

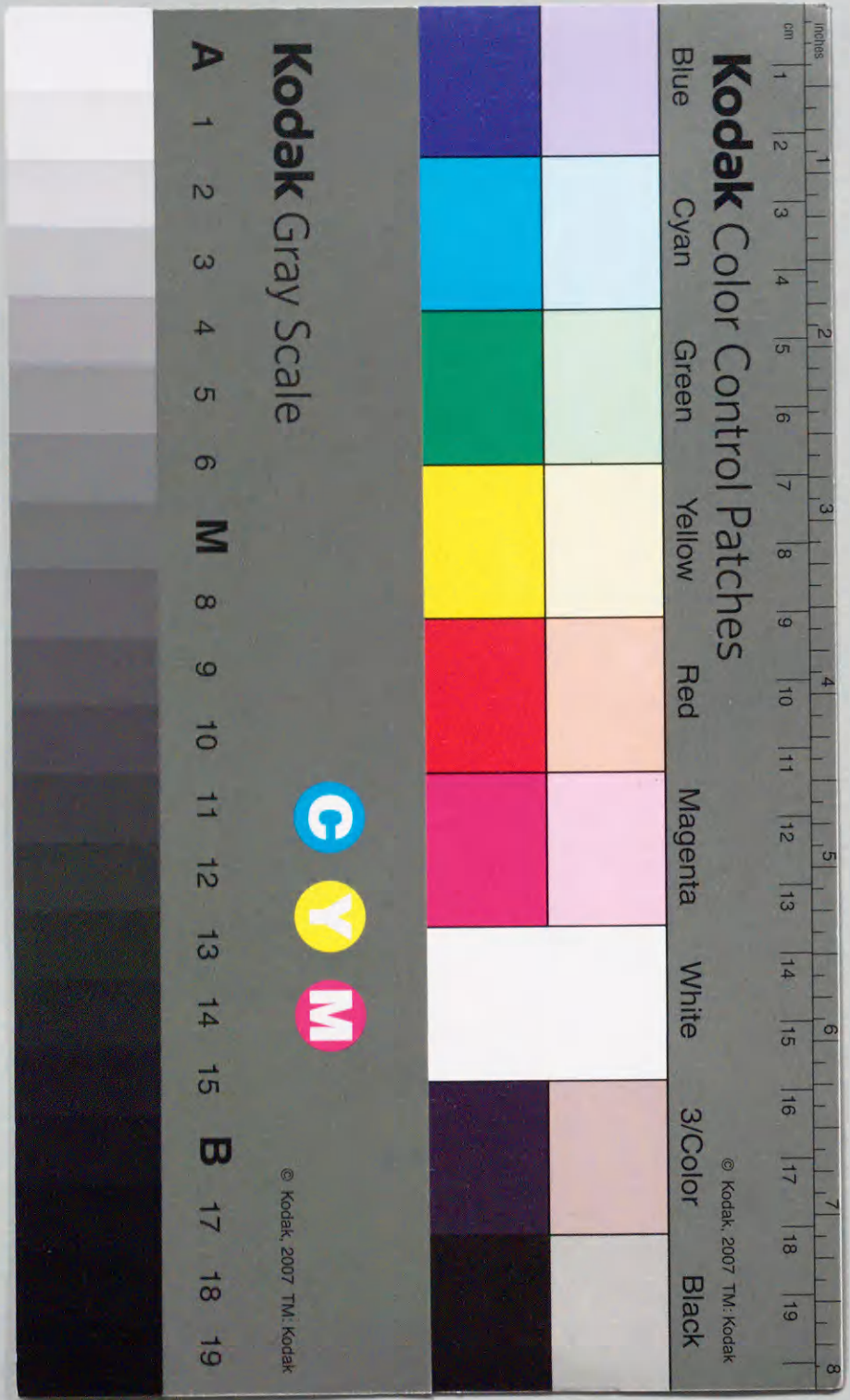
半剛接单層ラチスドームの  
座屈応力度とその耐力推定への  
応用に関する解析的研究

1996年1月

博士(工学)

庄村昌明

豊橋技術科学大学



半剛接単層ラチスドームの座屈応力度と  
その耐力推定への応用に関する解析的研究

半剛接単層ラチスドームの座屈応力度と  
その耐力推定への応用に関する解析的研究

1996年1月

博士(工学)

庄村昌明

豊橋技術科学大学

# 半剛接单層ラチスドームの座屈応力度と その耐力推定への応用に関する解析的研究

## 要 旨

単層ラチスドームの座屈挙動や座屈荷重は、接合部の曲げ剛性の影響を受けるため、その影響を考慮した研究が多く行われてきた。さらに、剛接合ドームに対しては、部材の座屈応力度曲線による座屈荷重の推定方法に関する研究も進められている。この座屈応力度による表現は、通常の鋼構造物の許容応力度設計法等で用いられているものと同様の手法であり、単層ラチスドームに対してもこの方法が適用可能であれば、ドームの耐力を簡易的に評価する上で有用となる。しかしながら、半剛接合された単層ラチスドームに対して、部材の座屈応力度曲線を用いたドームの座屈荷重の推定方法に関する研究は進められていない。

そこで、本論文は、半剛接单層ラチスドームを対象に、ドームの座屈に影響する要因をパラメータとして解析を進め、半剛接合ドームの座屈荷重を分析する。そして、部材の座屈応力度曲線を用いたドームの座屈荷重の評価方法の検討を行い、接合部の曲げ剛性を考慮したドームに対する座屈応力度曲線を提示する。また、この座屈応力度曲線を利用して、ドームを構成する部材断面の略算的な算定方法を示し、この略算法の有用性を議論する。本論文は、以下の6章で構成される。

第1章では、本研究の目的と位置付けを述べている。

第2章では、半剛接合を考慮した部材モデルと解析方法を説明している。

第3章では、半剛接单層ラチスドームを対象に、線形および弾塑性座屈解析を進め、ドームの座屈荷重の分析と、部材の座屈応力度曲線を用いた座屈荷重の推定方法を検討している。そして、ドームの座屈に寄与する部材で定義される正規化細長比を用いれば、ラチスドームの座屈荷重を座屈応力度曲線より簡易的に推定できることを示している。

第4章では、半剛接单層ラチスドームを対象に、線形、弾性、弾塑性座屈解析を進め、接合部の曲げ剛性がドームの座屈耐力に与える影響を検討している。また、半剛接合ドームに対してどのような部材の座屈応力度曲線が得られるかを調べ、剛接合ドームの座屈応力度曲線と比較・検討している。そして、接合部の曲げ剛性に応じて正規化細長比を修正して用いれば、剛接合ドームに対する座屈応力度曲線を利用して半剛接合ドーム

の座屈荷重を推定し得ることを示している。

第5章では、等分布荷重を受ける剛接合単層ラチスドームについて、第4章で示した部材の有効座屈長さと座屈応力度曲線を利用して、ドームを構成する部材断面を略算的に算定する方法を示している。この方法で仮定された、部材構成が一様でないドームに対して、線形および弾塑性座屈解析を実施し、どのような部材の座屈応力度曲線が得られるか、境界条件の影響を考慮して議論している。また、弾塑性座屈解析から得られるドームの耐力と断面算定荷重を比較し、本研究で示した断面の略算的な算定法の有用性を確認している。

第6章では、本論文で得られた結果を総括的に示している。

## Analytical Study on the Buckling Strength for Single Layer Reticular Dome with Semi-Rigid Joints and Its Application for Estimation of the Dome Buckling Strength

### ABSTRACT

The buckling of single layer reticular domes has been studied analytically and experimentally by many researchers considering the bending rigidity at joints of the dome. Furthermore, the estimation of the buckling strength for rigidly jointed reticular domes with hexagonal planform, based on the concept of beam-column strength curves, have been investigated. However, the estimation of the buckling strength for reticular domes considering the effect of joint rigidity have not been proposed. Then, the present paper discusses the effect of joint rigidity on buckling strength of single layer reticular domes with circular planform under vertical load and the estimation of buckling strength of the semi-rigid jointed domes, using the buckling strength curves of member in dome. And the simple calculation procedure of the member section of the dome, using the equivalent buckling length and the buckling strength curve, is investigated. This thesis consists of six chapters.

The first chapter is the introduction to the present study. The purpose of the researches is discussed with a review of the previous investigations.

The second chapter shows a formula for member buckling strength considering semi-rigid joint and a method of analysis.

The third chapter discusses a method to estimate the elasto-plastic buckling loads for single layer reticular domes on a circular plan under vertical load. First, the buckled member of a dome is determined by a distribution pattern of the strain energy which is calculated through eigenvalue analysis. Then normalized slenderness ratio of the member is derived considering the axial force at elastic buckling load. The axial buckling stress of the member at elasto-plastic buckling load is expressed as a function in terms of the normalized slenderness ratio. From the result, it is confirmed that the proposed procedure is effective for estimation of buckling load of domes.

The fourth chapter discusses the effects of the joint rigidity on the buckling strength of single layer reticular domes on a circular plan under vertical load. The effects are clarified mainly from the following view-points; (1) how the joint rigidity reduces the elastic buckling loads, (2) how the reduction can be interrelated to column strength curves in terms of the normalized slenderness ratio

for the member most relevant to the overall buckling of domes, (3) whether the column strength curves will resemble to those for beam-columns in tall buildings or those for continuum shells, or will not. The discussions conclude that (1) modification of the normalized slenderness ratio by reflecting the joint rigidity leads an almost same columns strength curve for rigidly jointed members and (2) the elasto-plastic buckling loads for domes with semi-rigid connections can be estimated by applying the modified slenderness ratio.

The fifth chapter discusses the simple calculation procedure of member section, using equivalent buckling length and buckling strength curves shown as in Chapter four, for single layer reticular domes on a circular plan with rigid joints. The domes are assumed under uniform vertical loading. Each member section of the dome is calculated by its axial force and bending moment. So the dome consists of members which is not of same section. The buckling strength of dome is investigated from the following view-point; (1) how the buckling stress curve can be obtained for the domes, (2) how the boundary condition of the dome, pin support and roller support, changes the buckling strength curve, (3) whether the design strength of the dome will correspond to the buckling strength of the dome calculated by elasto-plastic analysis. From the result, it is confirmed that the proposed procedure is effective for design of single layer domes.

The six chapter concludes the present study.

## 謝 辞

本論文をまとめるにあたり、終始懇切かつ適切な御指導・御鞭撻を頂きました豊橋技術科学大学教授・加藤史郎博士に心から感謝申し上げます。

本論文の査読・審査を通して、御指導・御助言を頂きました豊橋技術科学大学教授・栗林栄一博士、同大学教授・角徹三博士、同大学助教授・山田聖志博士に感謝申し上げます。

本論文の作成の機会と御支援を頂きました中日本建設コンサルタント株式会社・佐々木正久社長ならびに名川叡助常務取締役をはじめとする役員の方々に深く感謝申し上げます。また、論文作成の間、多大なる御支援・御協力を頂きました中日本建設コンサルタント株式会社・情報システム室・笠井豊室長をはじめとする情報システム室の方々に深く御礼を申し上げます。

本研究を進めるにあたり、有益な御指導・御助言を頂きました豊橋技術科学大学助手・高島英幸博士、岐阜工業高等専門学校助教授・武藤至先生、同学校講師・柴田良一博士、ならびに株式会社巴コーポレーション・植木隆司博士に厚く御礼を申し上げます。

著者が学生時代から、本研究やその他勉学の御指導を頂いた豊橋技術科学大学・加藤研究室の先輩、株式会社巴コーポレーション・向山洋一氏をはじめとする多くの方々に御礼を申し上げます。

## 目 次

### 1. 序論

1.1. 単層ラチスドームに関する既往の研究	1
1.2. 本研究の目的と位置付け	4
1.3. 本論文の構成と内容	5

### 2. 基礎理論

2.1. 半剛接合を考慮した部材モデルの定式化	7
2.1.1. 部材モデル	7
2.1.2. 弾塑性ばねの力学特性	7
2.1.3. 弾性部材の力学特性	8
2.1.4. 単材の基本式の誘導	10
2.2. 数値解析手法	13
2.2.1. 線形座屈解析	13
2.2.2. 弾性および弾塑性座屈解析	14

### 3. 半剛接单層ラチスドームの座屈荷重と部材座屈応力度曲線の分析

3.1. はじめに	18
3.2. 解析モデルと解析方法	19
3.2.1. ラチスドームの形状	19
3.2.2. ラチスドームを構成する部材	19
3.2.3. 境界条件	20
3.2.4. 荷重条件	20
3.2.5. 形状初期不整	20
3.2.6. 部材元たわみ	21
3.2.7. ドームの部材補強	21
3.2.8. 解析方法	21
3.3. 半剛接ドームの座屈荷重	23
3.3.1. ドームの線形座屈荷重, 弾塑性座屈荷重	23

3.3.2. 無次元化座屈荷重 $\eta$ の定義	23
3.3.3. $\xi$ と $\eta$ で表示された座屈荷重の分析	25
3.4. 半剛接ドームの座屈応力度	29
3.4.1. 特定部材の選び方と正規化細長比	29
3.4.2. 解析結果	31
3.4.3. 座屈荷重の推定	33
3.5. まとめ	36

### 4. 半剛接单層ラチスドームの座屈耐力ならびに耐力推定のための部材座屈応力度

4.1. はじめに	82
4.2. 解析モデルと解析方法	83
4.2.1. 単層ラチスドームの形状と境界条件	83
4.2.2. ドームを構成する部材	83
4.2.3. 接合部の曲げ剛性	84
4.2.4. 荷重条件	84
4.2.5. 形状初期不整	84
4.2.6. 解析方法	85
4.3. 解析結果および考察	86
4.3.1. 節点あたりの無次元化座屈荷重 $\eta$ の定義	86
4.3.2. $\xi$ , $\eta$ 表示された座屈荷重の分析	88
4.3.3. 接合部の無次元化回転ばね定数 $\kappa$ が弾性座屈荷重の低下に及ぼす影響 ; 正規化細長比による分析	90
4.4. 部材の座屈応力度による半剛接ドームの座屈荷重の分析	92
4.4.1. 弾性座屈応力度	92
4.4.2. 修正した正規化細長比による弾性座屈応力度の表現	92
4.4.3. 弾塑性座屈応力度	94
4.4.4. ドームの弾塑性座屈荷重の推定方法	94
4.5. まとめ	96



## 1.序論

---

### 1.1.単層ラチスドームに関する既往の研究

今日、日本は経済活動の盛んな国の1つであり、その経済発展に伴って、社会基盤などの整備を含めた多くの建造物の建設が要求されている。その中で、大空間建造物の需要も多くなっている。例えば、野球場・プール等の屋内運動施設や、飛行機の格納庫等の産業用施設である。これら施設の大空間を作り出す構造として、スペースフレーム構造が挙げられる。スペースフレームとは、線状の部材を立体的に構成させて力を伝達されるシステムである[1]。部材で組み立てられた単位要素を連続的につなぎ合わせることで、軽量化と量産化が可能となり、大スパンが実現できる。このスペースフレームの1つの構造形式として、本研究で対象とする単層ラチスドーム構造がある。

単層ラチスドームの利点として、(1)曲面構造にすることにより、シェルの(アーチ的)な効果が生まれ、少ない材料で大空間を実現できる、(2)三角形網目、あるいは、四角形網目の同一パターンでドームを構成するので、部材の規格化が可能となり、効率的な生産・建設が実現できる、(3)連続的な部材の構成となるので、構造的だけでなく、視覚的(景観的)にも優れている、ことが挙げられる。しかし、単層ラチスドームでは座屈が重要な問題となり、ドームを設計する上で、その座屈性状を把握することは必要不可欠である。その座屈形式には、シェルの性状に類似したドーム全体の座屈、ドーム内のある節点に生じる局部座屈、構成部材が座屈する個材座屈などがある。日置[2]はラチスドームの不安定現象を概説し、種々の分類方法によりドームの座屈現象を示しているが、座屈が生じるには多くの要因が影響するため、明確に座屈形式を分類することは困難である。ドームの座屈に影響する要因として、単層ラチスドームの幾何形状(平面形状やむくり度合い)、構成部材の接合条件、構成部材の細長比、境界条件、施工時に発生する形状初期不整や部材元たわみ、荷重条件などが挙げられる。

1963年にルーマニアのブカレストで直径90mを越える単層状のドームが積雪により



崩壊する事故が起き、これを機に、単層ラチスドームの研究が進められるようになった。この事故の原因を解明するため、Wright[3]は、ラチスドームを等価な連続体シェルに置換し、シェルの古典座屈式を用いてドームの座屈荷重を分析している。剛接合された単層ラチスドームは、その力学特性が連続体シェルに類似しているため、多くの研究者が同様にラチスドームと連続体シェルとの関連を調べている。Yamadaら[4]は、球殻状の剛接合単層ラチスドームを対象に、理論的な解として、等価な球殻シェルの弾性座屈耐力と、骨組解析による弾性座屈耐力を求め、実験による弾性座屈耐力と比較し、シェルらしさ係数を用いた剛接合ドームの弾性座屈耐力の推定についてを述べている。加藤、高島[5,6]は、六角形平面の剛接合単層ラチスドームについて、弾性ならびに弾塑性座屈挙動を分析し、連続体シェルの古典座屈荷重に対する荷重係数によるドームの座屈荷重の推定方法を検討している。Jung, Kwoon and Yamada[7]は、四角形網目で構成される剛接合単層ラチスドームについて、シェル近似による解析およびフレームモデルの解析による座屈耐力と、実験結果との比較を行い、ドームの弾性座屈耐力の分析を行っている。鈴木、小河ら[8]は、ランダムに発生させた形状初期不整を考慮して剛接合単層ラチスドームの弾性座屈荷重を分析している。

一方、接合部がピン接合されたラチスドームでは、剛接合ドームのようなシェルのな性状は見られず、局部的に節点が落ち込む座屈挙動が現れ、座屈形式はディンプル座屈が支配的となる。Lind[9]は、ピン接合された数スパンのドームを対象に弾性座屈荷重の推定方法を論じている。加藤、石川[10,11]は、六角形平面を有するピン接合単層ラチスドームを対象に、ドームの弾性および弾塑性座屈性状の分析と座屈荷重推定の検討を行っている。

しかしながら、ラチス構造物でしばしば用いられるボールジョイントやシステムトラスなどは、剛接合とピン接合の中間的な接合状態となる。これまでラチス構造物の接合状態に注目した研究が多く進められてきた。Forman and Huchinson[12]は、線形固有値解析による座屈荷重と等価な連続体シェルによる古典座屈荷重の比較を行い、接合部の回転剛性による座屈性状の変化を分析している。坂、日置[13]は、ボールジョイント接合の立体トラスについて、実験と解析によりその挙動を分析している。植木、加藤ら[14,15]は、矩形平面状の単層ラチスドームについて、接合部の曲げ剛性を変化させて、ドームの線形座屈荷重、弾性座屈荷重および弾塑性座屈荷重の分析を行い、ドームの座屈荷重の推定法を検討している。山田ら[16,17]は、円形平面状の単層ラチスドームを対象に、

接合部の曲げ剛性と荷重条件を考慮して、ドームの変形・応力ならびに弾性座屈耐力の分析を行っている。鈴木、小河ら[18]は、ボール接合された六角形平面の単層ラチスドームについて、剛域長を含む接合部特性を考慮した弾塑性解析を行い、載荷実験との比較・検討を行っている。Murakami[19]は、六角形平面状の単層ラチスドームを対象に、接合部の回転剛性を変化させて弾性座屈解析を進め、座屈モードならびに座屈荷重の分析を行っている。高島、柴田、加藤[20]は、ボールジョイントの力学性状の数値シミュレーション法を提示し、その適用性を実験結果と比較し検討している。植木ら[21]は、ボールジョイント接合部の載荷実験とその接合部を持つ単層ラチスドームの載荷実験を行い、接合部の曲げ剛性を考慮したドームの弾塑性座屈解析の結果と比較し、提案したモデルによる弾塑性解析法の有用性を示している。植木ら[22]は、3種類の接合部を設定し、それらの接合部を用いたそれぞれの単位六角形ドームについて載荷実験を行い、接合部が単位ドームの座屈挙動に与える影響を分析している。Fujimoto, Imai and Saka[23]は、ボールジョイント接合された円形平面状の単層ラチスドームを対象に、ドーム中央部分に鉛直荷重が作用する場合の載荷実験を行い、弾塑性解析結果と比較し、提案したモデルによる弾塑性解析法の有用性を示している。Yamashita and Kunieda[24]は、単層ラチスドームについて弾性座屈解析を進め、接合部の曲げ剛性が座屈荷重に与える影響を分析している。以上のように、接合部の影響を考慮した単層ラチスドームに関する実験的・解析的研究が多く進められ、そのラチスドームの座屈挙動や座屈耐力も把握されつつある。

ところで、通常の鋼構造物（ラーメン構造物等）の柱部材の設計では、部材の細長比を設定し、その細長比に対して圧縮強度を評価する方法[25,26,27]が用いられている。この手法は、部材の圧縮強度が簡便に求めることができるので、効率的な構造物の設計が可能である。個材の座屈だけでなく、種々の座屈性状が現れる単層ラチスドームに対しても、同様の手法に基づく研究が進められつつある。加藤、柴田ら[28,29,30]は、剛接合された六角形平面状の単層ラチスドームを対象に、線形座屈解析ならびに弾塑性座屈解析を進め、部材の座屈応力度曲線を用いた単層ラチスドームの座屈荷重の推定法を検討している。植木、加藤ら[31]は、偏平な折板状のラチスアーチを対象に、弾塑性座屈解析によりその座屈挙動を分析し、線形固有値解析による座屈耐力の推定方法について検討している。武藤、加藤[32]は、単層ラチスドームの座屈耐力と球殻の座屈実験結果を、細長比パラメータを用いて比較し分析を行っている。

このように、単層ラチスドームの静的荷重に対する座屈挙動や座屈荷重に関する資料となりうるデータが多く蓄積されつつある。日置、半谷、加藤、山田[2]や、Gioncu[33]により、これまでの単層ラチスドームに関する研究の現状と問題点について述べられている。

## 1.2. 本論文の目的と位置付け

単層ラチスドームの座屈挙動や座屈荷重は、接合部の曲げ剛性の影響を受けるため、前節で示したように、その影響を考慮して実験的・解析的な研究が多く行われ、その結果、ドームの座屈性状はかなり解明されてきた。しかし、座屈応力度曲線による半剛接合単層ラチスドームの座屈荷重の表現方法に関する研究はほとんど進められていない。この座屈応力度曲線による座屈荷重の表現方法は、一般の鋼構造物の許容応力度設計法や限界状態設計法で用いられており、半剛接合のラチスドームについてもこのような表現が可能であるならば、ラチスドームが一般の鋼構造物と同様の手法で設計が可能となる。

そこで、本論文では、半剛接合の単層ラチスドームを対象に、以下の検討を行う。まず、ドームの構成部材の中からドームの座屈に影響する部材を選定して、この部材の正規化細長比を定義する。そして、部材の座屈応力度曲線よりこの正規化細長比に対応する部材の圧縮強度を求め、その圧縮強度よりドームの座屈荷重を推定する方法を検討する。これらの議論は、線形座屈解析と弾塑性座屈解析に基づいて行う。

次に、ラチスドームの接合部の曲げ剛性に注目して、この曲げ剛性がドームの座屈荷重に与える影響を分析し、半剛接合ドームについてどのような座屈応力度曲線が得られるか検討する。そして、接合部の曲げ剛性に応じて正規化細長比を修正して用いれば、剛接合ドームに対する座屈応力度曲線を利用して、半剛接合ドームの座屈荷重が近似的に推定できることを示す。前節でも述べたように、剛接合単層ラチスドームの座屈耐力の評価に関する研究は多く進められ、加藤、柴田ら[28,29,30]も、剛接合単層ラチスドームに対する部材の座屈応力度曲線を示している。したがって、ボールジョイント接合等を用いた半剛接合単層ラチスドームについても、剛接合ドームと同様な曲線による表現が可能であれば、剛接合ドームの耐力評価に関する既往の研究の成果を利用して、ドームの座屈耐力を評価することができる。

ところで、これまでの単層ラチスドームに関する多くの研究は、ドームの構成部材を

一様断面として仮定されたものがほとんどであり、現実に建設されるであろう部材の構成と異なってくる。そのため、上述した部材の座屈応力度でドームの座屈荷重を評価する方法が、部材構成が一様でないドームに対して、どの程度有効であるか検討する必要がある。また、境界条件によりドームの座屈性状や座屈荷重が異なることを考慮すれば、周辺がピン支持またはローラー支持されたドームに対して、どのような座屈応力度曲線が得られるかを検討することも必要である。

したがって、前述の検討に続いて、以下の検討を行う。まず、上述の検討で得られた部材の座屈応力度曲線とドーム形状より定義される部材の有効座屈長さを利用して、ドームを構成する部材の断面を略算的に算定する方法を述べる。ここで、ドームの部材断面はそれぞれの部材の応力にほぼ対応するように仮定するため、ドームの部材構成は一様でなくなる。このドームに対して、線形座屈解析および弾塑性座屈解析を実施し、どのような座屈応力度曲線が得られるか、先に示す座屈応力度曲線と比較し検討する。また、周辺ピン支持と周辺ローラー支持の2種の境界条件のドームを設定し、境界条件により部材の座屈応力度曲線がどのように変化するかについても調べる。この検討は、単層ラチスドームに対する座屈応力度曲線による座屈耐力の評価だけでなく、この曲線を利用したドームの構成部材の略算的な断面算定方法も示し、半剛接合ドームを含めた単層ラチスドームの断面設計法に、得られた座屈応力度曲線が適用できることを示唆するものである。

以上のように、本論文で進めた種々の検討は、今後、単層ラチスドームの設計法を確立していく上で、重要な資料となり得ると考える。

## 1.3. 本論文の構成と内容

本論文では、半剛接合される単層ラチスドームを対象に、数値解析を用いて、ドームの座屈荷重ならびに座屈挙動の分析を進め、座屈応力度曲線によるドームの座屈耐力の評価方法を検討している。本論文は以下に示す6章で構成される。

第1章〔序論〕では、本論文で対象とした単層ラチスドームの研究の現状を述べ、本研究の目的と位置付けを説明している。

第2章〔基礎理論〕では、解析による検討で用いた半剛接部材モデルの定式化と数値解析手法の説明を行っている。部材のモデル化では、部材の降伏を考慮するため、部材

の両端および中央に弾塑性ばねを設けている。また、梁部材の定式化では、部材の弾性座屈が精度よく扱えるように、座屈たわみ角法を用いている。単層ラチスドームは、変形が進むにつれて、幾何学的非線形性が大きくなるので、幾何学的非線形性が扱える荷重増分法・変位増分法の増分形式に基づいた数値解析法を採用している。

第3章 [半剛接单層ラチスドームの座屈荷重と部材座屈応力度曲線の分析] では、スパンが 32m~35m 程度の円形平面状の半剛接单層ラチスドームを対象に、線形座屈解析と弾塑性座屈解析を進め、ドームの座屈荷重を分析する。そして、部材の座屈応力度に注目したドームの座屈荷重の推定方法を検討する。解析パラメータとして、部材両端の回転ばねの曲げ剛性、境界条件、ドーム頂部の部材半開角、構成部材の細長比、形状初期不整、荷重分布を考慮している。

第4章 [半剛接单層ラチスドームの座屈耐力ならびに耐力推定のための部材座屈応力度] では、比較的偏平な円形平面状の半剛接单層ラチスドームを対象に、線形座屈解析、弾性座屈解析、弾塑性座屈解析を進め、接合部の曲げ剛性が座屈荷重に与える影響を検討するとともに、剛接合ドームに対する部材の座屈応力度曲線を利用した半剛接单層ラチスドームの座屈荷重の評価方法を検討している。対象としたドームは、スパンが約 200m 程度のモデルと、スパンが約 50m のモデルであり、接合部の曲げ剛性、構成部材の細長比、形状初期不整、荷重条件を解析パラメータとしている。

第5章 [等分布鉛直荷重を受ける単層ラチスドームの断面算定方法の検討] では、第4章で得られた部材の有効座屈長さや座屈応力度曲線を利用して、等分布鉛直荷重を受けるドームの構成部材の断面を略算的に算定する方法を提案する。そして、同一断面ではなく、それぞれの部材の応力に対応した断面となる部材で構成されるドームについて、線形座屈解析と弾塑性座屈解析を進め、部材の座屈応力度曲線の適用性を検討する。また、弾塑性座屈解析から得られるドームの耐力と、座屈応力度曲線から推定した耐力を比較し、ここで示した断面の略算的算定法の有用性を検討する。対象としたドームはスパンが 150m 程度の剛接单層ラチスドームであり、境界条件はピン支持とローラー支持を検討している。

第6章 [結論] では、本研究で得られた結果をまとめ、総括的に結論を示す。

## 2. 基礎理論

### 2.1. 半剛接合を考慮した部材モデルの定式化

#### 2.1.1. 部材モデル

解析で用いる部材は図 2-1 に示すようにモデル化を行う。この部材モデルは、接合部を表す両端の剛域と弾性ばね、部材を表す弾性部材および部材の降伏を模擬するための 3 個の弾塑性ばねから構成される。なお、以下の説明では、部材モデルを弾性部材と区別するため、単材と表現している。

#### 2.1.2. 弾塑性ばねの力学特性

部材に用いるばねは、図 2-2 に示すような x 軸方向の伸び、y 軸回りの回転、z 軸回りの回転に抵抗する 3 つのばねを考える。ばねは軸力および曲げモーメントにより降伏し、降伏前は弾性ばね、降伏後は塑性ばねとなり、塑性状態では降伏曲面上を塑性流動すると仮定する。

##### 2.1.2.1. ばねの力学特性

ばねの応力は次のように表せる。

$$\{f_{ab}\} = [k_s] \{d_{ab}\} \quad (2-1)$$

ここで、 $[k_s]$  はばねの剛性マトリックス、 $\{f_{ab}\}$  はばねの応力ベクトル、 $\{d_{ab}\}$  はばねの変位ベクトルであり、 $\{f_{ab}\}$ 、 $\{d_{ab}\}$  は次のように表せる。

$$\{f_{ab}\} = \{n_a, q_{ya}, q_{za}, m_{xa}, m_{ya}, m_{za}, n_b, q_{yb}, q_{zb}, m_{xb}, m_{yb}, m_{zb}\}^T \quad (2-2)$$

$$\{d_{ab}\} = \{u_a, v_a, w_a, \theta_{xa}, \theta_{ya}, \theta_{za}, u_b, v_b, w_b, \theta_{xb}, \theta_{yb}, \theta_{zb}\}^T \quad (2-3)$$

### 2.1.2.2.弾塑性ばねの剛性マトリックス

#### 弾性ばねの剛性マトリックス

降伏前のばねの剛性マトリックスは次式で表せる。

$$[k_{el}] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta z} \\ -k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta z} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

#### 塑性ばねの剛性マトリックス

降伏後のばねの剛性マトリックスは次式で表せる。

$$[k_{pl}] = \begin{bmatrix} k_x - \frac{1}{h}a^2 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}ab & -\frac{1}{h}ac & -(k_x - \frac{1}{h}a^2) & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}ab & \frac{1}{h}ac \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2 & -\frac{1}{h}bc & \frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & -(k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2) & \frac{1}{h}bc \\ -\frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}bc & k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2 & \frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}bc & -(k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2) \\ -(k_x - \frac{1}{h}a^2) & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}ab & \frac{1}{h}ac & k_x - \frac{1}{h}a^2 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}ab & -\frac{1}{h}ac \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & -(k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2) & \frac{1}{h}bc & -\frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2 & -\frac{1}{h}bc \\ \frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}bc & -(k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2) & -\frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}bc & k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

$$a = k_x \phi_x, \quad b = k_{\theta y} \phi_y, \quad c = k_{\theta z} \phi_z, \quad h = k_x \phi_x^2 + k_{\theta y} \phi_y^2 + k_{\theta z} \phi_z^2 \quad (2-6)$$

ここで、 $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  は降伏関数  $f(n, m_y, m_z)$  の微分係数であり、

$$\phi_x = \frac{\partial f}{\partial n}, \quad \phi_y = \frac{\partial f}{\partial m_y}, \quad \phi_z = \frac{\partial f}{\partial m_z} \quad (2-7)$$

である。なお、弾塑性ばねの剛性マトリックスの詳細な説明は、APPENDIX.3 で述べている。

### 2.1.3.弾性部材の力学特性

弾性部材は、図 2-3 に示すような長さ  $l$  の梁部材 AB を考える。梁部材の定式化では、部材の弾性座屈を精度よく扱える座屈たわみ角法[34]を用いている。

### 2.1.3.1.弾性部材の力学特性

部材の応力-変位関係は次式となる。

$$\{f_{AB}\} = [K_L \pm \frac{P}{l}] \{d_{AB}\} + \{f_N\} \quad (2-8)$$

ここで、 $[K_L \pm \frac{P}{l}]$  は部材の剛性マトリックス、 $\{f_{AB}\}$  は部材端応力、 $\{d_{AB}\}$  は部材端変位、 $\{f_N\}$  は非線形性による軸力増分であり、それぞれ次のように表せる。

$$\{f_{AB}\} = \{N_a, Q_{ya}, Q_{za}, M_{xa}, M_{ya}, M_{za}, N_b, Q_{yb}, Q_{zb}, M_{xb}, M_{yb}, M_{zb}\}^T \quad (2-9)$$

$$\{d_{AB}\} = \{u_a, v_a, w_a, \theta_{xa}, \theta_{ya}, \theta_{za}, u_b, v_b, w_b, \theta_{xb}, \theta_{yb}, \theta_{zb}\}^T \quad (2-10)$$

$$\{f_N\} = \begin{Bmatrix} -EA \left( \frac{1}{2} \left( \frac{v_b - v_a}{l} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{w_b - w_a}{l} \right)^2 \right) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -EA \left( \frac{1}{2} \left( \frac{v_b - v_a}{l} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{w_b - w_a}{l} \right)^2 \right) \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2-11)$$

$$[K_L \pm \frac{P}{l}] = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \\ K_2^T & K_1 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

$$[K_1] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4EI_z(2A_z + B_z)}{l^3} - \frac{P}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z(2A_z + B_z)}{l^2} \\ 0 & 0 & \frac{4EI_y(2A_y + B_y)}{l^3} - \frac{P}{l} & 0 & -\frac{2EI_y(2A_y + B_y)}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{2EI_y(2A_y + B_y)}{l^2} & 0 & \frac{4EI_z A_z}{l} & 0 \\ 0 & \frac{2EI_z(2A_z + B_z)}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_y A_y}{l} \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$[K_2] = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4EI_z(2A_z+B_z)}{l^3} + \frac{P}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_z(2A_z+B_z)}{l^2} \\ 0 & 0 & -\frac{4EI_y(2A_y+B_y)}{l^3} + \frac{P}{l} & 0 & -\frac{2EI_y(2A_y+B_y)}{l^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2EI_y(2A_y+B_y)}{l^2} & 0 & \frac{2EI_zB_z}{l} & 0 \\ 0 & -\frac{2EI_z(2A_z+B_z)}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_yB_y}{l} \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

### 2.1.3.2. 増分形式による表現

弾性部材の応力-変位関係を増分形式で表すと、

$$\{f_{AB}(d + \Delta d)\} = [{}_tK_B]\{\Delta d_{AB}\} + \{f_{AB}\} \quad (2-15)$$

となる。ここで、 $[{}_tK_B]$ は部材の接線剛性マトリックス、 $\{\Delta d_{AB}\}$ は増分変位、 $\{f_{AB}(d + \Delta d)\}$ は変位が $\{d_{AB}\}$ から $\{\Delta d_{AB}\}$ だけ増分したときの部材端力である。この時、部材の剛性マトリックスは次のように線形部分の項と非線形部分の項に分離できる。

$$[{}_tK_B] = [K_L \pm \frac{P}{l}] + [K_N] \quad (2-16)$$

ここで、 $[K_L \pm \frac{P}{l}]$ は式(2-12)と同じマトリックス、 $[K_N]$ は次式で表される。

$$[K_N] = \frac{EA}{l} \begin{bmatrix} 0 & \frac{v_b - v_a}{l} & \frac{w_b - w_a}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_b - v_a}{l} & \frac{(v_b - v_a)^2}{l^2} & \frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & 0 & 0 & 0 & -\frac{v_b - v_a}{l} & -\frac{(v_b - v_a)^2}{l^2} & -\frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{w_b - w_a}{l} & \frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & \frac{(w_b - w_a)^2}{l^2} & 0 & 0 & 0 & -\frac{w_b - w_a}{l} & -\frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & -\frac{(w_b - w_a)^2}{l^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{v_b - v_a}{l} & -\frac{w_b - w_a}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{v_b - v_a}{l} & \frac{w_b - w_a}{l} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{v_b - v_a}{l} & -\frac{(v_b - v_a)^2}{l^2} & -\frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & 0 & 0 & 0 & \frac{v_b - v_a}{l} & \frac{(v_b - v_a)^2}{l^2} & \frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{w_b - w_a}{l} & \frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & -\frac{(w_b - w_a)^2}{l^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{w_b - w_a}{l} & \frac{v_b - v_a}{l} \frac{w_b - w_a}{l} & \frac{(w_b - w_a)^2}{l^2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2-17)$$

### 2.1.4. 単材の基本式の誘導

#### 2.1.4.1. 単材の基本式

ばね・弾性部材で構成される単材と外力の増分ポテンシャルエネルギーの和は0であ

るので、単材に関して次式を得る。

$$\delta \{d_1^T, d_b^T, d_c^T, d_d^T, d_e^T, d_f^T, d_g^T, d_2^T\} \begin{bmatrix} \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil \\ \lceil & k_{s1} & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil \\ \lceil & \lceil & k_{s2} & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil \\ \lceil & \lceil & \lceil & k_{b1} & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil \\ \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & k_{s3} & \lceil & \lceil & \lceil \\ \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & k_{b2} & \lceil & \lceil \\ \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & k_{s4} & \lceil \\ \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & k_{s5} \\ \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil & \lceil \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_b \\ d_c \\ d_d \\ d_e \\ d_f \\ d_g \\ d_2 \end{Bmatrix} - \delta \{d_1^T, d_2^T\} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2-18)$$

ここで、 $[k_{s1}]$ ,  $[k_{s2}]$ ,  $[k_{b1}]$ ,  $[k_{s3}]$ ,  $[k_{b2}]$ ,  $[k_{s4}]$ ,  $[k_{s5}]$ は図 2-1 で示すばねもしくは梁部の剛性マトリックスであり、 $d_i$ は*i*点の変位である。これを単材両端の節点 1, 2 と内部節点 *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g* に分離して表示すると、

$$\delta \{d_{12}^T, d_{bg}^T\} \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_{12} \\ d_{bg} \end{Bmatrix} - \delta \{d_{12}^T, d_{bg}^T\} \begin{Bmatrix} f_{12} \\ 0 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2-19)$$

となる。ここで、

$$\{d_{12}\}^T = \{d_1^T, d_2^T\} \quad (2-20)$$

$$\{d_{bg}\}^T = \{d_b^T, d_c^T, d_d^T, d_e^T, d_f^T, d_g^T\} \quad (2-21)$$

$$\{f_{12}\}^T = \{f_1^T, f_2^T\} \quad (2-22)$$

である。したがって、式(2-19)より、

$$[A]\{d_{12}\} + [B]\{d_{bg}\} = \{f_{12}\} \quad (2-23)$$

$$[B]^T \{d_{12}\} + [C]\{d_{bg}\} = \{0\} \quad (2-24)$$

が得られる。式(2-24)より、

$$\{d_{bg}\} = -[C]^{-1}[B]^T \{d_{12}\} \quad (2-25)$$

となり、これを式(2-23)に代入すると、次式を得る。

$$[A] - [B][C]^{-1}[B]^T \{d_{12}\} = \{f_{12}\} \quad (2-26)$$

よって、単材の剛性マトリックス $[K]$ を

$$[K] = [A] - [B][C]^{-1}[B]^T \quad (2-27)$$

とすれば、単材の応力・変位関係は次のようになる。

$$\{f_{12}\} = [K]\{d_{12}\} \quad (2-28)$$

なお、式の誘導の詳細な説明は、APPENDIX.2 で述べている。

### 2.1.4.2.増分形式による単材の基本式

式(2-19)で示した単材の応力・変位関係を、増分変位による形式で表すと、

$$\delta\{\Delta d_{12}^T, \Delta d_{bg}^T\} \begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d_{12} \\ \Delta d_{bg} \end{Bmatrix} + \delta\{\Delta d_{12}^T, \Delta d_{bg}^T\} \begin{Bmatrix} G_{12} \\ G_{bg} \end{Bmatrix} - \delta\{\Delta d_{12}^T, \Delta d_{bg}^T\} \begin{Bmatrix} f_{12} \\ 0 \end{Bmatrix} = 0 \quad (2-29)$$

となる。ここで、

$$\{\Delta d_{12}\}^T = \{\Delta d_1^T, \Delta d_2^T\} \quad (2-30)$$

$$\{\Delta d_{bg}\}^T = \{\Delta d_b^T, \Delta d_c^T, \Delta d_d^T, \Delta d_e^T, \Delta d_f^T, \Delta d_g^T\} \quad (2-31)$$

$$\{f_{12}\}^T = \{f_1^T, f_2^T\} \quad (2-32)$$

$$\{G_{12}\}^T = \{g_1^T, g_2^T\} \quad (2-33)$$

$$\{G_{bg}\}^T = \begin{Bmatrix} g_b + s_2 f_b \\ s_2 f_c + b f_c \\ b_1 f_d + s_3 f_d \\ s_3 f_e + b_2 f_e \\ b_2 f_e + s_4 f_f \\ s_4 f_g + g_g \end{Bmatrix} \quad (2-34)$$

である。なお、式(2-29)～式(2-34)の誘導等の詳細な説明は、APPENDIX.2 で述べている。式(2-29)を次の2式に分解する。

$$[A]\{\Delta d_{12}\} + [B]\{\Delta d_{bg}\} + \{G_{12}\} = \{f_{12}\} \quad (2-35)$$

$$[B]^T\{\Delta d_{12}\} + [C]\{\Delta d_{bg}\} + \{G_{bg}\} = \{0\} \quad (2-36)$$

式(2-36)より、

$$\{\Delta d_{bg}\} = -[C]^{-1}[B]^T\{\Delta d_{12}\} - [C]^{-1}\{G_{bg}\} \quad (2-37)$$

が得られる。これを、式(2-35)に代入すると、

$$[A] - [B][C]^{-1}[B]^T\{\Delta d_{12}\} + \{G_{12}\} - [B][C]^{-1}\{G_{bg}\} = \{f_{12}\} \quad (2-38)$$

となり、

$$[K] = [A] - [B][C]^{-1}[B]^T \quad (2-39)$$

$$\{F\} = \{G_{12}\} - [B][C]^{-1}\{G_{bg}\} \quad (2-40)$$

と置くと次式を得る。

$$[K]\{\Delta d_{12}\} + \{F\} = \{f_{12}\} \quad (2-41)$$

なお、単材の基本式の誘導の詳細な説明は、APPENDIX.2 で示している。

## 2.2.数値解析手法

本研究では、単層ラチスドームの座屈荷重や座屈挙動を分析するために、以下の解析を行っている。

- (a)線形座屈解析
- (b)弾性および弾塑性座屈解析

これらの解析手法について以下に述べる。

### 2.2.1.線形座屈解析

線形固有値解析は一般に座屈問題や自由振動問題に用いられる。通常、構造物の座屈問題で利用される線形固有値解析[35]は、構造物の線形剛性マトリクス $[K_L]$ と幾何剛性マトリクス $[K_G]$ より、

$$|[K_L] + \lambda_{cr}[K_G]| = 0 \quad (2-42)$$

で表せる固有値問題に帰着させ、座屈荷重と座屈モードを求める解析である。ここで、 $\lambda_{cr}$ は固有値であり、構造物の座屈荷重に相当する。しかしながら、本研究で用いた部材モデルは、座屈たわみ角法で定式化を行っているため、剛性マトリクス内に固有値に対応する軸力が陰の形で含まれている。そのため、式(2-42)を用いて固有値解析を行うことは不可能となる。本研究では、次のように固有値解析を行っている。

- (1)設定された基準荷重 $P_0$ に対して、座屈前変形を無視して各部材の軸力 $N_0$ を求める。
- (2)この軸力 $N_0$ を用いて、構造物の剛性マトリクス $[K(\lambda)]$ を作成する。ここで、 $\lambda$ は基準荷重に対する荷重係数であり、その $\lambda$ に対応する荷重と軸力はそれぞれ $P = \lambda \cdot P_0$ と $N = \lambda \cdot N_0$ で表せる。
- (3) $\lambda$ を順に大きくして、以下のように最小固有値 $\lambda_{cr}^{lin}$ を決定する。

$$|[K(\lambda_{cr}^{lin})]| = 0 \quad (2-43)$$

- (4)したがって、最小の線形座屈荷重 $P_{cr}^{lin}$ と対応する各部材の線形座屈軸力 $N_{cr}^{lin}$ は、次のように計算される。

$$P_{cr}^{lin} = \lambda_{cr}^{lin} \cdot P_0 \quad (2-44)$$

$$N_{cr}^{lin} = \lambda_{cr}^{lin} \cdot N_0 \quad (2-45)$$

## 2.2.2.弾性および弾塑性座屈解析

弾性座屈解析では幾何学的非線形性を、弾塑性座屈解析では幾何学的非線形性および材料学的非線形性を考慮する。数値解法は Newton-Rapshon 法に基づく手法であり、最大荷重直前までは荷重増分法、それ以降は変位増分法を用いる。

### 2.2.2.1.荷重増分法

荷重増分法は荷重をある量だけ増分させ、その増分量に対応する増分変位量を求め、これを繰り返し計算を行う方法である。図 2-4 のように、荷重係数  $\lambda_i$  とその時の変位  $d_i$  が既知であり、次のステップの荷重係数  $\lambda_{i+1}$  に対応する変位  $d_{i+1}$  は次式で計算できる。

$$[K_i]\{\Delta d\} = \{\Delta P\} \quad (2-46)$$

ここで、 $[K_i]$  はステップ  $i$  の接線剛性マトリックス、 $\{\Delta d\}$  は増分変位ベクトル、 $\{\Delta P\}$  は増分荷重ベクトルであり、

$$\{\Delta d\} = \{d_{i+1}\} - \{d_i\} \quad (2-47)$$

$$\{\Delta P\} = \{\lambda_{i+1} \cdot P_0\} - \{\lambda_i \cdot P_0\} \quad (2-48)$$

である。よって、

$$\{\Delta d\} = [K_i]^{-1} \{\Delta P\} \quad (2-49)$$

により、増分変位が計算でき、ステップ  $i+1$  の変位は

$$\{d_{i+1}\} = \{d_i\} + \{\Delta d\} \quad (2-50)$$

となる。しかし、最初に計算される変位  $\{d_{i+1}^{(1)}\}$  は近似値であるため、精解を求めるためには収束計算をしなければならない。収束計算は最初に求められた  $\{d_{i+1}^{(1)}\}$  を用いて、剛性マトリックスと不釣合力を計算し、これらを式(2-49)に代入することにより、新たな変位  $\{d_{i+1}^{(2)}\}$  が求められる。この操作を繰り返せば、近似値を精解に近づけることができる。

### 2.2.2.2.変位増分法

ある 1 つの節点に増分変位を与えると、その変位量に対応する増分荷重ベクトルを求める。そして、この増分荷重ベクトルを用いて、荷重増分法と同様の操作を行うと、構

造物の増分変位ベクトルが計算できる。以下に、変位増分法の基本式を示す。

$$\begin{bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d_0 \\ \Delta d \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} P \\ Q \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (2-51)$$

ここで、 $\Delta d_0$  は変位増分させる点における増分変位、 $\Delta d$  はその点以外の増分変位であり、それに対応した剛性マトリックス、荷重ベクトルを表示している。上式を分解すると、

$$[A]\{\Delta d_0\} + [B]\{\Delta d\} = \lambda\{P\} - \{f_1\} \quad (2-52)$$

$$[B]^T\{\Delta d_0\} + [C]\{\Delta d\} = \lambda\{Q\} - \{f_2\} \quad (2-53)$$

となる。式(2-53)より、

$$\{\Delta d\} = -[C]^{-1}[B]^T\{\Delta d_0\} + \lambda[C]^{-1}\{Q\} - [C]^{-1}\{f_2\} \quad (2-52)$$

上式を式(2-52)に代入すると、

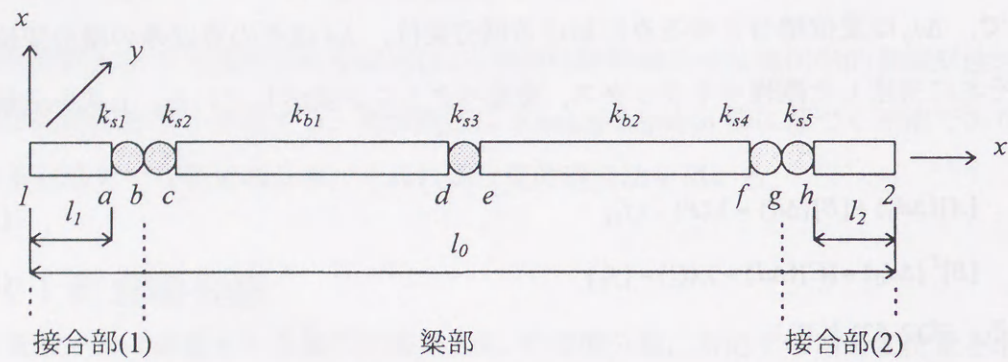
$$[A - BC^{-1}B^T]\{\Delta d_0\} = \lambda\{P - BC^{-1}Q\} - \{f_1 - BC^{-1}f_2\} \quad (2-55)$$

となり、 $\lambda$  は次のようになる。

$$\lambda = \frac{[A - BC^{-1}B^T]\{\Delta d_0\} + \{f_1 - BC^{-1}f_2\}}{\{P - BC^{-1}Q\}} \quad (2-56)$$

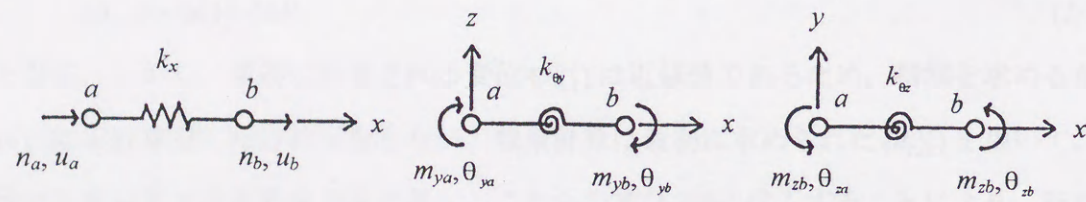
求められた荷重比  $\lambda$  を式(2-54)に代入すれば、増分変位ベクトル  $\{\Delta d\}$  が求められる。





接合部(1) : 剛域[l-a]+弾塑性ばね[a-b]  
 梁部 : 弾塑性ばね[b-c]+弾性部材[c-d]+弾塑性ばね[d-e]  
           +弾性部材[e-f]+弾塑性ばね[f-g]  
 接合部(2) : 弾塑性ばね[g-h]+剛域[h-2]  
 ※ただし、梁部にはねじりモーメントは生じないと仮定する。

図 2-1 半剛接合を考慮した部材モデル



※ばねはねじりモーメントを伝達しないと仮定する。

図 2-2 ばねの力学特性

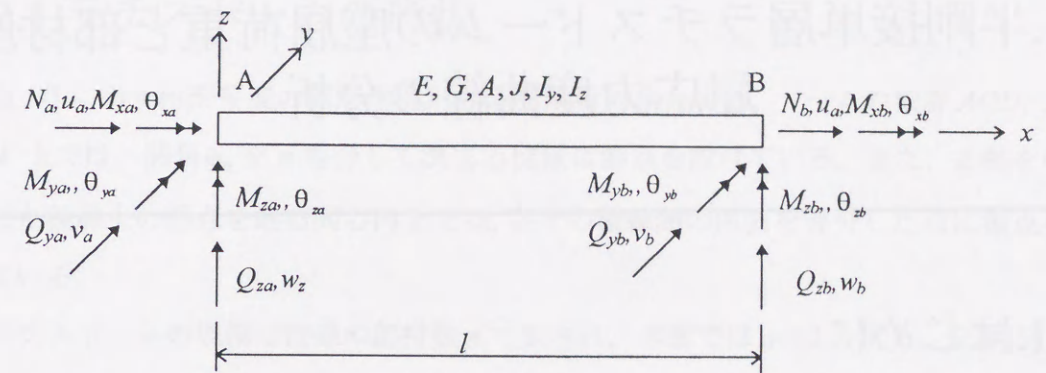


図 2-3 弾性部材の力学特性

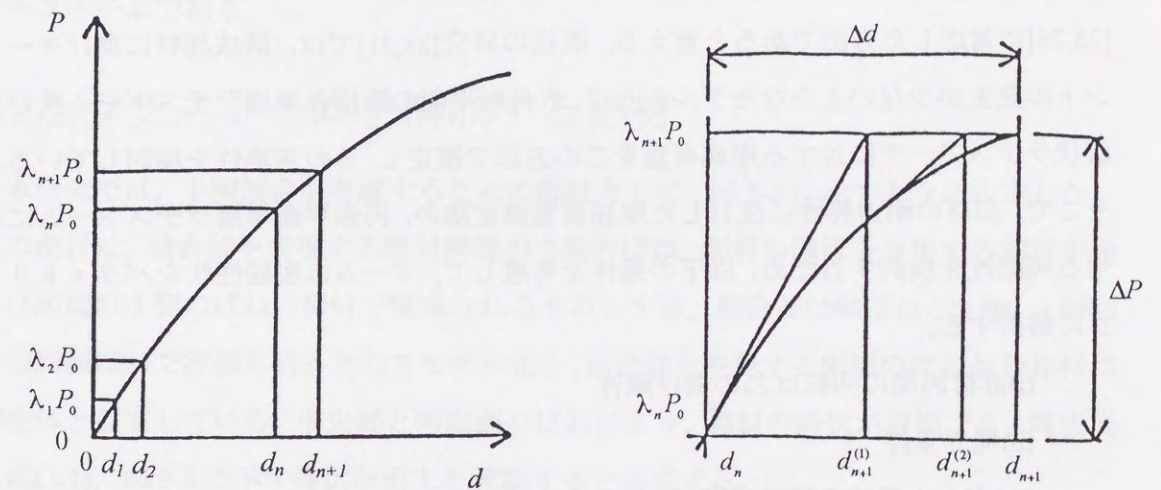


図 2-4 増分荷重と増分変位



### 3.半剛接单層ラチスドームの座屈荷重と部材座屈応力度曲線の分析

#### 3.1.はじめに

本章では、円形平面状の半剛接单層ラチスドームを対象として、ドームの座屈荷重の分析と、その座屈荷重の推定法を検討する。座屈荷重は $\eta$ と $\xi$ による表示[14,15]で分析を行う。また、座屈荷重の推定法の検討は、はじめにドームを構成する多数の部材の中で、ドームの耐力に最も大きな影響を与える部材を選定する。次に、この局所的な単一部材の耐力特性によって、単層ラチスドームの座屈荷重を推定する方法を議論する。これは、鋼構造物の柱部材の設計における、部材の細長比により圧縮強度を評価する手法[25,26]に対応した方法であると言える。既往の研究[28,31]では、構成部材に曲げモーメントの発生が少ないようなモデルとして、六角形平面の剛接单層ラチスドーム及び折板状ラチスアーチに対する座屈荷重をこの方法で推定し、その可能性を検討している。そこで、部材の耐力特性に注目した座屈荷重推定法の、円形平面単層ラチスドームに対する可能性を検討するため、以下の条件を考慮して、ドームの座屈性状をパラメトリックに解析する。

- (i)部材両端の回転ばねの曲げ剛性
- (ii)境界条件
- (iii)ドーム頂部の部材半開角
- (iv)ドームを構成する部材の細長比
- (v)形状初期不整
- (vi)荷重分布

### 3.2.解析モデルと解析方法

#### 3.2.1.ラチスドームの形状

図3-1に示す円形平面の球形単層ドームを解析対象とする。ドームの稜線AOD, BOE, COF上では、開角 $\phi_0$ を $n$ 等分して決まる位置に節点を設けている。また、Z軸を中心とした稜線上の節点を通る同心円上では、各々の稜線間の円弧を等分した点に節点を設けている。

ラチスドームの規模は稜線の部材数 $n$ で表され、本章では $n=12$ とする。文献[5]では、 $n=4\sim 12$ に対してほぼ同様な傾向を持つ座屈性状が得られている。ただし、より一般的な結論を得るには、この $n$ が本章で示す推定法に及ぼす影響をさらに検討する必要がある。

ラチスドームのむくりの度合を表す部材半開角 $\theta_0$ は2度、3度、4度について検討する。また、稜線の部材長 $l_0$ は300cmとなるように決められ、ラチスドームのスパン $L$ 、中央部の高さ $H$ 、ドームの曲率半径 $R$ は表3-1のようになる。これらは、比較的偏平なラチスドームである。

#### 3.2.2.ラチスドームを構成する部材

本研究では、半剛接合を考慮するための部材として、図3-2に示すように設定した。この部材は、接合部を表現する部材両端の2個のばね、部材の降伏を表現する部材中央及び両端の3個のばね、棒材で構成されるものとする。接合部は軸ばねと $y$ 軸、 $z$ 軸回りの回転ばねで評価し得るとしてモデル化し、接合部を表現する両端のばね及び棒材は弾性体と仮定している。中央部と両端部のばねにより、棒材の降伏が評価でき、降伏後は式(3-1)、図3-3で示す降伏曲面上を流動すると仮定する。

$$f = \left(\frac{N}{N_y}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{M_y}{M_p}\right)^2 + \left(\frac{M_z}{M_p}\right)^2} = 1 \quad (3-1)$$

ここで、 $N$ はばねの軸力、 $M_y$ 、 $M_z$ はばねの $y$ 、 $z$ 軸回りの曲げモーメント、 $N_y$ は部材の降伏軸力、 $M_p$ は部材の $y$ 、 $z$ 軸回りの全塑性モーメントである。なお、部材の降伏を表現するための3個のばねの剛性は、十分に大きいものと仮定している。ラチスドームに用いる部材は原則として同一断面とし、部材の細長比 $\lambda_0$ の影響を比較するため、4種類

の鋼管を設定した。それらの諸元を表 3-2 に示す。部材の降伏耐力は鋼管の耐力で定め、解析では鋼管の降伏応力度  $\sigma_y = 2.4 \text{tf/cm}^2$  で設定した。接合部の特性を表す回転ばねは  $y$  軸回りのばねと  $z$  軸回りのばねは同一のばね定数  $K_B$  と仮定し、式(3-2)で示す無次元化回転ばね定数  $\kappa$  を用いて表現する。

$$\kappa = K_B \frac{l_0}{EI_p} \quad (3-2)$$

ここで、 $EI_p$  は鋼管の曲げ剛性、 $l_0$  は部材長である。本解析では、 $\kappa = 0.01, 1.0, 4.0, 1000$  の 4 種類に対してその影響を調べた。ただし、接合部の軸方向のばね剛性  $K_x$  は部材の伸び剛性  $EA/l_0$  の 1000 倍に設定した。また、部材のねじり剛性は無いものとした。

### 3.2.3.境界条件

ここでは 2 種の境界条件として、図 3-4 に示す(a)周辺ピン支持、(b)周辺ローラー支持を採用した。図 3-4(a)に示す周辺ピン支持は、境界上の節点変位をすべて拘束し、回転を自由にしたものである。図 3-4(b)に示す周辺ローラー支持は、境界上の節点について、鉛直方向の変位を拘束し、 $X$ - $Y$  平面上を自由に移動できるものである。なお、稜線上の点  $A, B, C, D, E, F$  については放射上のみ移動可能としたものである。また、ローラー支持のドームでは周辺のリング部(図 3-8)を構成する部材に、きわめて大きな引張応力が発生する可能性がある。そのため、このリング部の部材の断面積、断面二次モーメント、耐力は他の部材の 6 倍として解析を行なっている。

### 3.2.4.荷重条件

ラチスドームの耐力は、作用する荷重形態に大きな影響を受けるため、通常、設計では幾つかの荷重形態に対して検討が行われる。本章では、自重あるいは積雪の荷重を想定し、図 3-5 に示す鉛直方向に作用する(a)等分布状の節点荷重と(b)片偏載状の節点荷重の 2 種について検討した。なお、片偏載荷重の比率は 1:3 に設定した。

### 3.2.5.形状初期不整

単層ラチスドームの座屈耐力は形状初期不整に対し敏感であると考えられるため、形状初期不整を有するドームについても検討した。

図 3-6 に示すように、形状初期不整はラチスドームの任意の 1 節点に、ドーム曲率の

中心方向に与えるものとした。その初期不整量  $w_i$  は、ドームを構成する部材の断面二次半径  $i (= \sqrt{I_p/A})$  に対する比を用いて決定した。また、初期不整はラチスドームの座屈に最も影響すると思われる節点に与えた。今回、初期不整量を  $w_i = 0.35i$  とし、形状初期不整を持つ節点は、完全形状時の弾塑性座屈解析の結果より判断し、節点 G(図 3-1)とした。

### 3.2.6.部材元たわみ

ラチスドームの構成部材には、施工時に元たわみが生じる可能性があるため、そのドームの座屈荷重に対する影響を調べた。元たわみ量として、鉄骨精度検査基準[36]で示されている許容範囲量である部材長さの 1/1000 を設定し、図 3-7 で示すように部材の中央部に元たわみ量  $w_e$  を与える。元たわみを与える部材は、完全形状ドームでの弾塑性座屈解析結果より定め、本研究では部材 8(図 3-1)に部材元たわみを与えた。

### 3.2.7.ドームの部材補強

後述するように、周辺ピン支持された円形平面上のドームでは、ドームの稜線部材が座屈しやすいため、設計では稜線部材を補強することが考えられる。そこで、周辺ピン支持ドームについて、稜線部材の断面積、断面二次モーメント、部材の降伏耐力を他の部材の 1.2 倍とした検討を行った。

また、ローラー支持のドームでは、境界付近の部材に大きな応力が生じることが多い。そのため、それらの部材の耐力を上げることにより、ラチスドーム全体の耐力を高めることが考えられる。そこで、図 3-8 に示すように、ドームを内部部材と外部部材に分け、外部部材の断面積、断面二次モーメント、降伏耐力を内部部材の 1.2 倍とした検討を行った。

### 3.2.8.解析方法

本研究では、座屈前変形を無視した線形固有値解析(以下、線形座屈解析)、ならびに材料・幾何学的非線形性を考慮した座屈解析(以下、弾塑性座屈解析)を行った。これらの解析方法は第 2 章で述べているので、詳細な説明は省略する。線形座屈解析は、主としてラチスドームを構成する部材の中でドームの座屈に深く関連すると思われる部材を選定するために用いた。弾塑性座屈解析は、この注目する特定の部材の圧縮強度を推

定するために用い、最大荷重直前までを荷重増分法、それ以降を変位増分法としている。  
 なお、線形座屈解析においては、図 3-1 に示すドーム全体を解析対象とした。一方、弾  
 塑性座屈解析については、多くのパラメータの下で効率よく解析を進めるため、数値解  
 析上ドームの対称性を仮定し、全体の 1/2 モデルを用いた。

### 3.3. 半剛接ドームの座屈荷重

#### 3.3.1. ドームの線形座屈荷重、弾塑性座屈荷重

ドームの線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ 、弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$  を表 3-3～表 3-8 に示す。表 3-3 は周  
 辺ピン支持、等分布荷重の場合、表 3-4 は周辺ピン支持、片偏載荷重の場合、表 3-5 は  
 周辺ピン支持、等分布荷重、稜線部材補強の場合、表 3-6 は周辺ローラー支持、等分布  
 荷重の場合、表 3-7 は周辺ローラー支持、片偏載荷重の場合、表 3-8 は周辺ローラー支  
 持、等分布荷重、外部部材補強の場合である。なお、表 3-3 と表 3-6 では、形状初期不  
 整を有するドームの弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}(i)$  と、部材元たわみを有するドームの弾塑性座  
 屈荷重  $P_{cr}^{pl}(e)$  を示してある。

#### 3.3.2. 無次元化座屈荷重 $\eta$ の定義

図 3-9～図 3-14 は、これらの座屈荷重を式(3-3)、(3-4)で定義される無次元量[14,15]  
 で表示したものである。

$$\xi = \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0 \theta_0 \sqrt{1+2/\kappa}} \quad (3-3)$$

$$\eta = \frac{P_{cr}}{EA_p \theta_0^3} \quad (3-4)$$

剛接合ドームの連続体置換法によるシェルとしての節点あたりの古典座屈荷重  $P_{cl0}$  [37]  
 は式(3-5)で表される。

$$\begin{aligned} P_{cl0} &= \frac{2E_e}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \times \left(\frac{t_e}{R}\right)^2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} l_0^2 \\ &= \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0} EA \theta_0^2 \end{aligned} \quad (3-5)$$

ここで、

$$E_e = \frac{EA}{3l_0 \gamma_0} \quad (3-6)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{\frac{I_p}{A}} \quad (3-7)$$

$$t_e = 2\sqrt{3} \cdot \gamma_0 \quad (3-8)$$

$$\nu = 1/3 \quad (3-9)$$

であり、 $E_e$ は等価ヤング係数、 $\gamma_0$ は断面二次半径、 $t_e$ は等価シェル厚、 $\nu$ はポアソン比である。また、部材両端の曲げ剛性 $\kappa$ を考慮した半剛接合ドームの連続体置換によるシェルとしての節点あたりの古典座屈荷重 $P_{cl0}^{lin}(\kappa)$ は式(3-10)で表される。

$$\begin{aligned} P_{cl0}^{lin}(\kappa) &= \frac{2E_e}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \times \left(\frac{t_e}{R}\right)^2 \times \frac{\sqrt{3}}{2} I_0^2 \\ &= \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0 \theta_0 \sqrt{1+2/\kappa}} EA \theta_0^3 \end{aligned} \quad (3-10)$$

ここで、

$$E_e = \frac{EA}{3I_0 \gamma_e} \quad (3-11)$$

$$\gamma_e = \sqrt{\frac{I_e}{A}} \quad (3-12)$$

$$t_e = 2\sqrt{3} \cdot \gamma_e \quad (3-13)$$

$$I_e = I_p / (1+2/\kappa) \quad (3-14)$$

であり、 $\gamma_e$ は等価断面二次半径、 $I_e$ は等価断面二次モーメントである。ここで、図3-9で示す $\eta = \xi$ の直線は、ドームを連続体シェルに置換した場合の古典座屈荷重に相当する。

ピン接合されたドームの線形座屈荷重 $P_{cr}^{pin}$ は、個材の座屈を無視した場合、 $EA\theta_0^3$ にほぼ比例する[10,12]。よって、部材両端の曲げ剛性がピン接合に近づくと、 $P_{cr}^{pin} / EA\theta_0^3$ はある値に漸近する。ここで、図中の $\eta^P$ を次のように表す。

$$\eta^P = \frac{P_{cr}^{pin}}{EA\theta_0^3} \quad (3-15)$$

本研究で対象とした円形平面状の単層ラチスドームでは、ほぼ $\eta^P = 2.5$ となった。この $\eta^P$ はドームの平面形状により異なり、矩形平面ではほぼ $\eta^P = 2.0$ となる[14]。

また、図中の $\eta^E$ 、 $\eta^Y$ は、部材の弾性座屈および部材の降伏によるドームの座屈荷重の近似値であり、以下のような考え方で求めたものである。単位六角形のドームの頂点

に鉛直下方の荷重 $P$ が作用する場合を想定する。座屈前の変形を無視し、また、部材の弾性座屈軸力が部材長さを座屈長とする弾性部材座屈軸力 $N_{cr0}^{lin}$

$$N_{cr0}^{lin} = \frac{\pi^2 EI_p}{l_0^2} \quad (3-16)$$

で近似しうると仮定すれば、部材の座屈で決定される単位ドームの弾性座屈荷重 $\bar{P}^E$ は、次式となる。

$$\bar{P}^E = 6\theta_0 N_{cr0}^{lin} \quad (3-17)$$

同様の考えから、部材が降伏した場合の座屈荷重 $\bar{P}^Y$ は、

$$\bar{P}^Y = 6\theta_0 A_p \sigma_y \quad (3-18)$$

となる。 $EA_p \theta_0^3$ で $\bar{P}^E$ 、 $\bar{P}^Y$ を除せば、次式が得られる。

$$\bar{\eta}^E = \frac{\pi^2}{48} \xi_0^2, \quad \xi_0 = \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0 \theta_0} \quad (3-19)$$

$$\bar{\eta}^Y = \frac{6\sigma_y}{E\theta_0^2} \quad (3-20)$$

しかしながら、本論文で対象とする単層ラチスドームでは、軸力分布は一様とはならないので、この影響を考慮する必要がある。 $N'_0$ を単位六角形ドームの頂点に荷重 $P_0$ が作用した場合の部材の圧縮軸力、 $N''_0$ をドームの各節点に等分布状に $P_0$ が作用した場合のドーム内での圧縮軸力の最大値とする。ここで、 $N''_0$ に対する $N'_0$ の比を次のように表す。

$$\beta_0 = N'_0 / N''_0 \quad (3-21)$$

本研究で扱うドームでは、 $\beta_0 = 0.7$ 程度となる。座屈前変形を無視すれば、部材の弾性座屈あるいは降伏でドームが耐力に至る荷重は、次式で近似的に推定できる。

$$\eta^E = \beta_0 \cdot \frac{\pi^2}{48} \xi_0^2 \quad (3-22)$$

$$\eta^Y = \beta_0 \cdot \frac{6\sigma_y}{E\theta_0^2} \quad (3-23)$$

### 3.3.3. $\xi$ と $\eta$ で表示された座屈荷重の分析

#### (1) ピン支持ドーム、等分布荷重

図3-9(a)~(d)、図3-10(a)~(d)、図3-11(a)~(d)は、等分布荷重を受けるピン支持ドーム

ムの  $\eta$  と  $\xi$  の関係を示しており、それぞれ、 $\theta_0=2.0^\circ$ 、 $3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  の結果である。各図の(a)は線形座屈荷重、(b)、(c)、(d)は、それぞれ、完全形状ドーム、形状初期不整を有するドーム、部材元たわみを有するドームの弾塑性座屈荷重である。

線形座屈荷重は、個材の座屈が生じない場合、 $\xi < 2.5$  では  $\eta = \eta^P$ 、 $\xi > 2.5$  では  $\eta = \xi$  の付近に分布しており、線形座屈荷重はこの2直線で表現できることがわかる。ただし、 $\theta_0=2.0^\circ$  では  $\phi 60$  ( $\triangle$ 印) の部材の場合、 $\theta_0=3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  では  $\phi 89$ 、 $\phi 60$  ( $\diamond$ 、 $\triangle$ 印) の部材の場合、個材の弾性座屈が生じるため、先の2直線よりも小さな値となっている。

$\theta_0=2.0^\circ$  の完全形状ドームの弾塑性座屈荷重は、 $\xi < 2.5$  では  $\eta = 0.7\eta^P$ 、 $2.5 < \xi < 5.5$  では  $\eta = 0.7\xi$ 、 $\xi > 5.5$  では  $\eta = 0.7\eta^Y$  のそれぞれの直線付近で分布している。部材元たわみがあるドームの弾塑性座屈荷重はほぼ完全形状ドームと同様の分布となっているが、形状初期不整があるドームの弾塑性座屈荷重は、完全形状ドームの荷重に対して6~9割程度に低下している。

$\theta_0=3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  の弾塑性座屈荷重は、ほとんどのケースで部材の降伏によりドームの耐力が決まるため、部材が弾性座屈する  $\phi 60$  ( $\triangle$ 印) を除き、ほぼ  $\eta = 0.7\eta^Y$  の直線付近に分布する。

#### (2) ピン支持ドーム、片偏載荷重

図3-9(e)、(f)、図3-10(e)、(f)、図3-11(e)、(f)は、片偏載荷重を受けるピン支持ドームの  $\eta$  と  $\xi$  の関係であり、それぞれ、 $\theta_0=2.0^\circ$ 、 $3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  の結果である。また、各図の(e)は線形座屈荷重、(f)は弾塑性座屈荷重を表す。

線形座屈荷重は、等分布荷重を受けるドームの線形座屈荷重よりも多少低い値となるが、部材の細長比が大きい場合 ( $\theta_0=2.0^\circ$  のドームでは  $\phi 60$ 、 $\theta_0=3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  のドームでは  $\phi 89$ 、 $\phi 60$ ) を除き、 $\xi < 2.5$  では  $\eta = \eta^P$ 、 $\xi > 2.5$  では  $\eta = \xi$  の直線に沿った分布形となる。しかし、部材の細長比が大きい場合の線形座屈荷重は、等分布荷重を受けるドームの値よりも大きく下回る。

弾塑性座屈荷重は、等分布荷重を受けるドームの座屈荷重と同様の分布形となるが、その値は等分布荷重のドームよりも低い値となる。

#### (3) ピン支持ドーム、稜線部材補強

図3-9(g)、(h)、図3-10(g)、(h)、図3-11(g)、(h)は、稜線部材を補強したピン支持ドームが等分布荷重を受ける場合の  $\eta$  と  $\xi$  の関係であり、それぞれ、 $\theta_0=2.0^\circ$ 、 $3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$

の結果である。また、各図の(g)は線形座屈荷重、(h)は弾塑性座屈荷重を表す。

稜線部材を補強した場合、線形座屈荷重は、稜線部材を補強しない場合のドームとほぼ同じ分布となるが、弾塑性座屈荷重は、稜線部材を補強しないドームよりも1割程度値が大きくなっており、稜線部材を補強することによりピン支持ドームの耐力が上がるのがわかる。

#### (4) ローラー支持ドーム、等分布荷重

図3-12(a)~(d)、図3-13(a)~(d)、図3-14(a)~(d)は、等分布荷重を受けるローラー支持ドームの  $\eta$  と  $\xi$  の関係を示しており、 $\theta_0=2.0^\circ$ 、 $3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  の結果である。各図の(a)は線形座屈荷重、(b)、(c)、(d)は、それぞれ、完全形状ドーム、形状初期不整を有するドーム、部材元たわみを有するドームの弾塑性座屈荷重である。

線形座屈荷重は、個材の座屈が生じない場合、 $\xi < 2.5$  では  $\eta = \eta^P$ 、 $\xi > 2.5$  では  $\eta = \xi$  の付近に分布しており、線形座屈荷重はこの2直線で表現できることがわかる。ただし、 $\theta_0=2.0^\circ$  では  $\phi 60$  ( $\triangle$ 印) の部材の場合、 $\theta_0=3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  では  $\phi 89$ 、 $\phi 60$  ( $\diamond$ 、 $\triangle$ 印) の部材の場合で個材の座屈が生じるため、先の2直線よりも小さな値となっている。また、これらローラー支持の線形座屈荷重は、ピン支持の場合とほぼ同じ分布形となっている。

$\theta_0=2.0^\circ$  の完全形状ドームの弾塑性座屈荷重は、 $\xi < 2.5$  では  $\eta = 0.5\eta^P$ 、 $2.5 < \xi < 5.5$  では  $\eta = 0.5\xi$ 、 $\xi > 5.5$  では  $\eta = 0.5\eta^Y$  のそれぞれの直線付近で分布している。部材元たわみがあるドームの弾塑性座屈荷重はほぼ完全形状ドームと同様の分布となっているが、形状初期不整があるドームの弾塑性座屈荷重は、完全形状ドームの荷重に対して6~9割程度に低下している。

$\theta_0=3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  の弾塑性座屈荷重は、ほとんどのケースで部材の降伏によりドームの耐力が決まるため、部材が弾性座屈する  $\phi 60$  ( $\triangle$ 印) を除き、ほぼ  $\eta = 0.5\eta^Y$  の直線付近に分布する。

#### (5) ローラー支持ドーム、片偏載荷重

図3-12(e)、(f)、図3-13(e)、(f)、図3-14(e)、(f)は、片偏載荷重を受けるローラー支持ドームの  $\eta$ 、 $\xi$  関係であり、それぞれ、 $\theta_0=2.0^\circ$ 、 $3.0^\circ$ 、 $4.0^\circ$  の結果である。また、各図の(e)は線形座屈荷重、(f)は弾塑性座屈荷重を表す。

線形座屈荷重は、部材の細長比が大きい場合 ( $\theta_0=2.0^\circ$  のドームでは  $\phi 60$ 、 $\theta_0=3.0^\circ$ 、

4.0°のドームではφ 89, φ 60)を除き,  $\xi < 2.5$ では $\eta = \eta^P$ ,  $\xi > 2.5$ では $\eta = \xi$ の直線に沿った分布形とり, 等分布荷重時の結果とほぼ同じである。しかし, 部材の細長比が大きい場合の線形座屈荷重は, 等分布荷重を受けるドームの値よりも低い値となる。

弾塑性座屈荷重は, 等分布荷重を受けるドームの座屈荷重とほぼ同様の分布形となっている。

#### (6) ローラー支持ドーム, 外部部材補強

図 3-12(g), (h), 図 3-13(g), (h), 図 3-14(g), (h)は, 外部部材を補強したローラー支持ドームが等分布荷重を受ける場合の $\eta$ と $\xi$ の関係であり, それぞれ,  $\theta_0 = 2.0^\circ, 3.0^\circ, 4.0^\circ$ の結果である。また, 各図の(g)は線形座屈荷重, (h)は弾塑性座屈荷重を表す。

外部部材を補強した場合, 線形座屈荷重は, 外部部材を補強しない場合のドームとほぼ同じ分布となるが, 弾塑性座屈荷重は, 外部部材を補強しないドームよりも1割程度値が大きくなっており, 外部部材を補強することによりローラー支持ドームの耐力が高まることわかる。

## 3.4. 半剛接ドームの座屈応力度

### 3.4.1. 特定部材の選び方と正規化細長比

#### (1) 特定部材の選び方

本研究では, 特定の部材の座屈強度によりラチスドームの座屈荷重を推定するため, ラチスドームの座屈に最も影響を及ぼす部材を決定しなければならない。この場合, 指標となる値としては, 構成部材の応力, 変形, 座屈モードに対するひずみエネルギー等が考えられる。この中で本研究では, 原則として座屈性状をエネルギーとして表現する指標として歪エネルギーを採用する[38,39]。ただし, 後述のように, ローラー支持のドームでは周辺部に軸力が極めて大きくなる部材があるため, 歪エネルギーに加えて, 軸力の大小も特定部材の判定に用いる。

歪エネルギーは線形座屈解析から求められるものであり, 最小座屈荷重を与える座屈モードと部材の剛性マトリクスにより計算される。この解析手法は, 構造物の座屈特性を調べるために一般に使われる手法である。よって, これにより得られる値を指標とすることは, 簡便な座屈荷重推定法を考える上で有効であると思われる。

線形座屈解析結果の例を図 3-15 に示す。この図は, 最小座屈荷重を与えるモードと, それによる歪エネルギーの密度分布を示している。ただし, 座屈モードは節点の変位のみで回転のモードは表示されていない。また, 歪エネルギーは単位体積に保存される歪エネルギーを考えるため密度で表示しており, 各部材の歪エネルギー密度  $E_m$  は次式により計算する。

$$E_m = \frac{1}{2A_m l_m} \{d_m\}^T [k_{mcr}] \{d_m\} \quad (3-24)$$

ここで,  $[k_{mcr}]$ は線形座屈時の部材剛性マトリクス,  $\{d_m\}$ は部材端の座屈モードであり,  $A_m, l_m$ はそれぞれ部材の断面積, 部材長である。なお, 図中で, 正值は実線, 負値は破線として, また絶対値の大きさに線の太さが比例するように表示している。

図 3-15(a), (b), (c)はピン支持の結果, 図 3-15(d), (e), (f)はローラー支持の結果である。すべて同一断面の部材で構成されたラチスドームに等分布荷重が作用している場合について, 境界条件の違いを比較すると図 3-15(a)と(d)のようになる。どちらも稜線上

の部材に歪エネルギーが集中しているが、ピン支持の場合は内側の部材が著しく、逆にローラー支持の場合は外側の部材が著しい。

ここで、それぞれの歪エネルギーの集中している部分を補強したモデルの結果を、ピン支持の場合を図3-15(b) (稜線部材の断面積、断面二次モーメントをそれぞれ1.2倍に補強)、ローラー支持の場合を図3-15(f) (図3-8の外部部材の断面積、断面二次モーメントを1.2倍に補強)に示している。両者とも補強の効果により、歪エネルギーの集中する部材が変化している。図3-15(b)の稜線部材を補強したモデルでは、稜線部材の歪エネルギーは小さくなり、稜線部材は座屈していないことを表している。図3-15(f)はローラー支持の結果であるが、境界付近の部材剛性を高めるため、変形性状がピン支持ドームの場合に近づき、ピン支持の場合の結果(図3-15(a))にやや類似した結果となる。

図3-15(c)は片偏載荷重を受ける場合の結果であるが、歪エネルギー分布がY軸に対して非対称となり、荷重が大きく作用する側の部材で座屈が生じていることがわかる。

以上の結果によれば、座屈モードに対する歪エネルギー分布は、座屈変形の著しい部材において集中し、その値が負になることが知られている。そこで、原則としては、線形座屈解析による座屈モードを用いて、式(3-24)より部材の歪エネルギー密度を計算し、その値が負でかつ絶対値が最大の部材を特定部材として採用する。ただし、ローラー支持とした場合には、軸力が極めて大きくなる部材と歪エネルギーが集中する部材とが異なる恐れがあるため、特定部材を以下のように決定する。

- (i)線形座屈解析において、歪エネルギーの集中する部材を部材①とする。
- (ii)線形座屈時の部材軸力でその部材の降伏軸力を正規化した値  $N_y / N_{cr}^{lin}$  が最小の部材を部材②とする。
- (iii)上記の①、②の部材を用いて、節3.4.3.で後述する方法で2個のドームの座屈荷重を推定し、低い座屈荷重を与える部材を特定部材とする。

#### (2)正規化細長比

線形座屈解析と弾塑性座屈解析でのラチスドームの座屈荷重の結果を比較するために、特定部材の正規化細長比を次式で定義する。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{N_y}{N_{cr}^{lin}}} \quad (3-25)$$

ただし、 $N_y$ は特定部材の降伏軸力、 $N_{cr}^{lin}$ は線形座屈解析におけるラチスドームの座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$  時の特定部材の線形軸力であり、次のように求められる。

$$N_{cr}^{lin} = \frac{P_{cr}^{lin}}{P_d} N_d \quad (3-26)$$

ここで、 $P_d$ は設計荷重であり、 $N_d$ は設計荷重時の線形弾性解析から得られる特定部材の軸力である。

#### 3.4.2.解析結果

表3-9～表3-14に、解析より得られた正規化細長比  $\Lambda$ 、座屈軸力(式(3-28))を示す。また、図3-16、図3-17に周辺ピン支持及び周辺ローラー支持の解析結果を示す。図中の横軸の値は、前節で述べた方法に従って選ばれた特定部材の軸力より求められた正規化細長比  $\Lambda$  である。一方、縦軸の値は、次式で求められる軸力  $N_{cr}^{pl}$  の降伏軸力  $N_y$  に対する比である。

$$N_{cr}^{pl} = \frac{P_{cr}^{pl}}{P_d} N_d \quad (3-27)$$

ここで、縦軸に用いる値を  $\zeta$  とし、次式で表す。

$$\zeta = \frac{N_{cr}^{pl}}{N_y} \quad (3-28)$$

なお、弾塑性座屈解析におけるラチスドームの座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$  は、解析により得られる最大荷重を指すものとし、 $N_{cr}^{pl}$  は最大荷重まで部材軸力が線形的に増加すると仮定した場合の値となる。ただし、ある部材が降伏するとドームの剛性が著しく低下するため、その後耐力の上昇がある場合でも、部材降伏時の荷重をラチスドームの座屈荷重とした。図中の実線は、 $\Lambda$  が1.0以下では部材の軸降伏、1.0以上では弾性座屈を表し、次式となる。

$$\zeta = \begin{cases} 1.0 & (\Lambda < 1.0) \\ \frac{1}{\Lambda^2} & (\Lambda \geq 1.0) \end{cases} \quad (3-29)$$

また、図中の点線は終局限界状態設計式[26]による部材の圧縮強度であり、次式で表される。

$$\zeta = \begin{cases} 1.0 & (\Lambda < \lambda_c) \\ 1.0 - 0.5 \frac{\Lambda - \lambda_c}{\lambda_c - \lambda_e} & (\lambda_e \leq \Lambda < \lambda_c) \\ \frac{1}{1.2\Lambda^2} & (\Lambda > \lambda_c) \end{cases} \quad (3-30)$$

ここで、 $\lambda_c$  は塑性限界細長比、 $\lambda_e$  は弾性限界細長比であり、それぞれの値は  $\lambda_c = 0.15$ 、 $\lambda_e = 1/\sqrt{0.6}$  である。なお、 $\kappa = 0.01$  の場合、接合部がほぼピン接合となるドームであり、本研究で対象とする半剛接合ドームとは座屈性状等が異なるので、以下の結果では  $\kappa = 1 \sim 1000$  の範囲について示している。

#### (1) 周辺ピン支持ドームの正規化細長比と軸力の関係

図 3-16(a) は等分布荷重時の結果であり、部材半開角  $\theta_0$  に関係なく、式(3-30)のまわりに分布している。

図 3-16(b) は形状初期不整を有する場合の結果である。ただし、正規化細長比  $\Lambda$  は完全形状による値を用いている。単層ラチスドームは形状初期不整の影響を受けやすく、完全形状時の結果(図 3-16(a))と比較して、 $N_{cr}^d / N_y$  の値がかなり低下していることがわかる。

図 3-16(c) は偏載荷重を受ける場合の結果である。等分布荷重を受ける場合と同様、式(3-29)と式(3-30)との間に分布しており、この  $\Lambda$  を用いた表示は、偏載荷重時においても大きな変化を受けないことがわかる。

図 3-16(d) は稜線部材を補強した場合の結果である。図 3-15(b) に示した歪エネルギー分布の例では、補強によりその分布が変化し、座屈部材が稜線部材から他の部材に移っていることがわかる。しかし、正規化細長比と軸力の関係は、ドーム全体に同一部材を用いた場合の結果(図 3-16(a))と同様な分布である。

#### (2) 周辺ローラー支持ドームの正規化細長比と軸力の関係

図 3-17 は、特定部材の正規化細長比と軸力の関係を表す。図中の白抜き(細い印)は歪エネルギーで決められた値、白抜き(太い印)は軸力比  $N_y / N_{cr}^{lm}$  が最小となる外部領域にある部材(図 3-8)の軸力で決められた値を表す。

図 3-17(a) は等分布荷重を受ける場合の結果である。ローラー支持の場合ではピン支持の場合よりも  $N_{cr}^d / N_y$  の値が若干低下する傾向があるが、ピン支持同様、式(3-29)と式(3-30)に沿う形で分布している。また、 $\theta_0 = 2^\circ$  の場合、線形座屈解析において内部の節点が座屈するモードとなる場合が多い。しかし、弾塑性座屈解析では外部の部材が軸降伏してドームの耐力に至るため、外部部材の軸力により決まるもの(図中の太い印)が多い。

図 3-17(b) は形状初期不整を有する場合の結果である。初期不整を有するドームは耐力の低下が著しく、完全形状の結果(図 3-17(a))と比較して、 $N_{cr}^d / N_y$  の値がかなり低下し、特に  $\theta_0 = 2$  の場合に著しい。

図 3-17(c) は偏載荷重を受ける場合の結果である。偏載荷重を受ける場合も式(3-29)と式(3-30)に沿う分布となり、ピン支持同様、荷重分布から影響を受けないことがわかる。

図 3-17(d) は外部部材を補強した場合の結果である。ローラー支持の場合、ドーム全体に同一な部材を用いると、外部部材に歪エネルギーが集中することが多い。そのため、外部の部材の耐力を上げることにより、ラチスドーム全体の耐力を高めることができる。そこで、図 3-8 に示すラチスドームの外部部材の断面積、断面二次モーメント、部材の耐力をそれぞれ 1.2 倍とし、同様の解析を行なった。外部部材の耐力を上げたため、内部の部材でラチスドームの耐力が決まるが、この分布は図 3-17(a) の全部材が均一の場合と同様の分布となっている。

以上の周辺ピン支持及び周辺ローラー支持の解析結果より、支持条件や荷重の分布形状にそれほど影響を受けることなく、この方法で座屈時の軸力を整理することが可能である。また、正規化細長比による座屈時の軸力の推定式としては、式(3-30)に基づくものとする。

### 3.4.3. 座屈荷重の推定

ラチスドームの座屈荷重の推定方法は次のようになる。

- (i) 線形座屈解析から得られる座屈モードから計算される部材について、歪エネルギー密度の値が負で、その絶対値が最大となる部材を注目する部材として抽出する。
- (ii) 特定部材の正規化細長比  $\Lambda$  を式(3-25)から求める。
- (iii)  $\Lambda$  に対応するその部材の圧縮強度  $N_{cr}^d$  を先に定義された推定式より決める。
- (iv) 軸力  $N_{cr}^d$  を用い、次式より座屈荷重  $P_{cr}^d$  を推定する。

$$P_{cr}^d = N_{cr}^d \cdot \frac{P_d}{N_d} \quad (3-31)$$

ここで、 $P_{cr}^d$  はラチスドームの推定された座屈荷重、 $P_d$  は設計荷重、 $N_d$  は設計荷重時の線形軸力である。ただし、ローラー支持ドームでは、外部部材が大きく変形し、ラチスドームの耐荷力が決まることが多いので、次の手順により座屈荷重を推定する。



- (イ)歪エネルギー密度最大部材から座屈荷重を推定する。
- (ロ)外部部材の中で降伏軸力と部材の座屈軸力の比( $N_y / N_{cr}^{lim}$ )が最小となる部材を注目する部材として、ラチスドームの座屈荷重を推定する。
- (ハ)両者を比較し、その内低い値を推定座屈荷重として採用する。

本研究では部材の強度(座屈軸力)を推定する式として、式(3-30)で示す終局限界状態設計式から計算される部材の圧縮強度  $N_{cr}$  に低減係数  $\alpha$  を乗じた値  $N_{cr}^d$  (式(3-32))を用いる。

$$N_{cr}^d = \alpha \cdot N_{cr} \quad (3-32)$$

ここで、低減係数  $\alpha$  は 0.7 とする。これは単層ラチスドームが形状初期不整等に対して敏感であるため、この効果を考慮するための係数である。式(3-32)で計算される部材の強度  $N_{cr}^d$  は図 3-16、図 3-17 において破線で示している。

この方法で求めたドームの座屈荷重と、弾塑性座屈解析の座屈荷重の関係を図 3-18 に示す。横軸にラチスドームの弾塑性座屈解析による座屈荷重と推定座屈荷重の比  $P_{cr}^p / P_{cr}^d$  を取り、縦軸に頻度を取る。今回の解析では、接合部の無次元化回転ばね定数  $\kappa = 1 \sim 1000$  で、等分布荷重を受けるラチスドーム、部材が補強されたラチスドーム、偏載荷重を受けるラチスドーム、形状初期不整を有するラチスドームについて対象としており、これらの結果についてのみ検討している。

図 3-18(a)はピン支持ドーム、図 3-18(b)はローラー支持ドームの結果を示している。ハッチ部分は形状初期不整を有するドームについての値を表し、白抜き部分は不整がない場合の値を表している。ピン支持のラチスドームでは、形状初期不整を有するドームの 1 ケースを除いたすべての  $P_{cr}^p / P_{cr}^d$  が 1.0 以上の値となり、その平均が 1.63、標準偏差が 0.25 となっている。ローラー支持のラチスドームでは、形状初期不整の数ケースを除いて 1.0 以上となり、その平均が 1.54、標準偏差が 0.28 となる。ピン支持のドームは、ローラー支持のドームより座屈荷重を若干高く推定する傾向にあり、ばらつきも小さい。また、 $P_{cr}^p / P_{cr}^d$  の値が 1.0 以下となるものはすべて形状初期不整を有するドームであり、ラチスドームの耐荷力を推定する場合、形状初期不整の影響を十分考慮しなければならないことがわかる。

以上により、低減係数を 0.7 としてラチスドームの座屈荷重を推定した場合、境界条件に関係なくほとんどの場合が、弾塑性座屈解析の座屈荷重よりも低い値を示している。

これより、ここで示した方法によるラチスドームの座屈荷重の推定が、十分可能であることがわかる。ただし、低減係数  $\alpha$  の値の決定方法等について、実験結果との整合性を含め詳細な検討が今後必要であろう。

### 3.5.まとめ

本研究で対象とした単層ラチスドームは、円形平面を持つ球殻状のドームであり、ドームのむくりを表す部材半開角は2度から4度と比較的扁平なものである。また、境界条件はピン支持とローラー支持の2種とし、部材の接合状態は半剛接から剛接までを仮定している。これらの限られた条件下で、単層ラチスドームの座屈性状を評価する上で、の注目すべき部材を選定し、その部材の圧縮強度に基づいて、ドームの耐荷力の推定法を検討し、得られた結果を以下にまとめる。

- (i) 特定部材の正規化細長比を用いることにより、ラチスドームの耐力を部材レベルの指標で整理することが出来る。
- (ii) 特定部材の強度は荷重条件や支持条件等にそれほど関係なく同様の分布となる。この正規化細長比を用いる方法は簡便な線形座屈解析に基づいており、ラチスドームの座屈耐力を推定する方法として可能性が期待できる。

しかし、本研究では特定の条件内での検討を行なっているため、今後、以下の解析を進める必要がある。

- (i) 矩形平面等の他の平面を有するラチスドーム
- (ii) 部材半開角が4度以上となるライズの高いラチスドーム、あるいは2度以下のライズの浅いラチスドーム
- (iii) 部材に高強度な材料を使用したラチスドーム
- (iv) 正規化細長比だけでなく、ドームの部材半開角等もパラメータとする圧縮強度の推定式、及びその推定式に対応した圧縮強度の低減係数の値

さらに、本研究で想定した雪荷重や自重などの静的な鉛直荷重だけでなく、地震力や風荷重などの動的な荷重に対する単層ラチスドームの応答性状の把握や耐震設計等も今後の課題である。

