

鋼・CFRP 接着接合法とその力学性状に関する研究
(Study on the bonding method for CFRP onto steel surface and its
mechanical behavior)

2020 年 1 月

博士 (工学)

三枝 玄希

豊橋技術科学大学

鋼・CFRP 接着接合法とその力学性状に関する研究

要旨

高度経済成長期に建設された鋼構造物を構成する鋼部材が経年劣化によって腐食・減肉し、構造性能が低下している。中でも、我が国の橋梁は50年経過橋梁が年々増加し、2033年には日本の橋梁の67%がこれに相当すると試算されている。そこで、橋梁を含め、インフラストラクチャーの延命化・長寿命化が望まれており、軽量、高強度、高耐久性を有する炭素繊維強化樹脂 (Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下 CFRP) が建築・土木構造物への補修・補強において応用されている。

建築・土木構造物への補修・補強において多く採用されているのは、ハンドレイアップ成形法による現場での成形接着工法と CFRP プレートを用いた接着工法である。これらの工法にはいくつか特徴がある。ハンドレイアップ成形法による成形接着工法は自由な形状での成形によって、様々な条件に適応可能である。しかし、施工は技術者に依存してしまうことから、設計に対する安定した施工が難しい。また、ハンドレイアップ成形法は樹脂の含浸作業を1層毎に進める必要があるため、広範囲・多積層の施工の場合に工期が長期化してしまう。構造物に対する補修・補強の場合は使用者が絶え間なく存在することから、工期の長期化は懸念事項である。CFRP プレートによる接着工法は現場での接着工程のみで施工が完了するため、作業は容易であるが不陸面への接着には不向きであり、形状の自由度が限られてしまう。

そこで本論文では航空・宇宙分野、船舶分野、エネルギー分野等で適用されている真空含浸成形 (Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下 VaRTM) 法を建築・土木分野における鋼構造物の補修・補強への応用のため、鋼構造部材に対する VaRTM 法を用いた接着接合法の確立とその力学性状を分析することを目的とする。

本論文は7章で構成されている。

第1章では序論として、研究背景と目的について述べる。

第2章では本研究で用いる VaRTM 法を始めとする FRP 成形法について、既往研究を交えて述べる。

第3章では、本研究で用いた VaRTM 法による鋼構造部材への安定した成形接着工法の実現のため、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, 以下 SEM) による表面分析を行うことで、成形接着時に必要な諸手順について述べる。

第4章では、VaRTM 法を用いた鋼/CFRP 接着接合試験体について剥離時に接着層に生じる主応力評価のための試験法を提案し、既往の主応力評価式および有限要素解析との比較を行った。

第5章では、基礎的な接着強度評価として、二面引張剪断試験および鋼材の降伏を伴う3点曲げ試験を通じた接着剪断強度と曲げ変形下による接着強度の評価を行った。

第6章では鋼板に対する曲げ補強を目的に CFRP の断面設計を行い、3点曲げ試験を通して評価を行った。

第7章では各章で得られた研究結果の要約を統括し、結論とする。

Study on the bonding method for CFRP onto steel surface and its mechanical behavior

ABSTRACT

It can be confirmed that many steel structures constructed during the period of high economic growth are corroded and thinned due to aging, and the structural performance is degraded. It is estimated that the number of Japanese bridges used for more than 50 years is increased year by year, and in 2033, 67% of Japanese bridges will correspond to this. Therefore, it is desired to extend the life of infrastructure including bridges, and the carbon fiber reinforced plastic (CFRP) that has light weight, high strength, and high durability performance is used for construction and civil engineering structures. The most commonly used repairing and strengthening of buildings and civil engineering structures are the on-site molding and bonding method using hand lay-up technique and the bonding method using the CFRP plate. These methods have several characteristics. The molding and bonding method by hand lay-up can be easily applied to various conditions of shape. However, since construction depends on engineers, it is difficult to perform stable construction for the design. In addition, the hand lay-up technique requires the resin impregnation process to be carried out layer by layer, so that consuming a long construction time in the case of wide-area and multi-layer construction. In the case of repairing / strengthening of structures, since there are constant users, the extension of construction time becomes a concern. The CFRP plate bonding method is completed by only on-site bonding process, so the work is easy but not suitable for bonding to the un-uniform surface. Therefore, in this thesis, a vacuum assisted resin transfer molding (VaRTM) method, which is applied in the aerospace, marine and also energy field, is applied for repairing and strengthening steel structures in the construction and civil engineering fields. Hence, this thesis purposes to establish an adhesive bonding by using VaRTM method for steel structural members and analyzing its mechanical behavior.

This thesis consists of 7 chapters as follow.

In Chapter 1, the research background and purpose are described. .

In Chapter 2, the FRP molding process including the VaRTM method developed in this thesis is described.

In Chapter 3, in order to realize a stable molding and bonding method to steel structural members using the VaRTM method, surface analysis by a scanning electron microscope is performed. The requirement procedures for bonding method by VaRTM are also described.

In Chapter 4, proposes an experimental method for evaluating the principal stress generated in the adhesive layer at the time of peeling for steel/CFRP bonded specimen made from the VaRTM method, and compares it with the existing principal stress evaluation equation and finite element analysis.

In Chapter 5, basic bond strength evaluation, bond strength under shear loading and bending deformation through a double strap tensile shear test and a three-point bending test with yielding of

steel are evaluated.

In Chapter 6, CFRP strengthening shapes, cross-section, and taper position of CFRP were designed for bending steel plates and evaluated through a three-point bending tests.

In Chapter 7, the research findings in this thesis are summarized.

目次

	ページ
第 1 章	序論 1
第 2 章	FRP の成形法と構造物への応用例 4
2-1	ハンドレイアップ成形法 5
2-2	引抜成形法 6
2-3	レジントランスファーモールドイング法 7
第 3 章	VaRTM 法による鋼構造部材への成形接着法 9
3-1	VaRTM 法による鋼構造部材への成形接着工法 9
3-2	施工手順 11
3-3	SEM による接着接合部界面の分析 13
第 4 章	VaRTM 法による鋼/CFRP 接着接合試験体の接着強度評価法 17
4-1	既往の接着強度評価法 18
4-2	VaRTM 法による鋼/CFRP 試験体の接着強度評価法 22
4-3	接着強度評価試験 26
4-4	主応力評価 31
第 5 章	二面引張剪断試験および鋼材の降伏を伴う 3 点曲げ試験による力学性状分析 34
5-1	二面引張剪断試験 34
5-2	鋼材の降伏を伴う 3 点曲げ試験 97
第 6 章	曲げ補強を目的とした鋼板に対する CFRP の断面設計 116
6-1	補強設計の概要 117
6-2	設計耐力の算出 119
6-3	使用する炭素繊維の材料試験 120
6-4	補強設計 122
6-5	試験体の施工 128
6-6	試験結果と考察 128
第 7 章	結論 135
	謝辞 138
	付録 139

第1章 序論

高度経済成長期に建設された鋼構造物を構成する鋼部材が経年劣化によって腐食・減肉し、構造性能が低下している。中でも、我が国の橋梁は50年経過橋梁が年々増加し、2033年には日本の橋梁の67%がこれに相当すると試算されている¹⁾。そこで、橋梁を含め、インフラストラクチャーの延命化・長寿命化が望まれており、軽量、高強度、高耐久性を有する炭素繊維強化樹脂(Carbon Fiber Reinforced Polymer, 以下CFRP)が建築・土木構造物への補修・補強において応用されている²⁻⁴⁾。応用例は

- ・ 建築構造物に対する耐震補強⁵⁾
- ・ 橋梁の床版下面に接着することによる床版の疲労耐久性の向上⁶⁾
- ・ 橋梁の橋脚部に接着することによる曲げ補強、剪断補強、靱性の向上⁷⁾
- ・ トンネル内の亀裂、剥落の防止⁸⁾

等が挙げられる。これらの施工事例はCFRPを用いた構造物の補修・補強には接着接合法が用いられている。このような接着接合法には以下のような長所と短所がある。

【長所】

- ・ 機械接合に対して、母材への損傷を避けることができる
- ・ 鋼板による補修・補強に比べて、施工後の重量増加が抑制できるため地震荷重が低減される
- ・ CFRPの高耐久性により、劣悪な環境下でも施工可能である

【短所】

- ・ 施工は簡易であるが、施工範囲や積層数によっては工期が長期化する可能性がある
- ・ 剥離破壊は脆性的に生じる
- ・ 接着層界面で応力伝達を行うため、CFRPが剥離した場合に補修・補強効果が急激に低下してしまう
- ・ 剥離破壊は脆性的であるため、設計用値が低く設定されると共に施工後の維持管理が困難となる

また、CFRPによる接着接合法といってもいくつか採用されている。繊維強化樹脂(Fiber Reinforced Polymer, 以下FRP)の成形法は多種多様であり、1942年にアメリカ合衆国でガラス繊維強化樹脂(Glass Fiber Reinforced Polymer, 以下GFRP)が誕生してから、約70年で大きく分類しても、15種類を超える成形法が開発されている⁹⁾。

中でも建築・土木構造物への補修・補強において多く採用されているのは、ハンドレイアップ成形法による現場での成形接着工法とCFRPプレートを用いた接着工法である^{10, 11)}。これらの工法にはいくつか特徴がある。ハンドレイアップ成形法による成形接着工法は自由な形状での成形によって、様々な条件に適応可能である。しかし、施工は技術者に依存してしまうことから、設計に対する安定した施工が難しい。また、ハンドレイアップ成形法は樹脂の含浸作業を1層毎に進める必要があるため、広範囲・多積層の施工の場合に工期が長期化してしまう。構造物に対する補修・補強の場合は使用者が絶え間なく存在することから、工期の長期化は懸念事項である。CFRPプレートによる接着工法は現場での接着工程のみで施工が完了するため、作業は容易であるが不陸面への接着には不向きであり、形状の自由度が限られてしまう。

そこで本論文では航空・宇宙分野、船舶分野、エネルギー分野等で適用されている真空含浸成形

(Vacuum assisted Resin Transfer Molding, 以下 VaRTM) 法⁹⁾を建築・土木分野における鋼構造物の補修・補強への応用のため、以下の接着接合工法に見られる課題を解決することを目的に研究を行った。

- 1) VaRTM 法を応用し、ハンドレイアップ成形法を持つ自由な形状での成形を満足しつつ、CFRP プレートによる接着工法のような工期の短縮化が見込める、安定した成形の実現
- 2) VaRTM 法による接着接合工法の設計を行うための試験法と推定法の提案
- 3) 接着強度の変動を可能な限り抑える工法の実現とともに、その剥離破壊時の接着層に生じる応力の評価

以上より、本論文は

第 1 章では序論として、研究背景と目的について述べる..

第 2 章では本研究で用いる VaRTM 法を始めとする FRP 成形法について、既往研究を交えて述べる

第 3 章では、本研究で用いた VaRTM 法による鋼構造部材への安定した成形接着工法の実現のため、走査型電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope, 以下 SEM) による表面分析を行うことで、成形接着時に必要な諸手順について述べる.

第 4 章では、VaRTM 法を用いた鋼/CFRP 接着接合試験体について剥離時に接着層に生じる主応力評価のための試験法を提案し、既往の主応力評価式および有限要素解析との比較を行った.

第 5 章では、基礎的な接着強度評価として、二面引張剪断試験および鋼材の降伏を伴う 3 点曲げ試験を通した接着剪断強度と曲げ変形下による接着強度の評価を行った.

第 6 章では鋼板に対する曲げ補強を目的に CFRP の断面設計を行い、3 点曲げ試験を通して評価を行った.

第 7 章では各章で得られた研究結果の要約を統括し、結論とする.

参考文献

- 1) 国土交通省：https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/yobo1_1.pdf
- 2) 土木学会：複合構造レポート 12 FRP によるコンクリート構造の補強設計の現状と課題，2014.11
- 3) 土木学会：複合構造レポート 09 FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術，2013.11
- 4) 平松徹：よくわかる炭素繊維コンポジット入門，2015.12
- 5) 益尾潔：炭素繊維シートおよび鋼板で耐震補強された軸力と曲げせん断を受ける RC 柱の変形性能の評価，日本建築学会構造系論文集，第 564 号，pp.117-124，2003.2
- 6) 小林朗，蔡華堅，下西勝，松井繁之：炭素繊維シート格子接着工法により補強した RC 床版の疲労耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.1513-1518，2005
- 7) 張広鋒，星隈順一，堺淳一：炭素繊維シートと鋼板による RC 橋脚の耐震補強とその効果，土木技術資料 51-12，2009
- 8) 呉智深，朝倉俊弘，吉澤弘之，袁鴻，小林朗，高橋徹：連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究，土木学会論文集，No.662 V-49，pp.45-58，2000.11
- 9) 強化プラスチック協会：基礎からわかる FRP，2016.4
- 10) 石川敏之：鋼橋の CFRP 板接着補修・補強の現状と課題，日本接着学会誌，Vol.45，No.4，2009
- 11) (株) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル，2013.10

第2章 FRP の成形法と構造物への応用例

本章では、1942年にアメリカ合衆国で誕生し、現在までに建築・土木分野で構造物の補修・補強に応用されたFRPについて述べるとともに様々な成形法の内、代表的なFRPの成形法であるハンドレイアップ成形法、引抜成形法と本論文で採用したレジントランスファーモールドイング法について述べる。それらの成形法が建築・土木分野で構造物の補修・補強に応用されている例を既往研究と交える。なお、本論文ではFRPに用いる樹脂は熱硬化性樹脂を用いる場合に限定をして述べる。

現在、建築・土木分野において用いられるFRPはガラス繊維強化樹脂(Glass Fiber Reinforced Plastic, 以下GFRP)、CFRP、アラミド繊維強化樹脂(Aramid Fiber Reinforced Plastic, 以下AFRP)がある。各繊維と一般構造用圧延鋼材であるSS400材の物性値を表2-1に示す。炭素繊維は引張強度、引張弾性率ともに繊維によって様々であるが、引張弾性率は突出して高い値となっている。対して、アラミド繊維は高い引張強度を持ちながらも、低い引張弾性率を持っている。価格の面では、炭素繊維・アラミド繊維は極めて高価であり、ガラス繊維の数倍から数十倍の価格差がある。GFRPは浴槽や浄化槽などの構造用途以外での住宅向けの需要が高い¹⁾。構造用途では、価格面で秀でていることから、GFRPを用いた構造用部材の研究が進んでいる²⁾。また、優れた機械的性質を持つ炭素繊維との複合繊維強化樹脂(Hybrid Fiber Reinforced Plastic, 以下HFRP)として応用化を試みる研究・開発が進んでいる³⁾。CFRPはインフラストラクチャーに対する補修・補強分野で多く用いられている。応用例については、後述する。AFRPはその耐アルカリ性と低い引張弾性率から、RC構造物に対する研究・開発が多くなされている⁴⁾。⁶⁾

表 2-1 材料別の物性値

	炭素繊維 (中弾性型, 高強度型)	ガラス繊維 (E ガラス)	アラミド繊維 (ケプラー49)	一般構造用圧延部材 (SS400 材)
引張強度 [MPa]	2000~7000	3500	3500	400
引張弾性率 [GPa]	200~400	70	20	200

2-1 ハンドレイアップ成形法

ハンドレイアップ法は図 2-1 に示すように、任意形状の型枠に強化材を乗せ、ローラーによって樹脂を含浸させながら所定の形状と厚さに手作業によって積み重ねる成形法である⁷⁾。FRP の成形法の基本成形法であり、簡易な手法であることから様々な分野で利用されている。ハンドレイアップ法は 1953 年に FRP が日本へ導入された当初からの成形法である。特徴は多品種少量から大型製品、複雑形状での成形が可能となっている。樹脂の含浸はローラーのよる接触厚によって行い、含浸・脱泡が完了次第、積層を進める。設備の投資額が少なく、比較的容易に寸法変更に対応が可能である。しかし、成形が技術者の技能に依存してしまうことによって、完成品の厚みや機械的性質にバラつきが生じやすい。また、手作業による施工であることから、広範囲・多積層には適していない。

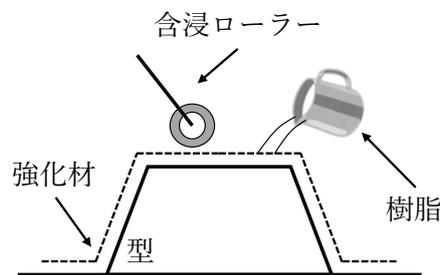


図 2-1 ハンドレイアップ法の概要図

ハンドレイアップ法は建築・土木分野においても、採用例が多い^{8,9)}。建築分野では RC 構造物の耐震補強や土木分野では橋梁の床版の疲労耐久性の向上を始め、トンネルの剥落防止にも CFRP をハンドレイアップ法によって成形接着することで結果が得られている。

2-2 引抜成形法

引抜成形法は図 2-2 に示すように、強化材に樹脂を含浸させながら金型内に引き込みながら加熱硬化させることで成形する方法である⁷⁾。一般に強化材はロービング材を用いて一方向に機械的性質を持たせる。強化材の引き込みから樹脂の含浸・硬化まで自動化が可能であるため再現性の高い複雑な断面形状を有する長尺部材の成形が可能である。ただし、少量生産に向かないことから、個々のケースに合わせたフレキシブルな活用は難しい。