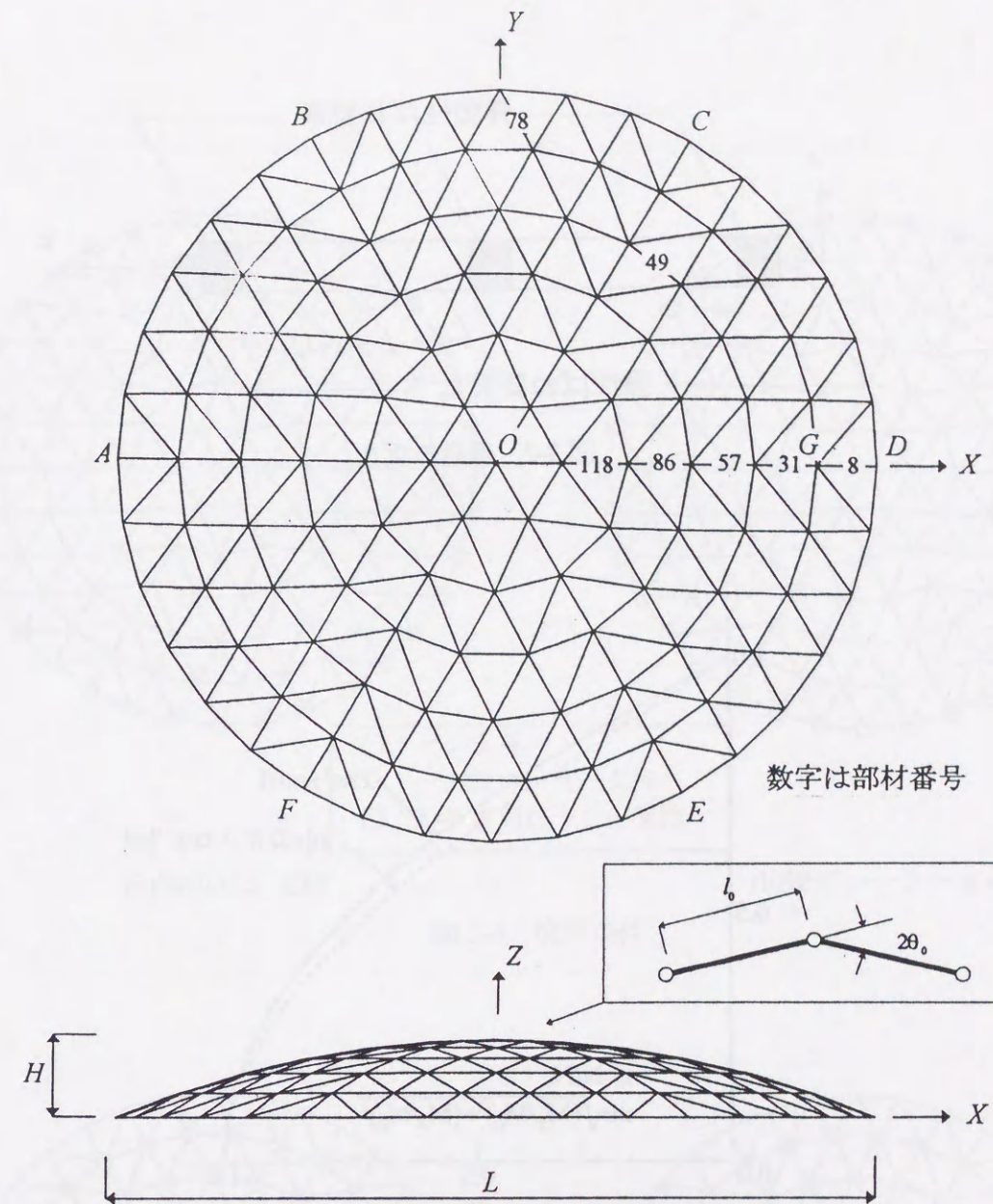


図 3-1 単層ラチスドームの形状

表 3-1 ラチスドームの形状諸元

$\theta_0$ (deg.)	L(m)	H(m)	R(m)
2.0	34.96	3.72	43.98
3.0	33.69	5.47	28.66
4.0	31.96	7.11	21.50

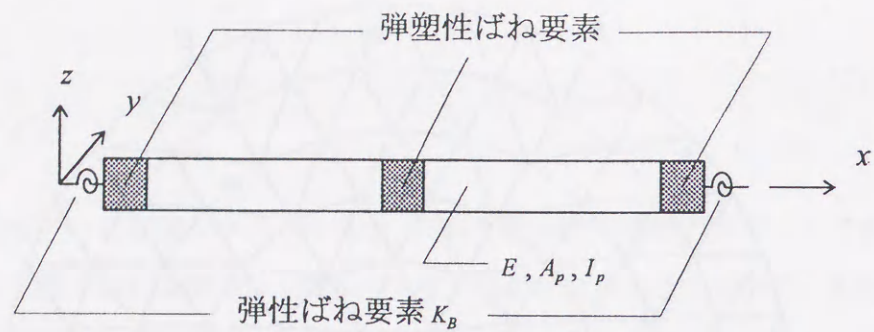


図 3-2 部材モデル

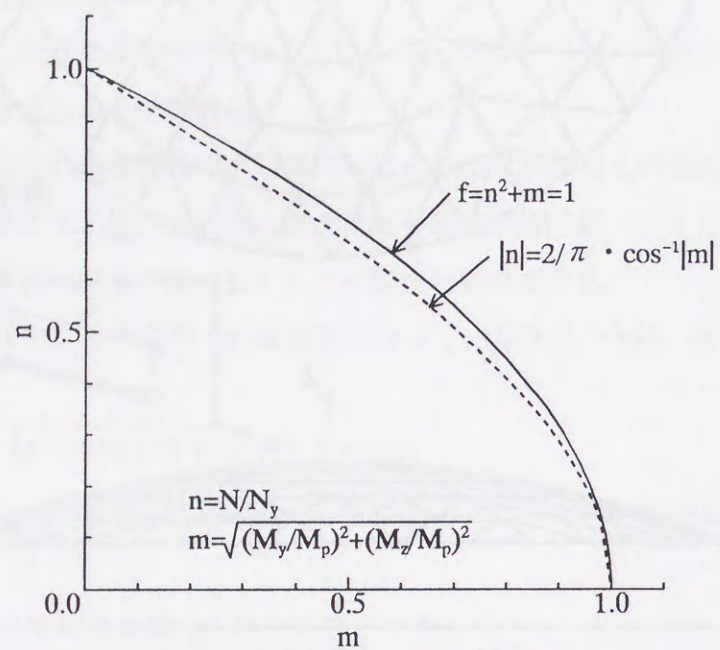
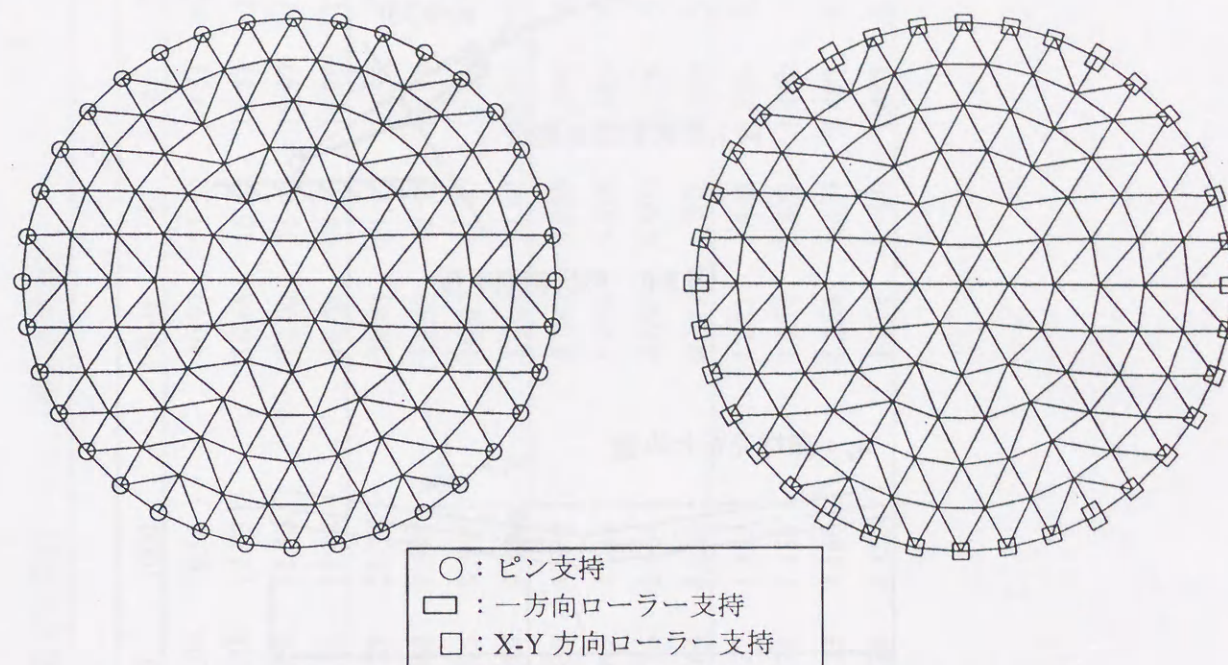


図 3-3 弾塑性ばねの降伏曲面

表 3-2 部材諸元

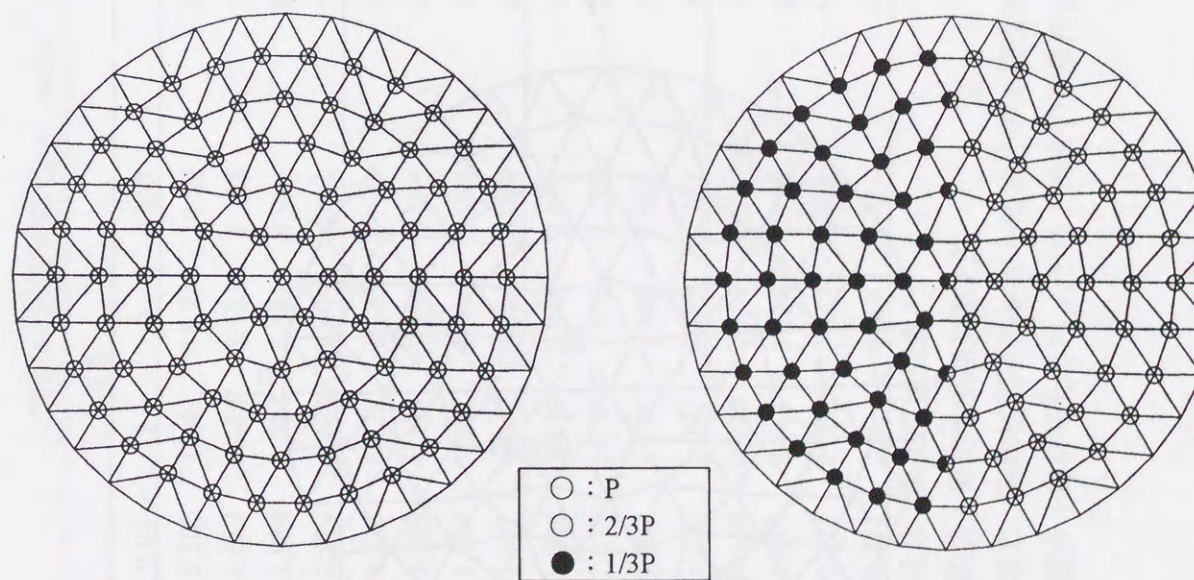
pipe	$A(\text{cm}^2)$	$I(\text{cm}^4)$	$\lambda_0$	$N_y(\text{tf})$	$M_p(\text{tf}\cdot\text{cm})$
$\phi 165.2 \times 4.5$	22.72	734	52.7	54.53	278.98
$\phi 139.8 \times 4.0$	17.07	394	62.5	40.97	177.09
$\phi 89.1 \times 2.8$	7.591	70.7	98.4	18.22	50.07
$\phi 60.5 \times 2.3$	4.205	17.8	145.6	10.09	18.71



(a) 周辺ピン支持

(b) 周辺ローラー支持

図 3-4 境界条件



(a) 等分布荷重

(b) 片偏載荷重

図 3-5 荷重条件

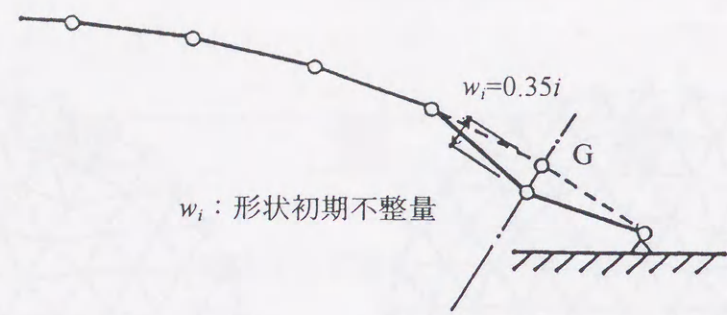


図 3-6 形状初期不整

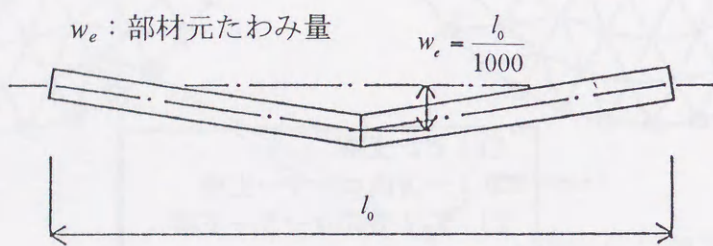


図 3-7 部材元たわみ

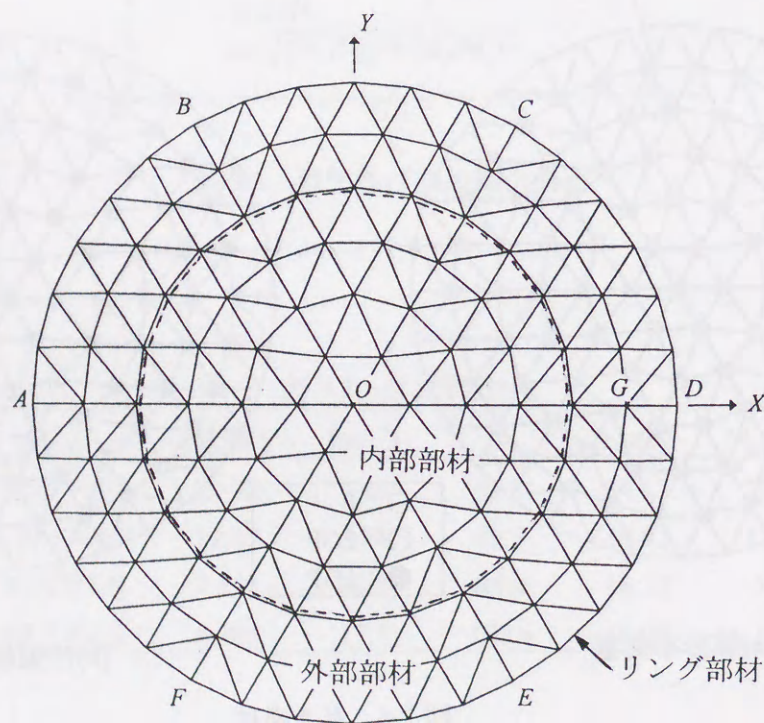


図 3-8 ローラー支持ドームの外部部材と内部部材

表 3-3 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ピン支持ドーム, 等分布荷重]

$\theta_0(deg.)$	2.0			3.0			4.0					
	$\kappa$	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi 165$	5.100	10.49	16.23	18.82	17.17	25.33	36.04	39.91	40.77	51.52	59.51	60.82
	3.687	6.485	8.121	8.185	12.05	12.69	12.78	12.73	16.68	16.68	16.81	16.83
	1.984	4.574	6.581	6.991	8.275	10.54	11.18	11.30	14.02	15.55	15.97	15.93
	3.584	6.467	8.099	8.099	11.71	12.37	12.62	12.48	16.06	16.23	16.79	16.64
$\phi 139$	3.818	6.722	10.25	11.67	12.88	17.23	22.23	23.35	28.43	31.53	32.55	33.20
	2.699	4.274	5.701	6.015	9.013	9.488	9.568	9.597	12.52	12.52	12.59	12.66
	1.654	3.057	4.596	5.038	6.549	7.878	8.275	8.365	10.61	11.47	11.98	11.89
	2.687	4.242	5.686	5.996	8.710	9.350	9.289	9.339	11.88	12.03	12.23	12.43
$\phi 89$	1.688	2.203	2.749	2.859	3.872	4.361	4.436	4.532	5.087	5.809	5.890	6.042
	1.215	1.459	1.843	2.280	3.678	3.926	4.049	4.059	5.008	5.538	5.583	5.612
	0.852	1.122	1.490	1.887	2.768	3.254	3.586	3.654	4.047	4.603	5.116	5.215
	1.177	1.442	1.799	2.172	3.306	3.553	3.764	4.035	4.321	4.761	5.058	5.278
$\phi 60$	0.664	0.720	0.746	0.763	1.049	1.081	1.122	1.152	1.281	1.428	1.486	1.529
	0.567	0.662	0.724	0.759	0.972	1.077	1.126	1.153	1.274	1.423	1.490	1.530
	0.471	0.553	0.642	0.744	0.917	1.059	1.123	1.160	1.269	1.417	1.491	1.553
	0.551	0.624	0.698	0.755	0.909	1.049	1.125	1.155	1.214	1.400	1.488	1.532

1 段目: 線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$

2 段目: 弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$

3 段目: 形状初期不整  $w_i$  がある場合の弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}(i)$

4 段目: 部材元たわみ  $w_e$  がある場合の弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}(e)$

表 3-4 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ピン支持ドーム, 片偏載荷重]

$\theta_0(deg.)$	2.0				3.0				4.0			
	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\kappa$	5.175	10.182	14.922	17.259	17.466	25.308	33.540	6.840	41.640	42.120	50.970	59.160
$\phi$ 165	3.057	6.270	6.621	6.540	9.777	10.098	10.296	10.515	14.208	14.322	14.433	14.553
$\phi$ 139	3.873	6.606	9.426	10.635	13.101	16.011	19.251	21.894	20.670	22.542	27.435	32.520
$\phi$ 89	2.263	4.116	4.881	4.995	7.335	7.542	7.668	7.794	10.662	10.740	10.773	10.893
$\phi$ 60	1.713	1.836	2.220	2.601	2.403	2.853	3.483	4.230	3.411	4.023	4.905	5.889
	1.020	1.380	1.779	2.094	2.316	2.769	3.240	3.354	3.363	3.990	4.605	4.743
	0.387	0.459	0.561	0.684	0.606	0.714	0.873	1.071	0.858	1.011	1.230	1.485
	0.387	0.477	0.600	0.678	0.615	0.795	0.978	1.083	0.855	1.131	1.371	1.515

1 段目: 線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 2 段目: 弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$

表 3-5 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=12, l_0=3m$ , 稜線部材補強, 周辺ピン支持ドーム, 等分布荷重]

$\theta_0(deg.)$	2.0				3.0				4.0			
	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\kappa$	5.282	10.63	16.55	19.14	17.79	25.96	37.40	40.55	42.28	53.11	60.06	61.51
$\phi$ 165	3.828	6.731	8.641	8.615	13.49	14.45	14.47	14.35	18.86	18.77	19.39	18.99
$\phi$ 139	3.954	6.851	10.45	11.95	13.35	17.72	23.04	23.97	30.29	31.96	32.92	33.79
$\phi$ 89	2.829	4.443	6.057	6.457	10.10	10.79	10.90	10.80	14.15	14.17	14.31	14.22
$\phi$ 60	1.749	2.267	2.821	2.919	4.242	4.338	4.497	4.630	5.436	5.758	5.977	6.182
	1.262	1.527	1.925	2.329	3.928	4.331	4.509	4.632	5.404	5.799	6.134	6.211
	0.730	0.727	0.756	0.779	1.075	1.094	1.134	1.180	1.369	1.451	1.509	1.566
	0.674	0.700	0.758	0.782	1.165	1.096	1.144	1.180	1.373	1.481	1.554	1.580

1 段目: 線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 2 段目: 弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$

表 3-6 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ローラー支持ドーム, 等分布荷重]

$\theta_0(deg.)$	2.0				3.0				4.0			
	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\kappa$	5.085	10.45	15.93	19.12	17.13	25.27	35.90	39.83	40.71	50.33	55.44	60.94
$\phi$ 165	2.784	5.022	5.712	5.512	9.815	10.19	9.805	9.301	14.94	14.52	14.09	13.60
	1.514	3.758	4.924	4.802	6.625	8.550	8.569	8.073	12.15	13.09	12.61	12.12
	2.825	5.103	5.711	5.499	9.663	10.18	9.779	11.12	14.34	14.43	14.06	13.63
$\phi$ 139	3.806	6.698	10.08	11.76	12.85	17.18	22.15	23.45	24.78	27.05	29.85	33.07
	2.089	3.283	4.170	4.095	7.374	7.608	7.394	7.031	11.22	10.98	10.63	10.31
	1.255	2.425	3.518	3.525	5.257	6.401	6.394	6.104	9.137	9.990	9.569	9.145
	2.119	3.320	4.170	4.092	7.214	7.559	7.380	7.032	10.61	10.68	10.66	10.32
$\phi$ 89	1.683	2.195	2.724	2.863	3.488	3.786	4.143	4.519	4.446	4.847	5.347	5.961
	0.936	1.140	1.429	1.716	3.097	3.168	3.227	3.266	4.452	4.673	4.691	4.747
$\phi$ 60	0.660	0.877	1.185	1.459	2.300	2.825	2.888	2.860	3.505	4.037	4.335	4.293
	0.930	1.132	1.412	1.703	2.768	2.911	3.018	3.115	3.861	4.020	4.168	4.473
	0.604	0.653	0.710	0.764	0.878	0.952	1.041	1.143	1.119	1.219	1.344	1.501
	0.495	0.537	0.599	0.662	0.871	0.942	1.023	1.127	1.157	1.233	1.349	1.506
	0.380	0.459	0.529	0.604	0.760	0.962	1.032	1.121	1.060	1.269	1.380	1.496
	0.457	0.509	0.576	0.648	0.809	0.916	1.012	1.115	1.089	1.183	1.302	1.487

1 段目: 線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$

2 段目: 弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$

3 段目: 形状初期不整  $w_i$  がある場合の弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}(i)$

4 段目: 部材元たわみ  $w_e$  がある場合の弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}(e)$

表 3-7 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ローラー支持ドーム, 片偏載荷重]

$\theta_0(deg.)$	2.0				3.0				4.0				
	$\kappa$	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi 165$		5.169	10.071	14.745	17.091	17.460	25.329	33.540	36.870	41.640	41.730	51.780	59.220
		2.793	5.079	6.102	5.829	9.246	9.603	9.942	10.086	13.644	13.758	13.872	13.833
$\phi 139$		3.098	6.588	9.351	10.551	13.098	16.059	19.686	21.984	18.462	22.305	27.813	32.700
		2.083	3.309	4.410	4.356	6.933	7.155	7.314	7.407	10.161	10.299	10.314	10.347
$\phi 89$		1.711	1.857	2.287	2.602	2.364	2.849	3.555	4.272	3.312	3.969	4.953	5.955
		0.922	1.149	1.430	1.759	2.217	2.660	3.126	3.150	3.222	3.846	4.467	4.473
$\phi 60$		0.384	0.463	0.576	0.692	0.595	0.713	0.888	1.086	0.834	0.996	1.241	1.505
		0.357	0.430	0.534	0.645	0.581	0.693	0.870	1.103	0.905	0.984	1.232	1.574

1 段目: 線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 2 段目: 弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$

表 3-8 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=12, l_0=3m$ , 外部部材補強, 周辺ピン支持ドーム, 等分布荷重]

$\theta_0(deg.)$	2.0				3.0				4.0				
	$\kappa$	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi 165$		5.102	10.46	16.33	19.58	17.17	25.29	36.18	40.10	40.77	51.45	59.73	61.79
		3.199	5.434	6.650	6.366	11.40	11.83	11.55	10.83	15.83	15.92	16.04	16.01
$\phi 139$		3.819	6.707	10.29	12.05	12.88	17.20	22.35	23.63	29.16	30.81	33.37	34.74
		2.401	3.591	4.799	4.721	8.573	8.856	8.703	8.202	11.95	11.97	12.00	12.04
$\phi 89$		1.689	2.200	2.762	2.885	3.682	4.193	4.564	4.800	4.826	5.538	6.074	6.489
		1.072	1.277	1.590	1.959	3.599	3.679	3.661	3.622	4.997	5.40	5.128	5.099
$\phi 60$		0.625	0.708	0.767	0.805	0.927	1.057	1.156	1.228	1.215	1.394	1.531	1.640
		0.576	0.614	0.674	0.745	0.914	1.043	1.142	1.224	1.206	1.399	1.534	1.654

1 段目: 線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 2 段目: 弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$

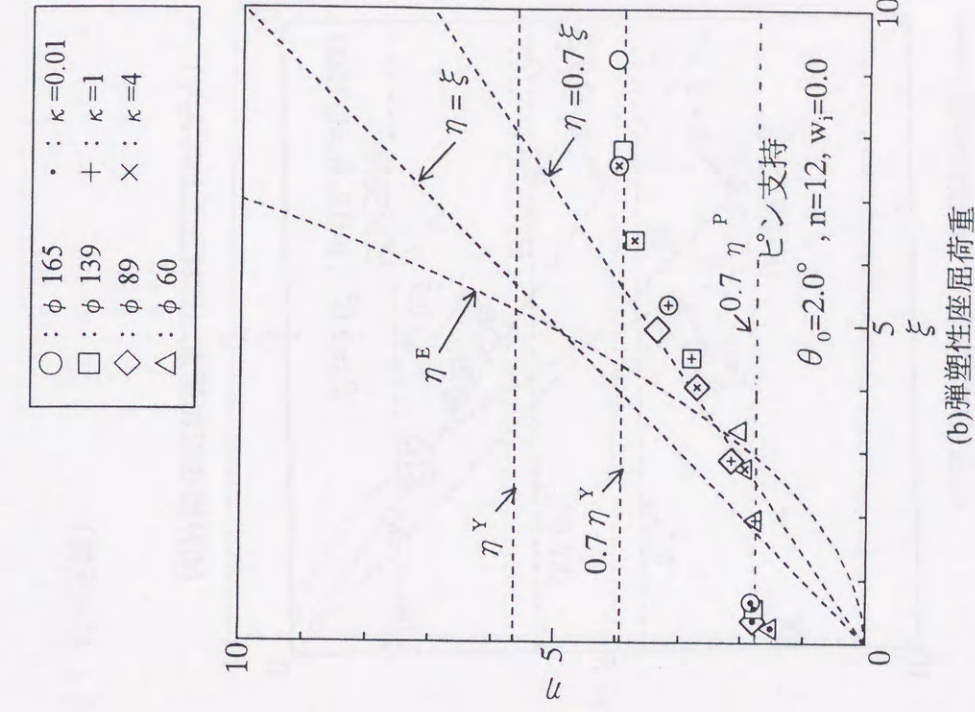
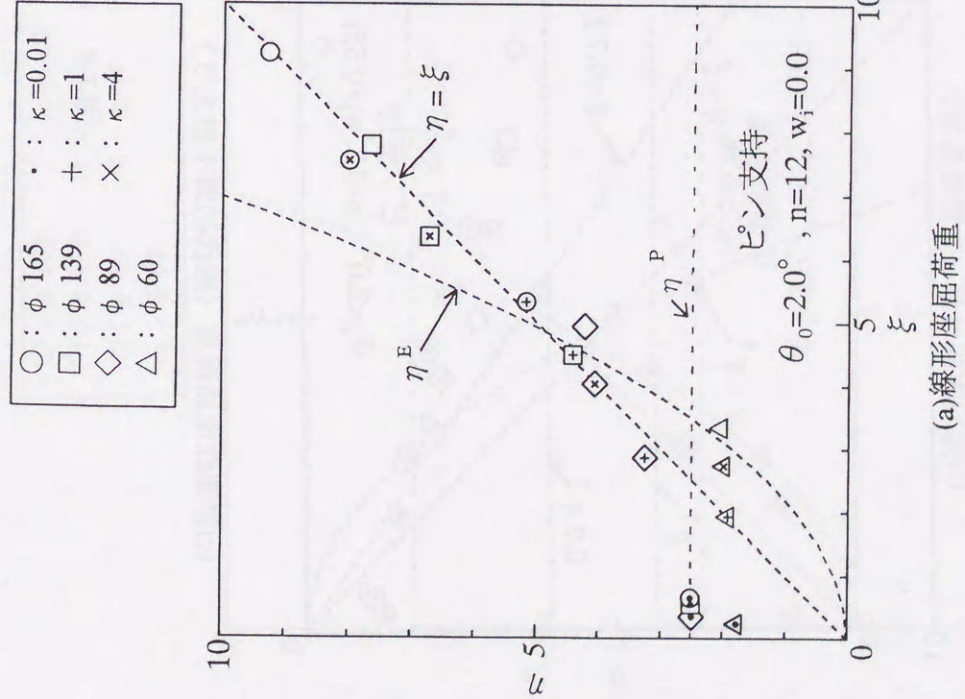
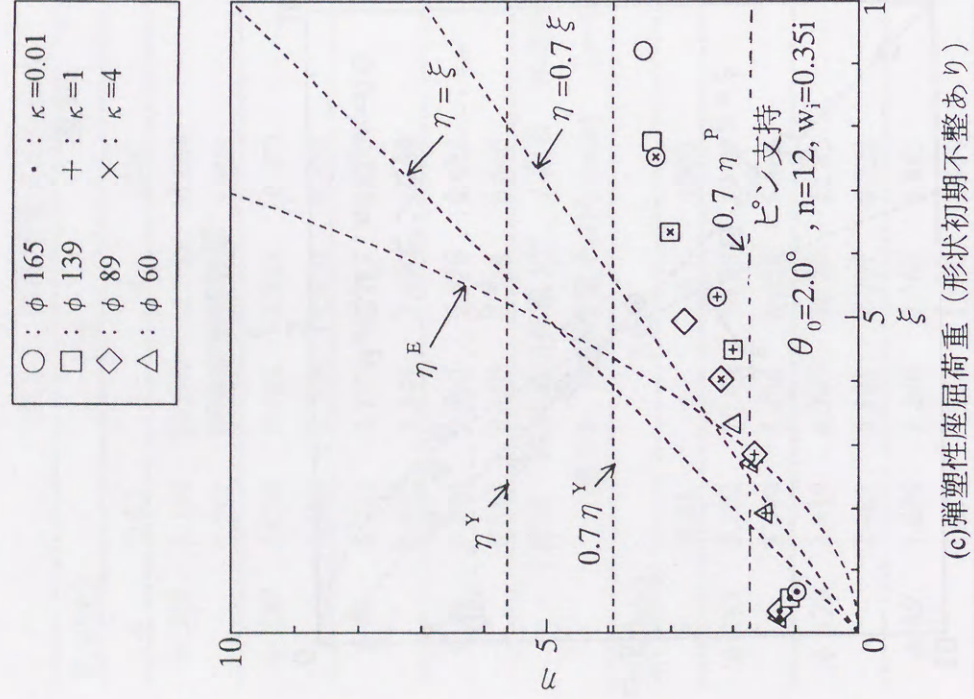
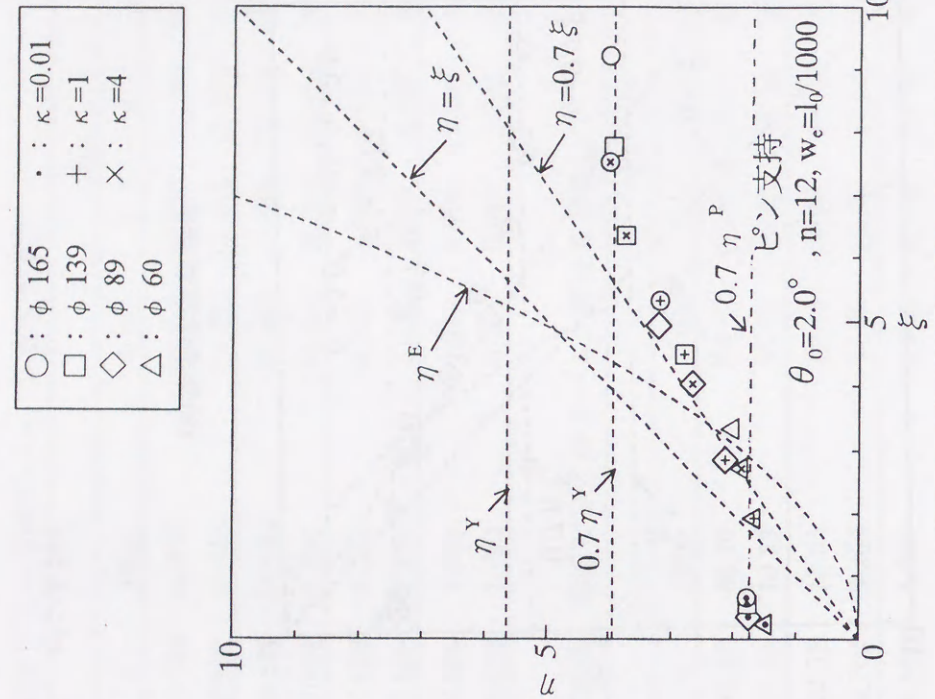


図 3-9  $\eta$  と  $\xi$  の関係 ( $\theta_0=2.0^\circ$ , ピン支持)

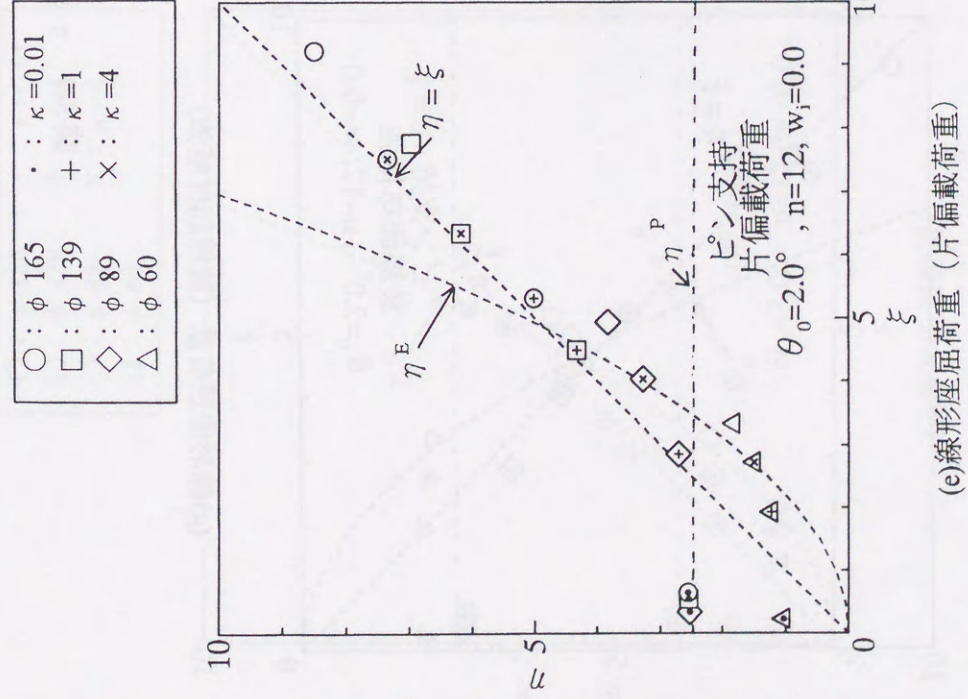


(c)弾塑性座屈荷重 (形状初期不整あり)

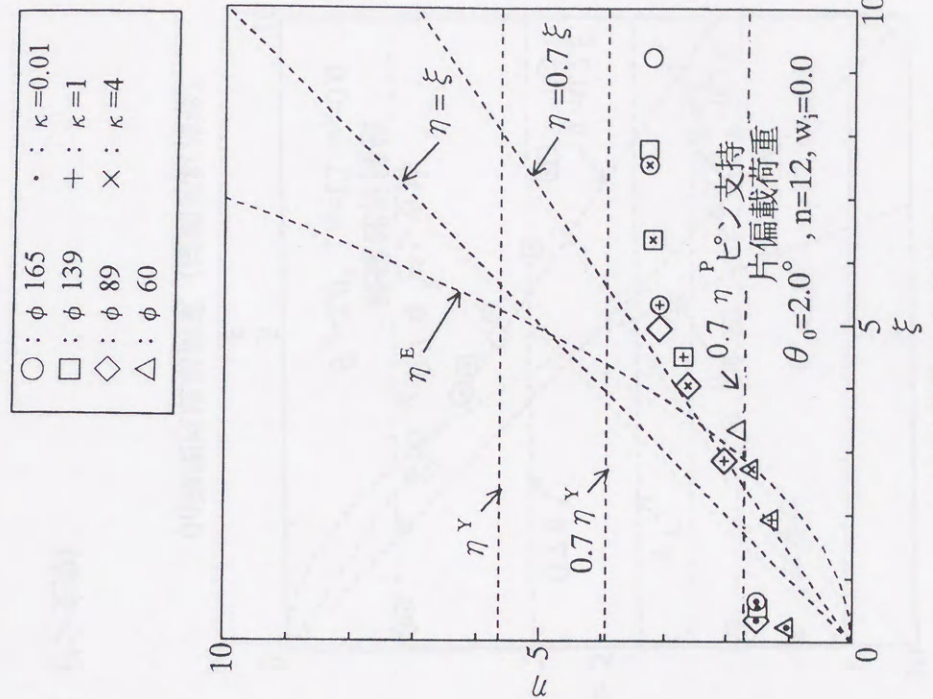


(d)弾塑性座屈荷重 (部材元たわみあり)

図 3-9 η と ξ の関係 (θ<sub>0</sub>=2.0°, ピン支持)

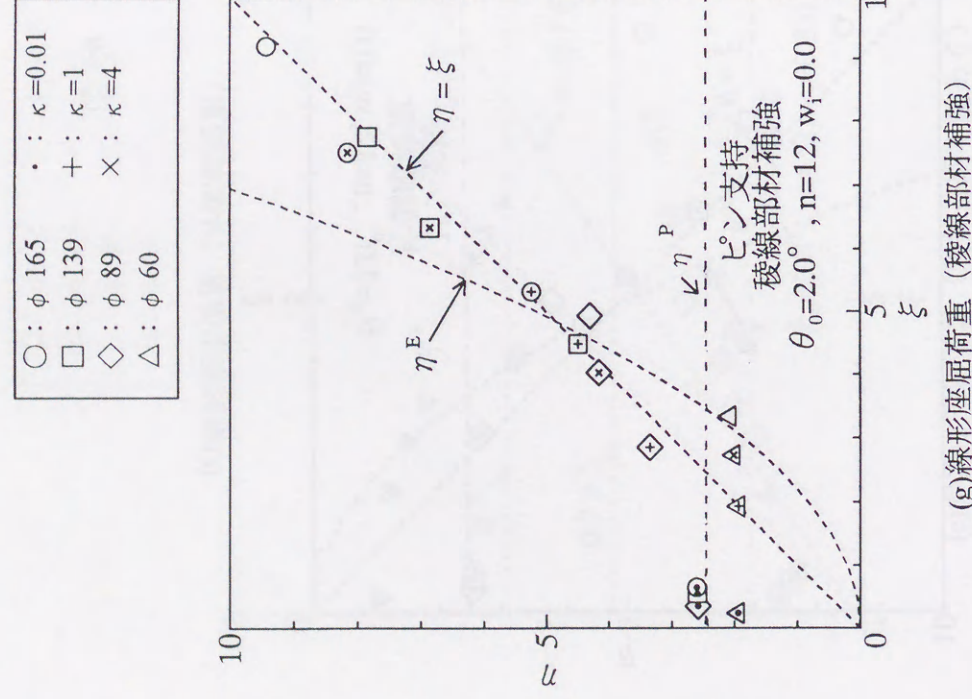


(e)線形座屈荷重 (片偏載荷重)

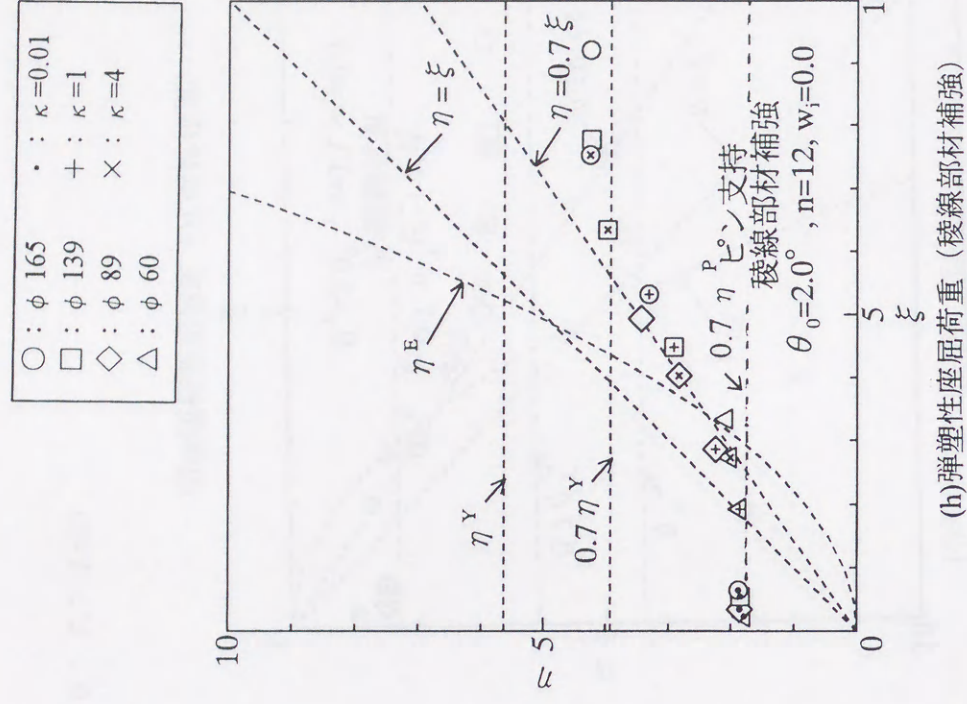


(f)弾塑性座屈荷重 (片偏載荷重)

図 3-9 η と ξ の関係 (θ<sub>0</sub>=2.0°, ピン支持)

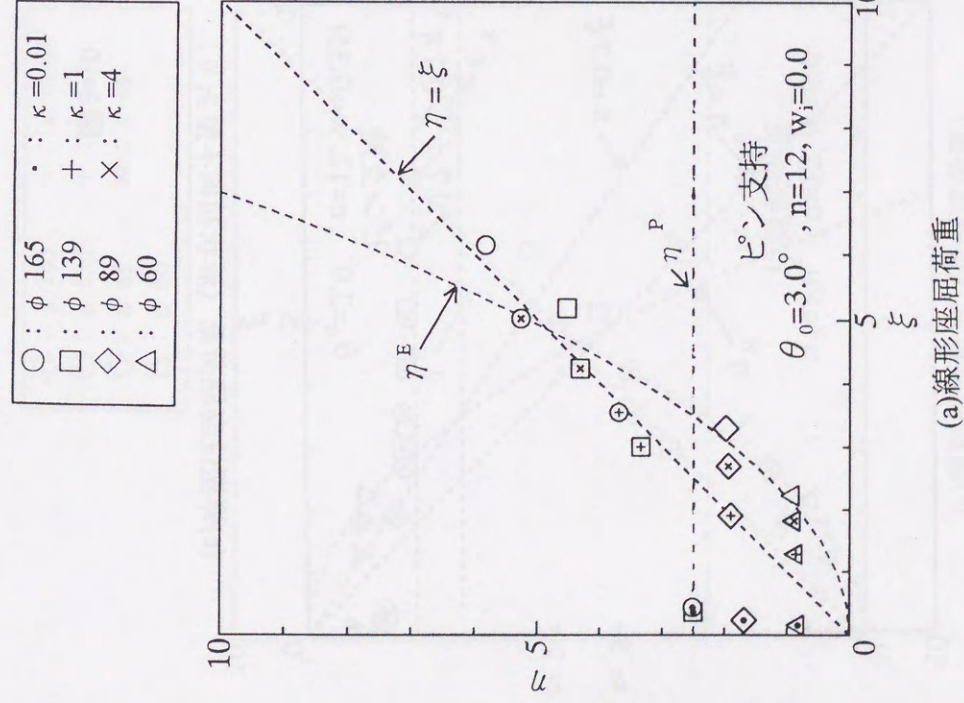


(g)線形座屈荷重 (稜線部材補強)

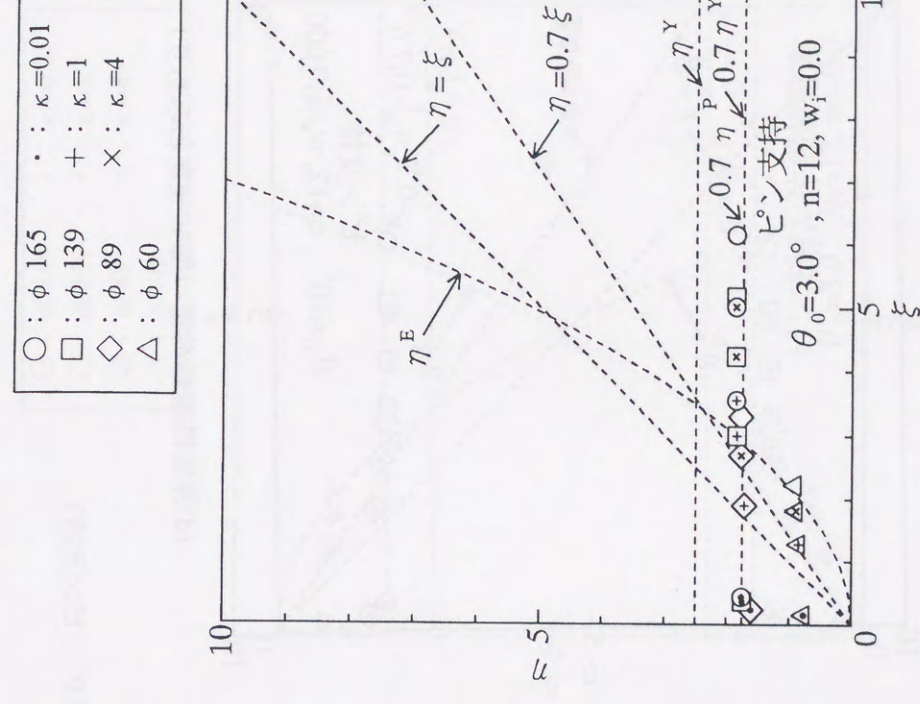


(h)弾塑性座屈荷重 (稜線部材補強)

図 3-9 η と ξ の関係 ( $\theta_0=2.0^\circ$ , ピン支持)



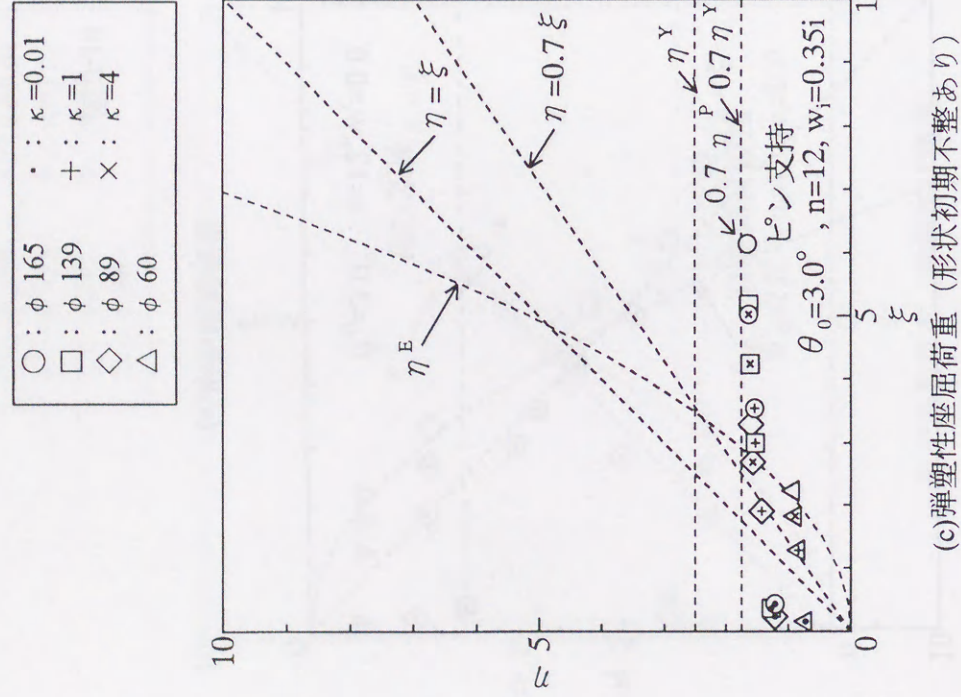
(a)線形座屈荷重



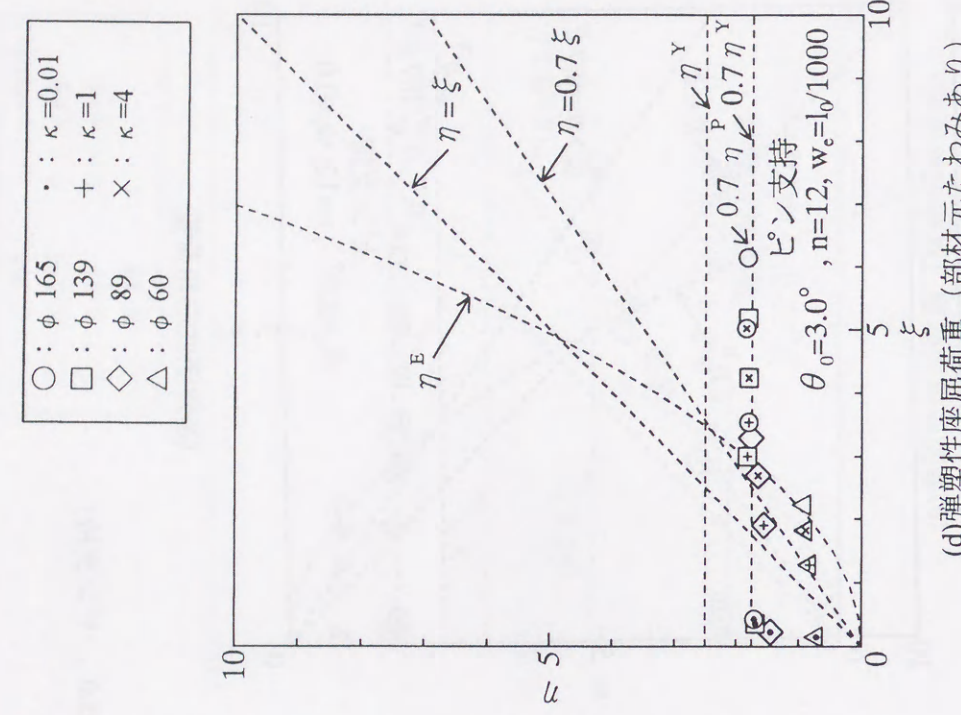
(b)弾塑性座屈荷重

図 3-10 η と ξ の関係 ( $\theta_0=3.0^\circ$ , ピン支持)



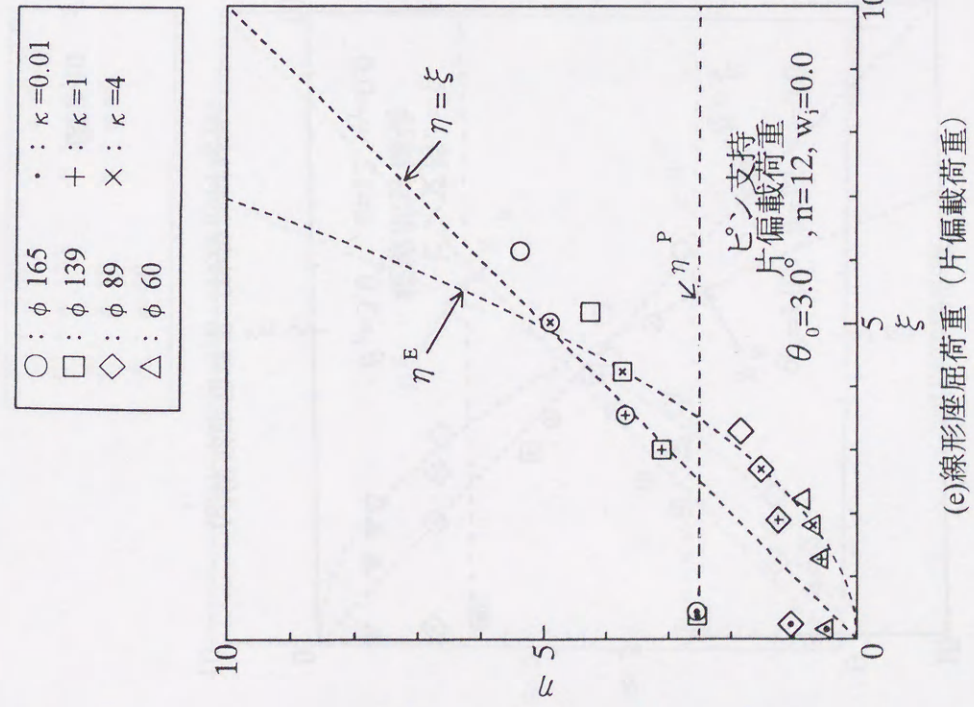


(c)弾塑性座屈荷重 (形状初期不整あり)

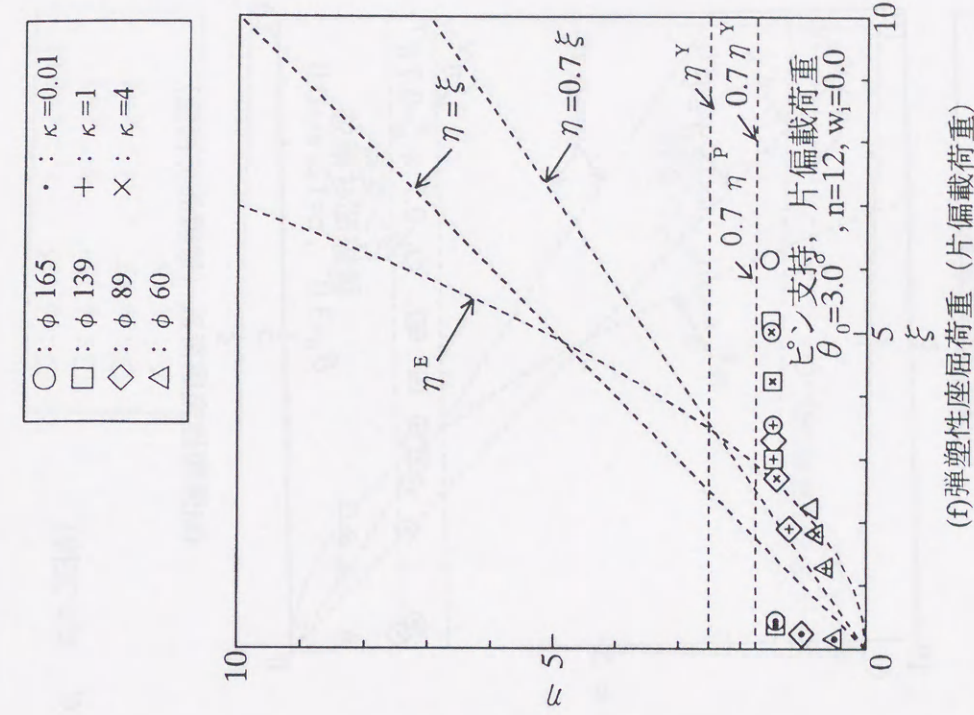


(d)弾塑性座屈荷重 (部材元たわみあり)

図 3-10 η と ξ の関係 ( $\theta_0 = 3.0^\circ$ , ピン支持)



(e)線形座屈荷重 (片偏載荷重)



(f)弾塑性座屈荷重 (片偏載荷重)

図 3-10 η と ξ の関係 ( $\theta_0 = 3.0^\circ$ , ピン支持)

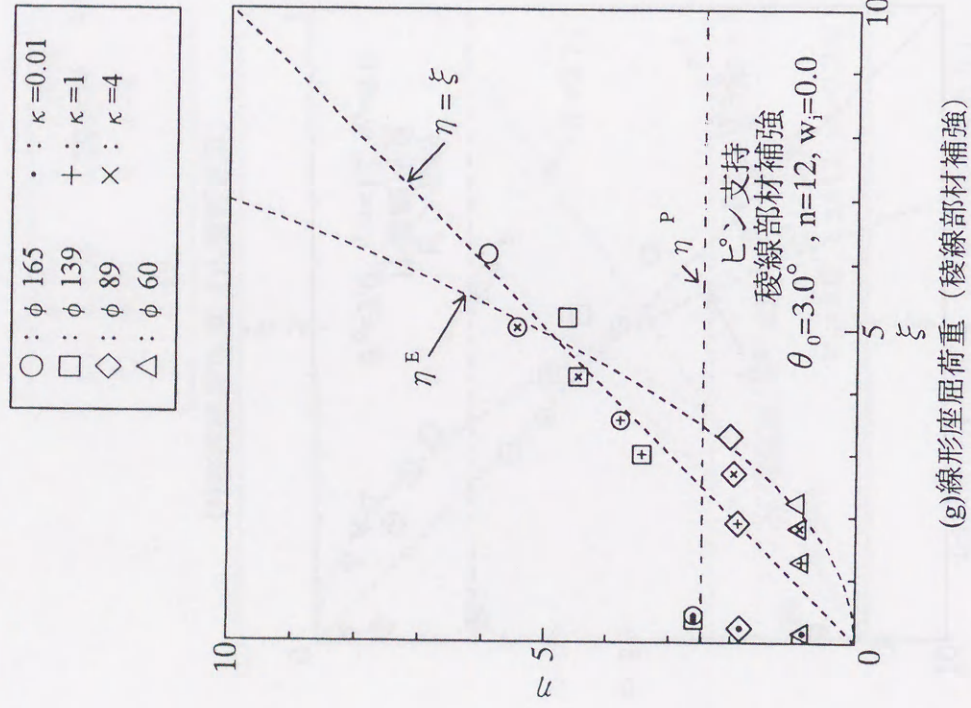


図 3-10 η と ξ の関係 (θ<sub>0</sub> = 3.0°, ピン支持)

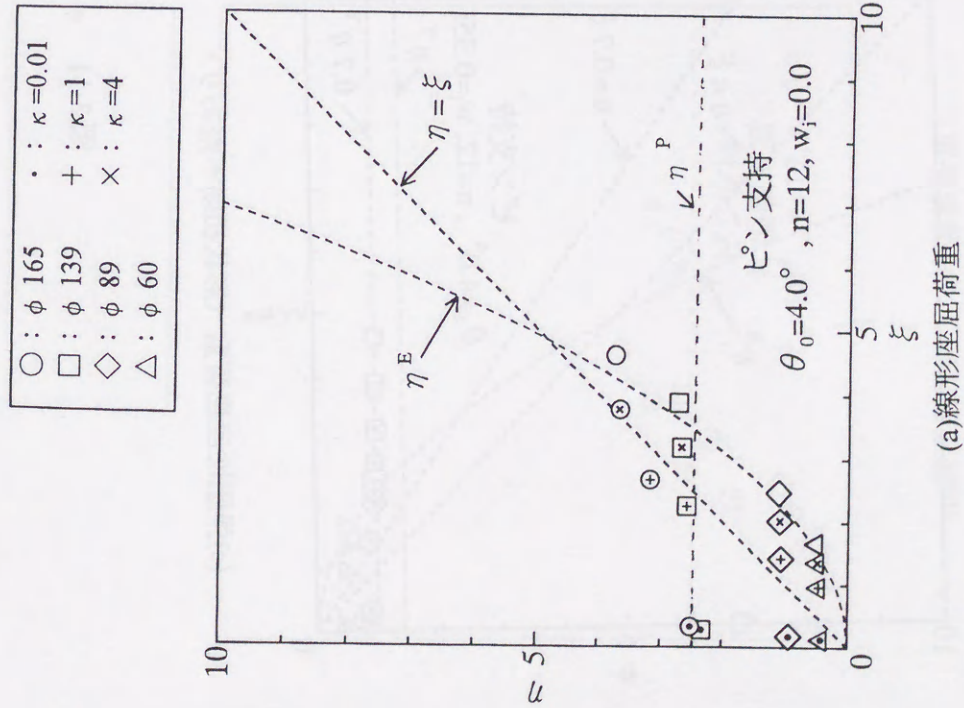
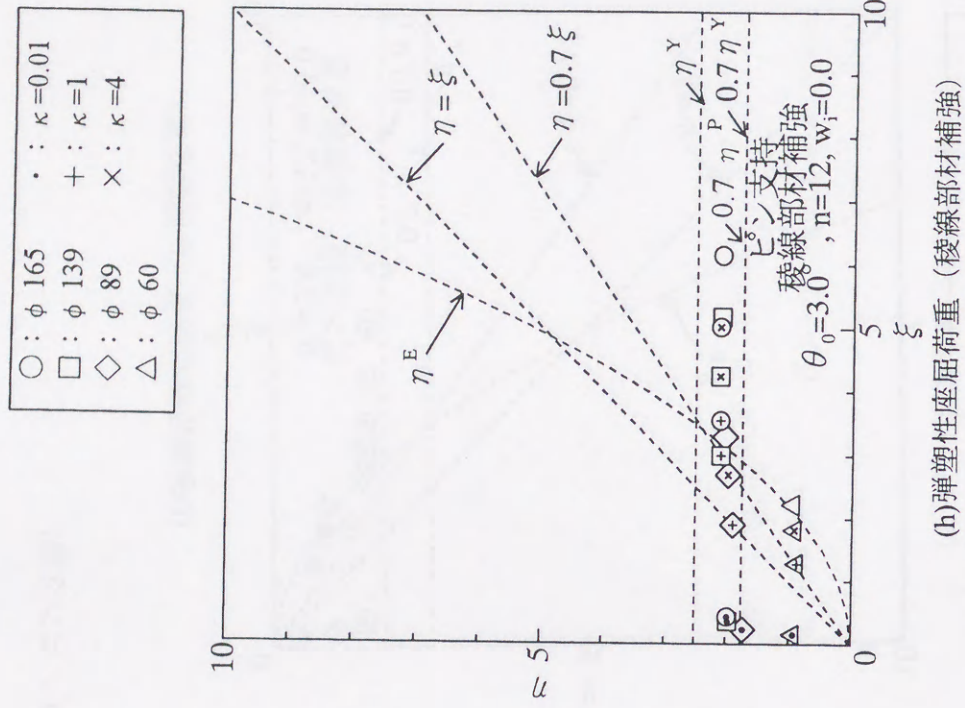
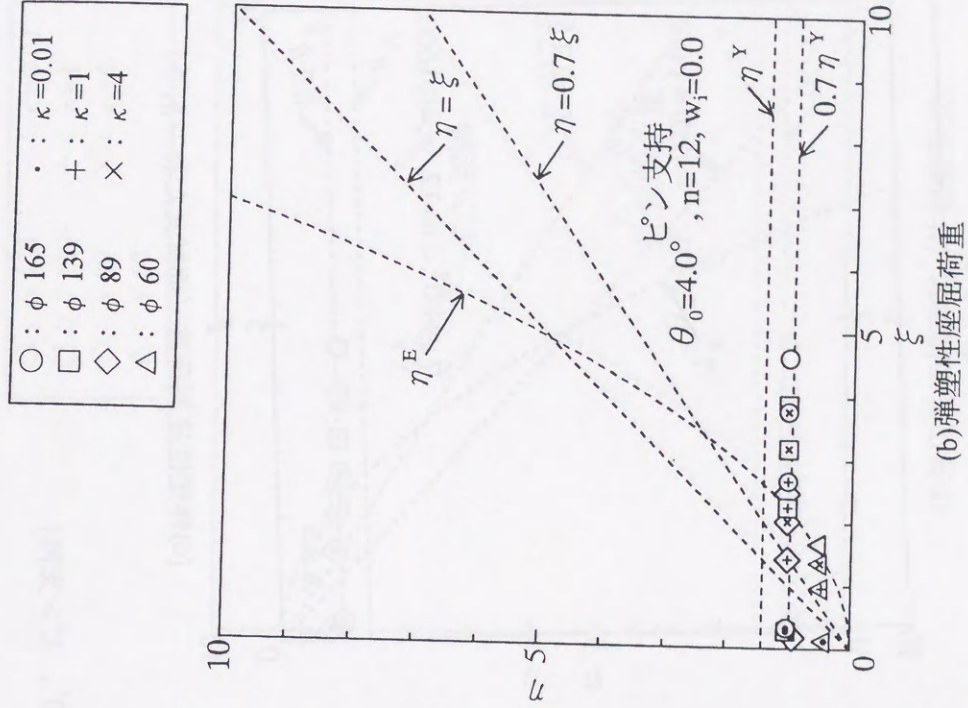
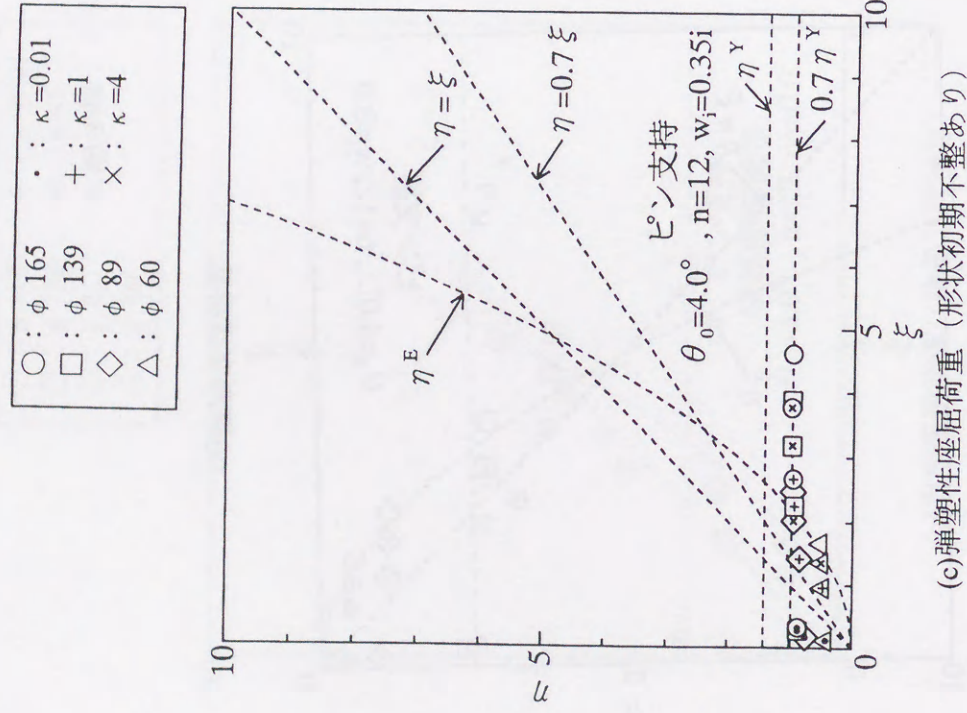
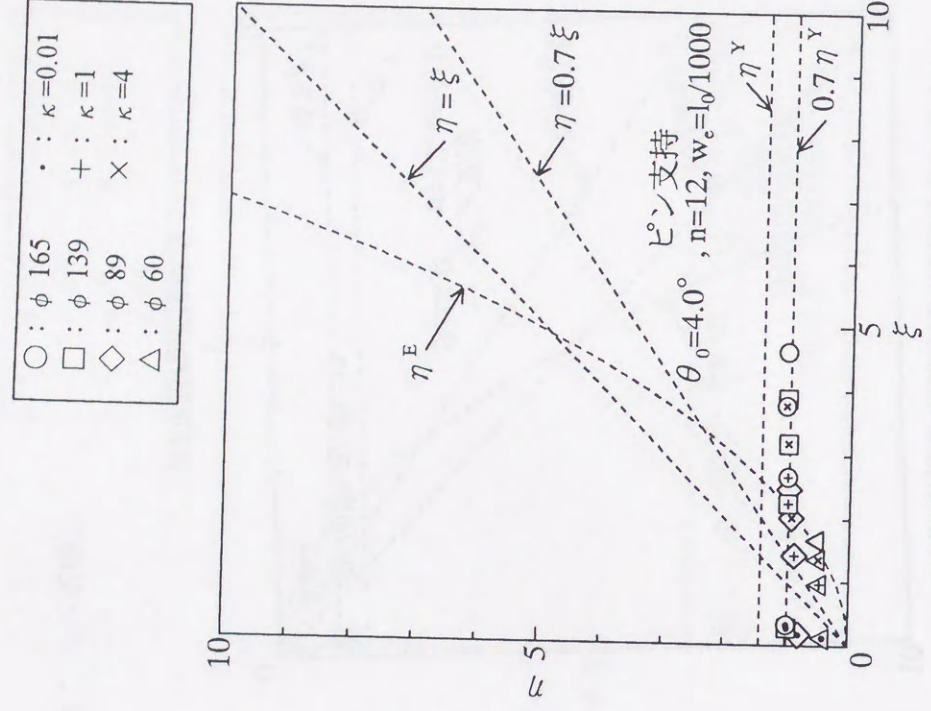


図 3-11 η と ξ の関係 (θ<sub>0</sub> = 4.0°, ピン支持)



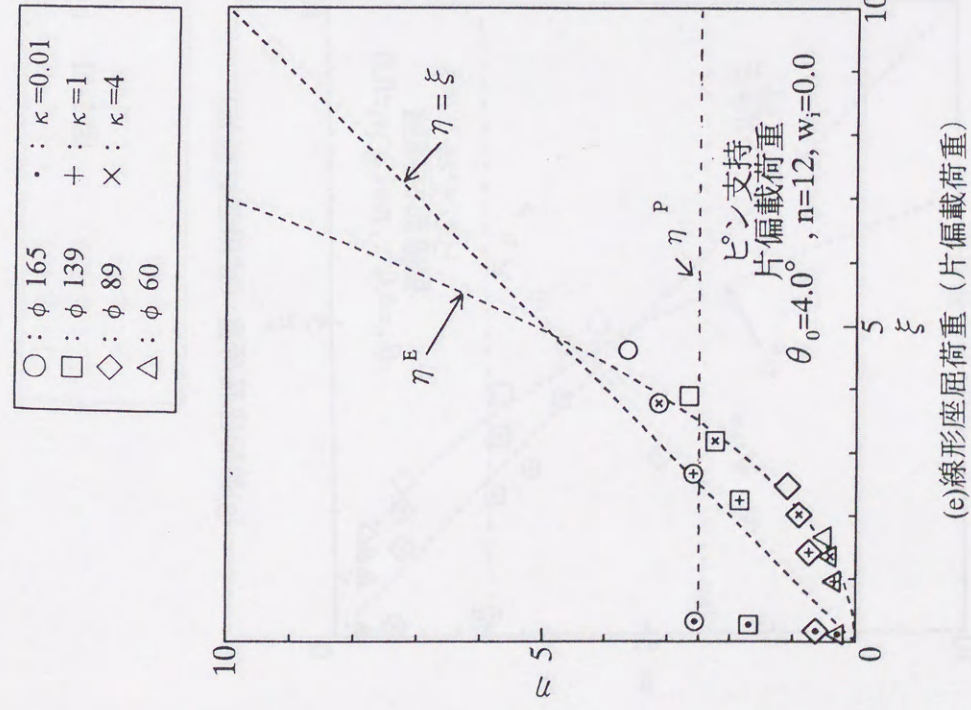


(c)弾塑性座屈荷重 (形状初期不整あり)

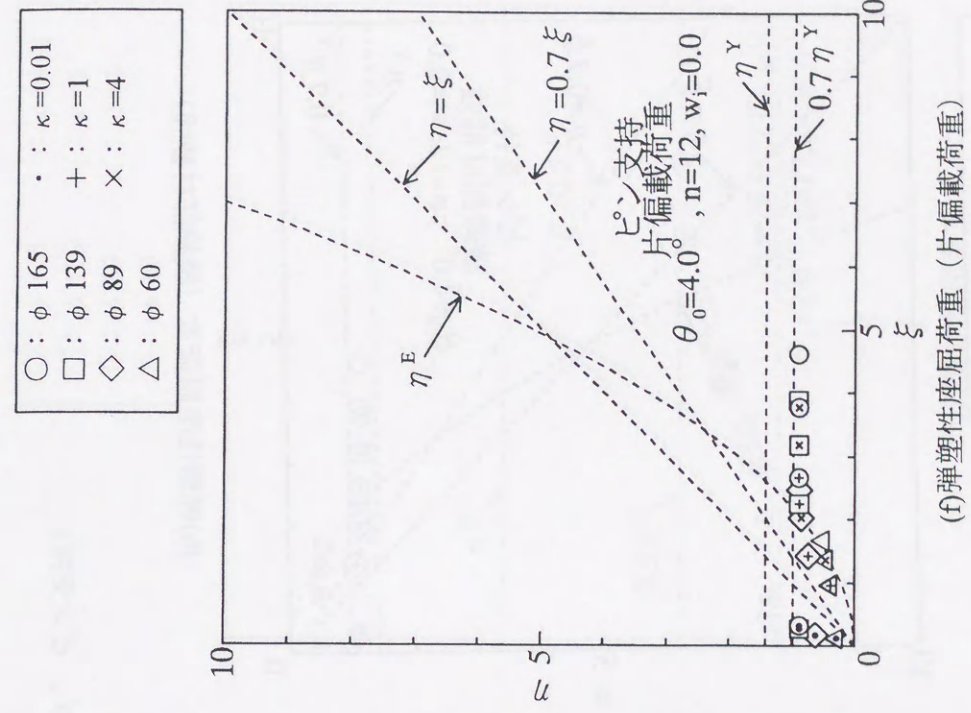


(d)弾塑性座屈荷重 (部材元たわみあり)

図 3-11 η と ξ の関係 ( $\theta_0 = 4.0^\circ$ , ピン支持)

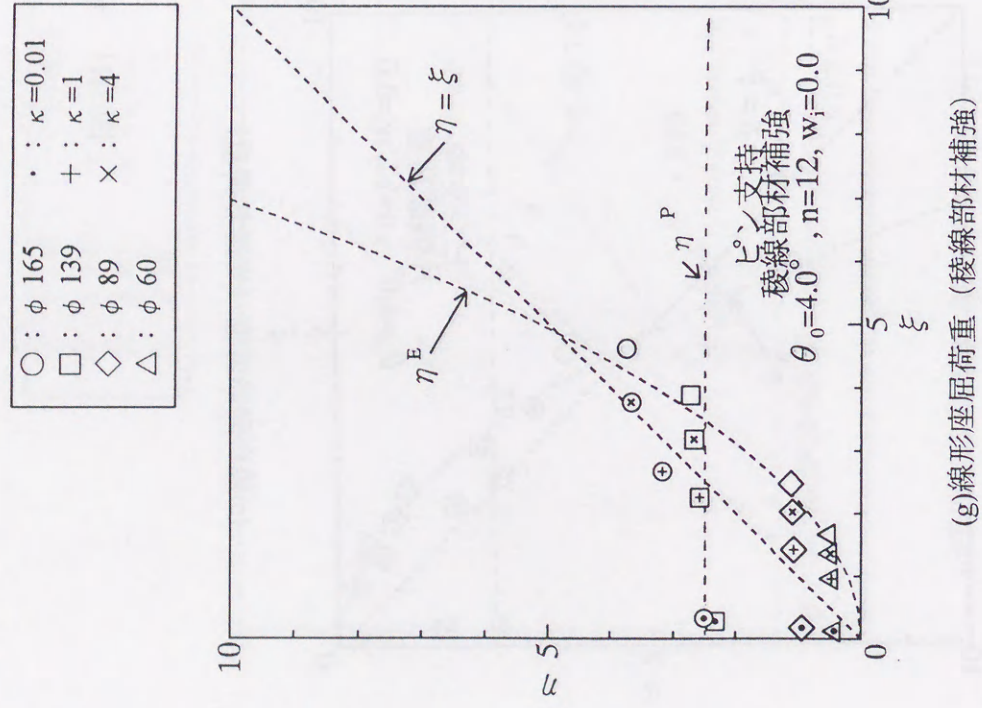


(e)線形座屈荷重 (片偏載荷重)

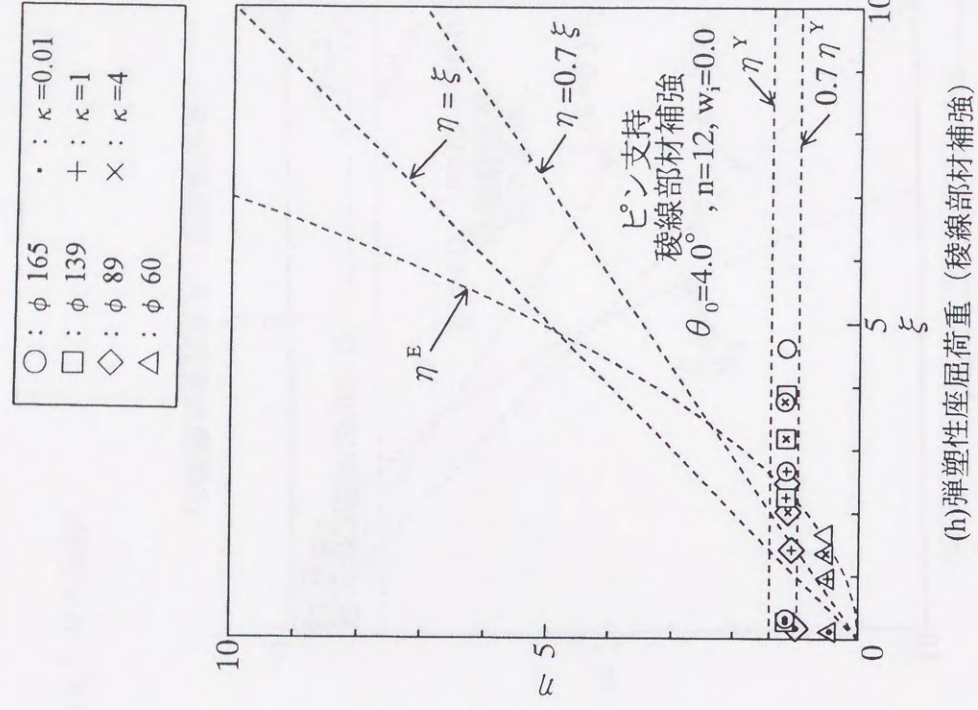


(f)弾塑性座屈荷重 (片偏載荷重)

図 3-11 η と ξ の関係 ( $\theta_0 = 4.0^\circ$ , ピン支持)

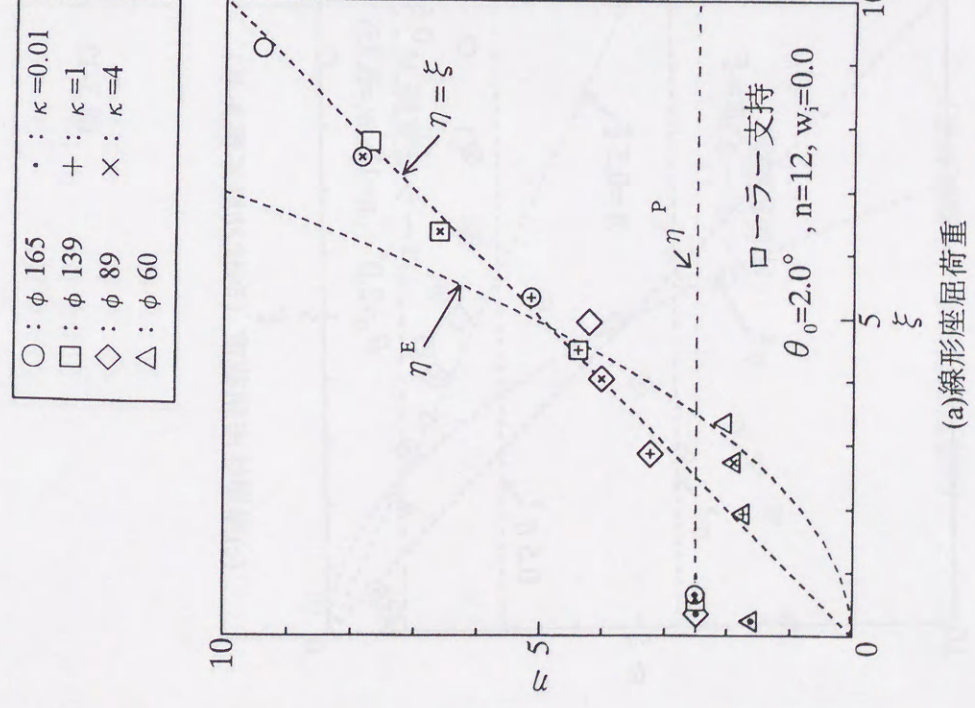


(g)線形座屈荷重 (稜線部材補強)

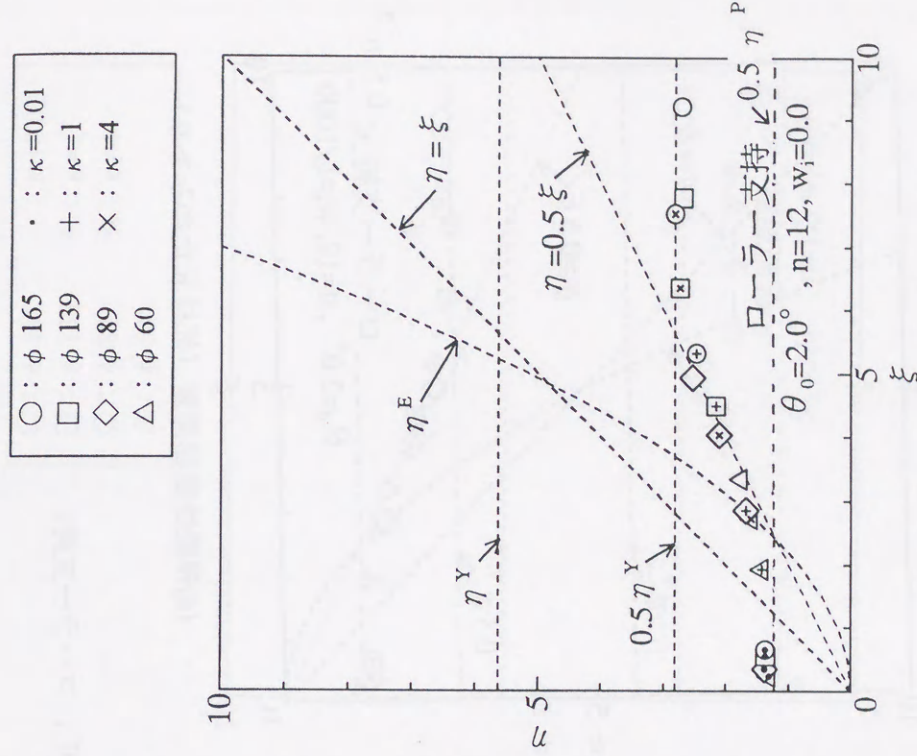


(h)弾塑性座屈荷重 (稜線部材補強)

図 3-11 η と ξ の関係 ( $\theta_0=4.0^\circ$ , ピン支持)



(a)線形座屈荷重



(b)弾塑性座屈荷重

図 3-12 η と ξ の関係 ( $\theta_0=2.0^\circ$ , ローラー支持)

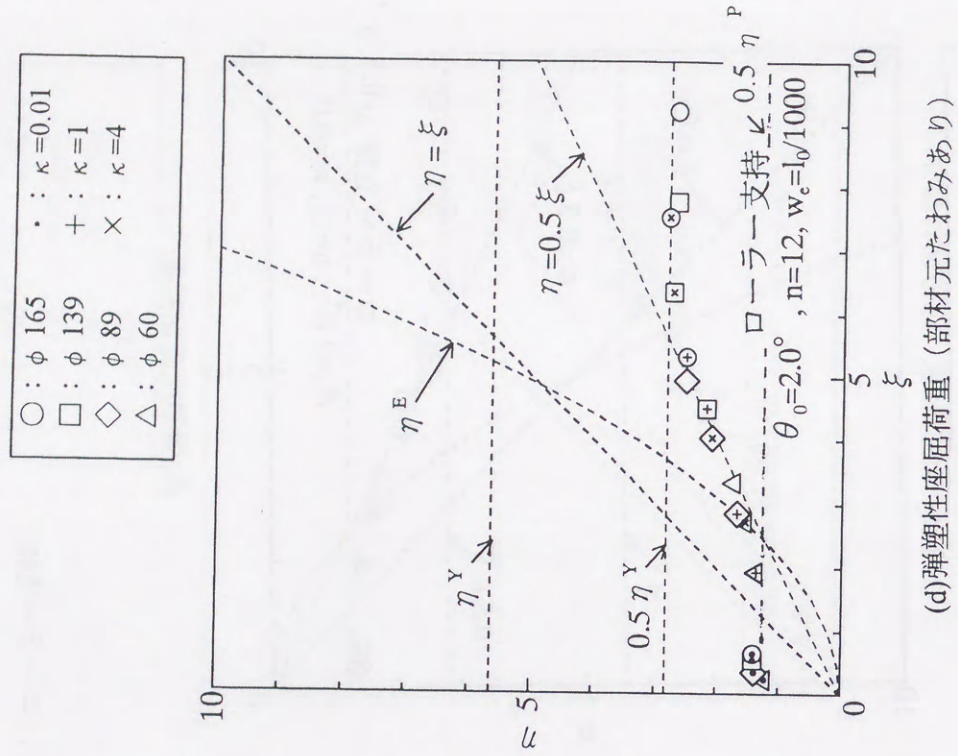
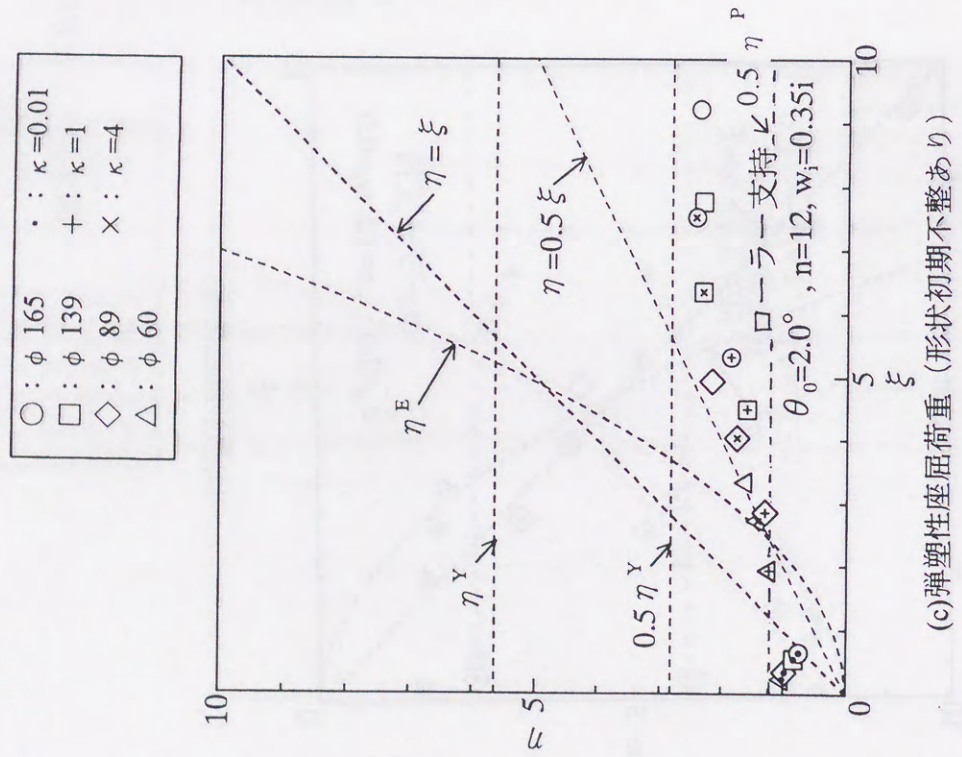


図 3-12 η と ξ の関係 ( $\theta_0 = 2.0^\circ$ , ロールー支持)

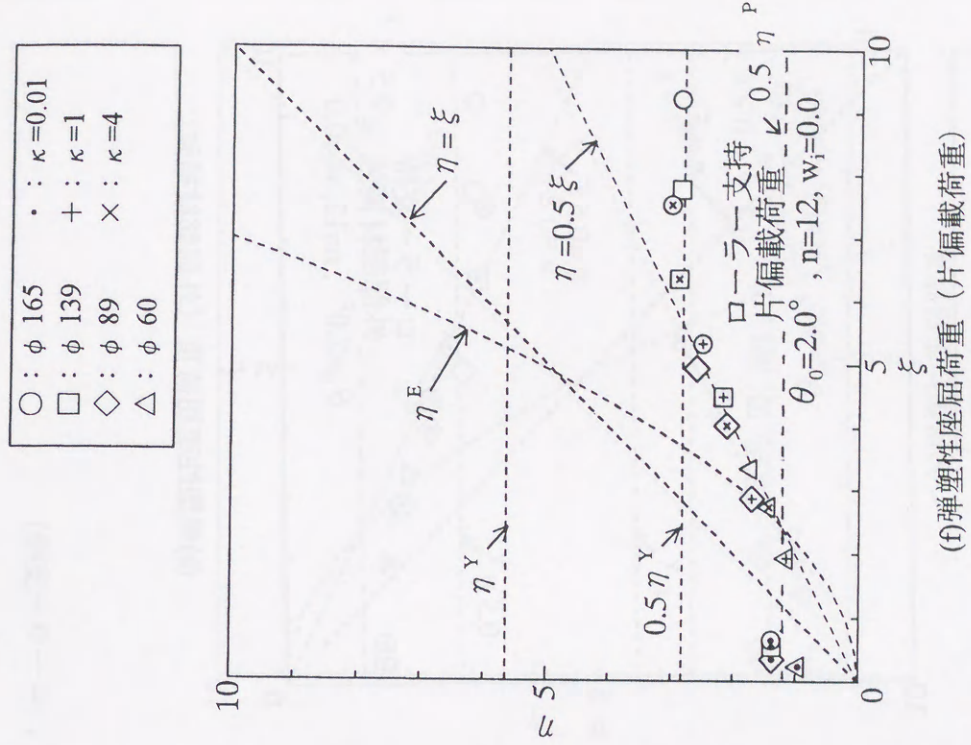
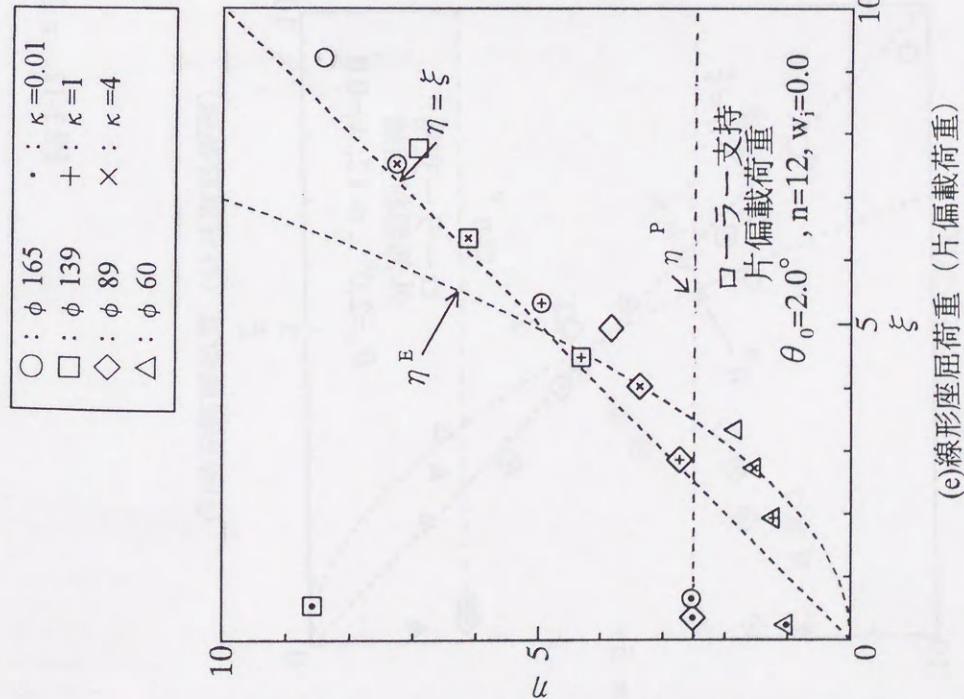
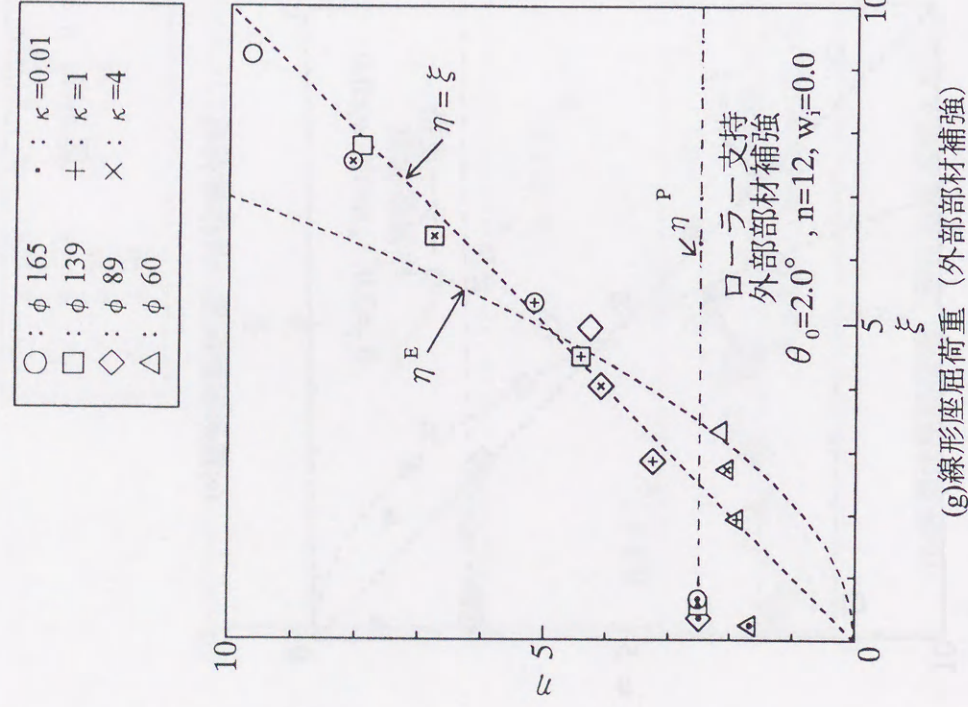
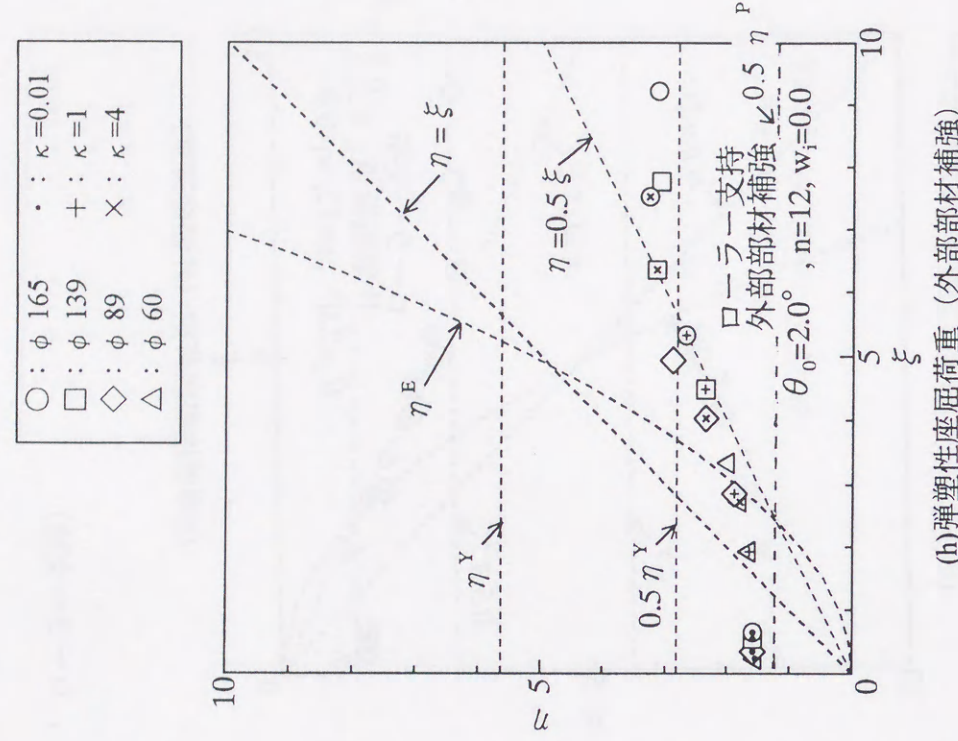


図 3-12 η と ξ の関係 ( $\theta_0 = 2.0^\circ$ , ロールー支持)