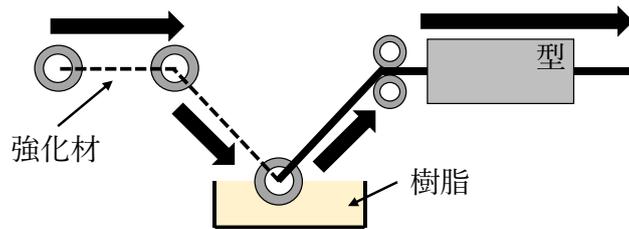


図 2-2 引抜成形法の概要図

引抜成形法は工場ですべて成形された既製品として、現場で接着するのみの工法として構造物の補修・補強に応用されている^{10) 11)}。CFRP では CFRP プレートまたは CFRP シートとして安定した機械的性質と断面性能によって広範囲の補修・補強に用いられている。また、ハンドレイアップ法は樹脂の含浸と接着を同時に行う成形法であるため、樹脂の選定の際には含浸性能と接着性能の両方を鑑みる必要がある。しかし、CFRP プレートを用いた接着工法の場合は既に含浸されているため接着の際には接着性能のみを考慮して樹脂の選定が可能となる。しかし、接着面が不陸面を有する場合には接着が困難になるため、適用ケースはハンドレイアップ法よりも限定される。

2-3 レジントランスファーモールドイング法

レジントランスファーモールドイング（Resin Transfer Molding 以下、RTM）法は図 2-3 に示すように合わせ型枠内に強化材を設置し、型枠内の樹脂注入口から含浸樹脂を圧入する成形法である。日本には 1970 年代とハンドレイアップ成形法に約 20 年遅れる形で導入された。特徴は成形に技術者の技量が不要であり、再現性の高い成形が可能であることである。また、クローズド成形であることから作業環境が良いといった点もある。

RTM 法にもいくつか種類がある。本論文で採用している VaRTM 法は RTM 法の中でも型枠内を減圧し、大気圧によって樹脂を吸引するインフュージョン成形法に属する。VaRTM 法は図 2-4 に示すように、RTM 法では合わせ型枠がどちらも高剛性の型枠であったの対し、上型を減圧下で強化材の形状に追随できるようにプラスチック製のフィルム等を用いる。また、減圧状態を確保させるためのシーラントテープや樹脂の流動を促進させるためのフローメディアを設置することにより成形する。RTM 法と同様に再現性の高い成形が可能で、真空減圧によって引抜成形法に近い高い繊維体積含有率を持った成形品を得ることができる。

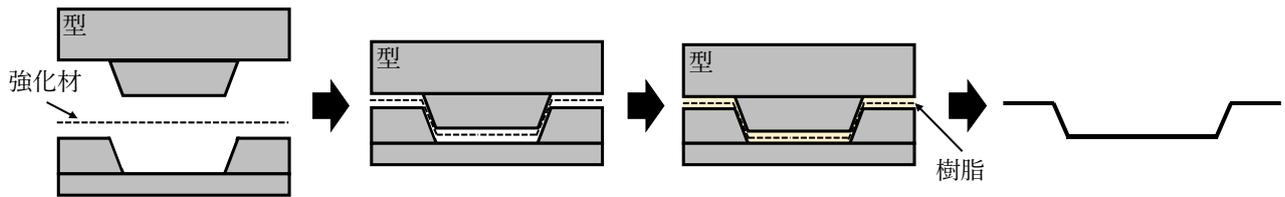


図 2-3 RTM 法の概要図

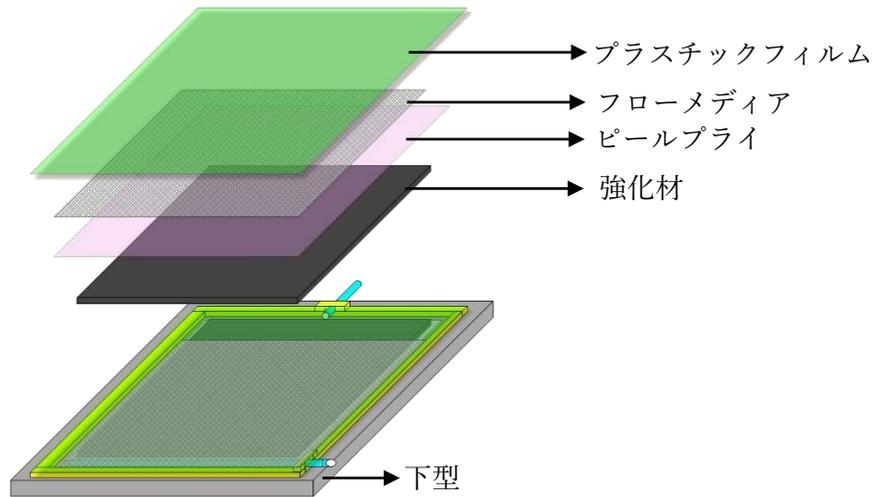


図 2-4 VaRTM 法の概要図

RTM 法を始め、VaRTM 法によって成形された CFRP を構造物の補修・補強に応用した例は見当たらない。これは、工場生産による既製 CFRP を現場で接着する場合は引抜成形法による CFRP プレートを用いる接着工法が広がっているためであると考えられる。

参考文献

- 1) 松井隆幸：ガラス繊維・炭素繊維・複合材料の産業論による分析，富大経済論集，第 52 卷 2 号，2006.11
- 2) 石井佑弥，小泉公佑，中村一史，古谷嘉康，中井裕司，西田雅之：トラス桁形式 GFRP 製橋梁用検査路の使用性と耐荷力に関する研究，土木学会論文集，Vol.72，No.5，II 33-II 45，2016
- 3) 白木健亮，睦好宏史，Nguyen Duc Hai，石濱達也：ハイブリッド FRP と超高強度繊維補強コンクリートから成る合成桁の曲げ性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.2，2010
- 4) 岸徳光，小室雅人，栗橋祐介，三上浩，船木隆史：AFRP ロッド下面埋設曲げ補強 RC 梁の耐衝撃性向上効果に関する実験的検討，構造工学論文集，Vol.63A，pp.1188-1200，2017.3
- 5) 池田翔哉，小室雅人，三上浩，岸徳光：AFRP シート緊張接着曲げ補強 RC 梁の静的耐荷性状に関する数値解析手法の妥当性検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.1321-1326，2013
- 6) 安藤直文，藤原保久，仁平達也，田中章：アラミド FRP ロッドによる RC 橋脚の耐震補強効果に関する実験的検討，プレストレストコンクリート工学会 第 24 回シンポジウム論文集，pp.83-88，2015.10
- 7) 強化プラスチック協会：基礎からわかる FRP，2016.4
- 8) 服部篤史，山本貴士，嘉指成詞，宮川豊章：連続繊維シート貼付けによる下水道コンクリートの補修・補強，土木学会論文集，No.599 V-40，pp.59-69，1998.8
- 9) 呉智深，朝倉俊弘，吉澤弘之，袁鴻，小林朗，高橋徹：連続繊維シートの貼付によるコンクリート片の剥落防止効果に関する実験的・解析的研究，土木学会論文集，No.662 V-49，pp.45-58，2000.11
- 10) 山口晃司，金原勲，影山和郎，高梨正祐：FRP シートによる鋼構造補修システムにおける海水環境中の接着強度評価に関する研究，日本造船学会論文集，第 188 号，pp.719-726，2000.7
- 11) 張広鋒，星隈順一，堺淳一：炭素繊維シートと鋼板による RC 橋脚の耐震補強とその効果，土木技術資料 51-12，2009

第3章 VaRTM 法による鋼構造部材への成形接着工法

本章では、2章で示した VaRTM 法を鋼構造部材に対する補修・補強工法への提案を行う。FRP を用いた構造物への補修・補強方法として、ハンドレイアップ成形法を用いた現場での成形接着工法と CFRP プレートを用いた接着工法について 2 章にて述べた。まず始めに、これらの工法における長所と短所を表 3-1 にまとめる。表 3.1 から、形状の自由度が高く、機械的性質と断面性能が安定し、施工範囲や積層数が施工期間に影響しないような成形接着法がより汎用的に構造物の補修・補強工法へ応用が可能であると考えられる。

3-1 VaRTM 法による鋼構造部材への成形接着工法

本論文では VaRTM 法を鋼構造部材への補修・補強方法へ応用する。図 2-4 に示したように、VaRTM 法は高剛性の下型に強化材を設置し、プラスチックフィルムによって気密性を保ち内部を減圧させる。この減圧により、下型に沿った形状が実現される。通常は樹脂の硬化後に下型から離し、FRP 材として出荷を行う。しかし、図 3-1 に示すように下型を既存鋼構造物の部材とし、表面処理を行った状態で強化材を設置し、成形を行うことで成形と接着を同時に行うことが可能となる。この工法によって既存鋼構造物の部材形状に沿って、安定した機械的性質と断面性能が得られる現場での成形接着工法が可能となる。

表 3-1 成形法による接着接合法の特徴

	成形法	
	ハンドレイアップ成形法による成形接着法	CFRP プレートによる接着工法
形状の自由度	手作業による成形接着のため、個々の現場に対応した形状での施工が可能。	引抜成形法を用いた工場生産品を用いることから限定される。特に不陸面への対応は困難。
成形品の安定性	施工を行う技術者の技術量に依存するため、機械的性質や断面性能に安定性を欠く。	引抜成形法によって、極めて安定した機械的性質と断面性能を持つ。
工期	施工範囲と積層数に応じて、工期が大きく左右される。	成形品を使用することから、工期はさほど変化しない。

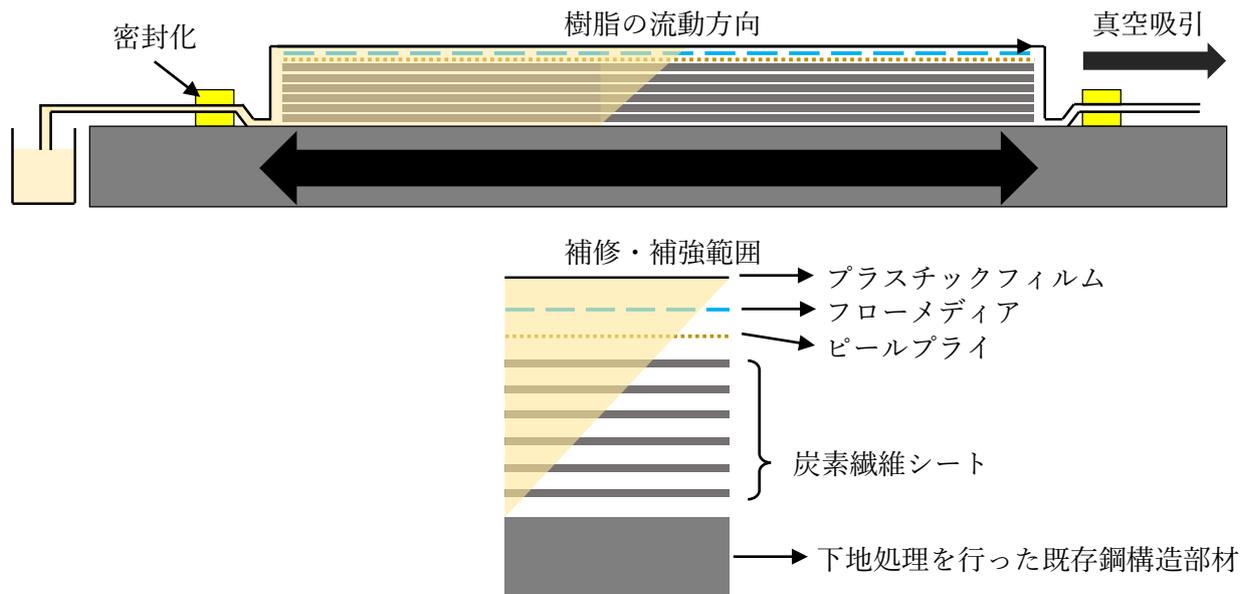


図 3-1 本論文で提案される VaRTM 法を用いた成形接着工法

3-2 施工手順

本節では 3-1 節で提案した VaRTM 法による成形接着工法の手順を述べる。図 3-2 に各手順の図を示す。施工手順は以下に示すような手順で行う。

【施工手順】

- (a) 鋼板の下地処理：補修・補強範囲である鋼板表面にロータリーブラスター¹⁻⁴⁾を用いて下地処理を行う。ロータリーブラスターを用いた場合、1 種ケレン相当である鋼材の酸化被膜を完全に除去することができ、鋼材面の完全な露出が可能となる。
- (b) 下地処理面の粗さ測定：下地処理後、粗さ測定を行う。本論文では、下地処理後の粗さは 20 μm 以上としている。
- (c) シーラントテープの貼り付け：シーラントテープで補修・補強範囲を囲う
- (d) 含浸樹脂による事前塗布：含浸樹脂を下地処理面に事前に塗布を行う。事前塗布の理由は以下の通りである。
 - ・ 下地処理面の保護を行う。
 - ・ 強化材の設置の際に事前塗布によって落下・ズレの防止になる。
 - ・ 接着性能の向上により、接着強度の安定性に繋がる接着性能の向上は図 3-3 に示すように、事前塗布を行っていない場合の二面引張剪断試験体の剥離面について、SEM を用いた表面分析を行った。SEM による表面分析は次節にて述べる。力学性状の向上については、4 章にて評価を行う。
- (e) チョップドストランドガラスマット (Chopped strand glass Mat, 以下 CM) の設置：VaRTM 法は真空減圧下で樹脂を含浸させることから、接着層の厚さが極めて小さくなる。接着層を確保することで、鋼と CFRP による電蝕を防止する目的がある。従来の補修・補強工法では、ハンドレイアップ成形法による成形接着法の場合は十分な樹脂層が形成され、CFRP プレートによる接着工法の場合にも接着用樹脂によって鋼と CFRP は接触しない。
- (f) 強化材および副資材の設置：CM の設置後、強化材である炭素繊維シートと副資材 (ピールプライ、フローメディア) を設置する。
- (g) プラスチックフィルムによるバギング：プラスチックフィルムを用いて補修・補強範囲を密封する。
- (h) 真空吸引：真空ポンプによって密封した補修・補強範囲内部を真空化する。本論文では、樹脂導入時の真空度は-100kPa とする。
- (i) 樹脂の導入：所定の真空度に到達後、樹脂の導入を行う。
- (j) 脱型：樹脂の硬化後、シーラントテープ、プラスチックフィルム、ピールプライ、フローメディアを除去する。



(a) 鋼板の下地処理



(b) 下地処理面の粗さ測定



(c) シーラントテープの貼り付け



(d) 含浸樹脂による事前塗布



(e) CM の設置



(f) 強化材および副資材の設置



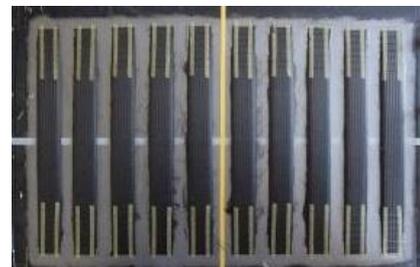
(g) プラスチックフィルムによるバギング



(h) 真空吸引



(i) 樹脂の導入



(j) 脱型

図 3-2 VaRTM 法を用いた成形接着工法の手順

3-3 SEMによる接着接合部界面の分析

SEMによる接着接合部界面の分析は図3-3に示すような、事前塗布を行わずに成形接着を行った10体の試験体について二面引張剪断試験を行った。なお、試験体は鋼材の表面処理面への事前塗布を行っていない他、CMではなくサーフェスマットを電蝕防止材として採用している。試験体の接着幅は約40mm、接着長は200mmとしている。表3-2に試験結果、図3-4に試験後の接着面を示す。表3-2から、単位接着面積あたりの荷重は平均で4.544MPa、変動係数11.49%とやや安定した接着強度であるものの約4.5MPaと低い結果となっている。これは図3-4に示しているように、破壊モードが全ての試験体を通して鋼材界面での剥離破壊が占めていることが低い接着強度の原因であると考えられる。

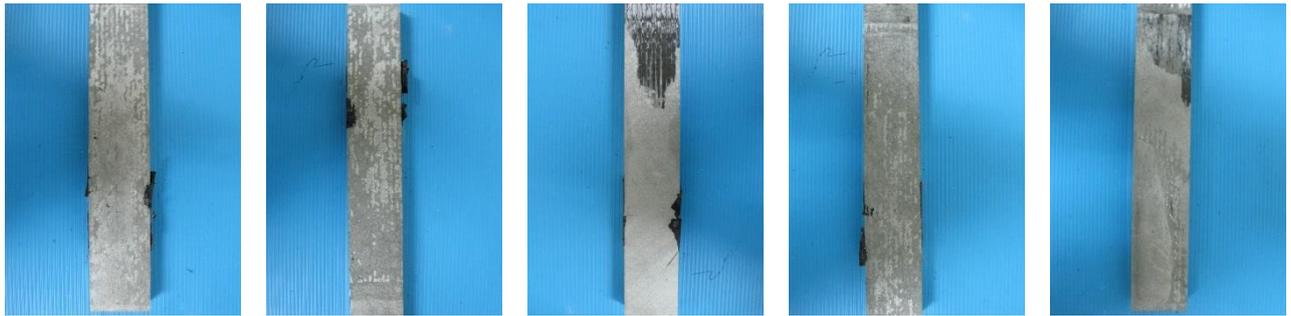
そこで、試験体10に対してSEMによる鋼材表面の分析を行った⁵⁾。分析対象は図3-5に示すように試験後のCFRPを切断し、白金蒸着法によって分析した。図3-6にSEMによって得られた分析結果を示す。分析深さは0.0042mmとした。分析結果から、CFRP表面には微量のケイ素原子と鉄原子が確認された。これにより、鋼材表面、サーフェスマット、CFRP間に樹脂が完全に導入されていなかったことがわかる。