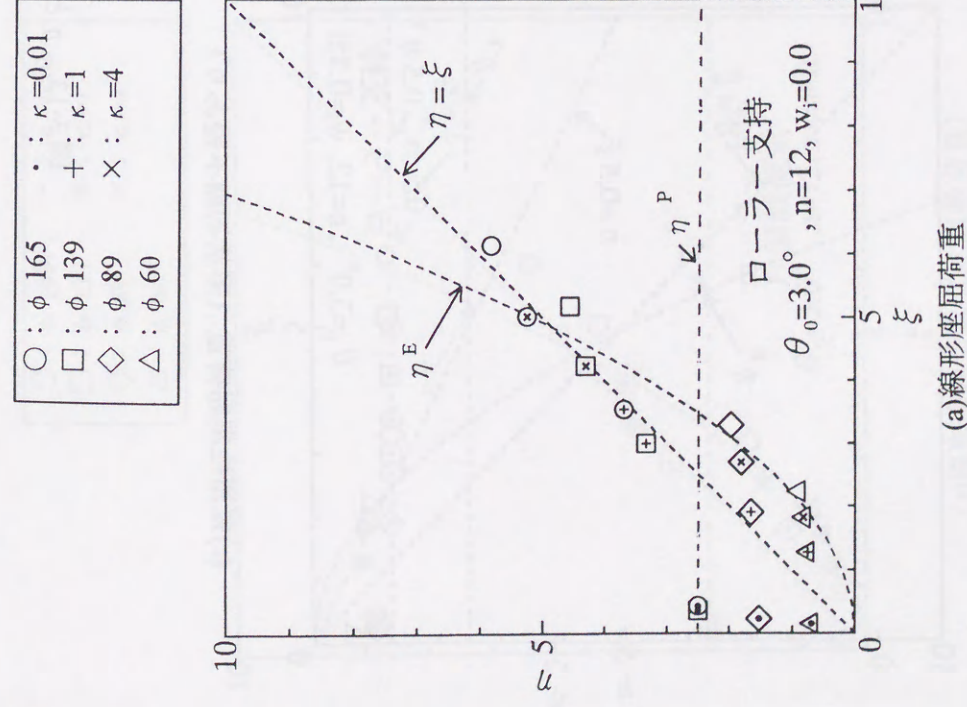


(g)線形座屈荷重 (外部部材補強)

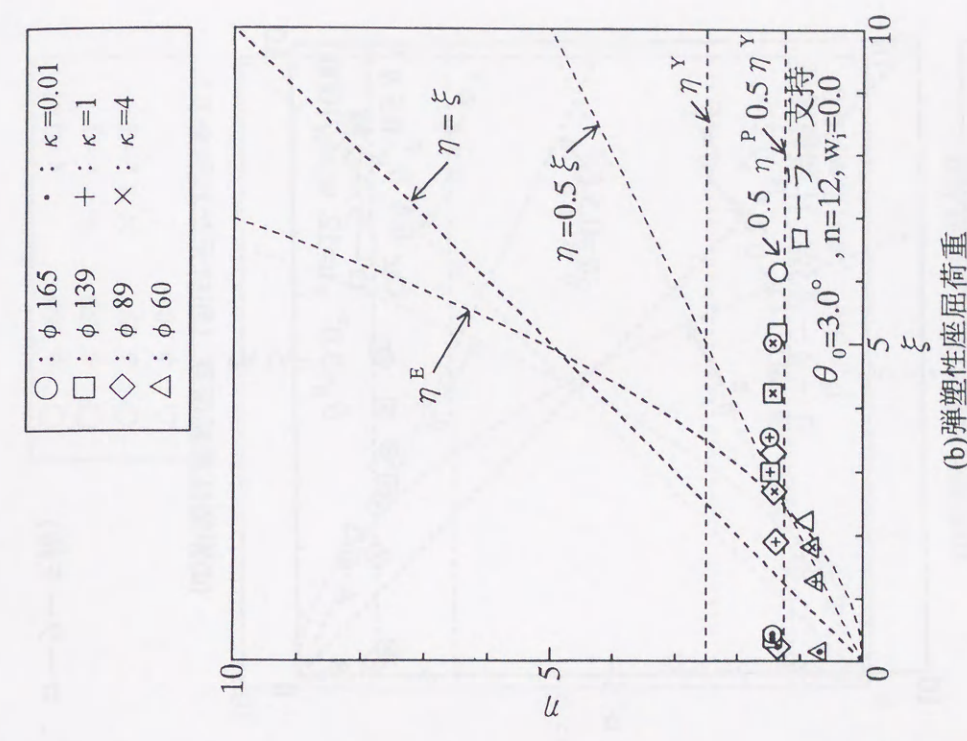


(h)弾塑性座屈荷重 (外部部材補強)

図 3-12  $\eta$  と  $\xi$  の関係 ( $\theta_0 = 2.0^\circ$ , ローラー支持)

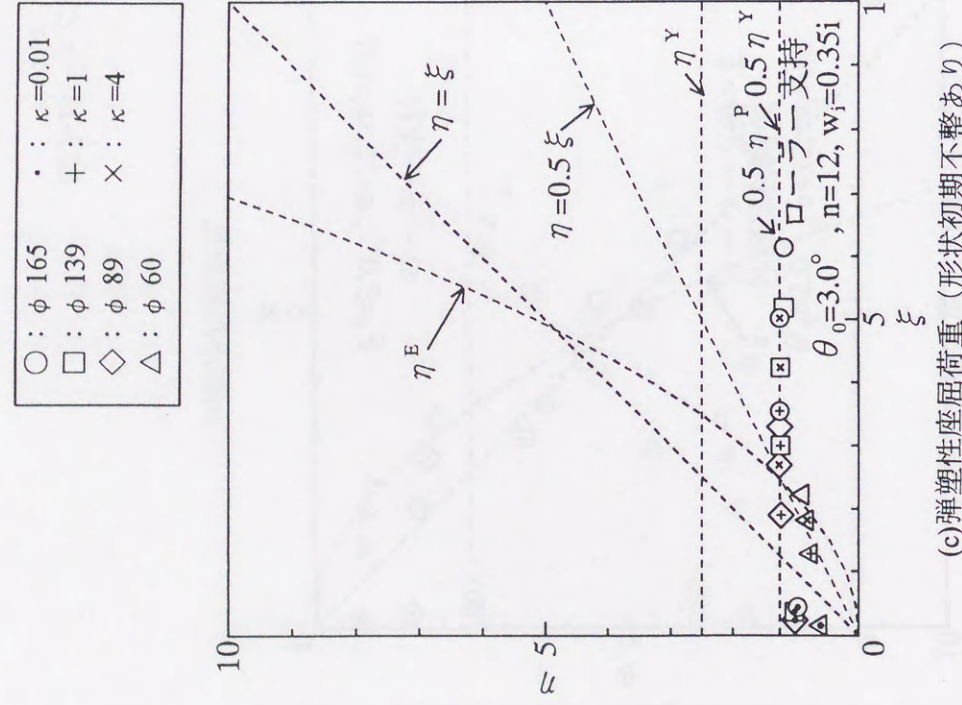


(a)線形座屈荷重

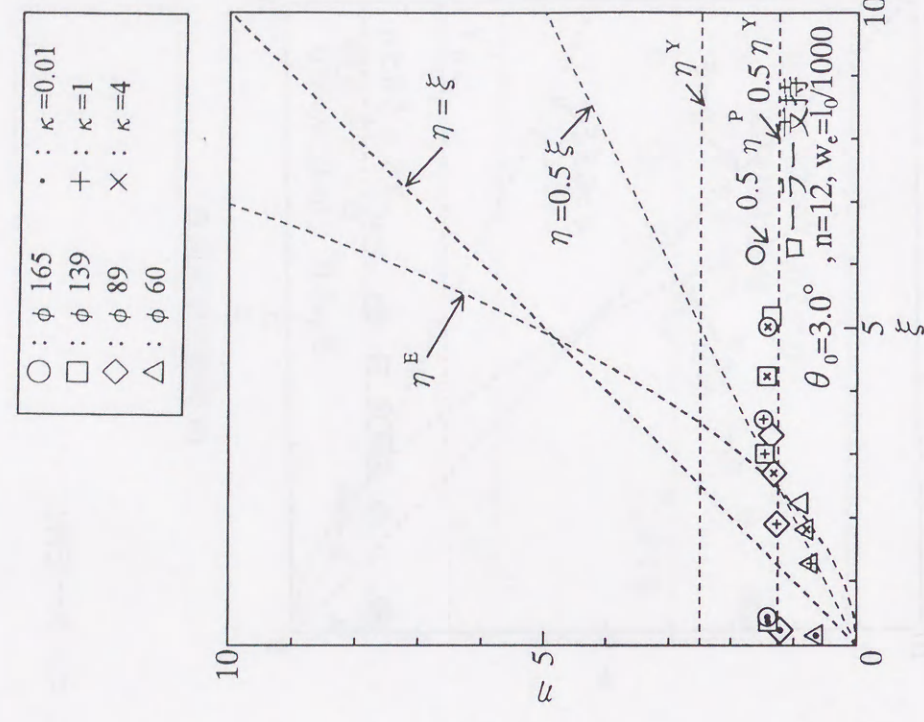


(b)弾塑性座屈荷重

図 3-13  $\eta$  と  $\xi$  の関係 ( $\theta_0 = 3.0^\circ$ , ローラー支持)

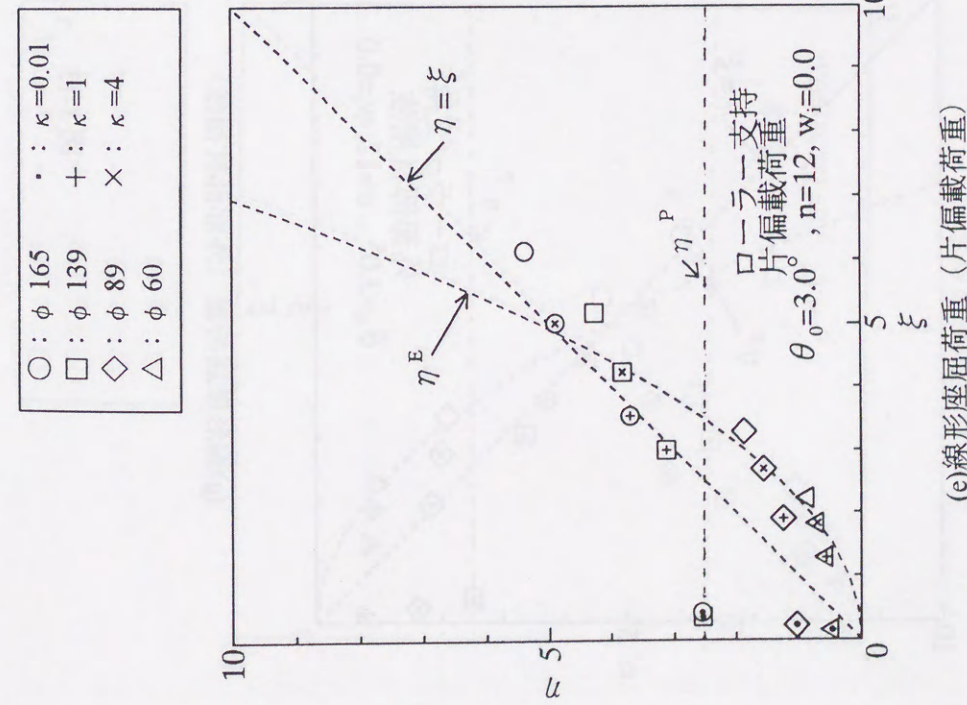


(c)弾塑性座屈荷重 (形状初期不整あり)

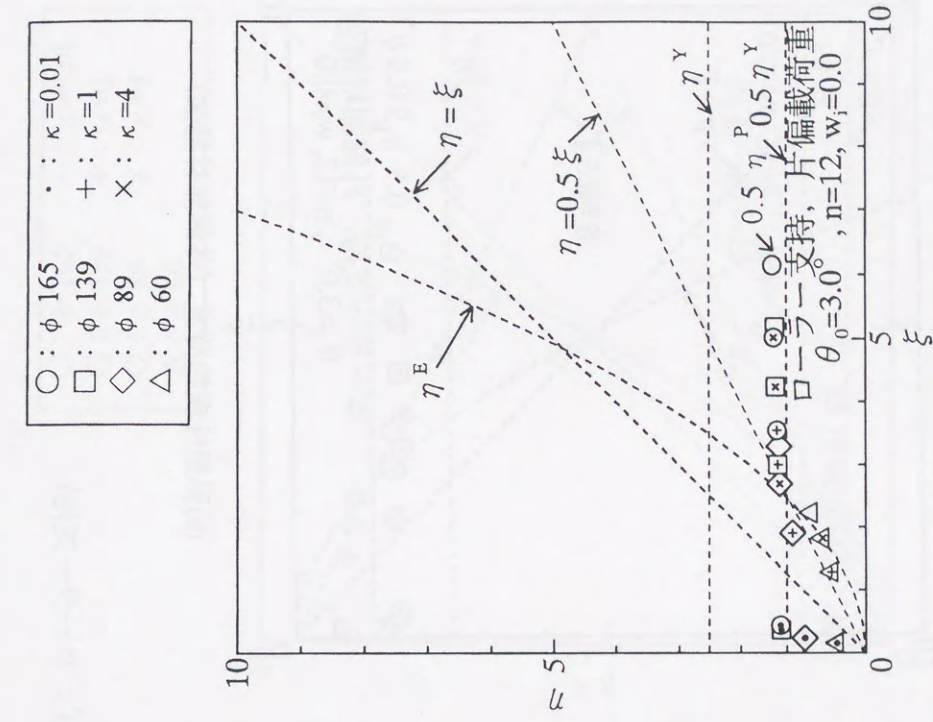


(d)弾塑性座屈荷重 (部材元たわみあり)

図 3-13 η と ξ の関係 (θ₀ = 3.0°, ローラー支持)

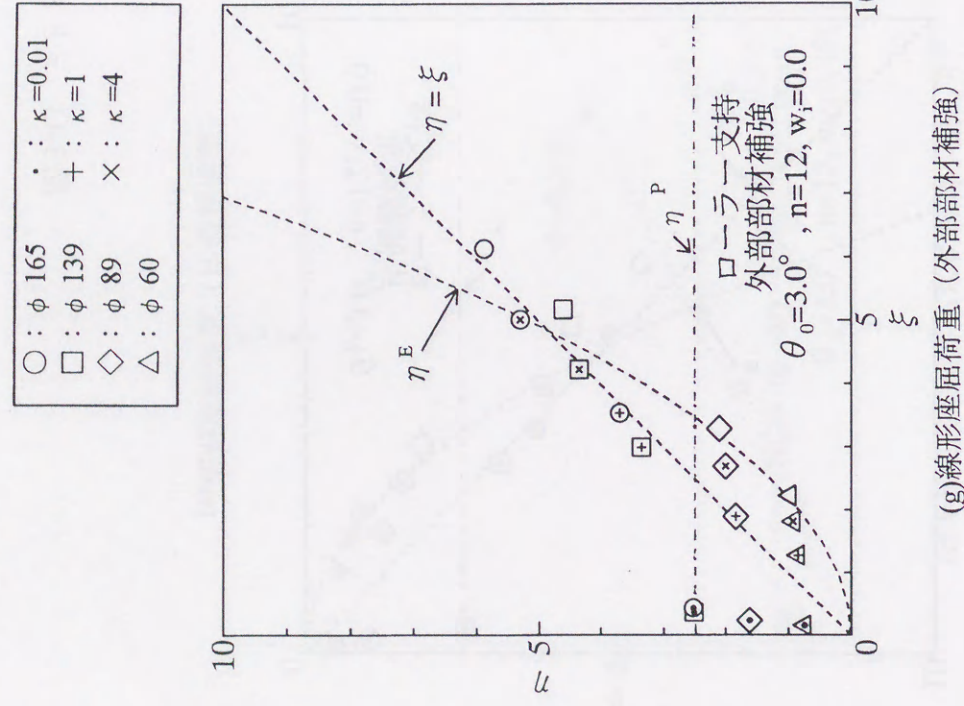


(e)線形座屈荷重 (片偏載荷重)

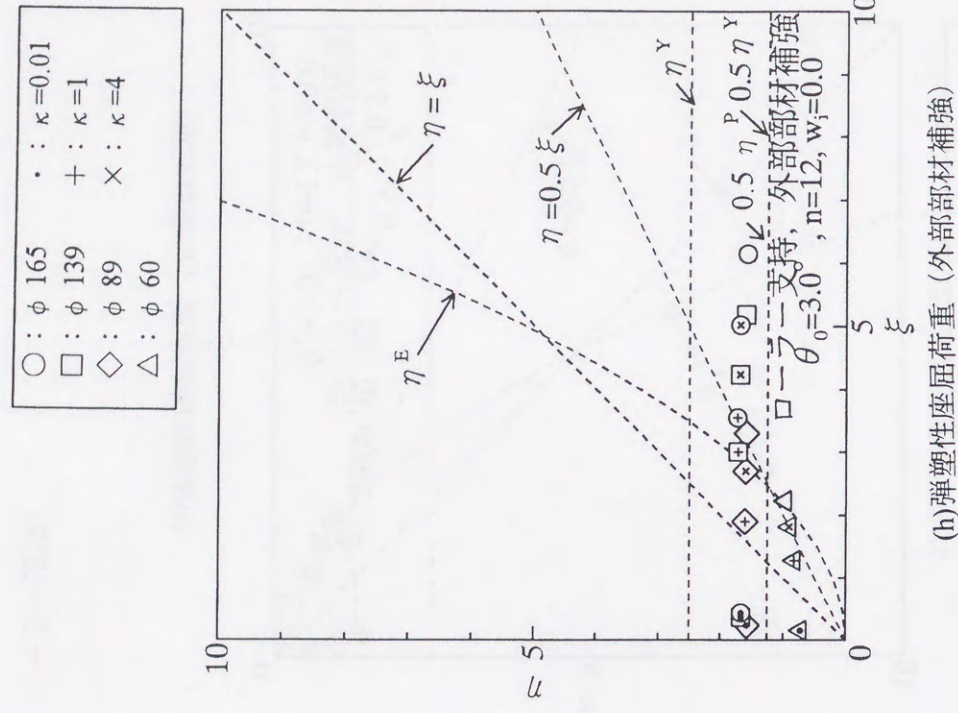


(f)弾塑性座屈荷重 (片偏載荷重)

図 3-13 η と ξ の関係 (θ₀ = 3.0°, ローラー支持)

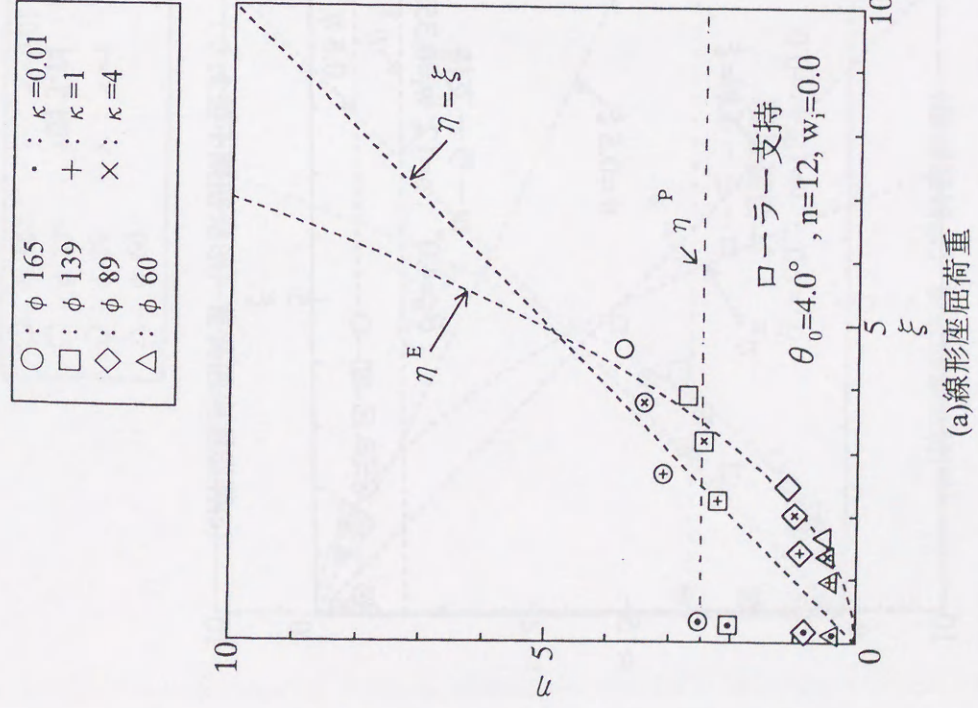


(g)線形座屈荷重 (外部部材補強)

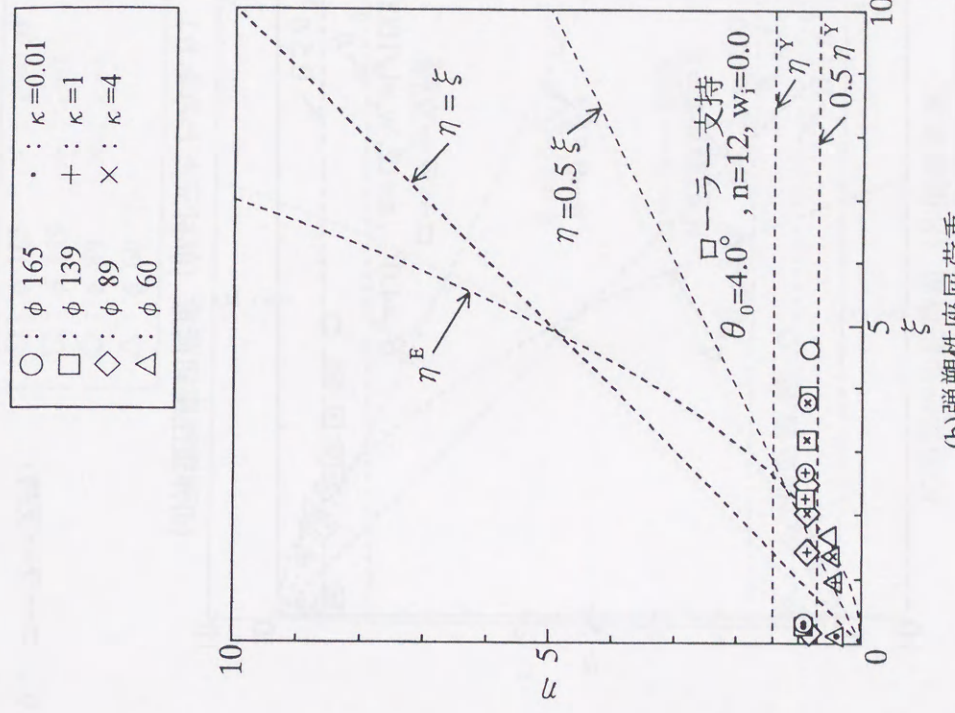


(h)弾塑性座屈荷重 (外部部材補強)

図 3-13 η と ξ の関係 (θ₀ = 3.0°, ローラー支持)



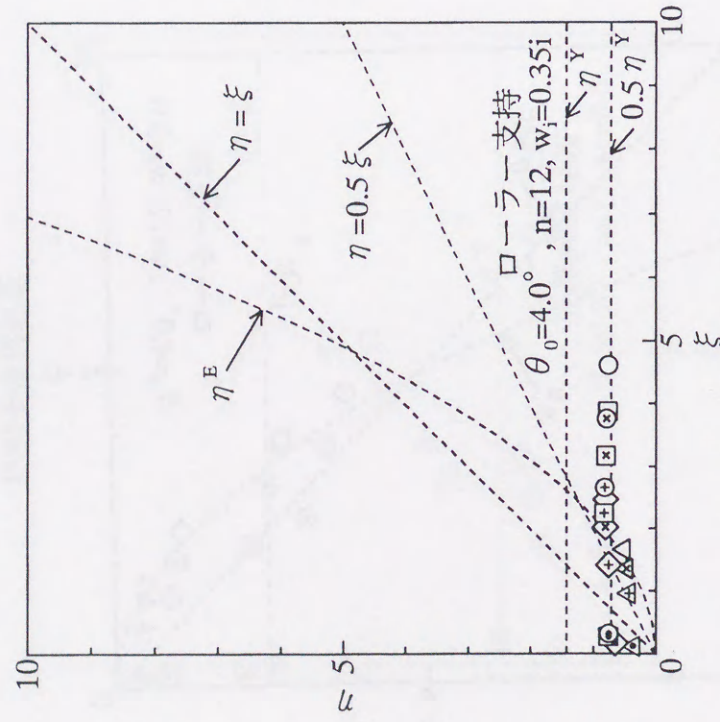
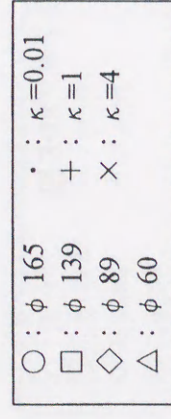
(a)線形座屈荷重



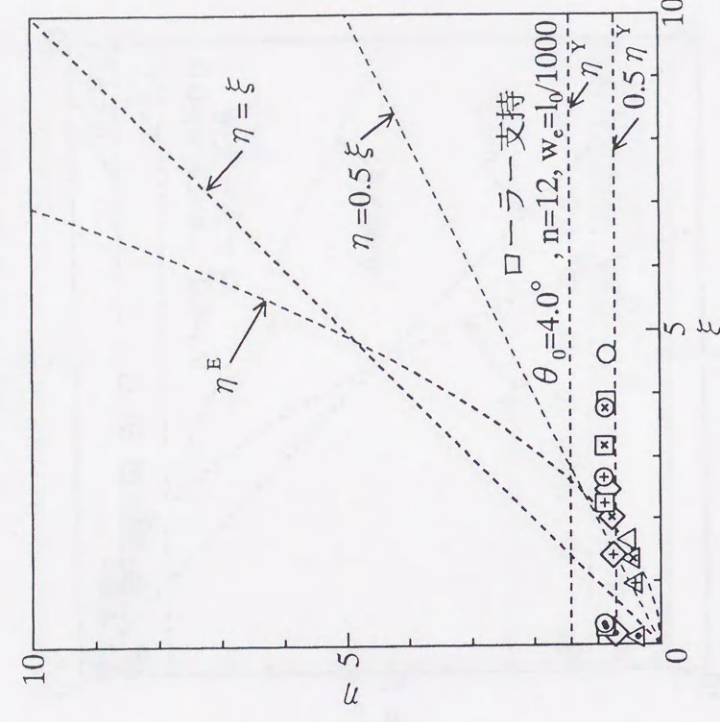
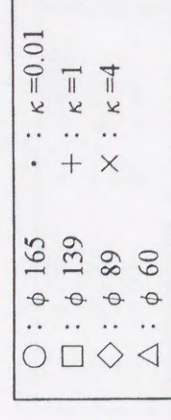
(b)弾塑性座屈荷重

図 3-14 η と ξ の関係 (θ₀ = 4.0°, ローラー支持)



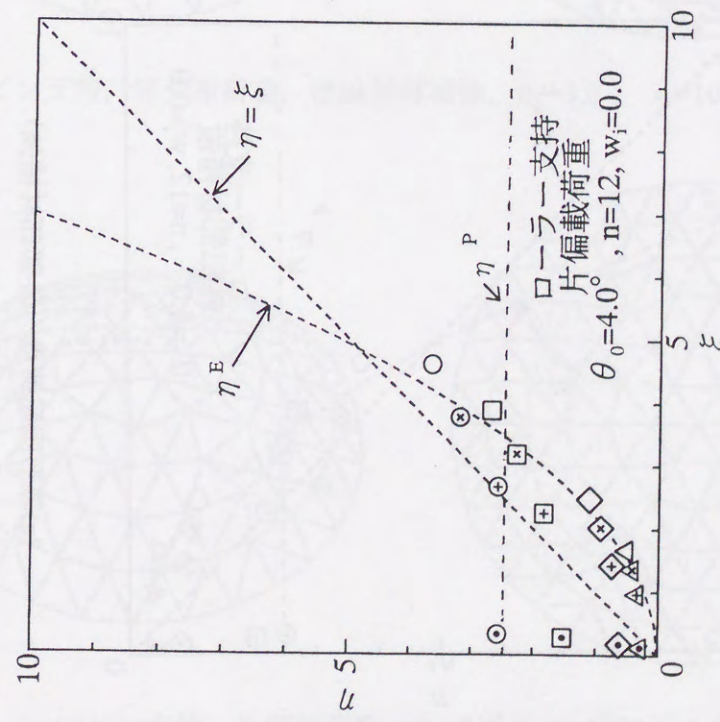
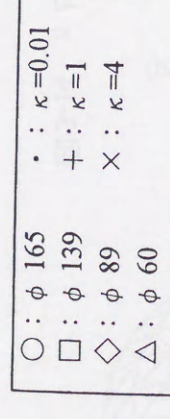


(c)弾塑性座屈荷重 (形状初期不整あり)

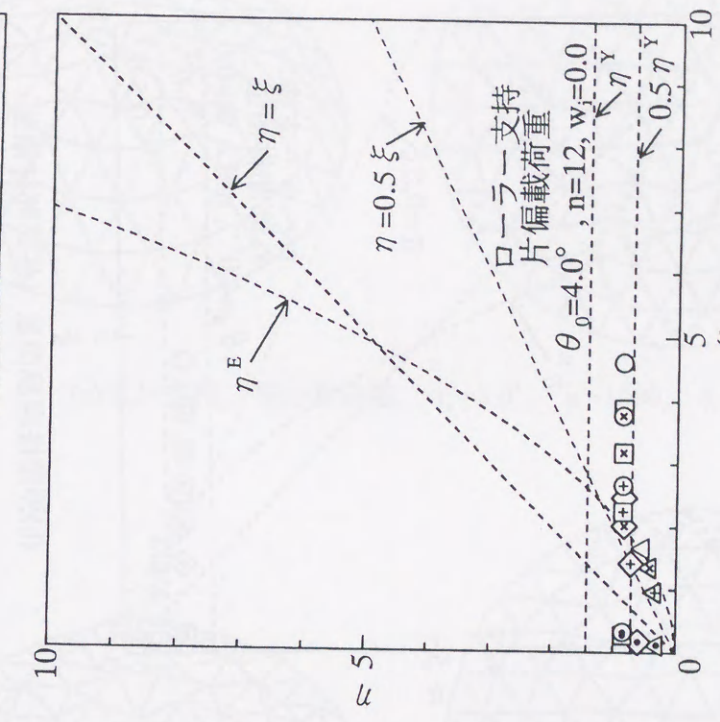
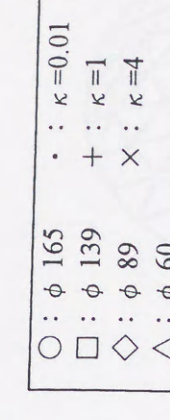


(d)弾塑性座屈荷重 (部材元たわみあり)

図 3-14 η と ξ の関係 ( $\theta_0=4.0^\circ$ , ロールー支持)

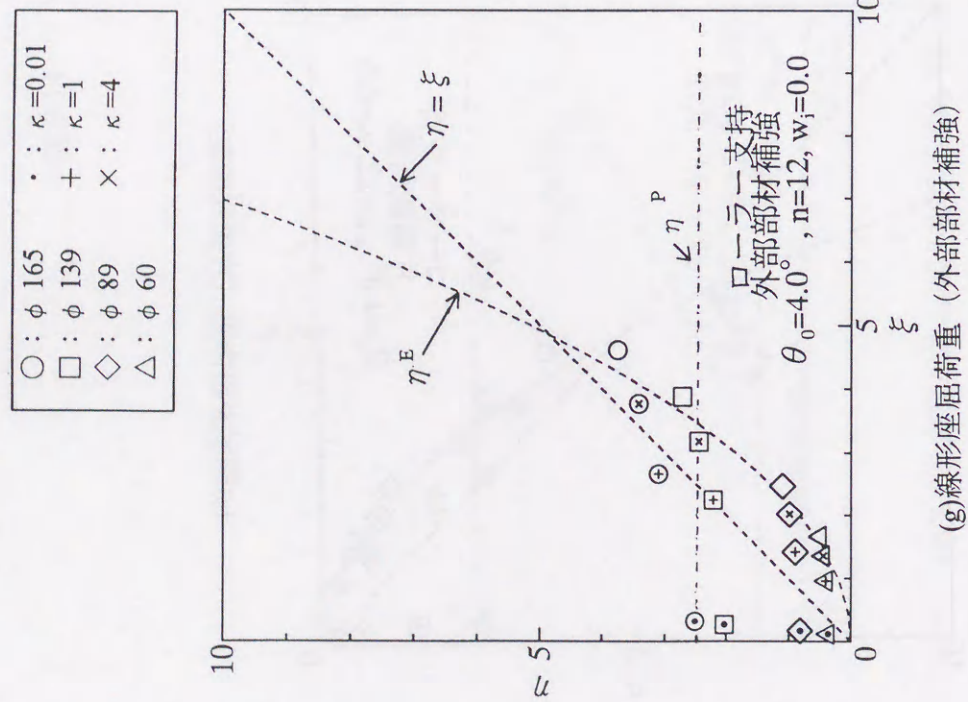


(e)線形座屈荷重 (片偏載荷重)

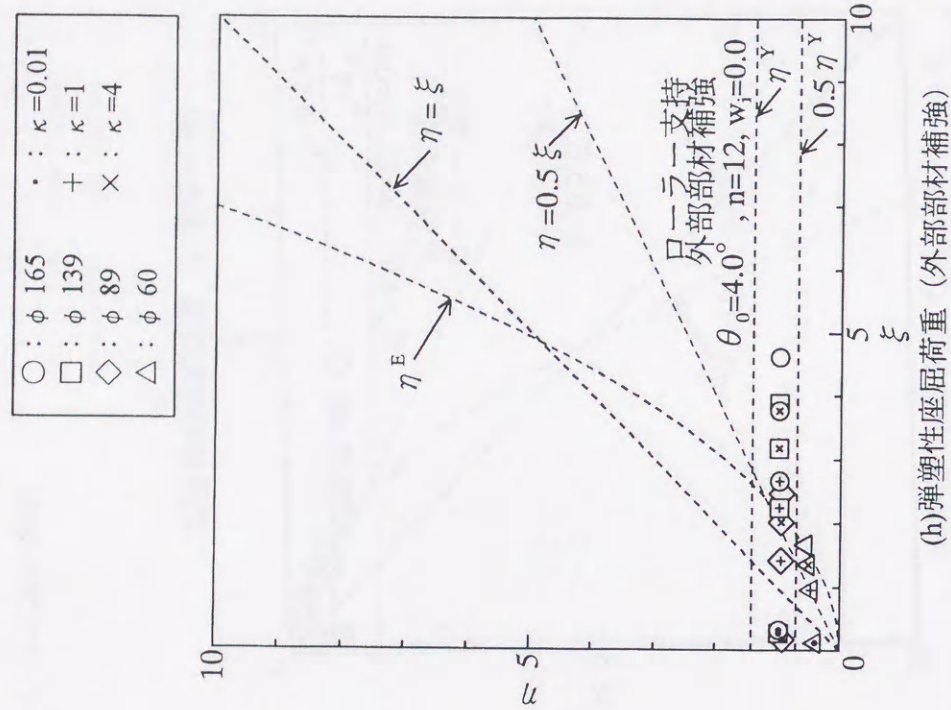


(f)弾塑性座屈荷重 (片偏載荷重)

図 3-14 η と ξ の関係 ( $\theta_0=4.0^\circ$ , ロールー支持)

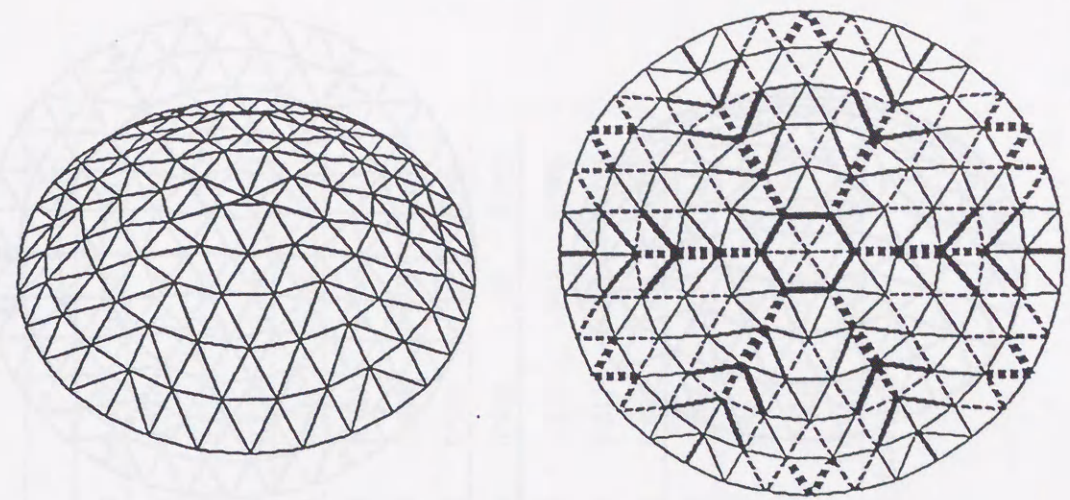


(g)線形座屈荷重 (外部部材補強)

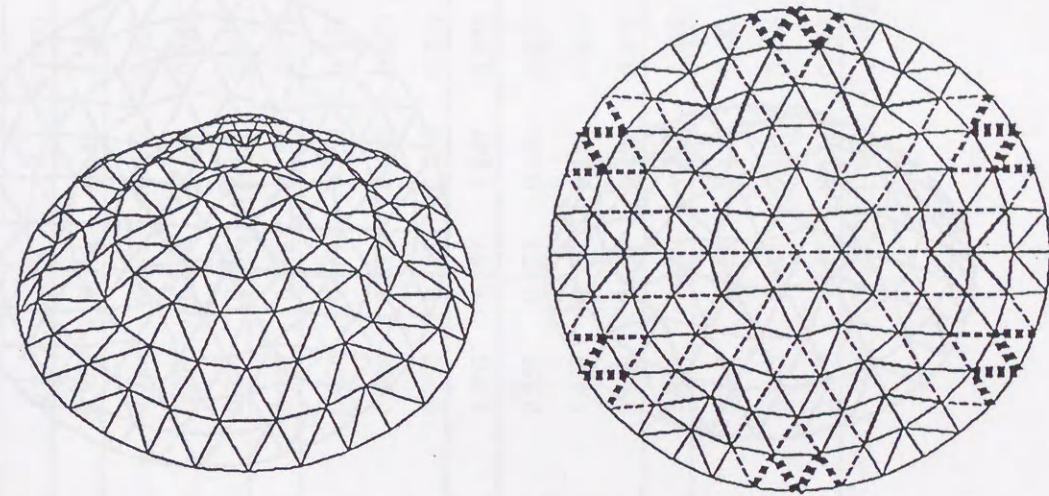


(h)弾塑性座屈荷重 (外部部材補強)

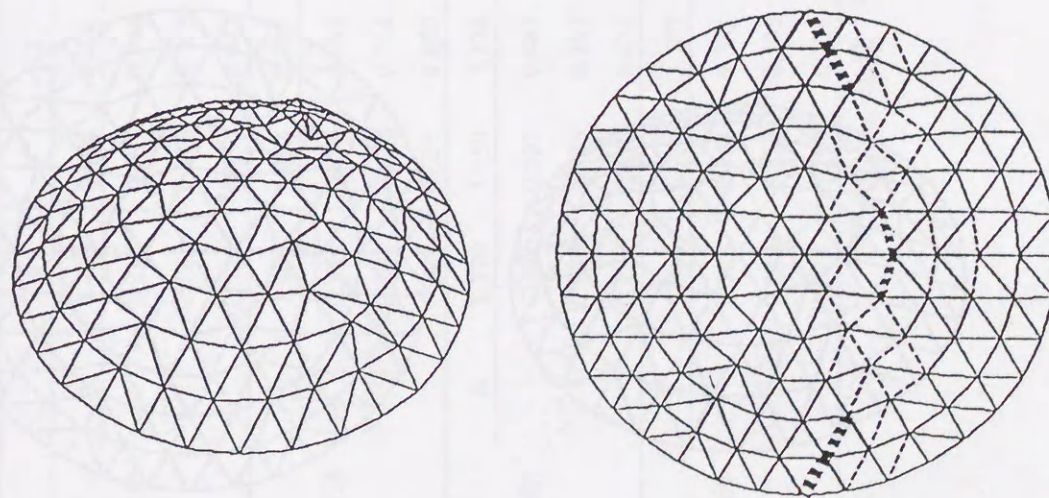
図 3-14 η と ξ の関係 ( $\theta_0=4.0^\circ$ , ローラー支持)



(a)ピン支持, 等分布荷重,  $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $\kappa=1000$ , φ 89



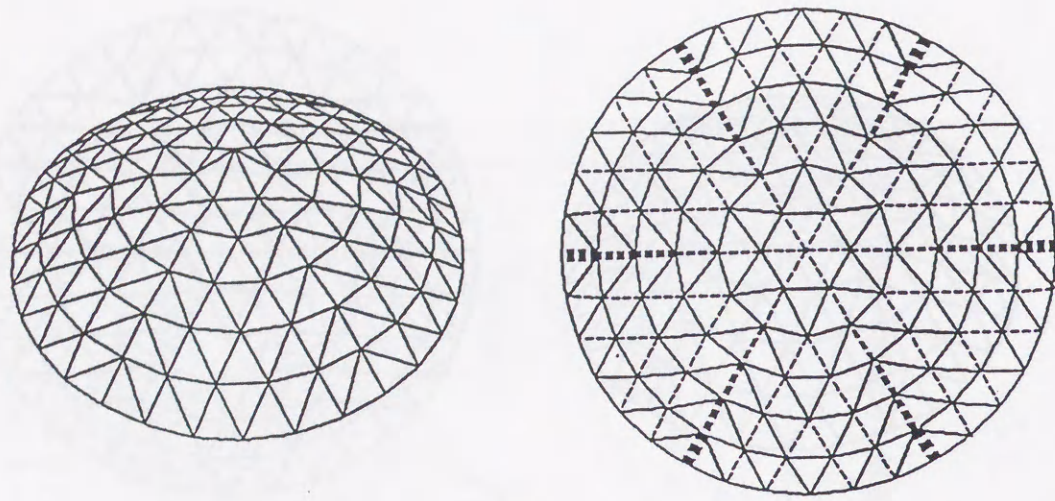
(b)ピン支持, 等分布荷重, 稜線部材補強,  $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $\kappa=1000$ , φ 89



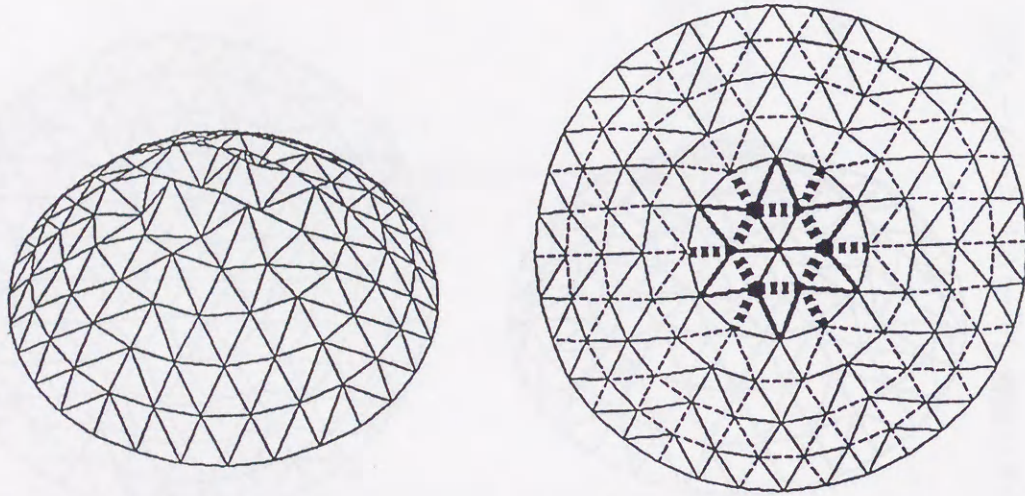
(c)ピン支持, 片偏載荷重,  $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $\kappa=1000$ , φ 89

実線 : 正值, 破線 : 負値 (線の太さは絶対値の大きさを表す)

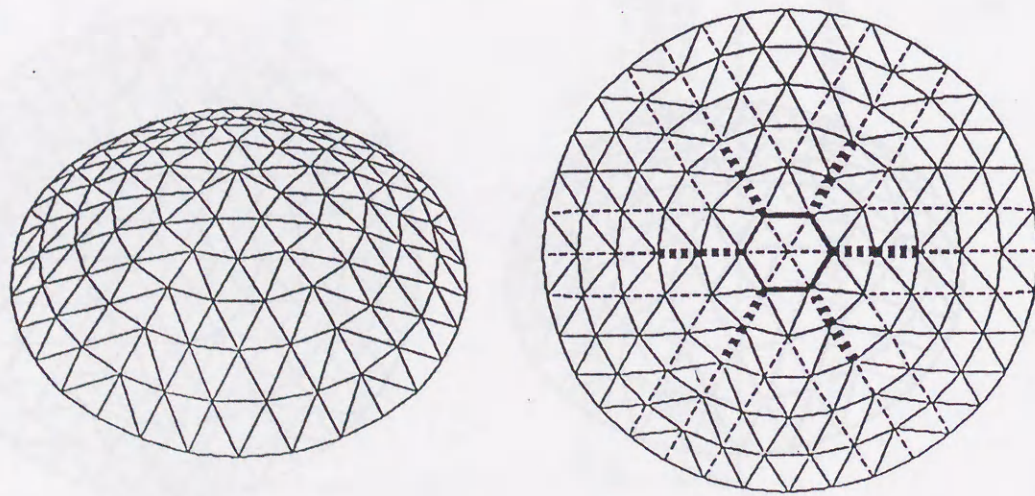
図 3-15 座屈モードと歪エネルギー分布



(d)ローラー支持, 等分布荷重,  $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $\kappa=1000$ ,  $\phi$  89



(e)ローラー支持, 等分布荷重,  $\theta_0=4.0^\circ$ ,  $\kappa=0.01$ ,  $\phi$  165



(f)ローラー支持, 等分布荷重, 外部部材補強,  $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $\kappa=1000$ ,  $\phi$  89

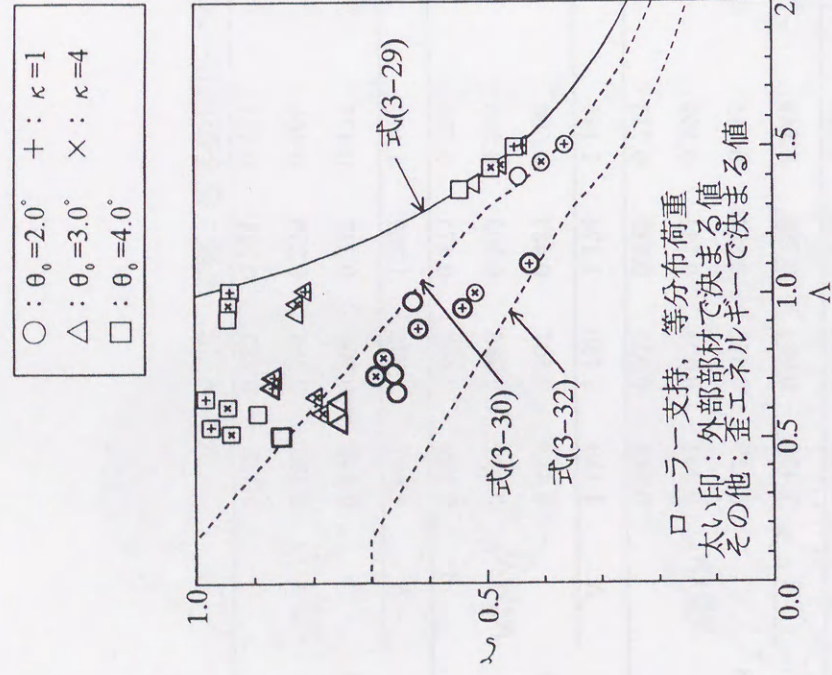
実線: 正值, 破線: 負値 (線の太さは絶対値の大きさを表す)

図 3-15 座屈モードと歪エネルギー分布

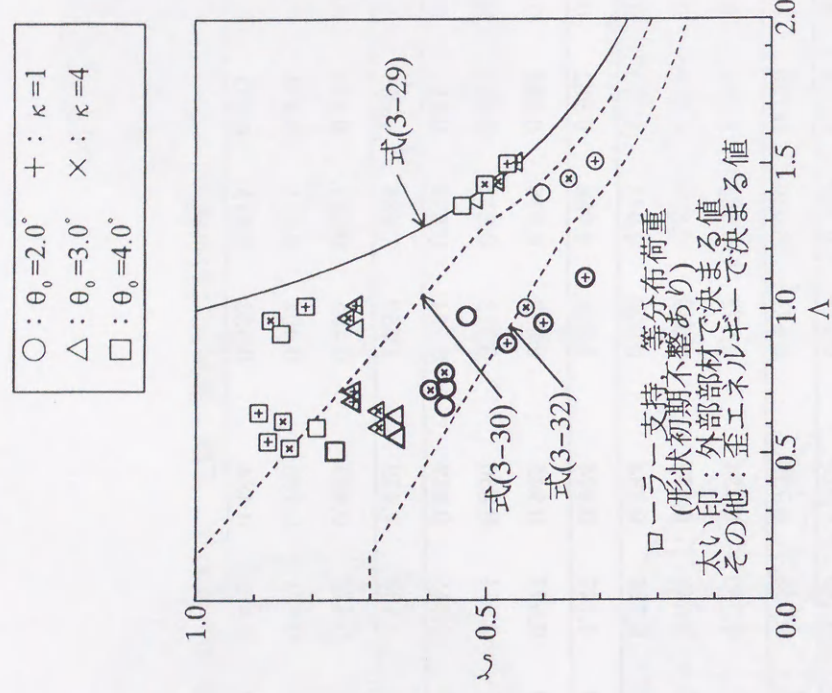
表 3-9 正規化細長比  $\Lambda$ , 座屈軸力  $N_{cr}^{pl} / N_y$  [ $n=12$ ,  $l_0=3m$ , 周辺ピン支持, 等分布荷重]

$\theta_0$	2.0			3.0			4.0						
	$\kappa$	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	$\Lambda$	1.462	0.906	0.728	0.771	0.981	0.718	0.687	0.567	0.740	0.657	0.618	0.611
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.338	0.753	0.944	0.733	0.729	0.973	0.752	0.992	0.746	0.749	0.740	0.741
$\phi$ 138	$\Lambda$	0.182	0.531	0.765	0.626	0.501	0.808	0.658	0.881	0.627	0.699	0.703	0.701
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.329	0.751	0.942	0.725	0.709	0.948	0.743	0.973	0.719	0.729	0.739	0.732
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.465	0.983	0.794	0.849	0.982	0.848	0.758	0.738	0.671	0.636	0.726	0.719
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.329	0.658	0.882	0.715	0.726	0.767	0.750	0.754	0.978	0.981	0.734	0.739
$\phi$ 60	$\Lambda$	0.202	0.471	0.711	0.599	0.528	0.637	0.648	0.657	0.829	0.899	0.699	0.694
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.328	0.653	0.880	0.713	0.702	0.755	0.728	0.734	0.928	0.943	0.713	0.725
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.320	1.150	1.174	1.149	1.303	1.157	1.147	0.974	1.056	0.988	0.982	0.971
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.413	0.501	0.487	0.604	0.559	0.672	0.693	0.945	0.882	0.976	0.984	0.986
$\phi$ 60	$\Lambda$	0.289	0.385	0.393	0.500	0.421	0.557	0.614	0.850	0.713	0.811	0.901	0.916
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.400	0.495	0.475	0.576	0.503	0.608	0.645	0.939	0.761	0.839	0.891	0.927
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.567	1.738	1.707	1.447	1.864	1.486	1.458	1.439	1.567	1.484	1.455	1.434
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.348	0.304	0.333	0.475	0.267	0.451	0.472	0.483	0.405	0.453	0.474	0.487
$\phi$ 60	$\Lambda$	0.289	0.254	0.295	0.466	0.252	0.444	0.471	0.486	0.404	0.451	0.474	0.494
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.338	0.287	0.321	0.473	0.249	0.440	0.472	0.484	0.386	0.445	0.473	0.487

$N_{cr}^{pl} / N_y$  は, 上段: 完全形状ドーム, 中段: 形状初期不整あり, 下段: 部材元たわみあり



(a)等分布荷重



(b)等分布荷重, 形状初期不整あり

図 3-17 正規化細長比と軸力の関係 (ローラー支持ドーム)

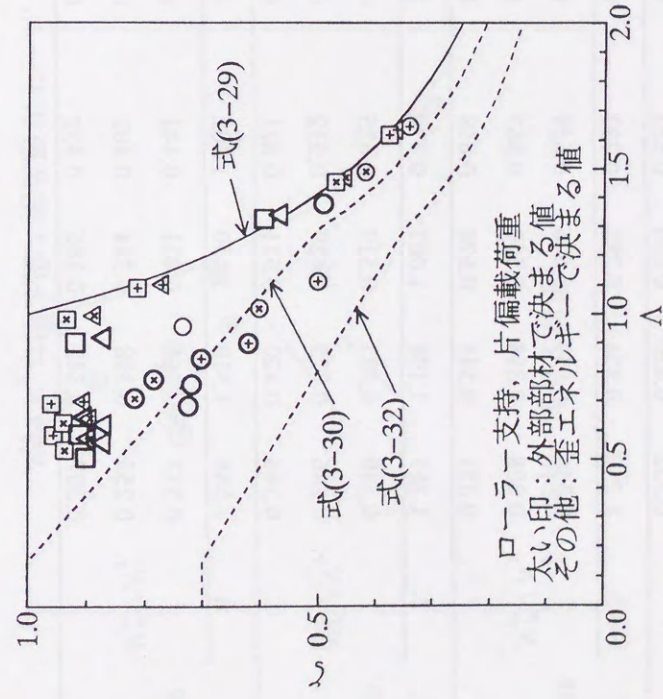
表 3-10 正規化細長比  $\Lambda$ , 座屈軸力  $N_{cr}^{pl} / N_y$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ピン支持, 片偏載荷重]

$\theta_0$	$\Lambda$												
	0.01	1	4	1000									
$\kappa$	0.01	1	4	1000									
$\phi$ 165	$\Lambda$	1.236	0.875	0.720	0.683	0.827	0.697	0.615	0.585	0.622	0.591	0.543	0.544
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.386	0.805	0.855	0.813	0.818	0.822	0.811	0.834	0.882	0.973	0.960	0.833
$\phi$ 138	$\Lambda$	1.238	0.970	0.809	0.754	0.828	0.707	0.653	0.655	0.816	0.699	0.639	0.637
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.381	0.662	0.791	0.827	0.817	0.973	0.935	0.830	0.776	0.975	0.962	0.826
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.242	1.119	1.031	1.026	1.202	1.109	1.011	0.927	1.190	1.099	1.000	0.980
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.386	0.600	0.754	0.764	0.667	0.789	0.910	0.924	0.697	0.821	0.939	0.839
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.794	1.656	1.510	1.381	1.781	1.645	1.493	1.357	1.766	1.629	1.480	1.352
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.311	0.379	0.469	0.520	0.320	0.411	0.502	0.549	0.320	0.422	0.509	0.558

表 3-11 正規化細長比  $\Lambda$ , 座屈軸力  $N_{\sigma}^{pl} / N_y$  [ $r=12, l_0=3m$ , 周辺ピン支持, 稜線部材補強]

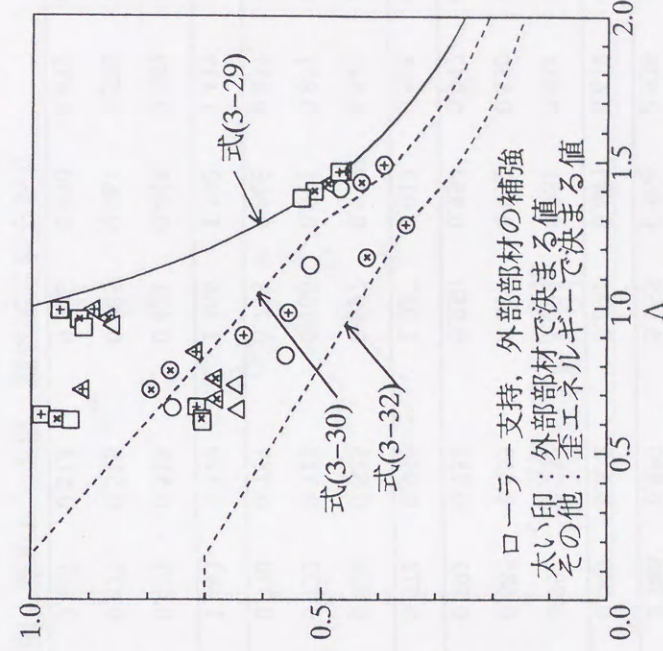
$\theta_0$	2.0				3.0				4.0				
	$\kappa$	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi 165$	$\Lambda$	1.437	0.972	0.772	0.773	0.964	0.770	0.634	0.652	0.727	0.651	0.614	0.606
	$N_{\sigma}^{pl} / N_y$	0.351	0.670	0.876	0.754	0.816	0.938	0.963	0.832	0.844	0.833	0.857	0.839
$\phi 138$	$\Lambda$	1.440	1.055	0.845	0.855	0.964	0.810	0.801	0.737	0.816	0.735	0.725	0.715
	$N_{\sigma}^{pl} / N_y$	0.345	0.582	0.812	0.739	0.814	0.927	0.737	0.830	0.701	0.820	0.828	0.823
$\phi 89$	$\Lambda$	1.443	1.236	1.176	1.156	1.083	1.164	1.143	1.127	1.285	1.158	1.136	1.057
	$N_{\sigma}^{pl} / N_y$	0.346	0.441	0.493	0.597	0.789	0.737	0.767	0.788	0.602	0.751	0.795	0.900
$\phi 60$	$\Lambda$	1.673	1.737	1.703	1.678	1.667	1.725	1.691	1.661	1.906	1.717	1.683	1.562
	$N_{\sigma}^{pl} / N_y$	0.330	0.319	0.345	0.356	0.390	0.337	0.351	0.362	0.276	0.346	0.363	0.413

○ :  $\theta_0=2.0^\circ$     + :  $\kappa=1$   
 △ :  $\theta_0=3.0^\circ$     × :  $\kappa=4$   
 □ :  $\theta_0=4.0^\circ$



(c)片偏載荷重

○ :  $\theta_0=2.0^\circ$     + :  $\kappa=1$   
 △ :  $\theta_0=3.0^\circ$     × :  $\kappa=4$   
 □ :  $\theta_0=4.0^\circ$



(d)等分布荷重, 外部部材補強

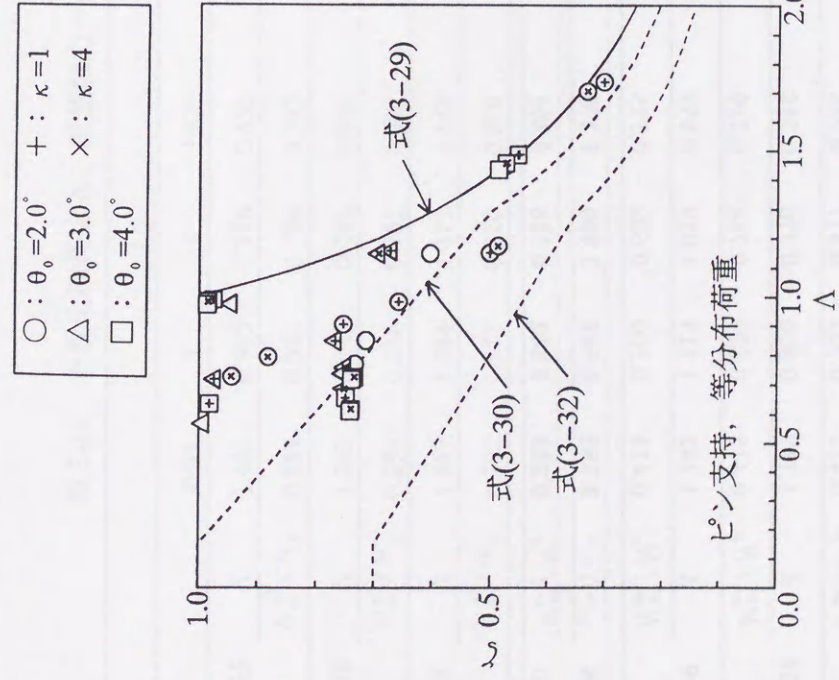
※このケースではすべて歪エネルギーで決まり, 外部部材で決まる値 (太い印) が存在しない。

図 3-17 正規化細長比と軸力の関係 (ローラー支持ドーム)

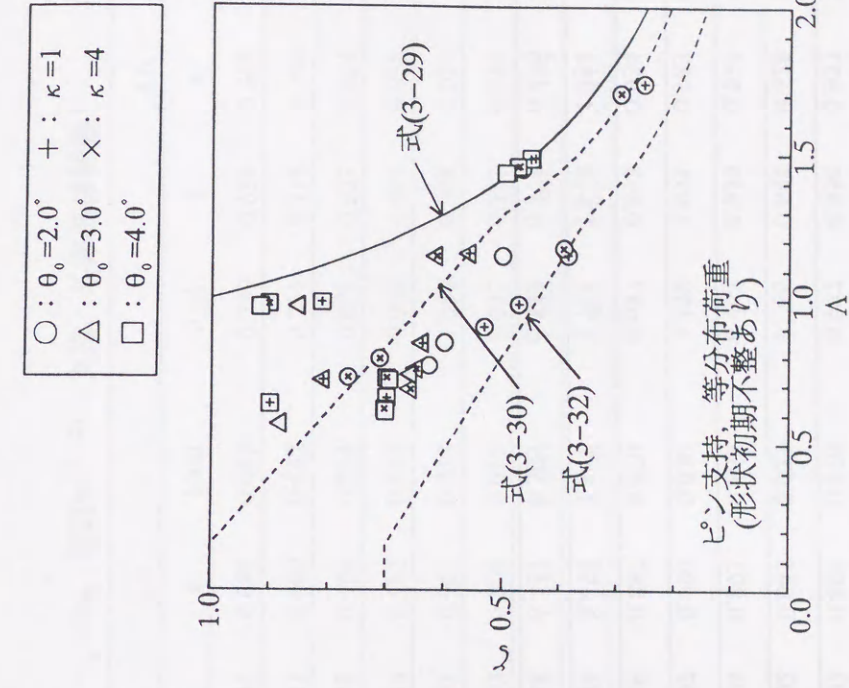
表 3-12 正規化細長比  $\Lambda$ , 座屈軸力  $N_{cr}^p / N_y$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ローラー支持, 等分布荷重]

$\theta_0$	2.0				3.0				4.0				
	$\kappa$	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi 165$	$\Lambda$	1.257	0.883	0.721	0.664	0.826	0.682	0.591	0.558	0.604	0.545	0.521	0.511
	$N_{cr}^p / N_y$	0.347	0.616	0.690	0.654	0.841	0.867	0.782	0.751	1.006	0.972	0.938	0.853
$\phi 138$	$\Lambda$	1.189	0.461	0.595	0.570	0.567	0.728	0.684	0.651	0.818	0.876	0.839	0.760
	$N_{cr}^p / N_y$	0.352	0.626	0.690	0.652	0.828	0.866	0.780	0.897	0.965	0.966	0.936	0.855
$\phi 89$	$\Lambda$	1.259	0.954	0.782	0.727	0.826	0.716	0.649	0.632	0.671	0.643	0.614	0.591
	$N_{cr}^p / N_y$	0.346	0.539	0.676	0.659	0.841	0.864	0.792	0.752	1.005	0.981	0.944	0.893
$\phi 60$	$\Lambda$	1.208	1.108	1.007	0.979	1.058	1.016	0.972	0.936	1.057	1.013	0.965	0.919
	$N_{cr}^p / N_y$	0.349	0.423	0.517	0.625	0.794	0.810	0.824	0.825	0.897	0.939	0.942	0.943
$\phi 60$	$\Lambda$	1.568	1.510	1.450	1.402	1.569	1.507	1.442	1.379	1.568	1.502	1.432	1.359
	$N_{cr}^p / N_y$	0.307	0.342	0.386	0.432	0.374	0.424	0.467	0.513	0.396	0.430	0.472	0.536

$N_{cr}^p / N_y$  は, 上段: 完全形状ドーム, 中段: 形状初期不整あり, 下段: 部材元たわみあり



(a) 等分布荷重



(b) 等分布荷重, 形状初期不整あり

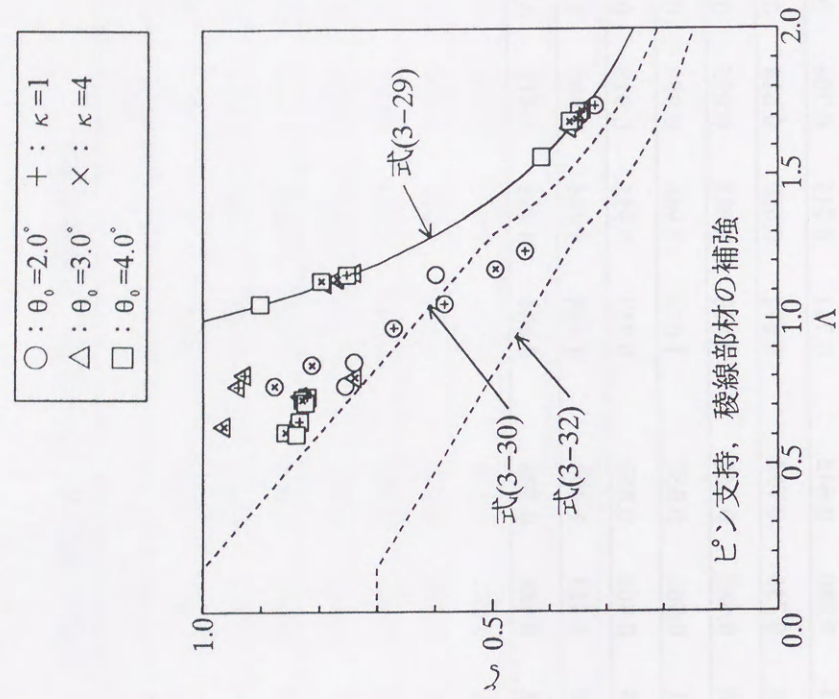
図 3-16 正規化細長比と軸力の関係 (ピン支持ドーム)

表 3-13 正規化細長比  $\Lambda$ , 座屈軸力  $N_{cr}^{pl} / N_y$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ローラー支持, 片偏載荷重]

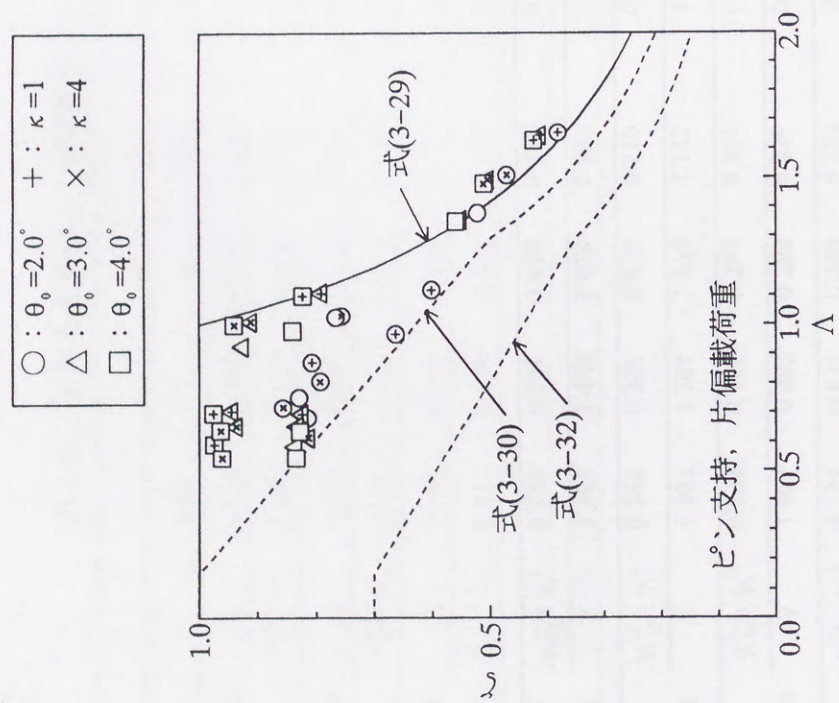
$\theta_0$	2.0				3.0				4.0				
	$\kappa$	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	$\Lambda$	1.138	0.848	0.712	0.686	0.765	0.648	0.575	0.561	0.581	0.587	0.535	0.509
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.417	0.702	0.817	0.758	0.904	0.902	0.896	0.870	0.972	0.956	0.937	0.901
$\phi$ 138	$\Lambda$	1.139	0.900	0.776	0.758	0.766	0.702	0.645	0.623	0.756	0.694	0.628	0.589
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.415	0.620	0.784	0.719	0.903	0.904	0.893	0.869	0.963	0.959	0.939	0.913
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.142	1.113	1.019	0.959	1.202	1.102	0.996	0.920	1.190	1.091	0.983	0.904
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.413	0.500	0.602	0.735	0.649	0.769	0.887	0.870	0.687	0.813	0.934	0.919
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.795	1.647	1.490	1.378	1.782	1.634	1.471	1.341	1.765	1.618	1.454	1.327
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.289	0.342	0.418	0.491	0.307	0.364	0.453	0.565	0.348	0.377	0.470	0.594

表 3-14 正規化細長比  $\Lambda$ , 座屈軸力  $N_{cr}^{pl} / N_y$  [ $n=12, l_0=3m$ , 周辺ローラー支持, 外部部材補強]

$\theta_0$	2.0				3.0				4.0				
	$\kappa$	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	$\Lambda$	1.461	0.905	0.716	0.656	0.981	0.716	0.685	0.649	0.739	0.658	0.617	0.606
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.294	0.634	0.794	0.757	0.690	0.911	0.680	0.642	0.711	0.715	0.706	0.705
$\phi$ 138	$\Lambda$	1.463	0.982	0.783	0.836	0.982	0.848	0.756	0.734	0.671	0.629	0.614	0.610
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.294	0.556	0.761	0.561	0.691	0.716	0.682	0.645	0.910	0.982	0.955	0.932
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.467	1.284	1.171	1.143	1.057	0.991	0.961	0.937	1.057	0.988	0.959	0.929
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.295	0.352	0.420	0.519	0.875	0.893	0.868	0.859	0.927	0.951	0.918	0.910
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.567	1.489	1.429	1.407	1.568	1.468	1.423	1.400	1.568	1.464	1.399	1.374
	$N_{cr}^{pl} / N_y$	0.375	0.391	0.430	0.467	0.401	0.458	0.488	0.508	0.404	0.469	0.512	0.534

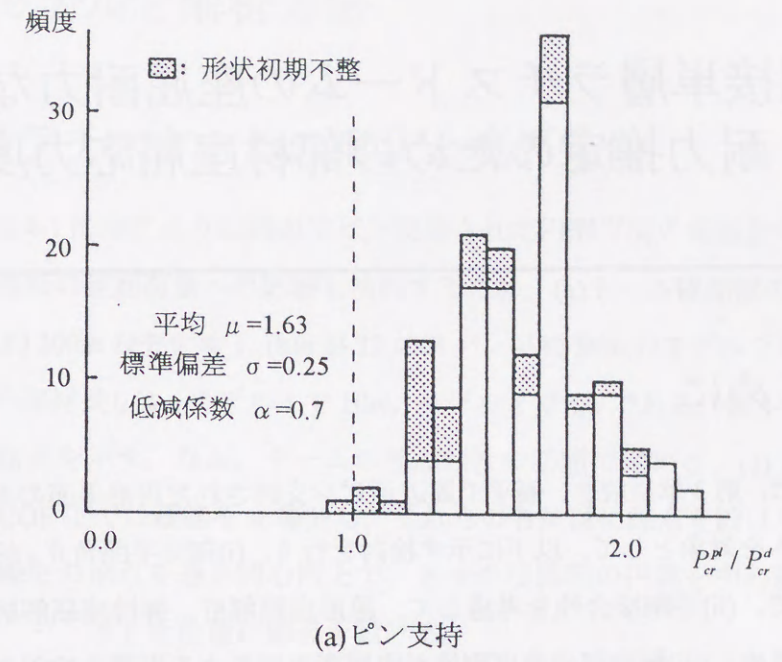


(c)片偏載荷重

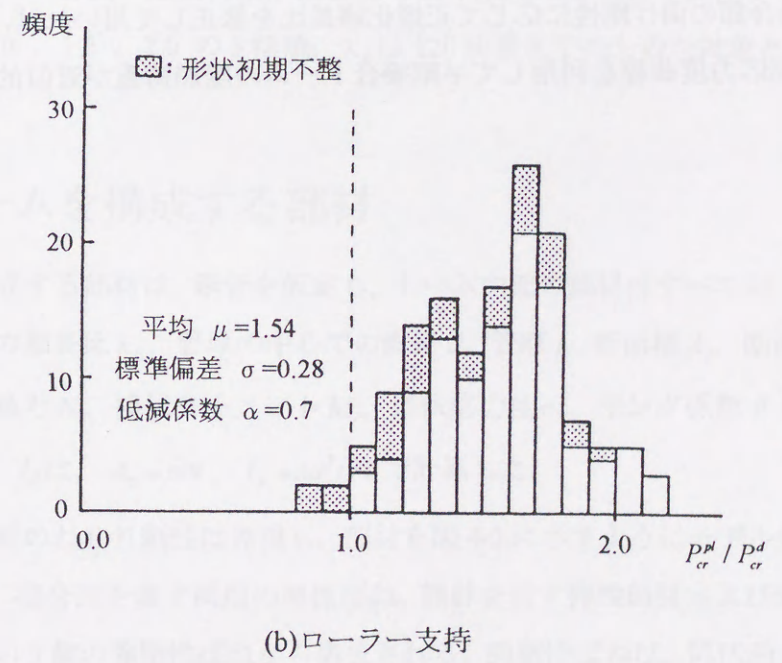


(d)等分布荷重, 稜線部材補強

図 3-16 正規化細長比と軸力の関係 (ピン支持ドーム)



(a)ピン支持



(b)ローラー支持

図 3-18 弾塑性座屈荷重と推定座屈荷重の比の頻度分布



## 4.半剛接单層ラチスドームの座屈耐力ならびに耐力推定のための部材座屈応力度

### 4.1.はじめに

第4章では、第3章に続き、偏平で周辺がピン支持された円形平面の半剛接合の単層ラチスドームを対象として、以下に示す検討を行う。(i)部材半開角 $\theta_0$ が $2^\circ$ 以下のドームに限定して、(ii)半剛接合性を考慮して、線形座屈解析、弾性座屈解析および弾塑性座屈解析を進め、(iii)接合部の曲げ剛性が座屈荷重に与える影響を検討するとともに、(iv)ドームの座屈に直接関連する特定の部材を選び、ドームの座屈荷重の関連から、この部材に対してどのような座屈応力度曲線が得られるか、また、(v)半剛接合ドームに対しては、接合部の曲げ剛性に応じて正規化細長比を修正して用いれば、剛接合ドームに対する座屈応力度曲線を利用して半剛接合ドームの座屈荷重が近似的に推定しうることを示す。

## 4.2.解析モデルと解析方法

### 4.2.1.単層ラチスドームの形状と境界条件

モデルは、図4-1に示すように周辺でピン支持された円形平面の球殻状のドームである。ドームの規模の座屈荷重への影響も検討するため、(a)ドーム稜線部の部材数 $n$ が20のスペンが約200mのモデル1、(b) $n$ が12のスペンが約50mのモデル2の2種を設定する。稜線上の部材長 $l_0$ は、モデル1で10m、モデル2で4mである。表4-1にこれらのドーム形状の諸元を示す。なお、ドームの節点は次の手順で定める。(1)ドームの稜線AOD、BOE、COF上では稜線を $n$ 等分し、それらの各位置に節点を設ける。(2)Z軸を中心とした稜線上の節点を通る同心円上で、各々の稜線間の円弧を中心側から順に1等分、2等分、 $\dots$ 、とした位置に節点を設ける。

部材半開角 $\theta_0$ (図4-1)が $2^\circ$ 以下、部材細長比 $\lambda_0$ が140程度以下の剛接单層ラチスドームは、連続体シェルに比較的類似した挙動となることが知られている[30]。本章では、そのようなドーム形状の座屈荷重が接合部の曲げ剛性によりどう変化するかを調べるため、 $\theta_0$ は $1.0^\circ$ 、 $1.5^\circ$ 、 $2.0^\circ$ の3種類、 $\lambda_0$ は120前後までのものを対象とする。

### 4.2.2.ドームを構成する部材

ドームを構成する部材は、鋼管を仮定し、ドーム内部の部材はすべて同一断面とする。仮定する部材の細長比 $\lambda_0$ 、管厚の中心での直径 $d$ 、管厚 $t$ 、断面積 $A_p$ 、断面二次モーメント $I_p$ 、降伏軸力 $N_y$ 、降伏モーメント $M_p$ 、降伏応力度 $\sigma_y$ 、ヤング係数 $E$ を表4-2に示す。なお、 $A_p$ 、 $I_p$ は、 $A_p = \pi dt$ 、 $I_p = \pi d^3 t / 8$ で計算した。

解析では部材のねじり剛性は無視し、部材を図4-2に示すようにモデル化する。この部材モデルは、接合部を表す両端の弾性ばね、部材を表す弾性部材および部材の降伏を模擬するための3個の弾塑性ばねから構成される。弾塑性ばねは、降伏前は弾性、降伏後は式(4-1)、図4-3で示す降伏曲面上を流動すると仮定する。

$$f = \left( \frac{N}{N_y} \right)^2 + \sqrt{\left( \frac{M_y}{M_p} \right)^2 + \left( \frac{M_z}{M_p} \right)^2} = 1 \quad (4-1)$$

ここで、 $N$ は軸力、 $M_y$ 、 $M_z$ はそれぞればねの $y$ 軸、 $z$ 軸回りの曲げモーメントである。

### 4.2.3. 接合部の曲げ剛性

部材両端の接合部の弾性回転ばね定数は、 $y$ 軸、 $z$ 軸とも同じと仮定し、これを $K_B$ とおく。接合部の弾性伸び剛性は十分大きいものとする。解析にあたり、次に示す無次元化回転ばね定数 $\kappa$ に対して、

$$\kappa = K_B \cdot \frac{l_0}{EI_p} \quad (4-2)$$

1, 2, 4, 10, 100の5種類について計算する。ここで、 $\kappa=100$ はほぼ剛接合に相当し、 $\kappa$ の減少とともに接合部の曲げ剛性は小さくなる。なお、前述のように、接合部では降伏や破断は起こらず、すべて鋼管部分で降伏が生じるものと仮定している。

### 4.2.4. 荷重条件

ドームに作用する荷重は、図4-4示す(a)等分布荷重と(b)片偏載荷重を設定する。節点に作用する荷重を $P$ とする。解析では比例荷重を想定し、 $P=\lambda P_d$ と置き、 $P_d$ を基準荷重、 $\lambda$ を荷重係数とする。なお、片偏載荷重の比率は1:3とした。

### 4.2.5. 形状初期不整

形状初期不整として、図4-1の節点 $G$ に、等価なシェル厚 $t_e$ の20%を仮定する。

$$w_i = 0.2t_e \quad (4-3)$$

ここで、

$$t_e = 2\sqrt{3}r_e \quad (4-4)$$

$$r_e = \sqrt{I_e/A_p} \quad (4-5)$$

$$I_e = \frac{I_p}{1+2/\kappa} \quad (4-6)$$

である。形状初期不整の大きさ、半波長等の仮定によって、ドームの座屈荷重に関する不整敏感性は異なるが、ここでは、仮定した形状初期不整がどう座屈荷重に影響するかを検討するにとどめる。

### 4.2.6. 解析方法

本章で用いる解析方法は、第2章で述べているので、実施した解析の概略を以下に述べる。

#### (1) 線形座屈解析

設定された基準荷重 $P_0$ に対して、まず、座屈前変形を無視して各部材の軸力 $N_0$ を求める。この値を用いて線形固有値解析を実施し、以下のように最小固有値 $\lambda_{cr}^{lin}$ を決定する。

$$\det|K(\lambda_{cr}^{lin})| = 0 \quad (4-7)$$

ここで、 $K$ はドームの全体剛性マトリックスであり、最小の線形座屈荷重 $P_{cr}^{lin}$ と対応する各部材の線形座屈軸力 $N_{cr}^{lin}$ は、次のように計算される。

$$P_{cr}^{lin} = \lambda_{cr}^{lin} \cdot P_0 \quad (4-8)$$

$$N_{cr}^{lin} = \lambda_{cr}^{lin} \cdot N_0 = \frac{P_{cr}^{lin}}{P_0} \cdot N_0 \quad (4-9)$$

#### (2) 弾性および弾塑性座屈解析

弾性座屈解析では幾何学的非線形性を、弾塑性座屈解析では幾何学的非線形性および式(4-1)で材料学的非線形性を考慮する。数値解法は通常Newton-Raphson法であり、最大荷重直前までは荷重増分法、それ以降は変位増分法を用いる。弾性座屈荷重 $P_{cr}^{el}$ 、弾塑性座屈荷重 $P_{cr}^{pl}$ として、それぞれ、ドームの荷重・変位関係で初めて極大となる荷重を採用する。なお、多くのパラメータについて解析を効率的に進めるため、図4-1の $X$ 軸に関して構造の対称性を仮定し、全体の1/2を対象とする。

### 4.3.解析結果および考察

モデル1( $n=20$ ,  $l_0=10\text{m}$ ), モデル2( $n=12$ ,  $l_0=4\text{m}$ )の等分布荷重時の線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 弾性座屈荷重  $P_{cr}^{el}$ , 弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$  を表4-3, 表4-5に示す。( )内の数値は節4.2.5で述べた  $0.2t_e$  の初期不整がある場合の座屈荷重である。また, モデル1の片偏載荷重時の線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$  と弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$  を表4-4に示す。

#### 4.3.1.節点あたりの無次元化座屈荷重 $\eta$ の定義

上記の座屈荷重を, 第3章と同様に,  $\xi$  と  $\eta$  の関係で表示し, これらを図4-5~図4-12に示す。図4-5, 図4-6, 図4-7は, モデル1でそれぞれ  $\theta_0=1.0^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $2.0^\circ$  の結果, 図4-8, 図4-9, 図4-10は, モデル2でそれぞれ  $\theta_0=1.0^\circ$ ,  $1.5^\circ$ ,  $2.0^\circ$  の結果である。各図の(a)は線形座屈荷重, (b), (c)は弾性座屈荷重であり, それぞれ完全形状ドームと初期不整を有するドームの結果, (d), (e)は弾塑性座屈荷重であり, それぞれ完全形状ドームと初期不整を有するドームの結果である。(f), (g)は片偏載荷重を受ける場合(モデル1のみ)の結果であり, それぞれ線形座屈荷重, 弾塑性座屈荷重を示す。また, 以上の結果をまとめて表示したもの(等分布荷重時のみ)が, 図4-11, 図4-12である。図中,  $\triangle$ 印は線形座屈荷重,  $\square$ と $\blacksquare$ は, それぞれ完全形状のドームと初期不整を有するドームの弾性座屈荷重,  $\circ$ と $\bullet$ は, それぞれ完全形状のドームと初期不整を有するドームの弾塑性座屈荷重を示す。また,  $\cdot$ のついたものは $\kappa$ が1あるいは2,  $+$ と $\times$ がついたものは, それぞれ $\lambda_0$ が120と150に対する結果である。

ここで,  $\xi$ ,  $\eta$  は式(4-10), 式(4-11)で定義される無次元量[14,15]である。

$$\xi = \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0\theta_0\sqrt{1+2/\kappa}} \quad (4-10)$$

$$\eta = \frac{P_{cr}}{EA_p\theta_0^3} \quad (4-11)$$

文献[14]に示されるように,  $\xi = \eta$  は, 連続体シェルに置換した場合の古典座屈荷重  $P_{cr0}^{lin}(\kappa)$  に相当する。ここで,  $P_{cr0}^{lin}(\kappa)$  は次式で与えられる。

$$P_{cr0}^{lin}(\kappa) = \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0\theta_0\sqrt{1+2/\kappa}} \cdot EA_p\theta_0^3 \quad (4-12)$$

図4-5~図4-12には,  $\eta^E$ ,  $\eta^Y$  が示されているが, これらは部材の弾性座屈および部材の降伏によるドームの座屈荷重の近似値であり, 以下のような考え方で求めたものである。単位六角形のドームの頂点に鉛直下方の荷重  $P$  が作用する場合を想定する。座屈前の変形を無視し, また, 部材の弾性座屈軸力が部材長さを座屈長とする弾性部材座屈軸力  $N_{cr0}^{lin}$

$$N_{cr0}^{lin} = \frac{\pi^2 EI_p}{l_0^2} \quad (4-13)$$

で近似しうると仮定すれば, 部材の座屈で決定される単位ドームの弾性座屈荷重  $\bar{P}^E$  は, 次式となる。

$$\bar{P}^E = 6\theta_0 N_{cr0}^{lin} \quad (4-14)$$

同様の考えから, 部材が降伏した場合の座屈荷重  $\bar{P}^Y$  は,

$$\bar{P}^Y = 6\theta_0 A_p \sigma_y \quad (4-15)$$

となる。 $EA_p\theta_0^3$  で  $\bar{P}^E$ ,  $\bar{P}^Y$  を除せば, 次式が得られる。

$$\bar{\eta}^E = \frac{\pi^2}{48} \xi_0^2, \quad \xi_0 = \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0\theta_0} \quad (4-16)$$

$$\bar{\eta}^Y = \frac{6\sigma_y}{E\theta_0^2} \quad (4-17)$$

しかしながら, 本論文で対象とする単層ラチスドームでは, 軸力分布は一樣とはならないので, この影響を考慮する必要がある。 $N'_0$  を単位六角形ドームの頂点に荷重  $P_0$  が作用した場合の部材の圧縮軸力,  $N''_0$  をドームの各節点に等分布状に  $P_0$  が作用した場合のドーム内での圧縮軸力の最大値とする。 $N'_0$  に対する  $N''_0$  の比  $\beta_0$

$$\beta_0 = N'_0 / N''_0 \quad (4-18)$$

は, 本研究で扱うドームでは, ほぼ 0.71~0.76 の範囲にあるので, これを考慮し,  $\beta_0$  として 0.70 を採用する。座屈前変形を無視すれば, 部材の弾性座屈あるいは降伏でドームが耐力に至る荷重は, 次式で近似的に推定できる。

$$\eta^E = \beta_0 \cdot \frac{\pi^2}{48} \xi_0^2 \quad (4-19)$$

$$\eta^Y = \beta_0 \cdot \frac{6\sigma_y}{E\theta_0^2} \quad (4-20)$$

### 4.3.2. $\xi$ , $\eta$ 表示された座屈荷重の分析

$\xi$ ,  $\eta$  軸上で表示された座屈荷重(図 4-11, 図 4-12)は, 線形座屈, 弾性座屈, 弾塑性座屈とも  $\theta_0$  が同じであれば, 稜線上の部材数  $n$  に関わらず, ほぼ同様な結果となる。

#### (1) 線形座屈荷重 $P_{cr}^{lin}$ と有効座屈長さ $l_{eq}$

式(4-10), 式(4-11)に関して, 植木ほか[14]が指摘するように, 線形座屈荷重(図 4-11, 4-12 の  $\Delta$ )がほぼ  $\eta = \xi$  上に分布する場合には, これをシェル的な座屈とみなすことができる。しかし, モデル 1, モデル 2 の  $\theta_0 = 2.0^\circ$  に関する図中の拡大図では,  $\xi < 5$  の範囲で,  $\lambda_0$  が 120(図中の+)と 150(図中の $\times$ )のドームの結果が,  $\eta = \xi$  と式(4-19)で定義される  $\eta^E$  の曲線に間にあり, また,  $\kappa$  の値に関わらず, ほぼ同じ値となっている。これは, 部材長さを有効座屈長さとする部材の弾性座屈が卓越していることを示している。特に,  $\lambda_0$  が 150 では, 線形座屈, 弾性座屈, 弾塑性座屈ともほぼ同じ値となり, 部材の弾性座屈の様相を強く示す。

図 4-13 は, 後に節 4.3.3(1)で述べるように, 式(4-24)の軸力比が最大となる部材に対する有効座屈長さ  $l_{eq}$  を示す。この値は, 軸力比が最大となる部材の線形座屈軸力  $N_{cr}^{lin}$  を用いて式(4-21)から計算したものである。

$$l_{eq} = \pi \sqrt{\frac{EI_p}{N_{cr}^{lin}}} \quad (4-21)$$

一般に, 連続体シェル近似から求められる部材に対する有効座屈長さ比  $l_{eq}/l_0$  は  $\sqrt{(1+2/\kappa) \cdot \xi}$  に比例し,  $\kappa$  が小さな場合には  $l_{eq}/l_0$  は大きくなる。この傾向は, 図 4-13 の結果とほぼ一致する。しかし, 骨組であるラチスドームでは,  $\lambda_0$  が 120 を越えれば,  $\kappa$  の値に関わらず, 座屈長さ比は 0.9~1.0 の範囲に留まり, それ以下の値は取らず, 前述のように部材長さを有効座屈長さとする部材の弾性座屈が強く現れる。

シェルとしての座屈半波長  $l_{cr0}$  が近似的に  $\sqrt{3} \cdot l_{eq}$  で与えられる[30]とすると,  $\kappa = 4, 10, 100$  では,  $\xi = 5 \sim 10$  の程度の範囲で  $l_{cr0}$  は部材の長さの 2 倍程度の値となる。したがって, 部材の 2 倍の長さを半波長とするような初期不整があれば, このような初期不整に対しては, 座屈荷重の低下が敏感に生ずると分析しうる。

#### (2) 弾性座屈荷重 $P_{cr}^e$

完全形状のドームの弾性座屈荷重(図 4-11, 4-12 の  $\square$ )は, ほぼ  $\eta = 0.7 \xi$  あるいは 0.65

$\xi$  上に分布する。この傾向は部材数  $n$  や部材半開角  $\theta_0$  に関係なく成立する。弾性座屈荷重が線形座屈荷重より低くなる原因は座屈前の弾性変形にある。したがって, 初期不整があれば, この影響により弾性座屈荷重はさらに減少する。

$\theta_0 = 2.0^\circ$  で部材細長比  $\lambda_0$  が 120 あるいは 150 の場合, 前述のように,  $\kappa$  に関わらず, 弾性座屈荷重, 線形座屈荷重, さらに後に述べる弾塑性座屈荷重は, ほぼ等しくなっており, ドームは弾性範囲の部材座屈で最大荷重に至っている。この傾向は  $\theta_0$  が大きくなるほど強くなる。

図 4-11, 4-12 において,  $\xi$  が 10 程度以上では, 等価シェル厚さの 20% の初期不整があっても弾性座屈荷重の低下はそれほど顕著でないが, それに比べ,  $\xi$  が 10 程度以下では, 初期不整による影響がより顕著となり, ドームの弾性座屈荷重は, 線形座屈荷重のほぼ 40% から 50% 程度まで低下する。先に述べたように,  $\kappa = 4, 10, 100$  では,  $\xi = 5 \sim 10$  の程度の範囲で, シェルとしての座屈半波長  $l_{cr0}$  は部材の長さの 2 倍程度の値となるので, 本解析で仮定した初期不整の座屈半波長に近くなり, 座屈荷重の低下が生じたと考えられる。

#### (3) 弾塑性座屈荷重 $P_{cr}^p$

図 4-11, 4-12 の  $\circ, \bullet$  は, それぞれ完全形状ドームおよび初期不整(等価シェル厚さの 20%)のあるドームの弾塑性座屈荷重である。十分に  $\xi$  が大きい場合には, 分割数  $n$ , 部材半開角  $\theta_0$  に関わらず, その最大値は, 式(4-20)の  $\eta^Y$  を用いて約  $0.7\eta^Y$  と表される。初期不整がない場合に関しては,  $\theta_0$  が  $2.0^\circ$  では  $\xi$  が約 6 以上,  $\theta_0$  が  $1.5^\circ$  では  $\xi$  が約 10 以上,  $\theta_0$  が  $1.0^\circ$  では  $\xi$  が約 22 以上となると, ほぼ  $\eta = 0.7\eta^Y$  となる。係数の 0.7 の値の大きさは, 線形座屈荷重に対する弾性座屈荷重の低減率とほぼ同じ値となっており, この低減率も座屈前変形の影響と考えられる。また,  $\xi$  が大きい範囲で初期不整の影響がほとんど現れないが, これは, 図 4-13 の等価な部材の座屈長さおよびシェルとしての座屈半波長に関して, 先に述べたように, 仮定した初期不整の座屈半波長が部材の高々 2 倍であり,  $\xi$  の大きなドームの座屈半波長に比べてかなり短くなるからである。

### 4.3.3. 接合部の無次元化回転ばね定数 $\kappa$ が弾性座屈荷重の低下に及ぼす影響；正規化細長比による分析

#### (1) 弾性座屈荷重の低下の度合い

弾性座屈荷重  $P_{cr}^{el}(\kappa)$  が  $\kappa$  によりどう低下するか、部材細長比  $\lambda_0$ 、部材半開角  $\theta_0$  を有する剛接合ドームの線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$  を基準として分析する。ただし、剛接合の値として  $\kappa=100$  の値を近似的に採用する。つまり、次式で示す  $\alpha(\kappa)$  の値の変化を検討する。

$$\alpha(\kappa) = \frac{P_{cr}^{el}(\kappa)}{P_{cr}^{lin}(\kappa=100)} \quad (4-22)$$

なお、低減率  $\alpha(\kappa)$  は、単に  $\kappa$  に影響されるだけでなく、 $\lambda_0$ 、 $\theta_0$  にも大きく影響を受けるが、ここでは、諸規準[26,40]に採用されているように、次に示す正規化細長比  $\Lambda$  によってどう変化するかを中心に分析する。

$$\Lambda = \sqrt{\frac{N_y}{N_{cr}^{lin}(\kappa=100)}} \quad (4-23)$$

なお、 $\Lambda$  を算定する部材  $m$  として、剛接合ドームにおいて、その部材の降伏軸力  $N_y$  に対するその部材の線形座屈荷重時の軸力  $N_{cr}^{lin}(\kappa=100)$  の比  $\delta_m$

$$\delta_m = \frac{N_{cr}^{lin}(\kappa=100)}{N_y} \quad (4-24)$$

が最大となる部材を選ぶこととする。つまり、ドームに作用する荷重が増加するのに伴い、線形弾性解析の下で軸力が最初に降伏軸力に到達すると想定される部材を選ぶこととする。

図 4-14 は、初期不整のないドームについて、 $\kappa$  の値ごとに  $\alpha(\kappa)$  の  $\Lambda$  に対する変化を示す。なお、 $n=20$  については、図中の左から、 $\lambda_0$  が 30, 50, 60, 90, 120,  $n=12$  については、 $\lambda_0$  が 30, 60, 90, 120, 150 に対応する結果である。図 4-14(a)~(e) に ○, ● 印で示されるように、 $\theta_0=1.0^\circ$  の場合は、 $\alpha(\kappa)$  は、 $\Lambda$  や  $\lambda_0$  の変化に依存せず、それぞれ、 $\kappa$  に応じてほぼ一定の値となる。一方、 $\theta_0=1.5^\circ$  と  $2.0^\circ$  の場合には、 $\Lambda$  の増加に応じて、 $\alpha(\kappa)$  は増加傾向で、1 に漸近し、弾性座屈荷重  $P_{cr}^{el}(\kappa)$  は剛な接合部のドームの線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}(\kappa=100)$  に近づく。 $\Lambda$  の増加は部材細長比  $\lambda_0$  の大きさと対応しているのので、 $\kappa$  に関わらず、 $\lambda_0$  が大きくなると、弾性座屈荷重に対して座屈前変形の影響が小さくなり、前述のように部材の座屈の様相を強める。この傾向は、 $\theta_0$  が大きいほど、 $\lambda_0$  が大