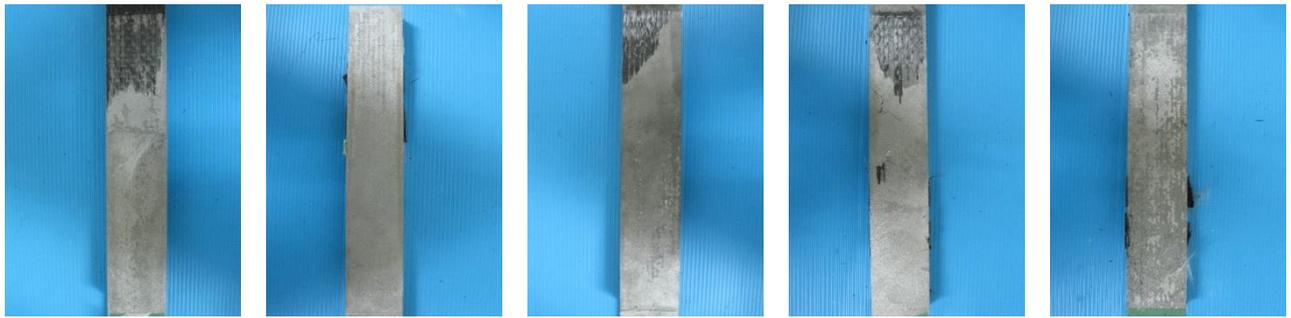
図3-3 事前塗布を行っていない試験体の二面引張剪断試験

表3-2 試験結果

試験体名	接着幅 [mm]	接着面積 [mm ²]	最大荷重 [kN]
試験体 1	38.32	7664	71.112
試験体 2	38.28	7656	64.612
試験体 3	36.00	7200	57.640
試験体 4	39.72	7944	68.324
試験体 5	38.36	7672	69.572
試験体 6	38.61	7722	76.196
試験体 7	38.14	7628	58.512
試験体 8	39.02	7804	81.184
試験体 9	38.29	7658	62.200
試験体 10	36.51	7302	80.940

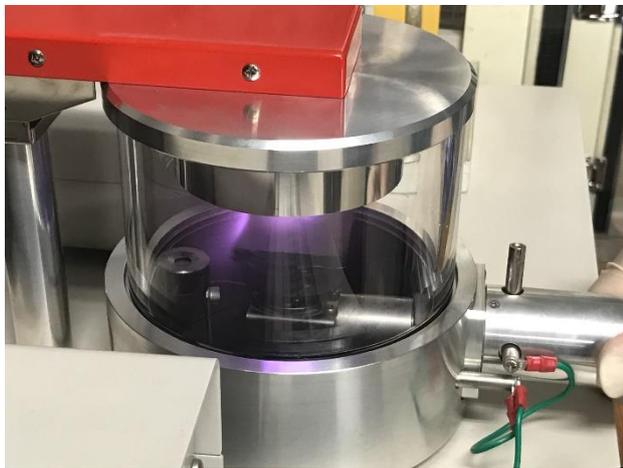


(a) 試験体 1 (b) 試験体 2 (c) 試験体 3 (d) 試験体 4 (e) 試験体 5

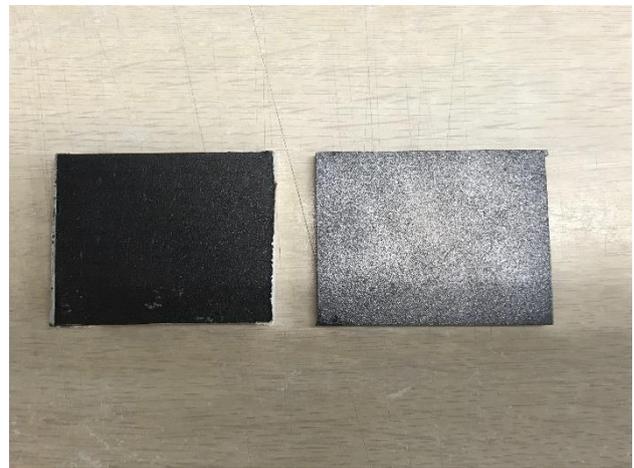


(f) 試験体 6 (g) 試験体 7 (h) 試験体 8 (i) 試験体 9 (j) 試験体 10

図 3-4 試験後の接着接合面

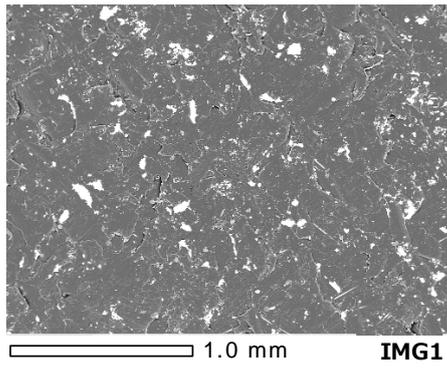


(a) 白金蒸着中の様子

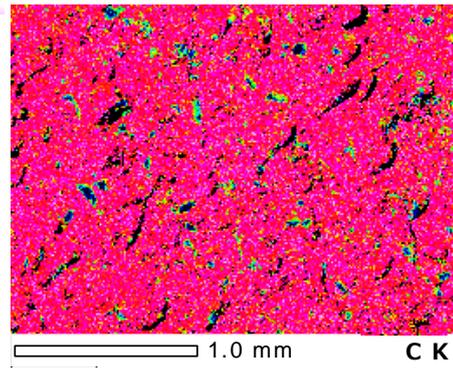


(b) 分析対象 (左が蒸着前, 右が蒸着後)

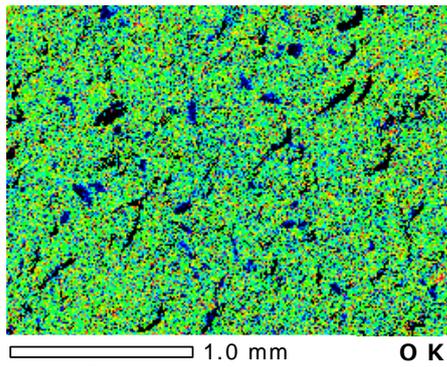
図 3-5 試験体 10 における接着接合部の界面分析



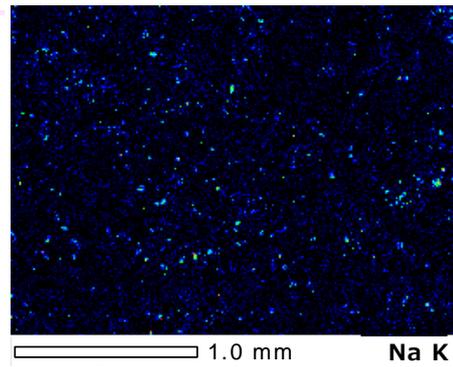
(a) 表面



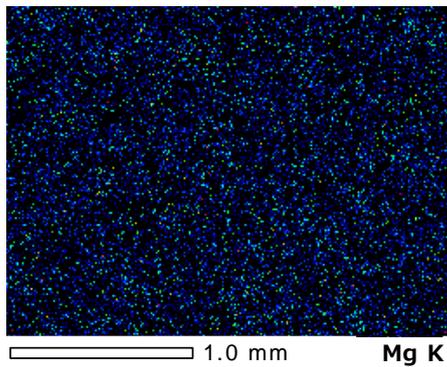
(b) 炭素



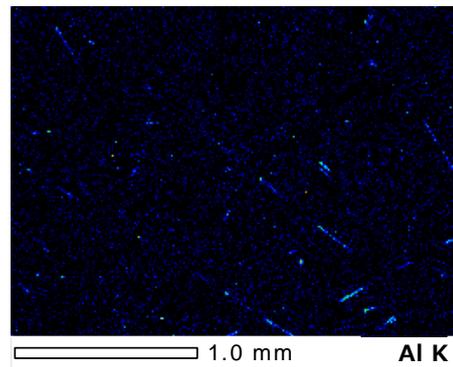
(c) 酸素



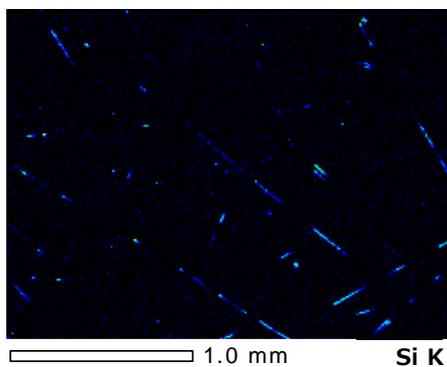
(d) ナトリウム



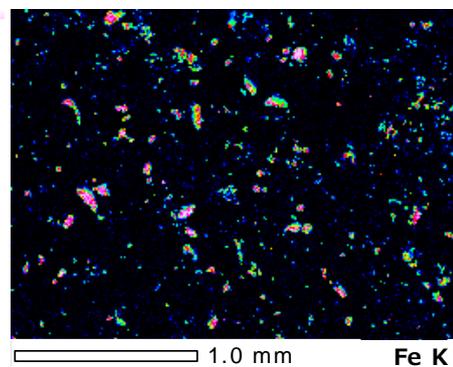
(e) マグネシウム



(f) アルミニウム



(g) ケイ素



(h) 鉄

図 3-6 分析結果

参考文献

- 1) 尾田光, 近藤照夫, 桑原幹雄: 鋼材表面を粗面化する動力工具の性能評価, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2016.8
- 2) Robert J. Stango, Piyush Khullar: Development of Bristle Blasting Process for Corrosion Removal and Generating Anchor Profile, PROCEEDINGS, INDOCOATING&CORROSION SUMMIT 2008
- 3) 辻良尚, 阿部米雄, 中野正: ブリストールブラスターによる素地調整, 日本橋梁・鋼構造物塗装技術協会 技術資料, 2010
- 4) 木村聡, 丹波寛夫, 閑上直浩, 山口隆司, 松村政秀, 杉山裕樹: 異種接合面処理を有する摩擦接合継手のすべり耐力試験, 土木学会第 66 回年次学術講演会, 2011.9
- 5) 日本表面科学会: ナノテクノロジーのための走査型電子顕微鏡 (表面分析技術選書), 2004.2

第4章 VaRTM 法による鋼/CFRP 接着接合試験体の接着強度評価法

近年の接着強度評価法は破壊時に接着剤に生じる主応力または剥離破壊時の接着剤のエネルギー解放率による評価が主流である。主応力による評価法は式 (1) に示されるような剥離破壊時の接着層に生じる垂直応力と剪断応力を用いた評価が用いられている¹⁻³⁾。エネルギー解放率による評価は図 4-1 に示すような 3つの破壊モードに対して、平面応力状態を仮定した場合、式 (2) で示される⁴⁾。

$$\sigma_p = \frac{\sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_y}{2}\right)^2 + \tau^2} \quad (1)$$

σ_p : 主応力, σ_y : 接着面垂直方向の応力, τ : 剪断応力

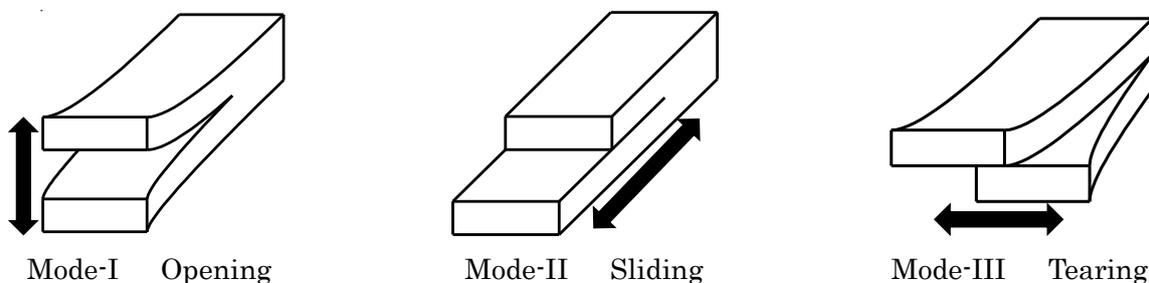


図 4-1 エネルギー解放率による評価に用いる破壊モード

$$G = \frac{K_I^2}{E} + \frac{K_{II}^2}{E} + \frac{K_{III}^2}{E}(1+\nu) \quad (2)$$

G : エネルギー解放率, K_I : Mode-I の応力拡大係数, K_{II} : Mode-II の応力拡大係数,
 K_{III} : Mode-III の応力拡大係数, E : 弾性係数, ν : ポアソン比

本章では、VaRTM 法によって鋼材表面に成形接着した鋼/CFRP 接着接合試験体の接着強度評価を式 (1) の主応力評価によって行う。4-1 節では既往の接着強度評価法について述べる。4-2 節では本論文で提案する接着強度評価法を述べる。4-3 節では 4.2 節で提案した接着強度評価法を用いて実験を行い、4.1 節で述べた既往の評価法と FEA による評価によって提案された接着強度評価法の有用性について述べる。

4-1 既往の接着強度評価法

文献 5)では、接着強度評価法として図 4-2 に示すような、4つの評価事例が示されている。これらの試験法による主応力は式 (3) ~ (10) で算出することができる。

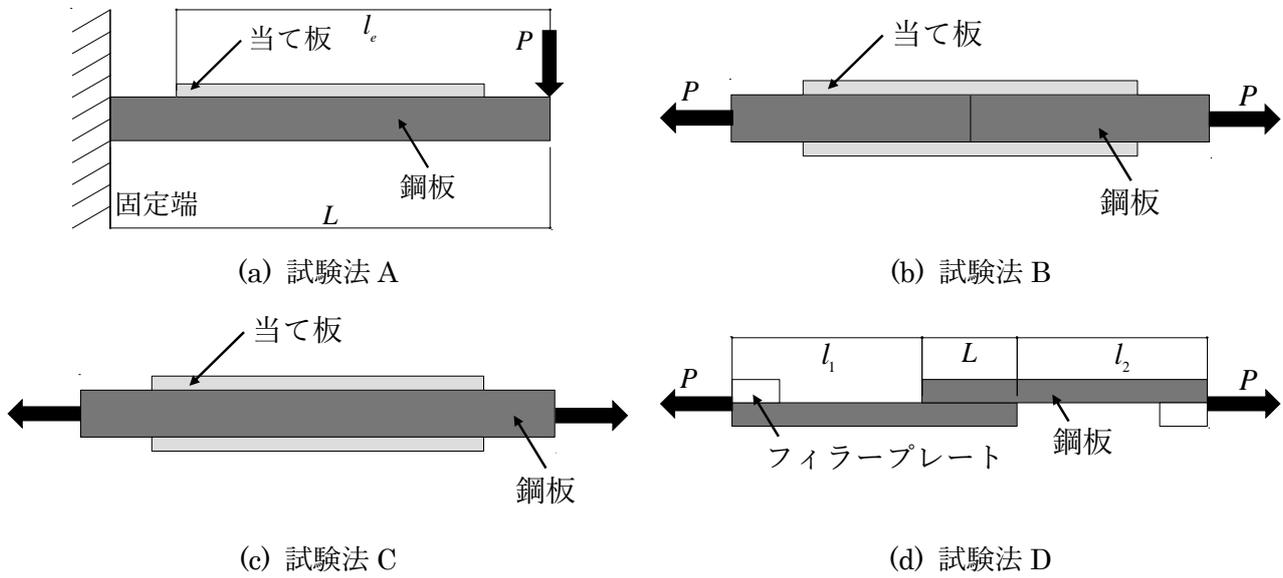


図 4-2 接着強度の評価法

【試験法 A】

$$\tau_{eMe} = \kappa \frac{c_b K}{ab_f} \left(M_e + \frac{\kappa}{c_b} Q_e \right) \quad (3)$$

$$\sigma_{eMe} = \frac{c_b \omega_b d_f K}{ab_f} \left[\left(2 - \frac{c_b}{\omega_b} + \frac{2a}{d_f K} \frac{\omega_b}{c_b} \frac{I_f}{nI_s} \right) M_e + \kappa \frac{2}{c_b} Q_e \right] \quad (4)$$

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{b_s E_e}{h} \frac{Z_1}{4E_f I_f}}, \quad c = \sqrt{\frac{b_s G_e}{h} \frac{a^2}{KZ_1 E_s I_s}}, \quad W = \frac{4}{4 + \left(\frac{c}{\omega}\right)^4} \frac{cJ}{Z_1}, \quad J = d_f - (Z_1 - 1)d_s,$$

$$K = \frac{1}{1 + Z_1 Z_2 \frac{r_s^2}{a^2}}, \quad a = d_s + d_f + h, \quad r_s = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}}, \quad Z_1 = 1 + \frac{I_f}{nI_s}, \quad Z_2 = 1 + \frac{nA_s}{A_f}$$

τ_{eMe} : 当て板の端部における接着用樹脂材料の剪断応力,

σ_{yeMe} : 当て板の端部における接着用樹脂材料の垂直応力, E_s : 鋼板の弾性係数,

E_f : 当て板の弾性係数, b_s : 鋼板の幅, b_f : 当て板の幅, A_s : 鋼板の断面積,

A_f : 当て板の断面積, h : 接着用樹脂材料の厚さ, E_e : 接着用樹脂材料の圧縮弾性係数,

G_e : 接着用樹脂材料の剪断弾性係数, d_f : 当て板の図心から当て板上面までの距離,

κ : 当て板の左端に対して $\kappa = 1$, 右端に対して $\kappa = -1$, n : 鋼材と当て板の弾性係数比

I_s : 鋼板の断面二次モーメント, I_f : 当て板の断面二次モーメント, M_e : 破壊時荷重において当て板端部に生じる曲げモーメント, Q_e : 破壊時荷重において当て板端部に生じる剪断力