きいほど強くなる。

#### (2) $\alpha(\kappa)$ の下限について

図 4-14 の  $\theta_0=1.0^\circ$  の結果からわかるように、 $\alpha(\kappa)$  は、 $\Lambda$  の変化に依存せず、それぞれ、 $\kappa$  に応じた一定の値となる。そこで、図 4-14 に示すように、 $\kappa$  ごとの  $\alpha(\kappa)$  の下限を  $\alpha_0(\kappa)$  で表す。これらの値を図 4-15 に  $\kappa$  ごとに ○ 印で示す。これらの値を 3 本の直線で近似すると式(4-25)が得られる。

$$\alpha_0(\kappa) = \epsilon_0 \cdot \epsilon(\kappa) \quad (4-25)$$

$$\epsilon_0 = 0.65 \quad (4-26)$$

$$\epsilon(\kappa) = \begin{cases} (0.3 \log_{10} \kappa + 0.3) / \epsilon_0 & (1 \leq \kappa < 10) \\ (0.05 \log_{10} \kappa + 0.55) / \epsilon_0 & (10 \leq \kappa < 100) \\ 0.65 / \epsilon_0 & (\kappa \geq 100) \end{cases} \quad (4-27)$$

この下限を表す低減率  $\alpha_0(\kappa)$  を用いれば、初期不整のない場合の弾性座屈荷重の下限  $P_{cr}^{lin*}(\kappa)$  は、次式で近似できる。

$$P_{cr}^{lin*}(\kappa) = \epsilon_0 \cdot \epsilon(\kappa) \cdot P_{cr}^{lin}(\kappa=100) \quad (4-28)$$

ただし、図 4-14 で前述したように、 $\theta_0=2.0^\circ$  の場合には  $\Lambda$  が 1 より大きな領域でかなり低めの評価となる。

## 4.4.部材の座屈応力度による半剛接合ドームの座屈荷重の分析

### 4.4.1.弾性座屈応力度

半剛接合ドームの弾性座屈荷重  $P_{cr}^{el}(\kappa)$  に対して、部材の弾性座屈軸力を次式で仮定する。弾性座屈は非線形であるから実際に生じる軸力は荷重に比例しないが、ここでは、線形性が成立するとの仮定のもとで、擬似的に次の弾性座屈軸力を用いる。

$$N_{cr}^{el}(\kappa) = \frac{P_{cr}^{el}(\kappa)}{P_0} \cdot N_0 \quad (4-29)$$

ただし、軸力を求める部材として、剛接合のドームにおいて式(4-24)で与えられる  $\delta_m$  が最大となる部材  $m$  を選ぶこととする。

剛接合ドームの部材  $m$  に関する正規化細長比  $\Lambda$  を横軸に、式(4-30)の  $N_{cr}^{el}(\kappa)/N_y$  を縦軸にして結果をまとめたものが図 4-16、図 4-17 であり、それぞれ、等分布荷重を受ける初期不整のないモデル 1 ( $n=20, l_0=10m$ )、モデル 2 ( $n=12, l_0=4m$ ) に対する結果である。また、表 4-6、4-7 はそれぞれの特定部材番号、正規化細長比、弾性座屈軸力を示す。

$$\alpha_{cr}^{el}(\kappa) = \frac{N_{cr}^{el}(\kappa)}{N_y} \quad (4-30)$$

図 4-14 で議論したように、 $\theta_0$  が  $1.0^\circ$  の場合には、 $\Lambda$  に関わらず、低減率は  $\kappa$  だけに支配される。したがって、 $\kappa=100$  では、ほぼ、 $\alpha_{cr}^{el}(\kappa)=0.65/\Lambda^2$ 、 $\kappa=1$  で、ほぼ、 $\alpha_{cr}^{el}(\kappa)=0.3/\Lambda^2$  となる。しかしながら、 $\theta_0$  が  $2.0^\circ$  の場合には、 $\Lambda$  が大きくなれば低減率  $\alpha(\kappa)$  は小さくなり、特に  $\lambda_0=120$  の場合では  $\kappa$  の影響は小さく、座屈前変形の影響は現れず、弾性座屈軸力は線形座屈軸力に漸近する。

### 4.4.2.修正した正規化細長比による弾性座屈応力度の表現

図 4-16、図 4-17 では、接合部の無次元化回転ばね定数  $\kappa$  ごとに弾性座屈応力度曲線が変化する。できるだけ、弾性座屈応力度曲線が  $\kappa$  に依存しない表現を得るため、式

(4-27)の  $\epsilon(\kappa)$  を用いて、次のような修正された正規化細長比  $\Lambda_{mod}$  (以下、修正正規化細長比)を採用する(図 4-18)。

$$\Lambda_{mod} = \Lambda \sqrt{1/\epsilon(\kappa)} \quad (4-31)$$

つまり、 $\kappa$  の弾性座屈応力に対する影響を  $\epsilon(\kappa)$  で評価すれば、半剛接合の場合にも剛接合の弾性座屈応力度曲線とほぼ同様な表示が得られることを示す。初期不整のない場合については、

$$\begin{aligned} \alpha_{cr}^{el}(\kappa) &= \frac{N_{cr}^{el}(\kappa)}{N_y} \\ &= \frac{\epsilon(\kappa) \cdot N_{cr}^{el}(\kappa=100)}{N_y} \\ &= \frac{N_{cr}^{el}(\kappa=100)}{N_{cr}^{lin}(\kappa=100)} \cdot \frac{1}{\Lambda_{mod}^2} \\ &= \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon(\kappa=100)}{\Lambda_{mod}^2} \end{aligned} \quad (4-32)$$

となり、式(4-32)は、剛接合の特性である  $\epsilon_0 \cdot \epsilon(\kappa=100)$  と、 $\kappa$  を考慮した修正正規化細長比  $\Lambda_{mod}$  に分離できる。

$\Lambda_{mod}$  を用いた各結果を図 4-19、図 4-20 に示す。それぞれ、モデル 1、モデル 2 の結果である。各図の(a), (c), (e)は完全形状ドームで、 $\theta_0=1.0^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ$  の結果、(b), (d), (f)は形状初期不整を有するドームで、 $\theta_0=1.0^\circ, 1.5^\circ, 2.0^\circ$  の結果である。また、これらの図をまとめ直したものが図 4-21 である。図中、○, □, △は初期不整のない場合、●, ■, ▲は  $w_r=0.2t_e$  の初期不整がある場合の結果である。これらの図は、(ア)  $\lambda_0, \theta_0$  の特性を持つ完全形状剛接合の単層ドームの線形座屈解析から、(イ)式(4-24)の軸力比  $\delta_m$  が最大となる部材  $m$  に対して、式(4-23)で  $\Lambda$  を求め、(ウ)次に、接合部の特性  $\kappa$  を用いて、式(4-24)から  $\Lambda_{mod}$  を求め、(エ)この  $\Lambda_{mod}$  を横軸にして、式(4-23)を用いて、同じ  $\lambda_0, \theta_0$  を持つ半剛接合のドームの  $\alpha_{cr}^{el}(\kappa)$  の値を描いたものである。なお、表 4-8、表 4-9 には、特定部材番号、修正正規化細長比、弾性座屈軸力を示している。

完全形状ドームについては、図 4-21 が示すように  $\theta_0$  が  $2.0^\circ$  で  $\lambda_0$  が 120 以上(△, △)を除けば、半剛接合の場合にも、剛接合の値  $0.65/\Lambda_{mod}^2$  の付近に結果が集中する。 $w_r=0.2t_e$  の初期不整がある場合には、その下界はほぼ  $0.55/\Lambda_{mod}^2$  で与えられる。係数 0.55 は剛接合のドームの初期不整敏感性から得られる値[33,30]である。IASS の基準[41]に準拠すれ

ば、シェル厚さの 20%の初期不整に対しては、弾性座屈は線形座屈の 43%で与えられるが、この値を用いれば十分に下界を把握できる。

#### 4.4.3.弾塑性座屈応力度

次式で計算した弾塑性座屈応力度を、 $\Lambda_{mod}$ を横軸にして示したものが図 4-22、図 4-23、図 4-24 である。また、表 4-10、4-11 は、特定部材番号、修正正規化細長比、弾塑性座屈応力度を示す。

$$\alpha_{cr}^{pl}(\kappa) = \frac{N_{cr}^{pl}(\kappa)}{N_y} \quad (4-33)$$

図 4-22、図 4-23 は、それぞれ、モデル 1、モデル 2 の結果を示したものであり、図 4-24 では、これらの結果をまとめて表示している。なお、座屈応力度を計算する部材は、式(4-24)の軸力比 $\delta_m$ が最大となる部材である。ここで、軸力比 $\delta_m$ の分布例を図 4-25 に示し、図 4-25(a)は等分布荷重時、 $\theta_0=1.0^\circ$ 、 $\lambda_0=60$ 、 $\kappa=100$ のドーム、図 4-25(b)は片偏載荷重時、 $\theta_0=1.0^\circ$ 、 $\lambda_0=60$ 、 $\kappa=100$ のドームの分布である。図中、線の太さは軸力比 $\delta_m$ の大きさを表し、●印は軸力比が最大となり、この例で採用した部材である。

ドームに等価シェル厚さの 20%の初期不整がある場合の下界は、モデル 1、2 とも、式(4-34)で、 $\gamma=0.55$ とした曲線で表される。

$$\left( \frac{1}{\gamma / \Lambda_{mod}^2} \cdot \alpha_{cr}^{pl}(\kappa) \right) + \left( \alpha_{cr}^{pl}(\kappa) \right)^2 = 1 \quad (4-34)$$

弾性座屈応力度の場合と同様に、 $\gamma=0.55$ とすれば、十分に弾塑性座屈応力度の下界を表現できる。

なお、Appendix.1 には、第 3 章で対象としたドームについて、本章と同様に、式(4-24)の軸力比 $\delta_m$ が最大となる部材を特定部材とした弾塑性座屈軸力を示している。

#### 4.4.4.ドームの弾塑性座屈荷重の推定方法

図 4-24 で示すように、部材の座屈応力度が修正正規化細長比 $\Lambda_{mod}$ の関数として与えられる。この修正正規化細長比を利用すれば、一般の鋼構造骨組と同様に座屈荷重が推定可能となる。ここでは、この $\Lambda_{mod}$ と部材の座屈応力度曲線を用いた座屈荷重の推定方法を説明する。

推定方法を述べるにあたり、再度、解析結果を図 4-26 に示す。この時の解析条件は、

(ア)周辺がピン支持された円形平面の単層ラチスドームを対象とし、(イ)部材半開角 $\theta_0$ が $1.0^\circ \sim 2.0^\circ$ 、(ウ)接合部の無次元化回転ばね定数 $\kappa$ の値が小さい場合を除き、 $\kappa$ が 4 以上とし、(エ)部材細長比が極めて大きい 150 を除いた 120 以下、(オ)等価シェル厚の 20%の初期不整、(カ)等分布荷重、(キ)部材の降伏を考慮した弾塑性範囲である。図 4-24 より、修正正規化細長比 $\Lambda_{mod}$ を用いれば、文献[30]の剛接合ドームの結果と同様に、 $\gamma=0.55$ とした式(4-34)で座屈応力度の下界が表されることがわかる。

図 4-27 には、図 4-26 の座屈応力度曲線を用いた座屈荷重の推定手順を示す。まず、基準荷重 $P_0$ を受ける剛接合とした単層ラチスドームの線形解析から各部材の軸力 $N_0$ を求め、座屈前変形を無視した線形座屈解析から式(4-24)で与えられる軸力比の最大となる部材を選び出す。この部材について、正規化細長比 $\Lambda$ を式(4-23)で求め、次に、接合部の無次元化回転ばね定数 $\kappa$ に対応して、式(4-31)から修正正規化細長比 $\Lambda_{mod}$ を求める。最終的にはこの $\Lambda_{mod}$ から、図 4-26 の式(4-34)を用いて、 $N_{cr}^{pl}(\kappa) / N_y$ を定め、次式

$$P_{cr}^{pl}(\kappa) = \frac{P_0}{N_0} \cdot N_{cr}^{pl}(\kappa) \quad (4-35)$$

から弾塑性座屈荷重 $P_{cr}^{pl}(\kappa)$ を推定する。

ただし、ここで示した推定の精度は、基本的には座屈応力度曲線の表現の正確さに依存する。したがって、設計に供し得るより妥当な座屈応力度曲線を定めるには、ドーム形状、荷重形態、境界条件、初期不整等に対応した部材の座屈応力度曲線を準備する必要がある。

#### 4.5.まとめ

本研究では、周辺がピン支持された円形平面の半剛接合単層ラチスドームの弾塑性範囲にわたる座屈荷重を解析より求め、ピン接合ドームおよび等価な連続体シェルの座屈に関する基本パラメータである  $EA_p \theta_0^3$  と  $\xi$  を用いて、座屈荷重の無次元表示  $\eta$  を示した。

また、ドームの座屈に深く関連する部材を選び出し、この部材の正規化細長比  $\Lambda$  をパラメータとして部材の座屈応力度曲線を与えた。半剛接合の場合には、剛接合ドームを基準とする正規化細長比を修正して得られる修正正規化細長比  $\Lambda_{mod}$  を用いれば、剛接合ドームの場合とほぼ同じ座屈応力度曲線表示が可能であることを示した。さらに、この正規化細長比と座屈応力度曲線から半剛接合ドームの座屈荷重を推定する方法を述べた。ただし、ここで示した推定の精度は、基本的には座屈応力度曲線の表現の正確さに依存するので、設計等に供し得る妥当な座屈応力度曲線を定めるには、各種の要因を考慮した研究が今後さらに必要であることを確認した。

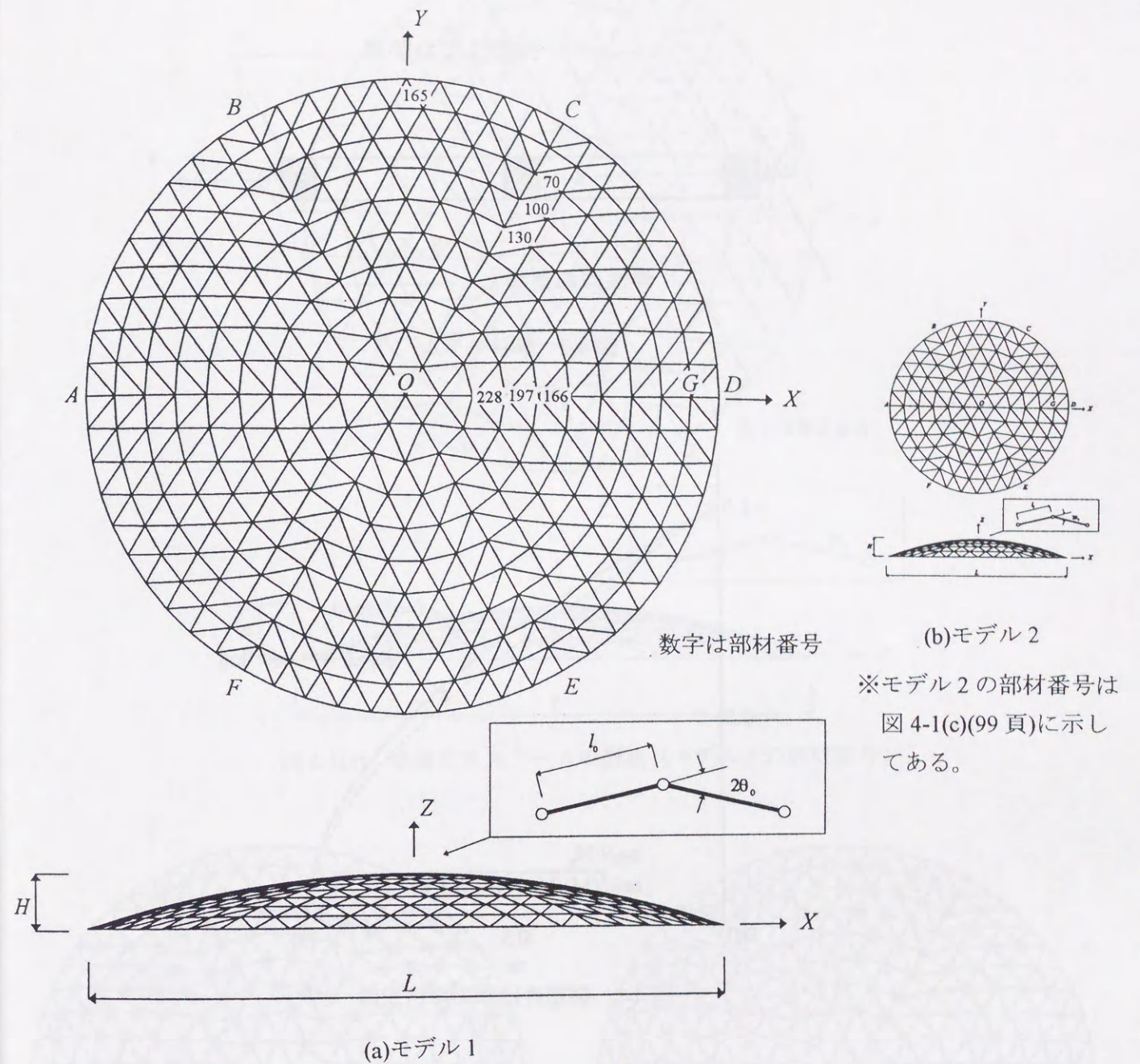


図4-1 単層ラチスドームの形状

表4-1 ラチスドームの形状諸元

	$n$	$l_0$ (m)	$\theta_0$ (deg.)	R(m)	L(m)	H(m)
モデル1	20	10	1.0	286.5	196.0	17.3
			1.5	191.0	191.0	25.6
			2.0	143.3	184.2	33.5
モデル2	12	4	1.0	114.6	47.7	2.5
			1.5	76.4	47.2	3.7
			2.0	57.3	46.6	5.0



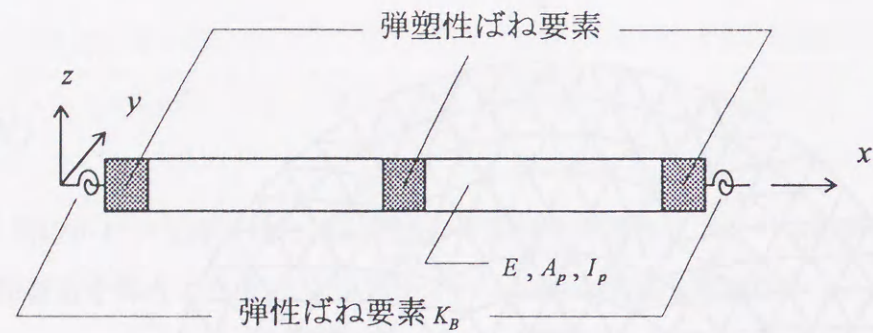


図 4-2 部材モデル

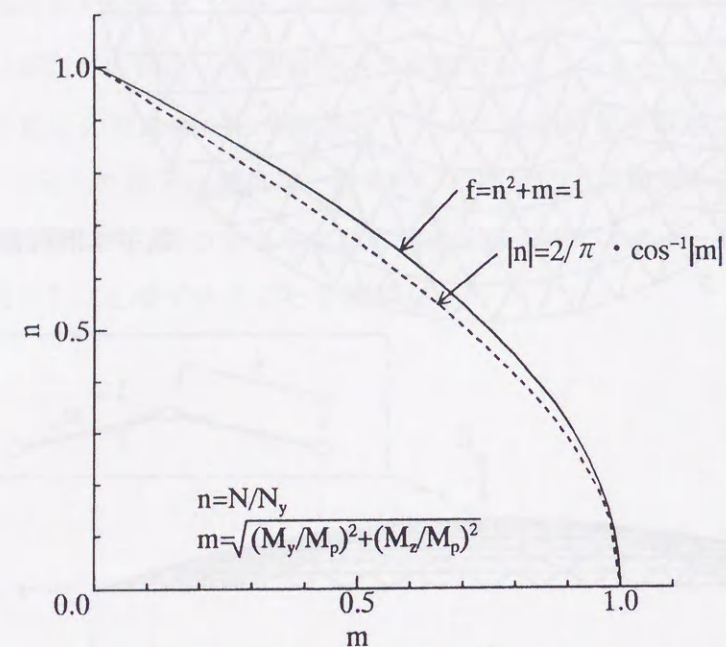
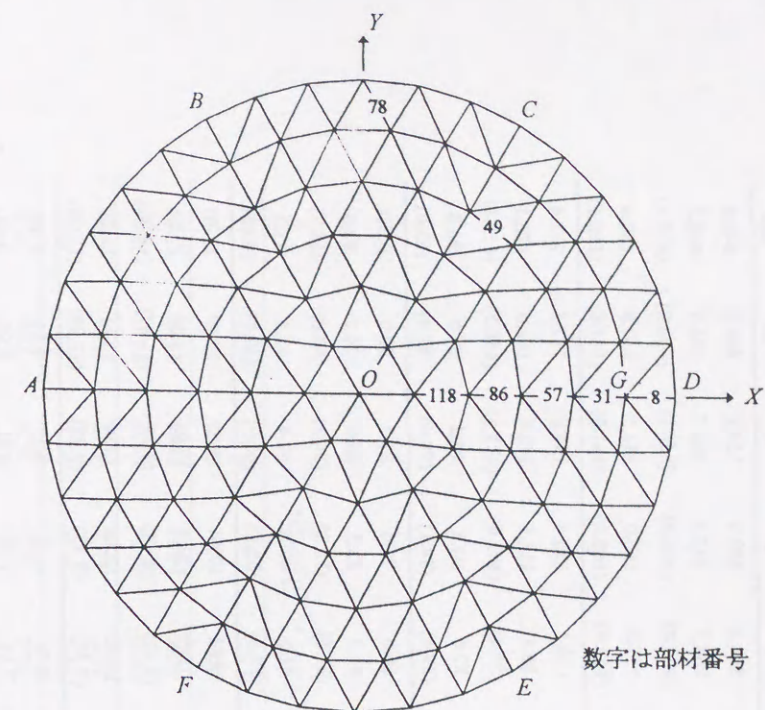


図 4-3 弾塑性ばねの降伏曲面

表 4-2 部材諸元

	$\lambda_0$	$d(cm)$	$t(cm)$	$A_p(cm^2)$	$I_p(cm^4)$	$N_y(tf)$	$M_p(tf \cdot cm)$
モデル1	30	94.28	1.5	444	494000	1070	32000
	50	56.75	1.5	267	107000	641	11500
	60	47.14	1.0	148	41000	355	5320
	90	31.43	0.5	49.3	6080	118	1180
モデル2	120	23.57	0.5	37.1	2580	89	668
	30	37.71	0.5	59.2	10500	142	1710
	60	18.86	0.5	29.6	13200	71.1	427
	90	12.57	0.5	19.8	390	47.4	190
	120	9.43	0.5	14.8	165	35.5	107
	150	7.54	0.5	11.9	84.3	28.4	68.3

ヤング係数:  $E=2100tf/cm^2$ , 降伏応力度:  $\sigma_y=2.4tf/cm^2$



数字は部材番号

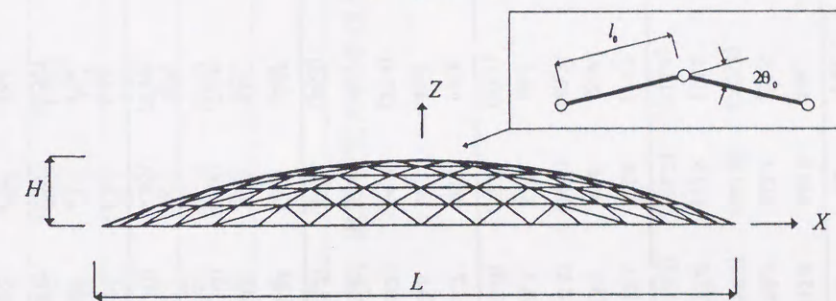
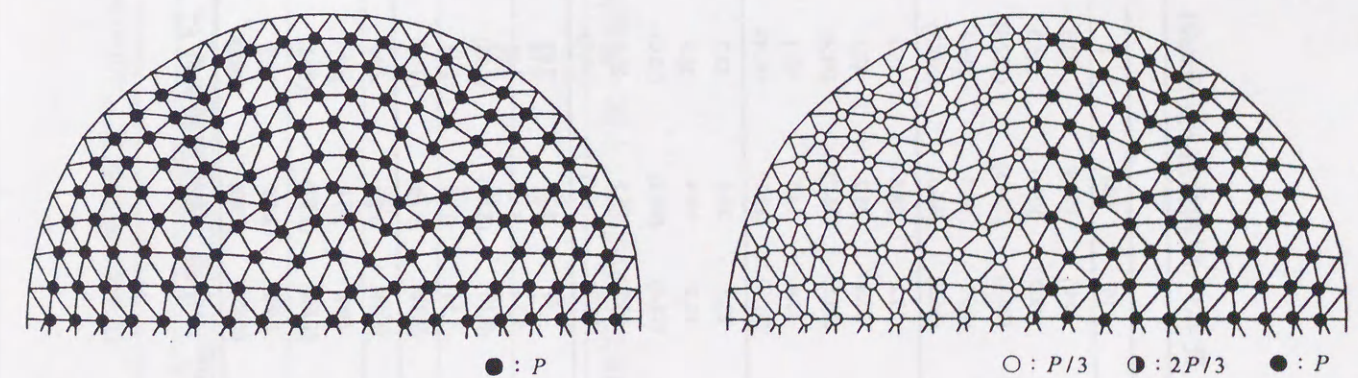


図 4-1(c) 単層ラチスドームの形状 (モデル2の部材番号)



(a) 等分布荷重

(b) 片偏載荷重

図 4-4 荷重条件

表 4-3 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=20, l_0=10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\theta_0$ (deg.)	1.0					1.5					2.0				
	1	2	4	10	100	1	2	4	10	100	1	2	4	10	100
$\kappa$	100.5	120.6	138.1	154.1	166.9	222.9	273.8	315.3	344.0	364.5	384.1	489.5	554.1	606.2	646.6
$\lambda_0=30$	61.5 (58.7)	76.4 (74.0)	88.0 (86.3)	98.0 (96.6)	106.0 (104.8)	140.3 (127.4)	178.3 (166.8)	208.6 (198.3)	233.3 (223.8)	251.9 (243.1)	268.5 (233.2)	342.4 (306.3)	402.7 (368.7)	451.6 (420.2)	488.5 (458.6)
	58.8 (56.1)	64.1 (62.1)	66.6 (65.3)	66.5 (66.9)	66.5 (66.5)	113.3 (108.3)	115.8 (112.4)	117.0 (113.5)	117.9 (114.2)	115.8 (113.6)	157.9 (152.8)	160.0 (162.2)	161.5 (161.9)	162.8 (161.8)	160.4 (160.6)
	35.0	43.7	49.9	55.2	58.6	75.1	97.1	112.1	122.8	129.9	130.1	170.4	199.0	217.4	227.4
$\lambda_0=50$	20.9 (18.8)	26.8 (24.9)	31.6 (29.8)	35.4 (33.8)	38.2 (36.7)	47.1 (41.4)	61.8 (54.1)	73.5 (66.0)	83.0 (76.0)	89.9 (83.3)	88.8 (59.4)	116.5 (101.6)	142.9 (121.5)	162.0 (140.3)	175.1 (154.6)
	20.9 (18.8)	26.8 (24.9)	31.2 (29.4)	33.4 (31.7)	34.6 (33.1)	47.1 (41.4)	60.2 (49.6)	63.3 (55.0)	64.2 (57.3)	64.5 (57.7)	87.6 (59.4)	94.5 (74.1)	96.2 (79.6)	96.0 (82.4)	96.8 (83.0)
$\lambda_0=60$	9.4 (8.3)	12.2 (11.0)	14.4 (13.4)	16.2 (15.3)	17.2 (16.6)	20.9 (15.0)	28.0 (24.1)	32.8 (29.3)	34.0 (34.0)	34.4 (37.4)	41.5 (27.6)	49.8 (36.2)	52.4 (54.2)	53.1 (62.0)	53.3 (68.7)
	8.3 (8.3)	11.0 (11.0)	13.4 (13.4)	15.2 (15.2)	16.2 (16.2)	15.0 (15.0)	22.5 (22.5)	26.3 (26.3)	28.9 (28.9)	29.3 (29.3)	27.6 (27.6)	35.6 (35.6)	40.3 (40.3)	42.8 (42.8)	43.5 (43.5)
$\lambda_0=90$	1.95 (1.40)	2.60 (2.24)	3.12 (2.74)	3.54 (3.18)	3.83 (3.49)	4.83 (3.33)	5.91 (4.14)	7.12 (5.30)	8.28 (6.88)	9.06 (7.64)	10.62 (7.50)	12.18 (8.43)	13.94 (9.75)	15.41 (11.47)	16.21 (13.20)
	1.88 (0.77)	2.39 (1.01)	2.81 (1.46)	3.05 (1.69)	3.22 (1.87)	4.72 (2.12)	5.56 (2.49)	6.26 (2.88)	6.54 (3.26)	6.61 (3.57)	8.76 (5.36)	9.12 (5.62)	9.23 (6.04)	9.31 (6.62)	9.38 (7.26)
$\lambda_0=120$	1.11 (0.77)	1.40 (1.01)	1.71 (1.46)	1.98 (1.69)	2.15 (1.87)	3.07 (2.12)	3.52 (2.49)	4.02 (2.88)	4.55 (3.26)	4.98 (3.57)	7.11 (5.36)	7.68 (5.62)	8.31 (6.04)	8.95 (6.62)	9.43 (7.26)

上段：線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 中段：弾性座屈荷重  $P_{cr}^{el}$ , 下段：弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$ , ( )内は形状初期不整がある場合

表 4-4 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=20, l_0=10m$ , 片偏載荷重 (1:3)]

$\theta_0$ (deg.)	1.0					1.5					2.0				
	1	2	4	10	100	1	2	4	10	100	1	2	4	10	100
$\kappa$	88.4	109.2	126.7	142.1	154.0	195.9	243.6	282.7	312.9	335.4	346.7	435.4	500.6	554.5	595.4
$\lambda_0=30$	52.7	55.3	54.6	54.0	53.2	93.9	89.5	95.3	92.8	89.9	130.3	132.7	135.0	133.6	127.9
$\lambda_0=50$	30.7	38.1	44.0	48.8	52.2	67.8	85.7	98.5	107.9	114.4	121.4	154.0	176.5	191.4	201.9
	20.1	25.9	29.0	30.1	30.7	45.8	52.9	53.6	53.5	53.4	74.4	76.2	76.9	77.6	77.8
$\lambda_0=60$	13.98	17.46	20.01	22.08	23.61	30.9	39.4	45.0	49.1	52.0	57.4	71.3	81.1	87.1	90.9
	9.01	11.68	13.90	15.38	16.00	20.4	26.9	28.9	29.1	29.2	38.9	41.3	41.8	42.2	42.6
$\lambda_0=90$	3.03	3.84	4.38	4.77	5.04	7.32	8.87	9.90	10.50	10.91	13.79	15.04	16.38	17.69	18.41
	1.92	2.50	2.99	3.40	3.69	4.73	5.80	7.00	8.06	8.74	9.33	11.23	13.41	13.48	13.57
$\lambda_0=120$	1.77	2.19	2.46	2.64	2.73	4.18	4.55	4.98	5.40	5.72	5.84	6.38	7.04	7.81	8.56
	1.08	1.37	1.69	1.91	2.07	2.94	3.39	3.90	4.42	4.84	5.76	6.42	7.05	7.71	8.14

上段：線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 下段：弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$ , 偏載荷重の比率は  $P_{cr}/3 : P_{cr}$  である。

表 4-5 座屈荷重  $P_{cr}(tf/node)$  [ $n=12, l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\theta_0$ (deg.)	1.0					1.5					2.0				
	1	2	4	10	100	1	2	4	10	100	1	2	4	10	100
$\kappa$	13.66	16.45	18.93	21.27	23.19	30.34	37.62	42.97	47.09	49.92	51.92	66.31	77.19	84.06	89.11
$\lambda_0=30$	8.68	10.91	12.58	14.11	15.09	18.38	23.88	28.62	32.41	34.95	32.26	42.06	49.98	57.39	63.53
	(7.97)	(10.22)	(11.92)	(13.50)	(14.55)	(16.33)	(21.76)	(26.21)	(30.07)	(32.83)	(27.70)	(37.19)	(45.17)	(52.32)	(58.27)
	8.33	9.17	9.62	9.98	9.91	15.06	15.37	15.59	15.72	15.75	21.87	21.82	21.67	21.67	21.94
	(7.74)	(8.73)	(9.24)	(9.61)	(9.60)	(13.86)	(14.77)	(14.69)	(14.47)	(14.34)	(18.37)	(19.24)	(19.52)	(19.21)	(18.68)
	3.21	4.13	4.78	5.23	5.52	6.84	8.97	10.62	11.55	12.16	12.07	15.74	18.49	20.17	21.14
	1.93	2.51	2.98	3.42	3.77	4.07	5.43	6.68	7.67	8.31	7.55	9.46	11.64	13.75	15.23
	(1.67)	(2.23)	(2.71)	(3.14)	(3.46)	(3.65)	(4.68)	(5.71)	(6.74)	(7.49)	(5.02)	(6.46)	(9.94)	(11.53)	(15.76)
$\lambda_0=60$	1.93	2.51	2.98	3.42	3.65	4.07	5.43	6.44	6.93	6.98	7.55	9.18	10.03	10.37	10.44
	(1.66)	(2.21)	(2.68)	(3.07)	(3.26)	(3.62)	(4.91)	(4.91)	(5.22)	(5.45)	(5.01)	(6.40)	(7.29)	(7.68)	(7.83)
	1.35	1.77	2.09	2.28	2.40	3.06	3.89	4.61	4.96	5.16	5.99	7.08	7.97	8.33	8.48
	0.79	1.05	1.30	1.49	1.61	1.90	2.32	2.79	3.30	3.69	3.92	4.49	5.16	5.86	6.49
	(0.71)	(0.91)	(1.11)	(1.32)	(1.46)	(1.29)	(1.62)	(1.99)	(2.75)	(3.05)	(2.78)	(3.15)	(3.55)	(4.25)	(4.88)
$\lambda_0=90$	0.79	1.05	1.30	1.49	1.61	1.90	2.32	2.79	3.30	3.69	3.92	4.49	5.16	5.68	6.02
	(0.70)	(0.90)	(1.09)	(1.28)	(1.40)	(1.29)	(1.62)	(2.01)	(2.50)	(2.78)	(2.78)	(3.14)	(3.52)	(4.17)	(4.47)
	0.752	0.979	1.146	1.251	1.315	1.89	2.23	2.52	2.63	2.68	3.73	3.80	3.85	3.89	3.92
	0.455	0.568	0.698	0.824	0.912	1.21	1.39	1.59	1.81	2.01	2.65	2.87	3.12	3.39	3.62
	(0.310)	(0.391)	(0.597)	(0.693)	(0.775)	(0.87)	(0.97)	(1.10)	(1.33)	(1.52)	(2.02)	(2.14)	(2.27)	(2.47)	(2.71)
$\lambda_0=120$	0.455	0.568	0.698	0.824	0.912	1.21	1.39	1.59	1.81	2.01	2.65	2.87	3.12	3.39	3.62
	(0.310)	(0.390)	(0.577)	(0.664)	(0.736)	(0.86)	(0.96)	(1.10)	(1.31)	(1.48)	(2.02)	(2.12)	(2.24)	(2.42)	(2.63)
	0.502	0.621	0.728	0.784	0.810	1.36	1.45	1.47	1.48	1.50	1.92	1.96	1.99	2.01	2.03
	0.312	0.370	0.437	0.512	0.573	0.894	0.979	1.075	1.179	1.272	1.76	1.88	1.95	2.00	2.03
	(0.215)	(0.252)	(0.305)	(0.427)	(0.466)	(0.674)	(0.721)	(0.774)	(0.856)	(0.948)	(1.53)	(1.59)	(1.66)	(1.74)	(1.83)
$\lambda_0=150$	0.312	0.370	0.437	0.512	0.573	0.894	0.979	1.075	1.179	1.272	1.76	1.88	1.95	2.00	2.03
	(0.215)	(0.252)	(0.303)	(0.383)	(0.437)	(0.672)	(0.718)	(0.767)	(0.840)	(0.920)	(1.51)	(1.56)	(1.61)	(1.68)	(1.76)

上段：線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$ , 中段：弾性座屈荷重  $P_{cr}^{el}$ , 下段：弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$ , ( )内は形状初期不整がある場合

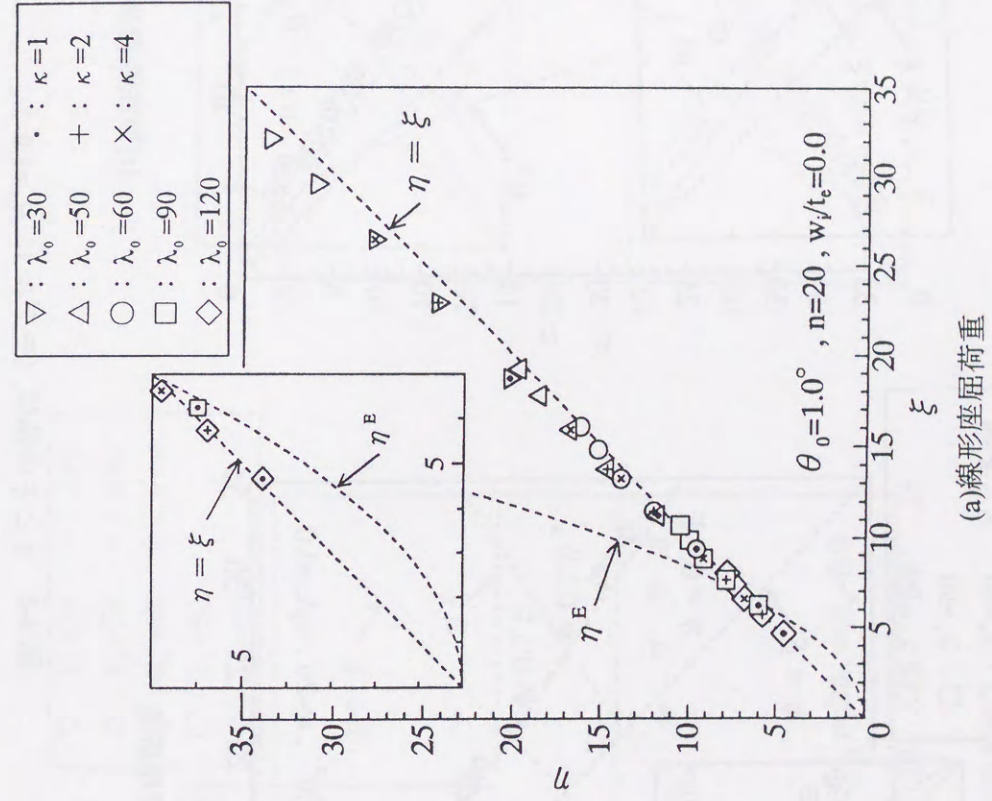
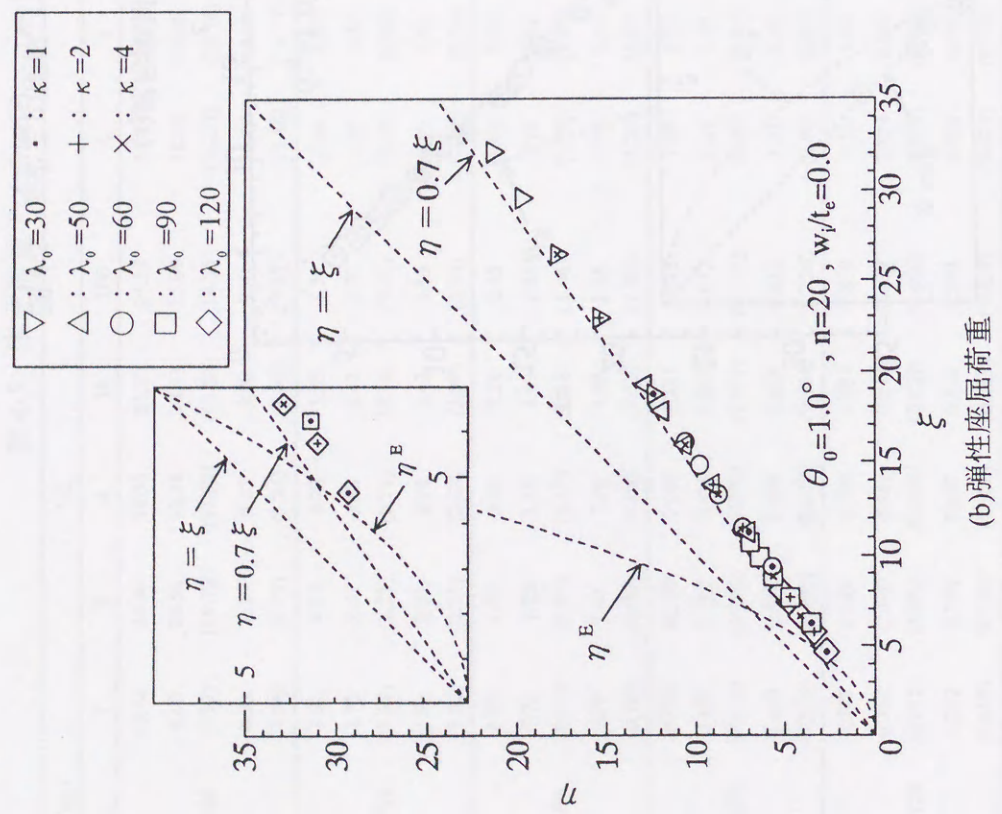
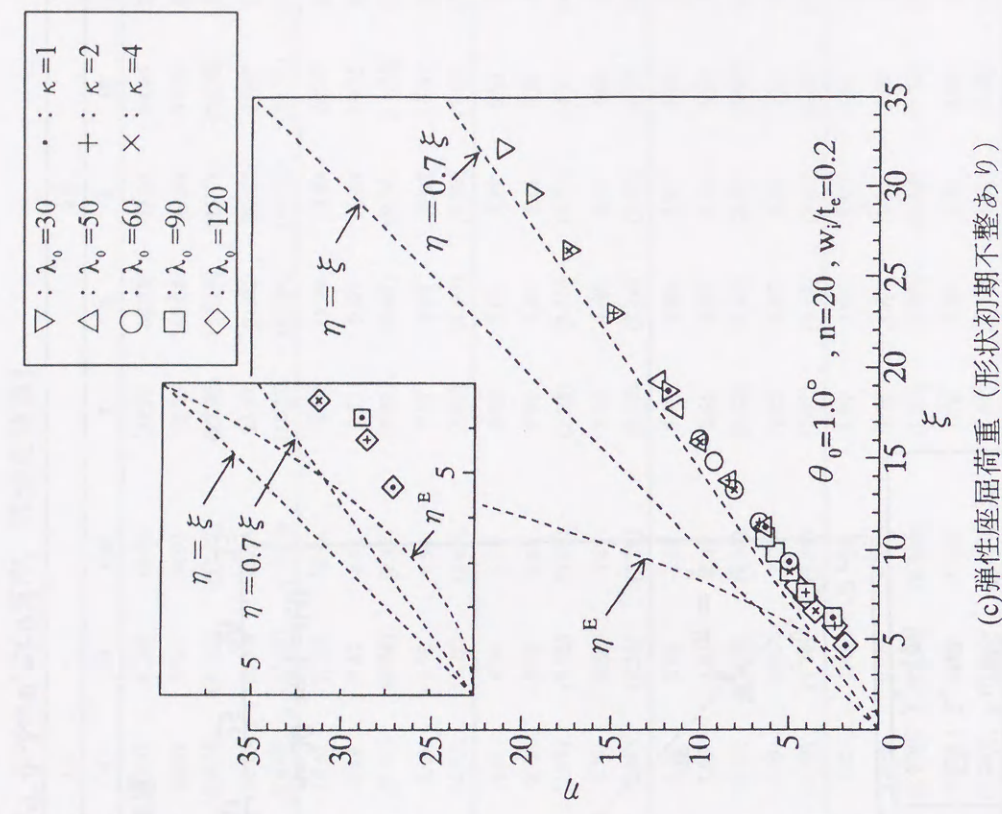


図 4-5  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル 1,  $\theta_0=1.0^\circ$ )

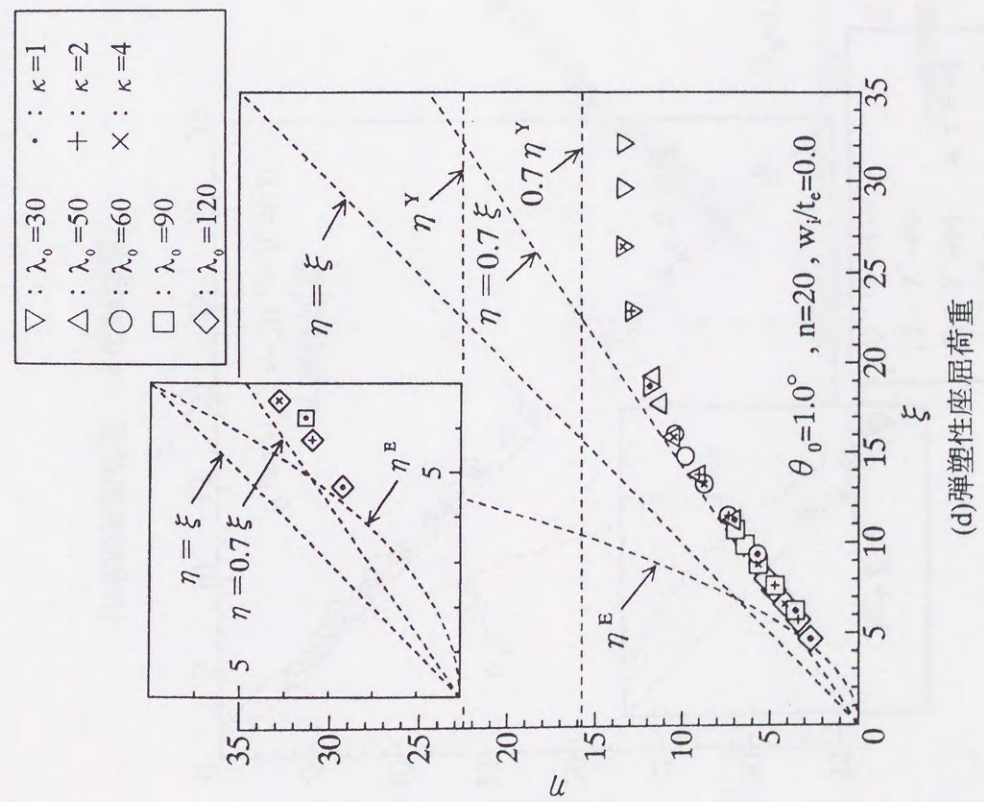


(b)弾性座屈荷重

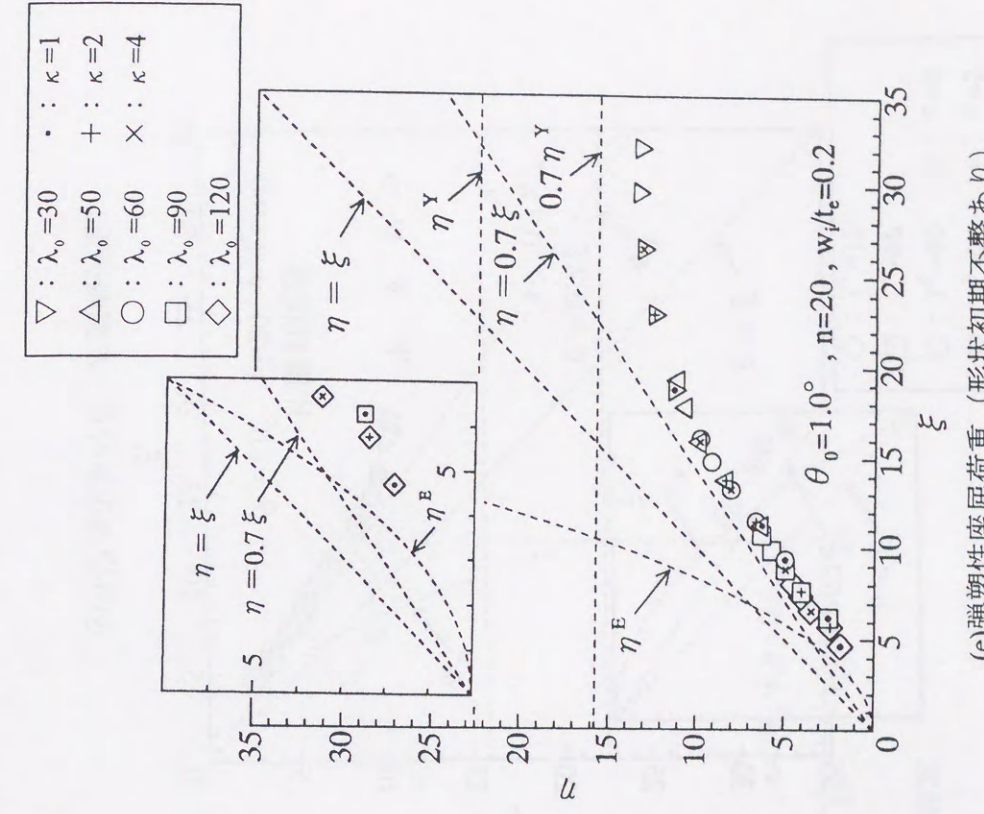


(c)弾性座屈荷重 (形状初期不整あり)

図4-5 ηとξの関係 (モデル1,  $\theta_0=1.0^\circ$ )

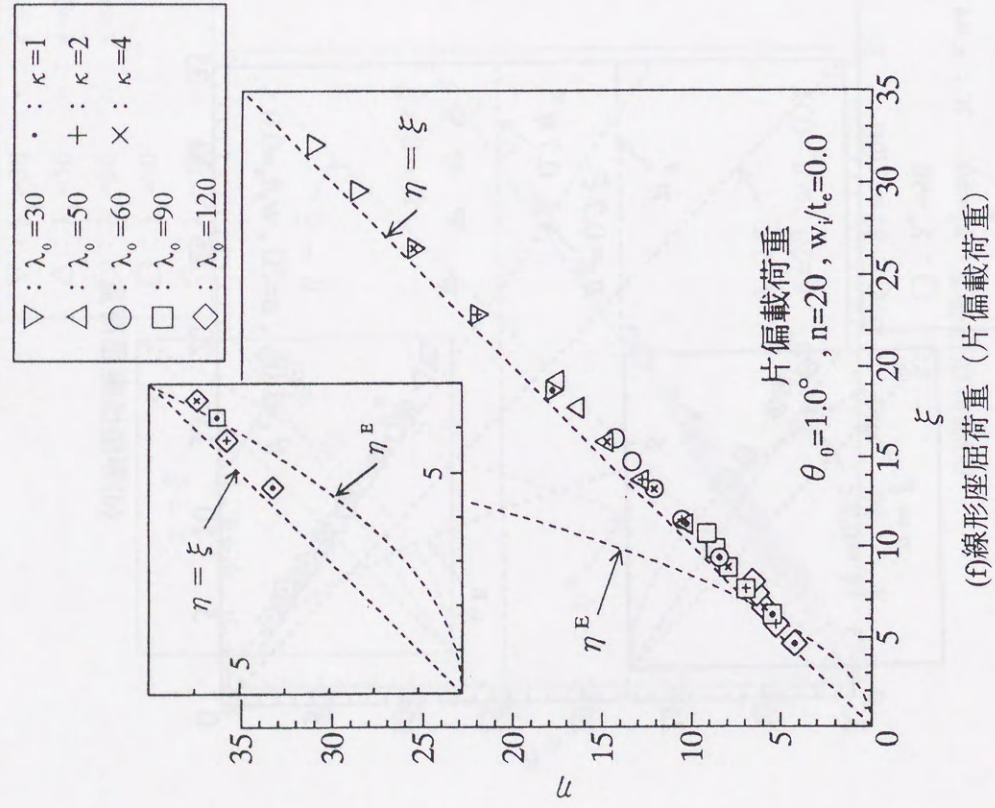


(d)弾塑性座屈荷重

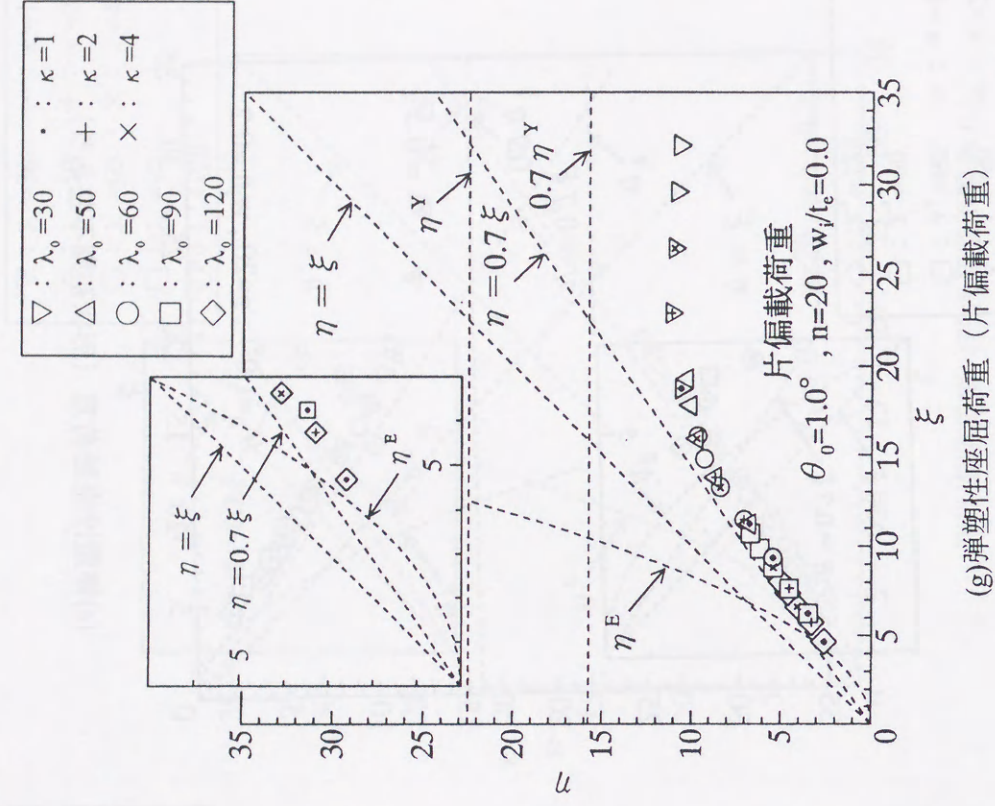


(e)弾塑性座屈荷重 (形状初期不整あり)

図4-5 ηとξの関係 (モデル1,  $\theta_0=1.0^\circ$ )

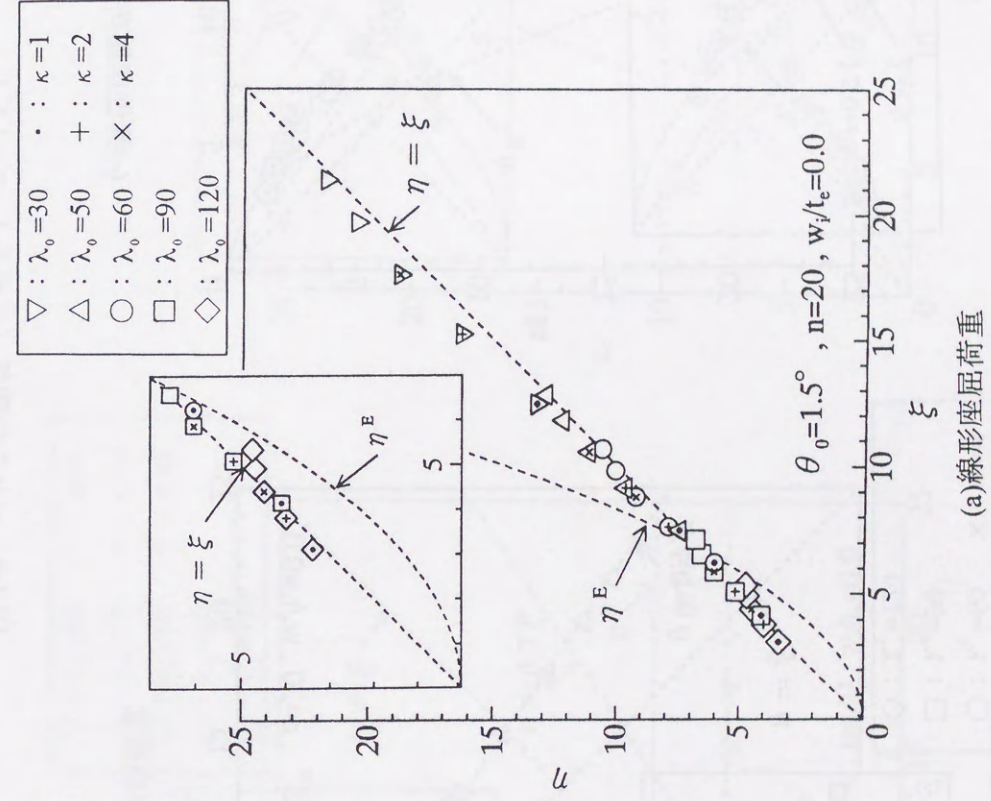


(f)線形座屈荷重 (片偏載荷重)



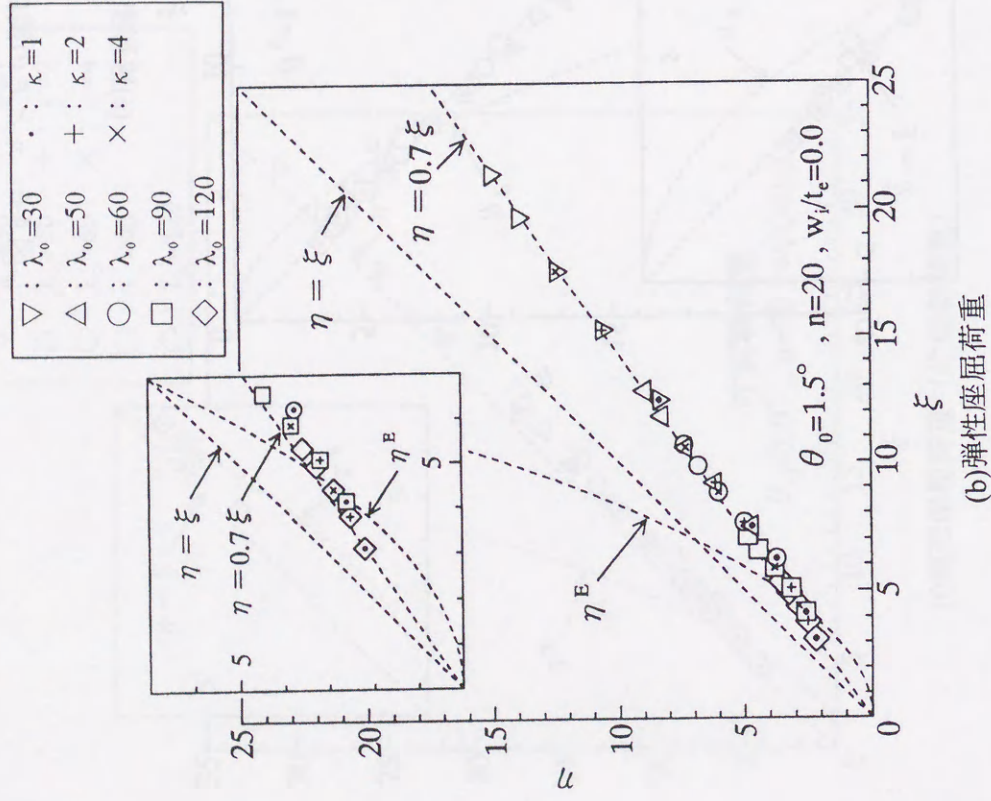
(g)弾塑性座屈荷重 (片偏載荷重)

図 4-5 η と ξ の関係 (モデル 1,  $\theta_0 = 1.0^\circ$ )

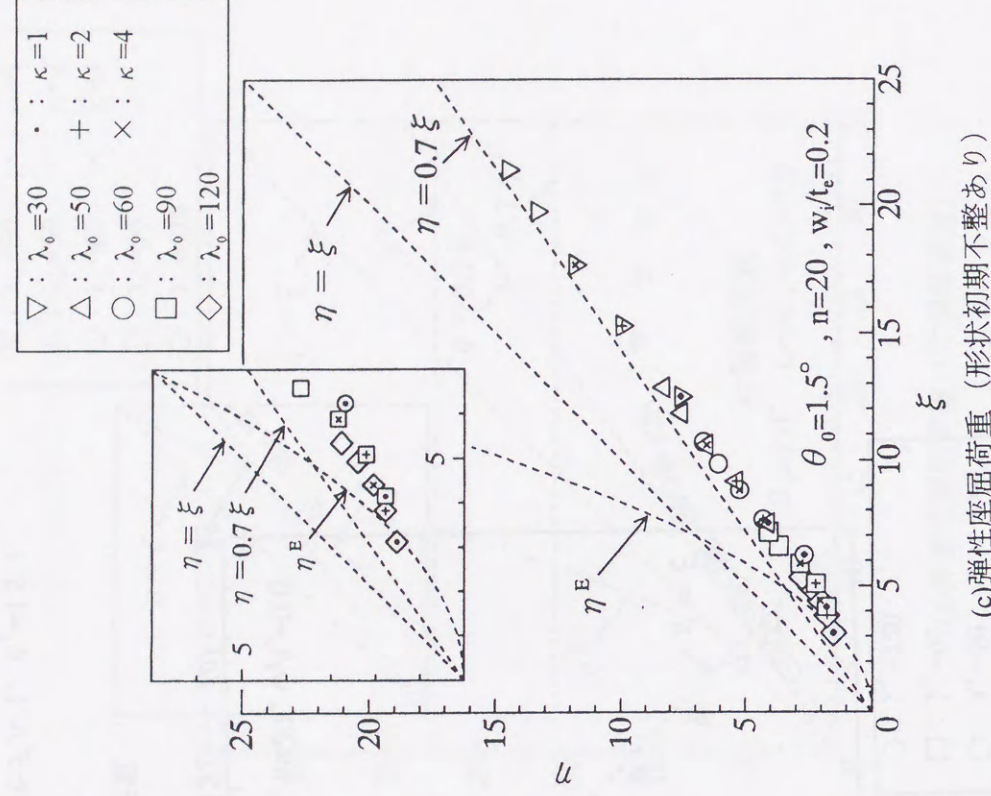


(a)線形座屈荷重

図 4-6 η と ξ の関係 (モデル 1,  $\theta_0 = 1.5^\circ$ )

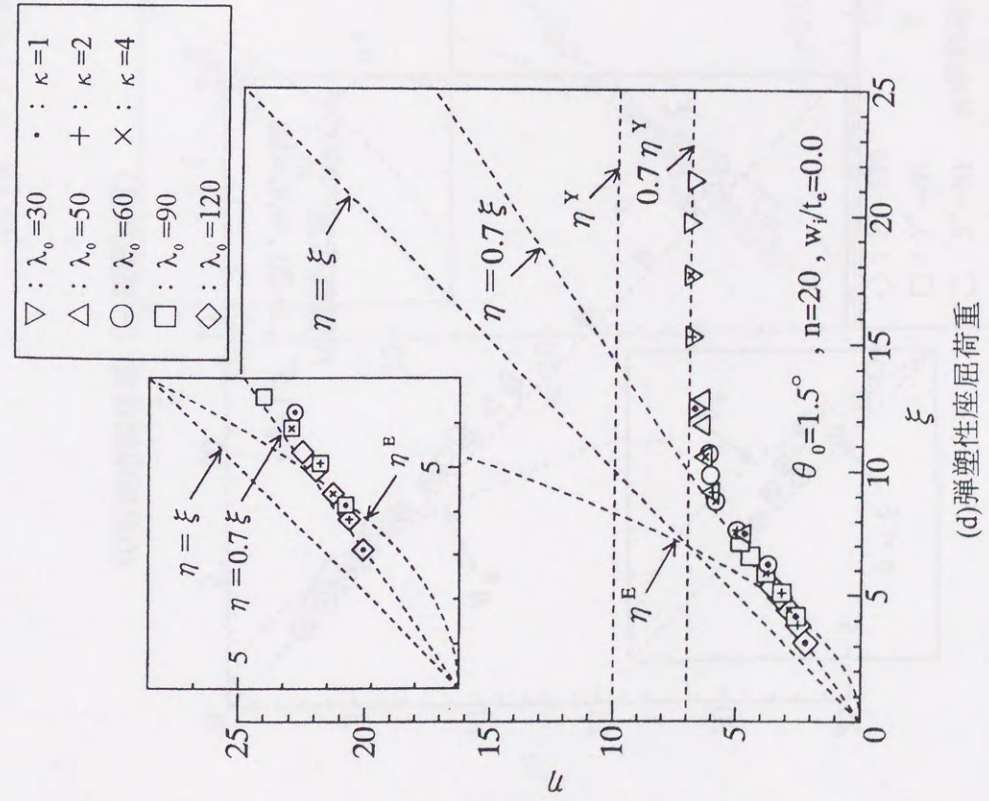


(b)弾性座屈荷重

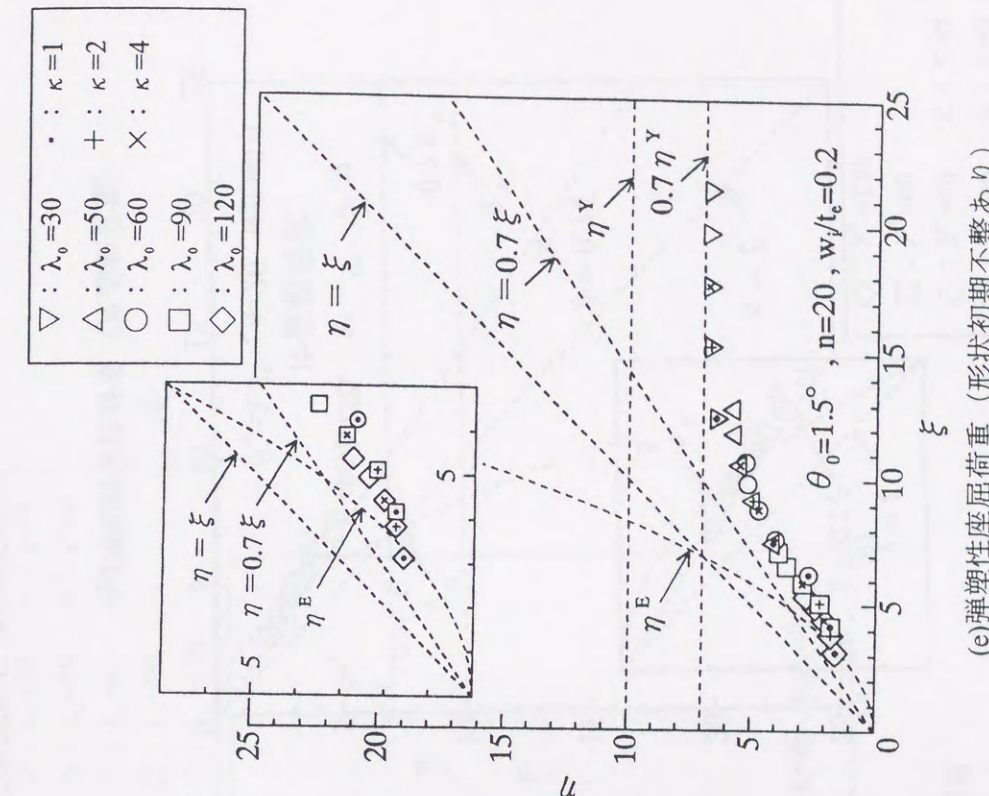


(c)弾性座屈荷重 (形状初期不整あり)

図 4-6 η と ξ の関係 (モデル 1,  $\theta_0=1.5^\circ$ )

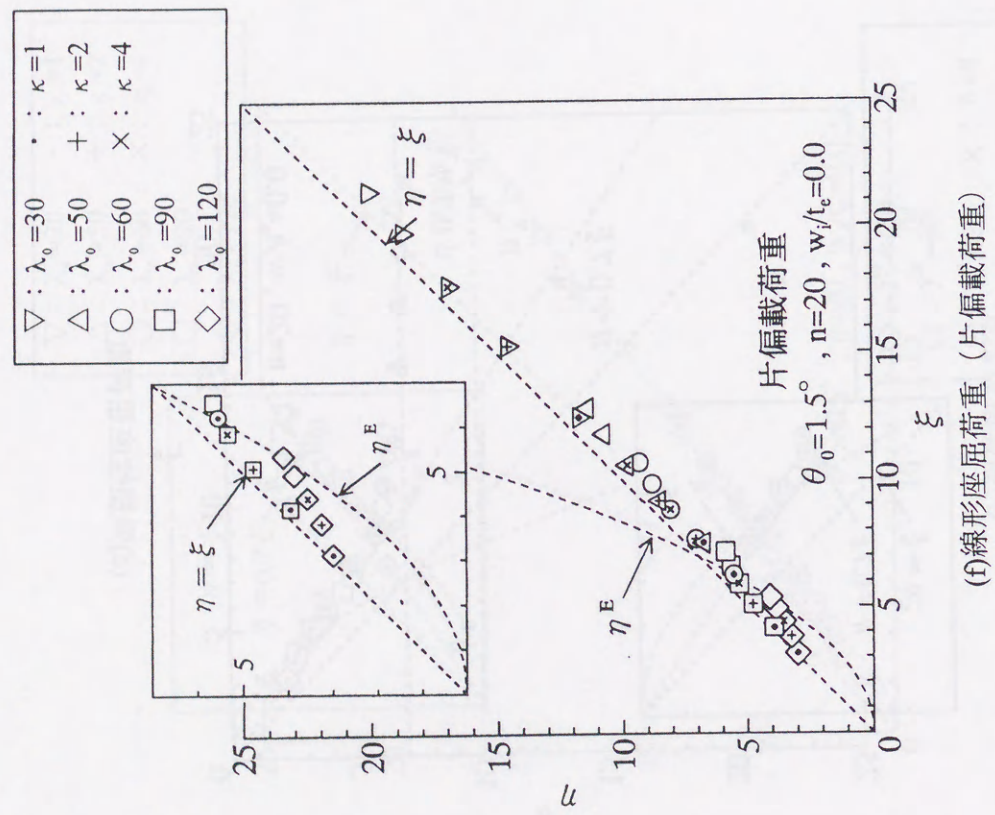


(d)弾塑性座屈荷重

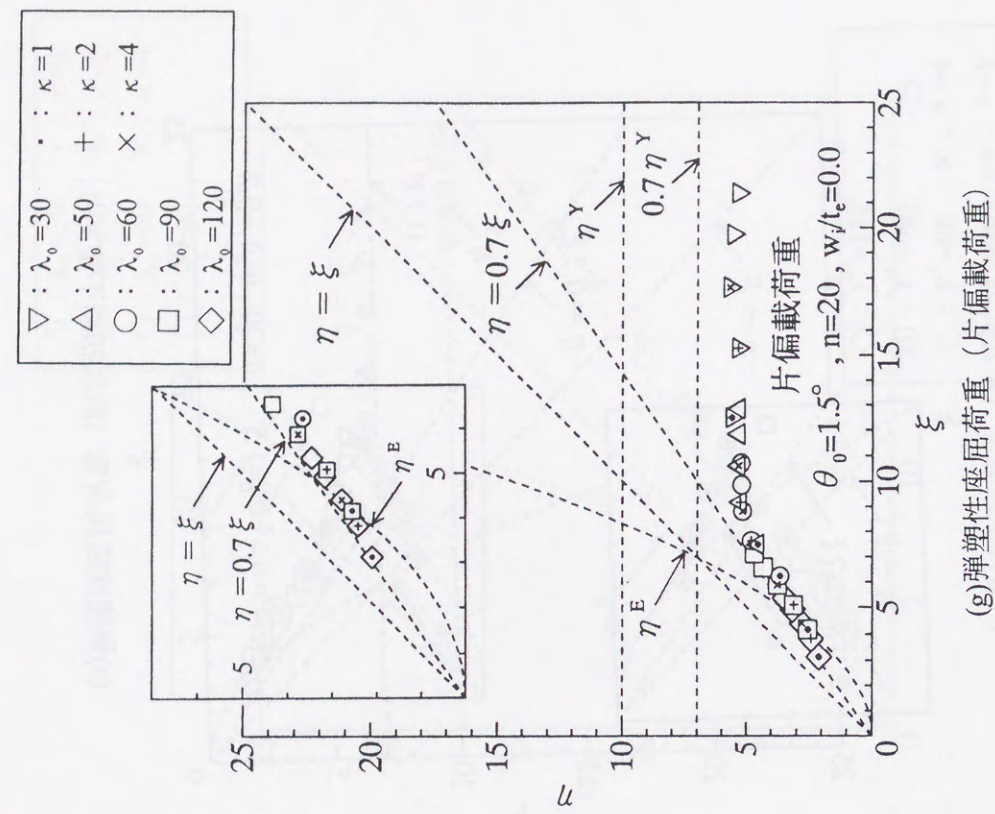


(e)弾塑性座屈荷重 (形状初期不整あり)

図 4-6 η と ξ の関係 (モデル 1,  $\theta_0=1.5^\circ$ )

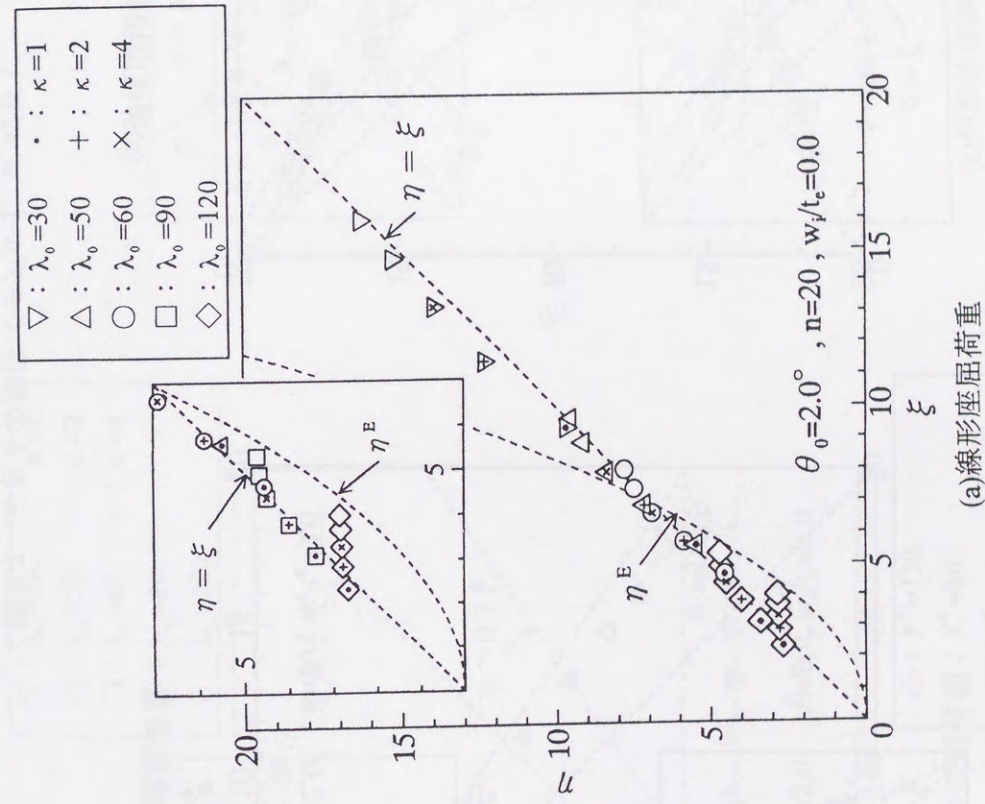


(f)線形座屈荷重 (片偏載荷重)



(g)弾塑性座屈荷重 (片偏載荷重)

図 4-6 η と ξ の関係 (モデル 1,  $\theta_0 = 1.5^\circ$ )



(a)線形座屈荷重

図 4-7 η と ξ の関係 (モデル 1,  $\theta_0 = 2.0^\circ$ )

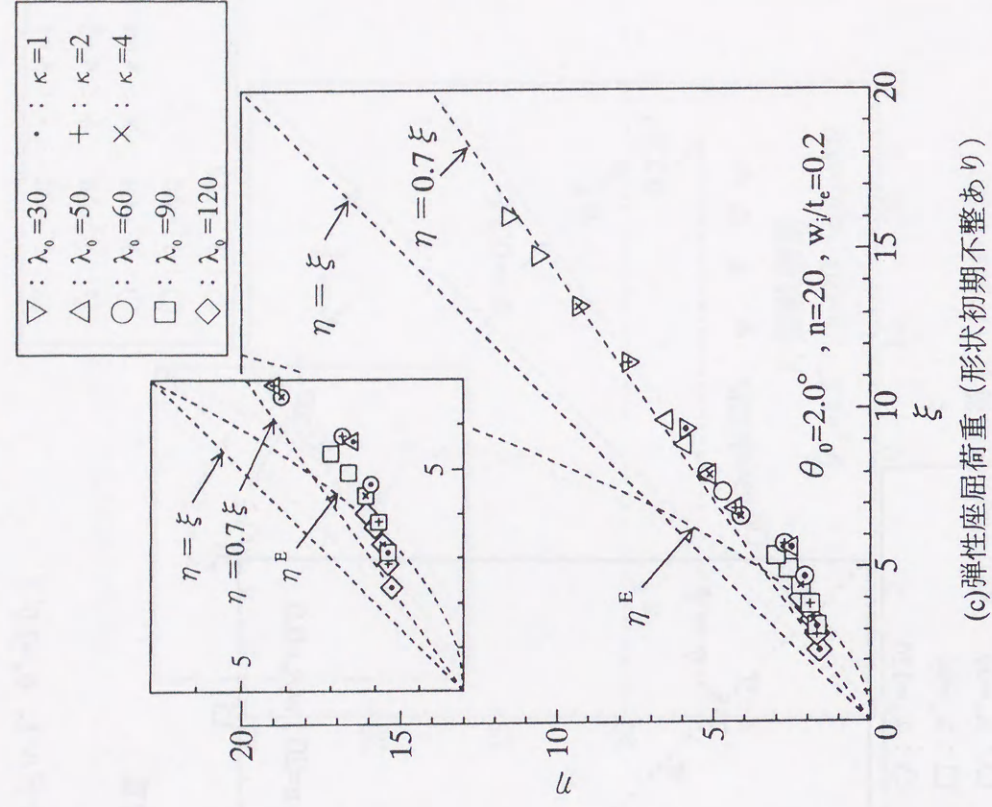
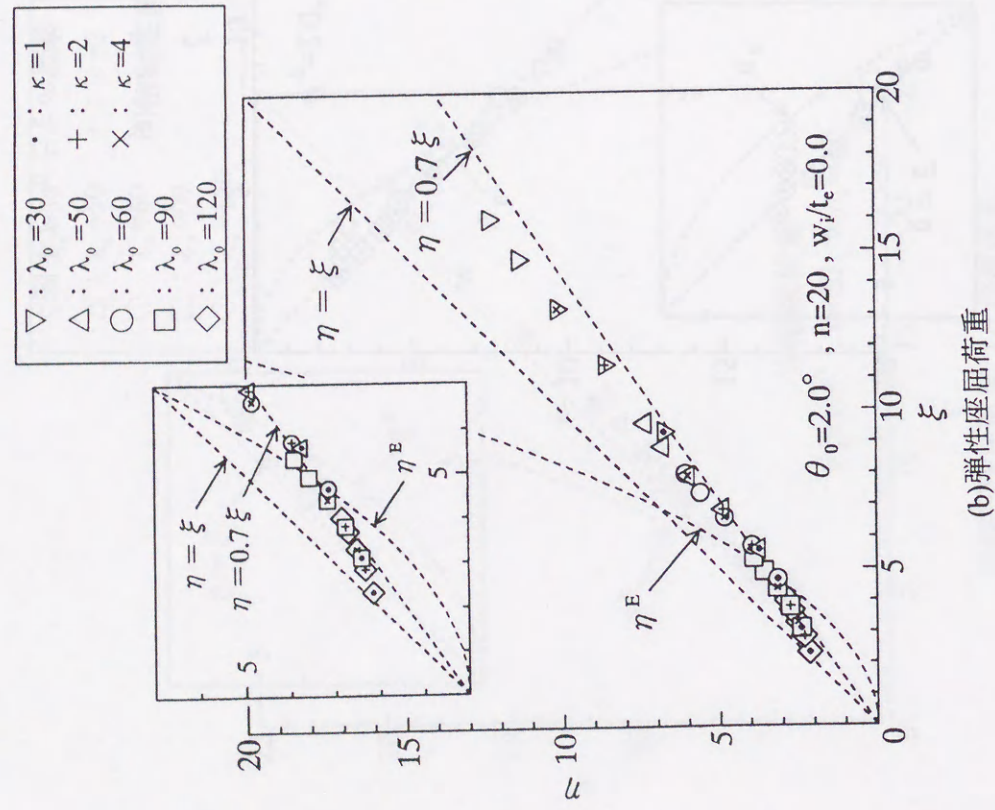


図4-7 ηとξの関係 (モデル1,  $\theta_0=2.0^\circ$ )

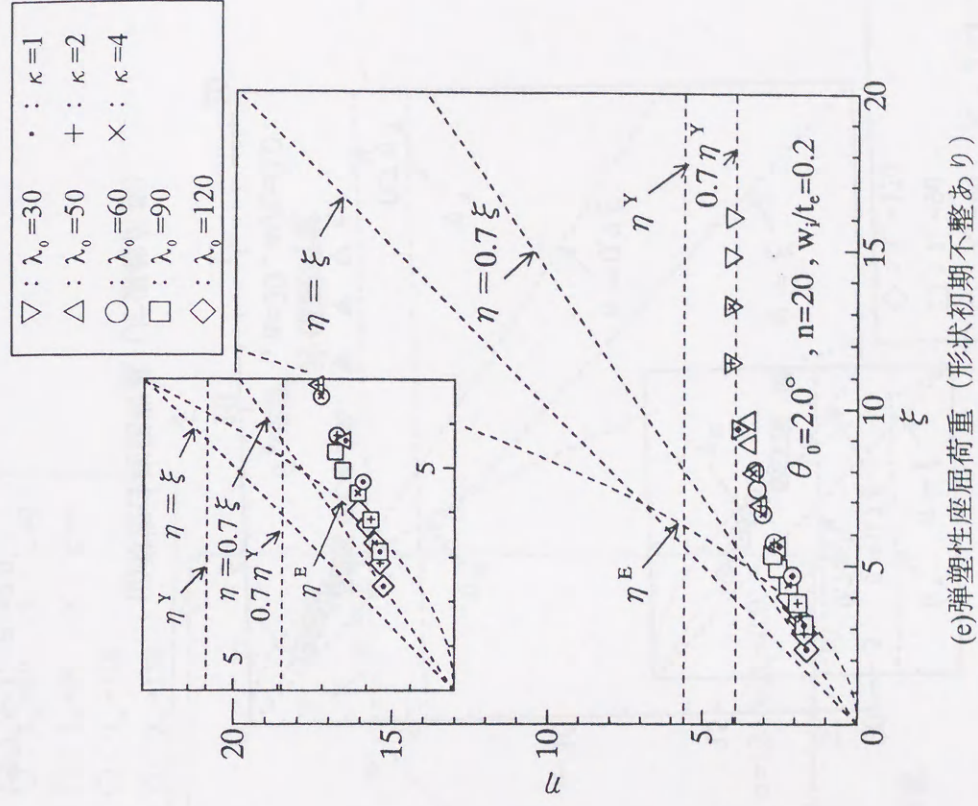
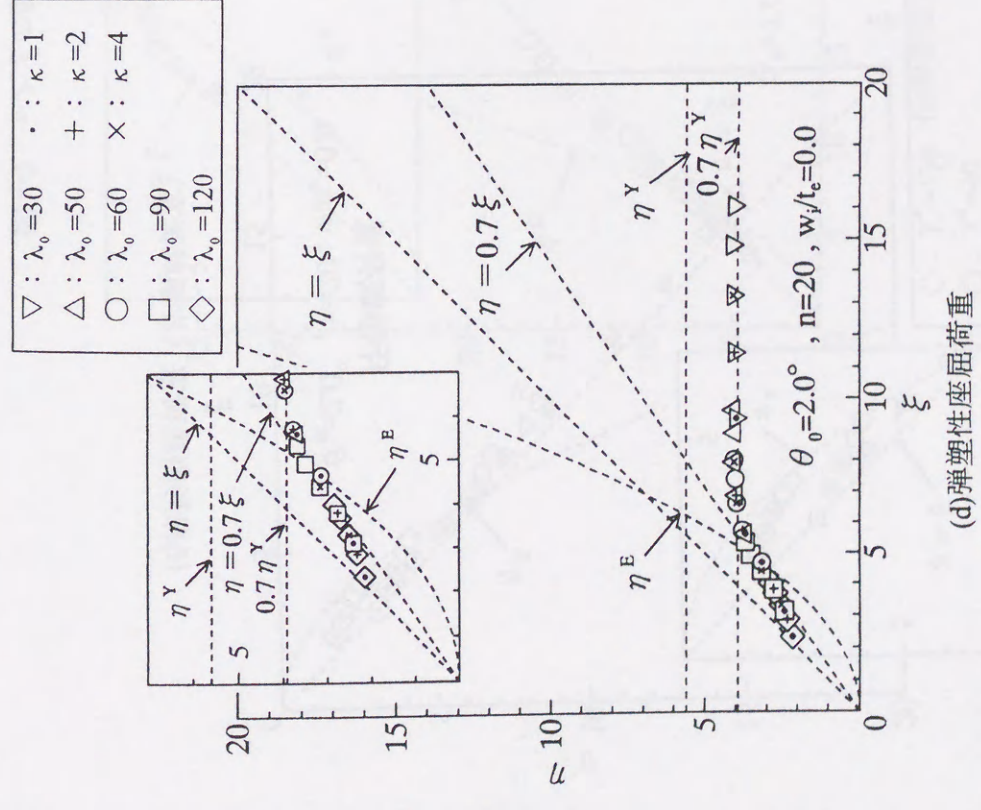


図4-7 ηとξの関係 (モデル1,  $\theta_0=2.0^\circ$ )



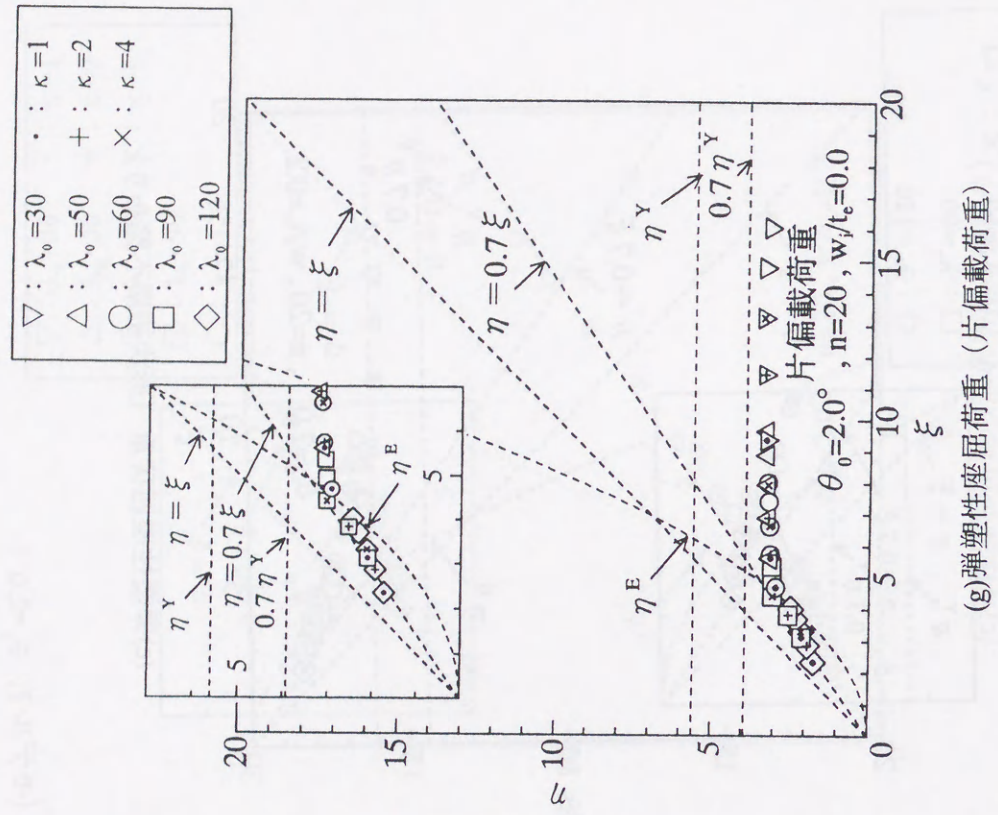
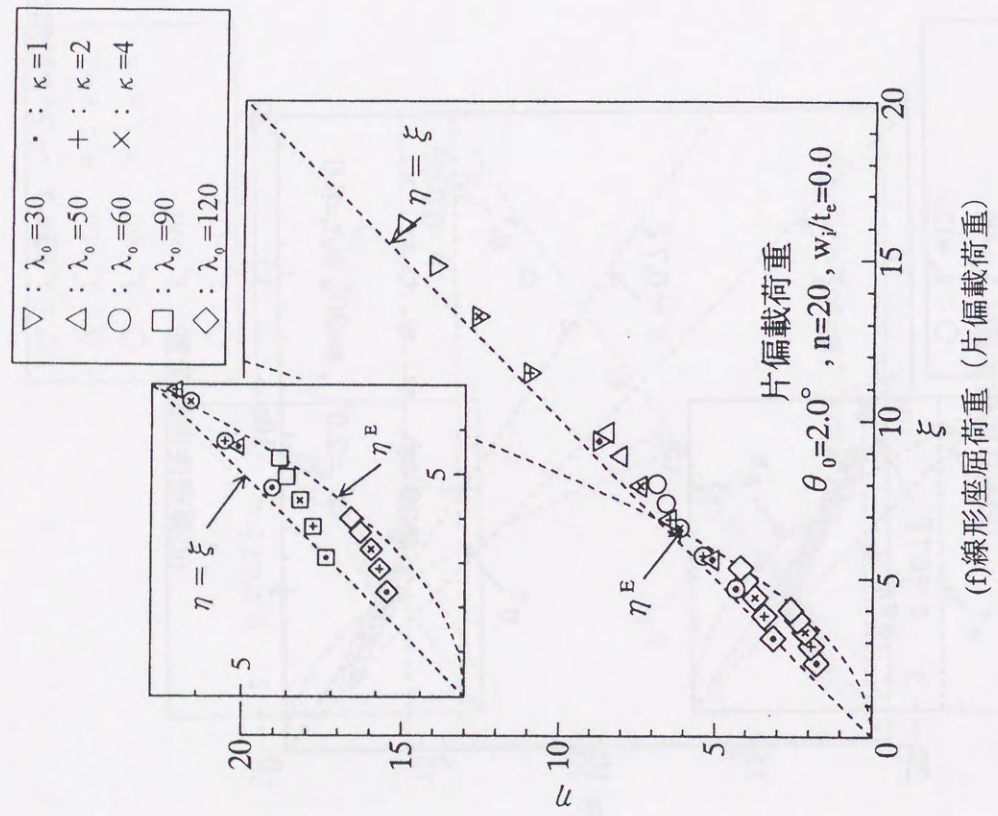


図4-7 ηとξの関係 (モデル1,  $\theta_0=2.0^\circ$ )

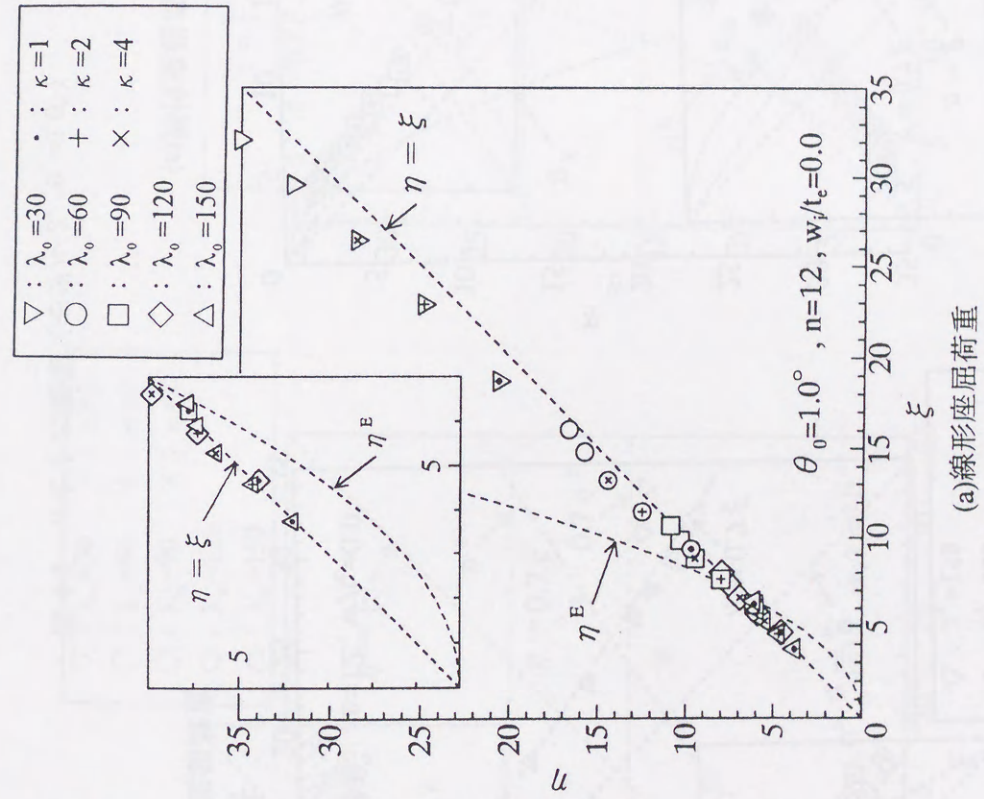


図4-8 ηとξの関係 (モデル2,  $\theta_0=1.0^\circ$ )

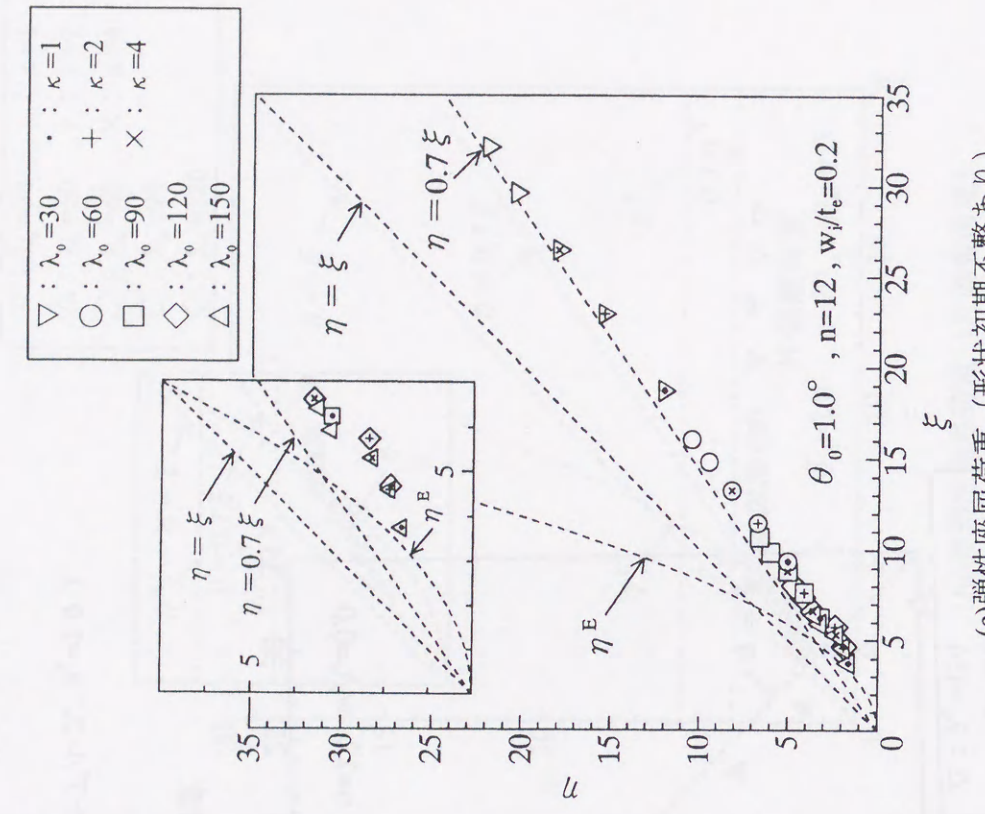
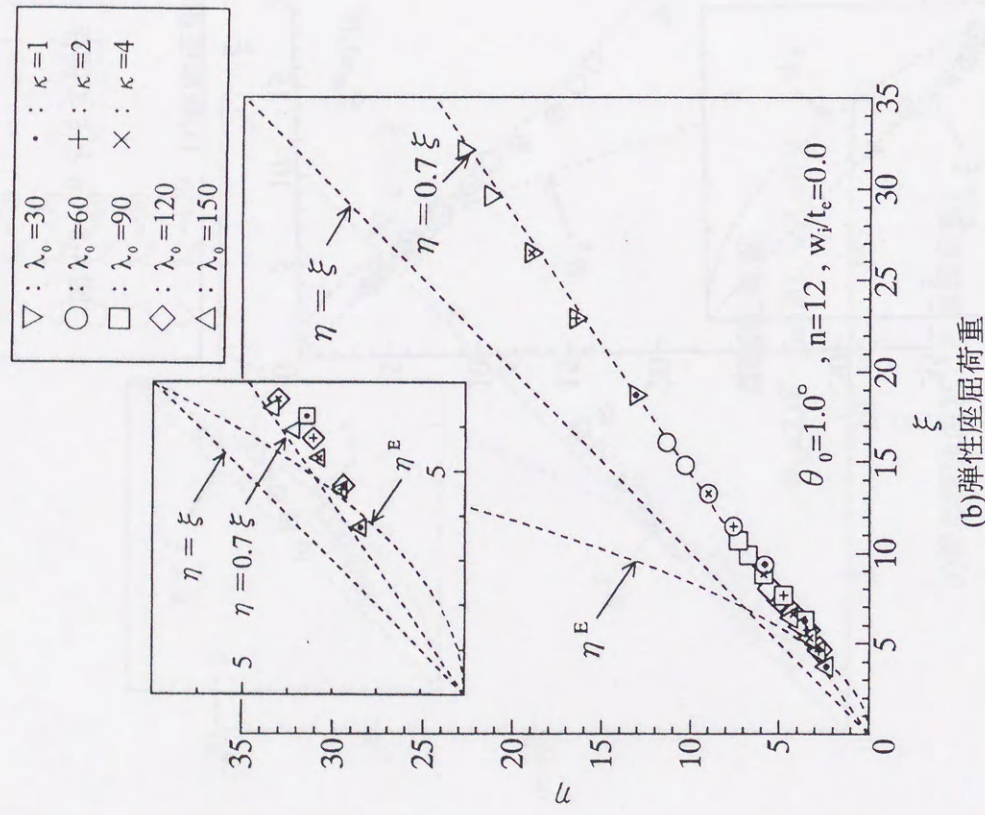


図4-8 ηとξの関係 (モデル2,  $\theta_0=1.0^\circ$ )

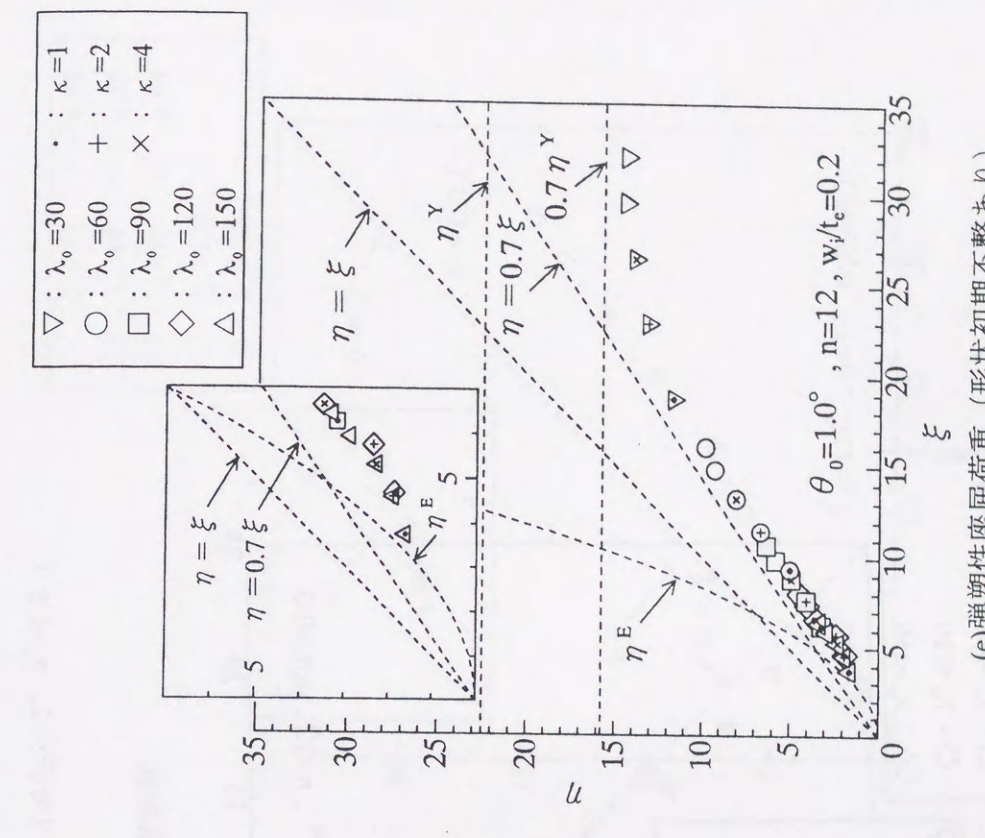
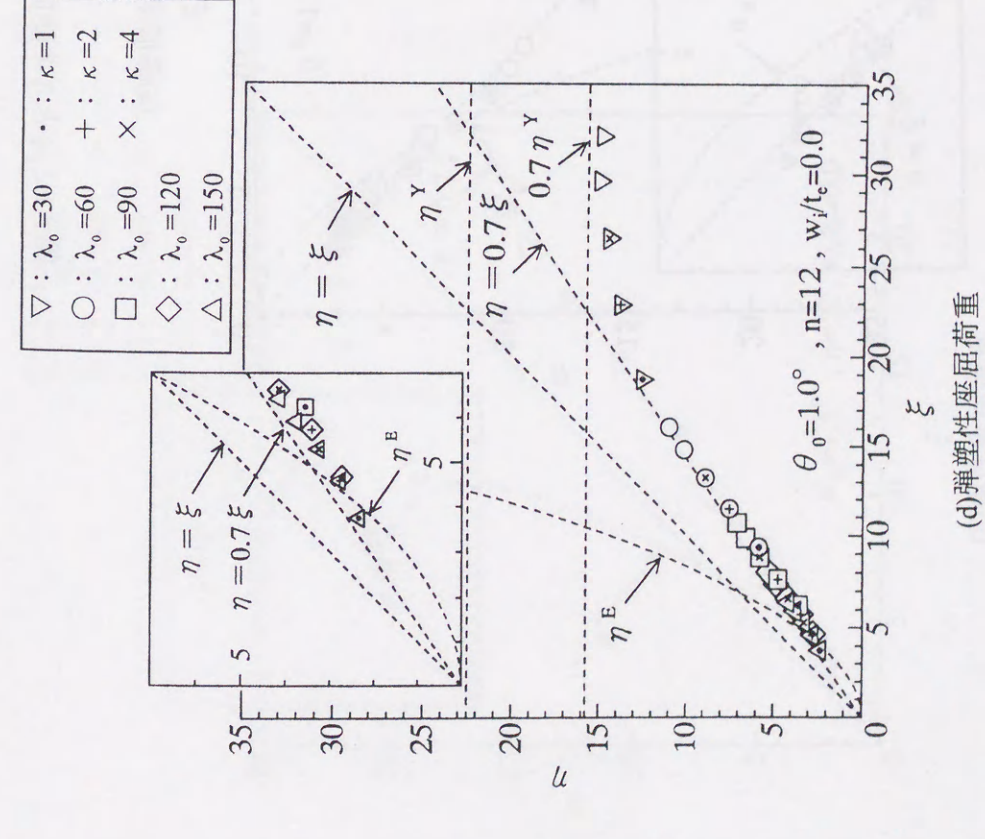


図4-8 ηとξの関係 (モデル2,  $\theta_0=1.0^\circ$ )

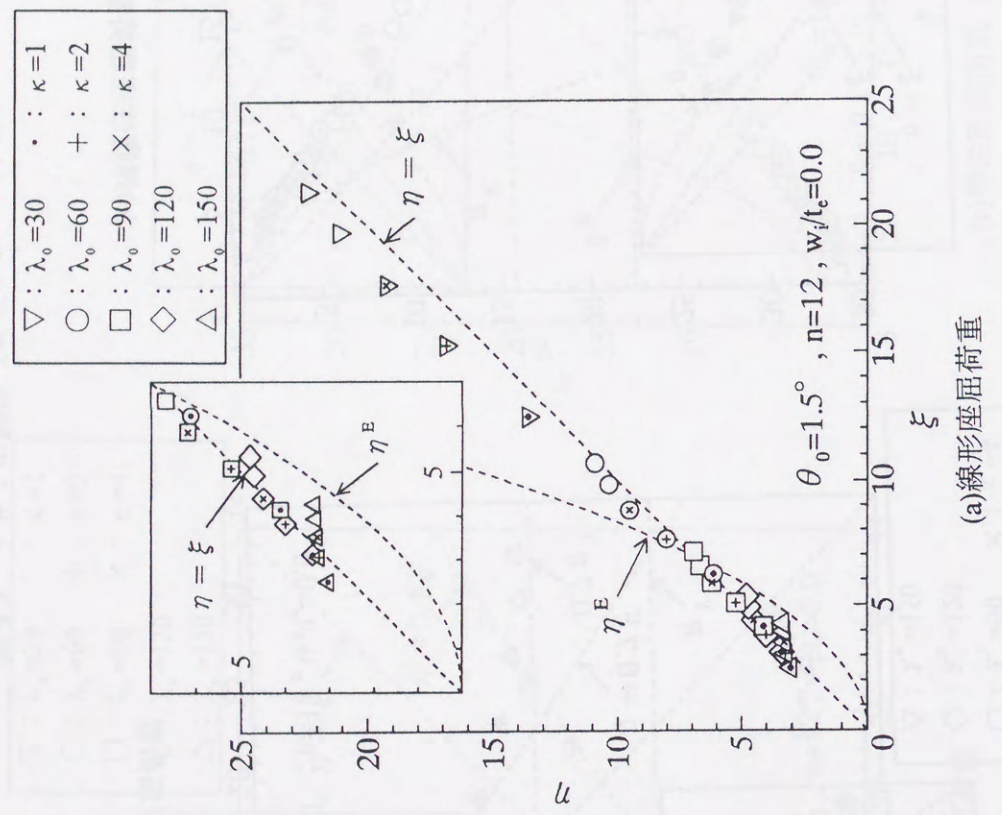


図4-9 ηとξの関係 (モデル2,  $\theta_0=1.5^\circ$ )

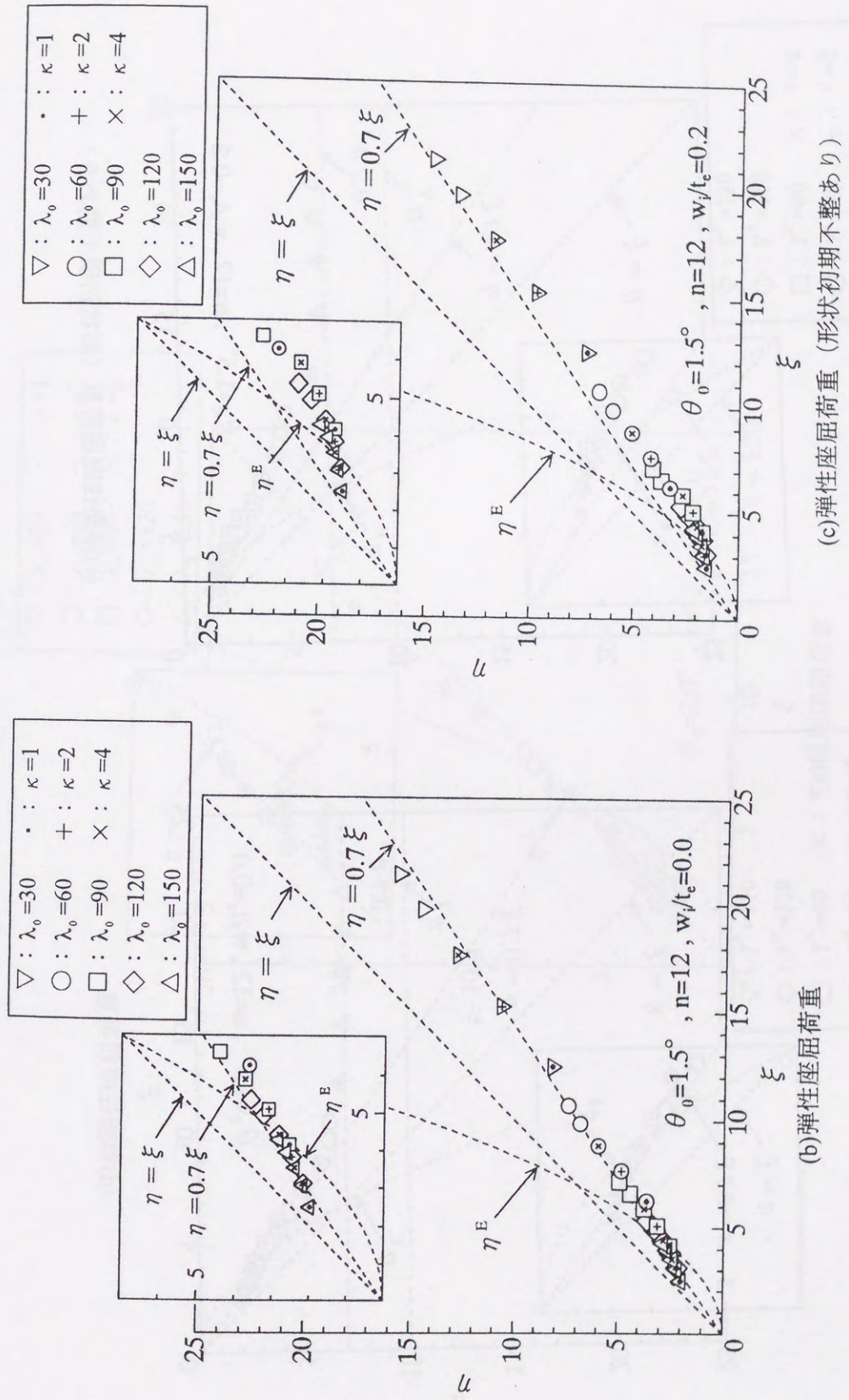


図4-9 ηとξの関係 (モデル2,  $\theta_0=1.5^\circ$ )

(c)弾性座屈荷重 (形状初期不整あり)

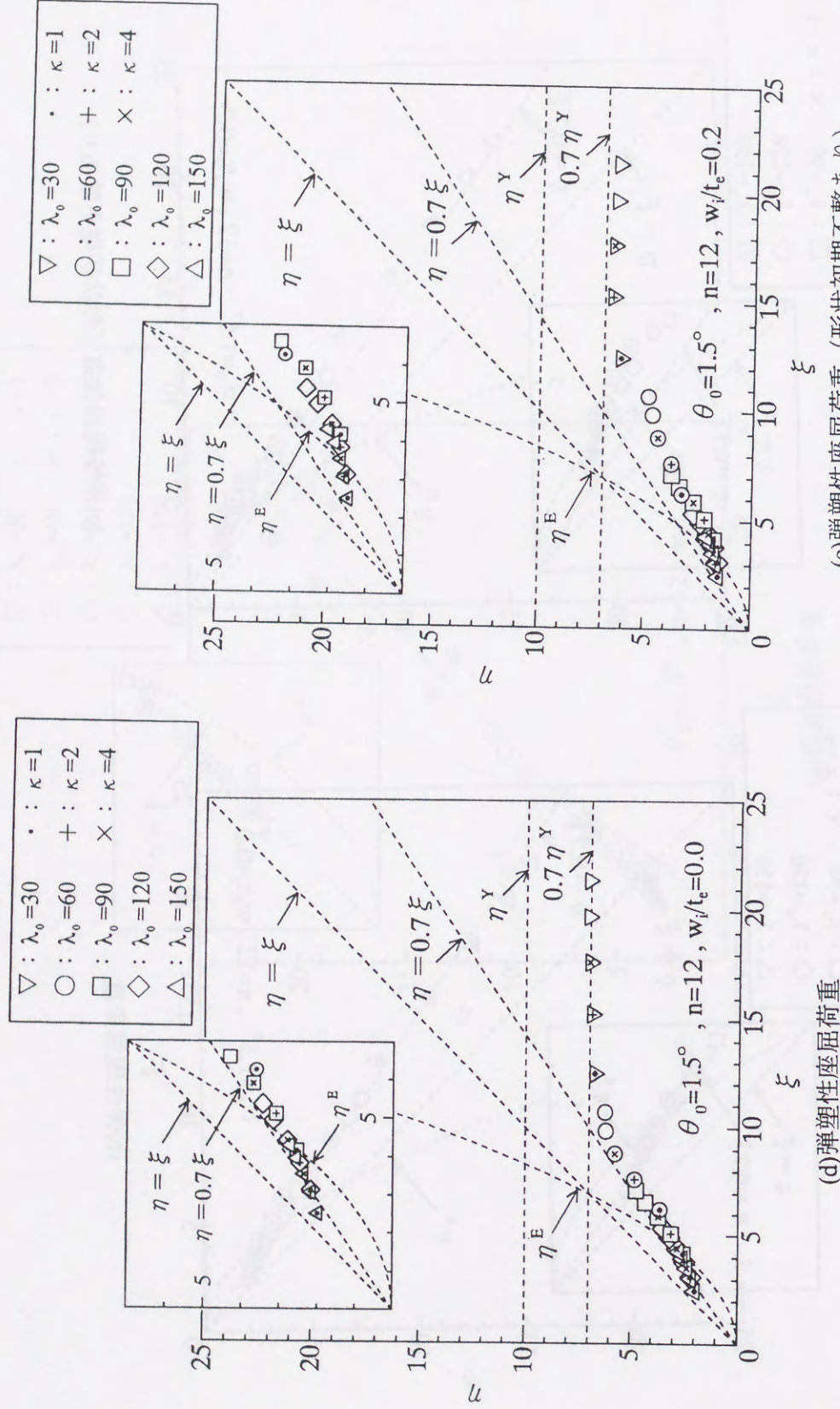


図 4-9  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル 2,  $\theta_0=1.5^\circ$ )

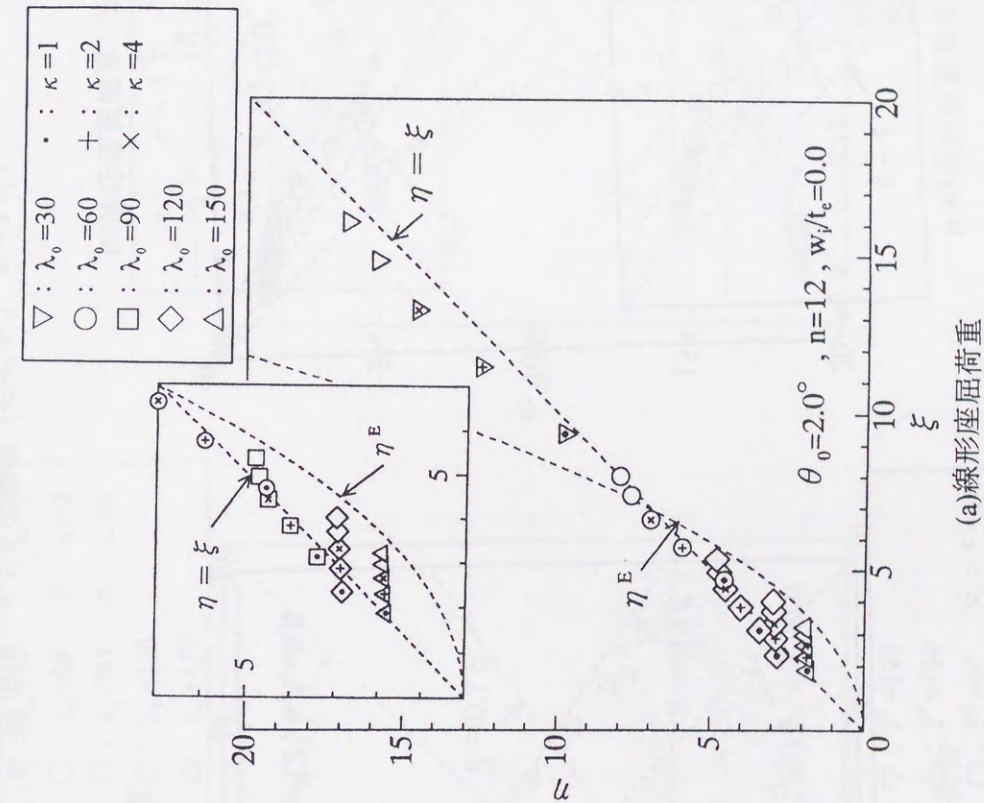


図 4-10  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル 2,  $\theta_0=2.0^\circ$ )

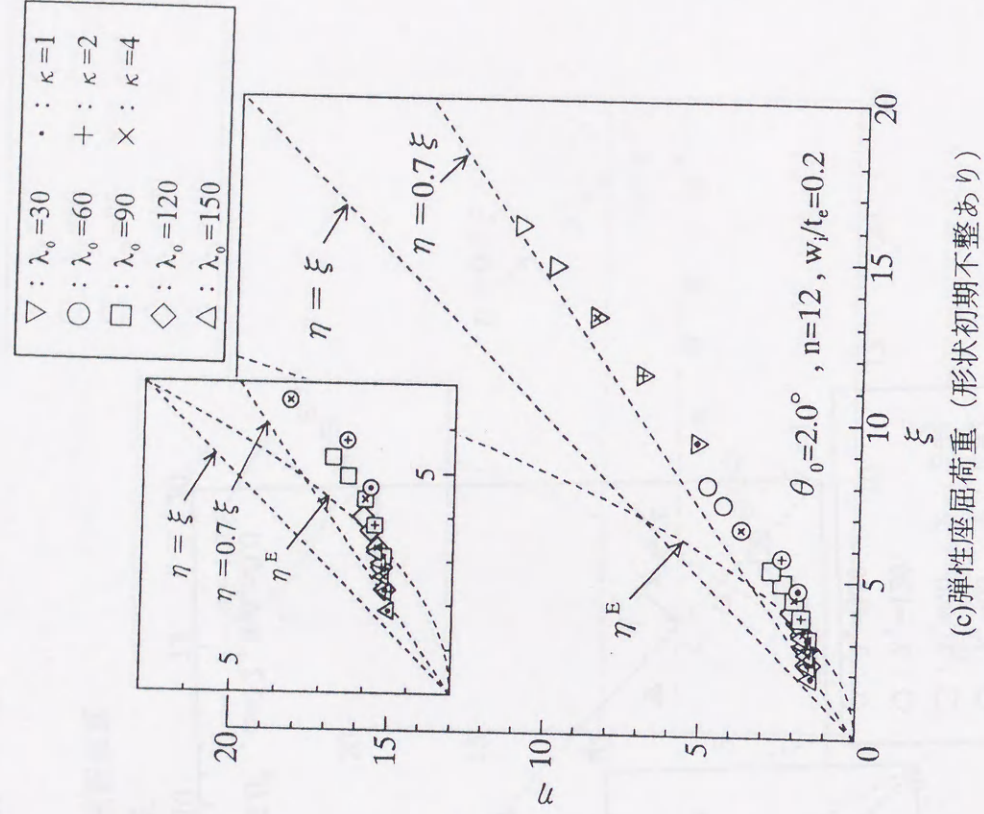
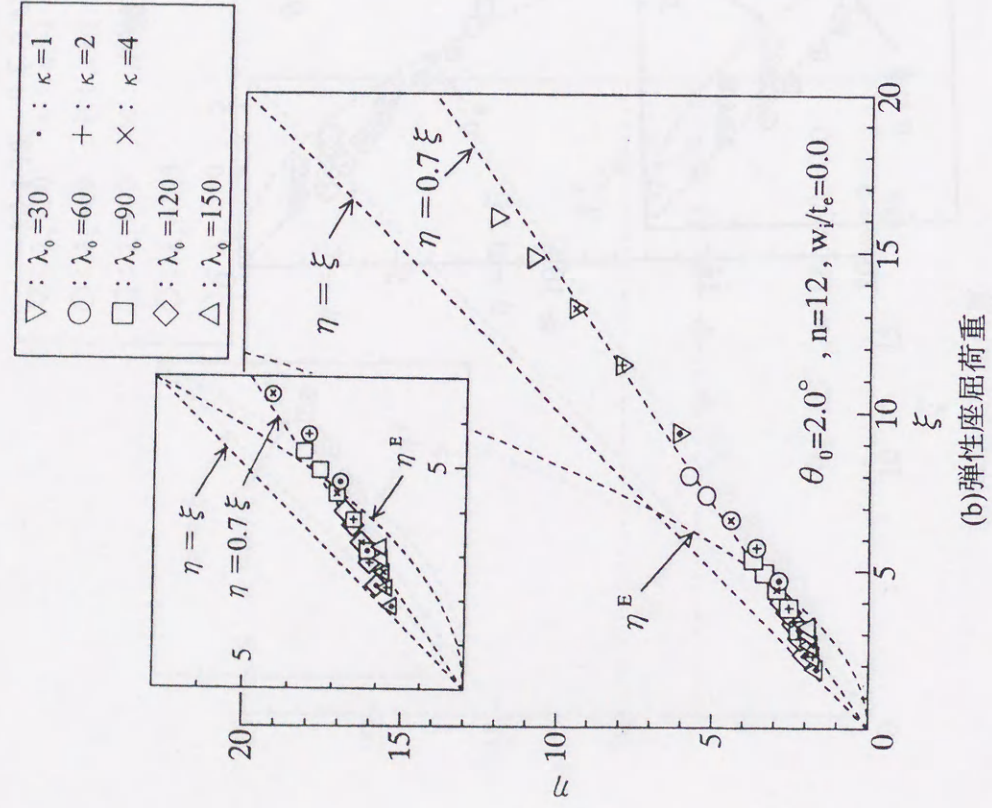


図 4-10 η と ξ の関係 (モデル 2,  $\theta_0 = 2.0^\circ$ )

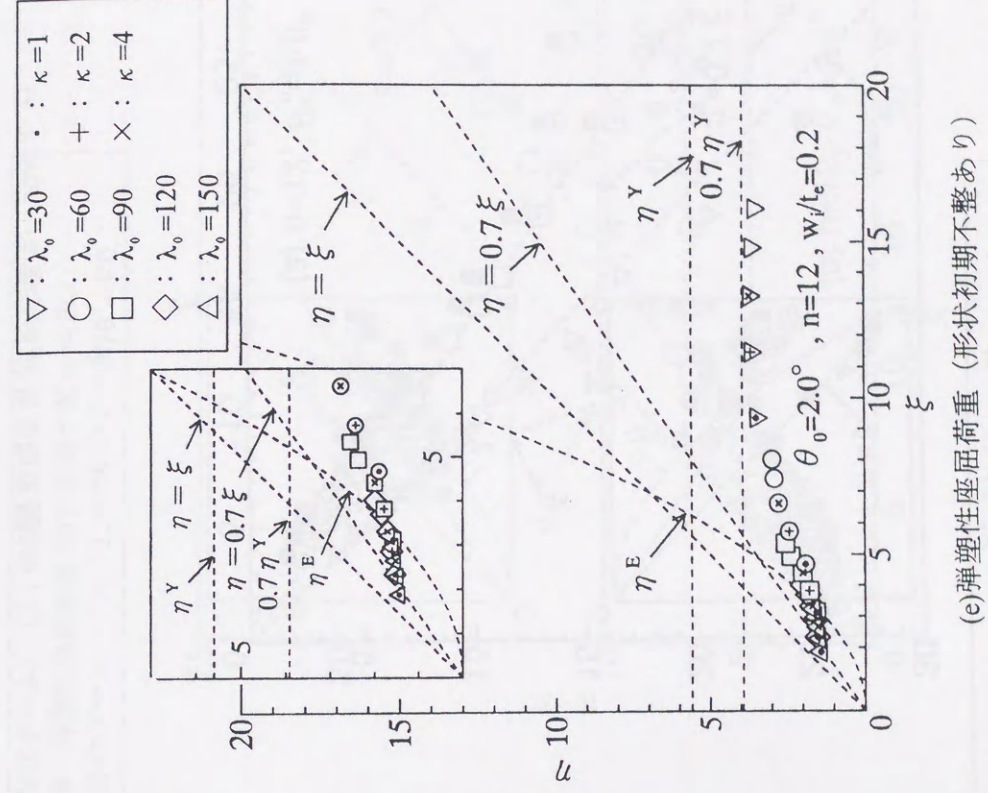
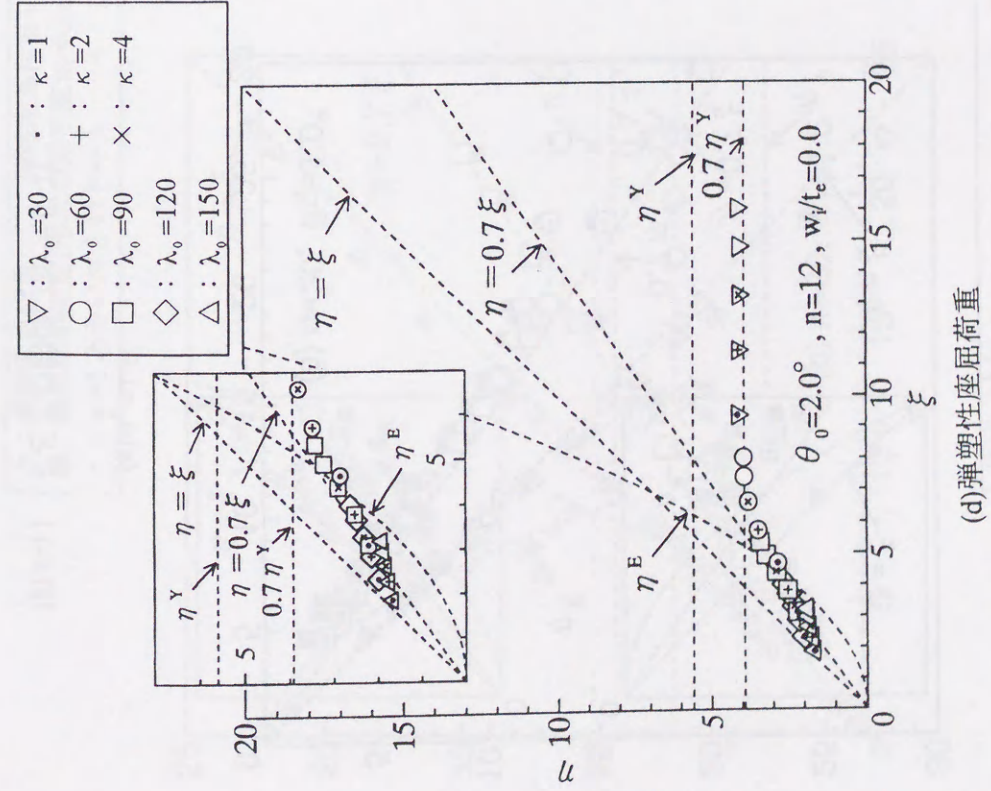
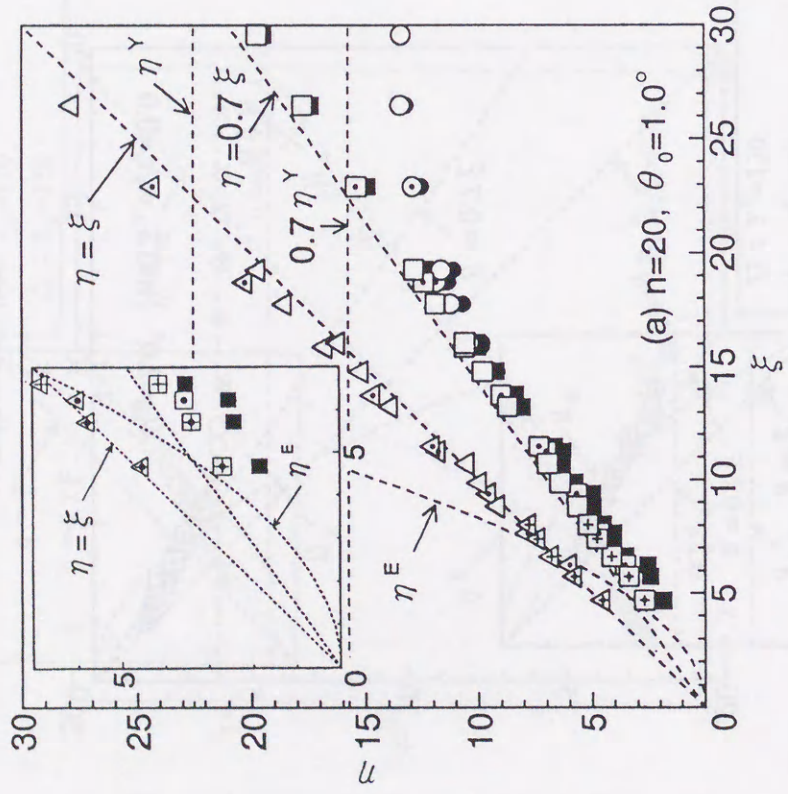


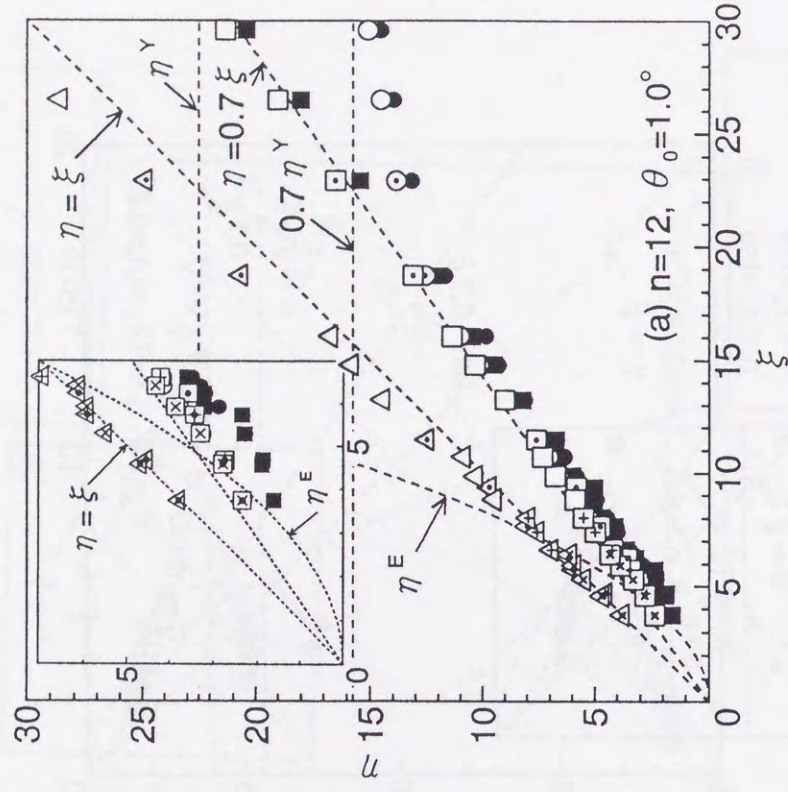
図 4-10 η と ξ の関係 (モデル 2,  $\theta_0 = 2.0^\circ$ )

△：線形座屈荷重 (完全形状ドーム) ○：弾塑性座屈荷重 (完全形状ドーム)  
 ■：弾性座屈荷重 (形状初期不整  $w_i=0.2t_i$ ) ●：弾塑性座屈荷重 (形状初期不整  $w_i=0.2t_i$ )  
 +： $\kappa=1$  あるいは2のドーム ×： $\lambda_0=150$  のドーム



(a)  $\theta_0=1.0^\circ$

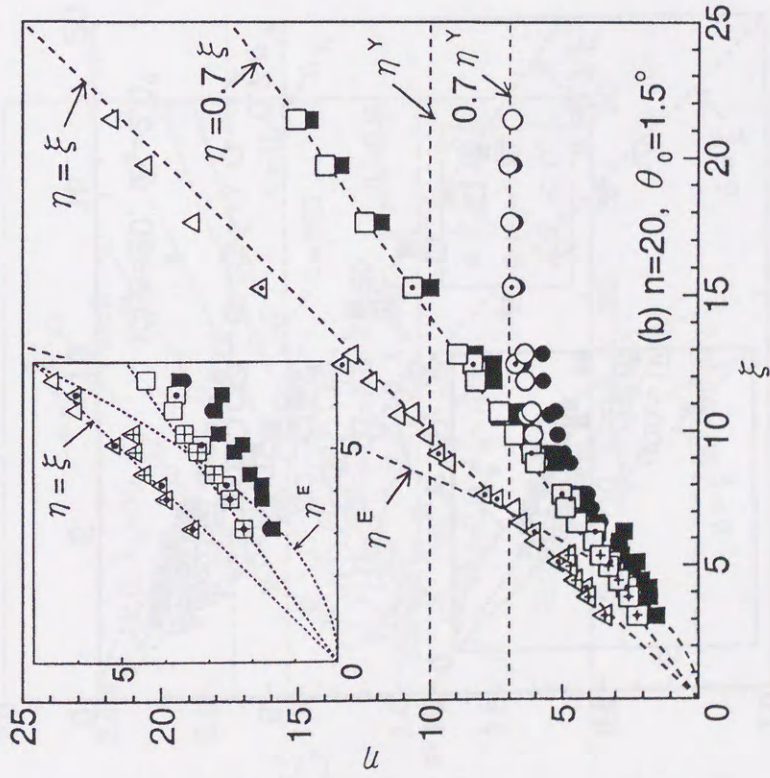
図 4-11  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル1)



(a)  $\theta_0=1.0^\circ$

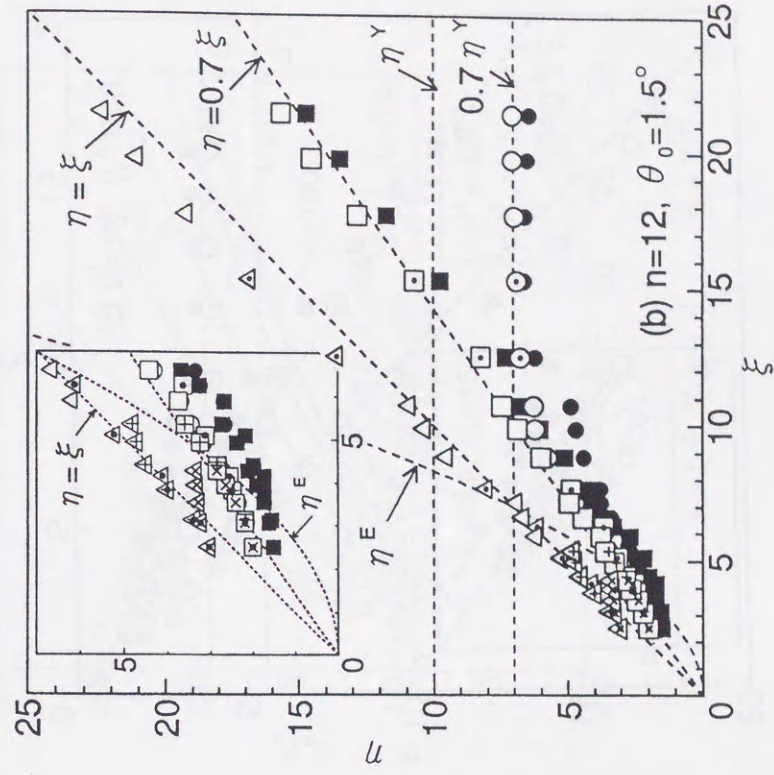
図 4-12  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル2)

△：線形座屈荷重 (完全形状ドーム) ○：弾塑性座屈荷重 (完全形状ドーム)  
 ■：弾性座屈荷重 (形状初期不整  $w_i=0.2t_i$ ) ●：弾塑性座屈荷重 (形状初期不整  $w_i=0.2t_i$ )  
 +： $\kappa=1$  あるいは2のドーム ×： $\lambda_0=150$  のドーム



(a)  $\theta_0=1.5^\circ$

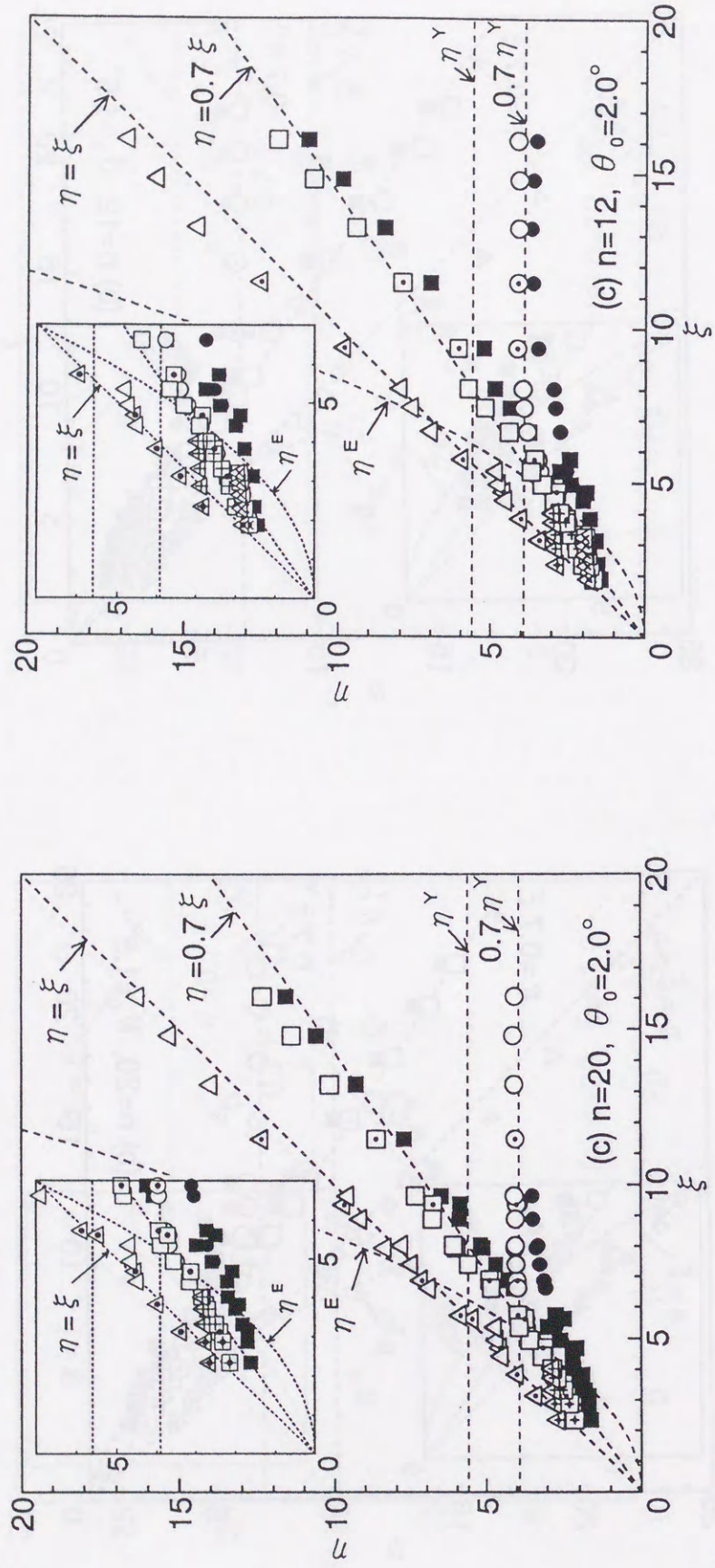
図 4-11  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル1)



(a)  $\theta_0=1.5^\circ$

図 4-12  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル2)

△：線形座屈荷重 (完全形状ドーム) ○：弾塑性座屈荷重 (完全形状ドーム)  
 ■：弾性座屈荷重 (形状初期不整  $w_i=0.2t_i$ ) ●：弾塑性座屈荷重 (形状初期不整  $w_i=0.2t_i$ )  
 +： $\kappa=1$  あるいは2のドーム ×： $\lambda_0=150$  のドーム



(c)  $\theta_0=2.0^\circ$

図 4-11  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル1)

(c)  $\theta_0=2.0^\circ$

図 4-12  $\eta$  と  $\xi$  の関係 (モデル2)

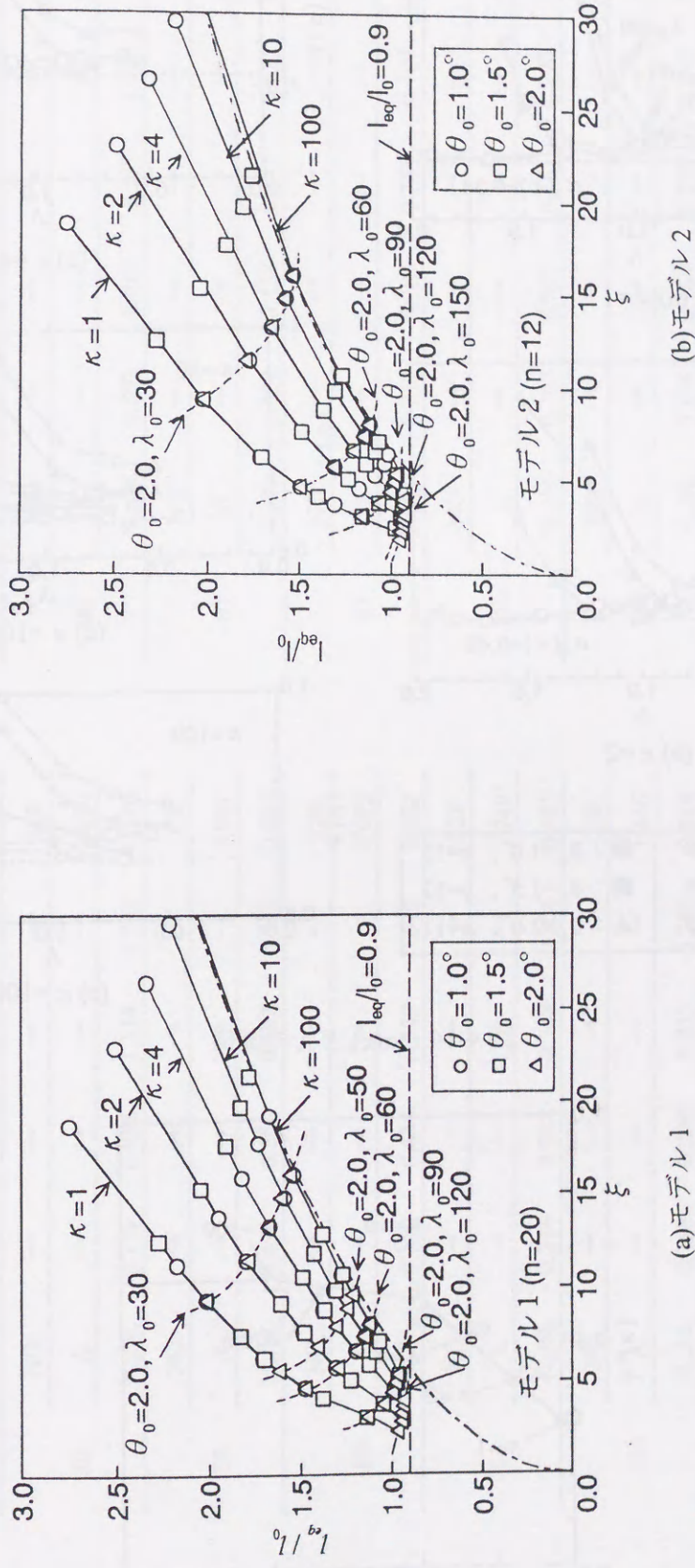


図 4-13 有効座屈長さ  $l_0$  と  $\xi$  の関係

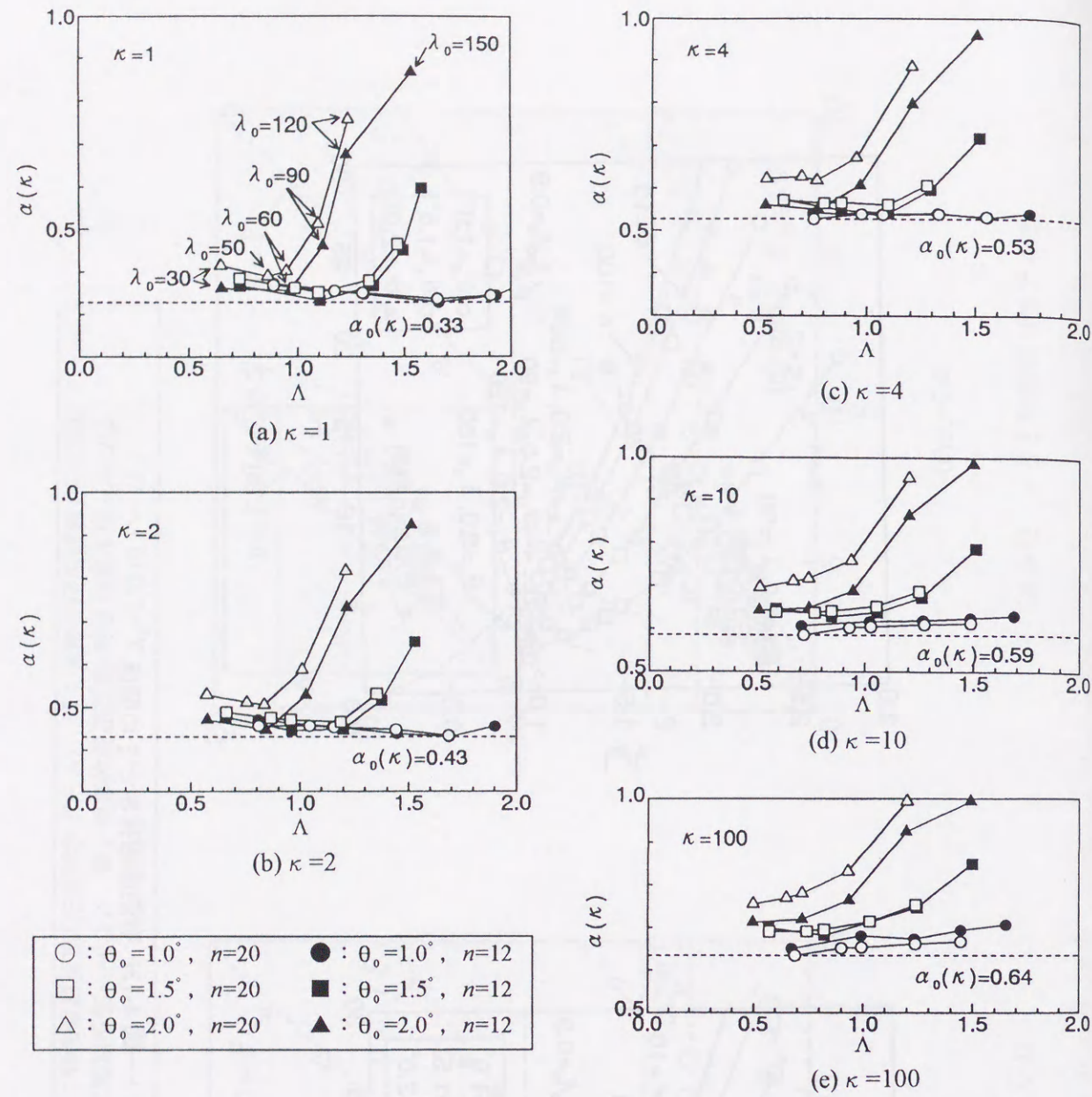


図 4-14  $\alpha(\kappa)$  と  $\Lambda$  の関係

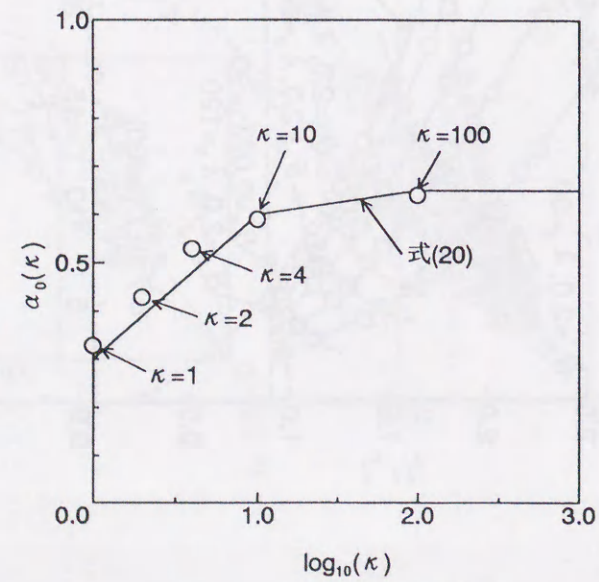


図 4-15  $\alpha_0(\kappa)$  と  $\kappa$  の関係

表 4-6(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 $[\theta_0=1.0^\circ, n=20, l_0=10m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda$	→	→	→	→	0.690
	$N_{cr}/N_y$	0.776	0.936	1.114	1.221	1.336
50	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda$	→	→	→	→	0.901
	$N_{cr}/N_y$	0.433	0.560	0.662	0.709	0.804
60	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda$	→	→	→	→	0.995
	$N_{cr}/N_y$	0.350	0.454	0.542	0.575	0.662
90	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda$	→	→	→	→	1.240
	$N_{cr}/N_y$	0.216	0.288	0.348	0.356	0.431
120	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda$	→	→	→	→	1.446
	$N_{cr}/N_y$	0.163	0.206	0.253	0.250	0.319

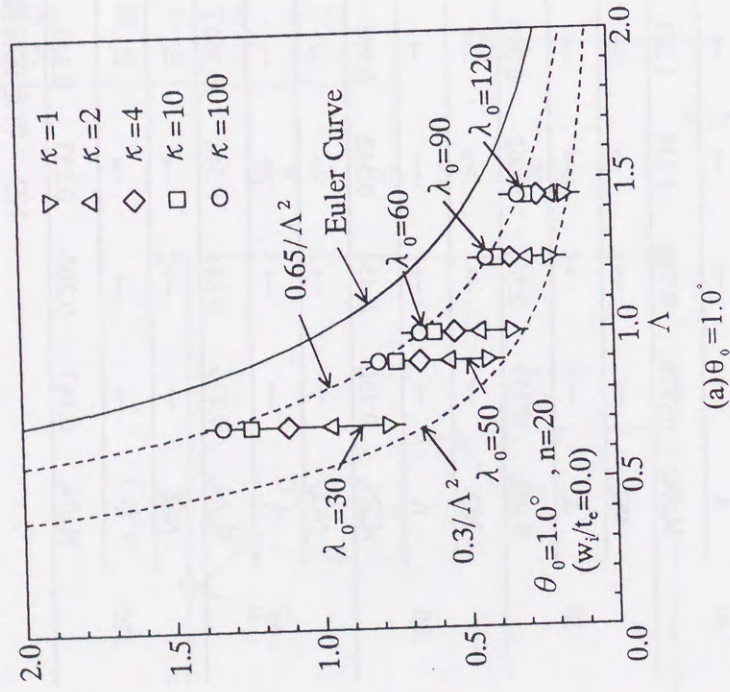
NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

表 4-7(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 $[\theta_0=1.0^\circ, n=12, l_0=4m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	118
	$\Lambda$	→	→	→	→	0.676
	$N_{cr}/N_y$	0.802	1.015	1.177	1.328	1.424
60	NO.	→	→	→	→	118
	$\Lambda$	→	→	→	→	0.993
	$N_{cr}/N_y$	0.350	0.458	0.545	0.627	0.692
90	NO.	→	→	→	→	118
	$\Lambda$	→	→	→	→	1.235
	$N_{cr}/N_y$	0.212	0.285	0.353	0.407	0.442
120	NO.	→	→	→	→	118
	$\Lambda$	→	→	→	→	1.447
	$N_{cr}/N_y$	0.162	0.203	0.251	0.298	0.331
150	NO.	→	→	→	→	118
	$\Lambda$	→	→	→	→	1.653
	$N_{cr}/N_y$	0.138	0.164	0.195	0.230	0.259

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力





(a)θ₀=1.0°

図 4-16  $N_{cr}^d(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 (モデル 1)

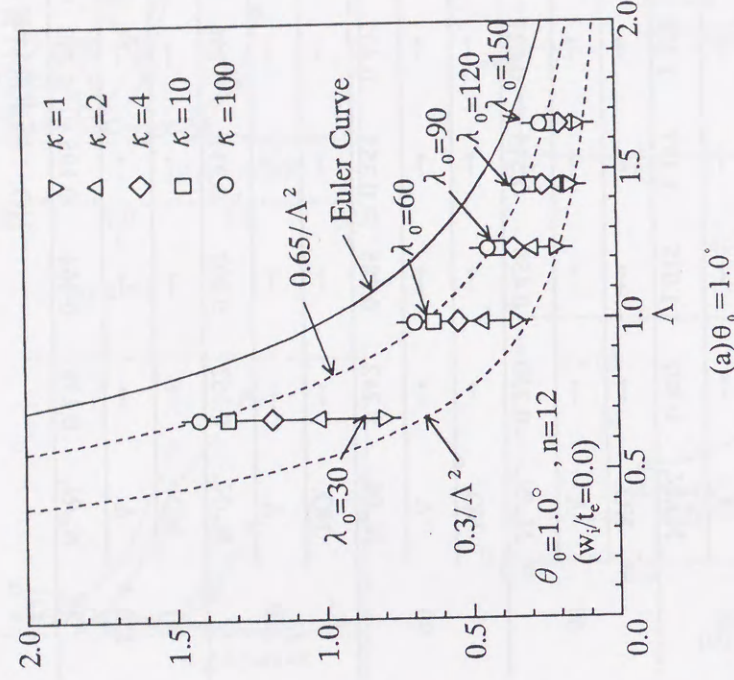
表 4-6(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾性座屈軸力  
[θ₀=1.5°, n=20, l₀=10m, ピン支持, 等分布荷重]

λ₀	κ	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	228
	Λ	→	→	→	→	0.574
$N_{cr}/N_y$		1.166	1.487	1.743	1.950	2.100
50	NO.	→	→	→	→	228
	Λ	→	→	→	→	0.745
$N_{cr}/N_y$		0.645	0.850	1.016	1.150	1.247
60	NO.	→	→	→	→	228
	Λ	→	→	→	→	0.823
$N_{cr}/N_y$		0.514	0.689	0.832	0.946	1.027
90	NO.	→	→	→	→	228
	Λ	→	→	→	→	1.032
$N_{cr}/N_y$		0.356	0.435	0.525	0.612	0.671
120	NO.	→	→	→	→	197
	Λ	→	→	→	→	1.241
$N_{cr}/N_y$		0.301	0.345	0.394	0.447	0.490

NO.: 特定部材番号

Λ: 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力



(a)θ₀=1.0°

図 4-17  $N_{cr}^d(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 (モデル 2)

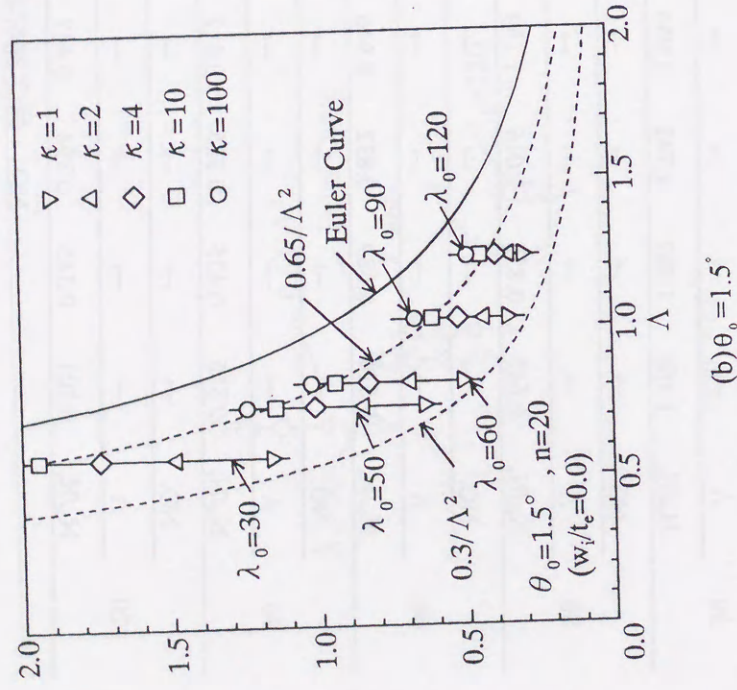
表 4-7(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾性座屈軸力  
[θ₀=1.5°, n=12, l₀=4m, ピン支持, 等分布荷重]

λ₀	κ	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	118
	Λ	→	→	→	→	0.574
$N_{cr}/N_y$		1.117	1.456	1.750	1.983	2.139
60	NO.	→	→	→	→	118
	Λ	→	→	→	→	0.823
$N_{cr}/N_y$		0.485	0.653	0.807	0.928	1.009
90	NO.	→	→	→	→	118
	Λ	→	→	→	→	1.035
$N_{cr}/N_y$		0.338	0.414	0.501	0.594	0.667
120	NO.	→	→	→	→	118
	Λ	→	→	→	→	1.248
$N_{cr}/N_y$		0.287	0.328	0.376	0.432	0.481
150	NO.	→	→	→	→	118
	Λ	→	→	→	→	1.499
$N_{cr}/N_y$		0.263	0.289	0.318	0.349	0.378

NO.: 特定部材番号

Λ: 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力



(b)  $\theta_0 = 1.5^\circ$

図 4-16  $N_c^a(k)/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 (モデル 1)

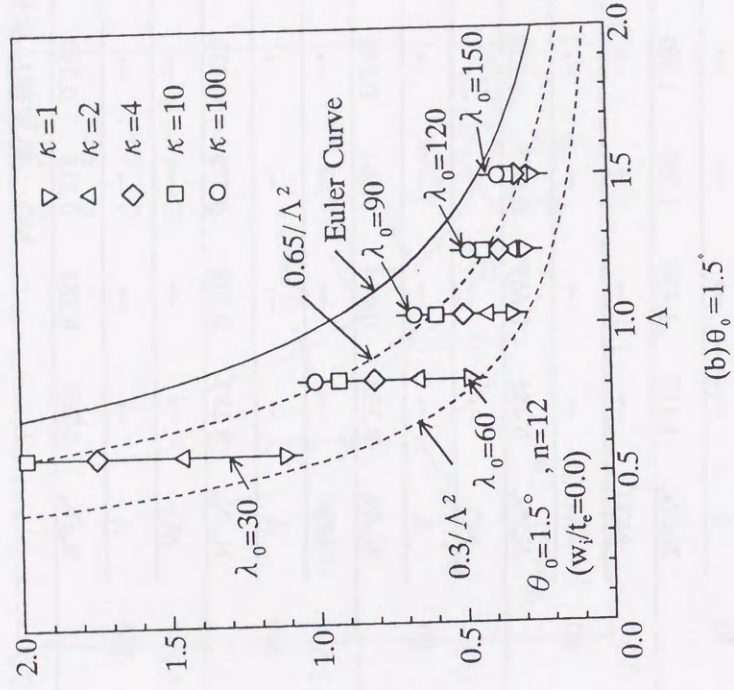
表 4-6(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 $[\theta_0 = 2.0^\circ, n = 20, l_0 = 10m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	→ 228
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 0.499
	$N_{cr}/N_y$	1.660	2.126	2.504	2.808	3.033
50	NO.	→	→	→	→	→ 228
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 0.652
	$N_{cr}/N_y$	0.913	1.196	1.470	1.671	1.809
60	NO.	→	→	→	→	→ 228
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.769	0.967	1.182	1.371	1.494
90	NO.	→	→	→	→	→ 166
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 0.933
	$N_{cr}/N_y$	0.592	0.678	0.774	0.875	0.956
120	NO.	→	→	→	→	→ 166
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 1.200
	$N_{cr}/N_y$	0.528	0.571	0.616	0.664	0.698

NO.: 特定部材番号

$\Lambda$ : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力



(b)  $\theta_0 = 1.5^\circ$

図 4-17  $N_c^a(k)/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 (モデル 2)

表 4-7(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 $[\theta_0 = 2.0^\circ, n = 12, l_0 = 4m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	→ 118
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 0.497
	$N_{cr}/N_y$	1.459	1.908	2.271	2.608	2.882
60	NO.	→	→	→	→	→ 118
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.671	0.845	1.046	1.240	1.377
90	NO.	→	→	→	→	→ 118
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 0.936
	$N_{cr}/N_y$	0.522	0.599	0.688	0.785	0.874
120	NO.	→	→	→	→	→ 118
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 1.197
	$N_{cr}/N_y$	0.470	0.510	0.554	0.603	0.645
150	NO.	→	→	→	→	→ 86
	$\Lambda$	→	→	→	→	→ 1.490
	$N_{cr}/N_y$	0.390	0.416	0.432	0.445	0.449

NO.: 特定部材番号

$\Lambda$ : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

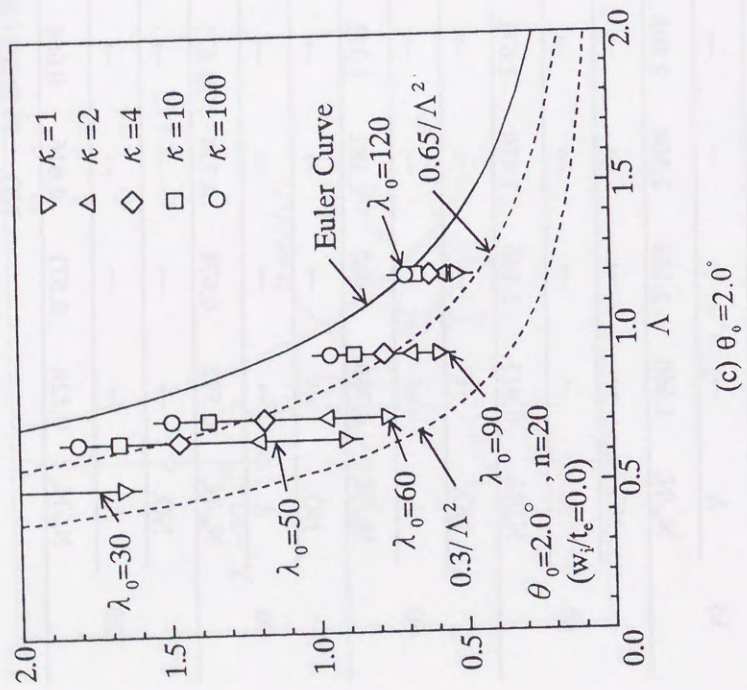


図 4-16  $N_{\sigma}^e(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 (モデル 1)

(c)  $\theta_0=2.0^\circ$

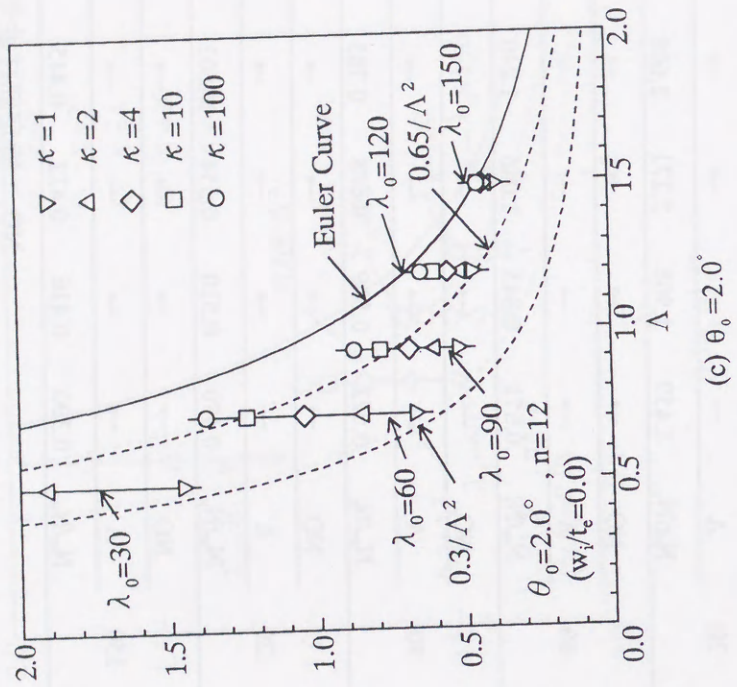


図 4-17  $N_{\sigma}^e(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 (モデル 2)

(c)  $\theta_0=2.0^\circ$

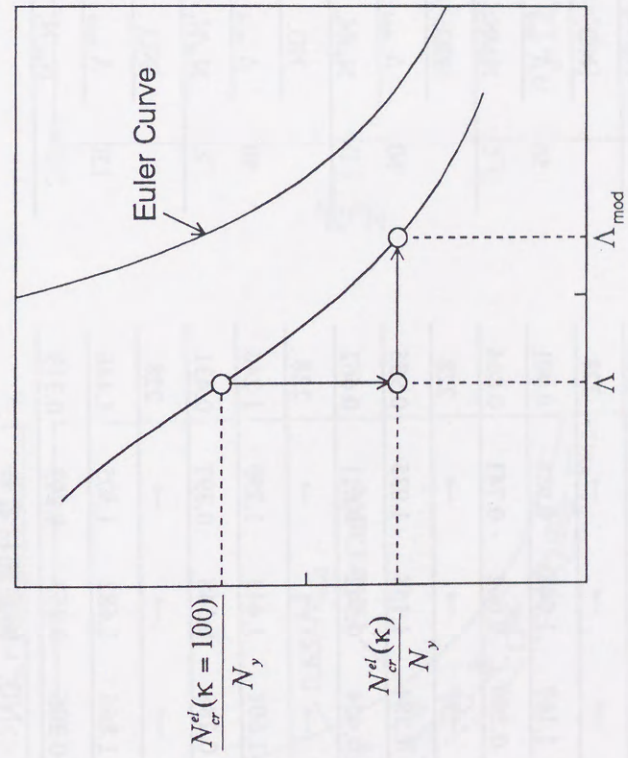


図 4-18 正規化細長比  $\Lambda$  と修正正規化細長比  $\Lambda_{mod}$

表 4-8(a) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.0^\circ$ ,  $n=20$ ,  $l_0=10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	1.015	0.890	0.802	0.718	0.690
	$N_{cr}/N_y$	0.776	0.965	1.114	1.239	1.336
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.326	1.163	1.048	0.938	0.901
	$N_{cr}/N_y$	0.433	0.560	0.662	0.743	0.804
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.464	1.284	1.158	1.035	0.995
	$N_{cr}/N_y$	0.350	0.454	0.542	0.611	0.662
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.825	1.601	1.443	1.290	1.240
	$N_{cr}/N_y$	0.216	0.288	0.348	0.397	0.431
	NO.	→	→	→	→	228
120	$\Lambda_{mod}$	2.128	1.866	1.682	1.505	1.446
	$N_{cr}/N_y$	0.163	0.206	0.253	0.293	0.319

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

表 4-8(b) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.0^\circ$ ,  $n=20$ ,  $l_0=10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

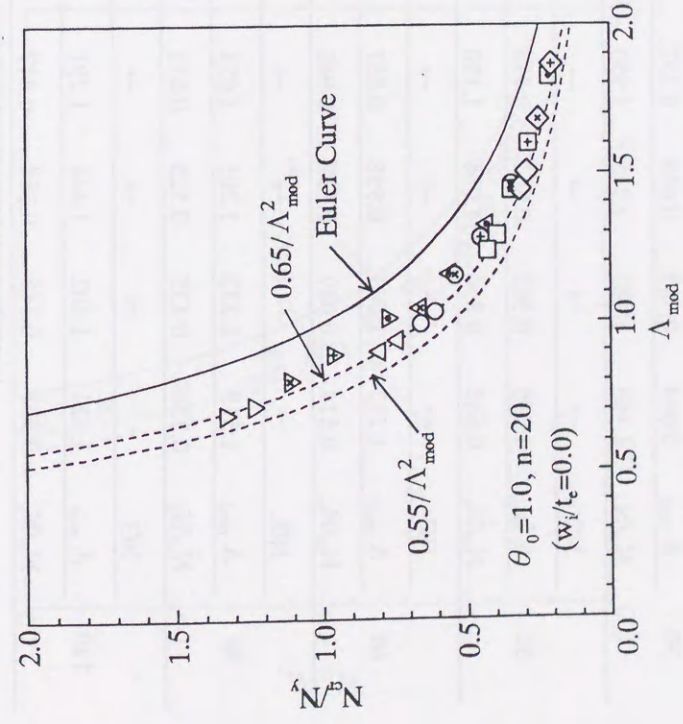
(形状初期不整  $w_i/t_e=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	1.015	0.890	0.802	0.718	0.690
	$N_{cr}/N_y$	0.740	0.936	1.092	1.221	1.321
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.326	1.163	1.048	0.938	0.901
	$N_{cr}/N_y$	0.390	0.519	0.625	0.709	0.772
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.464	1.284	1.158	1.035	0.995
	$N_{cr}/N_y$	0.307	0.412	0.502	0.575	0.628
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.825	1.601	1.443	1.290	1.240
	$N_{cr}/N_y$	0.155	0.248	0.305	0.356	0.392
	NO.	→	→	→	→	228
120	$\Lambda_{mod}$	2.128	1.866	1.682	1.505	1.446
	$N_{cr}/N_y$	0.112	0.148	0.215	0.250	0.279

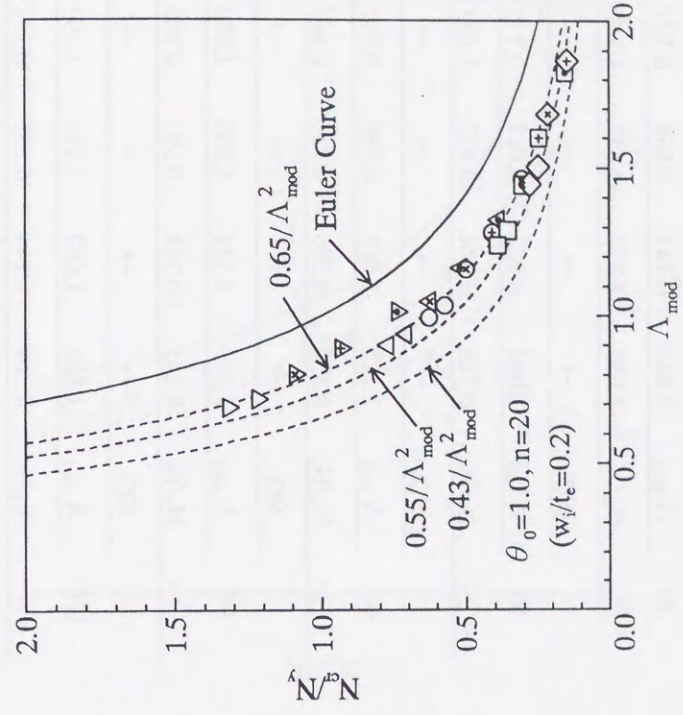
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力



(a)  $\theta_0=1.0^\circ$



(b)  $\theta_0=1.0^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-19  $N_{cr}^b(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 1)

表 4-8(c) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.5^\circ$ ,  $n=20$ ,  $l_0=10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	0.844	0.741	0.668	0.597	0.574
	$N_{cr}/N_y$	1.166	1.487	1.743	1.950	2.100
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.096	0.962	0.867	0.775	0.745
	$N_{cr}/N_y$	0.645	0.850	1.016	1.150	1.247
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.212	1.063	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.514	0.689	0.832	0.946	1.027
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.519	1.332	1.201	1.074	1.032
	$N_{cr}/N_y$	0.356	0.435	0.525	0.612	0.671
	NO.	→	→	→	→	197
120	$\Lambda_{mod}$	1.826	1.602	1.444	1.291	1.241
	$N_{cr}/N_y$	0.301	0.345	0.394	0.447	0.490

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

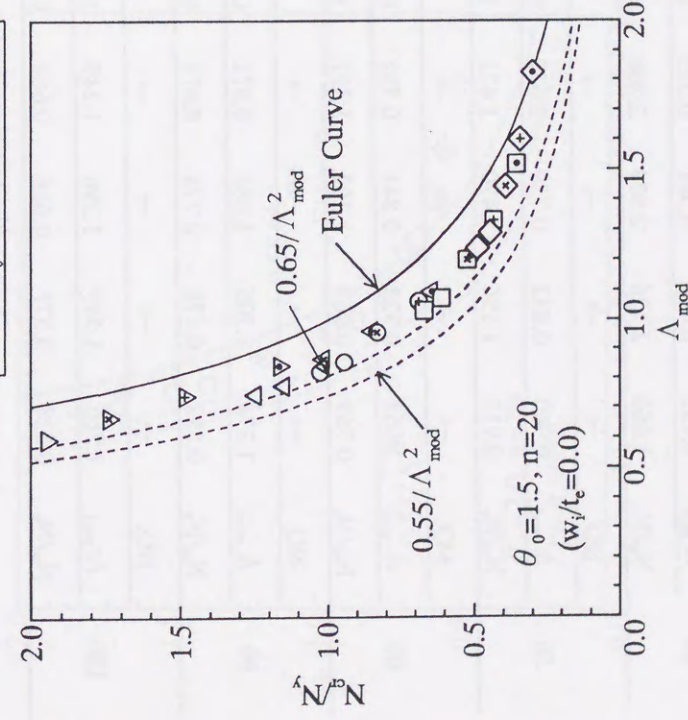
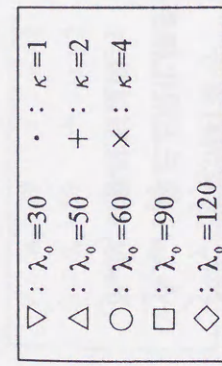
表 4-8(d) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.5^\circ$ ,  $n=20$ ,  $l_0=10m$ , ピン支持, 等分布荷重]  
 (形状初期不整  $w_i/t_e=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	0.844	0.741	0.668	0.597	0.574
	$N_{cr}/N_y$	1.059	1.391	1.657	1.870	2.027
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.096	0.962	0.867	0.775	0.745
	$N_{cr}/N_y$	0.566	0.744	0.912	1.053	1.156
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.212	1.063	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.370	0.595	0.726	0.845	0.931
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.519	1.332	1.201	1.074	1.032
	$N_{cr}/N_y$	0.245	0.304	0.391	0.508	0.566
	NO.	→	→	→	→	197
120	$\Lambda_{mod}$	1.826	1.602	1.444	1.291	1.241
	$N_{cr}/N_y$	0.208	0.244	0.281	0.331	0.381

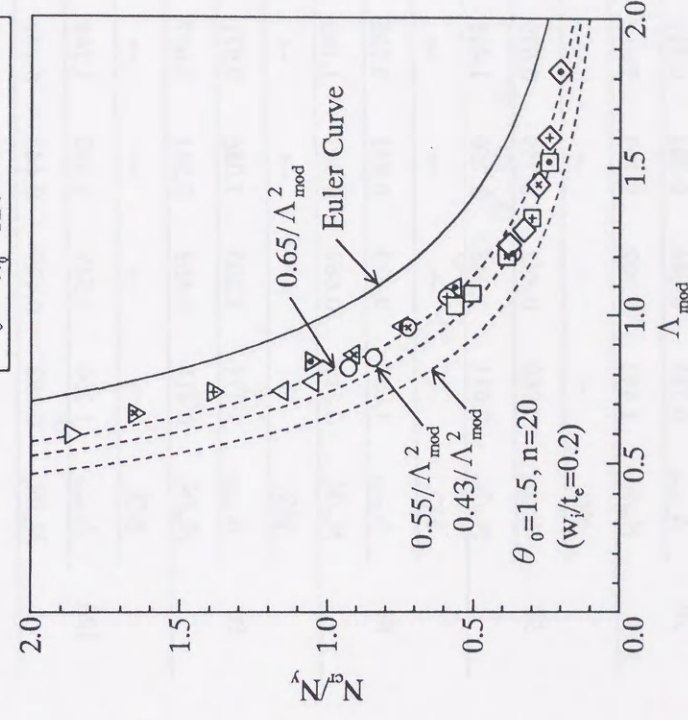
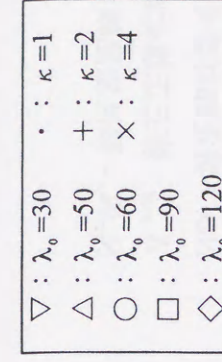
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力



(c)  $\theta_0=1.5^\circ$



(d)  $\theta_0=1.5^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-19  $N_{cr}^d(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 1)

表 4-8(e) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $n=20$ ,  $l_0=10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda_{mod}$	0.735	0.644	0.581	0.519	0.499
	$N_{cr}/N_y$	1.660	2.126	2.504	2.808	3.033
50	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda_{mod}$	0.960	0.842	0.759	0.679	0.652
	$N_{cr}/N_y$	0.913	1.196	1.470	1.671	1.809
60	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.933	0.841	0.752	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.769	0.967	1.182	1.371	1.494
90	NO.	→	→	→	→	166
	$\Lambda_{mod}$	1.374	1.205	1.086	0.971	0.933
	$N_{cr}/N_y$	0.592	0.678	0.774	0.875	0.956
120	NO.	→	→	→	→	166
	$\Lambda_{mod}$	1.766	1.549	1.396	1.249	1.200
	$N_{cr}/N_y$	0.528	0.571	0.616	0.664	0.698

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

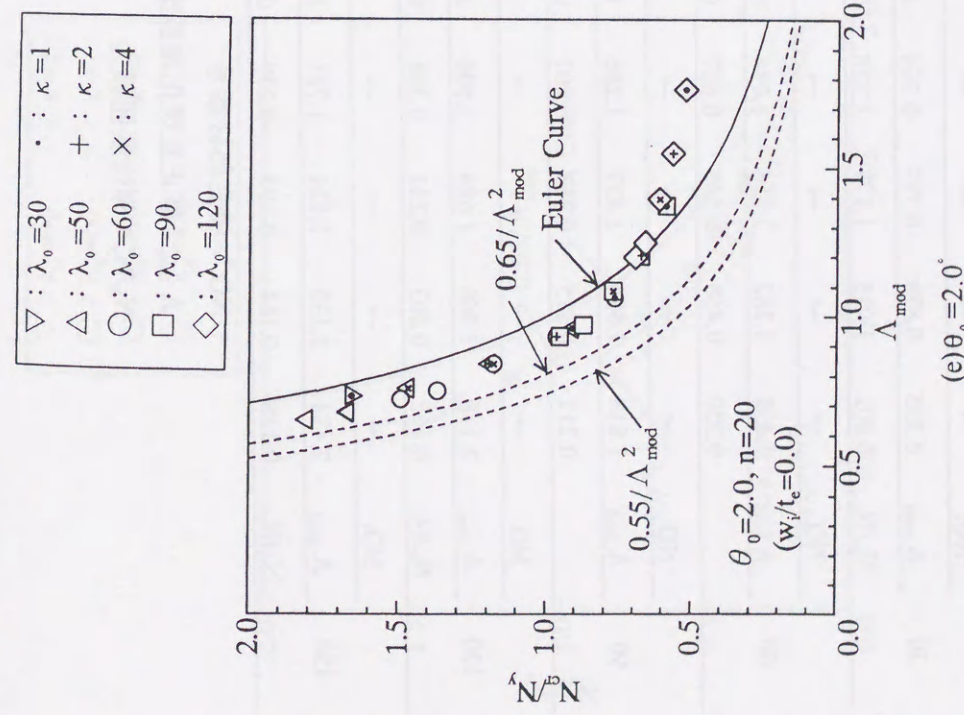
表 4-8(f) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $n=20$ ,  $l_0=10m$ , ピン支持, 等分布荷重]  
 (形状初期不整  $w_i/t_e=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
30	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda_{mod}$	0.735	0.644	0.581	0.519	0.499
	$N_{cr}/N_y$	1.441	1.902	2.292	2.612	2.847
50	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda_{mod}$	0.960	0.842	0.759	0.679	0.652
	$N_{cr}/N_y$	0.611	1.043	1.250	1.448	1.598
60	NO.	→	→	→	→	228
	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.933	0.841	0.752	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.512	0.669	1.003	1.146	1.274
90	NO.	→	→	→	→	166
	$\Lambda_{mod}$	1.374	1.205	1.086	0.971	0.933
	$N_{cr}/N_y$	0.418	0.469	0.541	0.637	0.732
120	NO.	→	→	→	→	166
	$\Lambda_{mod}$	1.766	1.549	1.396	1.249	1.200
	$N_{cr}/N_y$	0.398	0.417	0.448	0.491	0.537

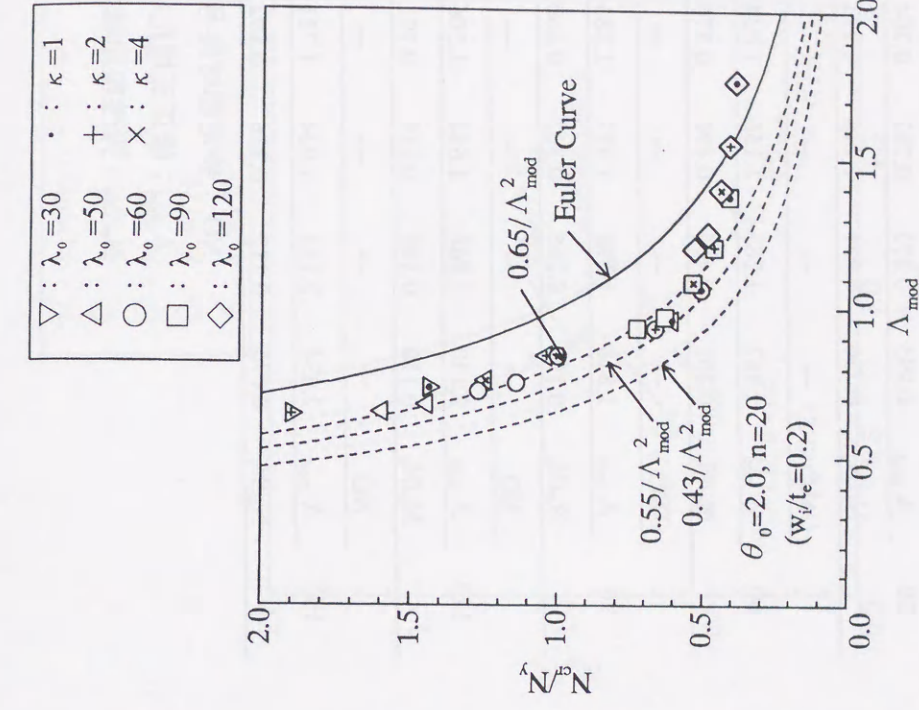
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力



(e)  $\theta_0=2.0^\circ$



(f)  $\theta_0=2.0^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-19  $N_{cr}^b(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 1)

表 4-9(a) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0 = 1.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.995	0.873	0.787	0.704	0.676
	$N_{cr}/N_y$	0.802	1.015	1.177	1.328	1.424
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.462	1.282	1.156	1.034	0.993
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.818	1.594	1.437	1.285	1.235
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	2.130	1.868	1.684	1.506	1.447
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.434	2.135	1.924	1.721	1.653
	NO.	→	→	→	→	118
	$N_{cr}/N_y$	0.138	0.164	0.195	0.230	0.259

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

表 4-9(b) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0 = 1.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

(形状初期不整  $w_i/t_e=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.995	0.873	0.787	0.704	0.676
	$N_{cr}/N_y$	0.736	0.951	1.116	1.271	1.372
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.462	1.282	1.156	1.034	0.993
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.818	1.594	1.437	1.285	1.235
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	2.130	1.868	1.684	1.506	1.447
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.434	2.135	1.924	1.721	1.653
	NO.	→	→	→	→	118
	$N_{cr}/N_y$	0.095	0.112	0.136	0.192	0.210

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

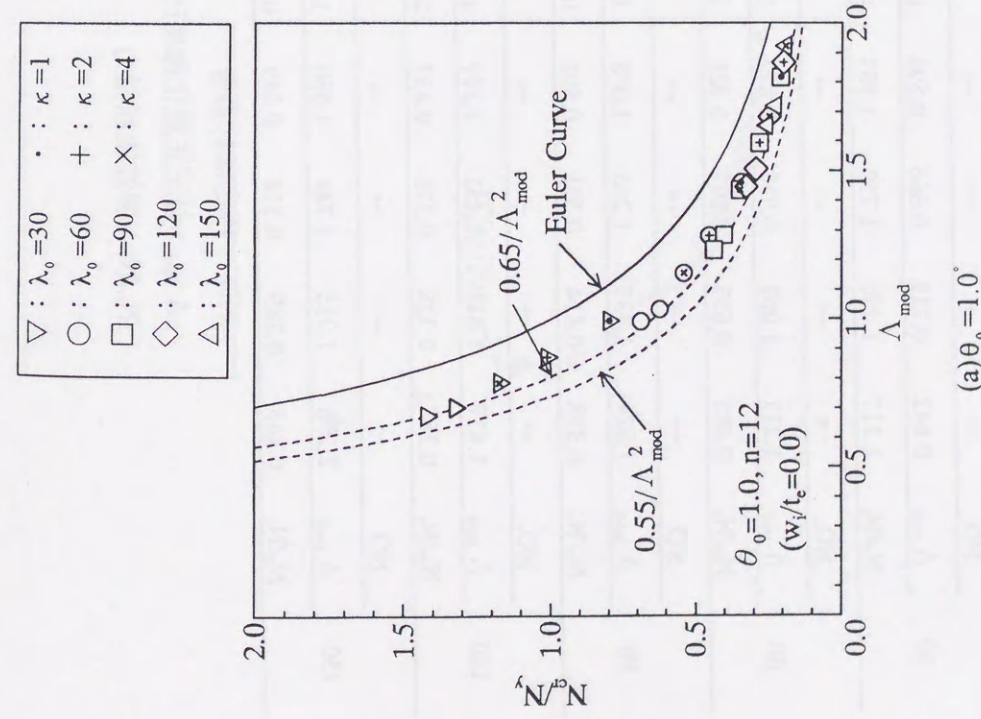
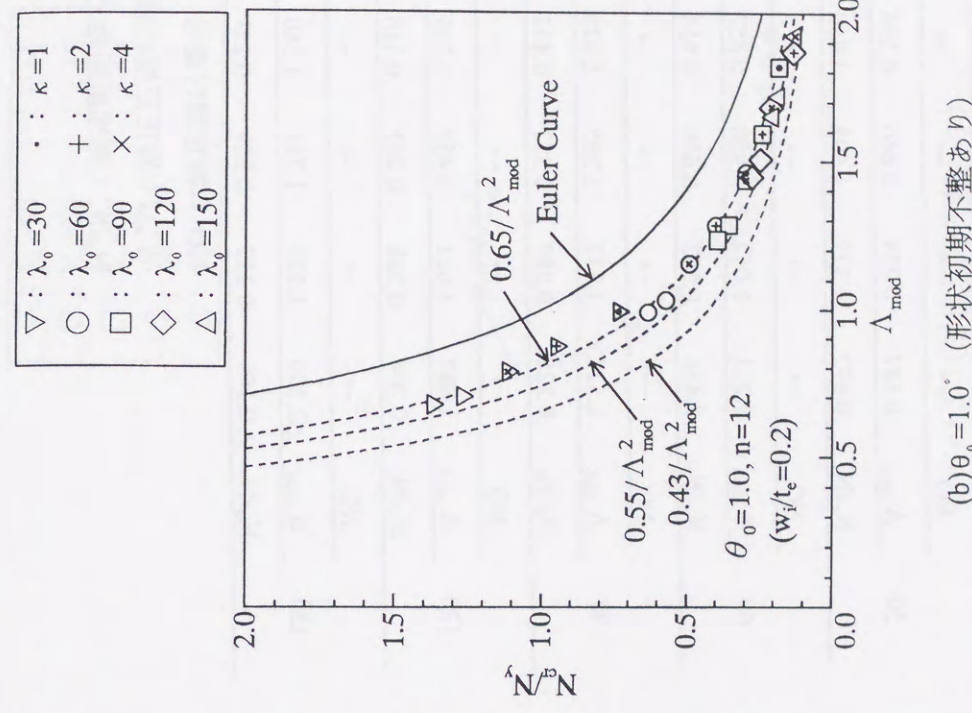


図 4-20  $N_{cr}^b(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 2)



(b)  $\theta_0 = 1.0^\circ$  (形状初期不整あり)

表 4-9(c) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.5^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.842	0.739	0.666	0.596	0.574
	$N_{cr}/N_y$	1.117	1.456	1.750	1.983	2.139
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.211	1.062	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.485	0.653	0.807	0.928	1.009
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.524	1.337	1.205	1.078	1.035
	$N_{cr}/N_y$	0.338	0.414	0.501	0.594	0.667
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.837	1.611	1.452	1.299	1.248
	$N_{cr}/N_y$	0.287	0.328	0.376	0.432	0.481
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.206	1.935	1.744	1.560	1.499
	$N_{cr}/N_y$	0.263	0.289	0.318	0.349	0.378

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

表 4-9(d) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.5^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

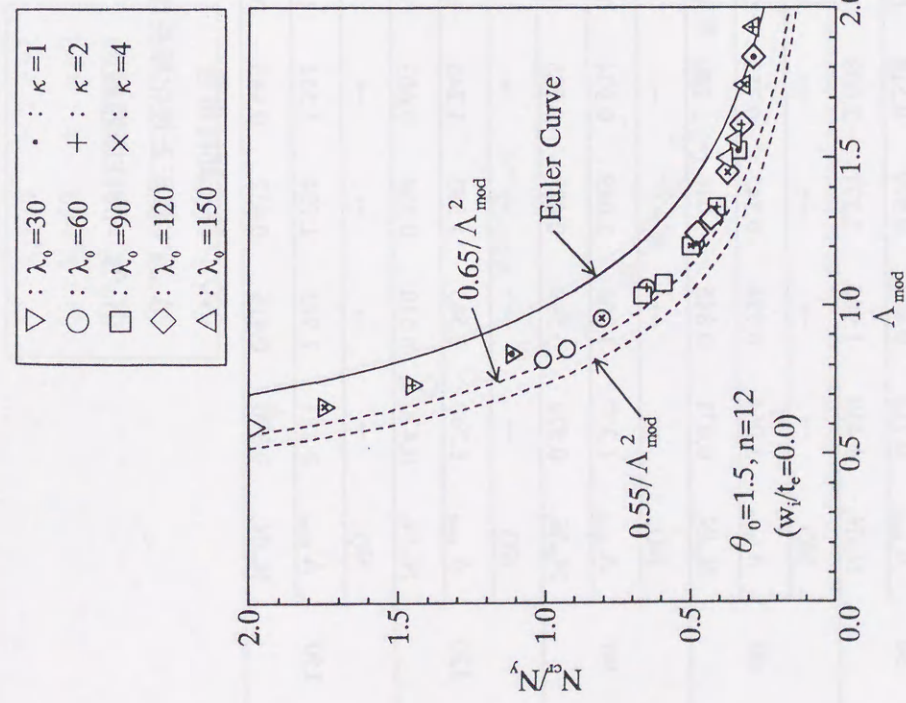
(形状初期不整  $w_i/t_e=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.842	0.739	0.666	0.596	0.574
	$N_{cr}/N_y$	0.992	1.327	1.602	1.840	2.009
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.211	1.062	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.436	0.563	0.690	0.816	0.909
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.524	1.337	1.205	1.078	1.035
	$N_{cr}/N_y$	0.228	0.289	0.357	0.495	0.551
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.837	1.611	1.452	1.299	1.248
	$N_{cr}/N_y$	0.204	0.228	0.263	0.316	0.364
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.206	1.935	1.744	1.560	1.499
	$N_{cr}/N_y$	0.199	0.213	0.229	0.253	0.282