【試験法 B, C】

$$\tau_{eNe} = \frac{c}{2b}(1 - \xi_0)P \quad (5)$$

$$\sigma_{yeNe} = 2\psi \frac{\omega}{c} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 - \frac{c}{\omega} + 2 \right] \tau_{eNe} = \frac{1}{2}(2\omega - c)h\tau_{eNe} \quad (6)$$

$$\tau_{eNo} = \frac{c}{2b}\xi_0 P \quad (7)$$

$$\sigma_{yeNo} = -2\psi \frac{\omega}{c} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 - \frac{c}{\omega} + 1 \right] \tau_{eNo} \quad (8)$$

$$c = \sqrt{\frac{b_f G_e}{h} \frac{2}{1 - \xi_0} \frac{1}{E_s A_s}}, \quad \omega = \sqrt[4]{\frac{b_f E_e}{4h} \frac{1}{E_f I_f}}, \quad \psi = \frac{ct_f}{4 + \left(\frac{c}{\omega} \right)^4}, \quad \xi_0 = \frac{1}{1 + \frac{2E_f A_f}{E_s A_s}}$$

τ_{eNe} : 当て板の端部における接着用樹脂材料の剪断応力,

σ_{yeNe} : 当て板の端部における接着用樹脂材料の垂直応力,

τ_{eNo} : 当て板の切断部における接着用樹脂材料の剪断応力,

σ_{yeNo} : 当て板の切断部における接着用樹脂材料の垂直応力, E_s : 鋼板の弾性係数,

E_f : 当て板の弾性係数, b_f : 当て板の幅, t_f : 当て板の厚さ, A_s : 鋼板の断面積,

A_f : 当て板の断面積, I_f : 当て板の断面二次モーメント, h : 接着用樹脂材料の厚さ,

E_e : 接着用樹脂材料の圧縮弾性係数, G_e : 接着用樹脂材料の剪断弾性係数, P : 破壊時荷重

【試験法 D】

$$\tau_{eSe} = -\frac{1}{b_s} \left(\lambda B_1 - \frac{K Q_{cr}}{a} \right) \quad (9)$$

$$\sigma_{yeSe} = -\frac{1}{b_s} \omega (C_1 + C_4) \quad (10)$$

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{b_s E_e Z_1}{h 2 E_s I_s}}, \quad \lambda^2 = \frac{b_s G_e a(a-h)}{h 2 E_s I_s K}, \quad K = \frac{1}{1 + \frac{4r^2}{a(a-h)}}$$

$$B_1 = \frac{1}{\sinh(\lambda l)} \left[P + \frac{K}{a} Q l - B_2 (\cosh(\lambda l) - 1) \right], \quad B_2 = -\frac{1}{2} (1 - K) P + \frac{K}{a} M,$$

$$C_1 = -\frac{1}{Y_1 + Y_0 Y_2} \left[-W Y_0 Y_2 M - \frac{W}{\cosh(\omega l) \sin(\omega l)} M + \left(\frac{W}{2\omega} (Y_3 - Y_4) - Y_3 \right) Q \right],$$

$$C_4 = -\frac{1}{Y_1 + Y_0 Y_2} \left[-W Y_1 M - \frac{W}{\cosh(\omega l) \sin(\omega l)} M + \left(\frac{W}{2\omega} (Y_3 - Y_4) - Y_3 \right) Q \right]$$

$$Y_0 = \frac{\tanh(\omega l)}{\tan(\omega l)}, \quad Y_1 = \frac{\tanh(\omega l) - 1}{\tanh(\omega l)}, \quad Y_2 = \frac{\tanh(\omega l) + 1}{\tan(\omega l)},$$

$$Y_3 = \frac{1}{\tan(\omega l)} \left(\frac{1}{\sin(\omega l) \cosh(\omega l)} - \frac{1}{\sinh(\omega l) \cos(\omega l)} \right), \quad Y_4 = \frac{1}{\tan(\omega l)} (Y_1 + Y_2)$$

τ_{eSe} : 鋼板の端部における接着用樹脂材料の剪断応力,

σ_{yeSe} : 鋼板の端部における接着用樹脂材料の垂直応力,

l : 接着長さ, b_s : 鋼板の幅, a : 上下の鋼板図心間距離, P : 破壊時荷重,

M_{cr} : 破壊時荷重において破壊が生じる鋼板端部に作用する曲げモーメント 2 箇所の鋼板端部の内, 小さい方を採用する.

Q_{cr} : 破壊時荷重において破壊が生じる鋼板端部に作用する剪断力 2 箇所の鋼板端部の内, 小さい方を採用する. 鋼板 2 箇所 で算定した曲げモーメントの勾配から算出する.

4-2 VaRTM 法による鋼/CFRP 試験体の接着強度評価法

4-1 節で示した試験法は鋼板に対して当て板を接着剤によって接着する試験法となっている。しかし、本論文で提案した VaRTM 法は真空吸引によって、接着層が形成されることから VaRTM 法による鋼材への成形接着法に適用が可能かを検証する必要がある。そこで、本論文では 4-1 節で示した試験法 A を参考に、図 4-3 のような試験法を提案する。本試験法は、鋼材の引張側に CM および CFRP を VaRTM 法によって成形接着を行う。また、載荷点である試験体中央部に CFRP を接着させないことで、試験区間中央部での剥離破壊となる。

主応力の評価式は以下に示す 2 式を用いる。1 つ目は試験法 A をおける評価式 (3), (4) を提案する評価法へ修正した式 (11), (12), 2 つ目は石川らが提案した評価式⁶⁾である式 (13), (14) とする。また、これらの評価式と共に FEA によって評価式の整合性を確認する。評価に用いる荷重は 2 つの CFRP の内、先に剥離破壊が発生した荷重ステップとする。剥離荷重は CFRP の剥離開始点から 10mm の位置に貼付した歪ゲージから得られる荷重-歪関係を用いる。

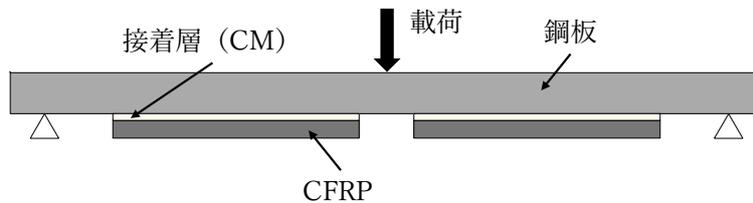


図 4-3 提案する接着強度評価法

図 4-4 に文献 5)を参考とした主応力評価法, 図 4-5 に石川らが提案している評価式⁶⁾の概要図を示す.

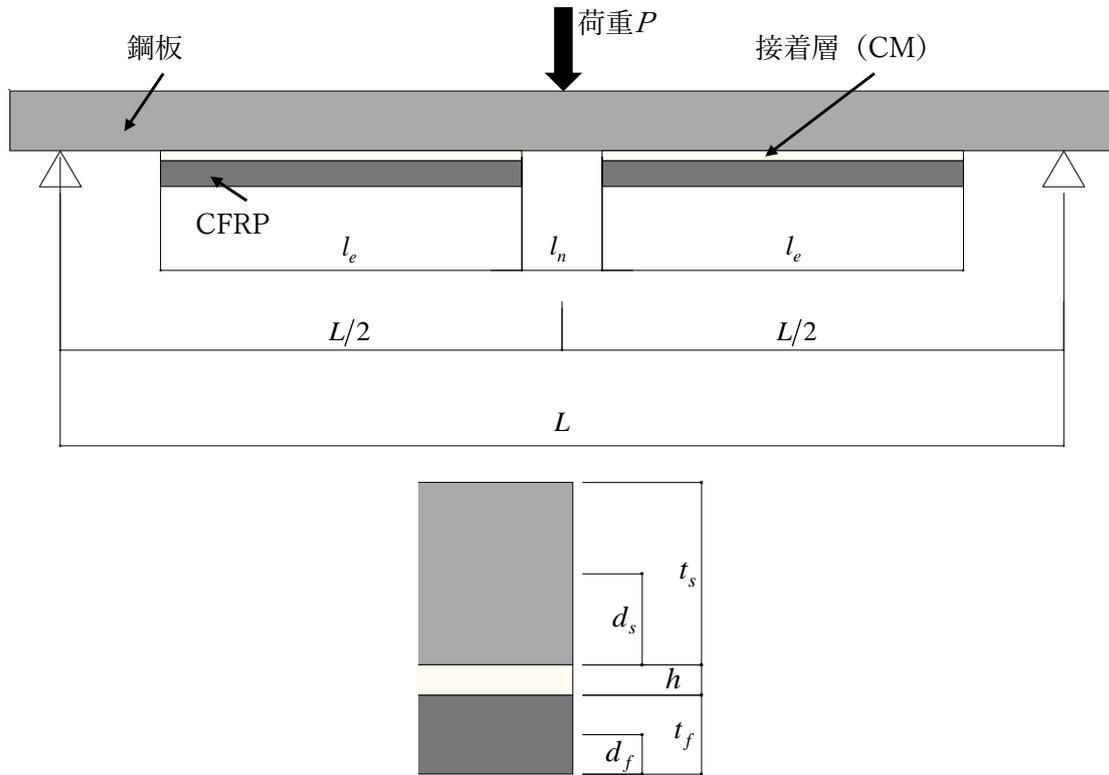


図 4-4 評価法概要図

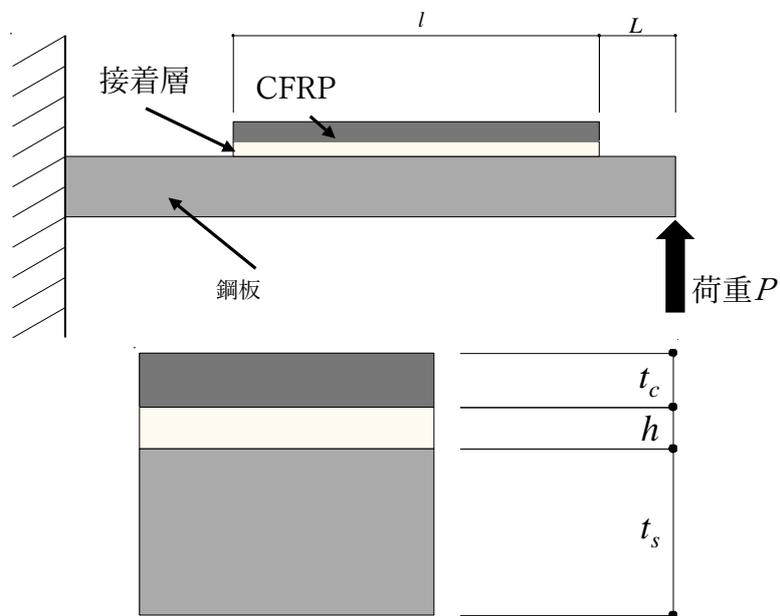


図 4-5 文献 6)による評価法概要図

$$\tau_{eMe} = \kappa \frac{c_b K}{ab_f} \left(M_e + \frac{\kappa}{c_b} Q_e \right) \quad (11)$$

$$\sigma_{eMe} = \frac{c_b \omega_b d_f K}{ab_f} \left[\left(2 - \frac{c_b}{\omega_b} + \frac{2a}{d_f K} \frac{\omega_b}{c_b} \frac{I_f}{nI_s} \right) M_e + \kappa \frac{2}{c_b} Q_e \right] \quad (12)$$

$$\omega = \sqrt[4]{\frac{b_s E_e}{h} \frac{Z_1}{4E_f I_f}}, \quad c = \sqrt{\frac{b_s G_e}{h} \frac{a^2}{KZ_1 E_s I_s}}, \quad W = \frac{4}{4 + \left(\frac{c}{\omega}\right)^4} \frac{cJ}{Z_1}, \quad J = d_f - (Z_1 - 1)d_s,$$

$$K = \frac{1}{1 + Z_1 Z_2 \frac{r_s^2}{a^2}}, \quad a = d_s + d_f + h, \quad r_s = \sqrt{\frac{I_s}{A_s}}, \quad Z_1 = 1 + \frac{I_f}{nI_s}, \quad Z_2 = 1 + \frac{nA_s}{A_f}$$

τ_{eMe} : CFRP の剥離位置における接着層の剪断応力,

σ_{yeMe} : CFRP の剥離位置における接着層の垂直応力, E_s : 鋼板の弾性係数,

E_f : CFRP の弾性係数, b_s : 鋼板の幅, b_f : CFRP の幅, A_s : 鋼板の断面積,

A_f : CFRP の断面積, h : 成形後の CM の厚さ, E_e : 接着層の弾性係数,

G_e : 接着層の剪断弾性係数, d_f : CFRP の図心から CFRP 下面までの距離,

d_s : 鋼板の図心から鋼板下面までの距離,

κ : CFRP の左端に対して $\kappa=1$, 右端に対して $\kappa=-1$, n : 鋼材と CFRP の弾性係数比

I_s : 鋼板の断面二次モーメント, I_f : CFRP の断面二次モーメント,

M_e : 破壊時荷重において CFRP の剥離位置に生じる曲げモーメント,

Q_e : 破壊時荷重において CFRP に生じる剪断力

$$\tau_e = \left\{ \frac{L}{(L+l)\sinh(cl)} - \frac{1}{\tanh(cl)} + \frac{1}{c(L+l)} \right\} \frac{H}{b_c c} M_{end} \quad (13)$$

$$\sigma_{ye} = - \left[\frac{J}{4\omega^4 + c^4} \left[2 \left\{ \frac{L}{(L+l)\sinh(cl)} - \frac{1}{\tanh(cl)} \right\} + \frac{1}{2} \left(\frac{c}{\omega} \right)^3 - \frac{c}{\omega} \right] + Z_5 \right] \frac{\omega H}{b_c c} M_{end} \quad (14)$$

$$Z_5 = \frac{J}{2\omega^4 c(L+l)} + \frac{2kE_c t_c^3}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \frac{c}{H} \left\{ \omega + \frac{1}{L+l} \right\}$$

$$c = \sqrt{k \frac{G_e}{h} \left(\frac{1}{E_s t_s} + \frac{1}{kE_c t_c} + \frac{12a_1 a_2}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3} \right)}, \quad H = k \frac{G_e}{h} \frac{12a_2}{E_s t_s^3 + kE_c t_c^3},$$

$$\omega = \sqrt[4]{3k \frac{E_e}{h} \left(\frac{1}{E_s t_s^3} + \frac{1}{kE_c t_c^3} \right)}, \quad J = 6k \frac{E_e}{h} \left(\frac{1}{E_s t_s^2} - \frac{1}{kE_c t_c^2} \right), \quad k = \frac{b_e}{b_s}, \quad a_1 = \frac{t_s}{2} + \frac{t_c}{2} + h,$$

$$a_2 = \frac{t_s}{2} + \frac{t_c}{2}, \quad M = P(L+x)$$

G_e : 接着層の剪断弾性係数, E_e : 接着層の弾性係数, h : 成形後の CM の厚さ,
 E_s : 鋼板の弾性係数, E_c : CFRP の弾性係数, t_s : 鋼板の厚さ, t_c : CFRP の厚さ,
 b_s : 鋼板の幅, b_c : CFRP の幅, A_s : 鋼板の断面積, P : 破壊時荷重

τ_e : CFRP の剥離位置における接着層の剪断応力,

σ_{ye} : CFRP の剥離位置における接着層の垂直応力

4-3 接着強度評価試験

図 4-6 に試験概要図を示す。使用材料の機械的性質を表 4-1 に示す。接着する CFRP は式 (13), (14) による τ_e と σ_{ye} の応力比が約 1 : 1 になるように設計を行い、本評価法は CFRP の剥離破壊時に鋼板が弾性状態を保持できるような試験体寸法としている。

設計の結果、試験体幅は 60mm とし、CFRP は接着長を 180mm、積層数を繊維体積含有率 (Fiber volume content, 以下 V_f) を 50% と仮定し、20 層とした。

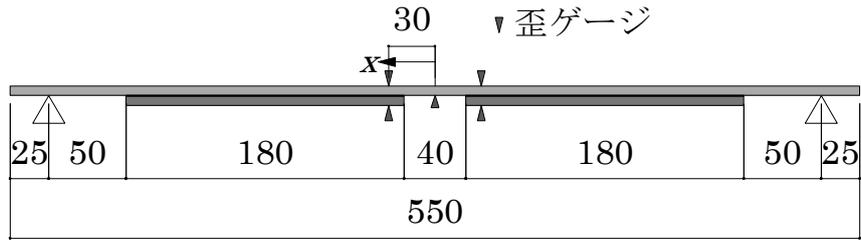


図 4-6 試験概要図【単位：mm】

表 4-1 使用材料の機械的性質

(a) 鋼材	
実測厚さ [mm]	5.85
弾性係数 [GPa]	200
ポアソン比	0.3
降伏点 [MPa]	347
(b) 炭素繊維シート	
目付量 [gsm]	400
厚さ [mm/ply]	0.217
繊維軸方向弾性係数 [GPa]	440
引張強度 [MPa]	2400
(c) CM	
目付量 [gsm]	450
弾性係数 [GPa]	8.0
(d) 含浸樹脂	
弾性係数 [GPa]	3.0
ポアソン比	0.35