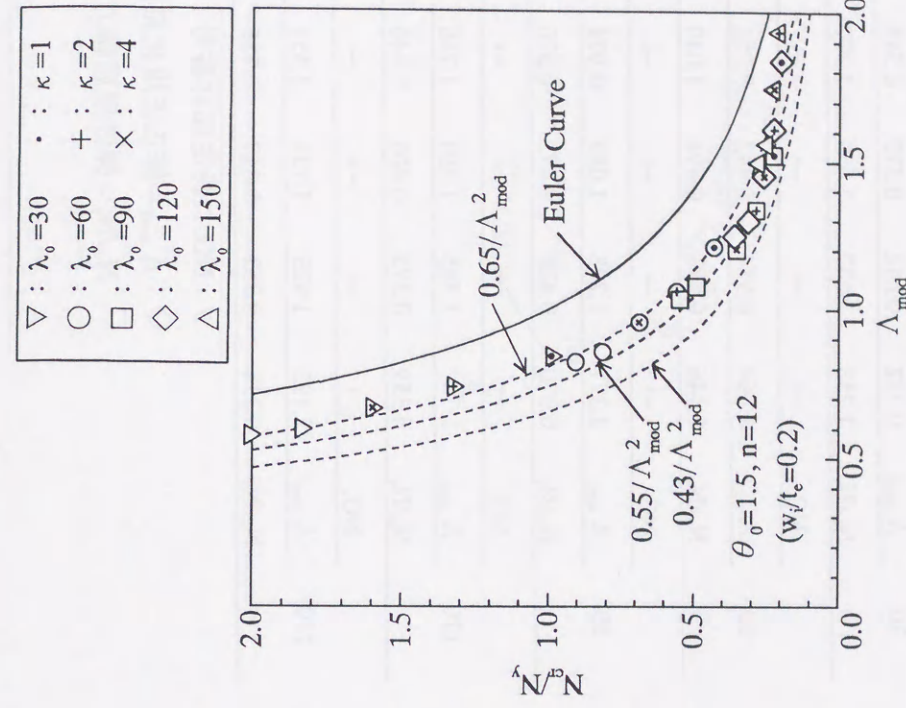
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力



(c)  $\theta_0=1.5^\circ$



(d)  $\theta_0=1.5^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-20  $N_{cr}^e(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 2)



表 4-9(e) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.732	0.642	0.579	0.518	0.497
	$N_{cr}/N_y$	1.459	1.908	2.271	2.608	2.882
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.934	0.842	0.753	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.671	0.845	1.046	1.240	1.377
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.377	1.208	1.089	0.974	0.936
	$N_{cr}/N_y$	0.522	0.599	0.688	0.785	0.874
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.762	1.545	1.393	1.246	1.197
	$N_{cr}/N_y$	0.470	0.510	0.554	0.603	0.645
	NO.	→	→	→	→	86
150	$\Lambda_{mod}$	2.193	1.923	1.734	1.551	1.490
	$N_{cr}/N_y$	0.390	0.416	0.432	0.445	0.449

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

表 4-9(f) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾性座屈軸力  
 [ $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

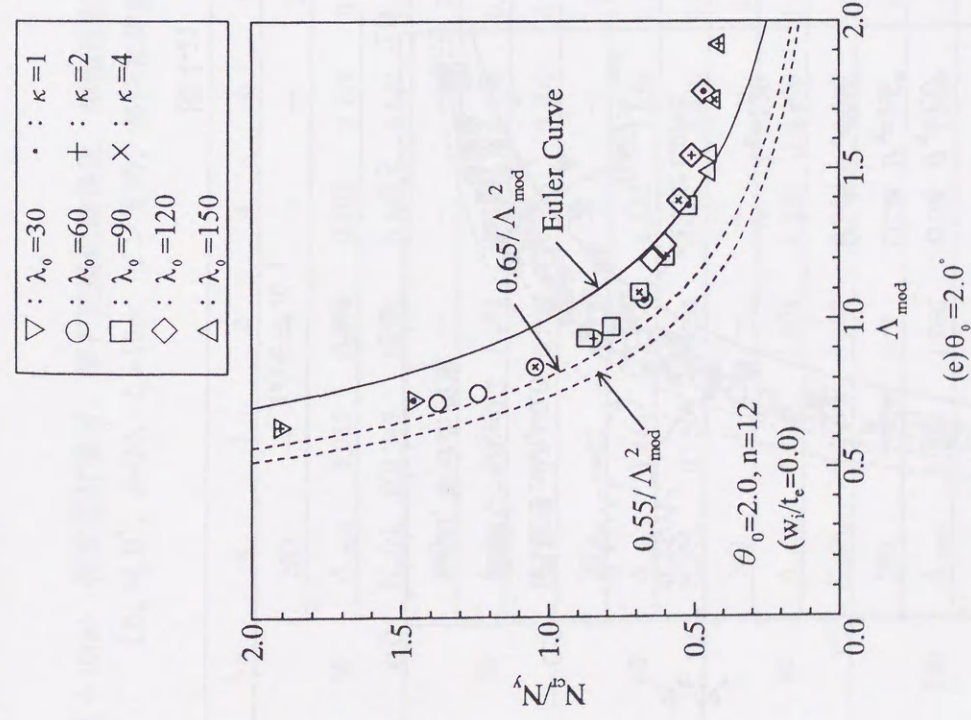
(形状初期不整  $w_i/t_c=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.732	0.642	0.579	0.518	0.497
	$N_{cr}/N_y$	1.253	1.687	2.053	2.377	2.644
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.934	0.842	0.753	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.446	0.577	0.894	1.040	1.164
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.377	1.208	1.089	0.974	0.936
	$N_{cr}/N_y$	0.370	0.420	0.473	0.570	0.656
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.762	1.545	1.393	1.246	1.197
	$N_{cr}/N_y$	0.359	0.379	0.403	0.440	0.483
	NO.	→	→	→	→	86
150	$\Lambda_{mod}$	2.193	1.923	1.734	1.551	1.490
	$N_{cr}/N_y$	0.338	0.352	0.367	0.385	0.407

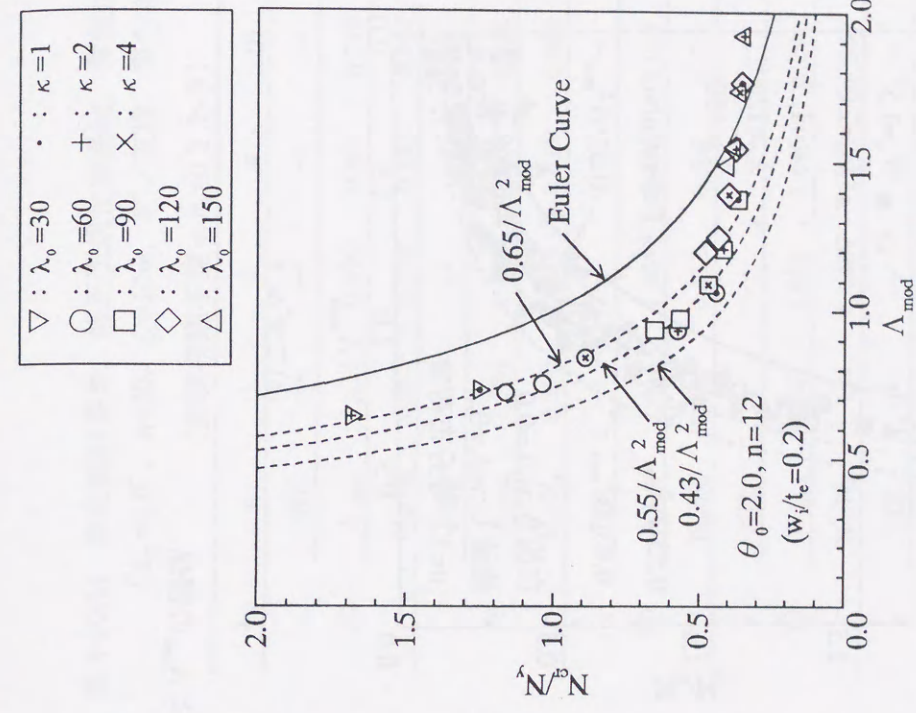
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾性座屈軸力

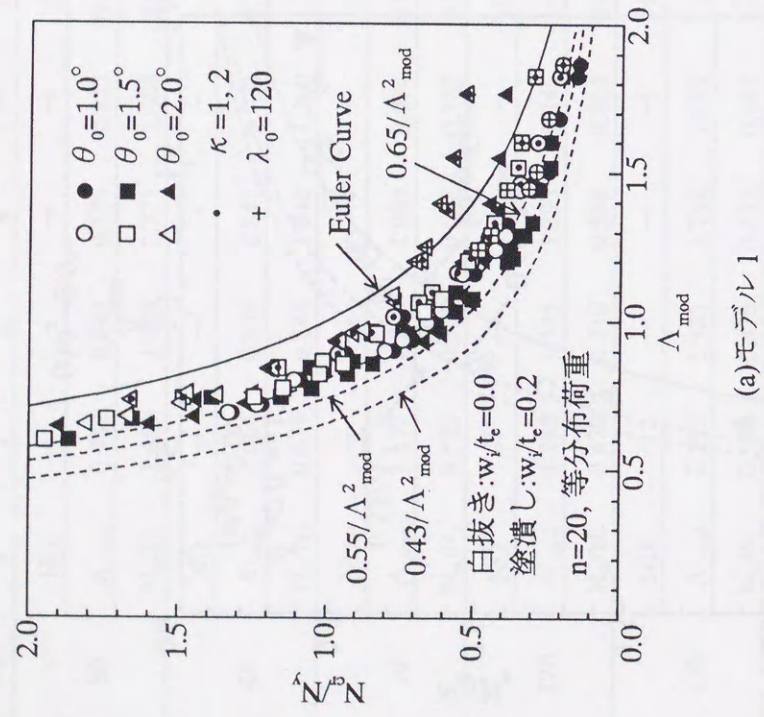


(e)  $\theta_0=2.0^\circ$

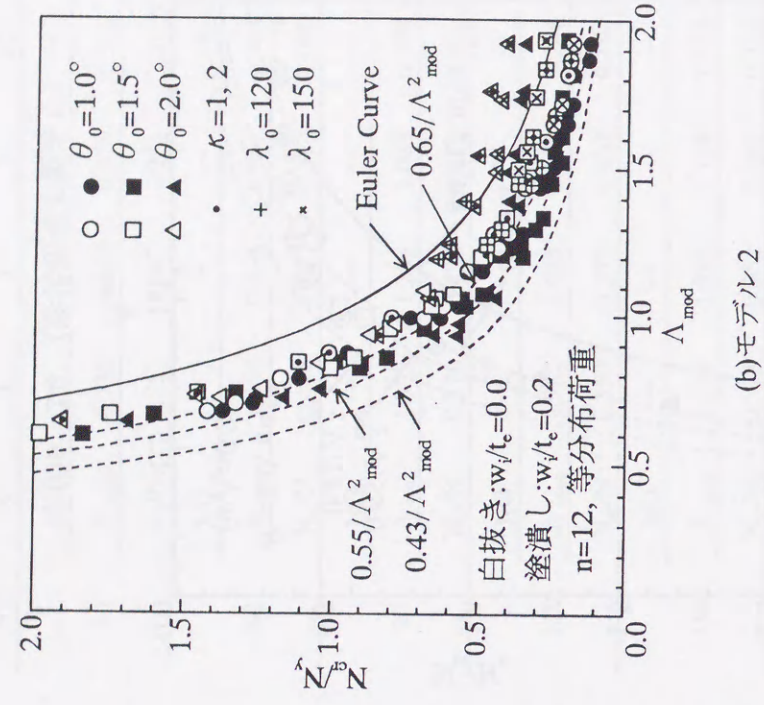


(f)  $\theta_0=2.0^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-20  $N_{cr}^d(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 2)



(a)モデル1



(b)モデル2

図 4-21  $N_{cr}^d(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係

表 4-10(a) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 $[\theta_0=1.0^\circ, n=20, l_0=10m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$

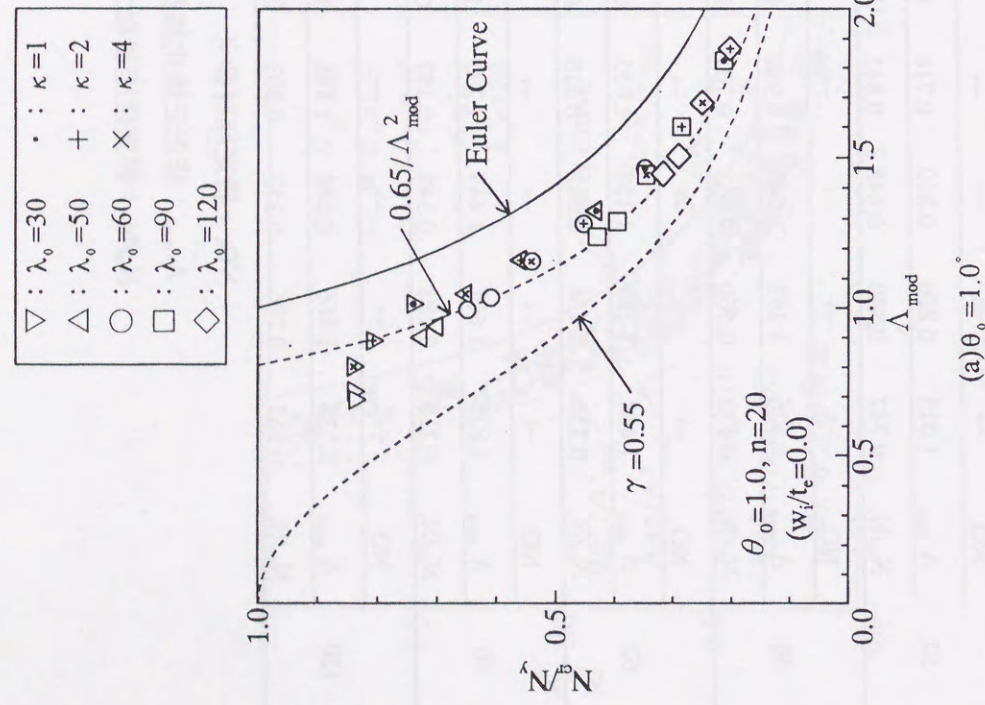
$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	1.015	0.890	0.802	0.718	0.690
	$N_{cr}/N_y$	0.742	0.810	0.842	0.841	0.839
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.326	1.163	1.048	0.938	0.901
	$N_{cr}/N_y$	0.433	0.560	0.653	0.701	0.728
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.464	1.284	1.158	1.035	0.995
	$N_{cr}/N_y$	0.350	0.454	0.542	0.610	0.650
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.825	1.601	1.443	1.290	1.240
	$N_{cr}/N_y$	0.216	0.288	0.348	0.397	0.431
	NO.	→	→	→	→	228
120	$\Lambda_{mod}$	2.128	1.866	1.682	1.505	1.446
	$N_{cr}/N_y$	0.163	0.206	0.253	0.293	0.319

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

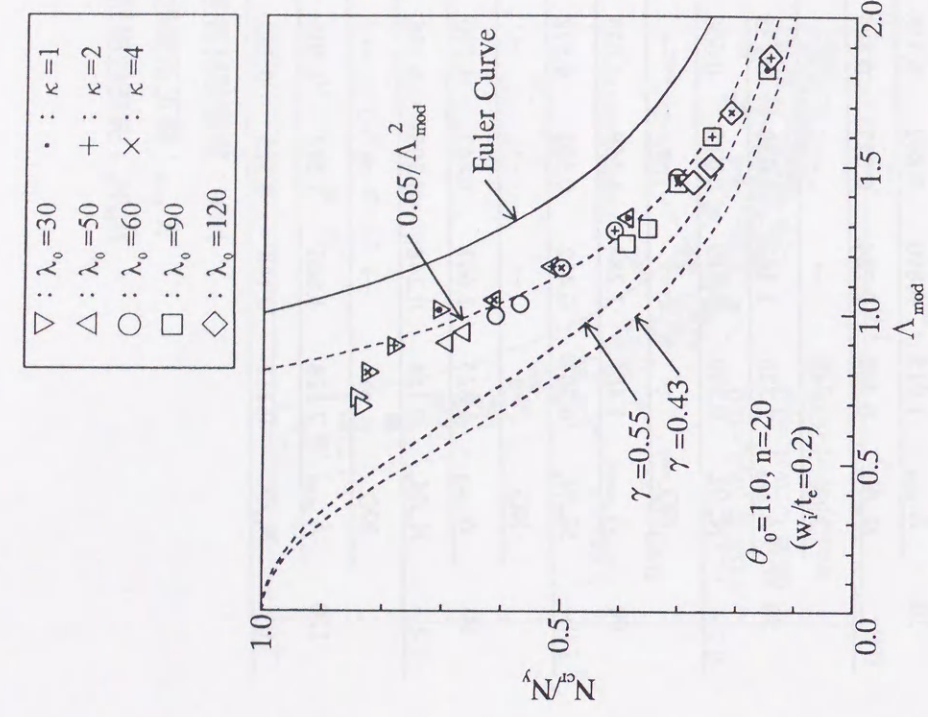
表 4-10(b) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 $[\theta_0=1.0^\circ, n=20, l_0=10m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$   
(形状初期不整  $w_i/t_c=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	1.015	0.890	0.802	0.718	0.690
	$N_{cr}/N_y$	0.708	0.784	0.827	0.845	0.838
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.326	1.163	1.048	0.938	0.901
	$N_{cr}/N_y$	0.390	0.519	0.615	0.666	0.695
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.464	1.284	1.158	1.035	0.995
	$N_{cr}/N_y$	0.307	0.412	0.502	0.572	0.612
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.825	1.601	1.443	1.290	1.240
	$N_{cr}/N_y$	0.154	0.248	0.305	0.356	0.392
	NO.	→	→	→	→	228
120	$\Lambda_{mod}$	2.128	1.866	1.682	1.505	1.446
	$N_{cr}/N_y$	0.112	0.148	0.215	0.250	0.279

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(a)  $\theta_0 = 1.0^\circ$



(b)  $\theta_0 = 1.0^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-22  $N_{cr}^*(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル I)

表 4-10(c) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 1.5^\circ$ ,  $n = 20$ ,  $l_0 = 10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	0.844	0.741	0.668	0.597	0.574
	$N_{cr}/N_y$	0.942	0.966	0.977	0.985	0.966
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.096	0.962	0.867	0.775	0.745
	$N_{cr}/N_y$	0.645	0.828	0.875	0.889	0.895
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.212	1.063	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.514	0.689	0.811	0.845	0.856
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.519	1.332	1.201	1.074	1.032
	$N_{cr}/N_y$	0.356	0.435	0.525	0.612	0.671
	NO.	→	→	→	→	197
120	$\Lambda_{mod}$	1.826	1.602	1.444	1.291	1.241
	$N_{cr}/N_y$	0.301	0.345	0.394	0.447	0.490

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

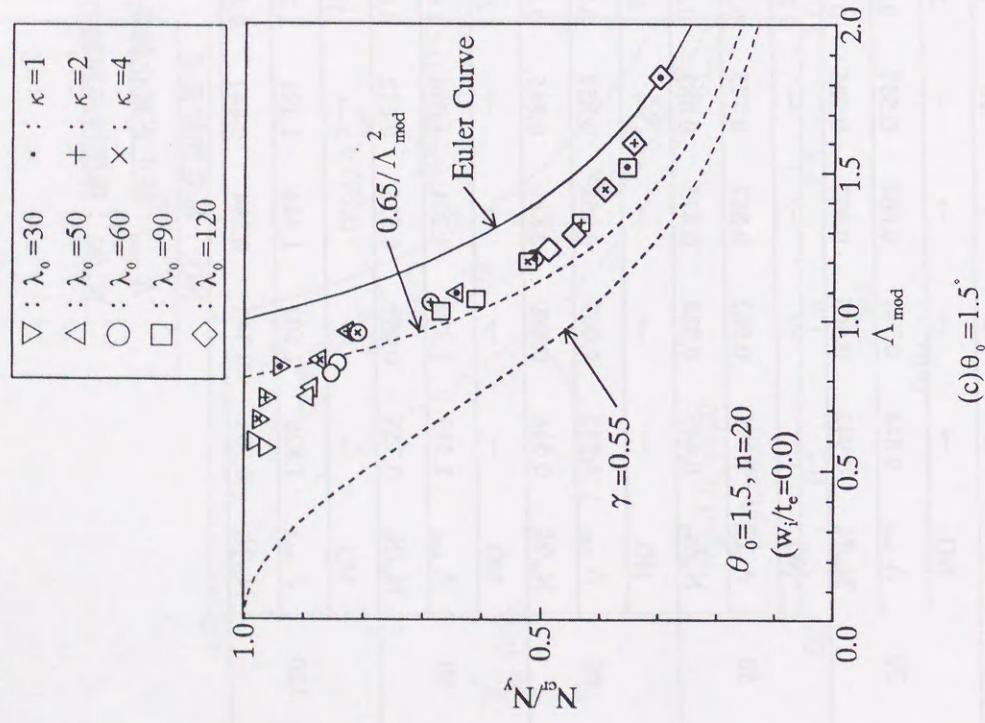
表 4-10(d) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 1.5^\circ$ ,  $n = 20$ ,  $l_0 = 10m$ , ピン支持, 等分布荷重]  
(形状初期不整  $w_i/t_e = 0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	0.844	0.741	0.668	0.597	0.574
	$N_{cr}/N_y$	0.900	0.937	0.949	0.955	0.947
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	1.096	0.962	0.867	0.775	0.745
	$N_{cr}/N_y$	0.566	0.683	0.760	0.794	0.801
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.212	1.063	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.368	0.556	0.651	0.718	0.729
	NO.	→	→	→	→	228
90	$\Lambda_{mod}$	1.519	1.332	1.201	1.074	1.032
	$N_{cr}/N_y$	0.245	0.304	0.401	0.492	0.538
	NO.	→	→	→	→	197
120	$\Lambda_{mod}$	1.826	1.602	1.444	1.291	1.241
	$N_{cr}/N_y$	0.219	0.244	0.281	0.331	0.381

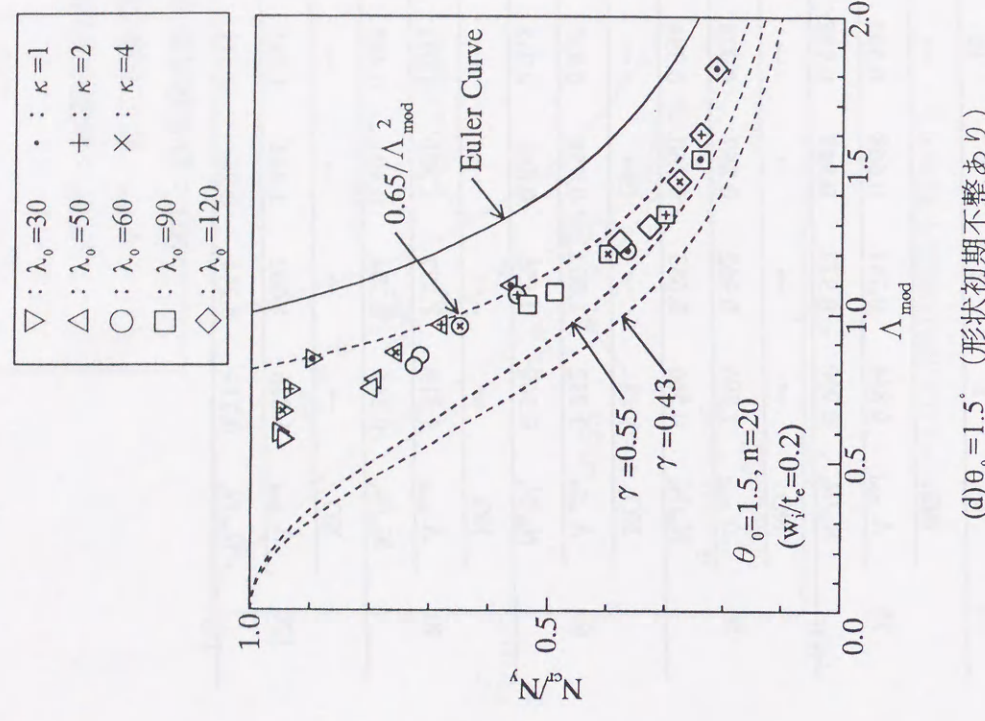
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(c)  $\theta_0 = 1.5^\circ$



(d)  $\theta_0 = 1.5^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-22  $N_{cr}^*(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 1)

表 4-10(e) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $n = 20$ ,  $l_0 = 10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

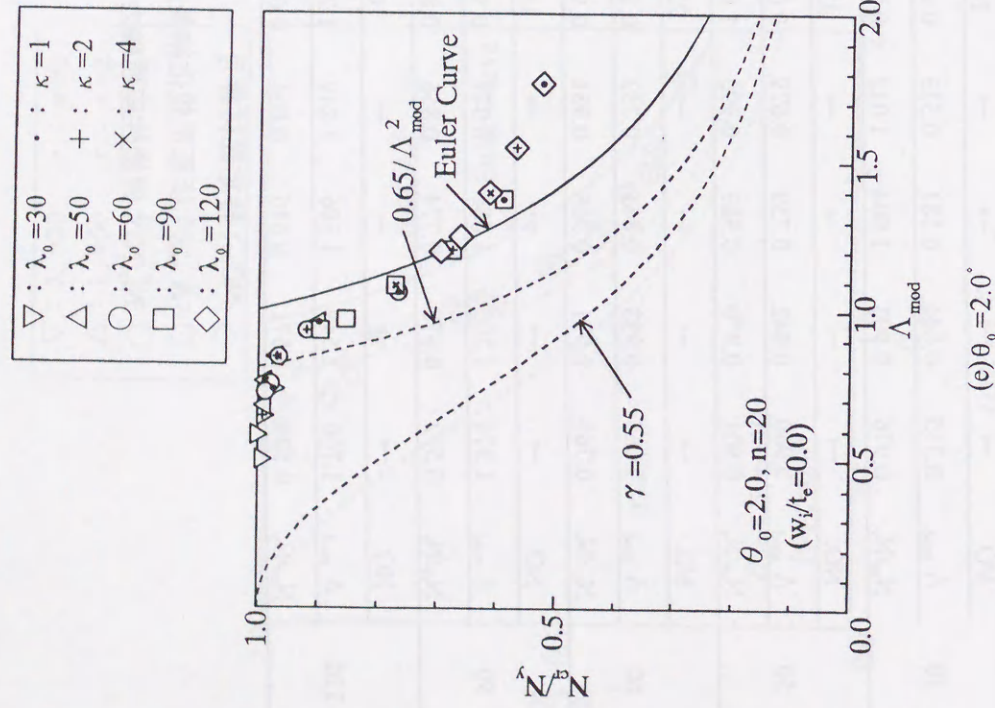
$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	0.735	0.644	0.581	0.519	0.499
	$N_{cr}/N_y$	0.976	0.993	1.004	1.012	0.996
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	0.960	0.842	0.759	0.679	0.652
	$N_{cr}/N_y$	0.901	0.970	0.989	0.990	1.000
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.933	0.841	0.752	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.769	0.921	0.968	0.981	0.989
	NO.	→	→	→	→	166
90	$\Lambda_{mod}$	1.374	1.205	1.086	0.971	0.933
	$N_{cr}/N_y$	0.592	0.678	0.774	0.856	0.899
	NO.	→	→	→	→	166
120	$\Lambda_{mod}$	1.766	1.549	1.396	1.249	1.200
	$N_{cr}/N_y$	0.528	0.571	0.616	0.664	0.698

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

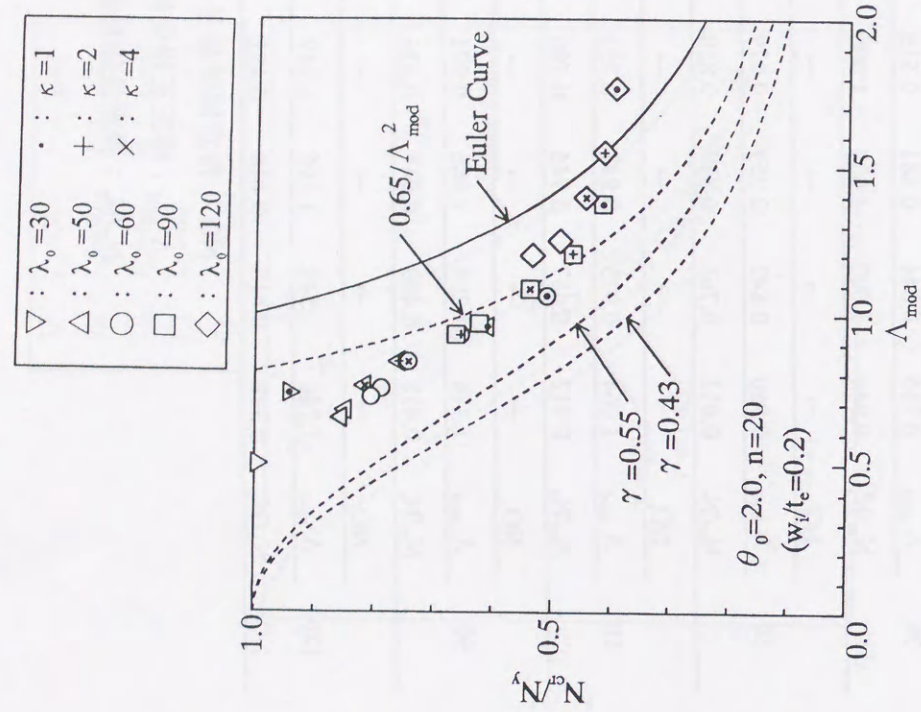
表 4-10(f) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $n = 20$ ,  $l_0 = 10m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	228
30	$\Lambda_{mod}$	0.735	0.644	0.581	0.519	0.499
	$N_{cr}/N_y$	0.944	1.007	1.007	1.006	0.997
	NO.	→	→	→	→	228
50	$\Lambda_{mod}$	0.960	0.842	0.759	0.679	0.652
	$N_{cr}/N_y$	0.611	0.761	0.818	0.850	0.857
	NO.	→	→	→	→	228
60	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.933	0.841	0.752	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.512	0.657	0.745	0.790	0.807
	NO.	→	→	→	→	166
90	$\Lambda_{mod}$	1.374	1.205	1.086	0.971	0.933
	$N_{cr}/N_y$	0.418	0.469	0.541	0.626	0.665
	NO.	→	→	→	→	166
120	$\Lambda_{mod}$	1.766	1.549	1.396	1.249	1.200
	$N_{cr}/N_y$	0.398	0.417	0.448	0.491	0.537

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(e)  $\theta_0 = 2.0^\circ$



(f)  $\theta_0 = 2.0^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-22  $N_{cr}^d(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 1)

表 4-10(g) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 1.0^\circ$ ,  $n = 20$ ,  $l_0 = 10m$ , ピン支持, 片偏載荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	→ 130
30	$\Lambda_{mod}$	0.968	0.849	0.765	0.684	0.657
	$N_{cr}/N_y$	0.794	0.836	0.823	0.813	0.800
	NO.	→	→	→	→	→ 100
50	$\Lambda_{mod}$	1.284	1.126	1.015	0.908	0.872
	$N_{cr}/N_y$	0.503	0.647	0.726	0.756	0.773
	NO.	→	→	→	→	→ 100
60	$\Lambda_{mod}$	1.425	1.250	1.127	1.008	0.968
	$N_{cr}/N_y$	0.410	0.525	0.624	0.692	0.722
	NO.	→	→	→	→	→ 70
90	$\Lambda_{mod}$	1.782	1.563	1.409	1.260	1.210
	$N_{cr}/N_y$	0.272	0.347	0.406	0.462	0.501
	NO.	→	→	→	→	→ 70
120	$\Lambda_{mod}$	2.083	1.827	1.647	1.473	1.415
	$N_{cr}/N_y$	0.210	0.259	0.315	0.351	0.377

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

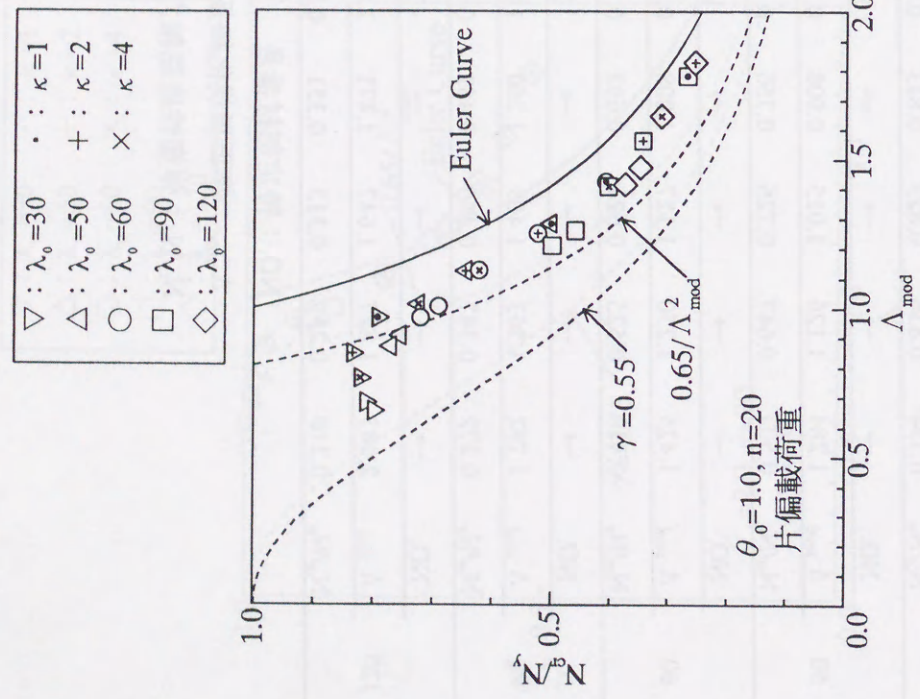
表 4-10(h) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 1.5^\circ$ ,  $n = 20$ ,  $l_0 = 10m$ , ピン支持, 片偏載荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	→ 130
30	$\Lambda_{mod}$	0.834	0.731	0.659	0.590	0.566
	$N_{cr}/N_y$	0.899	0.835	0.884	0.862	0.835
	NO.	→	→	→	→	→ 165
50	$\Lambda_{mod}$	1.101	0.966	0.871	0.779	0.748
	$N_{cr}/N_y$	0.770	0.869	0.863	0.848	0.835
	NO.	→	→	→	→	→ 165
60	$\Lambda_{mod}$	1.206	1.058	0.953	0.853	0.819
	$N_{cr}/N_y$	0.629	0.810	0.855	0.847	0.836
	NO.	→	→	→	→	→ 165
90	$\Lambda_{mod}$	1.490	1.306	1.178	1.012	1.012
	$N_{cr}/N_y$	0.449	0.542	0.644	0.730	0.782
	NO.	→	→	→	→	→ 165
120	$\Lambda_{mod}$	1.761	1.544	1.392	1.196	1.196
	$N_{cr}/N_y$	0.378	0.430	0.488	0.547	0.592

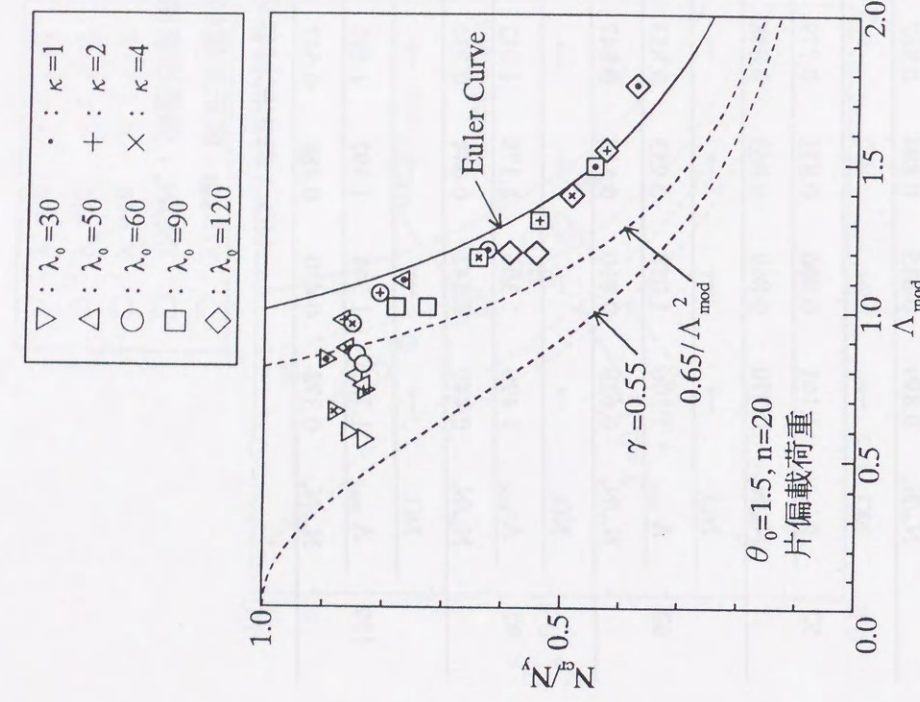
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(g)  $\theta_0 = 1.0^\circ$  (片偏載荷重)



(h)  $\theta_0 = 1.5^\circ$  (片偏載荷重)

図 4-22  $N_{cr}^p(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 1)

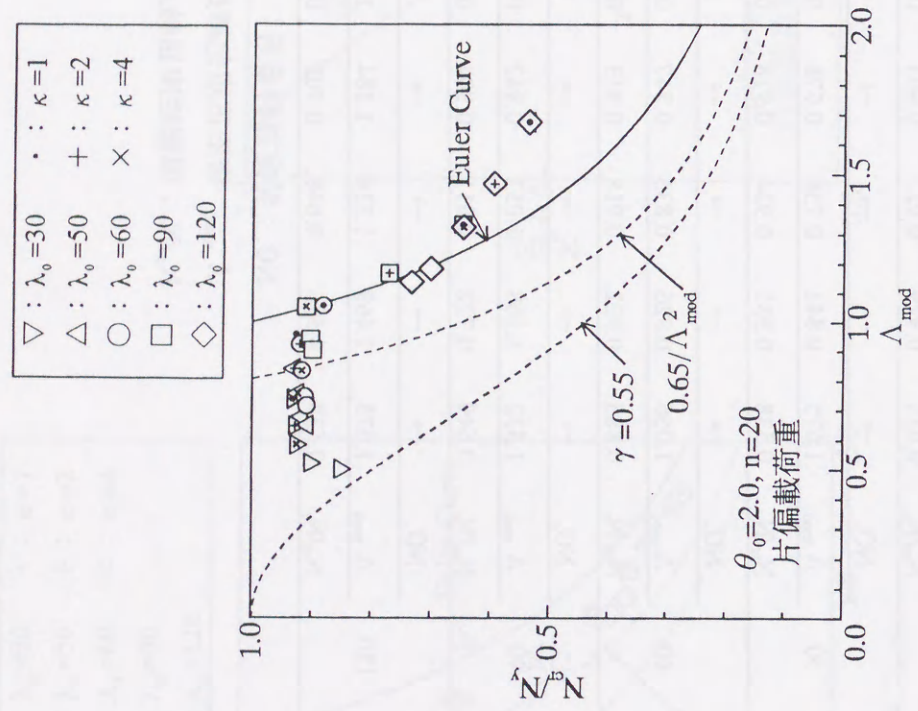
表 4-10(i) 特定部材番号, 修正規格化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $n = 20$ ,  $l_0 = 10m$ , ピン支持, 片偏載荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	165
30	$\Lambda_{mod}$	0.739	0.648	0.584	0.522	0.502
	$N_{cr}/N_y$	0.933	0.929	0.927	0.903	0.853
	NO.	→	→	→	→	165
50	$\Lambda_{mod}$	1.675	0.841	0.758	0.678	0.651
	$N_{cr}/N_y$	0.538	0.931	0.924	0.918	0.908
	NO.	→	→	→	→	165
60	$\Lambda_{mod}$	1.056	0.926	0.835	0.747	0.717
	$N_{cr}/N_y$	0.883	0.922	0.918	0.913	0.910
	NO.	→	→	→	→	165
90	$\Lambda_{mod}$	1.332	1.168	1.053	0.942	0.905
	$N_{cr}/N_y$	0.649	0.772	0.911	0.904	0.900
	NO.	→	→	→	→	165
120	$\Lambda_{mod}$	1.675	1.469	1.324	1.184	1.138
	$N_{cr}/N_y$	0.538	0.596	0.648	0.702	0.734

NO. : 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$  : 修正規格化細長比

$N_{cr}/N_y$  : 弾塑性座屈軸力



(i)  $\theta_0=2.0^\circ$  (片偏載荷重)

図 4-22  $N_y^e(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 1)

表 4-11(a) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.995	0.873	0.787	0.704	0.676
	$N_{cr}/N_y$	0.769	0.853	0.900	0.940	0.934
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.462	1.282	1.156	1.034	0.993
	$N_{cr}/N_y$	0.350	0.455	0.540	0.616	0.669
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.818	1.594	1.437	1.285	1.235
	$N_{cr}/N_y$	0.212	0.283	0.348	0.397	0.427
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	2.130	1.868	1.684	1.506	1.447
	$N_{cr}/N_y$	0.161	0.203	0.248	0.291	0.318
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.434	2.135	1.924	1.721	1.653
	$N_{cr}/N_y$	0.138	0.164	0.193	0.225	0.249

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

表 4-11(b) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 [ $\theta_0=1.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

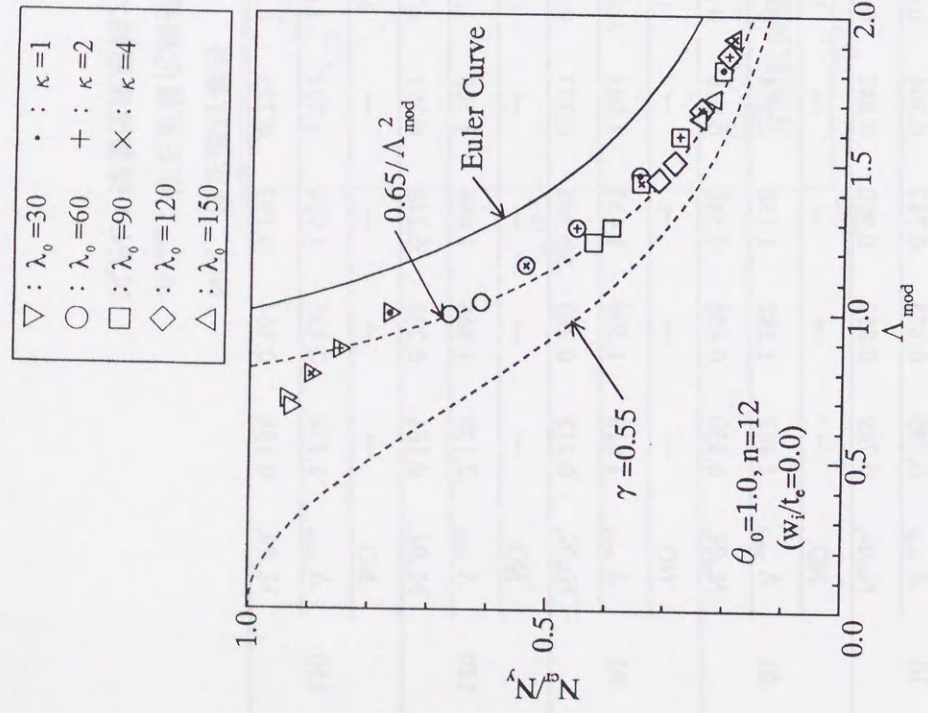
(形状初期不整  $w/t_e=0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.995	0.873	0.787	0.704	0.676
	$N_{cr}/N_y$	0.715	0.812	0.865	0.905	0.905
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.462	1.282	1.156	1.034	0.993
	$N_{cr}/N_y$	0.301	0.403	0.490	0.563	0.598
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.818	1.594	1.437	1.285	1.235
	$N_{cr}/N_y$	0.189	0.242	0.296	0.350	0.383
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	2.130	1.868	1.684	1.506	1.447
	$N_{cr}/N_y$	0.110	0.140	0.208	0.240	0.267
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.434	2.135	1.924	1.721	1.653
	$N_{cr}/N_y$	0.095	0.112	0.135	0.172	0.197

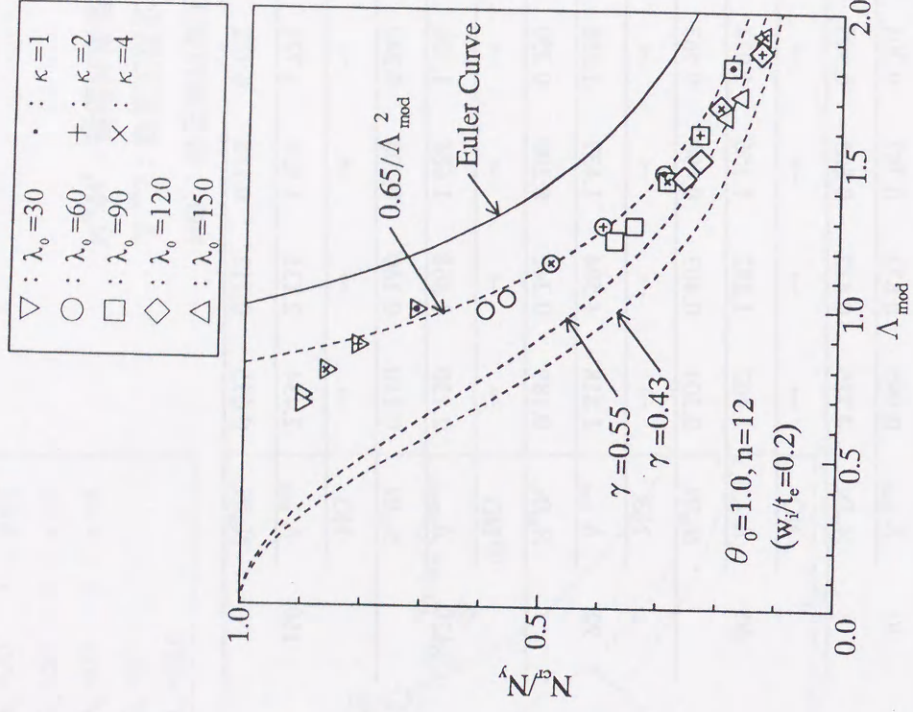
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(a)  $\theta_0 = 1.0$



(b)  $\theta_0 = 1.0$  (形状初期不整あり)

図 4-23  $N_{cr}^*(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 2)

表 4-11(c) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 $[\theta_0 = 1.5^\circ, n = 12, l_0 = 4m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.842	0.739	0.666	0.596	0.574
	$N_{cr}/N_y$	0.915	0.937	0.953	0.962	0.964
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.211	1.062	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.485	0.649	0.778	0.839	0.848
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.524	1.337	1.205	1.078	1.035
	$N_{cr}/N_y$	0.337	0.412	0.495	0.580	0.640
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.837	1.611	1.452	1.299	1.248
	$N_{cr}/N_y$	0.286	0.326	0.371	0.422	0.463
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.206	1.935	1.744	1.560	1.499
	$N_{cr}/N_y$	0.262	0.286	0.312	0.339	0.363

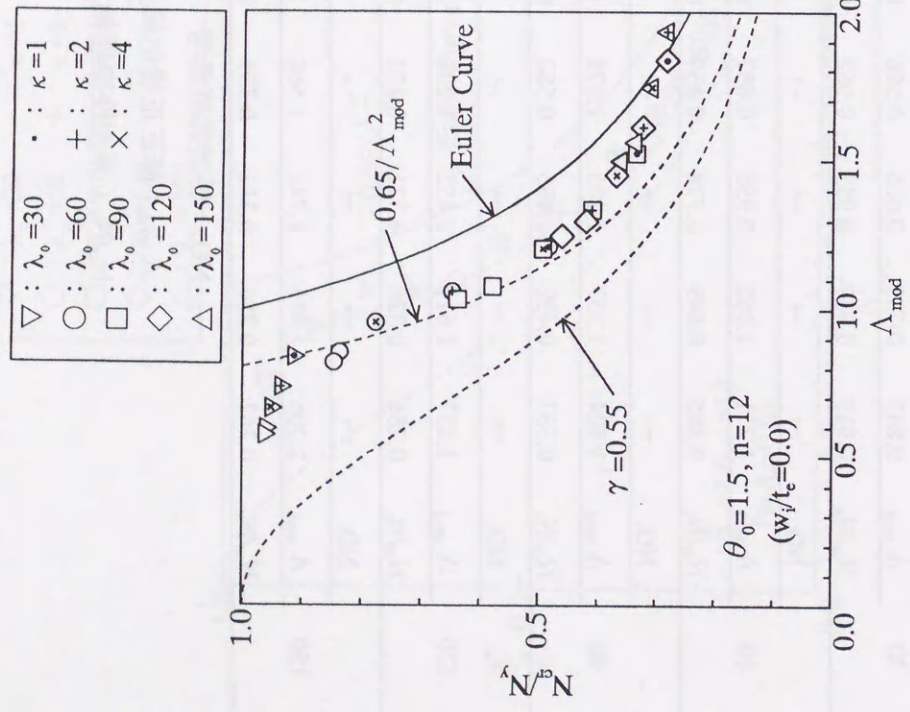
NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

表 4-11(d) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 $[\theta_0 = 1.5^\circ, n = 12, l_0 = 4m, \text{ピン支持, 等分布荷重}]$   
 (形状初期不整  $w_i/t_e = 0.2$  あり)

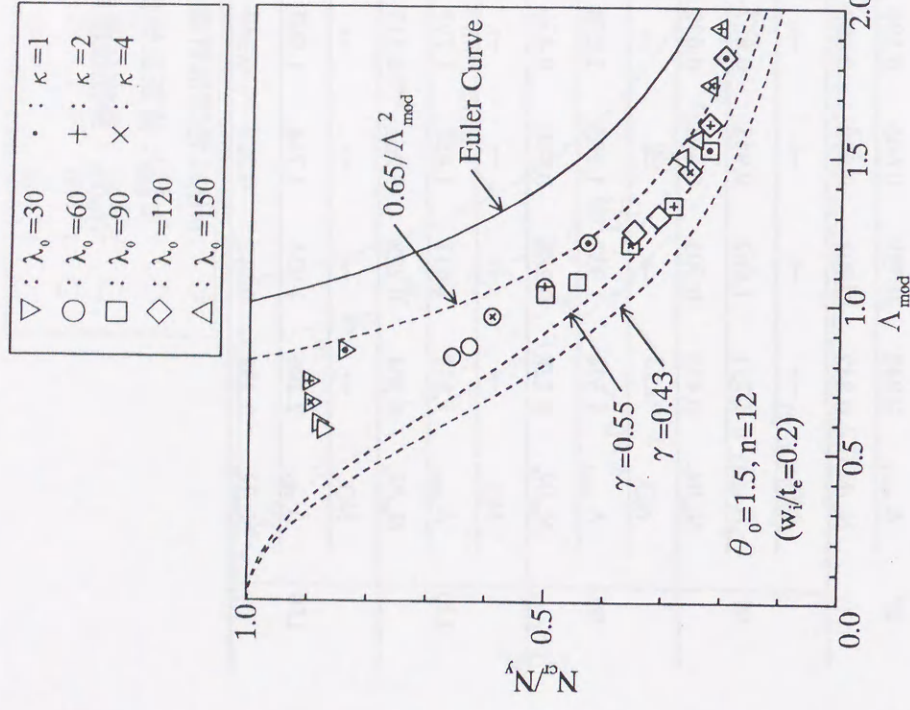
$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.842	0.739	0.666	0.596	0.574
	$N_{cr}/N_y$	0.842	0.901	0.898	0.885	0.877
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.211	1.062	0.958	0.857	0.823
	$N_{cr}/N_y$	0.433	0.505	0.593	0.632	0.661
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.524	1.337	1.205	1.078	1.035
	$N_{cr}/N_y$	0.228	0.288	0.360	0.450	0.503
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.837	1.611	1.452	1.299	1.248
	$N_{cr}/N_y$	0.204	0.228	0.261	0.313	0.354
	NO.	→	→	→	→	118
150	$\Lambda_{mod}$	2.206	1.935	1.744	1.560	1.499
	$N_{cr}/N_y$	0.198	0.212	0.227	0.249	0.274

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力





(c)  $\theta_0 = 1.5^\circ$



(d)  $\theta_0 = 1.5^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-23  $N_{cr}^2(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 2)

表 4-11(e) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.732	0.642	0.579	0.518	0.497
	$N_{cr}/N_y$	0.989	0.990	0.985	0.984	0.995
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.934	0.842	0.753	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.670	0.820	0.901	0.935	0.944
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.377	1.208	1.089	0.974	0.936
	$N_{cr}/N_y$	0.520	0.593	0.680	0.761	0.811
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.762	1.545	1.393	1.246	1.197
	$N_{cr}/N_y$	0.467	0.504	0.543	0.584	0.618
	NO.	→	→	→	→	86
150	$\Lambda_{mod}$	2.193	1.923	1.734	1.551	1.490
	$N_{cr}/N_y$	0.392	0.410	0.427	0.440	0.449

NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

表 4-11(f) 特定部材番号, 修正正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 4m$ , ピン支持, 等分布荷重]

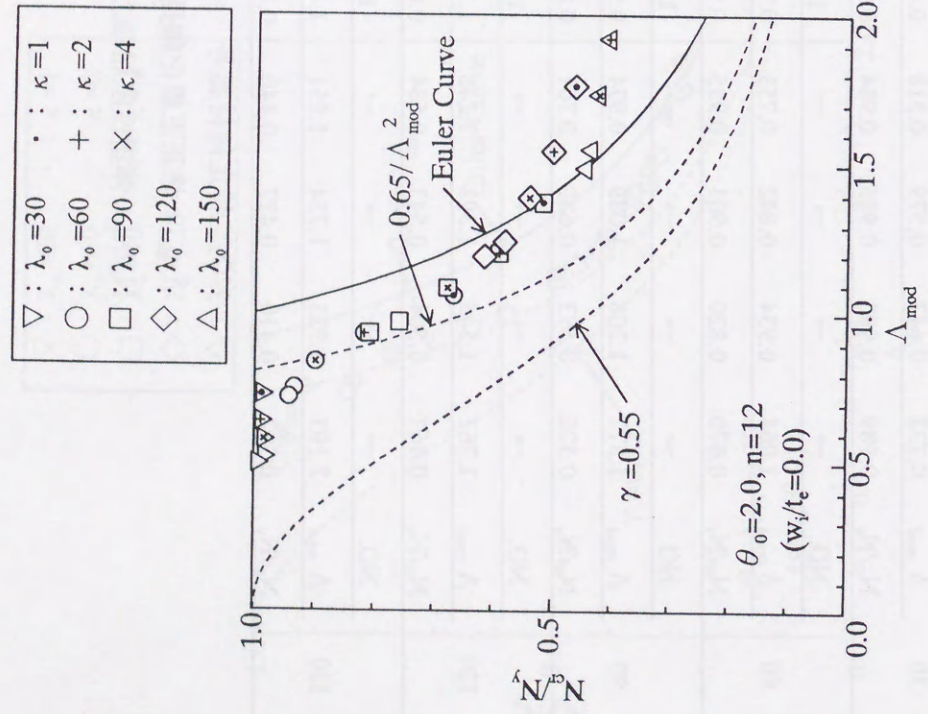
(形状初期不整  $w_i/t_e = 0.2$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	2	4	10	100
	NO.	→	→	→	→	118
30	$\Lambda_{mod}$	0.732	0.642	0.579	0.518	0.497
	$N_{cr}/N_y$	0.831	0.873	0.887	0.873	0.848
	NO.	→	→	→	→	118
60	$\Lambda_{mod}$	1.064	0.934	0.842	0.753	0.723
	$N_{cr}/N_y$	0.446	0.572	0.655	0.693	0.708
	NO.	→	→	→	→	118
90	$\Lambda_{mod}$	1.377	1.208	1.089	0.974	0.936
	$N_{cr}/N_y$	0.370	0.418	0.469	0.559	0.602
	NO.	→	→	→	→	118
120	$\Lambda_{mod}$	1.762	1.545	1.393	1.246	1.197
	$N_{cr}/N_y$	0.357	0.377	0.398	0.431	0.468
	NO.	→	→	→	→	86
150	$\Lambda_{mod}$	2.193	1.923	1.734	1.551	1.490
	$N_{cr}/N_y$	0.335	0.345	0.357	0.373	0.390

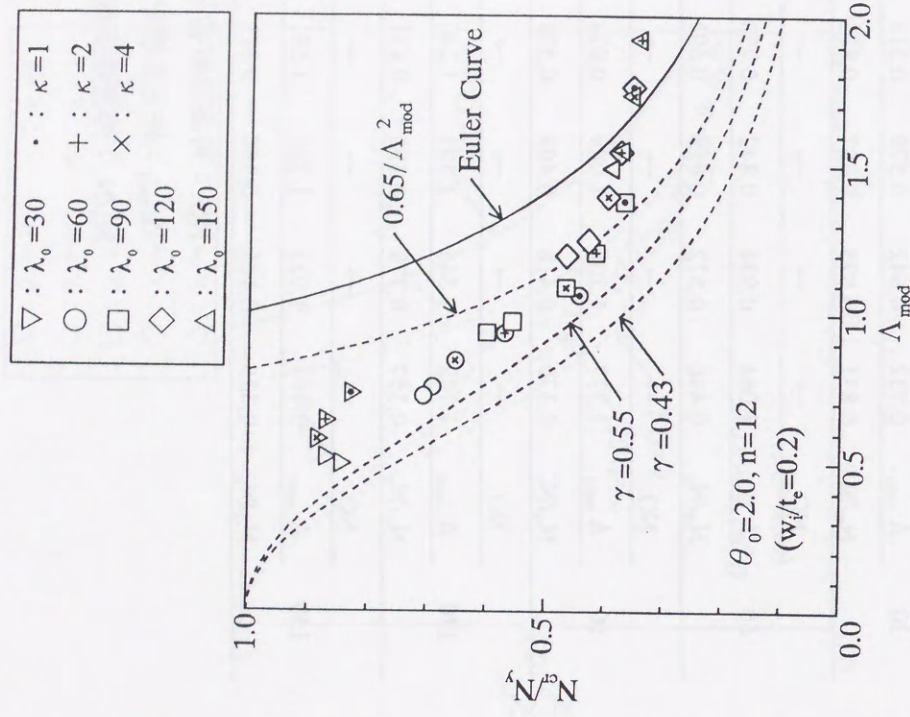
NO.: 特定部材番号

$\Lambda_{mod}$ : 修正正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

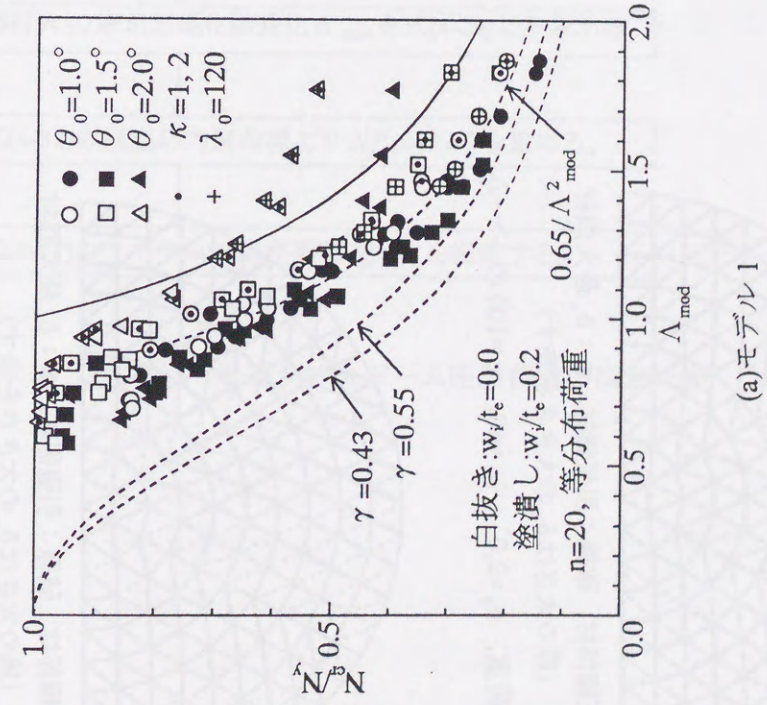


(e)  $\theta_0 = 2.0^\circ$

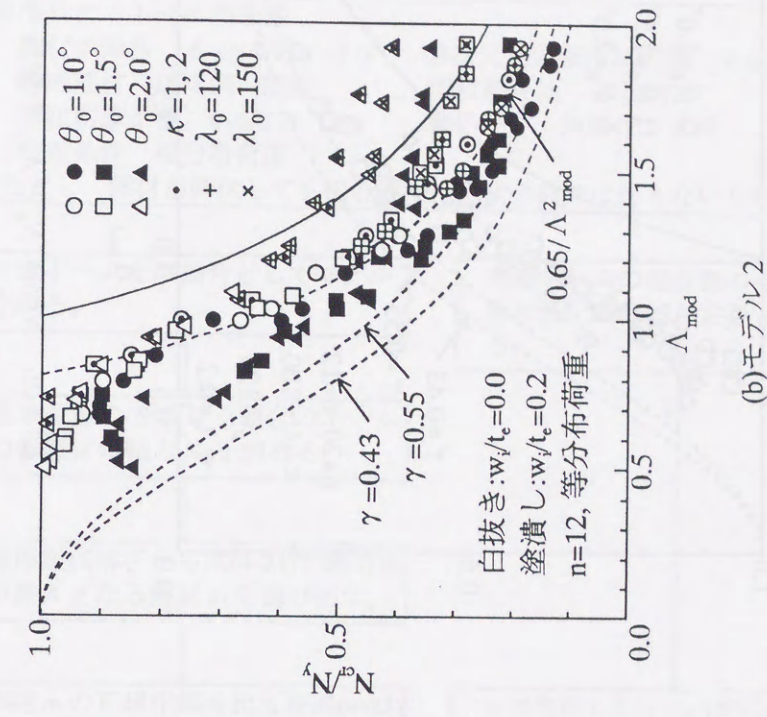


(f)  $\theta_0 = 2.0^\circ$  (形状初期不整あり)

図 4-23  $N_y^a(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係 (モデル 2)

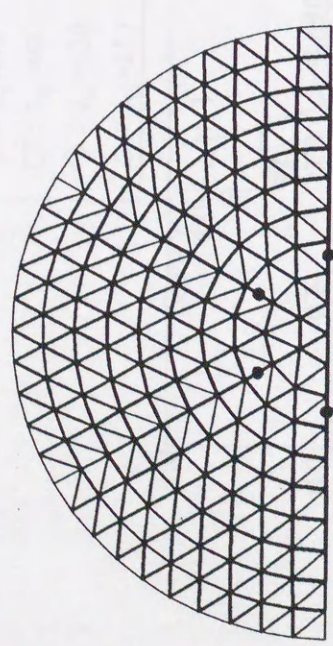


(a)モデル 1

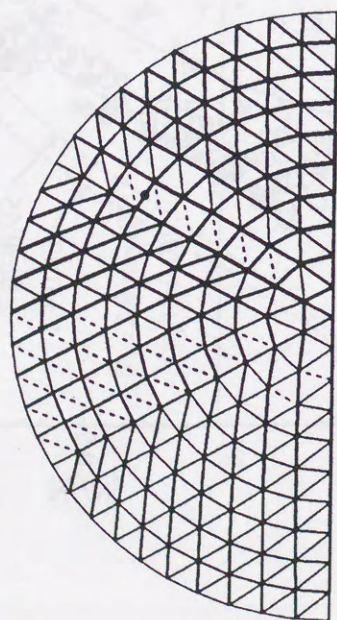


(b)モデル 2

図 4-24  $N_y^a(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係



実線：圧縮部材，破線：引張部材，●： $\delta_m$  最大部材  
(線の太さは $\delta_m$ の大きさを表す)  
(a) 等分布荷重， $\theta_0=2.0^\circ$ ， $\lambda_0=60$ ， $\kappa=100$  のドーム



実線：圧縮部材，破線：引張部材，●： $\delta_m$  最大部材  
(線の太さは $\delta_m$ の大きさを表す)  
(b) 片偏載荷重， $\theta_0=2.0^\circ$ ， $\lambda_0=60$ ， $\kappa=100$  のドーム

図 4-25  $\delta_m$  の分布例

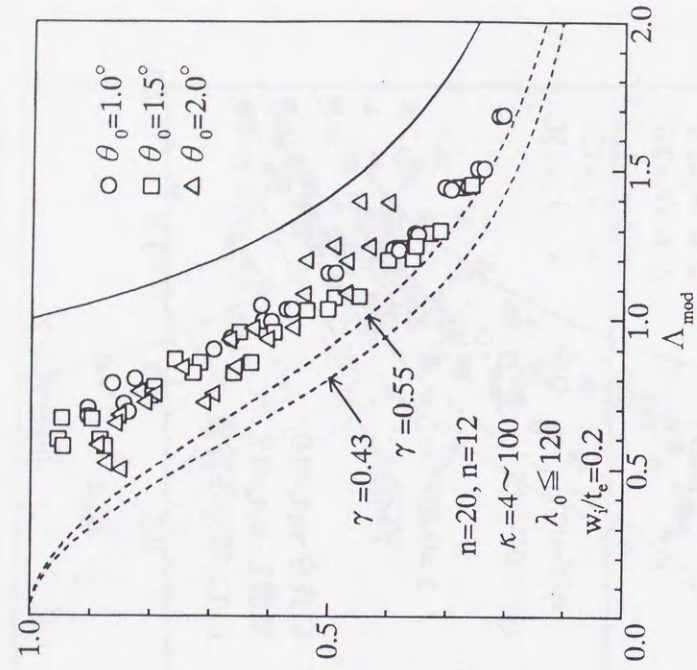


図 4-26  $N_{cr}^{pl}(\kappa)/N_y$  と  $\Lambda_{mod}$  の関係

( $\lambda_0$  が 120 以下， $\kappa$  が 4 以上，初期不整  $w_i=0.2t_c$ ，等分布荷重の場合)

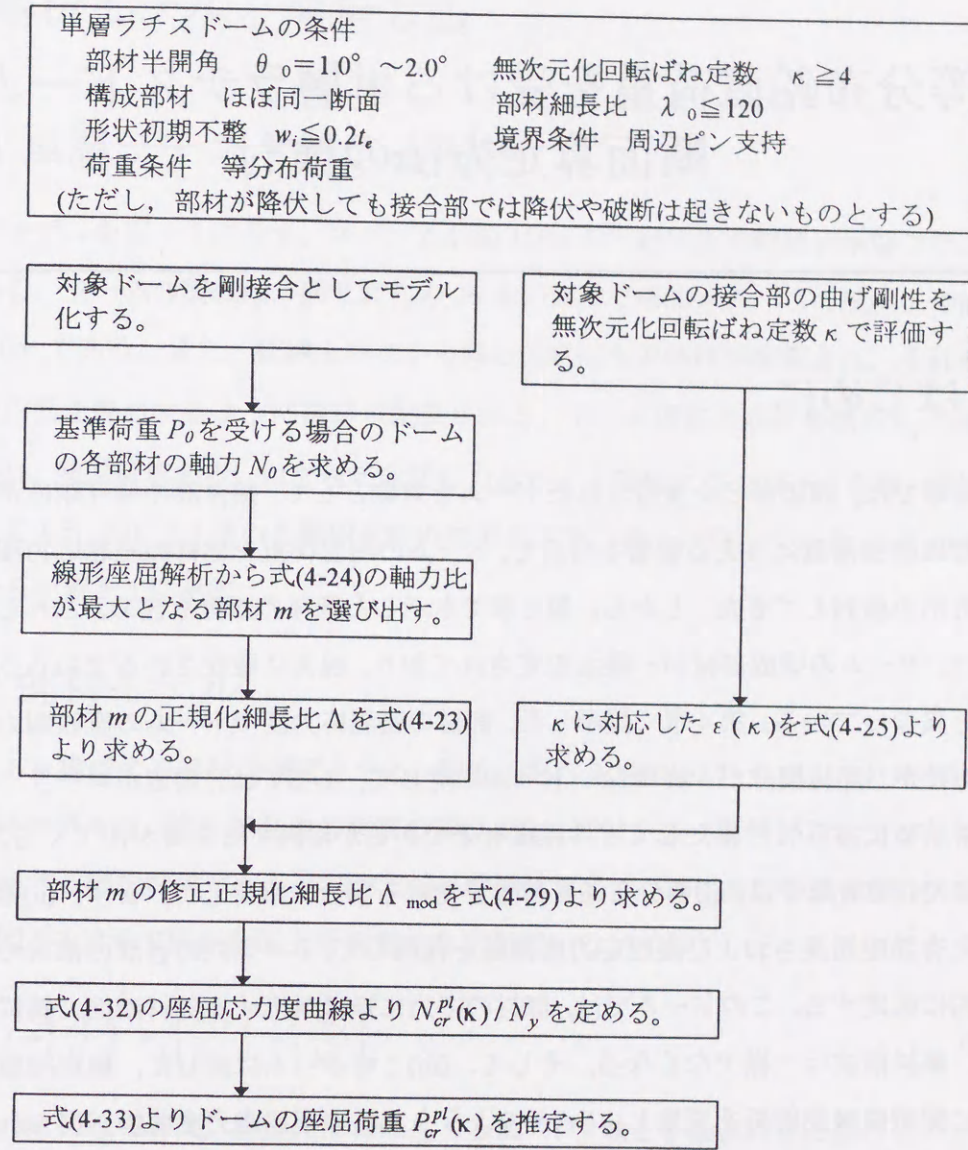


図 4-27 単層ラチスドーム座屈荷重の推定手順

## 5. 等分布鉛直荷重を受ける単層ラチスドームの断面算定方法の検討

### 5.1. はじめに

第4章では、周辺がピン支持されたドームを対象として、接合部の曲げ剛性がドームの弾塑性座屈荷重に与える影響を分析し、ドームの座屈荷重を部材の座屈応力度で評価する方法を検討してきた。しかし、第1章でも示した既往の研究も含め、これら研究の多くは、ドームの構成部材が一様と仮定されており、現実に建設されるであろう部材の構成と異なっている。第4章で提示した、部材の座屈応力度でドームの座屈耐力を評価する方法が、部材構成が一様でないドームに対して、あるいは、周辺がローラー支持されたドームに対して、果たしてどの程度有効であるか検討する必要がある。

そこで、第5章では、(i)等分布鉛直荷重を受ける場合に限定して、まず、(ii)第4章で示した有効座屈長さおよび座屈応力度曲線を利用して、ドーム内の各部の部材の断面を略算的に仮定する。このドームでは、部材の応力にほぼ対応する部材断面で構成されるので、部材構成は一様でなくなる。そして、(iii)このドームに対して、線形座屈解析ならびに弾塑性座屈解析を実施し、(iv)どのような部材の座屈応力度曲線が得られるか、第4章や既往の研究[30]で示されている部材座屈応力度曲線と比較する。また、弾塑性座屈解析から得られるドームの耐力と、その座屈応力度曲線から推定した耐力の比較から、(ii)で用いた断面の略算的方法の有用性を議論する。なお、(v)境界条件により部材の座屈応力度曲線がどう変化するか調べるため、周辺ピン支持とローラー支持の2種の境界条件のドームを対象とする。

第4章でも示したように、半剛接合単層ラチスドームの部材座屈応力度は、修正細長比を用いれば、剛接合ドームと同様の座屈応力度曲線を利用して評価できる。したがって、本章では、剛接合ドームを対象として座屈応力度の検討を進めている。

## 5.2. 解析モデルと解析方法

### 5.2.1. 単層ラチスドームの形状

解析モデルを図5-1に示す。スパン $L$ が約150mの円形平面の剛接合単層ラチスドームである。ドームの稜線は、同じ長さの16本の部材で構成され、この稜線上の部材長 $l_0$ は10mである。また、稜線上の点から同心円状に水平部材が配置され、それぞれの水平な円弧を等分するように部材が配置される。ドーム頂部の部材半開角 $\theta_0$ の値の変化につれ、座屈荷重あるいは部材の座屈応力度がどう変化するか調べるため、部材半開角として1.5、2.0、2.5度の3種類を解析対象とする。ドームのスパン $L$ 、ライズ $H$ 、曲率半径 $R$ を表5-1に示す。

### 5.2.2. 部材モデル

ドームを構成する部材は鋼管とする。解析にあたり、図5-2に示すようにモデル化する。部材モデルは、接合部を表す両端の弾性ばね、部材を表す弾性部材および部材の降伏を模擬する弾塑性ばねから構成される。弾塑性ばねは、降伏前は弾性体、降伏後は式(5-1)、図5-3で示す降伏曲面上を流動すると仮定する。

$$f = \left( \frac{N}{N_y} \right)^2 + \sqrt{\left( \frac{M_y}{M_p} \right)^2 + \left( \frac{M_z}{M_p} \right)^2} \quad (5-1)$$

ここで、 $N$ 、 $M_y$ 、 $M_z$ は、弾塑性ばねに生じる軸力、 $y$ 軸と $z$ 軸まわりの曲げモーメントであり、 $N_y$ 、 $M_p$ は、降伏軸力と降伏モーメントである。接合部は剛接合を仮定しているので、接合部の曲げ剛性は十分に大きな値を用いる。また、部材のねじり剛性は無視する。

ドームを構成するすべての部材について、管の厚さ中心で定める管径は同一とし、 $d$ とする。部材番号 $i$ の部材の管厚 $t_i$ は、節5.3.で述べる断面算定法により仮定する。これらの値を用いて、断面積 $A_i$ 、断面二次モーメント $I_i$ 、降伏軸力 $N_{yi}$ 、降伏モーメント $M_{pi}$ を次式で計算する。

$$A_i = \pi \cdot d \cdot t_i \quad (5-2)$$

$$I_i = \pi \cdot d^3 \cdot t_i / 8 \quad (5-3)$$

$$N_{yi} = \sigma_y \cdot A_{yi} \quad (5-4)$$

$$M_{\mu i} = \sigma_y \cdot d^2 \cdot t_i \quad (5-5)$$

ここで、稜線上の部材の断面二次半径  $r_0$  は、

$$r_0 = l_0 / \lambda_0 \quad (5-6)$$

で表せるので、

$$d = 2\sqrt{2} \frac{l_0}{\lambda_0} \quad (5-7)$$

となる。ここで、 $\lambda_0$  は稜線上の部材細長比である。今回の検討では、 $\lambda_0 = 30, 60, 90, 120$  となる 4 種類のドーム分析する。それぞれの  $\lambda_0$  に対する管径  $d$  を表 5-2 に示す。また、部材 SS400 を想定し、降伏応力度として、 $\sigma_y = 2.4 \text{ tf/cm}^2$ 、ヤング係数  $E = 2100 \text{ tf/cm}^2$  とする。

### 5.2.3.境界条件

ドームの境界条件として、2 種類を想定する。想定した境界条件(a)周辺ピン支持と(b)周辺ローラー支持を図 5-4 に示す。周辺ピン支持では、円周の境界上の節点変位をすべてゼロに拘束し、回転を自由とする。周辺ローラー支持では、境界上の節点の鉛直変位をゼロに拘束し、水平方向の変位とともにすべての回転を自由とする。ただし、周辺ローラー支持では、稜線につながる節点 A, B, C, D, E, F については放射状方向のみに移動が自由とする。

### 5.2.4.形状初期不整

単層ラチスドームに生じる形状初期不整  $w_i$  は、完全形状ドームの弾塑性解析の結果から、ドームの座屈荷重に最も影響があると思われる節点 G (図 5-1) に等価なシェル厚  $t_e$  の 20% を仮定する。

$$w_i = 0.2t_e \quad (5-8)$$

ここで、

$$t_e = 2\sqrt{3}r_0 \quad (5-9)$$

### 5.2.5.荷重条件

ドームに作用する荷重として、自重等の固定荷重を想定した等分布状の荷重を対象とする。

$$P = \lambda P_0 \quad (5-10)$$

ここで、 $P_0$  を基準荷重、 $\lambda$  を荷重係数とする。

### 5.2.6.解析方法

解析に用いる方法は、第 2 章で述べたものと同様であり、以下に解析の概略のみを述べる。

#### (1)線形座屈解析

設定された基準荷重  $P_0$  に対して、座屈前変形を無視して各部材の軸力  $N_{oi}$  ( $i$  は部材番号) を求める。この軸力を用いて線形固有値解析を実施し、以下の方程式を満足する最小固有値  $\lambda_{cr}^{lin}$  を求める。

$$\det[K(\lambda_{cr}^{lin})] = 0 \quad (5-11)$$

ここで、 $K$  は全体剛性マトリックスであり、最小の線形座屈荷重  $P_{cr}^{lin}$  と対応する各部材の線形軸力は、次のように計算できる。

$$P_{cr}^{lin} = \lambda_{cr}^{lin} \cdot P_0 \quad (5-12)$$

$$N_{oi}^{lin} = \lambda_{cr}^{lin} \cdot N_{oi} = \frac{P_{cr}^{lin}}{P_0} N_{oi} \quad (5-13)$$

#### (2)弾塑性座屈解析

弾塑性座屈解析では、幾何学的非線形性および式(5-1)で材料学的非線形性を考慮する。数値解法は Newton-Raphson 法に基づく手法であり、最大荷重直前までは荷重増分法、それ以降は変位増分法を用いる。弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$  として、ドームの荷重変位関係で極大となる荷重を採用する。

### 5.3. ドームを構成する部材断面の仮定方法

#### 5.3.1. 部材座屈強度に関する既往の結果

第4章では、単層ラチスドームを構成する部材の中で、降伏軸力  $N_y$  に対する線形座屈軸力  $N_{cr}^{lin}$  の比  $\delta_m$

$$\delta_m = N_{cr}^{lin} / N_y \quad (5-14)$$

が最大となる部材  $m$  に注目して、ドームが最大荷重（弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^{pl}$ ）に到達した時点での部材の座屈軸力（強度） $N_{cr}$  を分析した。

分析にあたり、部材  $m$  の正規化細長比  $\Lambda$

$$\Lambda = \sqrt{\frac{N_y}{N_{cr}^{lin}}} \quad (5-15)$$

の関数として、座屈強度  $N_{cr}$  を次式で近似的に表現した。なお、部材  $m$  を示す  $m$  を省略して表記する。

$$\frac{1}{\alpha_0 / \Lambda^2} \left( \frac{N_{cr}}{N_y} \right) + \left( \frac{N_{cr}}{N_y} \right)^2 = 1 \quad (5-16)$$

ここで、 $N_y$  は部材の降伏軸力である。 $\alpha_0$  は低減係数であり、線形座屈荷重に対する弾性座屈荷重の割合を示す係数である。この  $\alpha_0$  の値は、周辺ピン支持されたドームでは、等価シェル厚の20%程度の形状初期不整があると、0.55程度の値となった。また、等価な座屈長さ  $l_{eq}$  についても、次の関係がほぼ成り立つことを示した。ただし、 $l_{eq}$  の下限はほぼ0.9程度である。

$$l_{eq} / l_0 = c \sqrt{\xi} \quad (5-17)$$

$$\xi = \frac{12\sqrt{2}}{\lambda_0 \theta_0} \quad (5-18)$$

つまり、部材の線形座屈軸力  $N_{cr}^{lin}$  は、次式で与えられる。

$$N_{cr}^{lin} = \frac{\pi^2 EI}{l_{eq}^2} \quad (5-19)$$

係数  $c$  の値は、接合部の剛性に依存するが、文献[30]の図-8で例示するように、剛接合

の場合、0.40~0.50程度の値となる。

#### 5.3.2. 部材座屈強度に関する仮定

##### (7) 等価座屈長さ、線形座屈軸力

座屈強度を評価したい部材について、この部材がドームの中で一番早期に降伏する状況を想定する。したがって、式(5-17)によれば、この部材の等価座屈長さが推定できる。ただし、係数  $c$  として、どの程度の値を採用すればよいかという問題が生ずる。周辺ピン支持については、先の検討で、係数  $c$  は0.40~0.50であることが示されているが、周辺ローラー支持については、検討結果が示されていない。そこで、本研究では、周辺ピン支持と周辺ローラー支持の両者について、2種の値を、つまり、 $c=0.4$  と  $c=0.5$  を採用し、断面算定に用いることとする。また、 $l_0$  としては、各部材の長さを採用し、 $l_{eq}$  の下限は当該の部材長さとする。なお、等価座屈長さの仮定については、後に述べる結果と照応して検討することとする。一方、線形座屈軸力は、等価座屈長さに応じて算定が可能であるので、上記で求めた等価座屈長さ  $l_{eq}$  を使って、式(5-19)で算定する。

##### (4) 部材の座屈強度

正規化細長比  $\Lambda$  に対応する部材の座屈強度についても、先の研究で得られた式(5-16)を用いる。周辺ピン支持では  $\alpha_0$  の値として0.55を採用すれば、ほぼ座屈強度の下界が得られる[第4章や文献30]。ただし、初期不整はシェルの等価厚の20%を想定している。一方、周辺ローラー支持については、 $\alpha_0$  をどの程度の値とすればよいか、十分な検討が行われていない。多少の予備計算を実施したところ、ローラー支持の場合、 $\alpha_0$  として、0.40~0.55程度の結果が得られた。そこで、ローラー支持については、高めの値として、0.55を、ほぼ下界をおさえる値として0.43を仮定する。

(7,4)の検討にしたいがい、部材の座屈強度に際して、それぞれの境界条件について2ケースずつ仮定する。仮定した場合分けを表5-3に示す。

#### 5.3.3. 断面仮定方法の概要

設計あるいは予備設計段階で必要とされる終局荷重が与えられていると想定する。ここでは、この終局荷重を断面算定用荷重と呼び、この断面算定用荷重に対応して断面を仮定する。図5-5に、各部材の管厚の仮定方法の流れを示す。

まず、(7)部材半開角、部材細長比、稜線上の部材長等の形状と境界条件を定める。この時、すべての部材の管径は同一とし、式(5-7)で計算される値とする。また、定められたドームについて、断面算定用荷重を設定する。次に、(1)式(5-2)~(5-5)を用いて、部材の断面特性を仮定する。ただし、初期値として、すべての部材について同一の管厚  $t_i$  を仮定する。ここで、 $i$  は部材番号である。(ウ)仮定した断面特性を用いた線形弾性解析から、断面算定用荷重に対する部材断面力を計算する。部材の軸力  $N_i$ 、モーメント  $M_i$  とする。この部材断面力に基づいて、断面算定用の部材断面力  $N_{di}$  と  $M_{di}$  を仮定する。(エ)断面算定用部材断面力  $N_{di}$  と  $M_{di}$  を用いて、後に述べる方法で、新しい管厚  $t_i$  を求める。ここで求めた値と先に仮定した値を比較する。両者が十分に等しければ断面が収束したと考えるが、等しくなければ、ここで求めた新しい管厚  $t_i$  を仮定値として、(ウ)の手続きに戻り、断面を収束させる。(オ)収束した管厚  $t_i$ 、式(5-2)~(5-5)から得られる断面特性を用いて、線形座屈解析と弾塑性座屈解析を実施し、線形座屈荷重と弾塑性座屈荷重等を求める。

### 5.3.4. 断面算定用荷重（終局荷重）の仮定

断面算定用荷重として、等分布状の鉛直荷重を仮定する。単位面積あたりの固定荷重を  $w_0$  とすると、1節点あたりの固定荷重  $P_{d0}$  は次式で計算される。

$$P_{d0} = w_0 \times \frac{\sqrt{3}}{2} l_0^2 \quad (5-21)$$

これに鉛直荷重に対する安全率  $v_s$  を乗じて、断面算定用荷重を設定する。

$$P_d = v_s \cdot P_{d0} \quad (5-22)$$

ただし、 $P_d$  は終局荷重とし、固定荷重  $w_0$  と安全率  $v_s$  との積として、 $400 \text{ kgf/m}^2$  を仮定する。したがって、1節点あたりの断面算定用荷重（終局荷重） $P_d$  は  $34.64 \text{ tf}$  となる。

### 5.3.5. 断面算定用部材力

断面算定用荷重  $P_d$  に対して線形弾性解析を実施し、各部材の軸力  $N_i$ 、曲げモーメント  $M_i$  を求める。ただし、 $N_i$  は圧縮を負値とし、 $M_i$  は部材の  $y$  軸まわりと  $z$  軸まわりの曲げモーメントである  $M_{yi}$  と  $M_{zi}$  から、次式で計算する。

$$M_i = \sqrt{M_{yi}^2 + M_{zi}^2} \quad (5-23)$$

この  $N_i$ 、 $M_i$  を用いて、各部材の断面算定用部材軸力を  $N_{di}$  と  $M_{di}$  を次式で定める。

$$N_{di} = \begin{cases} N_i \cdot f_0 & \text{for } |N_i| \geq N_{\min} \\ N_{\min} \cdot \text{sign}(N_i) \cdot f_0 & \text{for } |N_i| < N_{\min} \end{cases} \quad (5-24)$$

$$M_{di} = \begin{cases} M_i \cdot f_0 & \text{for } M_i \geq M_{\min} \\ M_{\min} \cdot f_0 & \text{for } M_i < M_{\min} \end{cases} \quad (5-25)$$

ここで、

$$N_{\min} = \epsilon \cdot \max(|N_i|) \quad (5-26)$$

$$M_{\min} = \epsilon \cdot \max(M_i) \quad (5-27)$$

$$\epsilon = 0.3 \quad (5-28)$$

$$f_0 = \begin{cases} 1.0 & \text{for compression} \\ 1.2 & \text{for tension} \end{cases} \quad (5-29)$$

とする。式(5-24)~(5-29)の設定は、最小断面力を規定し、ドーム内であまりにも剛性の小さい部材を排除するためである。また、式(5-29)は、ドームの最大荷重が引張材の降伏で決定されないための配慮である。引張力を受ける周辺リングの断面の算定にも同様な配慮を払い、次式を仮定する。

$$N_{dr} = N_r \cdot f_{0r} \quad (5-30)$$

$$M_{dr} = M_r \cdot f_{0r} \quad (5-31)$$

$$f_{0r} = 1.5 \quad (5-32)$$

ここで、添字  $r$  は周辺リング部材を表す。

### 5.3.6. 管厚の算定方法

すべての部材は同じ管径  $d$  であると仮定したので、断面算定用部材軸力  $N_{di}$  と  $M_{di}$  を用いて決められるべき値は、各部材の管厚  $t_i$  である。 $t_i$  は次式から定める。

降伏条件式（すべての部材に適用）

$$\left( \frac{N_{di}}{N_{yi}} \right)^2 + \left( \frac{M_{di}}{M_{pi}} \right) = 1 \quad (5-33)$$

部材の座屈強度式（圧縮部材のみに適用）

$$\left| \frac{N_{di}}{N_{cri}} \right| = 1 \quad (5-34)$$

ここで、座屈強度  $N_{cri}$  は次のように求めることとする。

(7)まず、有効座屈長さ  $l_{eq}(i)$  を式(5-35)から求める。

$$l_{eq}(i)/l_i = c\sqrt{\xi} \quad (5-35)$$

ただし、 $l_{eq}(i)$  は部材長さ  $l_i$  より長いものとする。

$$l_{eq}(i)/l_i \geq 1.0 \quad (5-36)$$

(イ)次に、線形座屈軸力  $N_{cr}^{lin}(i)$  と正規化細長比  $\Lambda_i$  から座屈強度  $N_{cri}$  を計算する。

$$N_{cr}^{lin}(i) = \frac{\pi^2 EI_i}{l_{eq}(i)^2} \quad (5-37)$$

$$\Lambda_i = \sqrt{\frac{N_{yi}}{N_{cr}^{lin}(i)}} \quad (5-38)$$

$$\left( \frac{\Lambda_i^2 N_{cri}}{\alpha_0 N_{yi}} \right) + \left( \frac{N_{cri}}{N_{yi}} \right)^2 = 1 \quad (5-39)$$

式(5-35)と式(5-39)で使われる係数  $c$  と  $\alpha_0$  は、表 5-3 に従うこととする。

### 5.3.7. 断面算定用荷重に対応して仮定された部材断面

表 5-1 の部材半開角と表 5-2 の部材細長比の組み合わせで得られる 12 通りのドームに関して、表 5-3 の 4 種類の仮定を行い、5.3.3~5.3.6 節の方法にしたがって 48 種類のドームの断面を算定した。算定結果の概要を説明する。

各ドームの稜線部材とリング部材の断面積の最大値を表 5-4 に示す。括弧の無い値は、稜線部材の最大断面積、括弧内はリング部材の最大断面積である。断面算定用荷重（終局荷重） $P_d$  が  $400 \text{ kgf/cm}^2$  に対する値であり、この荷重が 1/2 となれば、断面積も 1/2 となる。図 5-6、図 5-7、図 5-8 にそれぞれのドームの部材（鋼材）体積の比較を示す。ここで、図 5-6 は周辺リング部材を含まない部材体積の小合計  $V_1$ 、図 5-7 は周辺リング部材の小合計  $V_2$ 、図 5-8 はドーム全体の体積の合計  $V_3$  である。また、CASE-2 と CASE-4 の一部のドームについての断面積の分布を図 5-9 に示す。

周辺ピン支持ドームである CASE-1 と CASE-2 を比較する。周辺リング部材に関しては、周辺がピン支持であるため、軸力と曲げモーメントは小さく、したがって、両ケースとも断面積は小さくなる。リング部材を除いた内部の部材に関しては、座屈長さを多少大きめに採用した CASE-2 の部材では、部材の座屈強度が小さくなるため、その分だけ断面積が大きくなる。したがって、稜線部材の最大断面積は、CASE-2 は CASE-1 の 1.1~1.4 程度となる。また、リング部材を除いた部材体積の合計  $V_1$  を比較すると、CASE-2 は CASE-1 よりも約 1.1~1.4 倍大きくなり、部材半開角が小さいほど、また、

部材細長比が大きいほどその倍率が大きくなる傾向にある。

周辺ローラー支持ドームである CASE-3 と CASE-4 を比較する。周辺リング部材の断面積はほぼ同じであるので、リング部材の体積  $V_2$  もほぼ同程度となる。しかし、CASE-4 は有効座屈長さを長く、部材の座屈強度を低く仮定したので、その分リング部材を除いた内部部材の断面積は大きくなり、CASE-4 の稜線部材の最大断面積は、CASE-3 の値よりも 1.2~1.7 倍程大きい。また、周辺リング部材を除く体積  $V_1$  は、CASE-4 は CASE-3 に対し約 1.2~1.8 倍の値となる。

ピン支持である CASE-1 とローラー支持である CASE-3 を比較する。 $\alpha_0$ 、 $c$  の値が同じであるので、断面の算定式は同じものである。周辺ローラー支持である CASE-3 では大きなリングテンションが発生するので、周辺リング部材の断面積やリング部材の体積の合計  $V_2$  は CASE-1 に比べ十分大きくなる。しかし、周辺リング部材を除く内部部材の体積の合計  $V_1$  は、CASE-1 と CASE-3 でほぼ同様の値となる。



## 5.4.弾塑性座屈解析結果とその分析

### 5.4.1.線形座屈荷重と弾塑性座屈荷重

表 5-5 に鉛直等分布荷重を受けるドームの線形座屈荷重  $P_{cr}^m$  と弾塑性座屈荷重  $P_{cr}^d$  を示す。ここで、()内は形状初期不整を有するドームの弾塑性座屈荷重である。なお、先に述べたように、CASE-1~CASE-4 は、断面算定の仮定の違いを表す(表 5-3)。断面算定荷重が節点あたり 36.64 *gf* であるので、弾塑性座屈解析から求めた最大荷重  $P_{cr}^d$  がこの値に近いが、それより多少大きければ、断面の仮定方法が効率的であると想定できる。

図 5-10(a)は CASE-2,  $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $\lambda_0=60$  のドームの節点 G における荷重と鉛直変位の関係を、図 5-11(a)はそれに対応する部材のモーメントと軸力の関係を示す。なお、図中の記号(○, △, □, ◇)により、図 5-10 と図 5-11 のステップを対応させている。このドームでは部材 c(図 5-9(a))が  $\delta_m$  の最大部材である。ドームの変形に伴って、部材 a の軸力と曲げモーメントが大きくなり、部材 a の降伏後にドームが耐力に至っている。

図 5-10(b), 図 5-11(b)は CASE-4,  $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $\lambda_0=60$  のドームの場合の結果である。このドームの場合も CASE-2 のドームと同様に、部材 c(図 5-9(b))が  $\delta_m$  の最大部材となるが、部材 a の降伏後にドームの耐力に至っている。ローラー支持である CASE-4 は、ピン支持の CASE-2 に比べ、境界条件の影響により、同じ荷重に対して鉛直変位が大きくなっている。また、部材 a での軸力に対する曲げモーメント割合も CASE-4 の場合が大きくなるのがわかる。

### 5.4.2.部材の座屈応力度

図 5-12 は正規化細長比  $\Lambda$  と部材  $m$  (線形座屈軸力に対する降伏軸力の比が最大の部材であり、CASE-2 と CASE-4 では図 5-9 の部材 c および a がこれに相当する) の座屈軸力  $N_{cr}$  の関係を示す。また、表 5-6 は、特定部材番号、正規化細長比、弾塑性座屈軸力を示す。なお、図中の記号、○, □, △は形状初期不整がない場合、●, ■, ▲は形状初期不整がある場合を表す。ここで、 $N_{cr}$  は次式で定義される値であり、線形性を仮定してドームの座屈荷重を部材の軸力に反映された擬似的な量である。

$$N_{cr} = \frac{P_{cr}^d}{P_0} \cdot N_{om} \quad (5-40)$$

ここで、 $N_{om}$  は基準荷重  $P_0$  に対する線形弾性解析で得られる部材  $m$  の軸力である。

図 5-12(a), (b)は周辺ピン支持である CASE-1 と CASE-2 の結果である。これらと比較すると、有効座屈長さの仮定方法が異なるものの、部材  $m$  に対する座屈応力度の分布状況はほとんど同じになる。座屈応力度の下界は、形状初期不整を有するドームでも、低減係数  $\alpha_0=0.55$  を用いた式(5-39)で把握できる。

図 5-12(c), (d)は周辺ローラー支持である CASE-3 と CASE-4 の結果である。この 2 つのケースは、式(5-35), (5-39)において、有効座屈長さおよび座屈強度を仮定する時点で、係数  $c$ ,  $\alpha_0$  とともに異なった値を採用したにもかかわらず、ほぼ同様な座屈応力度の分布状況が得られている。これら両者の座屈応力度の下界は、式(5-39)で低減係数  $\alpha_0=0.43$  を使用すれば、ほぼ把握しうる。

これらの結果から、周辺ピン支持では  $\alpha_0=0.55$ 、周辺ローラー支持で  $\alpha_0=0.43$  とする式(5-39)の座屈応力度曲線でほぼ下界が把握しうるということが理解できる。

### 5.4.3.推定座屈荷重と弾塑性座屈荷重の比較

次に、次式

$$P_{cr}^d = \frac{P_0}{N_{om}} N_{cr} \quad (5-41)$$

で推定される座屈荷重  $P_{cr}^d$  と先の弾塑性座屈解析から求めた座屈荷重  $P_{cr}^d$  を比較する。ここで、 $N_{cr}$  は、式(5-39)において、周辺ピン支持では  $\alpha_0=0.55$ 、周辺ローラー支持で  $\alpha_0=0.43$  として求めた値を用いている。

図 5-13(a), (b)はそれぞれ CASE-1, CASE-2 の結果である。CASE-1 と CASE-2 では、多少部材構成が異なっているが、部材  $m$  の座屈強度の推定にあたり、式(5-39)において、 $\alpha_0=0.55$  を用いれば、ほぼ弾塑性座屈荷重の下界が求められる。

図 5-13(c), (d)はそれぞれ CASE-3, CASE-4 の結果である。部材  $m$  の座屈強度の推定にあたり、CASE-3 では  $\alpha_0=0.55$  を、CASE-4 では  $\alpha_0=0.43$  を使用している。両者の比較から、先の図 5-12 の結果でも示されるように、ローラー支持では、式(5-39)において、 $\alpha_0=0.43$  を用いれば、ほぼ座屈荷重の下界が推定できる。

したがって、ドームの座屈荷重を式(5-39)と式(5-41)から推定するにあたり、部材  $m$

の座屈強度を、ピン支持では $\alpha_0=0.55$ 、ローラー支持では $\alpha_0=0.43$ とすれば、ほぼ下界が得られる。

#### 5.4.4. 断面算定荷重と弾塑性座屈荷重の比較

先に管厚を仮定するに際して、周辺ピン支持、周辺ローラー支持ともに2種類の方法を、表5-3に示すように仮定した。これらの仮定に応じて算定された管厚の部材で構成されるドームの弾塑性座屈荷重が $P_{cr}^p$ として得られる。この $P_{cr}^p$ の値が、式(5-22)で始めに設定した断面算定用荷重 $P_d$ にかなり近い値、あるいは、 $P_d$ よりも多少高い値であれば、管厚の算定法は予備設計等で有効に利用できる。

表5-3で示す係数を用いた断面算定法で得られる管厚で構成されるドームの弾塑性座屈荷重 $P_{cr}^p$ と断面算定用荷重 $P_d$ を比較した結果を図5-14に示す。周辺ピン支持では、図5-14(a)、(b)から理解できるように、CASE-2の仮定方法が妥当な結果を与える。一方、周辺ローラー支持では、図5-14(c)、(d)に示されるように、CASE-4の仮定方法がより妥当と判断できる。

ここで仮定した初期不整に限られるが、周辺ピン支持の場合に表5-3のCASE-2( $\alpha_0=0.55, c=0.5$ )を用いた場合には、 $P_d$ のほぼ90%、周辺ローラー支持の場合にCASE-4( $\alpha_0=0.43, c=0.5$ )を用いた場合には、 $P_d$ のほぼ80%程度の座屈荷重が得られることになる。

ここで示した断面の仮定方法は、予備設計等の段階での断面算定に有効に利用できるであろう。これにより、第1次近似の断面を求め、さらに精度のある弾塑性座屈解析でドームの座屈荷重を求めて、断面の修正を施せば、より洗練された断面を決定しうると考えられる。

当然のことながら、本章で得られた結果は、仮定する形状初期不整により多少とも異なったものとなりうる。したがって、より実用的な断面の略算法を提案するには、初期不整や荷重分布など多くの要因を考慮した検討が必要である。

#### 5.5. まとめ

本章では、円形平面状の剛接合単層ラチスドームについて、(1)等分布鉛直荷重を受ける場合に限定し、(2)有効座屈長さおよび座屈応力度曲線を利用して、ドーム内の各部材の断面を略算的に仮定する方法を示した。そして、(3)このようにして得られた部材で構成されるドームに対して、線形座屈解析および弾塑性座屈解析を実施し、(4)得られた部材の座屈応力度曲線を既往の研究で示された部材の座屈応力度曲線と比較し、断面略算用の部材座屈応力度曲線を得た。また、略算的方法で得られた断面で構成されるドームの座屈荷重が、ほぼ所定の座屈荷重を与えることから、(5)本章で示した断面算定の略算的方法の有用性を示した。

ただし、これらの結果は限られた条件の検討であるため、今後、単層ラチスドームの設計に対して、ここで示した断面算定法を利用するためには、さらに多くの条件に対する検討を進める必要がある。

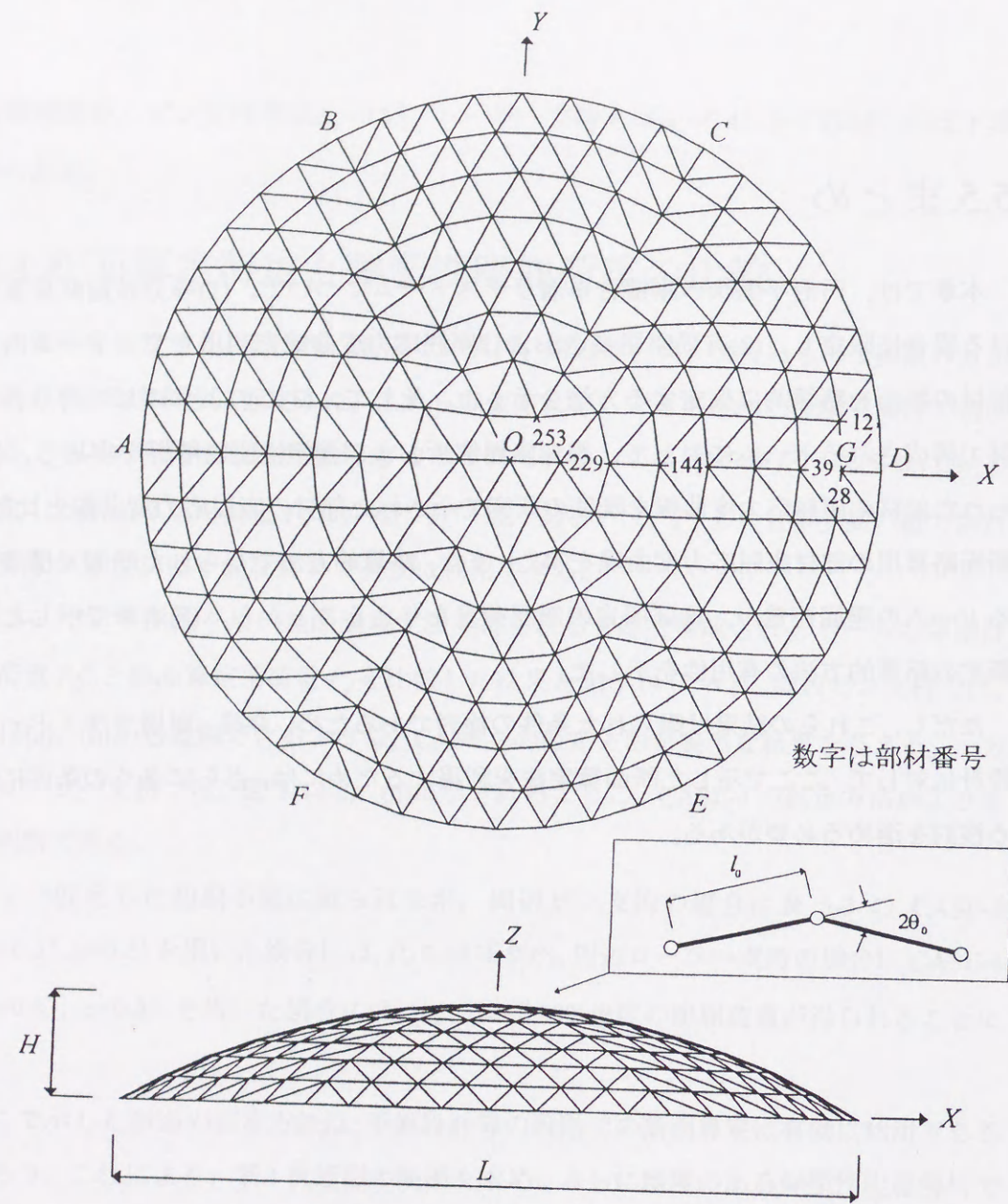


図 5-1 単層ラチスドームの形状

表 5-1 単層ラチスドームの形状諸元

$\theta_0$	$L(m)$	$H(m)$	$R(m)$
1.5	155.4	16.5	191.0
2.0	151.8	21.8	143.3
2.5	147.4	26.8	114.6

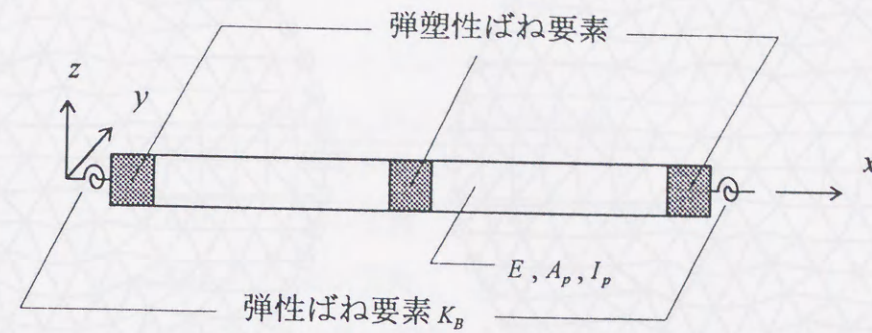


図 5-2 部材モデル

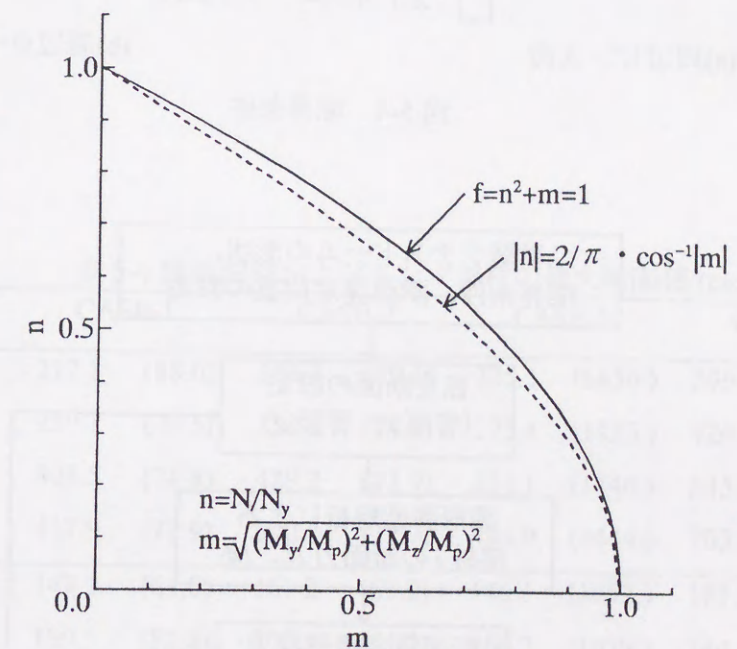


図 5-3 弾塑性ばねの降伏曲面

表 5-2 部材細長比  $\lambda_0$  と管径  $d$

$\lambda_0$	30	60	90	120
$d(cm)$	94.28	47.14	31.43	23.57

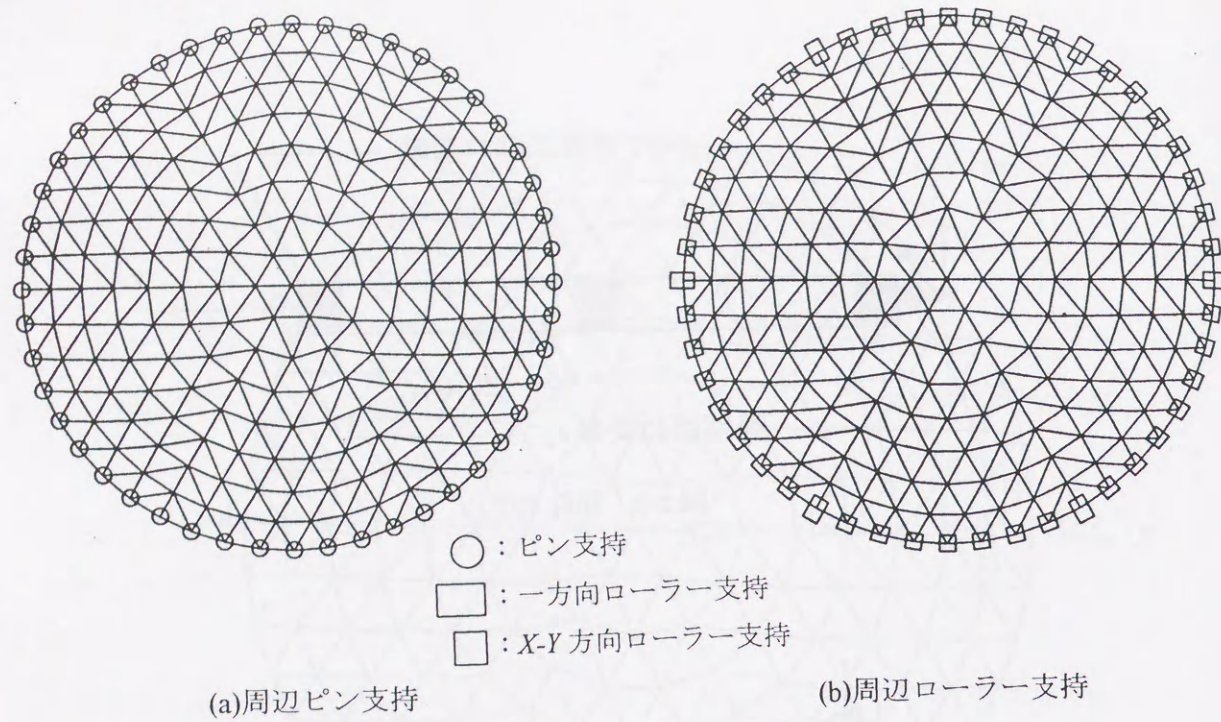


図 5-4 境界条件

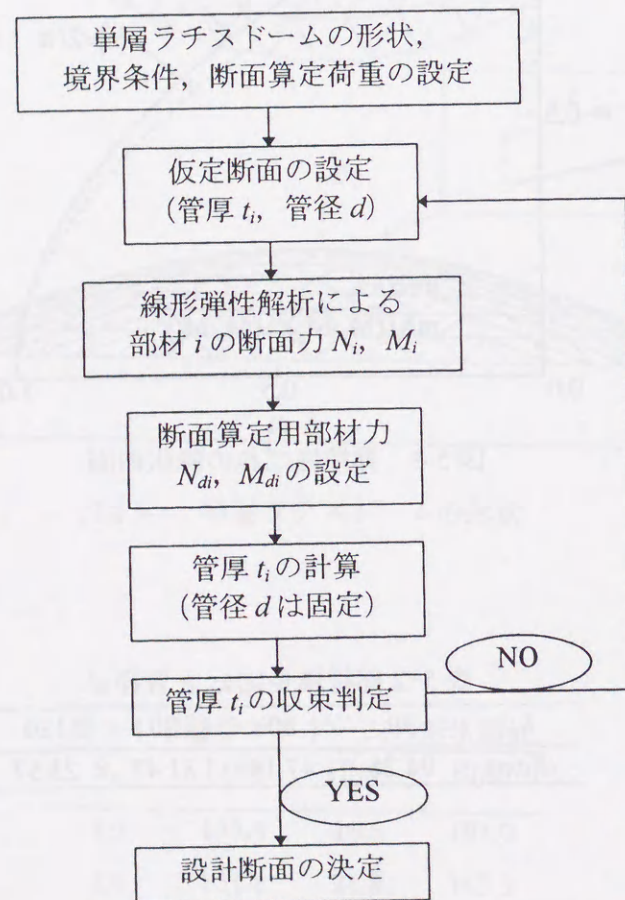


図 5-5 断面決定の流れ

表 5-3  $\alpha_0$  および  $c$  の設定値

CASE	境界条件	$\alpha_0$	$c$
CASE-1	ピン支持	0.55	0.4
CASE-2	ピン支持	0.55	0.5
CASE-3	ローラー支持	0.55	0.4
CASE-4	ローラー支持	0.43	0.5

表 5-4 稜線部材およびリング部材の最大断面積 ( $cm^2$ )

$\theta_0$	$\lambda_0$	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
1.5	30	212.8 (88.0)	256.2 (89.5)	225.5 (1450.)	299.9 (1427.)
	60	250.1 (73.5)	328.5 (74.5)	273.4 (1435.)	424.5 (1422.)
	90	305.5 (71.8)	429.2 (73.9)	321.1 (1440.)	545.3 (1441.)
	120	417.9 (72.9)	540.8 (72.7)	434.9 (1444.)	703.5 (1447.)
2.0	30	143.1 (64.0)	161.2 (63.2)	146.1 (1052.)	185.3 (1040.)
	60	159.5 (52.8)	200.4 (54.3)	166.7 (1039.)	244.4 (1032.)
	90	206.5 (52.1)	254.3 (52.6)	214.9 (1037.)	324.9 (1040.)
	120	311.4 (50.9)	314.7 (51.0)	329.7 (1039.)	419.6 (1041.)
2.5	30	106.6 (48.5)	115.7 (47.4)	106.2 (804.3)	128.0 (797.1)
	60	115.7 (41.9)	140.0 (40.7)	118.7 (784.9)	166.6 (781.3)
	90	164.2 (39.2)	172.8 (39.3)	174.6 (783.7)	224.9 (784.8)
	120	249.1 (38.7)	307.7 (38.7)	268.1 (784.5)	342.3 (785.5)

括弧なしは稜線部材, 括弧ありはリング部材の最大断面積を示す。

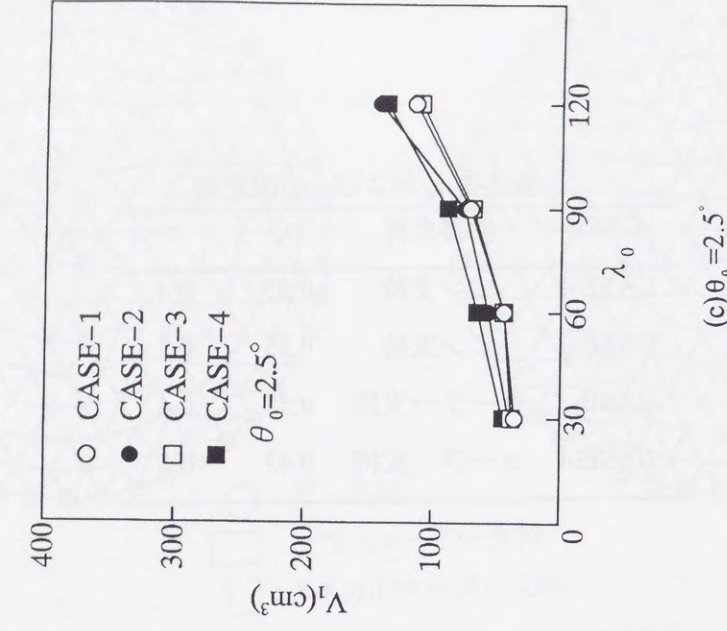
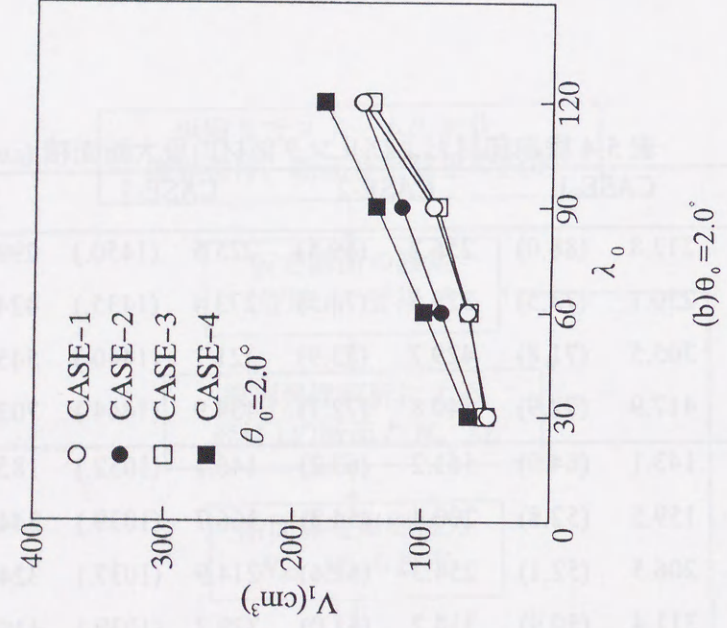
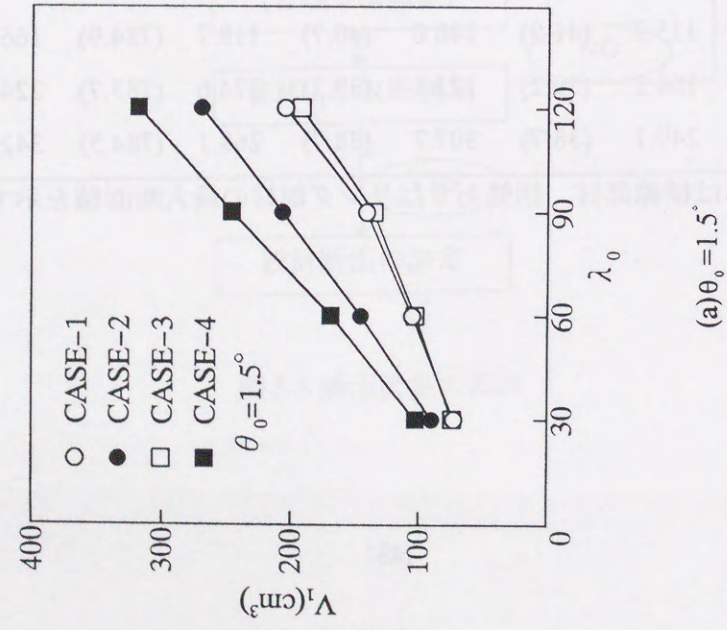


図 5-6 構成部材の体積 (周辺リング部材を除いた部材の合計)

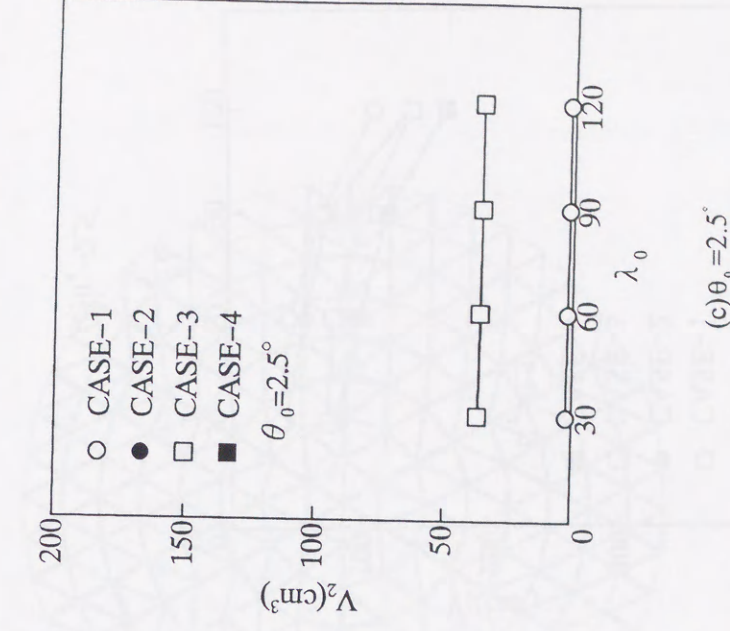
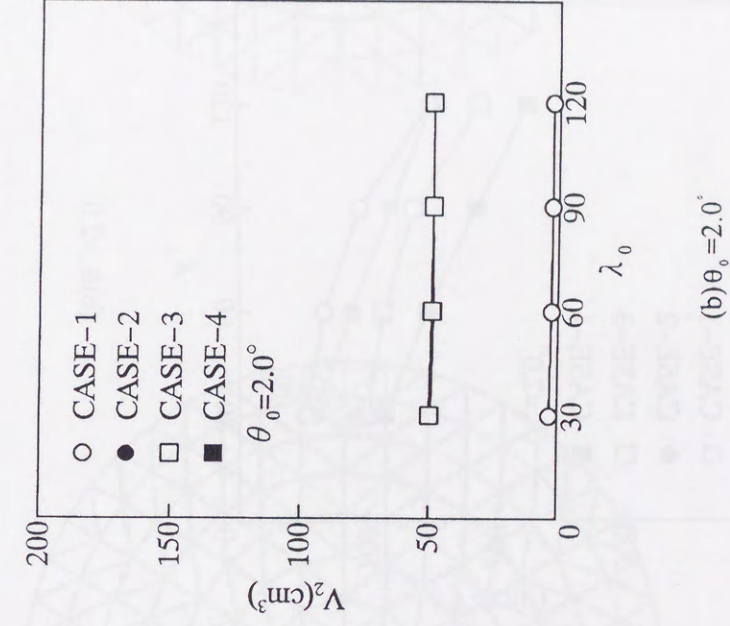
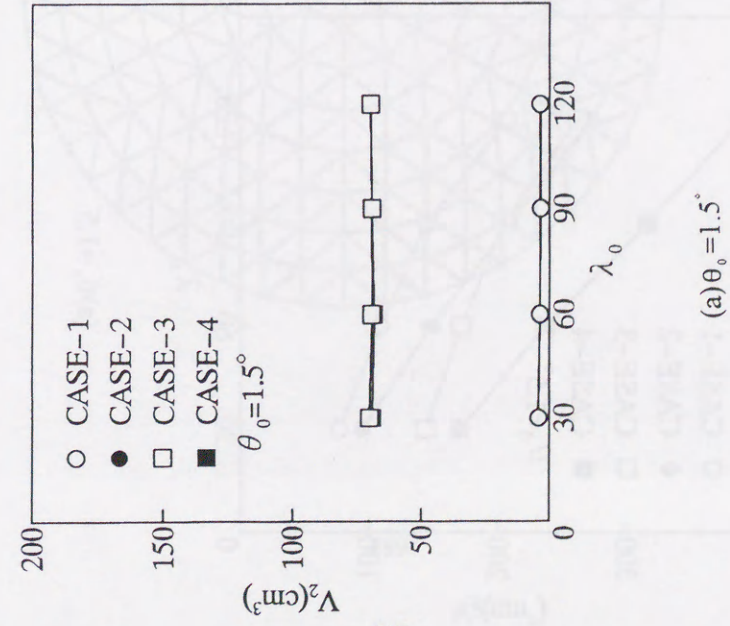


図 5-7 構成部材の体積 (周辺リング部材の合計)

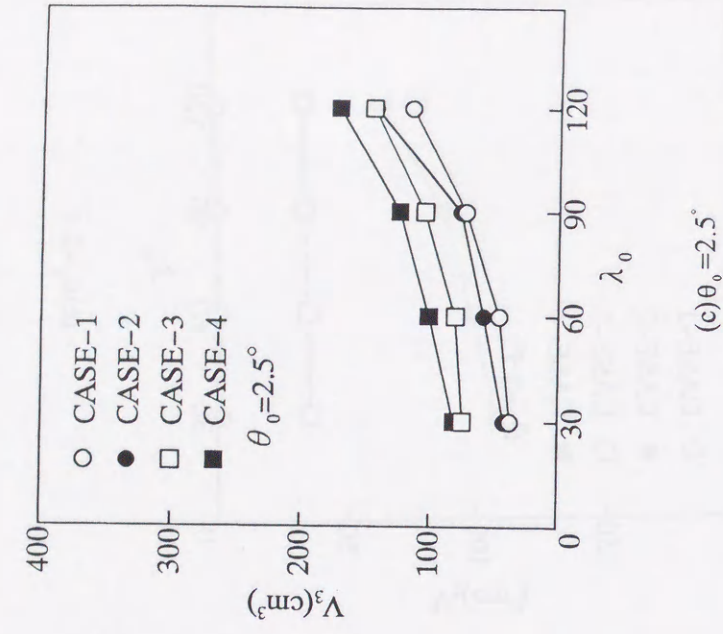
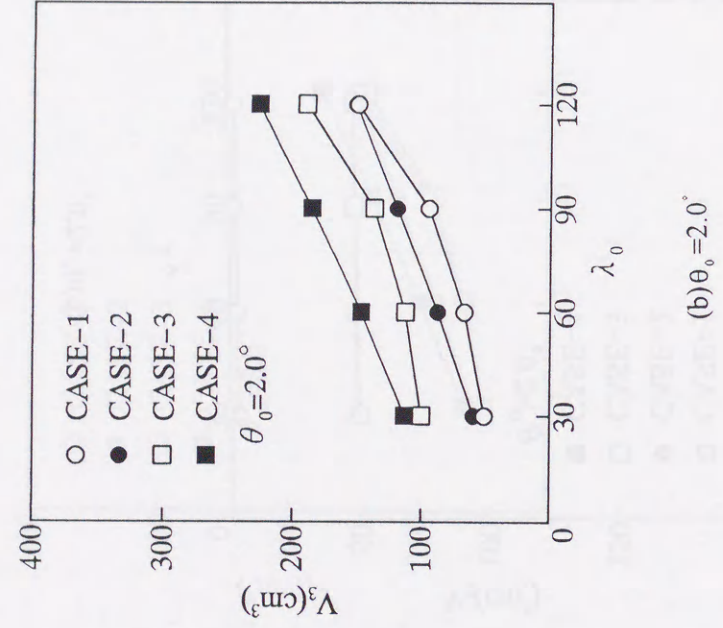
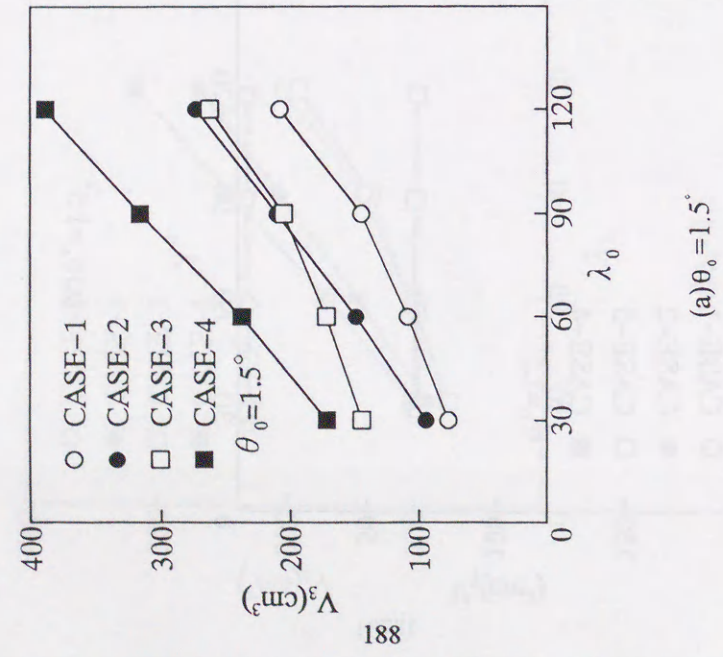
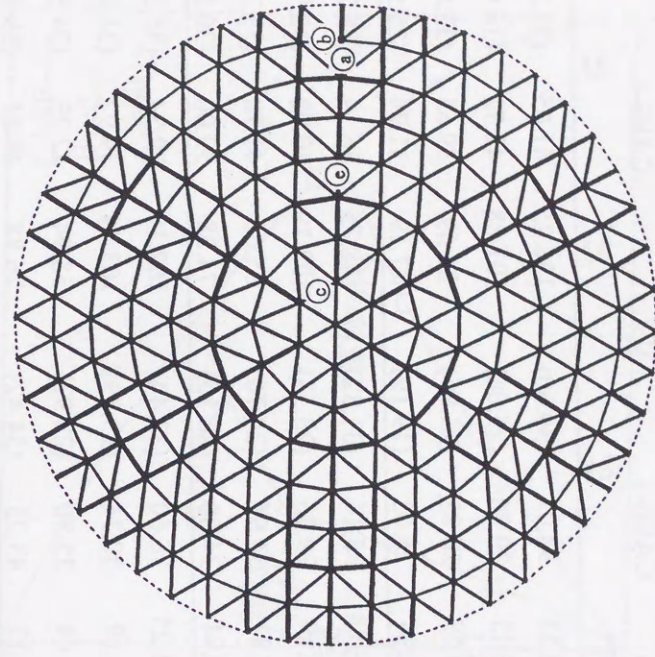
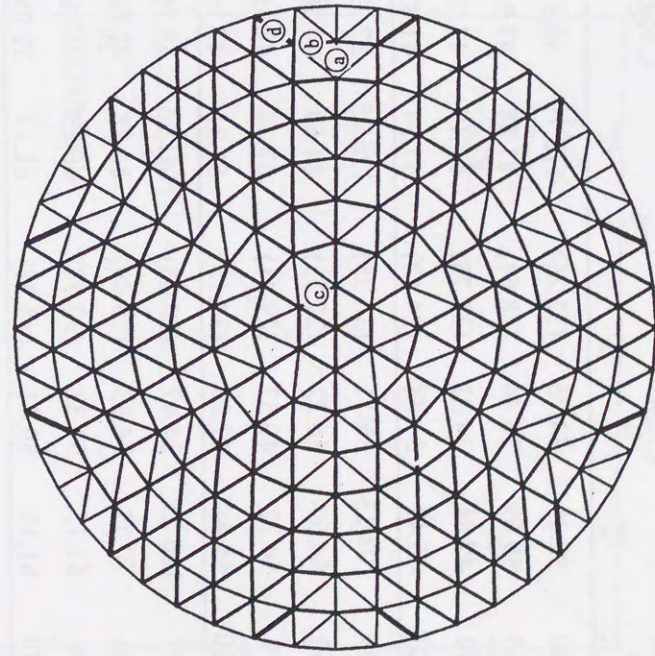


図 5-8 構成部材の体積 (全部材の合計)



(a) CASE-2,  $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $\lambda_0 = 60$

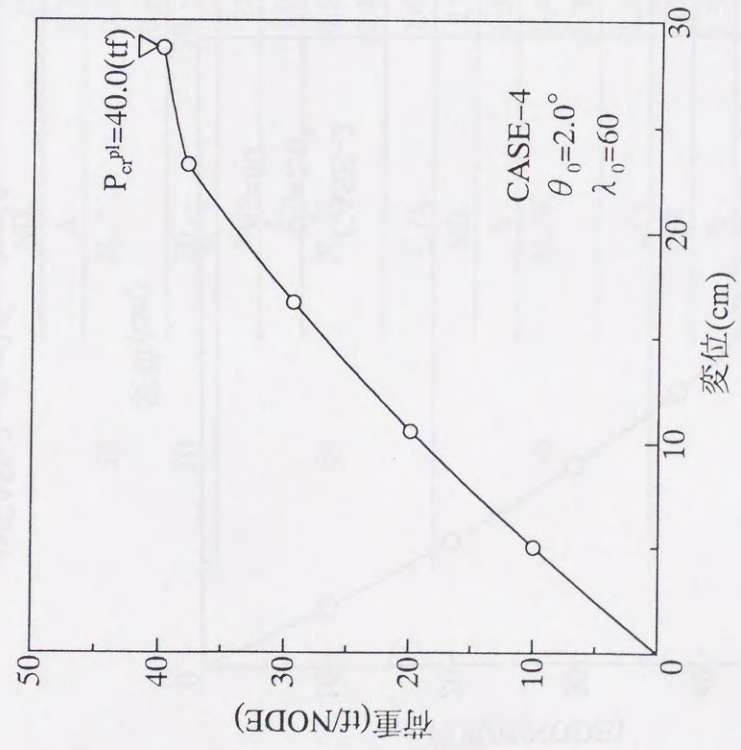
(b) CASE-4,  $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $\lambda_0 = 60$

図 5-9 断面積の分布例

表 5-5 ドームの座屈荷重(tf/node)

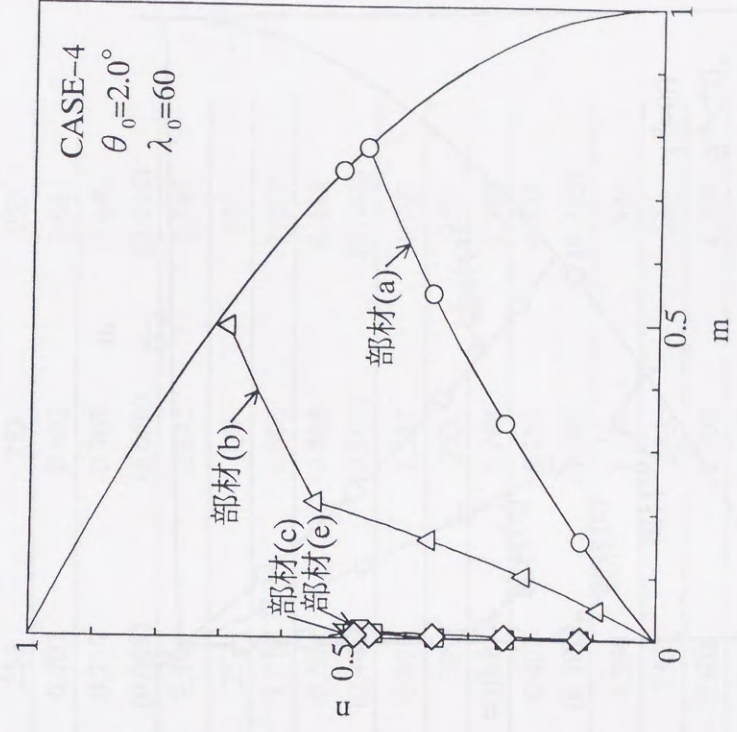
$\theta_0$	$\lambda_0$	CASE-1		CASE-2		CASE-3		CASE-4	
		$P_{cr}^{lm}$	$P_{cr}^{pl}$	$P_{cr}^{lm}$	$P_{cr}^{pl}$	$P_{cr}^{lm}$	$P_{cr}^{pl}$	$P_{cr}^{lm}$	$P_{cr}^{pl}$
1.5	30	92.19	34.75 (32.26)	112.19	40.37 (37.55)	98.13	33.07 (30.60)	136.25	41.05 (38.23)
	60	59.69	36.44 (28.61)	81.88	47.91 (37.86)	63.13	29.70 (25.06)	101.88	42.72 (36.94)
	90	47.81	34.23 (25.73)	67.19	47.02 (35.15)	49.69	26.87 (21.95)	84.69	39.65 (33.82)
	120	45.47	33.38 (24.18)	57.34	41.83 (29.90)	50.94	25.03 (19.19)	77.19	31.74 (25.57)
2.0	30	108.13	34.11 (30.75)	126.25	37.33 (33.82)	116.88	35.16 (31.32)	148.75	36.19 (36.20)
	60	64.69	36.22 (27.35)	84.69	44.50 (33.98)	67.19	29.36 (23.53)	102.19	40.02 (32.74)
	90	54.22	40.37 (29.41)	67.34	49.16 (35.77)	57.81	31.95 (24.76)	85.63	41.78 (33.26)
	120	55.94	47.28 (34.15)	56.21	47.16 (34.54)	60.94	34.00 (26.15)	74.38	39.00 (30.20)
2.5	30	126.25	34.47 (30.03)	141.25	35.76 (31.67)	141.25	36.60 (32.44)	162.19	39.34 (35.36)
	60	70.63	34.83 (26.89)	86.88	43.89 (33.39)	72.19	30.31 (23.89)	103.44	39.97 (31.94)
	90	63.13	51.32 (37.78)	66.23	53.80 (39.76)	68.44	35.80 (28.92)	58.94	42.23 (34.56)
	120	61.17	59.01 (48.22)	61.17	72.09 (59.02)	63.13	43.23 (34.42)	76.88	48.81 (39.81)

$P_{cr}^{lm}$  は線形座屈荷重,  $P_{cr}^{pl}$  は弾塑性座屈荷重, ( )内は形状初期不整がある場合



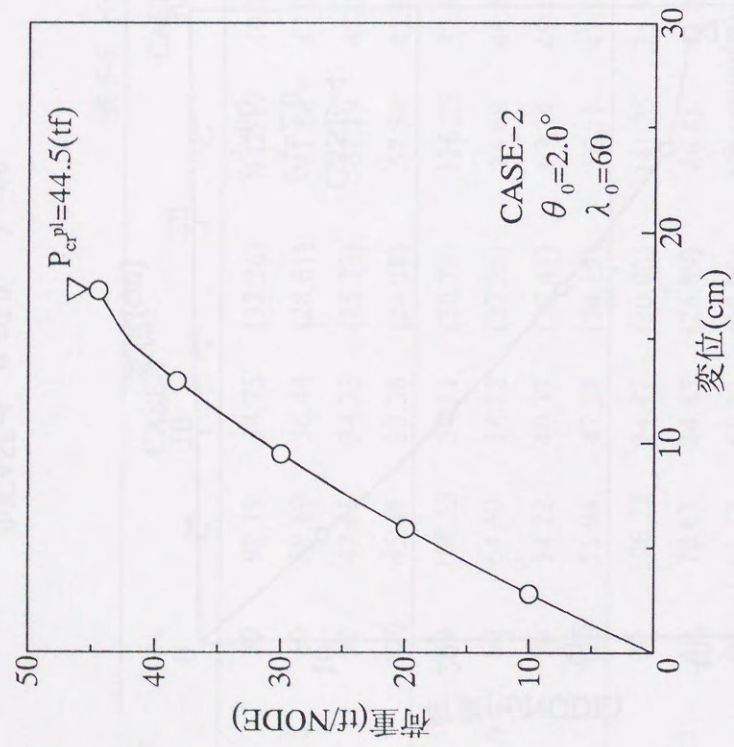
(b)CASE-4,  $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $\lambda_0=60$

図 5-10 荷重と変位の関係 (節点 G)



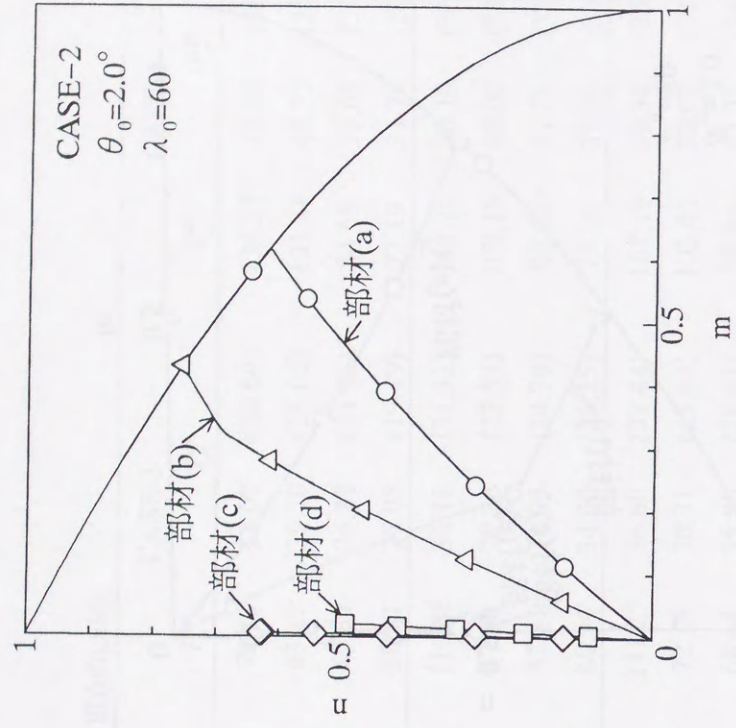
(b)CASE-4,  $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $\lambda_0=60$

図 5-11 モーメントと軸力の関係



(a)CASE-2,  $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $\lambda_0 = 60$

図 5-10 荷重と変位の関係 (節点 G)



(a)CASE-2,  $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $\lambda_0 = 60$

図 5-11 モーメントと軸力の関係

表 5-6(a) 特定部材番号, 正規化細長比 $\Lambda$ , 弾塑性座屈軸力 $N_{cr}/N_y$ , 有効座屈長さ比 $l_{eq}/l_0$   
 $[\theta_0 = 1.5^\circ, n = 16, l_0 = 10m, \text{等分布荷重}]$

$\lambda_0$	CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
	NO. 253	253	253	253
	$\Lambda$ 0.716	0.707	0.692	0.681
30	$N_{cr}/N_y$ 0.735 (0.682)	0.719 (0.669)	0.703 (0.650)	0.649 (0.604)
	$l_{eq}/l_0$ 2.218	2.191	2.145	2.545
	NO. 253	253	229	253
	$\Lambda$ 1.036	1.018	1.006	1.001
60	$N_{cr}/N_y$ 0.569 (0.447)	0.564 (0.446)	0.465 (0.393)	0.418 (0.362)
	$l_{eq}/l_0$ 1.604	1.577	1.557	1.797
	NO. 253	39	253	253
	$\Lambda$ 1.314	1.317	1.288	1.304
90	$N_{cr}/N_y$ 0.415 (0.312)	0.403 (0.302)	0.326 (0.266)	0.275 (0.235)
	$l_{eq}/l_0$ 1.357	1.360	1.330	1.521
	NO. 253	253	253	253
	$\Lambda$ 1.593	1.616	1.505	1.559
120	$N_{cr}/N_y$ 0.289 (0.210)	0.279 (0.200)	0.217 (0.166)	0.169 (0.136)
	$l_{eq}/l_0$ 1.233	1.251	1.165	0.588

( ) 内は形状初期不整  $w_i = 0.2t_i$  のドームの場合  
 NO. は特定部材番号を表す。



表 5-6(b) 特定部材番号, 正規化細長比 $\Lambda$ , 弾塑性座屈軸力 $N_{cr}/N_y$ , 有効座屈長さ比 $l_{eq}/l_0$   
 [ $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $n=16$ ,  $l_0=10m$ , 等分布荷重]

$\lambda_0$		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
30	NO.	12	229	253	253
	$\Lambda$	0.633	0.628	0.611	0.608
	$N_{cr}/N_y$	0.786 (0.709)	0.749 (0.679)	0.806 (0.718)	0.659 (0.659)
	$l_{eq}/l_0$	1.962	1.946	1.893	1.883
	NO.	253	253	229	253
60	$\Lambda$	0.927	0.910	0.907	0.897
	$N_{cr}/N_y$	0.652 (0.492)	0.635 (0.485)	0.531 (0.425)	0.487 (0.398)
	$l_{eq}/l_0$	1.435	1.409	1.405	1.389
	NO.	253	253	253	253
	$\Lambda$	1.176	1.173	1.139	1.146
90	$N_{cr}/N_y$	0.538 (0.392)	0.531 (0.386)	0.426 (0.330)	0.371 (0.296)
	$l_{eq}/l_0$	1.214	1.211	1.176	1.183
	NO.	253	253	253	253
	$\Lambda$	1.436	1.440	1.375	1.392
	$N_{cr}/N_y$	0.410 (0.296)	0.405 (0.296)	0.295 (0.227)	0.270 (0.209)
120	$l_{eq}/l_0$	1.112	1.115	1.065	1.078

( ) 内は形状初期不整  $w_i=0.2t_e$  のドームの場合  
 NO.は特定部材番号を表す。

表 5-6(c) 特定部材番号, 正規化細長比 $\Lambda$ , 弾塑性座屈軸力 $N_{cr}/N_y$ , 有効座屈長さ比 $l_{eq}/l_0$   
 [ $\theta_0=2.5^\circ$ ,  $n=16$ ,  $l_0=10m$ , 等分布荷重]

$\lambda_0$		CASE-1	CASE-2	CASE-3	CASE-4
30	NO.	12	12	229	229
	$\Lambda$	0.571	0.571	0.543	0.555
	$N_{cr}/N_y$	0.837 (0.729)	0.776 (0.687)	0.879 (0.779)	0.788 (0.708)
	$l_{eq}/l_0$	1.770	1.770	1.682	1.719
	NO.	28	28	144	253
60	$\Lambda$	0.842	0.835	0.837	0.828
	$N_{cr}/N_y$	0.695 (0.536)	0.725 (0.552)	0.600 (0.473)	0.564 (0.450)
	$l_{eq}/l_0$	1.305	1.293	1.296	1.282
	NO.	28	28	28	28
	$\Lambda$	1.078	1.079	1.035	1.248
90	$N_{cr}/N_y$	0.700 (0.515)	0.698 (0.516)	0.488 (0.394)	0.460 (0.376)
	$l_{eq}/l_0$	1.113	1.114	1.069	1.289
	NO.	28	28	28	28
	$\Lambda$	1.354	1.354	1.333	1.341
	$N_{cr}/N_y$	0.526 (0.430)	0.643 (0.527)	0.386 (0.307)	0.353 (0.288)
120	$l_{eq}/l_0$	1.048	1.048	1.032	1.039

( ) 内は形状初期不整  $w_i=0.2t_e$  のドームの場合  
 NO.は特定部材番号を表す。

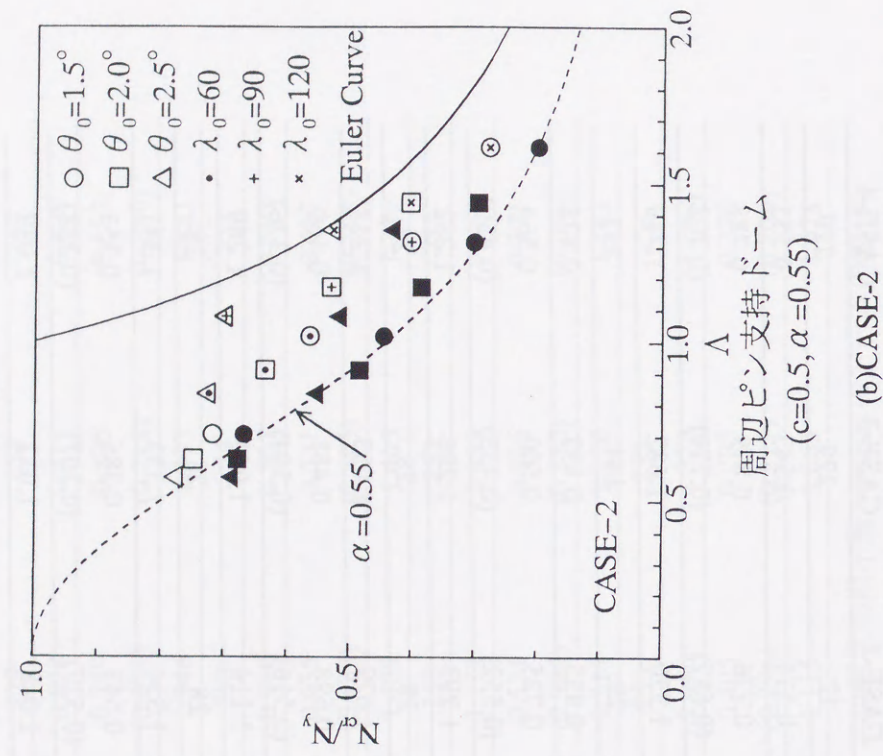
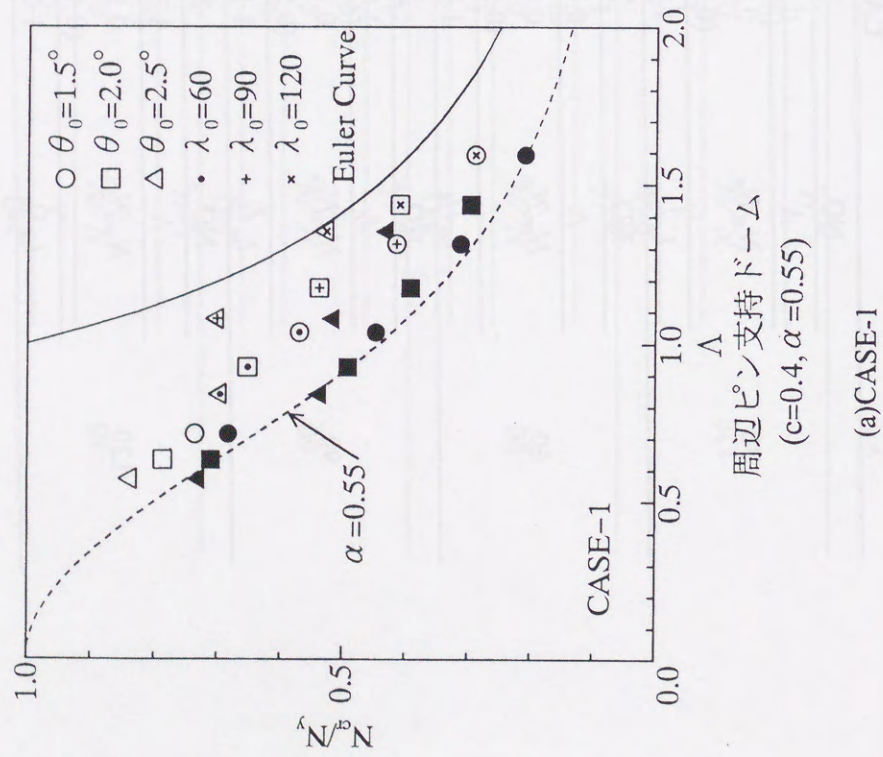


図 5-12  $N_x/N_y$  と  $\Lambda$  の関係

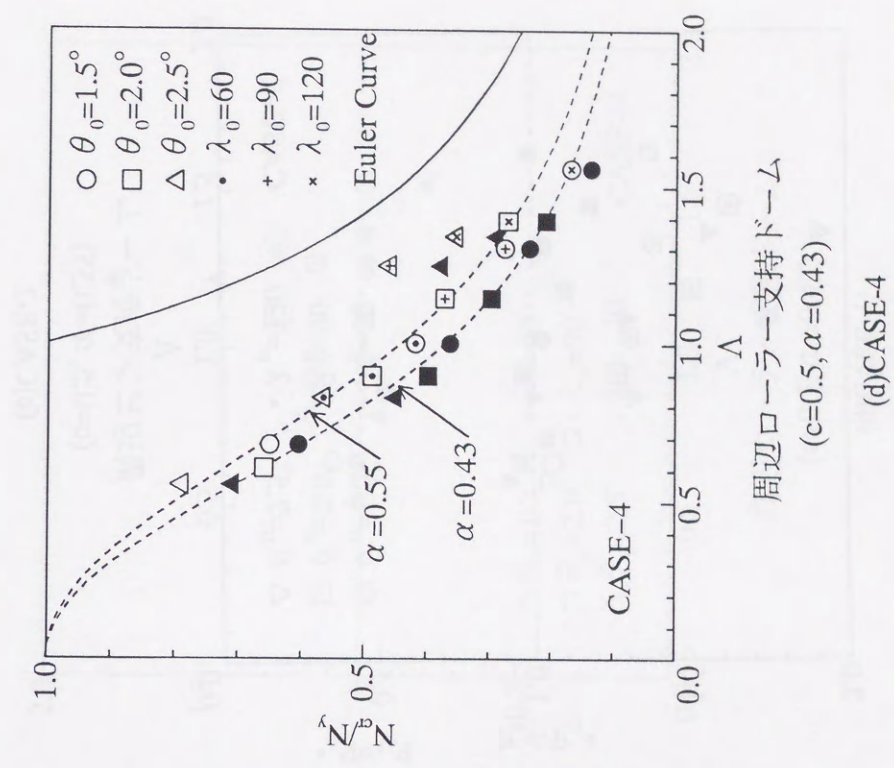
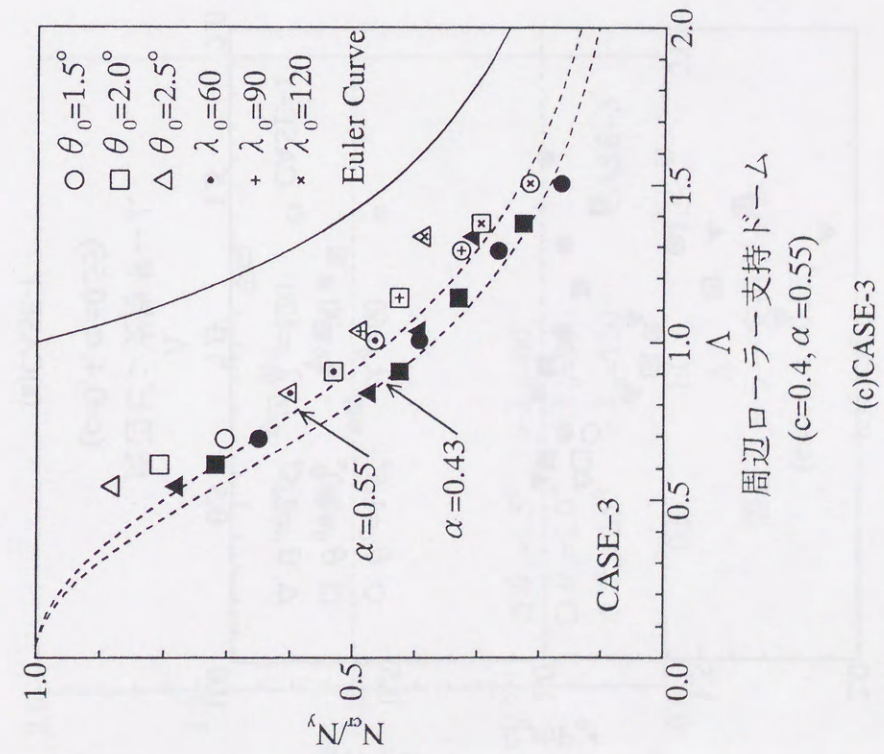


図 5-12  $N_x/N_y$  と  $\Lambda$  の関係

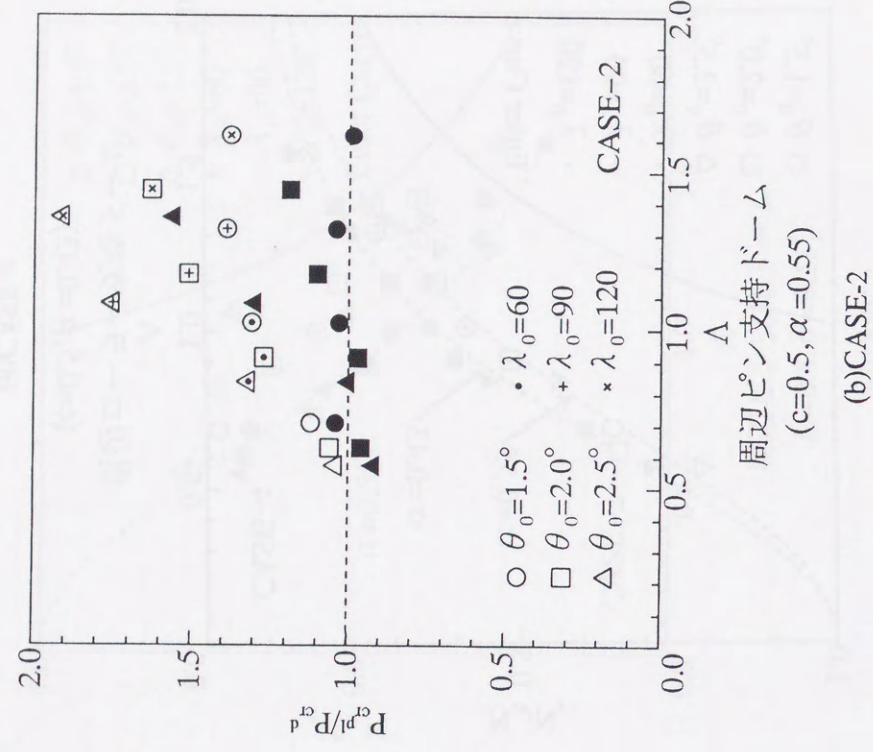
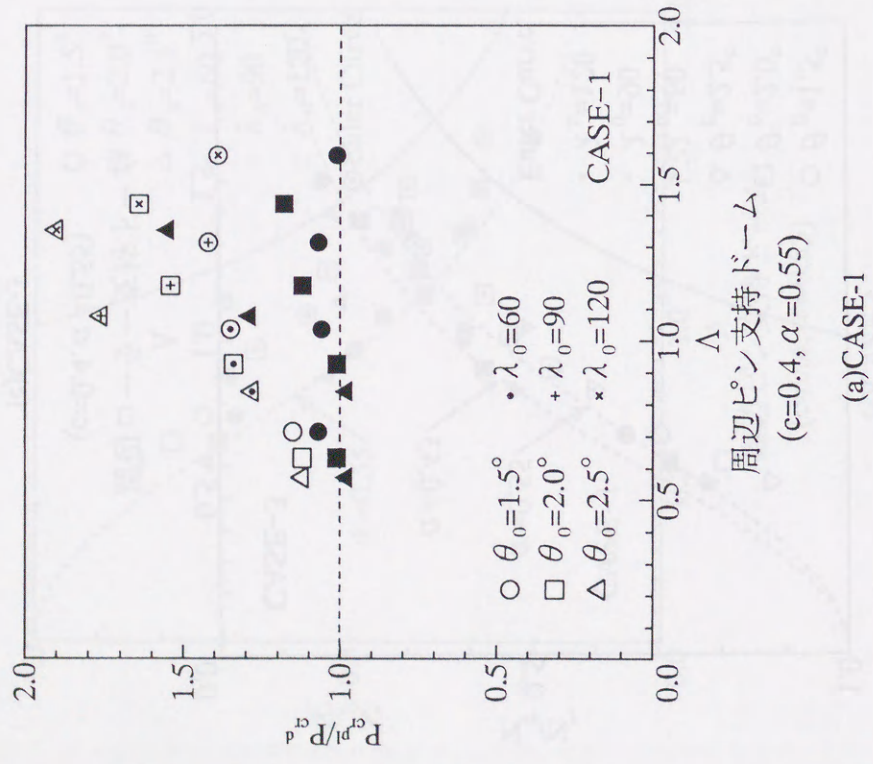


図 5-13  $P_\alpha^pl / P_\alpha^d$  と  $\Lambda$  の関係

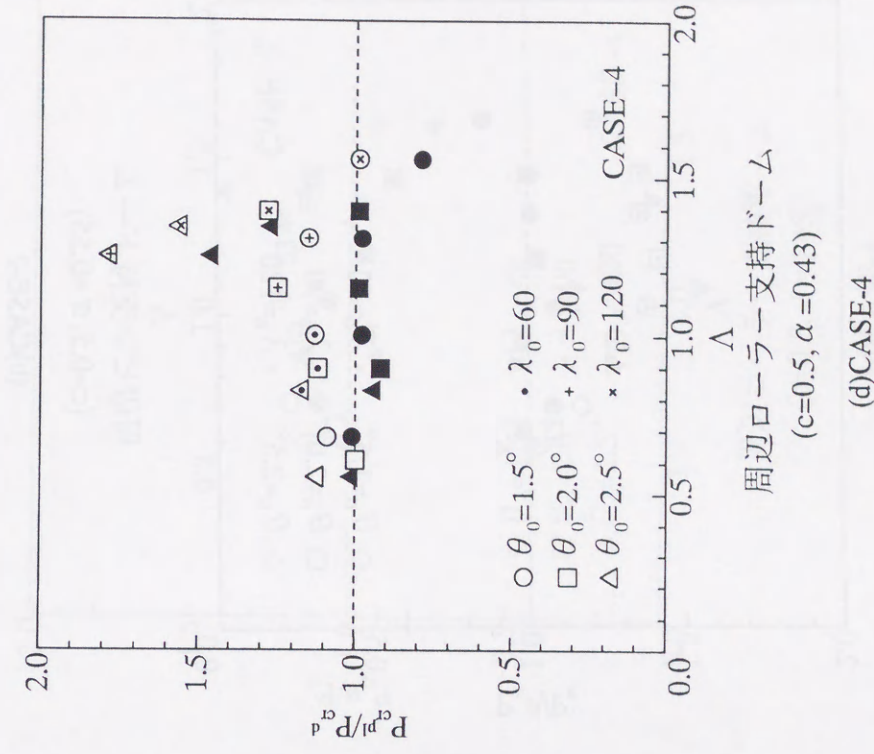
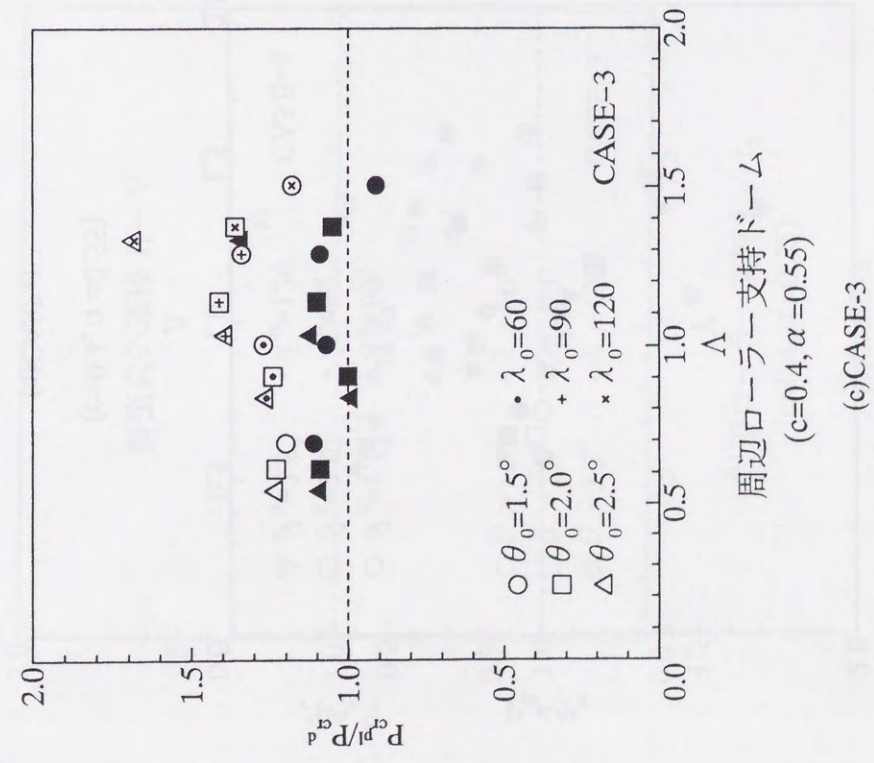


図 5-13  $P_\alpha^pl / P_\alpha^d$  と  $\Lambda$  の関係

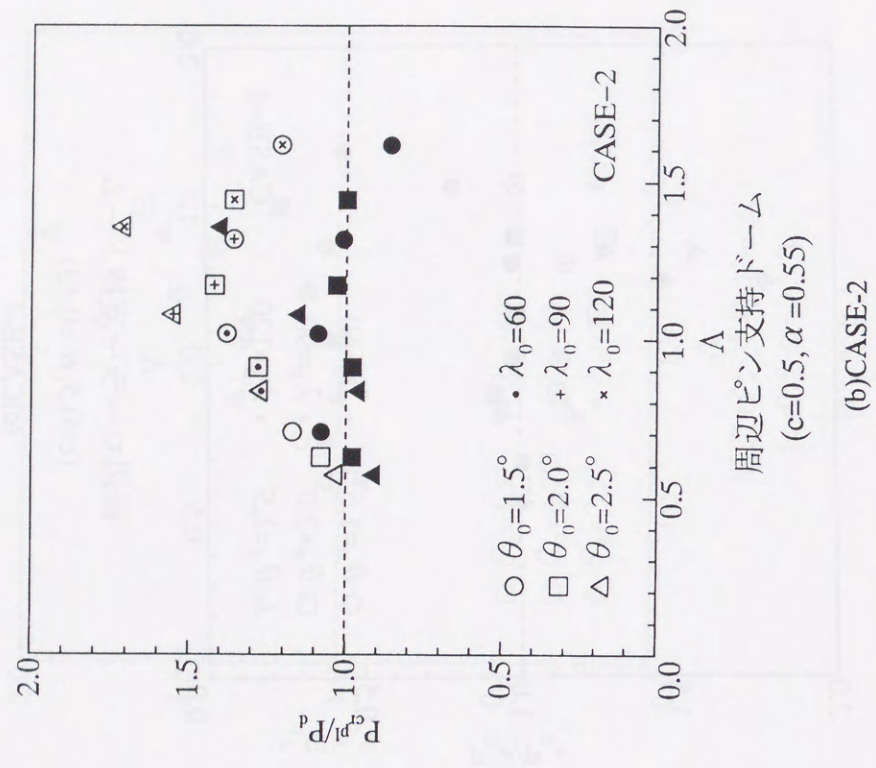
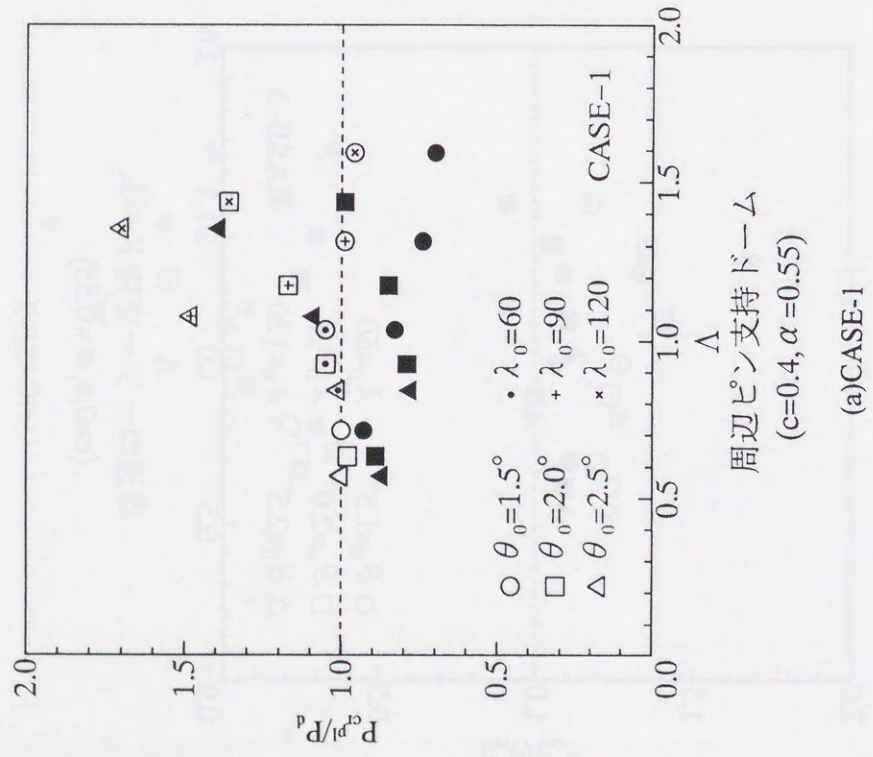


図 5-14  $P_{cp}^n / P_d$  と  $\Lambda$  の関係

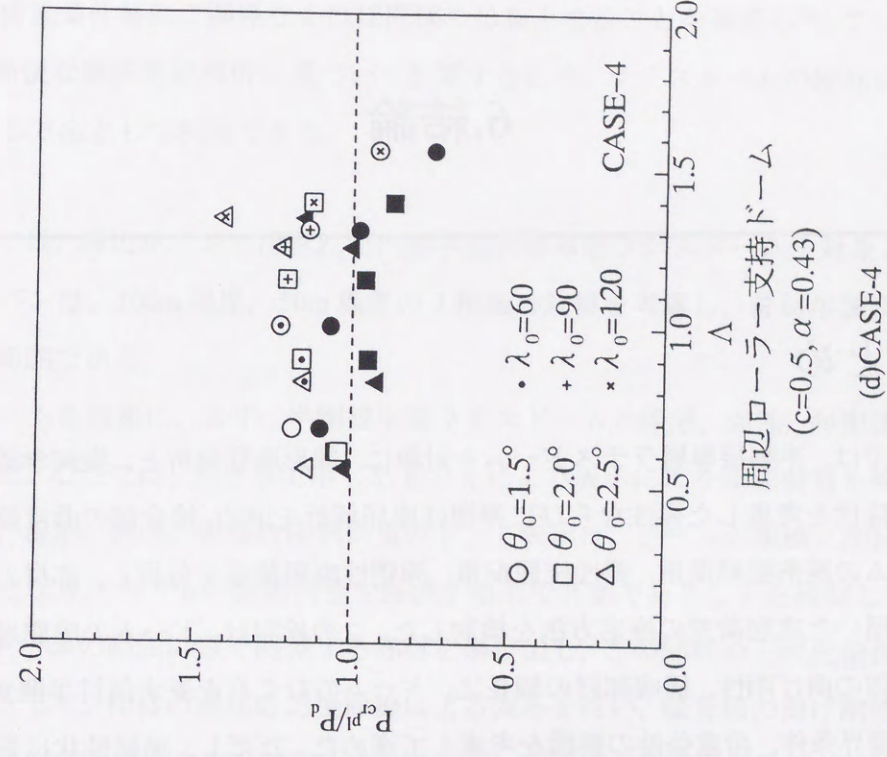
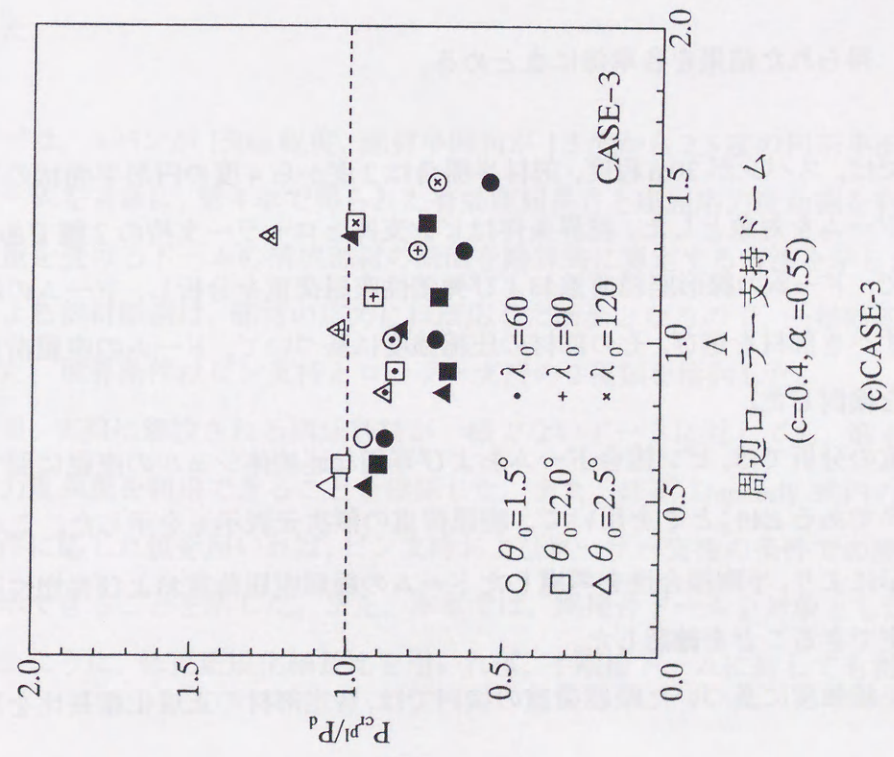


図 5-14  $P_{cp}^n / P_d$  と  $\Lambda$  の関係

## 6. 結論

### 6.1. まとめ

本研究では、半剛接单層ラチスドームを対象に、線形座屈解析と、幾何学的非線形性や部材の降伏を考慮した弾性ならびに弾塑性座屈解析を進め、接合部の曲げ剛性を考慮したドームの線形座屈荷重、弾性座屈荷重、弾塑性座屈荷重を分析し、部材の座屈応力度曲線を用いた座屈荷重の推定方法を検討した。この検討は、ドームの座屈挙動に影響する接合部の曲げ剛性、構成部材の細長比、ドームのむくりを表す部材半開角、形状初期不整、境界条件、荷重条件の要因を考慮して進めた。ただし、座屈性状に影響するであろう平面形状は、円形平面状に限定している。

また、得られたドームの有効座屈長さ $\lambda$ と座屈応力度曲線を利用して、ドームの構成断面を略算的に算定する方法を提案し、その有効性を議論した。

以下では、得られた結果を各章毎にまとめる。

第3章では、スパンが30m程度、部材半開角は2度から4度の円形平面状の半剛接单層ラチスドームを対象とした。境界条件はピン支持とローラー支持の2種である。この条件の下で、ドームの線形座屈荷重および弾塑性座屈荷重を分析し、ドームの座屈性状から注目すべき部材を選び、その部材の圧縮強度に基づいて、ドームの座屈荷重を推定する方法を検討した。

座屈荷重の分析では、ピン接合ドームおよび等価な連続体シェル $\sigma$ の座屈に関する基本パラメータである $E40^3$ と $\xi$ を用いて、座屈荷重の無次元表示 $\eta$ を示した。この $\xi$ と $\eta$ による表示により、半剛接合性を考慮したドームの線形座屈荷重および弾塑性座屈荷重をほぼ推定できることを確認した。

部材の圧縮強度に基づいた座屈荷重の検討では、特定部材の正規化細長比を用いるこ

とにより、ラチスドームの耐力を部材レベルの指標で整理でき、この部材の強度は、境界条件や荷重条件等には関係なくほぼ同様の分布となることを確認した。この正規化細長比は、簡便な線形座屈解析に基づいて計算するため、ラチスドームの座屈耐力を簡易に推定する方法として利用できる。

第4章では、周辺がピン支持された円形平面状の単層ラチスドームを対象とした。ドームのスパンは、200m程度、50m程度の2種類の規模を考慮し、部材半開角は1度から2度の範囲である。

このドームを対象に、まず、半剛接单層ラチスドームの線形、弾性、弾塑性座屈荷重を分析した。ここでは、第3章で示した $\xi$ と $\eta$ による表示により座屈荷重を検討した。その結果、線形、弾性、弾塑性座屈荷重の $\xi$ 、 $\eta$ 表示は、ドームの規模に関係なく、同様の分布となり、ドームの座屈荷重を評価する上で有効であることを確認した。

次に、ドームの座屈に深く関連する部材を選び出し、この部材の正規化細長比 $\Lambda$ をパラメータとして、部材の座屈応力度曲線による表示を行い、接合部の曲げ剛性の影響を考慮して部材の座屈応力度を検討した。ここで、座屈応力度曲線として、修正Dunkerly式を用いている。その結果、半剛接合ドームの場合、剛接合ドームを基準とする正規化細長比を、接合部の曲げ剛性に応じて修正して得られる正規化細長比 $\Lambda_{\text{mod}}$ を用いれば、剛接合ドームの座屈応力度曲線を利用して、半剛接合ドームの座屈荷重は推定できることを確認した。

第5章では、スパンが150m程度、部材半開角が1.5度から2.5度の円形平面状の単層ラチスドームを対象に、第4章で得られた有効座屈長さ $\lambda$ と座屈応力度曲線を利用して、等分布荷重を受けるドームの構成部材の断面を略算的に算定する方法を示した。この算定方法による部材断面は、部材の応力にほぼ応じた断面となるので、一様断面ではなくなる。また、境界条件はピン支持とローラー支持の2種類を検討した。

この結果、実際に建設される構成部材が一様でないドームに対しても、第4章で示した座屈応力度曲線を利用できることを確認した。また、修正Dunkerly式内の低減係数を境界条件に応じた値を用いれば、ピン支持およびローラー支持の条件での座屈応力度曲線が表示できることを示した。また、本章では、剛接合ドームを対象としたが、第4章で示したように、修正正規化細長比を用いれば、半剛接ドームに対しても得られた結

果を利用できる。

## 6.2.今後の課題と展望

本研究では、限られた条件下で検討を進めた。したがって、座屈応力度曲線を利用したドームの座屈荷重の推定やドームの部材断面の算定等を、実際に設計される単層ラチスドームに適用していくためには、各種の要因を考慮した検討を行い、それらのドームに対して、座屈応力度曲線を提示していく必要がある。例えば、

- ・平面形状の影響
- ・構成部材の網目形状の影響

などにより、ドームの座屈荷重がどのように変化し、どのような座屈応力度曲線が得られるか、調べる必要がある。また、静的な鉛直荷重だけでなく、

- ・風荷重
- ・地震荷重

などの動的な荷重に対するドームの座屈荷重を分析し、どのように座屈応力度曲線を利用すればよいか、などの検討も必要である。

これまで、単層ラチスドームに関して、多くの解析や実験による研究がなされ、単層ラチスドームの設計で有用となる基礎データは蓄積されつつある。今後、先に述べた要因を含めた各種の検討がさらに進められれば、単層ラチスドームの設計法を体系的に確立できると考える。

## 参考文献

- [1] 研究代表者 日置興一郎：スペースフレーム（立体格子構造）設計・解析・施工，昭和57年度文部省科学研究費補助金総合研究(B)研究報告書，1983.3
- [2] 日本建築学会シェル空間構造運営委員会スペースフレーム小委員会：単層ラチスドームの安定解析 -その現状と問題点-，1989.8
- [3] Wright, D.T. : Membrane Forces and Buckling in Reticulated Shells, ASCE ST1, pp.173-201, Feb., 1965
- [4] Yamada, M., Uchiyama, K., Yamada, S. and Ishokawa, T. : Theoretical and Experimental Study on the Buckling of Rigidly Jointed Single Layer Latticed Spherical Shells under External Pressure, Shells, Membranes and Space Frames, Proc. of IASS Symposium on Membranes Structures and Space Frames, Osaka, Vol.3, pp.113-120, 1986.9
- [5] 加藤史郎，高島英幸：六角形平面の剛接単層ラチスドームの弾塑性座屈解析 -形状初期不整が存在しない完全形状ドームについて-，日本建築学会構造系論文報告集，No.408，pp.77-87，1990.2
- [6] 高島英幸，加藤史郎：形状・荷重不整を有する剛接合単層ラチスドームの弾塑性座屈解析，日本建築学会構造系論文報告集，No.428，pp.89-95，1991.10
- [7] Hwan-Mok Jung, Young-Hwan Kwon and Motohiko Yamada : Buckling Characteristics of Rigidly-Jointed Single-Layer Latticed Domes with Square Network - The estimation of rigidity of covering materials and the effect of initial imperfection -, SEIKEN-IASS SYMPOSIUM ON NONLINEAR ANALYSIS AND DESIGN FOR SHELL AND SPATIAL STRUCTURES, pp.67-174, 1993.10
- [8] 鈴木敏郎，小河利行，田中美知，五十嵐規矩夫：ランダムな形状初期不整を有する剛接合単層ラチスドームの弾性座屈荷重，日本建築学会構造系論文報告集，No.418，pp.109-116，1990.12
- [9] Lind, N.C. : Local Instability Analysis of Triangulated Dome Framework, The Structural Engineering, pp.317-324, Aug., 1969
- [10] 加藤史郎，石川浩一郎：ピン接合単層ラチスドームの弾性座屈性状の分析と座屈荷重の推定 -六角形平面上の偏平球殻上のドームが周辺でローラー支持されている場合についての検討-，日本建築学会構造系論文報告集，No.393，pp.118-127，1988.10
- [11] 加藤史郎，石川浩一郎：ピン接合単層ラチスドームの弾塑性座屈荷重について，日本建築学会構造系論文報告集，No.404，pp.105-114，1989.10

- [12] Forman, S.E. and Hutchinson, J.W. : Buckling of Reticulated Shell Structures, Int. Journal Solids Structures, Vol.6, pp909-932, 1970.
- [13] 坂壽二, 日置興一郎: ねじ込み接合で組み立てた立体トラスの座屈挙動, 日本建築学会論文報告集, No.331, pp.1-9, 1983.9
- [14] 植木隆司, 向山洋一, 加藤史郎: 両端に回転ばねのある部材で構成される単層ラチスドームの線形および弾性座屈荷重 - 矩形平面形状をした裁断球殻状ドームについて-, 日本建築学会構造系論文報告集, No.411, pp.117-129, 1990.5
- [15] 植木隆司, 加藤史郎, 向山洋一, 松栄泰男: 両端に回転ばねのある部材で構成される単層ラチスドームの弾塑性座屈荷重 - 矩形平面形状をした裁断球殻状のドームについて-, 日本建築学会構造系論文報告集, No.448, pp.47-58, 1993.6
- [16] 山田大彦, 山本博志, 王麗: 単層ラチスドームの変形・応力並びに座屈特性に対する接合部剛性と荷重条件の影響に関する研究 その 1. 変形・応力伝達特性について, その 2. 座屈耐力について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.1427-1430, 1988.10
- [17] 有山伸之, 王麗, 鄭煥穆, 山田大彦: 単層ラチスドームの座屈特性における接合部回転剛性と荷重条件の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), pp.1245-1246, 1989.10
- [18] 鈴木敏郎, 小河利行, 久保寺勲, 五十嵐規矩夫: ボール接合単層ラチスドームの座屈実験及び弾塑性座屈解析 中央集中荷重を受ける部分球形ドームについて, 日本建築学会構造系論文報告集, No.444, pp.53-62, 1993.2
- [19] M., Murakami : Numerical Analysis of Elastic Buckling of Single-Layer Latticed Domes under Gravity Load, Innovative Large Span Structures, Vol.2, IASS-CSCE International Congress, pp.576-586, 1992.
- [20] 高島英幸, 柴田良一, 加藤史郎: スペースフレーム接合部の数値シミュレーション法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.455, pp.105-111, 1994.1
- [21] 植木隆司, 向山洋一, 庄村昌明, 加藤史郎: 単層ラチスドームの載荷試験および弾塑性座屈解析, 日本建築学会構造系論文報告集, No.421, pp.117-128, 1991.3
- [22] 植木隆司, 松栄泰男, 加藤史郎, 山田聖志: 単位単層ラチスドームの載荷試験および弾塑性座屈荷重, 日本建築学会構造系論文報告集, No.452, pp.67-76, 1993.10
- [23] Fujimoto, M., Imai, K., and Saka, T. : Nonlinear Buckling Analysis of a Single Layer Latticed Dome Composed of a Standardized Truss System under Nodal Gravity Loads

- at Dome Central Portion, SEIKEN-IASS SYMPOSIUM on Nonlinear Analysis and Design for Shell and Spatial Structures, pp.175-182, 1993.10
- [24] T., Yamashita and H., Kunieda : Geometrical Nonlinear Analysis of Single-Layer Latticed Domes, Innovative Large Span Structures, Vol.2, IASS-CSCE International Congress, pp.476-486, 1992
- [25] 日本建築学会: 鋼構造設計規準, 1973
- [26] 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説, 1990.2
- [27] 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 1990.2
- [28] 加藤史郎, 山田聖志, 高島英幸, 柴田良一: 剛接合単層ラチスドームの座屈応力度に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.428, pp.97-105, 1991.10
- [29] 加藤史郎, 柴田良一, 植木隆司: 剛接合単層ラチスドームの座屈荷重推定法 部材の座屈応力度を用いる方法, 日本建築学会構造系論文報告集, No.436, pp.91-103, 1992.6
- [30] 柴田良一, 加藤史郎, 植木隆司: きわめて偏平な剛接合単層ラチスドームの弾塑性座屈荷重 等分布荷重を受ける周辺ピン支持六角形平面ドームの座屈応力度曲線について, 日本建築学会構造系論文報告集, No.449, pp.143-153, 1993.7
- [31] 植木隆司, 加藤史郎, 向山洋一, 庄村昌明: 線形固有値解析に基づく折板状ラチスアーチの耐力の推定方法に関する研究 正規化細長比による方法の可能性について, 日本建築学会構造系論文報告集, No.439, pp.103-110, 1992.9
- [32] 武藤至, 加藤史郎: 単層ラチスドームの座屈耐力と球殻の座屈曲線との関連についての一考察, 日本建築学会構造系論文報告集, No.449, pp.155-161, 1993.7
- [33] V.Gionco : Buckling of Reticulated Shells : State-of-Art, International Journal of Space Structures, Vol.10, No.1, 1995
- [34] 建築学大系編集委員会, 藤本盛久: 座屈論 3.2. 骨組の座屈 I たわみ角法によるラーメンの立体的座屈の解析, 日本建築学会編, 建築学大系 12, 彰国社, pp.388-407, 1968
- [35] J.S. シェムニスキー: マトリックス構造解析の基礎理論 15. 非線形構造解析, 培風館, pp/349-371, 1988.
- [36] 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 6 鉄骨工事, 付則 6 鉄骨精度検査基準, 1991
- [37] Kollar, L. and Dulacska, E. : Buckling of Shells for Engineers, 4. Stability of Spherical Shells

and Domes of Other Forms, 9. Practical Application of the Results of the Stability Theory, John Wiley & Sons, pp.64-95, pp.199-265, 1984

[38] Heki, K. : The Continuum Analogy of Lattice Structures from the View-point of Difference Equations, SHELLS, MEMBRANES AND SPACE FRAMES, Proceedings IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, 1986, Vol.3, Edited by K.Heki, Elsevier Science Publishers B.V., pp.65-72, 1986.9

[39] Heki, K. : The Continuum Treatment of Discrete Systems and its Application to the Analysis of Lattice Structures, Bulletin of I.A.S.S., XXVI-3, pp.19-26, 1985.12

[40] Stahlbauten : Erläuterungen zu DIN 18800 Teil 1 bis Teil 4, Beuth Verlag, 1993.8

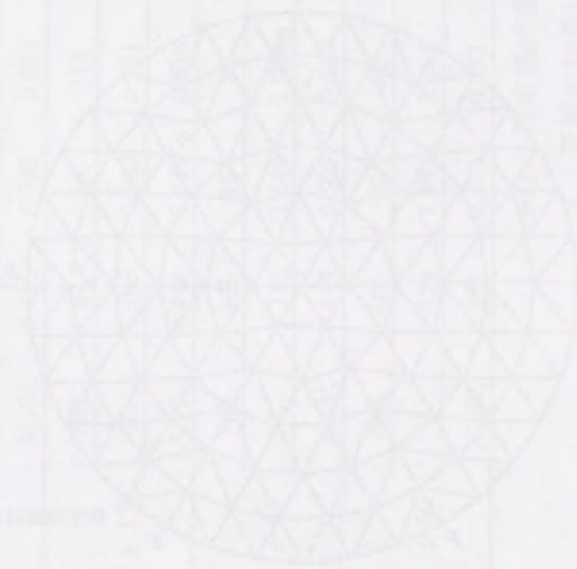
[41] Recommendations for Reinforced Concrete Shells and Fofed Plates, IASS, 1979

## APPENDIX

APPENDIX.1 第3章で対象としたドームの座屈応力度表示

APPENDIX.2 部材モデルの定式化

APPENDIX.3 弾塑性ばねの剛性マトリックス





APPENDIX.1 第3章で対象としたドームの座屈応力度表示

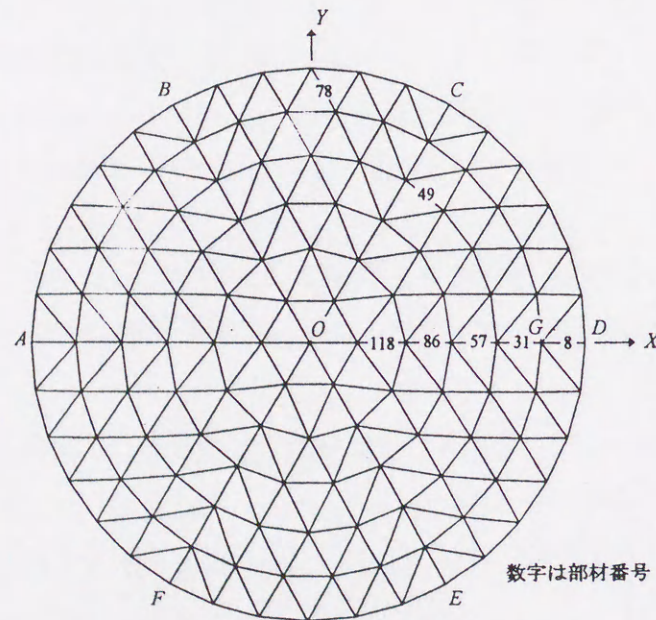
第4章では部材半開角が1~2度の周辺ピン支持ドームについての座屈応力度を示した。この時の座屈応力度を計算する部材として、次式で示す軸力比 $\delta_m$

$$\delta_m = \frac{N_{cr}^{kn}}{N_y} \quad (A-1)$$

が最大となる部材を採用した。また、第3章では、

- ・部材半開角が2度~4度
- ・境界条件はピン支持とローラー支持
- ・荷重条件は等分布荷重と片偏載荷重
- ・部材を補強したドーム

のドーム(図A1-1)を対象とし、線形座屈解析より得られる部材のひずみエネルギーを利用して、特定部材を選定して座屈応力度を表現した。ここでは、第3章で対象としたドームに対して、第4章で示した軸力比 $\delta_m$ を特定部材とする座屈応力度を示す。



図A1-1 単層ラチスドームの特定部材番号

表A-1(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=2.0^\circ, n=12, l_0=3m, \text{ピン支持, 等分布荷重}$ ]

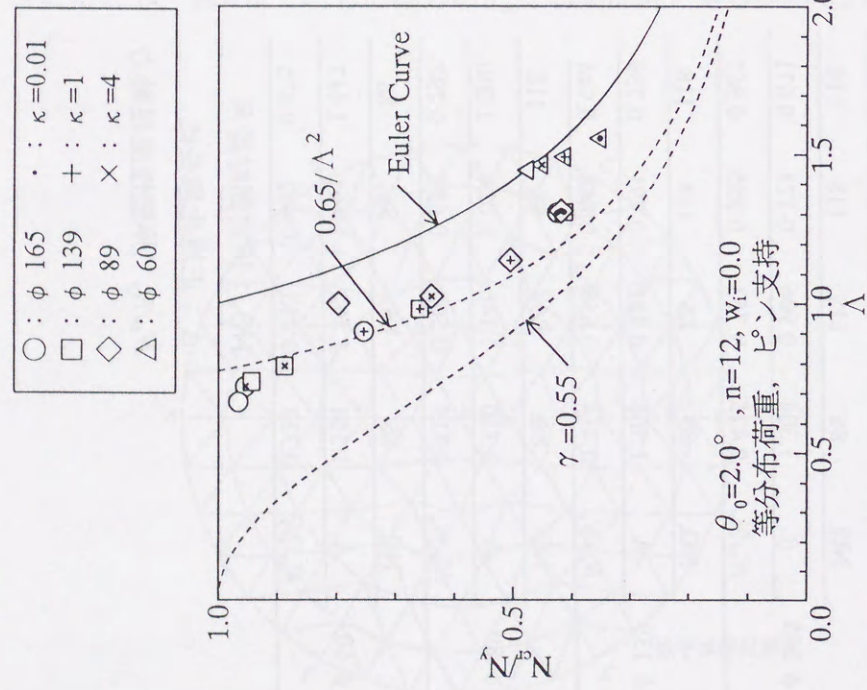
$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	86	118	118	118
	$\Lambda$	1.304	0.906	0.724	0.671
$\phi$ 139	$N_{cr}/N_y$	0.425	0.753	0.955	0.967
	NO.	86	86	118	118
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.306	0.982	0.791	0.739
	$N_{cr}/N_y$	0.414	0.659	0.888	0.944
$\phi$ 60	NO.	86	86	86	118
	$\Lambda$	1.310	1.146	1.024	1.000
$\phi$ 60	$N_{cr}/N_y$	0.419	0.505	0.639	0.797
	NO.	86	86	86	86
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.554	1.492	1.465	1.447
	$N_{cr}/N_y$	0.353	0.413	0.452	0.475

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

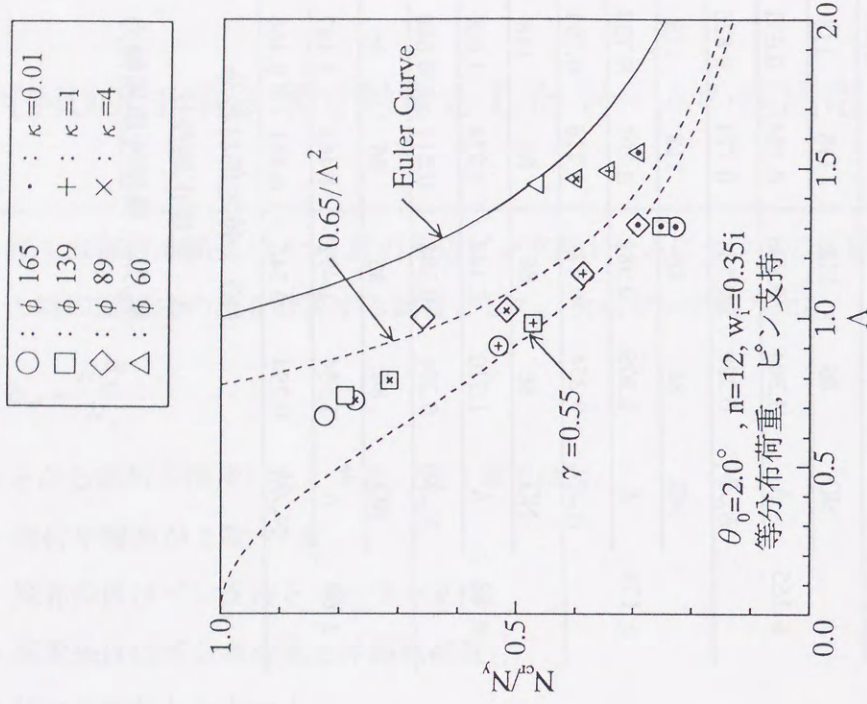
表A-1(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=2.0^\circ, n=12, l_0=3m, \text{ピン支持, 等分布荷重}$ ]  
(形状初期不整  $w_i=0.35i$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	86	118	118	118
	$\Lambda$	1.304	0.906	0.724	0.671
$\phi$ 139	$N_{cr}/N_y$	0.229	0.531	0.774	0.826
	NO.	86	86	118	118
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.306	0.982	0.791	0.739
	$N_{cr}/N_y$	0.254	0.472	0.716	0.791
$\phi$ 60	NO.	86	86	86	118
	$\Lambda$	1.310	1.146	1.024	1.000
$\phi$ 60	$N_{cr}/N_y$	0.294	0.388	0.517	0.660
	NO.	86	86	86	86
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.554	1.492	1.465	1.447
	$N_{cr}/N_y$	0.294	0.345	0.401	0.466