成形は図 4-7 に示すように、幅を約 200mm で成形接着を行い、硬化後に試験体が 2 体となるように幅を約 60mm で切断した。また、評価に伴って接着層の厚さが重要になることを鑑みて、同一真空内に CM を設置し、脱型時に厚さを計測した。施工は 3-2 節に示した VaRTM 法を用いた成形接着工法に従って行っている。表 4-2 に試験体寸法を示す。試験体名は「L180-試験体番号」とする。表中に示す V_f は式 (15) によって算出した。なお、 $t_{CFRP+CM}$ および t_{CM} は膜厚計 (SWT-9000) を用いて計測した。表 4-2 より、 V_f が約 52% と設計時に仮定した 50% に極めて近い施工が行えたことが確認できた。



(a) 全体図



(b) 切断後の試験体

図 4-7 脱型後の状態と試験体写真

表 4-2 試験体寸法

試験体名	L180-1	L180-2
試験体幅 [mm]	56.26	61.14
CM 厚さ [mm]	0.581	
CFRP 厚さ [mm]	8.285	
V_f [%]	52.38	

$$V_f = \frac{t_{CF} \times n}{t_{CFRP+CM} - t_{CM}} \times 100 \quad (15)$$

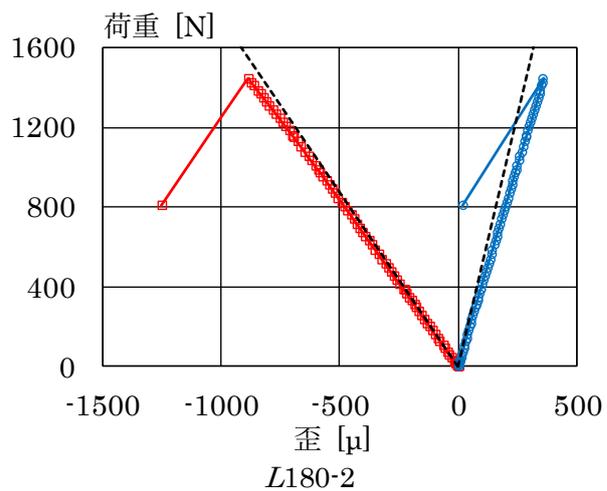
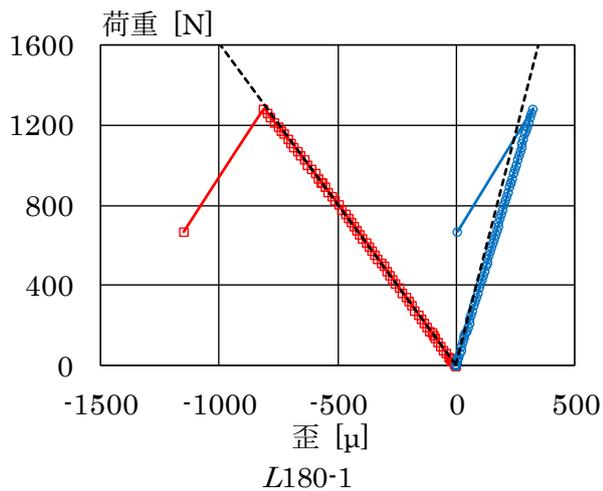
V_f : 繊維体積含有率, t_{CF} : 炭素繊維シートの厚さ (公称値), n : 積層数,

$t_{CFRP+CM}$: CM の厚さと CFRP の厚さの和, t_{CM} : CM の厚さ

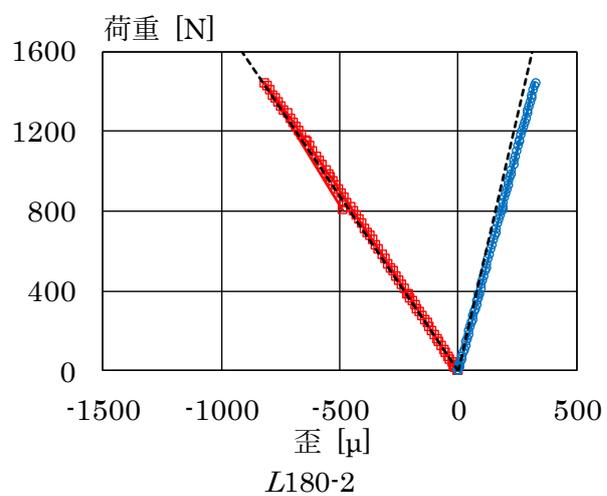
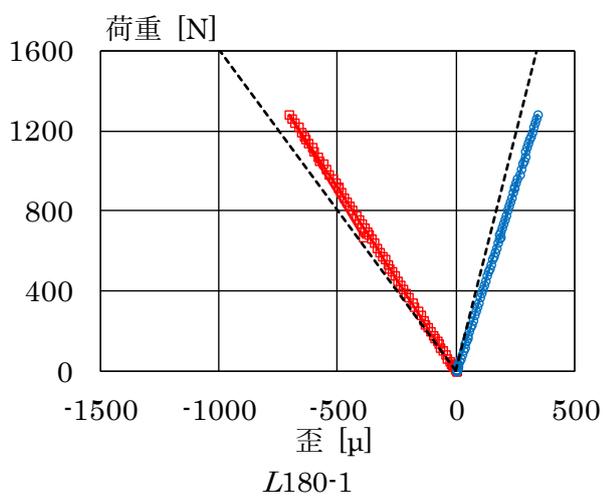
図 4-8 に試験時の様子，図 4-9 に試験より得られた荷重-歪関係を示す．歪は図 4-6 で示した歪ゲージによる値である．また，実験値と併せて FEA による解析結果を示している．FEA は平面応力状態を仮定した 2 次元解析，鋼材・CM を等方性弾性材料，CFRP を異方性弾性材料として，機械的性質を複合則によって算出し，試験体の対称性を考慮して線形弾性解析とした．なお，図 4-10 に示すように，成形後の試験体中央部に樹脂溜まりが生じたため，FEA モデルにも樹脂溜まりを模擬した．図 3-11 に FEA モデルを示す．図 4-9 より，CFRP の剥離荷重の推定を行う．剥離荷重は $x=\pm 30\text{mm}$ における荷重-歪関係より，急激に耐力が低下した荷重ステップの直前の荷重を剥離荷重とした．その結果，L180-1 で 1280.19N，L180-2 で 1442.4N となった．剥離荷重を試験体幅で除した値はそれぞれ 22.75N/mm，23.59N/mm と安定した接着耐力であったことが確認できた．また，実験値と FEA による解析結果は概ね対応しており，図 4-9 (c) から，剥離時に鋼材は弾性状態であることも確認できた．図 4-12 に試験後の状態を示す．剥離は両試験共に $x=+30\text{mm}$ 側の CFRP が剥離する結果となった．



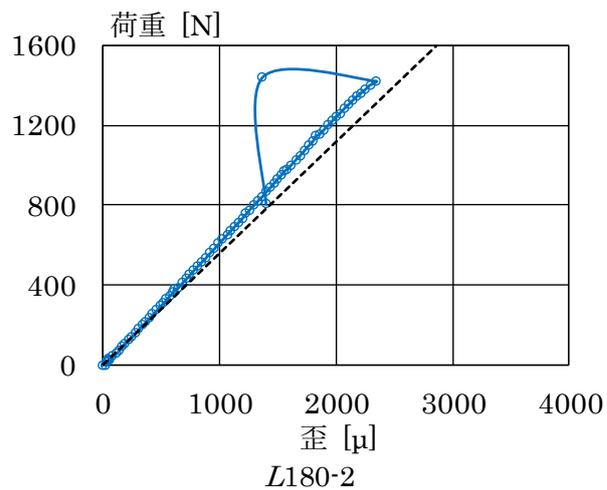
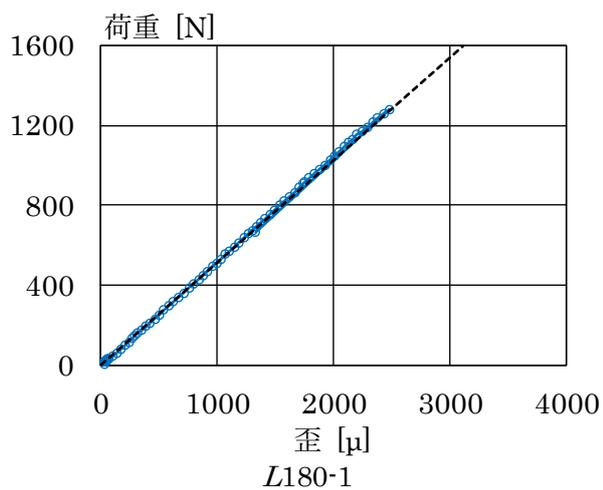
図 4-8 試験時の様子



(a) $x = 30\text{mm}$



(b) $x = -30\text{mm}$



(c) $x = 0\text{mm}$

□: 圧縮側歪ゲージ ○: 引張側側歪ゲージ - - - - : FEA

図 4-9 荷重-歪関係

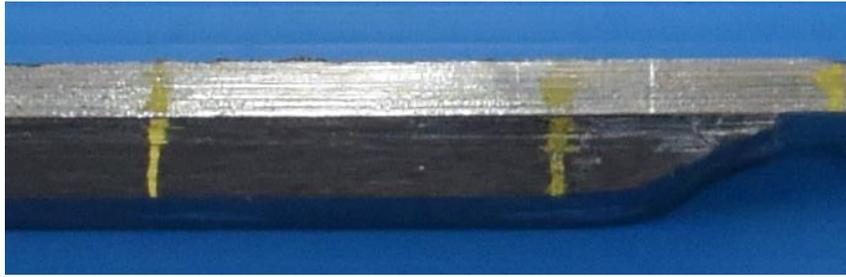


図 4-10 試験体中央部の樹脂溜まり

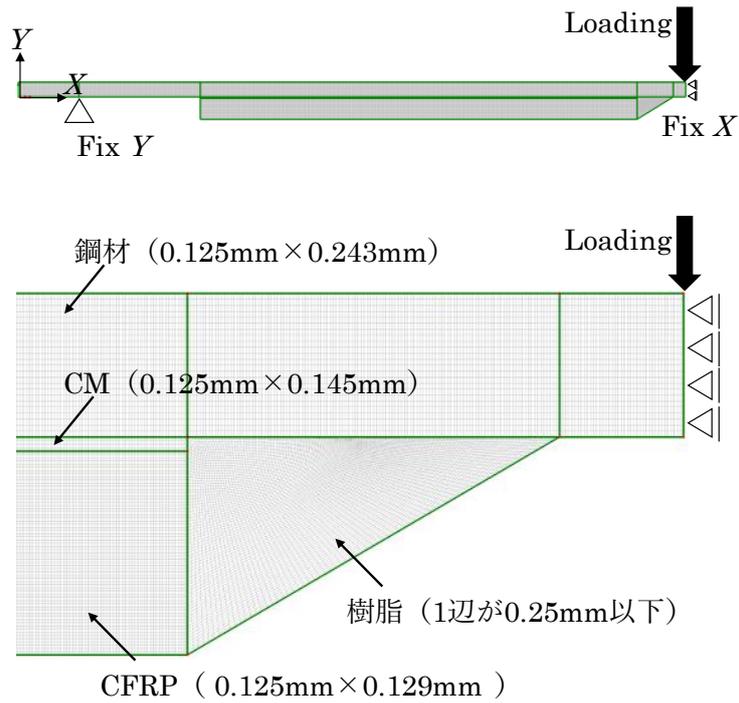
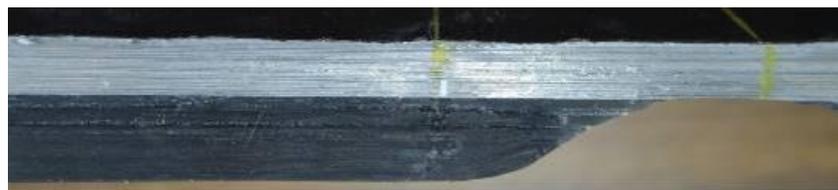


図 4-11 FEA モデル



(a) L180-1



(b) L180-2

図 4-12 試験後の状態

4-4 主応力評価

本節では、主応力の算出を行う。主応力は式 (1) によって算出する。式 (1) に用いる各応力は式 (11) ~ (14) による結果および FEA による解析結果を比較する。表 4-3 に各応力の算出結果、図 4-13 に剪断および垂直応力のコンター図を示す。表 4-3 より、式 (11), (12) は FEA に比べて大きく上回る結果となっている。式 (13), (14) では剪断応力は FEA に比べ高くなっているが垂直応力については概ね対応を示していることが確認された。式 (13), (14) の結果を用いて主応力を計算すると、L180-1 は 49.373MPa, L180-2 は 51.136MPa。FEA の結果から得られる主応力は L180-1 で 35.47MPa, L180-2 で 36.775MPa と FEA に比べて式 (13), (14) による主応力が約 39%高い結果ではあるが、本論文のような接着層がガラスマット層によって形成される VaRTM 法を用いた成形接着工法においても、既往の提案式によって主応力の評価が可能であると考えられる。

次章より、基礎的な接着強度評価として、二面引張剪断試験および 3 点曲げ試験を通した接着剪断強度と曲げ変形下による接着強度の評価を行う。その際に用いる接着強度は式 (13), (14) による提案式と FEA による解析結果を用いるものとする。接着強度の評価は図 4-14 に示す主応力曲線を用いる。

表 4-3 主応力算出結果の比較

試験体名	式 (11)	式 (12)	式 (13)	式 (14)	FEA	
	τ_{eMe}	σ_{yeMe}	τ_e	σ_{ye}	τ	σ_y
L180-1	55.199	42.621	31.429	29.367	18.979	25.315
L180-2	60.014	46.339	34.171	28.302	19.677	26.246

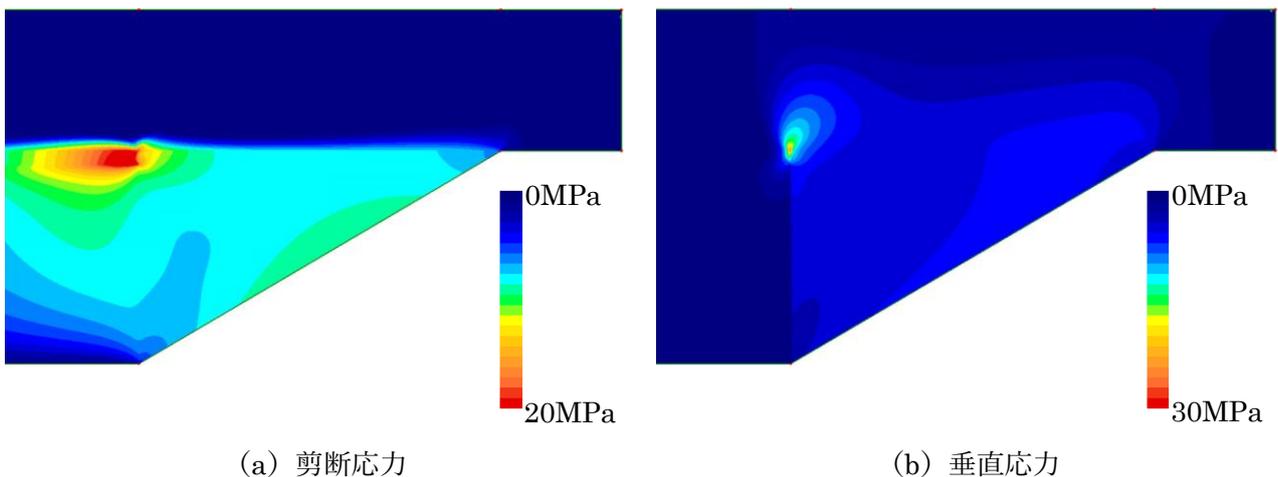


図 4-13 コンター図

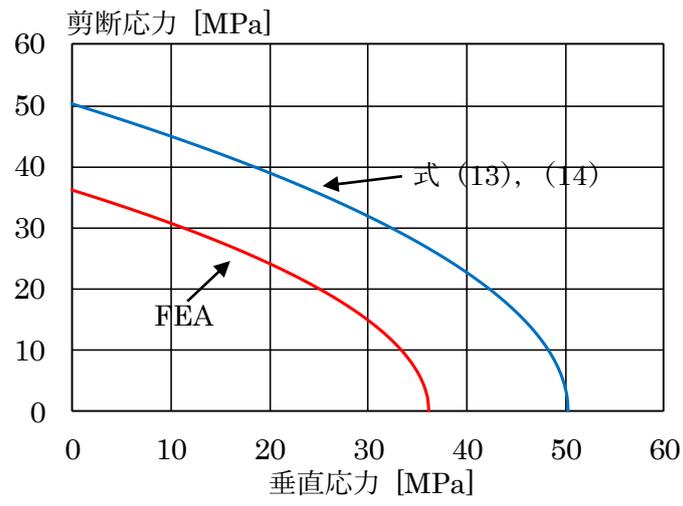


图 4-14 主应力曲线

参考文献

- 1) Jun Deng, Marcus M.K. Lee, Stuart S.J. Moy : Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate, *Composite Structures*, Vol.65, pp.204-215, 2004
- 2) S.T. Smith, J.G. Teng : Interfacial stresses in plated beams, *Engineering Structures*, Vol.23, pp.857-871, 2001.1
- 3) 石川敏之, 大倉一郎 : 切断鋼板に接着された CFRP のはく離挙動の理論解析, 構造工学論文集 A, 53A 巻, pp.1313-1320, 2007
- 4) 竹内博記, 斎藤博嗣, 金原勲 : CFRP 直交積層板の薄層化による損傷進展抑制に関する実験的評価, 日本複合材料学会誌, 37 巻, pp.121-129, 2011
- 5) 土木学会 : 複合構造シリーズ 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案), 2018
- 6) 石川敏之, 佐々木裕, 山田健太郎 : 板曲げを受ける CFRP 板接着鋼板のはく離強度, 応用力学論文集, 第 11 巻, pp.903-910, 2008

第5章 二面引張剪断試験および鋼材の降伏を伴う3点曲げ試験による力学性状分析

本章では、VaRTM法による鋼/CFRP接着接合試験体の力学性状について分析を行う。まず初めに、二面引張剪断試験によって、接着剪断強度の評価を行う。また、3章にて述べた下地処理面への含浸樹脂の事前塗布が力学性状への影響についても考察する。次に、鋼材の降伏を伴う3点曲げ試験を通して、積層数および接着長の変化による力学性状の分析を行う。

5-1 二面引張剪断試験

図5-1に試験体概要図を示す。試験体は図5-2に示すように、鋼板は厚さ12mmのSS400材とし、片面ずつ成形を行った。ダブルストラップ形式とするため鋼板は中央部で切断後、両端でボルト締めされている。試験パラメータは樹脂の事前塗布の有無とした。以降、樹脂の事前塗布を行った試験体をW試験体、行っていない試験体をD試験体とする。各試験体は、1度の成形によってW、D試験体を5体ずつ成形した。使用材料は、表4-1に示す通りである。CFRPは鋼材とCFRPとの軸剛性の比が約1:2となるように幅を30mmで積層数を片側7層の計14層とし、端部への応力集中を緩和させるため10mm/layerのテーパ状積層とした。また、破壊が生じる前に鋼材の降伏を免れるため、成形後に鋼材幅を約50mmの試験体として切断し引張試験を行った。試験体名は「樹脂の事前塗布の有無(W/D)・試験体番号」とし、図5-2に示しているAからDは接着面を示す際に用いる。図5-3に成形時の様子を示す。

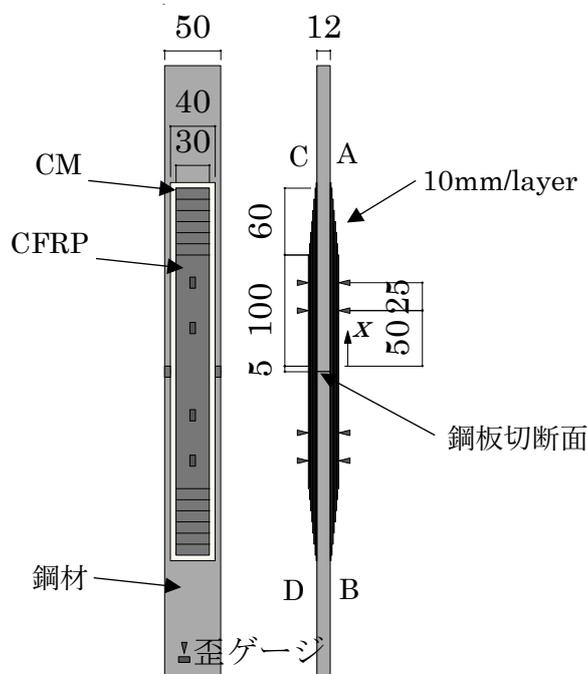


図5-1 試験体概要図【単位：mm】

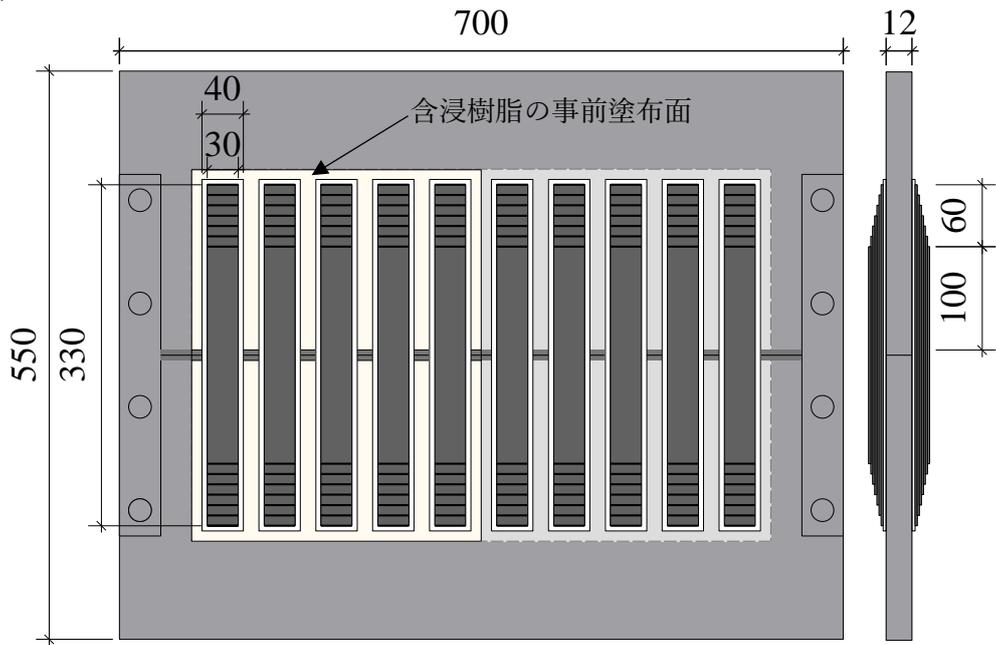
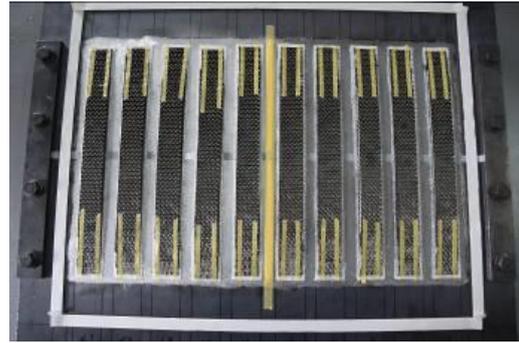


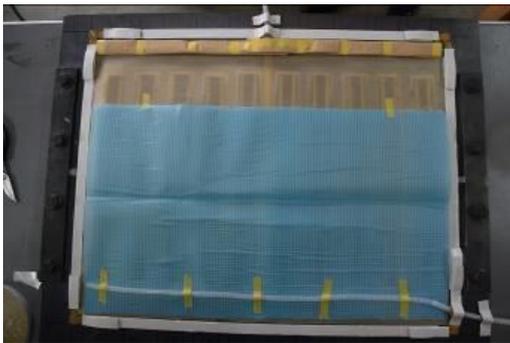
図 5-2 試験体成形概要図【単位：mm】



(a) 含浸樹脂の事前塗布 (左側)



(b) CM, 炭素繊維シートの設置



(c) 副資材の設置



(d) プラスチックフィルムによる密封化



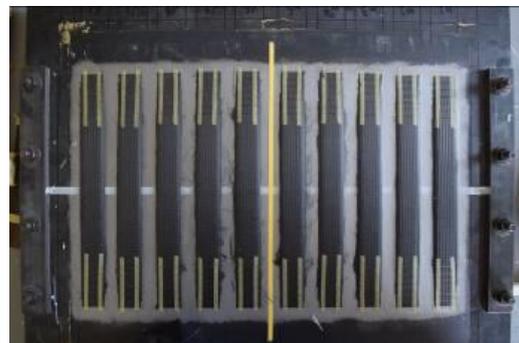
(e) 真空吸引 (-100kPa)



(f) 樹脂の注入, 含浸



(g) 硬化後



(h) 脱型後

図 5-3 成形時の様子

表 5-1 に W, D 試験体各 5 体の計 10 体について FRP 厚を膜厚計によって両面で 6 点計測し表 5-1 に示すよう繊維体積含有率を算出した。繊維体積含有率は式 (15) を用いて算出している。CM 厚については樹脂の含浸後で膜厚計により実測した結果、0.62mm であった。表 5-1 より全試験体を通して繊維体積含有率の平均が 50%を超える高い結果となった。下塗りの有無では繊維体積含有率の変化はほとんど見受けられず変動係数も安定しているため、CFRP 厚への影響はないと考えられる

表 5-1 二面引張剪断試験体の繊維体積含有率

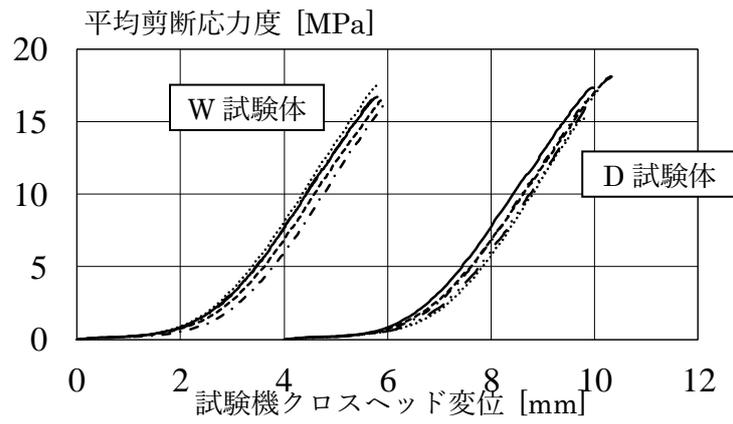
	FRP 厚さ [mm]	CFRP 厚さ [mm]	繊維体積含有率				
			含有率 [%]	平均 [%]	変動係数	平均[%]	変動係数
W-1	3.655	3.035	50.05	50.01	0.00476	50.22	0.00874
W-2	3.661	3.041	49.95				
W-3	3.660	3.040	49.97				
W-4	3.634	3.014	50.40				
W-5	3.679	3.059	49.66				
D-1	3.664	3.044	49.91	50.04	0.00963		
D-2	3.583	2.963	51.27				
D-3	3.658	3.038	50.01				
D-4	3.625	3.005	50.55				
D-5	3.631	3.001	50.44				

図 5-4 に試験時の様子，図 5-5 に平均剪断応力度・試験機クロスヘッド変位関係を示す．平均剪断応力度は式 (16) によって算出する．また，表 5-2 に各試験体及び樹脂の事前塗布と行わなかった別成形の試験体の最大荷重，破壊面および平均剪断強度，図 5-6 に試験後の接着面を示す．なお，表 5-2 中に示している別成形の試験体は厚さ 19mm の鋼板に 11 層の CFRP を成形接着したものである．試験体幅は 40mm，接着長は定着長 100mm に加えて，10mm/layer である 100 の計 200mm となっている．二面引張剪断試験の結果，W 試験体，D 試験体において平均剪断強度には大きな差は見られないが，変動係数については D 試験体に比べ W 試験体が小さく安定性を有している．但し，D 試験体については破壊モードのバラツキが生じなかったことによって，耐力の安定性を有しているが，表 3-2 に示した事前塗布を行っていない試験体の結果（試験体番号 1～10）の結果を見てみると平均剪断強度の平均が 4.314MPa，変動係数が 11%を超える結果も得られている．この 10 体の結果を基に設計時の接着強度を平均剪断強度の平均値である 4.314MPa から標準偏差の 3 倍である 1.515MPa を差し引くと設計用値としては 2.8MPa と現実的ではない設計強度となってしまうことがわかる．対して W 試験体の設計強度は 15.673MPa と約 5 倍の設計強度が得られていることを確認した．

接着強度について，文献 1)ではハンドレイアップ成形による接着法で本試験体よりも定着長を長くすることで接着耐力の安定性が望める試験体 2)を採用しているが，平均剪断強度 9.3MPa，変動係数 5.7%であり，本研究の W 試験体の方が高い平均剪断強度，低い変動係数となっている．さらに，文献 3)では，鋼板をエポキシ系接着剤で接着接合した場合として，試験体寸法と剥離荷重が示されている．この結果から平均剪断強度を算出した結果 8.2～15.3MPa となり，本論文の手法は高い平均剪断強度が得られていることが確認できる．これは CFRP 厚に差はほぼ無いものの，事前に鋼材と CM 層との界面の接着性が向上したことがこのような結果に繋がった要因と考えられる．



図 5-4 試験時の様子



— : W,D-1 : W,D-2 - - - - : W,D-3 - · - · : W,D-4 - - - - : W,D-5
 図 5-5 平均剪断応力度-試験機クロスヘッド変位関係

$$\tau_{\text{ave.}} = \frac{P}{A} \quad (16)$$

$\tau_{\text{ave.}}$: 平均剪断応力度, P : 荷重, A : 接着面積

表 5-2 試験結果

	最大荷重 [kN]	破壊面	平均剪断強度				
			[MPa]	平均 [MPa]	変動係数	平均[MPa]	変動係数
W-1	160.320	B,C	16.70	16.83	0.02291	16.98	0.0469
W-2	168.304	B,D	17.53				
W-3	158.868	B,C	16.55				
W-4	157.896	A,D	16.45				
W-5	162.480	B,C	16.93				
D-1	166.756	B,C	17.37	17.14	0.06051	16.98	0.0469
D-2	146.640	B,C	15.26				
D-3	173.300	B,C	18.05				
D-4	162.052	B,C	16.88				
D-5	173.880	A,D	18.11				
1	71.112		4.445	4.314	0.117		
2	64.612		4.038				
3	57.640		3.603				
4	68.324		4.270				
5	69.572		4.348				
6	76.196		4.762				
7	58.512		3.657				
8	81.184		5.074				
9	62.200		3.888				
10	80.940		5.059				

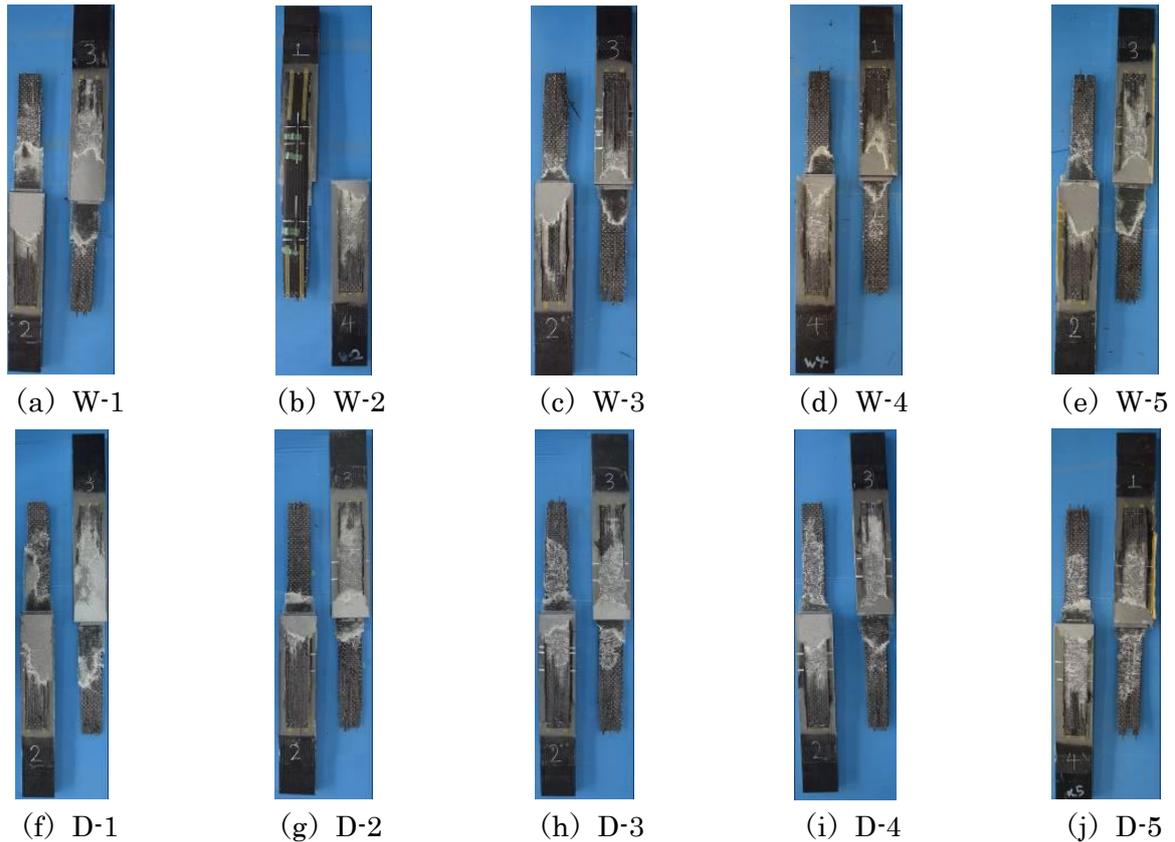
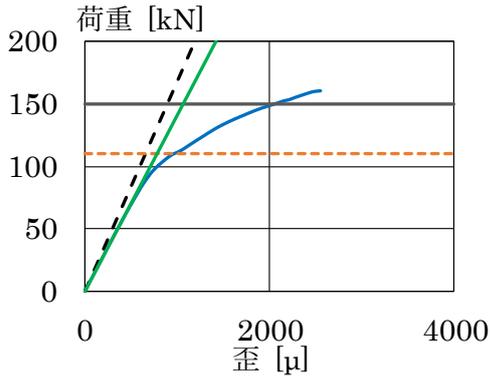
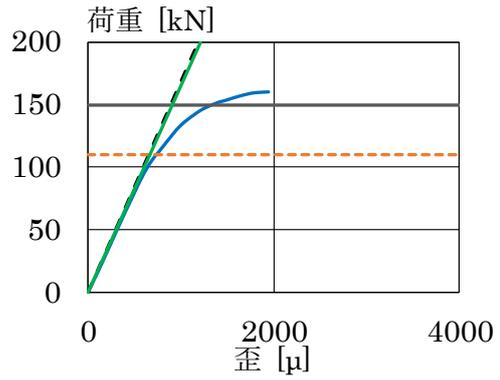