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(a)等分布荷重



(b)等分布荷重, 形状初期不整  $w_1=0.35i$  あり

図 A-1  $N_{cr}N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0=2.0^\circ$ , ピン支持)

表 A-1(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ピン支持, 片偏載荷重]

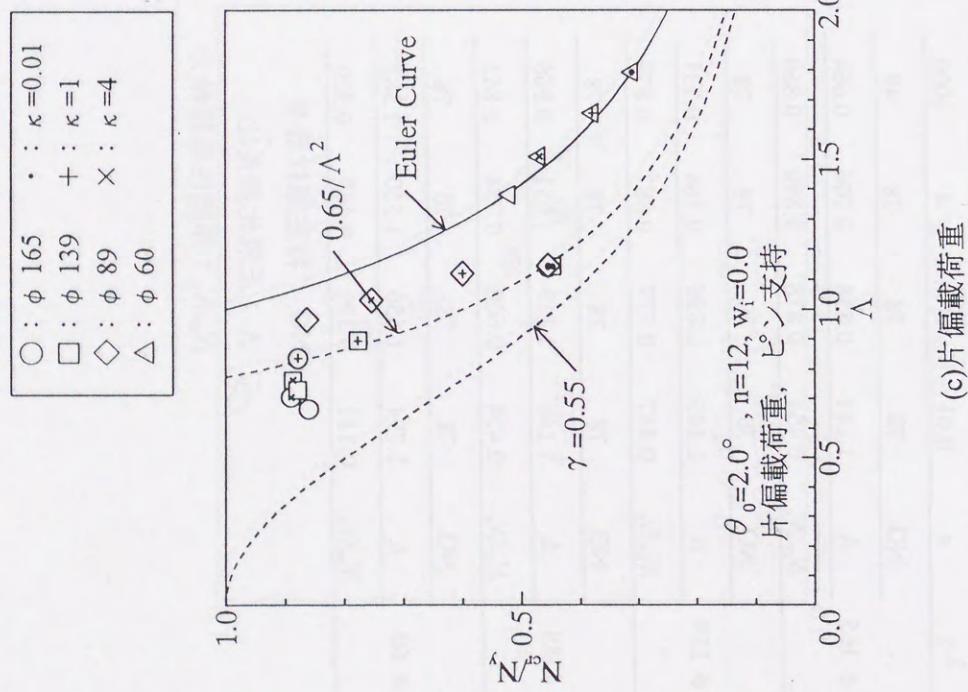
$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
φ 165	NO.	78	78	78
	$\Lambda$	1.141	0.838	0.706
	$N_{cr}N_y$	0.454	0.878	0.890
	NO.	78	78	78
φ 139	$\Lambda$	1.143	0.896	0.764
	$N_{cr}N_y$	0.447	0.777	0.887
	NO.	78	78	78
	$\Lambda$	1.146	1.119	1.031
	$N_{cr}N_y$	0.454	0.600	0.754
	NO.	78	78	78
φ 60	$\Lambda$	1.794	1.656	1.510
	$N_{cr}N_y$	0.311	0.379	0.469

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}N_y$ : 弾塑性座屈軸力

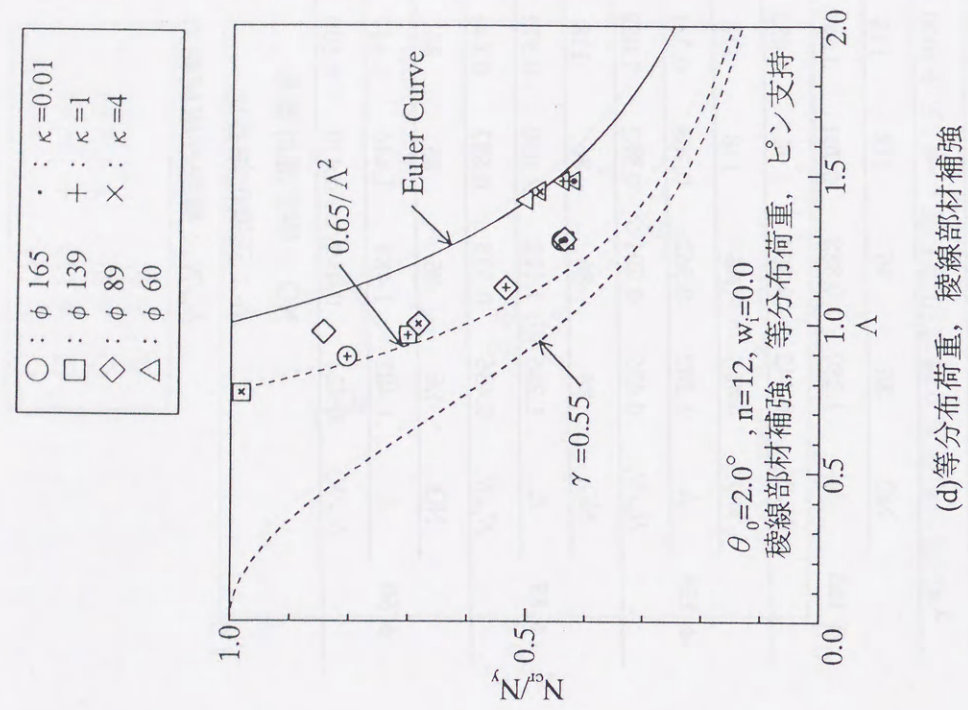
表 A-1(d) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=2.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ピン支持, 稜線部材補強]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
φ 165	NO.	86	86	118
	$\Lambda$	1.280	0.888	0.701
	$N_{cr}N_y$	0.442	0.804	1.063
	NO.	86	86	118
φ 139	$\Lambda$	1.282	0.962	0.768
	$N_{cr}N_y$	0.435	0.701	0.982
	NO.	86	86	118
	$\Lambda$	1.286	1.122	1.000
	$N_{cr}N_y$	0.436	0.535	0.683
	NO.	86	86	86
φ 60	$\Lambda$	1.482	1.481	1.446
	$N_{cr}N_y$	0.421	0.439	0.479

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(c)片偏載荷重



(d)等分布荷重, 稜線部材補強

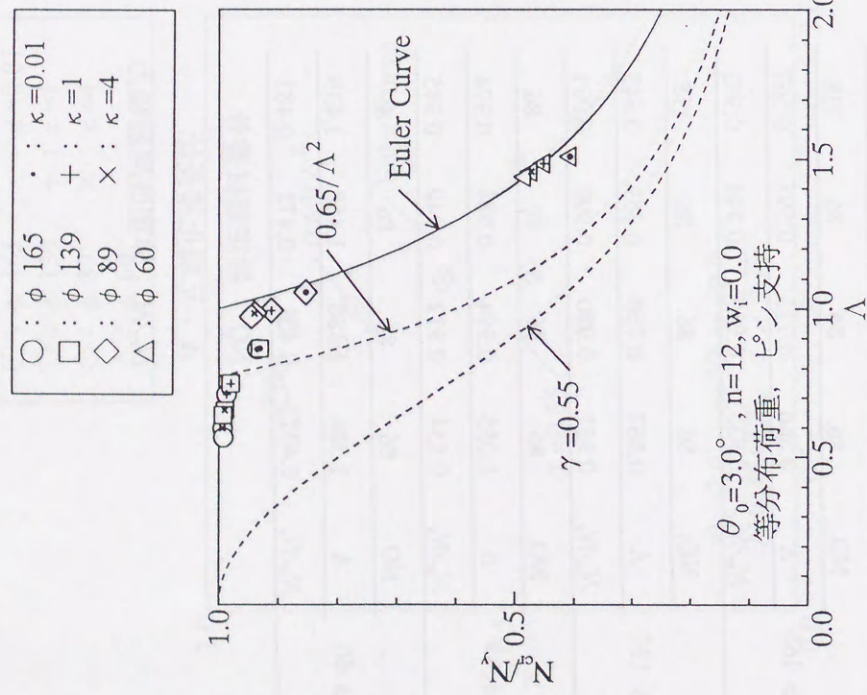
図 A-1  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0 = 2.0^\circ$ , ピン支持)

表 A-2(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 3.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ピン支持, 等分布荷重]

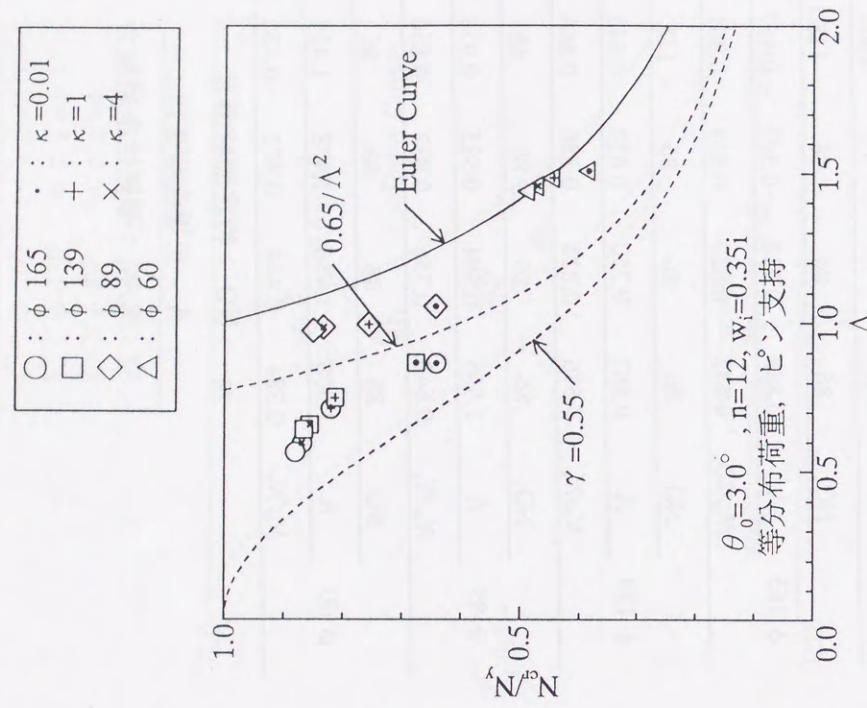
$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	86	86	118
	$\Lambda$	0.866	0.713	0.597
$\phi$ 139	$N_{cr}/N_y$	0.935	0.987	0.994
	$\Lambda$	0.867	0.750	0.643
$\phi$ 89	$N_{cr}/N_y$	0.931	0.980	0.990
	$\Lambda$	1.055	0.994	0.985
$\phi$ 60	$N_{cr}/N_y$	0.854	0.912	0.940
	$\Lambda$	1.508	1.486	1.458
NO.: 特定部材番号				
$\Lambda$ : 正規化細長比				
$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力				

表 A-2(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 3.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ピン支持, 等分布荷重]  
(形状初期不整  $w_i = 0.35i$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	86	86	118
	$\Lambda$	0.866	0.713	0.597
$\phi$ 139	$N_{cr}/N_y$	0.642	0.820	0.869
	$\Lambda$	0.867	0.750	0.659
$\phi$ 89	$N_{cr}/N_y$	0.676	0.813	0.856
	$\Lambda$	1.055	0.994	0.985
$\phi$ 60	$N_{cr}/N_y$	0.643	0.756	0.833
	$\Lambda$	1.508	1.486	1.458
NO.: 特定部材番号				
$\Lambda$ : 正規化細長比				
$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力				



(a)等分布荷重



(b)等分布荷重, 形状初期不整  $w_f=0.35i$  あり

図 A-2  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0=3.0^\circ$ , ピン支持)

表 A-2(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ピン支持, 片偏載荷重]

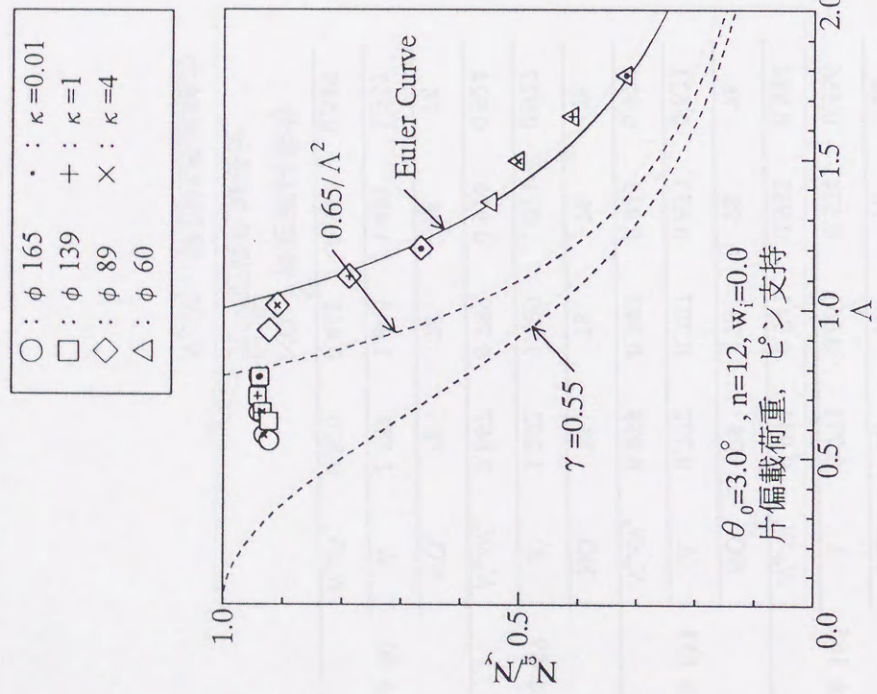
$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
φ 165	NO.	78	78	78	78
	$\Lambda$	0.771	0.651	0.574	0.556
φ 139	NO.	78	78	78	78
	$\Lambda$	0.772	0.707	0.653	0.621
φ 89	NO.	78	78	78	78
	$\Lambda$	1.202	1.109	1.011	0.927
φ 60	NO.	78	78	78	78
	$\Lambda$	1.782	1.645	1.493	1.357
$N_{cr}/N_y$		0.941	0.941	0.932	0.924
$N_{cr}/N_y$		0.939	0.943	0.935	0.924
$N_{cr}/N_y$		0.320	0.411	0.502	0.549

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

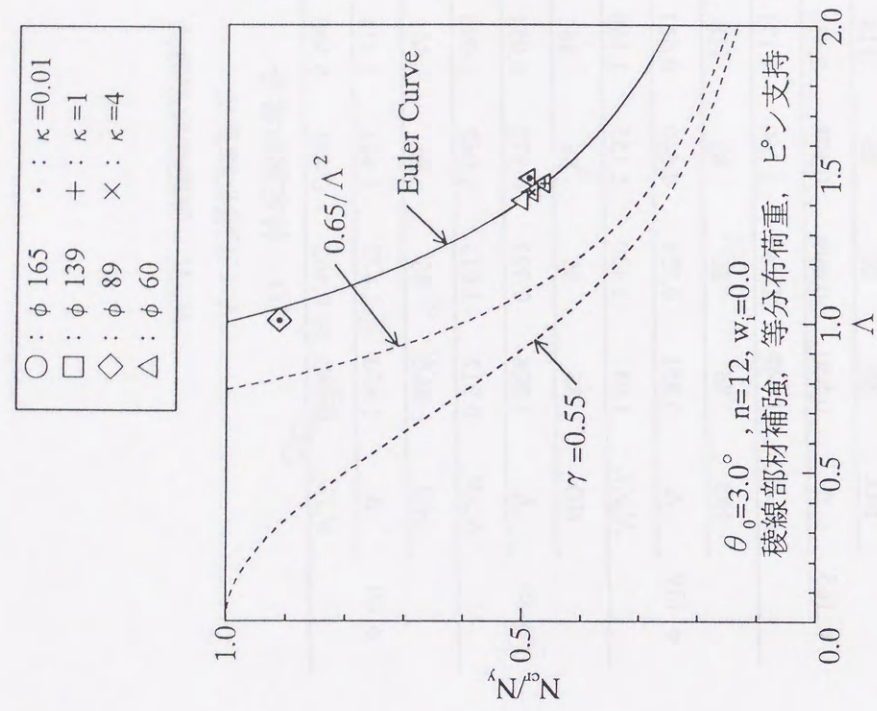
表 A-2(d) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ピン支持, 稜線部材補強]

$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
φ 165	NO.	86	86	86	118
	$\Lambda$	0.850	0.699	0.578	0.550
φ 139	NO.	86	86	86	118
	$\Lambda$	0.851	0.734	0.640	0.623
φ 89	NO.	86	86	86	86
	$\Lambda$	1.008	0.993	0.972	0.954
φ 60	NO.	86	86	86	86
	$\Lambda$	1.490	1.473	1.442	1.414
$N_{cr}/N_y$		1.049	1.140	1.160	1.171
$N_{cr}/N_y$		1.045	1.130	1.155	1.160
$N_{cr}/N_y$		0.488	0.462	0.483	0.500

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(c)片偏載荷重



(d)等分布荷重, 稜線部材補強

図 A-2  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0 = 3.0^\circ$ , ピン支持)

表 A-3(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 4.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ピン支持, 等分布荷重]

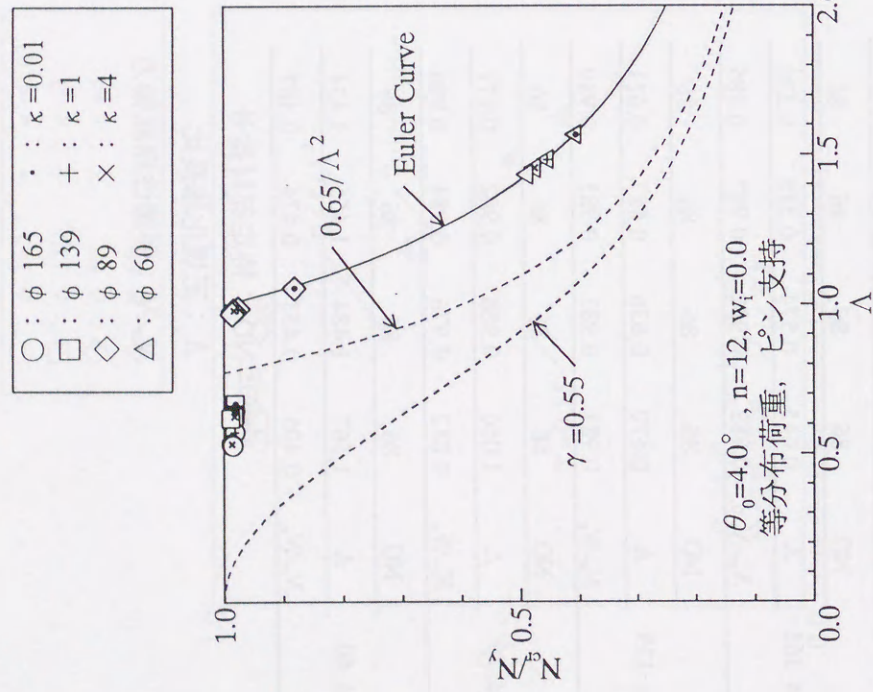
$\lambda_0$	$\kappa$	1		4		1000	
		NO.	86	86	86	86	86
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.645	0.574	0.535	0.530		
	$N_{cr}/N_y$	0.982	0.982	0.987	0.985		
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.670	0.636	0.627	0.621		
	$N_{cr}/N_y$	0.981	0.981	0.983	0.989		
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.056	0.988	0.982	0.971		
	$N_{cr}/N_y$	0.882	0.976	0.984	0.986		
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.567	1.484	1.455	1.434		
	$N_{cr}/N_y$	0.405	0.453	0.474	0.487		

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

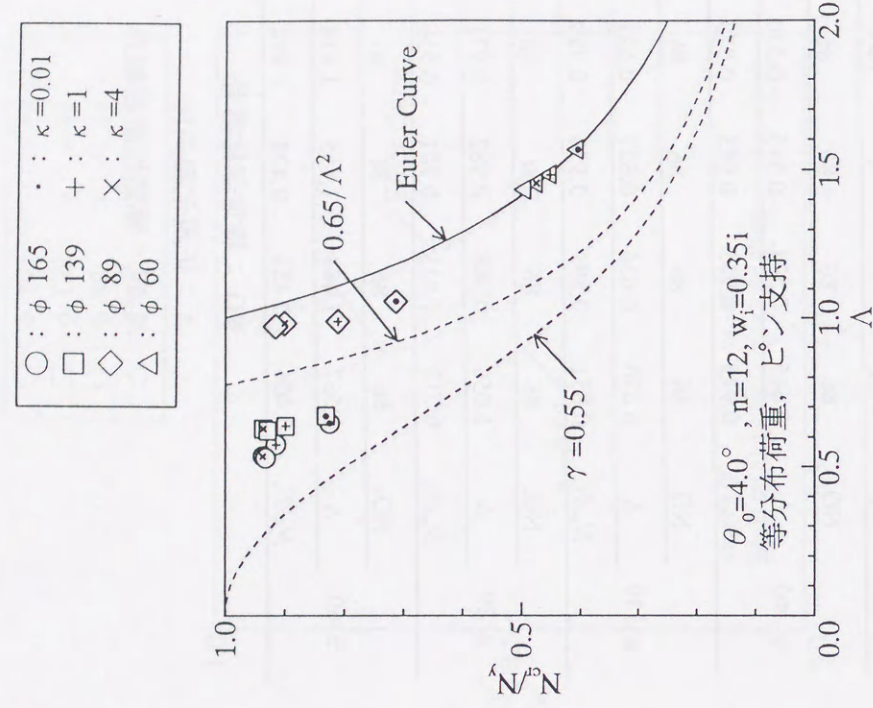
表 A-3(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 4.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ピン支持, 等分布荷重]  
(形状初期不整  $w_i = 0.35i$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1		4		1000	
		NO.	86	86	86	86	86
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.645	0.574	0.535	0.530		
	$N_{cr}/N_y$	0.945	0.955	0.985	0.973		
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.670	0.636	0.627	0.621		
	$N_{cr}/N_y$	0.831	0.899	0.936	0.929		
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.056	0.988	0.982	0.971		
	$N_{cr}/N_y$	0.713	0.811	0.901	0.916		
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.567	1.484	1.455	1.434		
	$N_{cr}/N_y$	0.404	0.451	0.474	0.494		

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(a)等分布荷重



(b)等分布荷重, 形状初期不整  $w_f=0.35i$  あり

図 A-3  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0=4.0^\circ$ , ピン支持)

表 A-3(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=4.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ピン支持, 片偏載荷重]

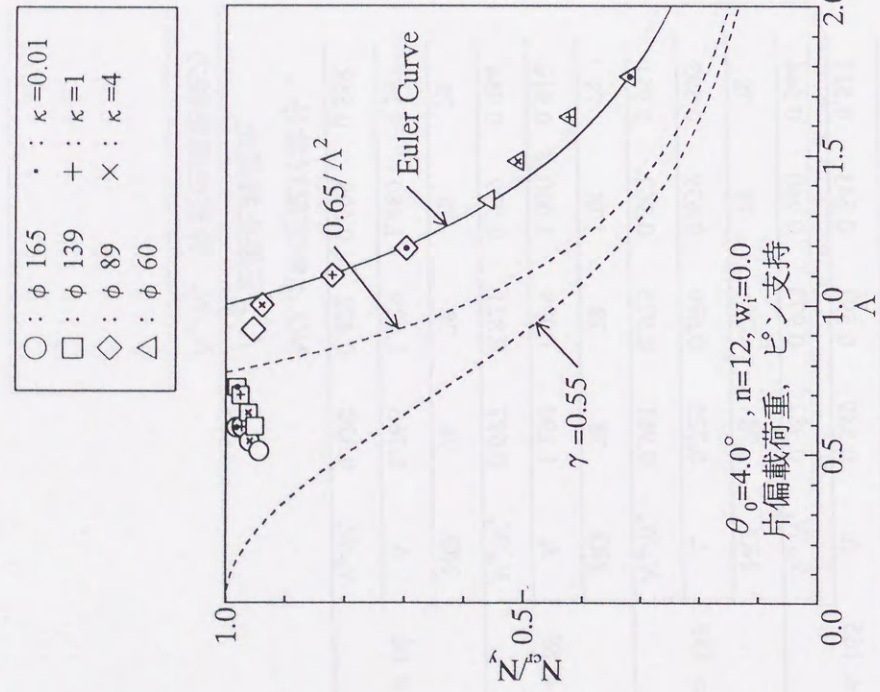
$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
	NO.	78	78	78
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.589	0.591	0.543
	$N_{cr}/N_y$	0.982	0.973	0.960
	NO.	78	78	78
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.725	0.699	0.639
	$N_{cr}/N_y$	0.981	0.975	0.962
	NO.	78	78	78
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.190	1.099	1.000
	$N_{cr}/N_y$	0.697	0.821	0.939
	NO.	78	78	78
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.766	1.629	1.480
	$N_{cr}/N_y$	0.320	0.422	0.509

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

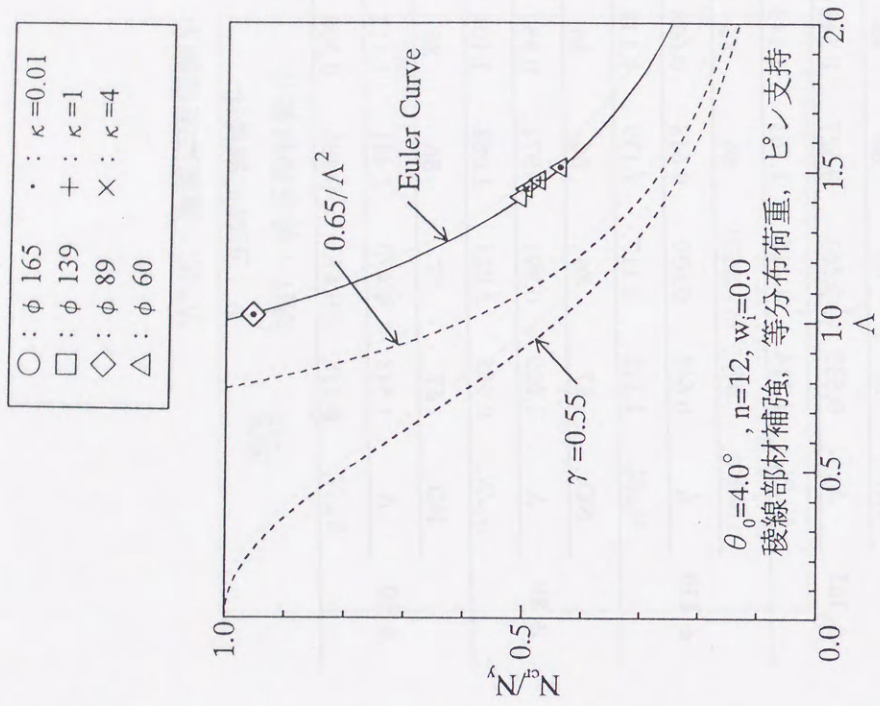
表 A-3(d) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=4.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ピン支持, 稜線部材補強]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
	NO.	57	86	86
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.633	0.563	0.527
	$N_{cr}/N_y$	1.114	1.115	1.163
	NO.	57	86	86
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.648	0.630	0.618
	$N_{cr}/N_y$	1.112	1.117	1.139
	NO.	57	86	86
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.020	0.991	0.971
	$N_{cr}/N_y$	0.955	1.025	1.088
	NO.	57	57	86
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.513	1.470	1.441
	$N_{cr}/N_y$	0.438	0.473	0.496

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(c)片偏載荷重



(d)等分布荷重, 稜線部材補強

図 A-3  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0 = 4.0^\circ$ , ピン支持)

表 A-4(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ローラー支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	8	8	31
	$\Lambda$	1.257	0.878	0.713
	$N_{cr}/N_y$	0.347	0.623	0.704
$\phi$ 139	NO.	8	8	8
	$\Lambda$	1.259	0.950	0.776
	$N_{cr}/N_y$	0.346	0.543	0.686
$\phi$ 89	NO.	8	8	8
	$\Lambda$	1.262	1.106	0.994
	$N_{cr}/N_y$	0.349	0.425	0.531
$\phi$ 60	NO.	8	8	8
	$\Lambda$	1.568	1.509	1.448
	$N_{cr}/N_y$	0.333	0.361	0.402

NO.: 特定部材番号

$\Lambda$ : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

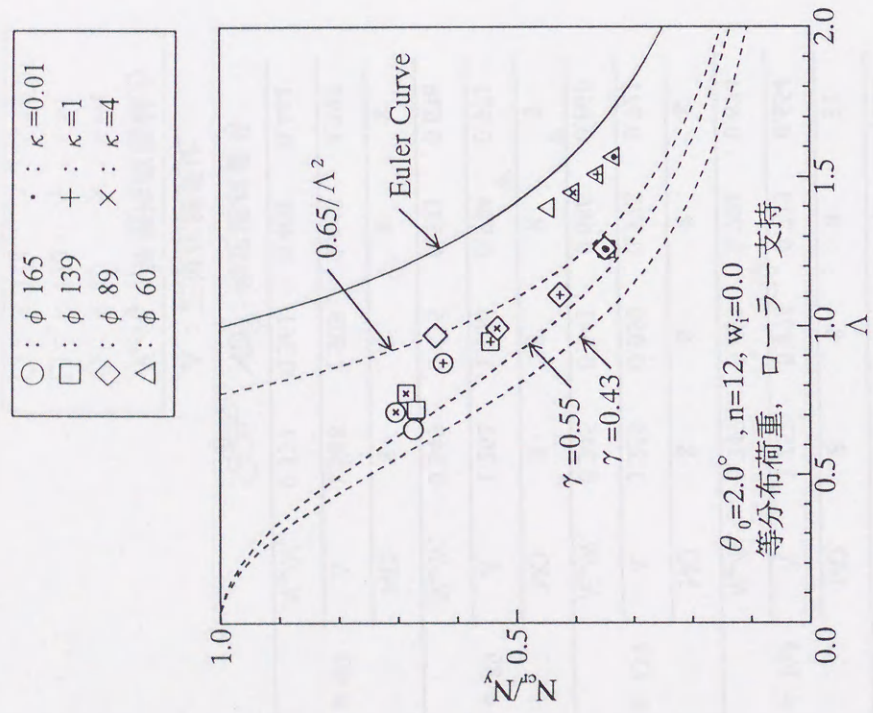
表 A-4(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 2.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ローラー支持, 等分布荷重]  
(形状初期不整  $w_i = 0.35i$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	8	8	31
	$\Lambda$	1.257	0.878	0.713
	$N_{cr}/N_y$	0.189	0.466	0.607
$\phi$ 139	NO.	8	8	8
	$\Lambda$	1.259	0.950	0.776
	$N_{cr}/N_y$	0.208	0.401	0.579
$\phi$ 89	NO.	1.262	1.106	0.994
	$\Lambda$	0.349	0.425	0.531
	$N_{cr}/N_y$	0.246	0.327	0.441
$\phi$ 60	NO.	8	8	8
	$\Lambda$	1.568	1.509	1.448
	$N_{cr}/N_y$	0.256	0.309	0.355

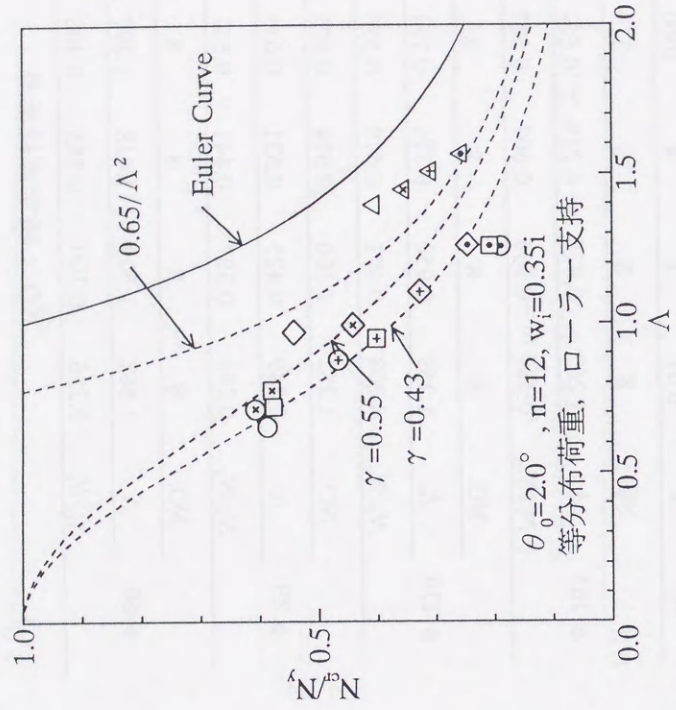
NO.: 特定部材番号

$\Lambda$ : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(a)等分布荷重



(b)等分布荷重, 形状初期不整  $w_i=0.35i$  あり

図 A-4  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0=2.0^\circ$ , ローラー支持)

表 A-4(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 [ $\theta_0=2.0^\circ, n=12, l_0=3m$ , ローラー支持, 片偏載荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
φ 165	NO.	78	78	49	49
	$\Lambda$	1.138	0.849	0.695	0.643
	$N_{cr}/N_y$	0.417	0.700	0.856	0.825
	NO.	78	78	49	49
φ 139	$\Lambda$	1.139	0.901	0.759	0.708
	$N_{cr}/N_y$	0.415	0.618	0.820	0.823
	NO.	78	78	78	49
	$\Lambda$	1.142	1.113	1.020	0.959
φ 89	$N_{cr}/N_y$	0.413	0.499	0.601	0.735
	NO.	78	78	78	78
φ 60	$\Lambda$	1.795	1.647	1.491	1.378
	$N_{cr}/N_y$	0.289	0.342	0.417	0.491

NO : 特定部材番号  
 $\Lambda$  : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$  : 弾塑性座屈軸力

表 A-4(d) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
 [ $\theta_0=2.0^\circ, n=12, l_0=3m$ , ローラー支持, 外部部材補強]

$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
φ 165	NO.	57	86	86	86
	$\Lambda$	1.275	0.897	0.717	0.655
	$N_{cr}/N_y$	0.386	0.646	0.793	0.757
	NO.	57	57	86	86
φ 139	$\Lambda$	1.278	0.970	0.783	0.724
	$N_{cr}/N_y$	0.385	0.569	0.761	0.748
	NO.	57	57	57	86
	$\Lambda$	1.281	1.125	1.008	0.987
φ 89	$N_{cr}/N_y$	0.387	0.459	0.566	0.697
	NO.	57	57	57	57
φ 60	$\Lambda$	1.567	1.475	1.419	1.391
	$N_{cr}/N_y$	0.375	0.399	0.436	0.479

NO : 特定部材番号  
 $\Lambda$  : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$  : 弾塑性座屈軸力



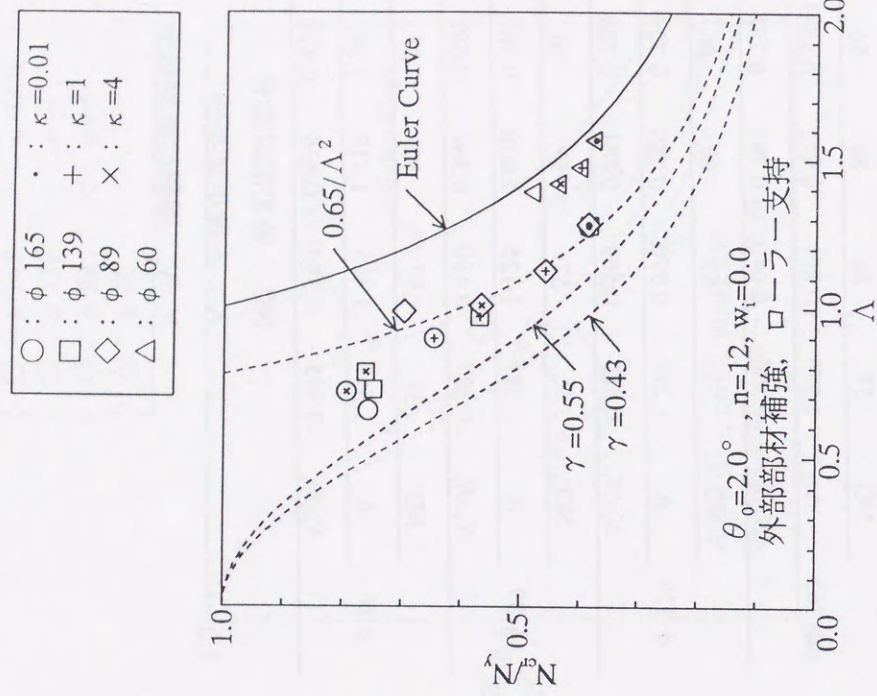
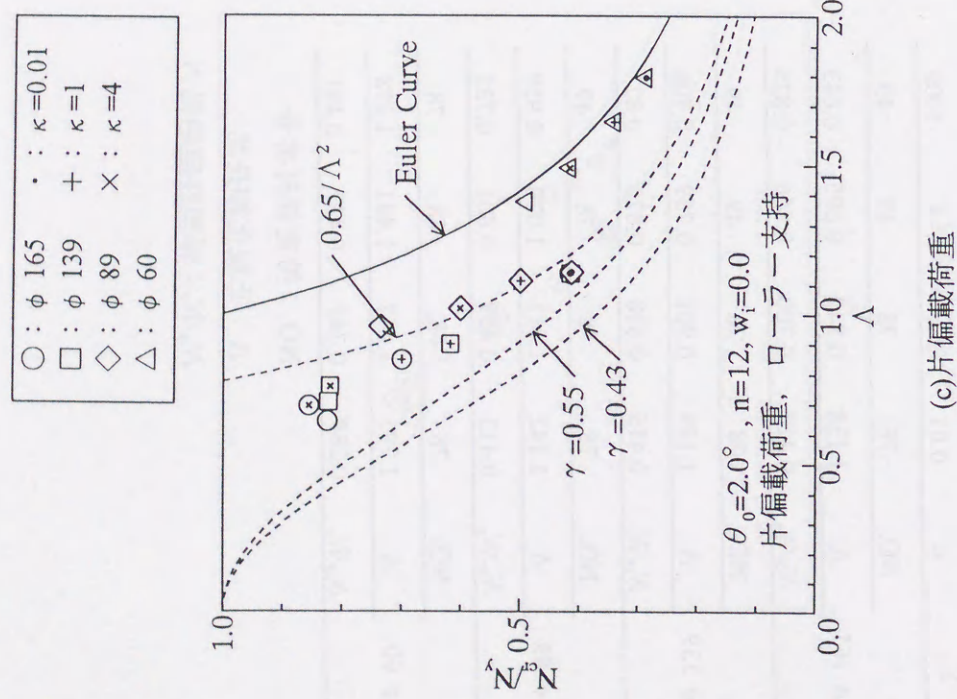


図 A-4  $N_{cr}N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0=2.0^\circ$ , ローラー支持)

表 A-5(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ローラー支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	NO.		
		8	1	4
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.825	0.683	0.577
	$N_{cr}N_y$	0.841	0.864	0.820
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.826	0.717	0.635
	$N_{cr}N_y$	0.841	0.861	0.828
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.057	1.016	0.974
	$N_{cr}N_y$	0.795	0.810	0.822
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.568	1.507	1.443
	$N_{cr}N_y$	0.404	0.436	0.472

NO. : 特定部材番号

$\Lambda$  : 正規化細長比

$N_{cr}N_y$  : 弾塑性座屈軸力

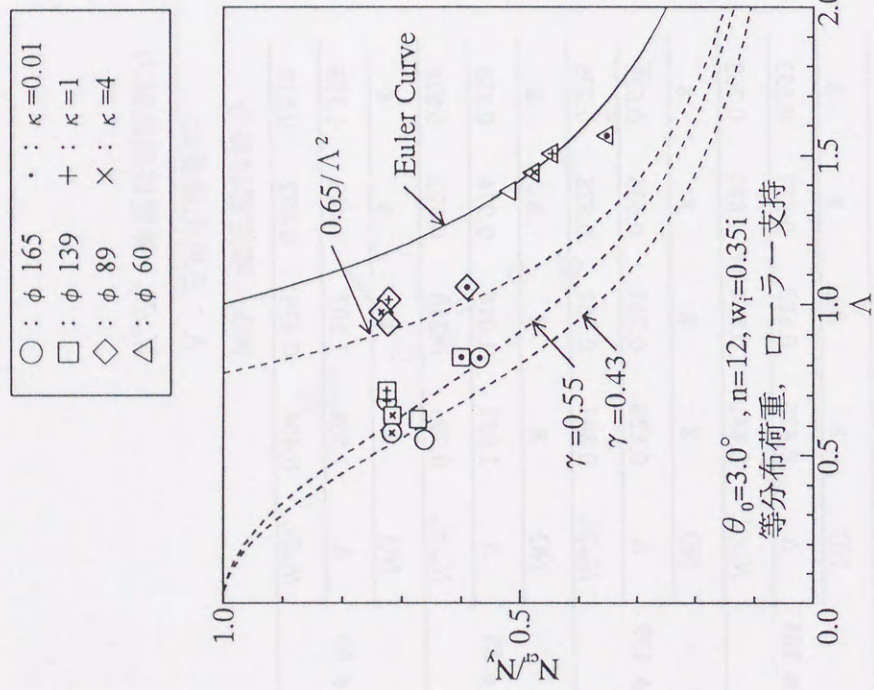
表 A-5(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=3.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ローラー支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	NO.		
		8	1	4
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.825	0.683	0.577
	$N_{cr}N_y$	0.568	0.725	0.717
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.826	0.717	0.635
	$N_{cr}N_y$	0.600	0.725	0.716
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.057	1.016	0.974
	$N_{cr}N_y$	0.590	0.722	0.735
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.568	1.507	1.443
	$N_{cr}N_y$	0.352	0.445	0.476

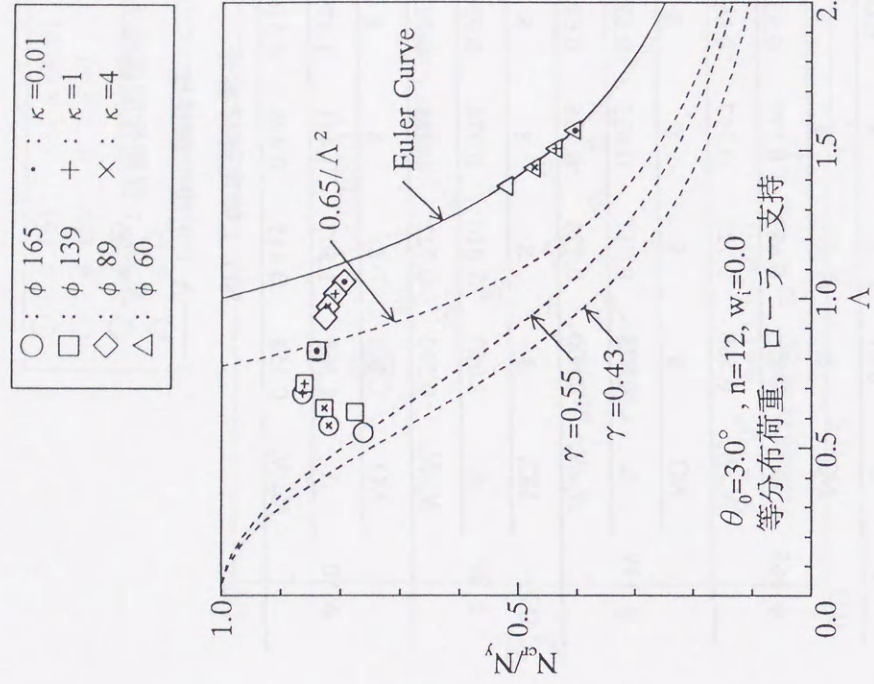
NO. : 特定部材番号

$\Lambda$  : 正規化細長比

$N_{cr}N_y$  : 弾塑性座屈軸力



(a)等分布荷重



(b)等分布荷重, 形状初期不整  $w_i=0.35i$  あり

図 A-5  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0 = 3.0^\circ$ , ローラー支持)

表 A-5(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 3.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ローラー支持, 片偏載荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	NO.		
		78	78	78
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.765	0.649	0.579
	$N_{cr}/N_y$	0.904	0.901	0.894
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.766	0.703	0.646
	$N_{cr}/N_y$	0.903	0.902	0.891
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.202	1.103	0.996
	$N_{cr}/N_y$	0.649	0.768	0.886
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.782	1.634	1.471
	$N_{cr}/N_y$	0.307	0.364	0.453

NO. : 特定部材番号

$\Lambda$  : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$  : 弾塑性座屈軸力

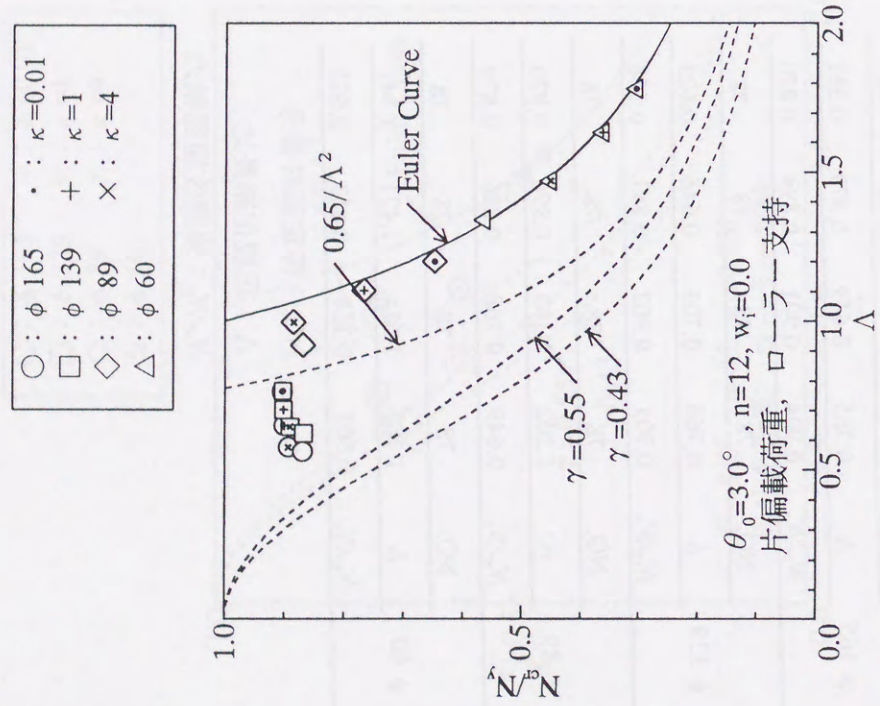
表 A-5(d) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 3.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ローラー支持, 外部部材補強]

$\lambda_0$	$\kappa$	NO.		
		57	57	57
$\phi$ 165	$\Lambda$	0.846	0.701	0.590
	$N_{cr}/N_y$	0.927	0.952	0.916
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.847	0.736	0.649
	$N_{cr}/N_y$	0.928	0.951	0.925
$\phi$ 89	$\Lambda$	1.056	0.991	0.958
	$N_{cr}/N_y$	0.876	0.893	0.875
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.567	1.468	1.367
	$N_{cr}/N_y$	0.402	0.458	0.500

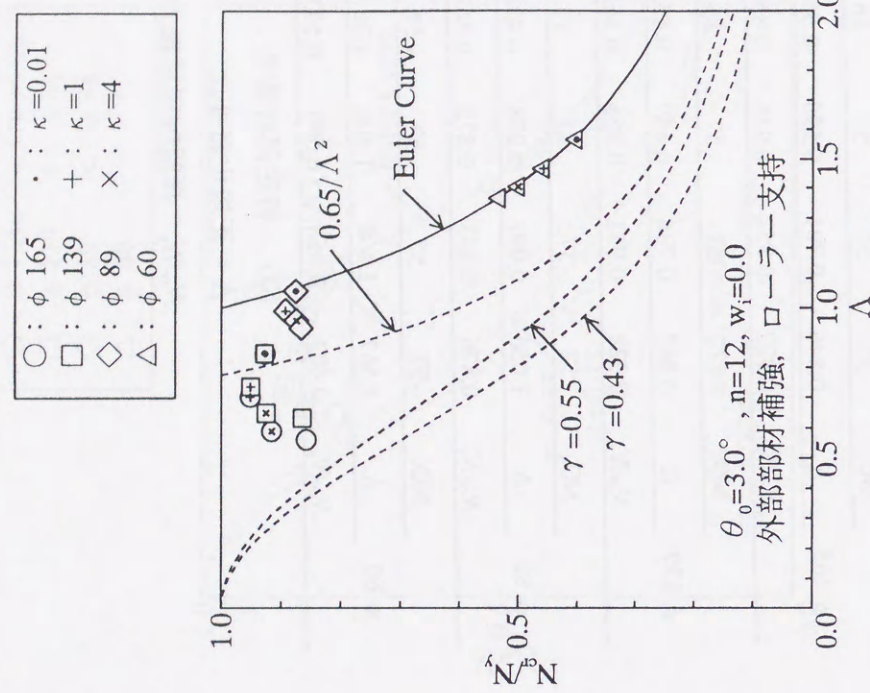
NO. : 特定部材番号

$\Lambda$  : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$  : 弾塑性座屈軸力



(c)片偏載荷重



(d)等分布荷重, 外部部材補強

図 A-5  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0 = 3.0^\circ$ , ローラー支持)

表 A-6(a) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 4.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ローラー支持, 等分布荷重]

$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	0.604	0.546	0.524	0.505
	$N_{cr}/N_y$	1.005	0.967	0.926	0.874
$\phi$ 139	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	0.671	0.645	0.617	0.591
	$N_{cr}/N_y$	1.004	0.976	0.936	0.893
$\phi$ 89	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	1.057	1.014	0.967	0.919
	$N_{cr}/N_y$	0.896	0.938	0.938	0.942
$\phi$ 60	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	1.568	1.503	1.433	1.359
	$N_{cr}/N_y$	0.420	0.448	0.489	0.544

NO.: 特定部材番号

$\Lambda$ : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

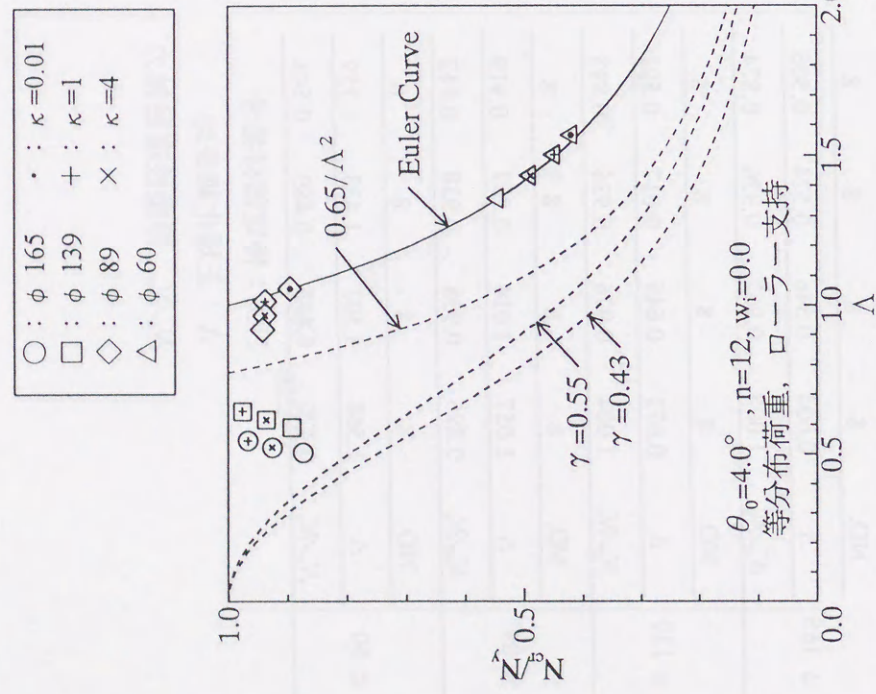
表 A-6(b) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0 = 4.0^\circ$ ,  $n = 12$ ,  $l_0 = 3m$ , ローラー支持, 等分布荷重]  
(形状初期不整  $w_i = 0.35i$  あり)

$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	0.604	0.546	0.524	0.505
	$N_{cr}/N_y$	0.817	0.872	0.829	0.779
$\phi$ 139	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	0.671	0.645	0.617	0.591
	$N_{cr}/N_y$	0.818	0.888	0.842	0.792
$\phi$ 89	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	1.057	1.014	0.967	0.919
	$N_{cr}/N_y$	0.705	0.810	0.867	0.852
$\phi$ 60	NO.	8	8	8	8
	$\Lambda$	1.568	1.503	1.433	1.359
	$N_{cr}/N_y$	0.385	0.461	0.500	0.540

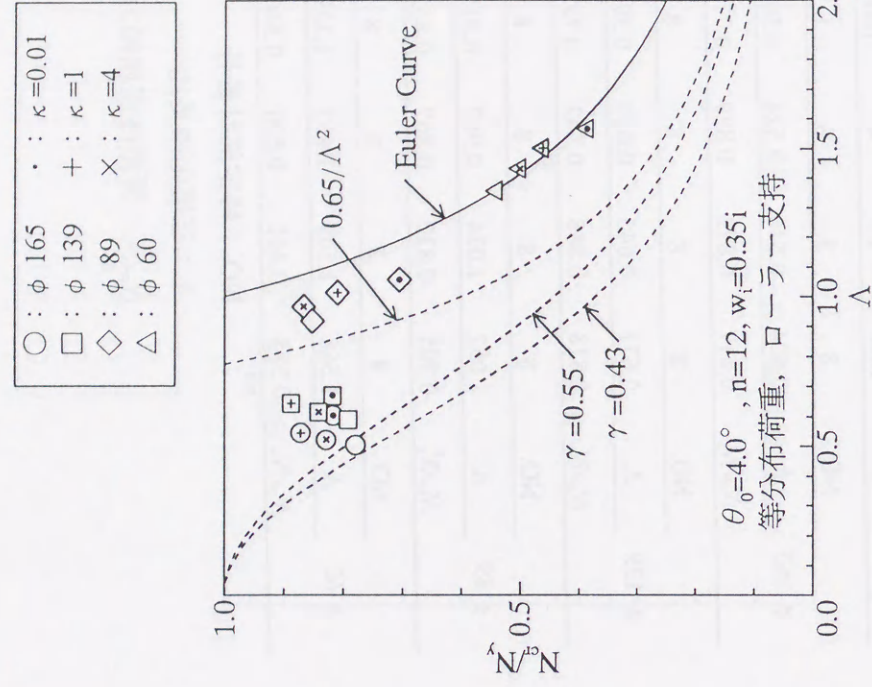
NO.: 特定部材番号

$\Lambda$ : 正規化細長比

$N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(a)等分布荷重



(b)等分布荷重, 形状初期不整  $w_i=0.35i$  あり

図 A-6  $N_{cr}/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0=4.0^\circ$ , ローラー支持)

表 A-6(c) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=4.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ローラー支持, 片偏載荷重]

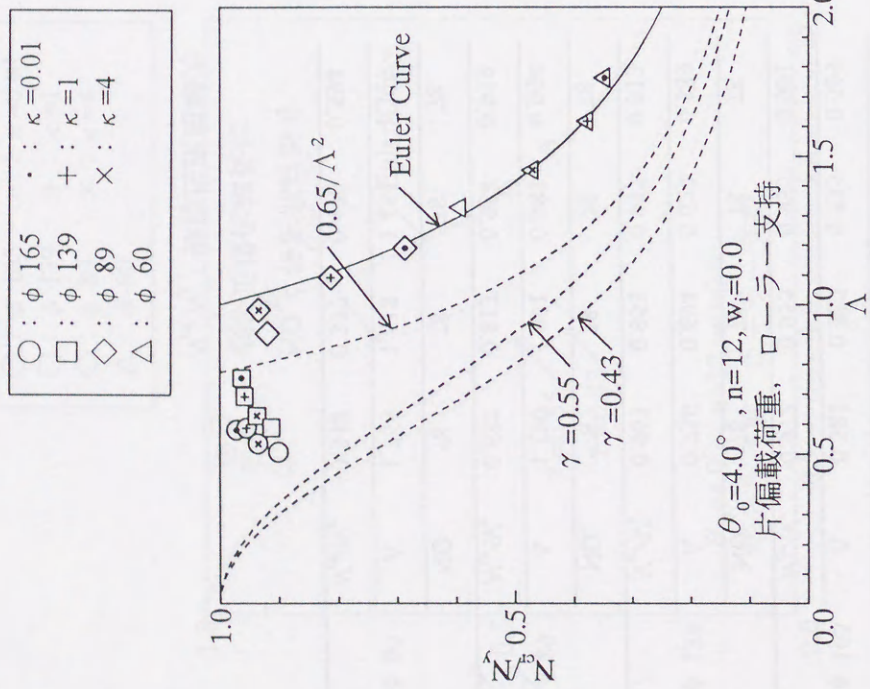
$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	78	78	78	78
	$\Lambda$	0.581	0.587	0.535	0.509
	$N_{cr}/N_y$	0.972	0.955	0.935	0.901
	NO.	78	78	78	78
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.756	0.694	0.629	0.589
	$N_{cr}/N_y$	0.963	0.958	0.937	0.913
$\phi$ 89	NO.	78	78	78	78
	$\Lambda$	1.190	1.091	0.983	0.904
	$N_{cr}/N_y$	0.687	0.813	0.934	0.919
	NO.	78	78	78	78
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.765	1.618	1.454	1.327
	$N_{cr}/N_y$	0.348	0.377	0.470	0.594

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力

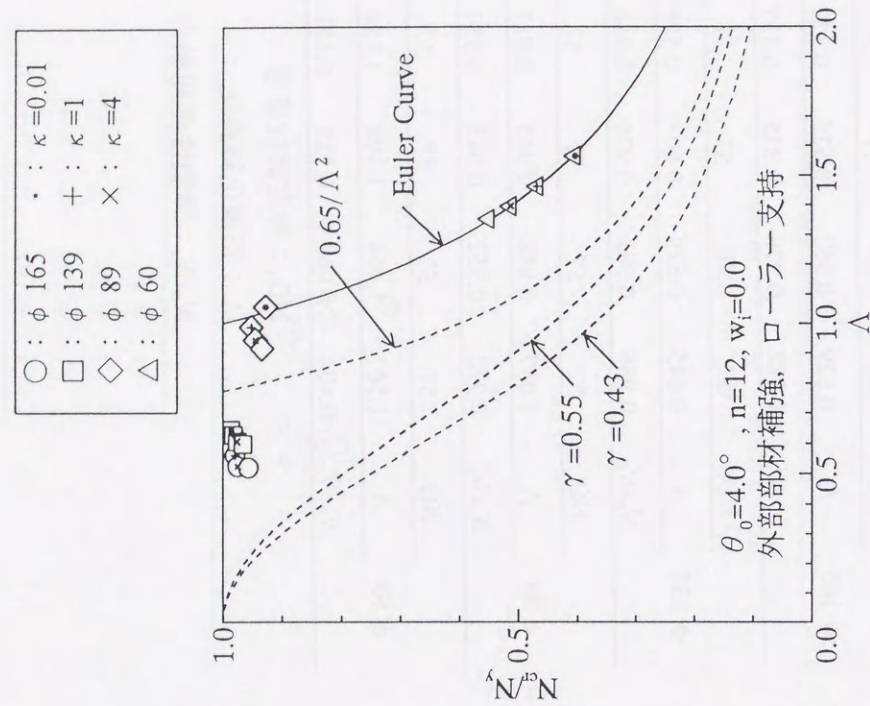
表 A-6(d) 特定部材番号, 正規化細長比, 弾塑性座屈軸力  
[ $\theta_0=4.0^\circ$ ,  $n=12$ ,  $l_0=3m$ , ローラー支持, 外部部材補強]

$\lambda_0$	$\kappa$	0.01	1	4	1000
$\phi$ 165	NO.	57	57	57	57
	$\Lambda$	0.629	0.562	0.525	0.520
	$N_{cr}/N_y$	0.982	0.979	0.975	0.957
	NO.	57	57	57	57
$\phi$ 139	$\Lambda$	0.645	0.629	0.607	0.599
	$N_{cr}/N_y$	0.986	0.982	0.976	0.966
$\phi$ 89	NO.	57	57	57	57
	$\Lambda$	1.057	0.988	0.945	0.917
	$N_{cr}/N_y$	0.928	0.952	0.945	0.934
	NO.	57	57	57	57
$\phi$ 60	$\Lambda$	1.567	1.464	1.398	1.354
	$N_{cr}/N_y$	0.404	0.468	0.513	0.551

NO.: 特定部材番号  
 $\Lambda$ : 正規化細長比  
 $N_{cr}/N_y$ : 弾塑性座屈軸力



(c)片偏載荷重



(d)等分布荷重, 外部部材補強

図 A-6  $N_c/N_y$  と  $\Lambda$  の関係 ( $\theta_0 = 4.0^\circ$ , ローラー支持)

## APPENDIX.2 部材モデルの定式化

### 1. 単材モデル

単材は図 A2-1 に示すモデルを考える。このモデルは、接合部を表す両端の剛域と弾性ばね、部材を表す弾性部材および部材の降伏を模擬するための3個の弾塑性ばねから構成される。なお、以下の説明では、部材の各節点の変位  $\{d_i\}$  および応力  $\{f_i\}$  を次のように表す。

$$\{d_i\} = \{u_i, v_i, w_i, \theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}\}^T \quad (A2-1)$$

$$\{f_i\} = \{n_i, q_{yi}, q_{zi}, m_{xi}, m_{yi}, m_{zi}\}^T \quad (A2-2)$$

ここで、 $u_i, v_i, w_i$  は  $x$  方向、 $y$  方向、 $z$  方向の変位量、 $\theta_{xi}, \theta_{yi}, \theta_{zi}$  は  $x$  軸まわり、 $y$  軸まわり、 $z$  軸まわりの回転量、また、 $n_i$  は軸力、 $q_{yi}, q_{zi}$  は  $y$  方向、 $z$  方向のせん断力、 $m_{xi}, m_{yi}, m_{zi}$  は  $x$  軸まわり、 $y$  軸まわり、 $z$  軸まわりのモーメントを表し、添字  $i$  は節点番号を示す。

なお、単材内のばねや弾性部材の剛性マトリックスを  $[k_j]$  ( $12 \times 12$ ) で表している。ここで、添字  $j$  はばねまたは部材の記号を表す。

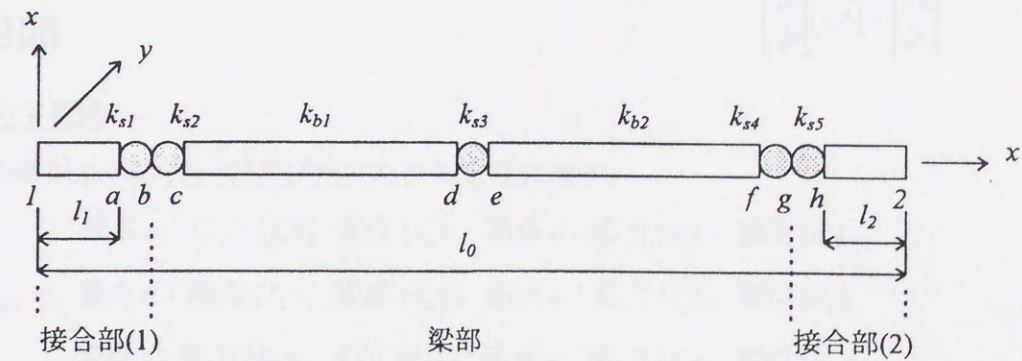


図 A2-1 部材モデル

## 2. 単材の基本式の誘導

### 2.1. 接合部(1)

#### 剛域(1-a)の変位関係

剛域(1-a)の長さを  $l_1$  とすれば、両端の変位の関係は、

$$u_a = u_1 \quad (\text{A2-3})$$

$$v_a = v_1 + l_1 \cdot \theta_{z1} \quad (\text{A2-4})$$

$$w_a = w_1 - l_1 \cdot \theta_{y1} \quad (\text{A2-5})$$

$$\theta_{xa} = \theta_{x1} \quad (\text{A2-6})$$

$$\theta_{ya} = \theta_{y1} \quad (\text{A2-7})$$

$$\theta_{za} = \theta_{z1} \quad (\text{A2-8})$$

となり、これをマトリックス表示すると、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} d_a \\ d_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-9})$$

#### 接合部(1)の力学特性

ばね(a-b)の力学特性は、ばねの剛性  $[k_{s1}]$ 、その両端の応力  $\{f_a\}$ 、 $\{f_b\}$  および変位  $\{d_a\}$ 、 $\{d_b\}$  を用いると、次のように表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} f_a \\ f_b \end{Bmatrix} = [k_{s1}] \begin{Bmatrix} d_a \\ d_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-10})$$

ここで、変位  $\{d_a\}$  について  $\{d_1\}$  を用いて、

$$\begin{Bmatrix} d_a \\ d_b \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -l_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_1 \end{Bmatrix} = [r_1] \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-11})$$

で表すと、式(A2-10)は次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} f_a \\ f_b \end{Bmatrix} = [k_{s1}] [r_1] \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-12})$$

#### 接合部(1)の増分ひずみエネルギー

ばね(a-b)の増分ひずみエネルギー  $\delta U_{s1}$  は次式で与えられる。

$$\delta U_{s1} = \delta \{d_a^T, d_b^T\} [k_{s1}] \begin{Bmatrix} d_a \\ d_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-13})$$

これに式(A2-11)を用いると、

$$\delta U_{s1} = \delta \{d_1^T, d_b^T\} [r_1]^T [k_{s1}] [r_1] \begin{Bmatrix} d_1 \\ d_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-14})$$

が得られる。

## 2.2. 梁部

#### 梁部の力学特性

梁部の各節点の応力、および変位を次のように表す。

節点 b : 応力  $\{f_b\}$ 、変位  $\{d_b\}$ 、節点 c : 応力  $\{f_c\}$ 、変位  $\{d_c\}$

節点 d : 応力  $\{f_d\}$ 、変位  $\{d_d\}$ 、節点 e : 応力  $\{f_e\}$ 、変位  $\{d_e\}$

節点 f : 応力  $\{f_f\}$ 、変位  $\{d_f\}$ 、節点 g : 応力  $\{f_g\}$ 、変位  $\{d_g\}$

また、各ばねと部材の剛性を次のように表す。

ばね(b-c) :  $[k_{s2}]$ , ばね(d-e) :  $[k_{s3}]$ , ばね(f-g) :  $[k_{s4}]$

部材(c-d) :  $[k_{b1}]$ , 部材(e-f) :  $[k_{b2}]$

これらを用いると, 各ばねおよび各部材の力学特性は次式のように得られる。

$$\begin{Bmatrix} f_b \\ f_c \end{Bmatrix} = [k_{s2}] \begin{Bmatrix} d_b \\ d_c \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-15})$$

$$\begin{Bmatrix} f_c \\ f_d \end{Bmatrix} = [k_{b1}] \begin{Bmatrix} d_c \\ d_d \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-16})$$

$$\begin{Bmatrix} f_d \\ f_e \end{Bmatrix} = [k_{s3}] \begin{Bmatrix} d_d \\ d_e \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-17})$$

$$\begin{Bmatrix} f_e \\ f_f \end{Bmatrix} = [k_{b2}] \begin{Bmatrix} d_e \\ d_f \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-18})$$

$$\begin{Bmatrix} f_f \\ f_g \end{Bmatrix} = [k_{s4}] \begin{Bmatrix} d_f \\ d_g \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-19})$$

### 梁部の増分ひずみエネルギー

梁部(b-g)の増分ひずみエネルギー  $\delta U_b$  は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \delta U_b = & \delta \{d_b^T, d_c^T\} [k_{s2}] \begin{Bmatrix} d_b \\ d_c \end{Bmatrix} + \delta \{d_c^T, d_d^T\} [k_{b1}] \begin{Bmatrix} d_c \\ d_d \end{Bmatrix} + \delta \{d_d^T, d_e^T\} [k_{s3}] \begin{Bmatrix} d_d \\ d_e \end{Bmatrix} \\ & + \delta \{d_e^T, d_f^T\} [k_{b2}] \begin{Bmatrix} d_e \\ d_f \end{Bmatrix} + \delta \{d_f^T, d_g^T\} [k_{s4}] \begin{Bmatrix} d_f \\ d_g \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A2-20})$$

## 2.3. 接合部(2)

### 剛域(h-2)の変位関係

剛域(h-2)の長さを  $l_2$  とすれば, 両端の変位の関係は,

$$u_h = u_2 \quad (\text{A2-21})$$

$$v_h = v_2 - l_2 \cdot \theta_{z2} \quad (\text{A2-22})$$

$$w_h = w_2 + l_2 \cdot \theta_{y2} \quad (\text{A2-23})$$

$$\theta_{xh} = \theta_{x2} \quad (\text{A2-24})$$

$$\theta_{yh} = \theta_{y2} \quad (\text{A2-25})$$

$$\theta_{zh} = \theta_{z2} \quad (\text{A2-26})$$

となり, これをマトリックス表示すると, 次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} d_h \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -l_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & l_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-27})$$

### 接合部(2)の力学特性

ばね(g-h)の力学特性は, ばねの剛性  $[k_{s5}]$ , その両端の応力  $\{f_g\}$ ,  $\{f_h\}$  および変位  $\{d_g\}$ ,  $\{d_h\}$  を用いると, 次のように表すことができる。

$$\begin{Bmatrix} f_g \\ f_h \end{Bmatrix} = [k_{s5}] \begin{Bmatrix} d_g \\ d_h \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-28})$$

ここで, 変位  $\{d_h\}$  について  $\{d_2\}$  を用いて,

$$\begin{Bmatrix} d_g \\ d_h \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d_2 \end{Bmatrix} = [r_2] \begin{Bmatrix} d_g \\ d_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-29})$$

で表すと, 式(A2-28)は次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} f_g \\ f_h \end{Bmatrix} = [k_{s5}] [r_2] \begin{Bmatrix} d_g \\ d_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-30})$$

### 接合部(2)の増分ひずみエネルギー

ばね(g-h)の増分ひずみエネルギー  $\delta U_{s2}$  は次式で与えられる。

$$\delta U_{s2} = \delta \{d_g^T, d_h^T\} [k_{s5}] \begin{Bmatrix} d_g \\ d_h \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-31})$$

これに式(A2-29)を用いると,





### 3.増分表現による単材の基本式の誘導

本節では前節で誘導した単材の基本式を増分形式で表現する。なお、以下の説明では、各節点の変位、応力、ばね（または弾性部材）の剛性マトリックスを次のように表す。

ステップ I からステップ I+1 の間の増分変位量： $\{\Delta d_i\}$

$$\{\Delta d_i\} = \{\Delta u_i, \Delta v_i, \Delta w_i, \Delta \theta_{xi}, \Delta \theta_{yi}, \Delta \theta_{zi}\}^T \quad (\text{A2-46})$$

ステップ I の応力： $\{f_j\}$

$$\{f_j\} = \{n_i, q_{yi}, q_{zi}, m_{xi}, m_{yi}, m_{zi}\}_I^T \quad (\text{A2-47})$$

ステップ I+1 の応力： $\{F_j\}$

$$\{F_j\} = \{n_i, q_{yi}, q_{zi}, m_{xi}, m_{yi}, m_{zi}\}_{I+1}^T \quad (\text{A2-48})$$

ステップ I におけるばね（または部材）の接線剛性： $[{}_i k_j]$

ここで、 $i$  は節点番号、 $j$  はばね（または部材）記号を表す。

#### 3.1.接合部(1)

ばね(a-b)の応力と変位の関係を、両端の増分変位 $\{\Delta d_a\}$ 、 $\{\Delta d_b\}$ を用いて表すと次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} s1 F_a \\ s1 F_b \end{Bmatrix} = [{}_i k_{s1}] \begin{Bmatrix} \Delta d_a \\ \Delta d_b \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s1 f_a \\ s1 f_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-49})$$

この時のばねの増分ひずみエネルギー $\delta U_{s1}$ は、

$$\delta U_{s1} = \delta \{\Delta d_a^T, \Delta d_b^T\} [{}_i k_{s1}] \begin{Bmatrix} \Delta d_a \\ \Delta d_b \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_a^T, \Delta d_b^T\} \begin{Bmatrix} s1 f_a \\ s1 f_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-50})$$

ここで、節点 a と節点 1 の関係式(A2-11)を用いると、上式は次のようになる。

$$\delta U_{s1} = \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_b^T\} [r_1]^T [{}_i k_{s1}] [r_1] \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_b \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_b^T\} [r_1]^T \begin{Bmatrix} s1 f_a \\ s1 f_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-51})$$

ここで、

$$[{}_i k_1] = [r_1]^T [{}_i k_{s1}] [r_1] \quad (\text{A2-52})$$

$$\begin{Bmatrix} g_1 \\ g_b \end{Bmatrix} = [r_1]^T \begin{Bmatrix} s1 f_1 \\ s1 f_b \end{Bmatrix} = [r_1]^T \begin{Bmatrix} s1 f_a \\ s1 f_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-53})$$

とすれば、 $\delta U_{s1}$ は次のようになる。

$$\delta U_{s1} = \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_b^T\} [{}_i k_1] \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_b \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_b^T\} \begin{Bmatrix} g_1 \\ g_b \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-54})$$

### 3.2.梁部

梁部の応力変位関係を増分形式で表現すると、次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} s2 F_b \\ s2 F_c \end{Bmatrix} = [{}_i k_{s2}] \begin{Bmatrix} \Delta d_b \\ \Delta d_c \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s2 f_b \\ s2 f_c \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-55})$$

$$\begin{Bmatrix} b1 F_c \\ b1 F_d \end{Bmatrix} = [{}_i k_{b1}] \begin{Bmatrix} \Delta d_c \\ \Delta d_d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b1 f_c \\ b1 f_d \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-56})$$

$$\begin{Bmatrix} s3 F_d \\ s3 F_e \end{Bmatrix} = [{}_i k_{s3}] \begin{Bmatrix} \Delta d_d \\ \Delta d_e \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s3 f_d \\ s3 f_e \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-57})$$

$$\begin{Bmatrix} b2 F_e \\ b2 F_f \end{Bmatrix} = [{}_i k_{b2}] \begin{Bmatrix} \Delta d_e \\ \Delta d_f \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} b2 f_e \\ b2 f_f \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-58})$$

$$\begin{Bmatrix} s4 F_f \\ s4 F_g \end{Bmatrix} = [{}_i k_{s4}] \begin{Bmatrix} \Delta d_f \\ \Delta d_g \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s4 f_f \\ s4 f_g \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-59})$$

したがって、梁部(b-g)の増分ひずみエネルギー $\delta U_b$ は次のようになる。

$$\begin{aligned} \delta U_b = & \delta \{\Delta d_b^T, \Delta d_c^T\} [{}_i k_{s2}] \begin{Bmatrix} \Delta d_b \\ \Delta d_c \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_b^T, \Delta d_c^T\} \begin{Bmatrix} s2 f_b \\ s2 f_c \end{Bmatrix} \\ & + \delta \{\Delta d_c^T, \Delta d_d^T\} [{}_i k_{b1}] \begin{Bmatrix} \Delta d_c \\ \Delta d_d \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_c^T, \Delta d_d^T\} \begin{Bmatrix} b1 f_c \\ b1 f_d \end{Bmatrix} \\ & + \delta \{\Delta d_d^T, \Delta d_e^T\} [{}_i k_{s3}] \begin{Bmatrix} \Delta d_d \\ \Delta d_e \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_d^T, \Delta d_e^T\} \begin{Bmatrix} s3 f_d \\ s3 f_e \end{Bmatrix} \\ & + \delta \{\Delta d_e^T, \Delta d_f^T\} [{}_i k_{b2}] \begin{Bmatrix} \Delta d_e \\ \Delta d_f \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_e^T, \Delta d_f^T\} \begin{Bmatrix} b2 f_e \\ b2 f_f \end{Bmatrix} \\ & + \delta \{\Delta d_f^T, \Delta d_g^T\} [{}_i k_{s4}] \begin{Bmatrix} \Delta d_f \\ \Delta d_g \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_f^T, \Delta d_g^T\} \begin{Bmatrix} s4 f_f \\ s4 f_g \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A2-60})$$

### 3.3.接合部(2)

ばね(g-h)の応力と変位の関係を、両端の増分変位  $\{\Delta d_g\}$ ,  $\{\Delta d_h\}$  を用いて表すと次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} s_5 f_g \\ s_5 f_h \end{Bmatrix} = [{}^t k_{s5}] \begin{Bmatrix} \Delta d_g \\ \Delta d_h \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} s_5 f_g \\ s_5 f_h \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-61})$$

この時のばねの増分ひずみエネルギー  $\delta U_{s2}$  は、

$$\delta U_{s2} = \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_h^T\} [{}^t k_{s5}] \begin{Bmatrix} \Delta d_g \\ \Delta d_h \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_h^T\} \begin{Bmatrix} s_5 f_g \\ s_5 f_h \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-62})$$

ここで、節点 h と節点 2 の関係式(A2-29)を用いると、上式は次のようになる。

$$\delta U_{s2} = \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_2^T\} [r_2]^T [{}^t k_{s5}] [r_2] \begin{Bmatrix} \Delta d_g \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_2^T\} [r_2]^T \begin{Bmatrix} s_5 f_g \\ s_5 f_h \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-63})$$

ここで、

$$[{}^t k_2] = [r_2]^T [{}^t k_{s5}] [r_2] \quad (\text{A2-64})$$

$$\begin{Bmatrix} g_g \\ g_2 \end{Bmatrix} = [r_2]^T \begin{Bmatrix} s_5 f_g \\ s_5 f_h \end{Bmatrix} = [r_2]^T \begin{Bmatrix} s_5 f_g \\ s_5 f_h \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-65})$$

とすれば、 $\delta U_{s2}$  は次のようになる。

$$\delta U_{s2} = \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_2^T\} [{}^t k_2] \begin{Bmatrix} \Delta d_g \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_2^T\} \begin{Bmatrix} g_g \\ g_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-66})$$

### 3.4.増分形式による単材の基本式

節点 1, 2 に作用する外力  $\{f_1\}$ ,  $\{f_2\}$  による単材の増分ポテンシャルエネルギー  $\delta E$  は、

$$\delta E = \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_2^T\} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-67})$$

で表されるので、単材の増分形式によるポテンシャルエネルギーは、次のようになる。

$$\begin{aligned} & \delta U_{s1} + \delta U_b + \delta U_{s2} - \delta E \\ &= \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_b^T\} [{}^t k_1] \begin{Bmatrix} \Delta d_1 \\ \Delta d_b \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_b^T\} \begin{Bmatrix} g_1 \\ g_b \end{Bmatrix} \\ &+ \delta \{\Delta d_b^T, \Delta d_c^T\} [{}^t k_{s2}] \begin{Bmatrix} \Delta d_b \\ \Delta d_c \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_b^T, \Delta d_c^T\} \begin{Bmatrix} s_2 f_b \\ s_2 f_c \end{Bmatrix} \\ &+ \delta \{\Delta d_c^T, \Delta d_d^T\} [{}^t k_{b1}] \begin{Bmatrix} \Delta d_c \\ \Delta d_d \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_c^T, \Delta d_d^T\} \begin{Bmatrix} b_1 f_c \\ b_1 f_d \end{Bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \delta \{\Delta d_d^T, \Delta d_e^T\} [{}^t k_{s3}] \begin{Bmatrix} \Delta d_d \\ \Delta d_e \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_d^T, \Delta d_e^T\} \begin{Bmatrix} s_3 f_d \\ s_3 f_e \end{Bmatrix} \\ &+ \delta \{\Delta d_e^T, \Delta d_f^T\} [{}^t k_{b2}] \begin{Bmatrix} \Delta d_e \\ \Delta d_f \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_e^T, \Delta d_f^T\} \begin{Bmatrix} b_2 f_e \\ b_2 f_f \end{Bmatrix} \\ &+ \delta \{\Delta d_f^T, \Delta d_g^T\} [{}^t k_{s4}] \begin{Bmatrix} \Delta d_f \\ \Delta d_g \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_f^T, \Delta d_g^T\} \begin{Bmatrix} s_4 f_f \\ s_4 f_g \end{Bmatrix} \\ &+ \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_2^T\} [{}^t k_2] \begin{Bmatrix} \Delta d_g \\ \Delta d_2 \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_g^T, \Delta d_2^T\} \begin{Bmatrix} g_g \\ g_2 \end{Bmatrix} \\ &- \delta \{\Delta d_1^T, \Delta d_2^T\} \begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \end{Bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (\text{A2-68})$$

上式について、単材の両端の節点 1, 2 と、単材の内部節点 b, c, d, e, f, g に分けてマトリックスで表示すると次式となる。

$$\delta \{\Delta d_{12}^T, \Delta d_{bg}^T\} \begin{Bmatrix} A & B \\ B^T & C \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta d_{12} \\ \Delta d_{bg} \end{Bmatrix} + \delta \{\Delta d_{12}^T, \Delta d_{b-g}^T\} \begin{Bmatrix} G_{12} \\ G_{bg} \end{Bmatrix} - \delta \{\Delta d_{12}^T, \Delta d_{bg}^T\} \begin{Bmatrix} f_{12} \\ 0 \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{A2-69})$$

ここで、

$$\{\Delta d_{12}\} = \{\Delta d_1, \Delta d_2\}^T \quad (\text{A2-70})$$

$$\{\Delta d_{bg}\} = \{\Delta d_b, \Delta d_c, \Delta d_d, \Delta d_e, \Delta d_f, \Delta d_g\}^T \quad (\text{A2-71})$$

$$\{f_{12}\} = \{f_1, f_2\}^T \quad (\text{A2-72})$$

$$\{G_{12}\} = \{g_1, g_2\}^T \quad (\text{A2-73})$$

$$\{G_{bg}\} = \begin{Bmatrix} g_b + s_2 f_b \\ s_2 f_c + b_1 f_c \\ b_1 f_d + s_3 f_d \\ s_3 f_e + b_2 f_e \\ b_2 f_f + s_4 f_f \\ s_4 f_g + g_g \end{Bmatrix} \quad (\text{A2-74})$$

である。また、剛性マトリックス  $[A]$ ,  $[B]$ ,  $[C]$  は、式(A2-69)から得られる剛性マトリックスを、変位  $\{\Delta d_{12}\}$ ,  $\{\Delta d_{bg}\}$  の順に対応するよう並び変え、 $\{\Delta d_{12}\}$  と  $\{\Delta d_{bg}\}$  に応じたマトリックスの項にまとめて表したものである。

式(A2-69)より次の2式が得られる。

$$[A] \{\Delta d_{12}\} + [B] \{\Delta d_{bg}\} + \{G_{12}\} = \{f_{12}\} \quad (\text{A2-75})$$

$$[B]^T \{\Delta d_{12}\} + [C] \{\Delta d_{bg}\} + \{G_{bg}\} = \{0\} \quad (\text{A2-76})$$

式(A2-76)より,

$$\{\Delta d_{bg}\} = -[C]^{-1}[B]^T \{\Delta d_{12}\} - [C]^{-1}\{G_{bg}\} \quad (A2-77)$$

となるので, これを式(A2-75)へ代入すると,

$$[A] - [B][C]^{-1}[B]^T \{\Delta d_{12}\} + \{G_{12}\} - [B][C]^{-1}\{G_{bg}\} = \{f_{12}\} \quad (A2-78)$$

が得られる。ここで, 単材の増分剛性マトリックス $[K]$ と等価内力 $\{F\}$ を

$$[K] = [A] - [B][C]^{-1}[B]^T \quad (A2-79)$$

$$\{F\} = \{G_{12}\} - [B][C]^{-1}\{G_{bg}\} \quad (A2-80)$$

とすれば, 次式を得る。

$$[K]\{\Delta d_{12}\} + \{F\} = \{f_{12}\} \quad (A2-81)$$

## APPENDIX.3 弾塑性ばねの剛性マトリックス

### 1. 弾性ばね

図 A3-1 で示すように, ばねの  $x$  軸方向の伸び剛性,  $y$  軸まわりの回転剛性,  $z$  軸まわりの回転剛性がそれぞれ  $k_x, k_{\theta y}, k_{\theta z}$  であるばねを考える。このばねの応力と変位の関係より次式が得られる。

$$n_b - n_a = k_x (u_b - u_a) \quad (A3-1)$$

$$m_{yb} - m_{ya} = k_{\theta y} (\theta_{yb} - \theta_{ya}) \quad (A3-2)$$

$$m_{zb} - m_{za} = k_{\theta z} (\theta_{zb} - \theta_{za}) \quad (A3-3)$$

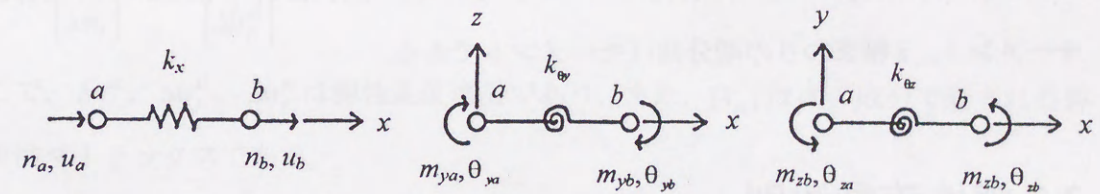


図 A3-1 ばねの力学特性

ここで,

$$\begin{aligned} n &= n_b - n_a, \quad u = u_b - u_a \\ m_y &= m_{yb} - m_{ya}, \quad \theta_y = \theta_{yb} - \theta_{ya} \end{aligned} \quad (A3-4)$$

$$m_z = m_{zb} - m_{za}, \quad \theta_z = \theta_{zb} - \theta_{za}$$

と置くと, 式(A3-1)~式(A3-3)は次のように表せる。

$$\begin{Bmatrix} n \\ m_y \\ m_z \end{Bmatrix} = [k_{el}] \begin{Bmatrix} u \\ \theta_y \\ \theta_z \end{Bmatrix} \quad (A3-5)$$

ここで,

$$[k_{el}] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\theta z} \end{bmatrix} \quad (\text{A3-6})$$

## 2. 弾塑性ばね

### 2.1. 降伏条件

ばねに軸力および曲げモーメントが作用し、ある時点でばねが降伏した場合を考える。この時、次のような降伏条件式が与えられるとする。

$$f = f(n, m_y, m_z) = 0 \quad (\text{A3-7})$$

ばねが塑性流動中は上式を満足し、また、その間、降伏関数  $f$  の全微分  $df$  は 0 であるので、次式を得る。

$$df = \frac{\partial f}{\partial n} \Delta n + \frac{\partial f}{\partial m_y} \Delta m_y + \frac{\partial f}{\partial m_z} \Delta m_z = 0 \quad (\text{A3-8})$$

ここで、 $\Delta n$ 、 $\Delta m_y$ 、 $\Delta m_z$  は増分応力であり、それぞれ増分軸力、 $y$  軸まわりの増分曲げモーメント、 $z$  軸まわりの増分曲げモーメントである。

### 2.2. 塑性流動法則

塑性化したばねでは、応力の増分はひずみの増分に対して仕事をしないと仮定すれば、次のように表せる。

$$\Delta n \cdot \Delta u^{pl} + \Delta m_y \cdot \Delta \theta_y^{pl} + \Delta m_z \cdot \Delta \theta_z^{pl} = 0 \quad (\text{A3-9})$$

ここで、 $\Delta u^{pl}$ 、 $\Delta \theta_y^{pl}$ 、 $\Delta \theta_z^{pl}$  は、それぞれ、 $x$  軸方向の塑性変形、 $y$  軸まわりの塑性ヒンジ回転角、 $z$  軸まわりの塑性ヒンジ回転角である。式(A3-8)、式(A3-9)において、軸力の成分、 $y$  軸まわり、 $z$  軸まわりの曲げモーメントの成分はそれぞれ独立であると考え

と、

$$\begin{Bmatrix} \Delta u^{pl} \\ \Delta \theta_y^{pl} \\ \Delta \theta_z^{pl} \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} \frac{\partial f}{\partial n} \\ \frac{\partial f}{\partial m_y} \\ \frac{\partial f}{\partial m_z} \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-10})$$

の関係が得られる。ここで、 $\lambda$  は比例定数である。また、

$$\phi_x = \frac{\partial f}{\partial n}, \quad \phi_y = \frac{\partial f}{\partial m_y}, \quad \phi_z = \frac{\partial f}{\partial m_z} \quad (\text{A3-11})$$

と置けば、式(A3-10)は次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta u^{pl} \\ \Delta \theta_y^{pl} \\ \Delta \theta_z^{pl} \end{Bmatrix} = \lambda \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-12})$$

### 2.3. 応力増分・変位増分

応力増分は弾性変位増分のみで与えられるとすれば、次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} \Delta n \\ \Delta m_y \\ \Delta m_z \end{Bmatrix} = [k_{el}] \begin{Bmatrix} \Delta u^{el} \\ \Delta \theta_y^{el} \\ \Delta \theta_z^{el} \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-13})$$

ここで、 $\Delta u^{el}$ 、 $\Delta \theta_y^{el}$ 、 $\Delta \theta_z^{el}$  は弾性変位増分であり、また、 $[k_{el}]$  は次の成分で表される弾性剛性マトリックスである。

$$[k_{el}] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\theta z} \end{bmatrix} \quad (\text{A3-14})$$

ところで、塑性状態における変位増分を次のような2つの成分で表す。

$$\begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta u^{el} \\ \Delta \theta_y^{el} \\ \Delta \theta_z^{el} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \Delta u^{pl} \\ \Delta \theta_y^{pl} \\ \Delta \theta_z^{pl} \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-15})$$

これより、

$$\begin{Bmatrix} \Delta u^{el} \\ \Delta \theta_y^{el} \\ \Delta \theta_z^{el} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \Delta u^{pl} \\ \Delta \theta_y^{pl} \\ \Delta \theta_z^{pl} \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-16})$$

となり、上式に式(A3-12)を代入すると、次式を得る。

$$\begin{Bmatrix} \Delta u^{el} \\ \Delta \theta_y^{el} \\ \Delta \theta_z^{el} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} - \lambda \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-17})$$

## 2.4. $\lambda$ の算出

式(A3-8)を次のように書き直す。

$$\{\phi_x, \phi_y, \phi_z\} \begin{Bmatrix} \Delta n \\ \Delta m_y \\ \Delta m_z \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{A3-18})$$

上式は式(A3-13)を用いて表すと、

$$\{\phi_x, \phi_y, \phi_z\} [k_{el}] \begin{Bmatrix} \Delta u^{el} \\ \Delta \theta_y^{el} \\ \Delta \theta_z^{el} \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{A3-19})$$

となる。この式に、変位の式(A3-17)を代入すると、次式を得る。

$$\{\phi_x, \phi_y, \phi_z\} [k_{el}] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} - \lambda \{\phi_x, \phi_y, \phi_z\} [k_{el}] \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} = 0 \quad (\text{A3-20})$$

したがって、 $\lambda$ は次のように求められる。

$$\lambda = \frac{1}{k_x \phi_x^2 + k_{\theta_y} \phi_y^2 + k_{\theta_z} \phi_z^2} \{\phi_x, \phi_y, \phi_z\} [k_{el}] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-21})$$

## 2.5. 塑性剛性マトリックス

ばねの塑性状態での応力・変位関係は式(A3-13)で与えられ、これに式(A3-17)を代入すると、次の関係式が得られる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta n \\ \Delta m_y \\ \Delta m_z \end{Bmatrix} = [k_{el}] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} - \lambda [k_{el}] \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-22})$$

上式の右辺第2項は、式(A3-21)の $\lambda$ を代入すると次のようになる。

$$\begin{aligned} \lambda [k_{el}] \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} &= [k_{el}] \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} \frac{1}{k_x \phi_x^2 + k_{\theta_y} \phi_y^2 + k_{\theta_z} \phi_z^2} \{\phi_x, \phi_y, \phi_z\} [k_{el}] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} \\ &= \frac{1}{k_x \phi_x^2 + k_{\theta_y} \phi_y^2 + k_{\theta_z} \phi_z^2} [k_{el}] \begin{Bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_z \end{Bmatrix} \{\phi_x, \phi_y, \phi_z\} [k_{el}] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} \\ &= \frac{1}{k_x \phi_x^2 + k_{\theta_y} \phi_y^2 + k_{\theta_z} \phi_z^2} \begin{bmatrix} (k_x \phi_x)^2 & (k_x \phi_x)(k_{\theta_y} \phi_y) & (k_x \phi_x)(k_{\theta_z} \phi_z) \\ (k_x \phi_x)(k_{\theta_y} \phi_y) & (k_{\theta_y} \phi_y)^2 & (k_{\theta_y} \phi_y)(k_{\theta_z} \phi_z) \\ (k_x \phi_x)(k_{\theta_z} \phi_z) & (k_{\theta_y} \phi_y)(k_{\theta_z} \phi_z) & (k_{\theta_z} \phi_z)^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{A3-23})$$

したがって、式(A3-22)は次のようになる。

$$\begin{Bmatrix} \Delta n \\ \Delta m_y \\ \Delta m_z \end{Bmatrix} = [k_{pl}] \begin{Bmatrix} \Delta u \\ \Delta \theta_y \\ \Delta \theta_z \end{Bmatrix} \quad (\text{A3-24})$$

ここで、ばねの塑性剛性マトリックスは次式で表される。

$$[k_{pl}] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_{\theta_y} & 0 \\ 0 & 0 & k_{\theta_z} \end{bmatrix} - \frac{1}{k_x \phi_x^2 + k_{\theta_y} \phi_y^2 + k_{\theta_z} \phi_z^2} \begin{bmatrix} (k_x \phi_x)^2 & (k_x \phi_x)(k_{\theta_y} \phi_y) & (k_x \phi_x)(k_{\theta_z} \phi_z) \\ (k_x \phi_x)(k_{\theta_y} \phi_y) & (k_{\theta_y} \phi_y)^2 & (k_{\theta_y} \phi_y)(k_{\theta_z} \phi_z) \\ (k_x \phi_x)(k_{\theta_z} \phi_z) & (k_{\theta_y} \phi_y)(k_{\theta_z} \phi_z) & (k_{\theta_z} \phi_z)^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A3-25})$$

## 3. 弾塑性ばねの剛性マトリックス

### 3.1. 弾性ばねの剛性マトリックス

弾性状態におけるばねの剛性マトリックスは、 $12 \times 12$  のマトリックス表示すると、次のようになる。

$$[k_{el}] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta z} \\ -k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_x & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta y} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{\theta z} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & k_{\theta z} \end{bmatrix} \quad (A3-26)$$

### 3.2. 塑性ばねの剛性マトリックス

塑性状態におけるばねの剛性マトリックスは、 $12 \times 12$  のマトリックス表示すると、次のようになる。

$$[k_{pl}] = \begin{bmatrix} k_x - \frac{1}{h}a^2 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}ab & -\frac{1}{h}ac & -(k_x - \frac{1}{h}a^2) & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}ab & \frac{1}{h}ac \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2 & -\frac{1}{h}bc & \frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & -(k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2) & \frac{1}{h}bc \\ -\frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}bc & k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2 & \frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}bc & -(k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2) \\ -(k_x - \frac{1}{h}a^2) & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}ab & \frac{1}{h}ac & k_x - \frac{1}{h}a^2 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}ab & -\frac{1}{h}ac \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & -(k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2) & \frac{1}{h}bc & -\frac{1}{h}ab & 0 & 0 & 0 & k_{\theta y} - \frac{1}{h}b^2 & -\frac{1}{h}bc \\ \frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{h}bc & -(k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2) & -\frac{1}{h}ac & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{h}bc & k_{\theta z} - \frac{1}{h}c^2 \end{bmatrix} \quad (A3-26)$$

ここで、

$$a = k_x \phi_x$$

$$b = k_{\theta y} \phi_y$$

$$c = k_{\theta z} \phi_z$$

$$h = k_x \cdot \phi_x^2 + k_{\theta y} \cdot \phi_y^2 + k_{\theta z} \cdot \phi_z^2$$

(A3-27)