図 5-6 試験後の接着面

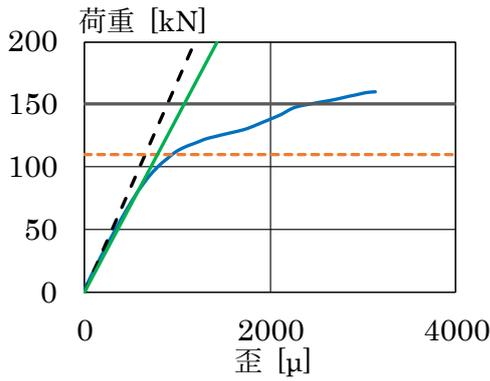
図 5-7 から図 5-16 に各試験体の荷重-歪関係を示す．荷重-歪関係には，各歪ゲージより得られる実験値，式 (17) による算出値，FEA による解析値を示す．式 (17) は鋼と CFRP の歪が等しくなった完全合成断面を仮定した式となっている．また，FEA から得られる接着層に生じる剪断応力および垂直応力から，4 章にて得られた剥離時の主応力に到達する荷重を示している．用いる主応力は FEA によって得られた主応力の平均値である 36.12MPa と式 (13)，(14) から得られる 50.26MPa とする．なお，式 (17) および FEA による結果は W，D 試験体のそれぞれの機械的性質の平均を用いた値としている．図 5-17 に FEA モデルを示す．解析は 3 章に示した主応力の解析方法と同様の条件とした．また，主応力の評価点は鋼板切断にメンディング材が塗布されている点を考慮し，鋼板の切断面から 5mm の距離にある図 5-1 中の $x=0\text{mm}$ の鋼/CM 層界面とした．図 5-18 に FEA によって算出された荷重-各応力関係を示す．図中には評価に用いる各主応力を描いている．この結果を基に推測される剥離荷重はそれぞれ約 110kN ， 150kN となった．荷重-歪関係から，FEA によって推定される剥離荷重時に歪の挙動が変化していることがわかる．W，D 試験体を比較すると，W 試験体は A から D の接着面で概ね均等に歪が変化しているのに対し，D 試験体では各接着面で挙動にバラつきがあることがわかる．この差についても，平均剪断強度のバラつきの理由と同様に樹脂の事前塗布によって接着性が向上したことがこれらの歪の挙動となったと考えられる．また，式 (13)，(14) による主応力時についても最大荷重以下となっており，評価可能な応力値であることが確認できた．これらの結果から，二面引張剪断試験では剥離荷重の推定として FEA を用いた主応力評価では高い精度で対応を示しており，接着強度の基礎評価試験を行うことで剥離が開始する荷重が推定可能であることがわかった．



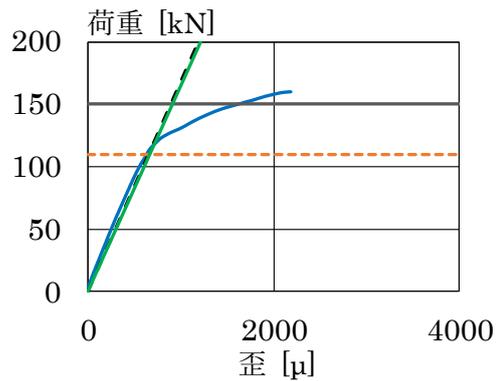
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



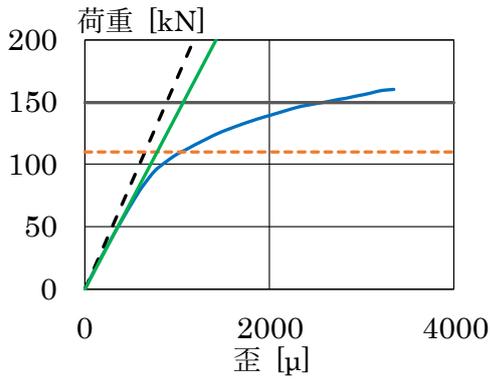
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



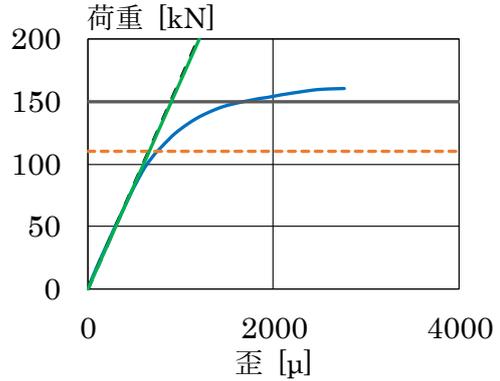
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



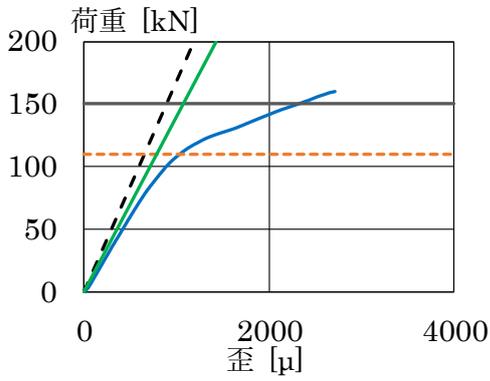
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



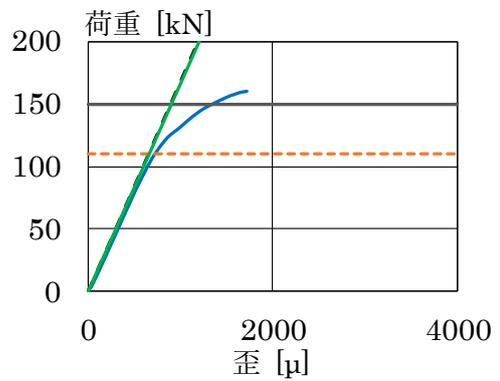
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



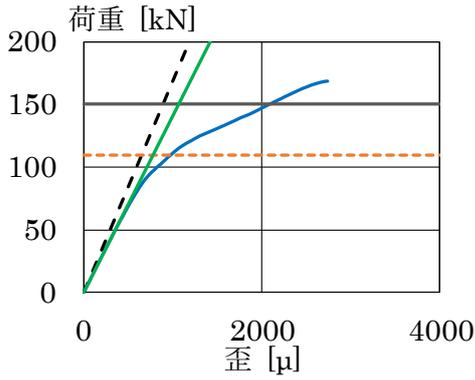
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



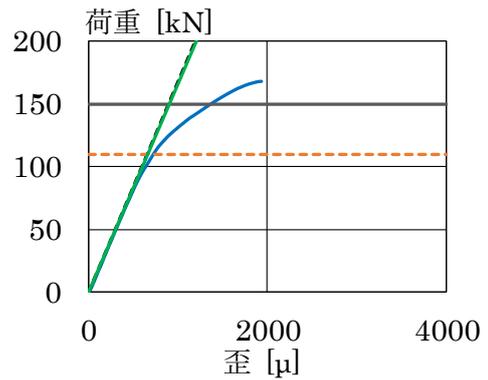
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

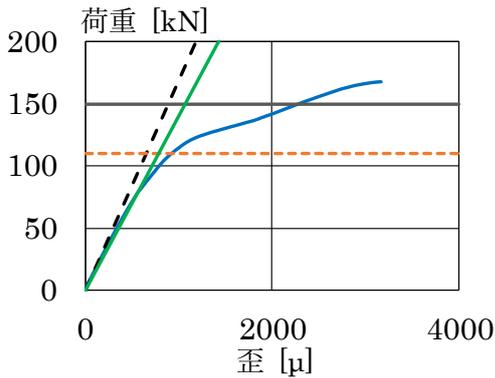
図 5-7 荷重-歪関係【W-1】



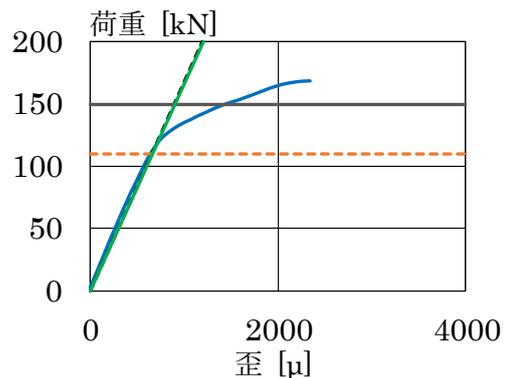
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



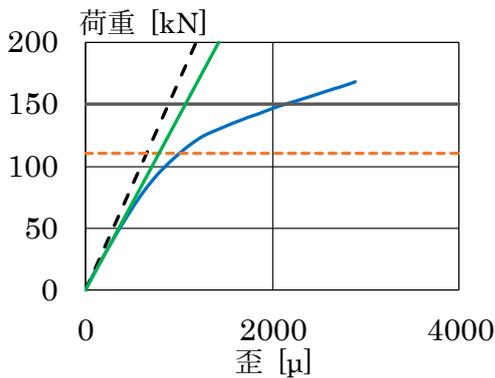
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



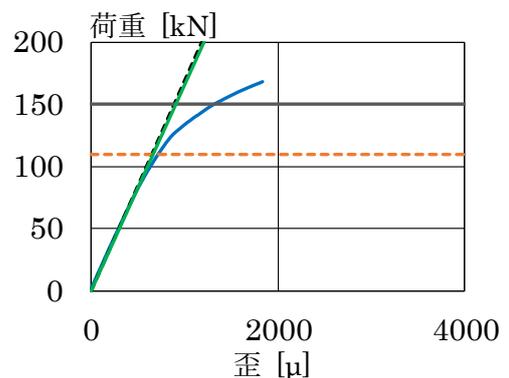
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



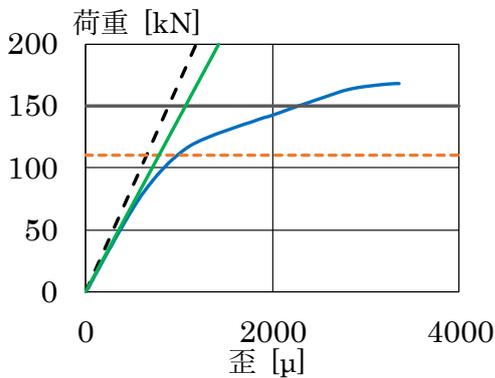
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



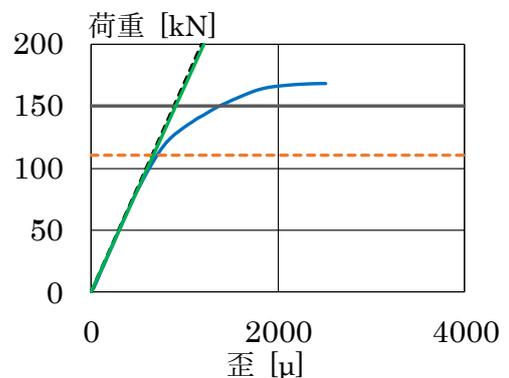
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



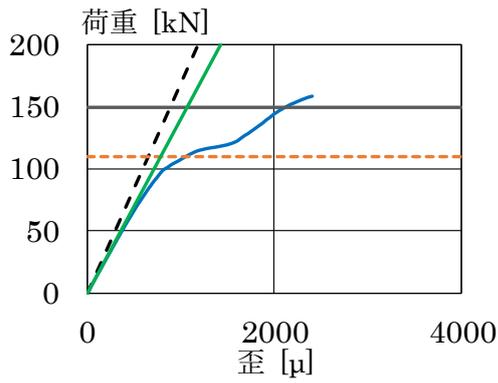
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



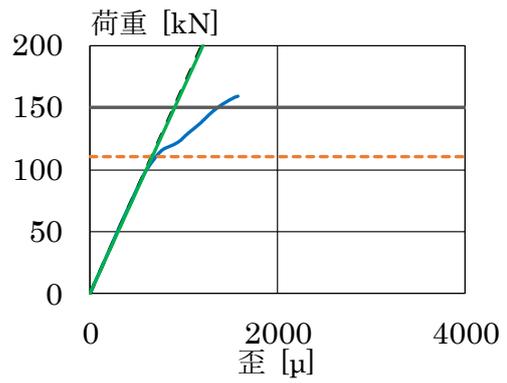
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

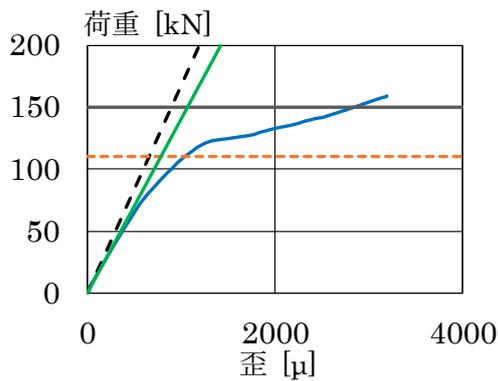
図 5-8 荷重-歪関係【W-2】



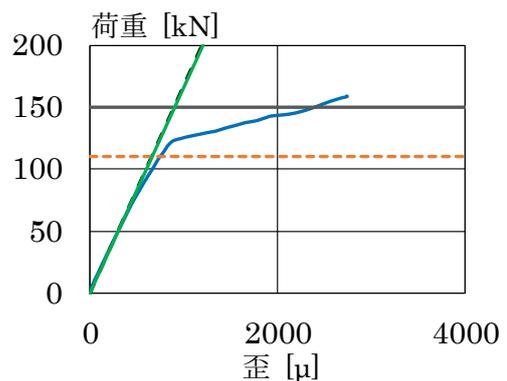
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



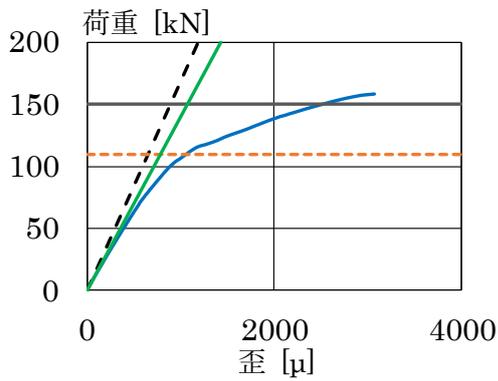
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



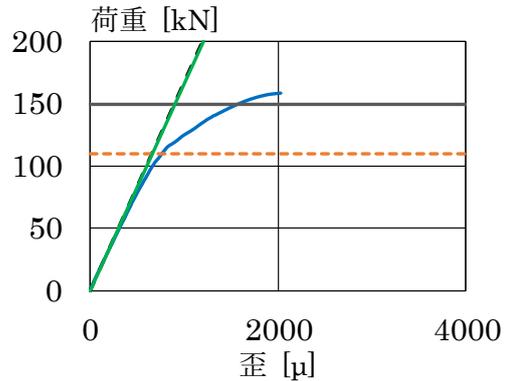
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



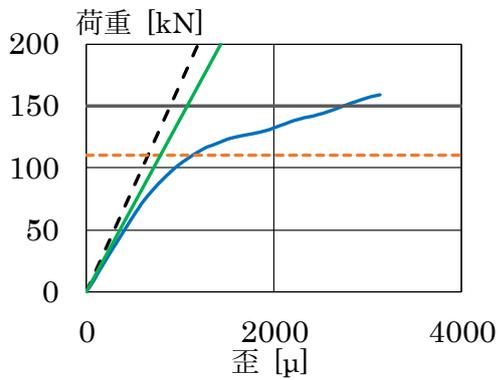
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



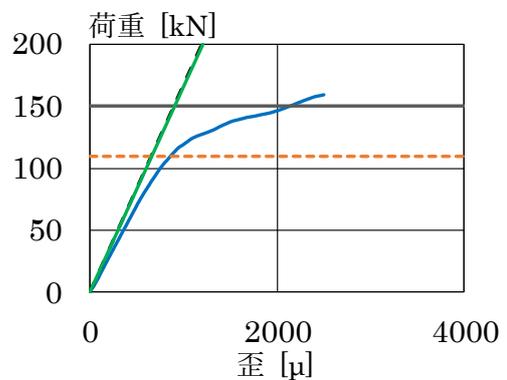
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



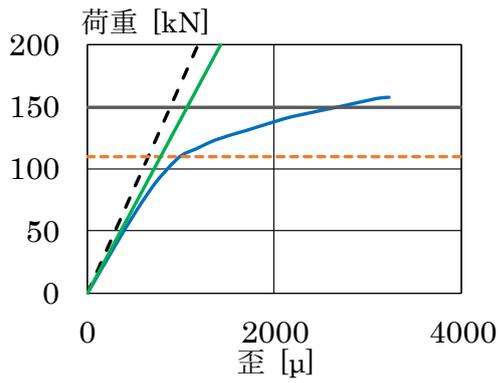
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



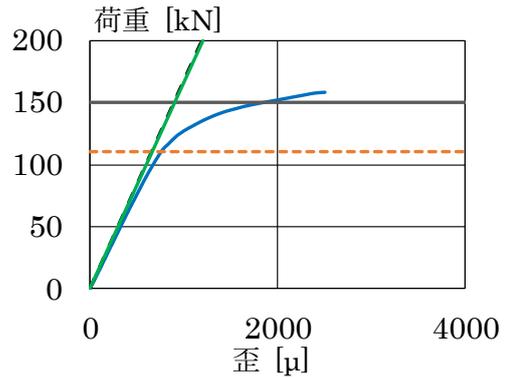
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

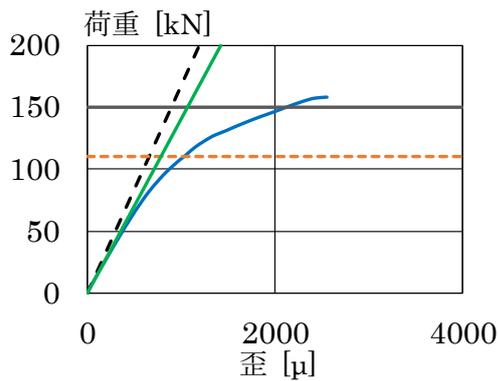
図 5-9 荷重-歪関係 【W-3】



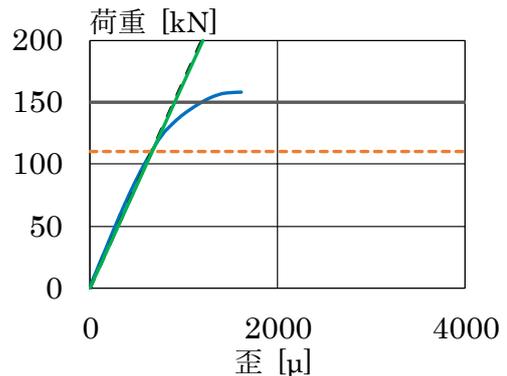
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



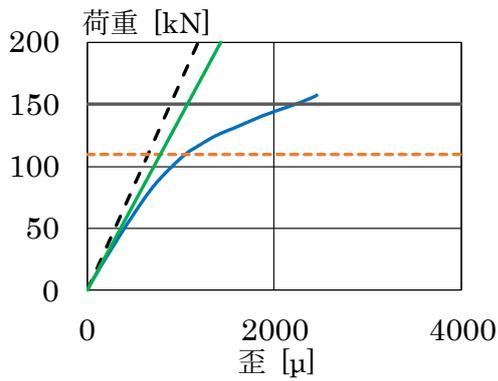
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



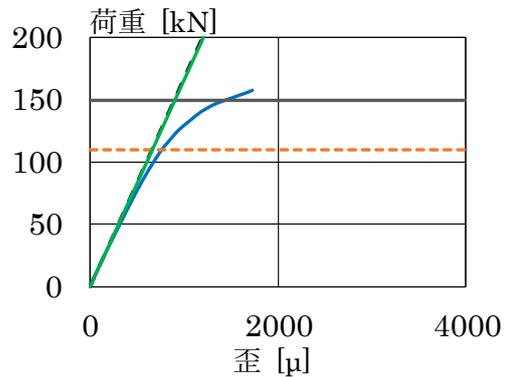
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



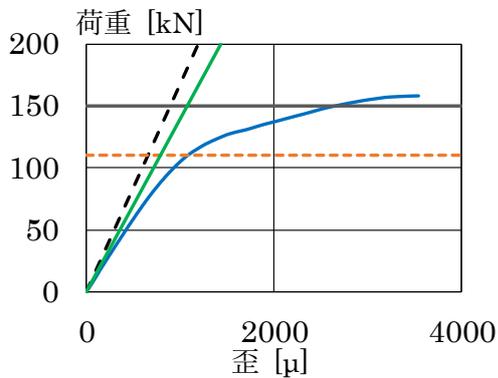
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



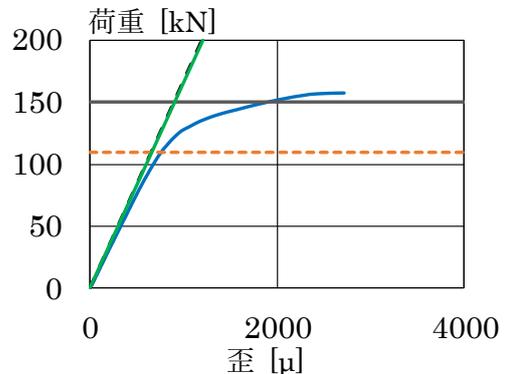
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



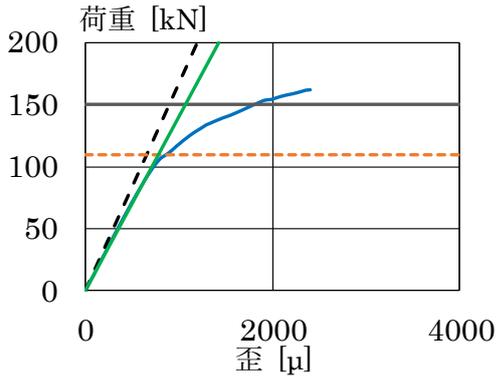
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



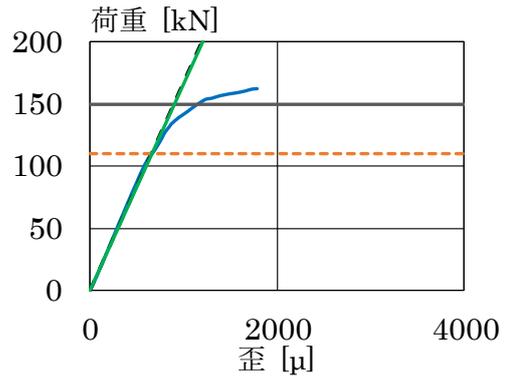
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

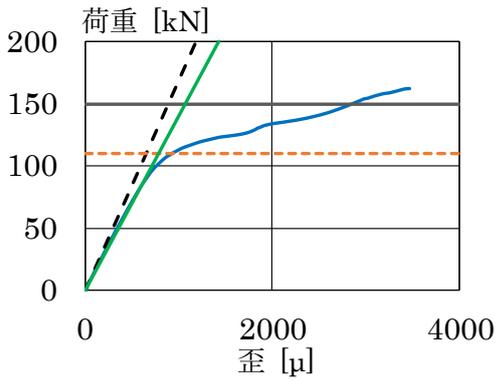
図 5-10 荷重-歪関係【W-4】



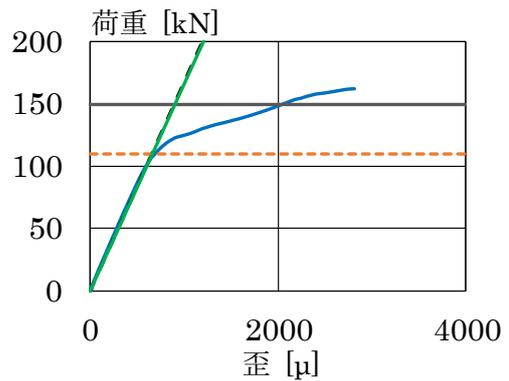
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



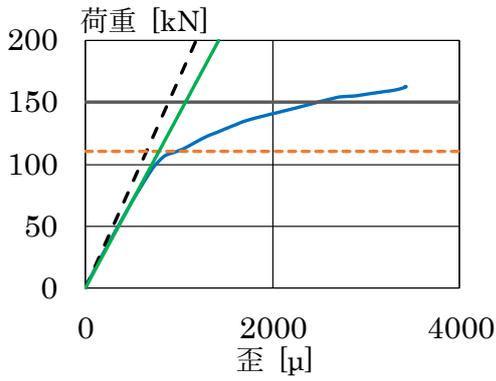
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



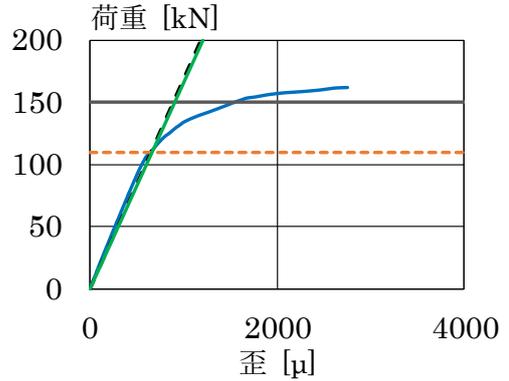
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



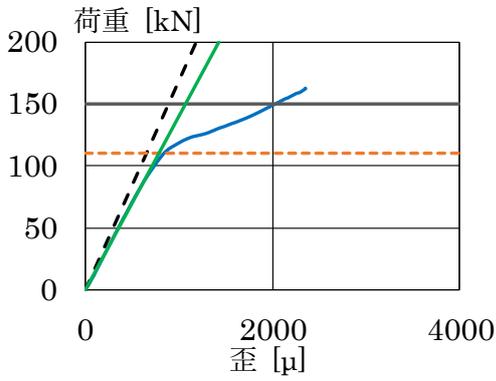
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



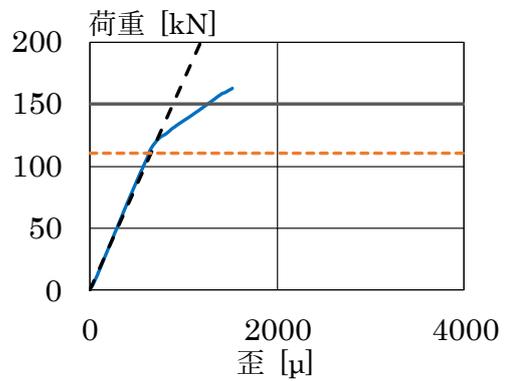
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



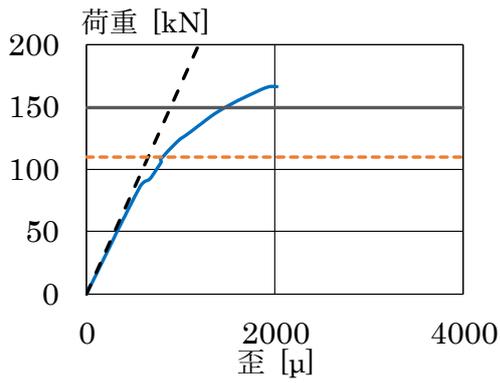
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



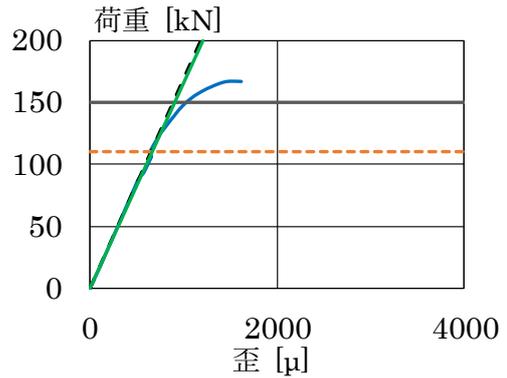
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

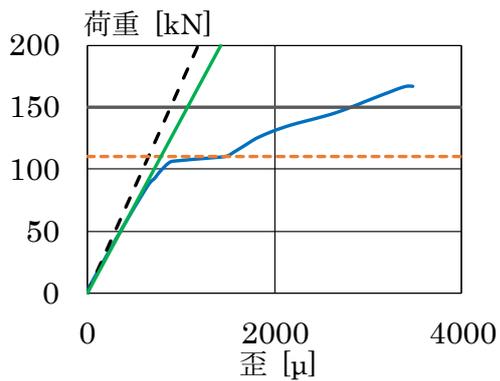
図 5-11 荷重-歪関係 【W-5】



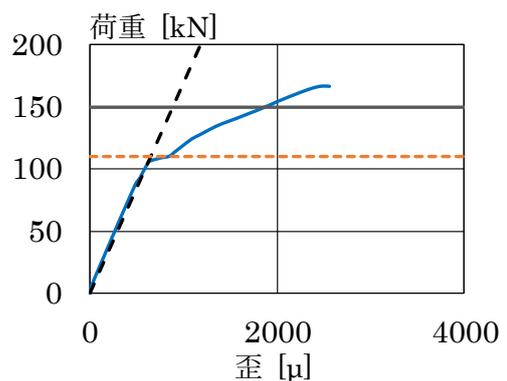
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



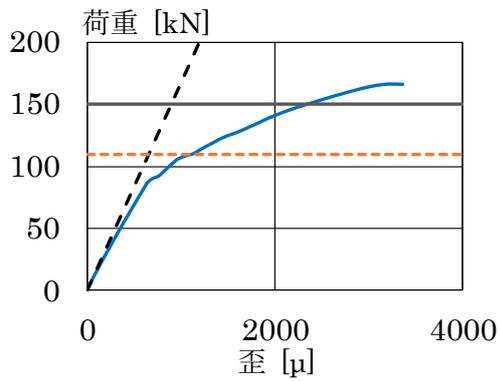
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



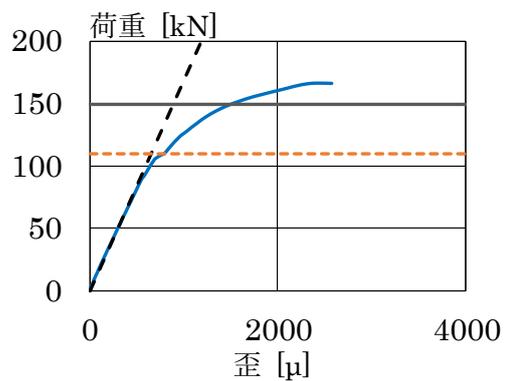
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



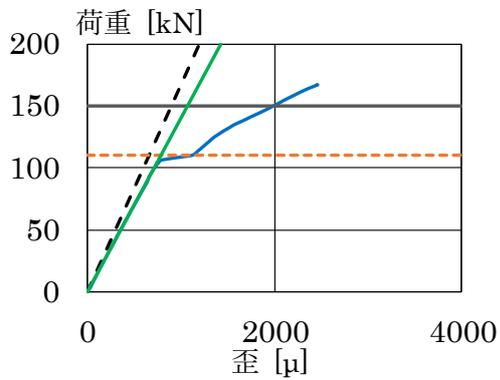
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



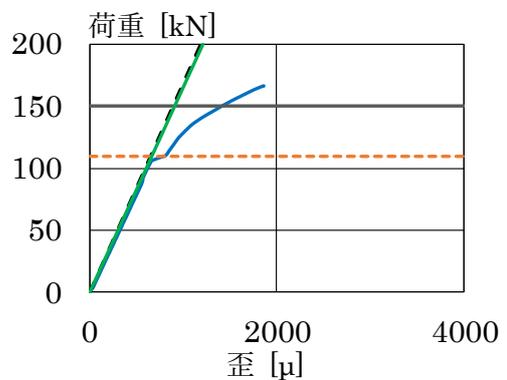
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



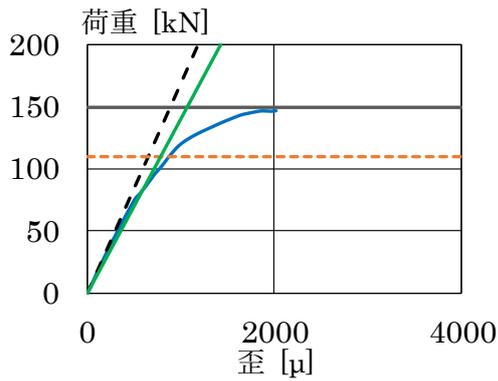
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



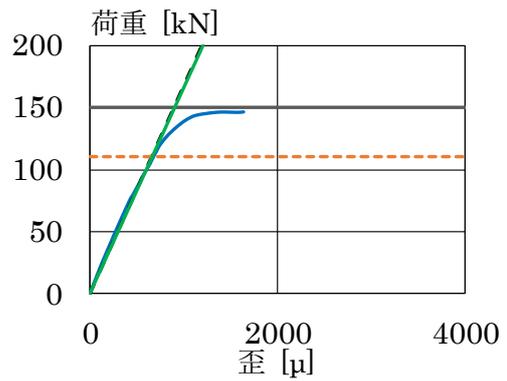
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

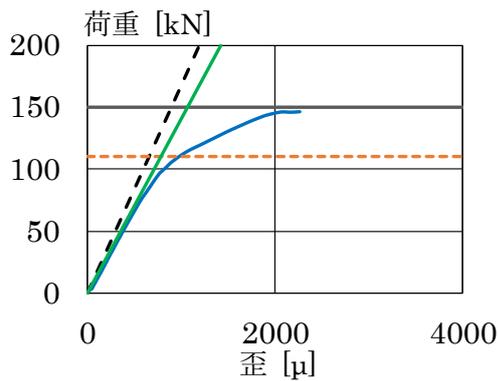
図 5-12 荷重-歪関係 【D-1】



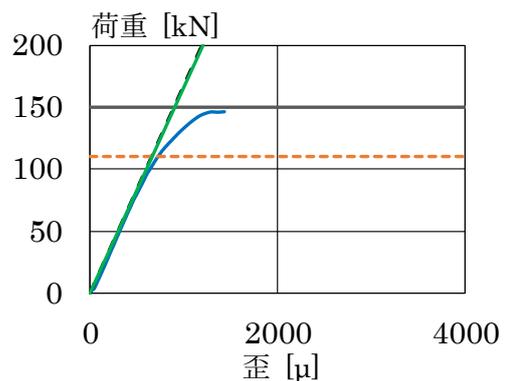
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



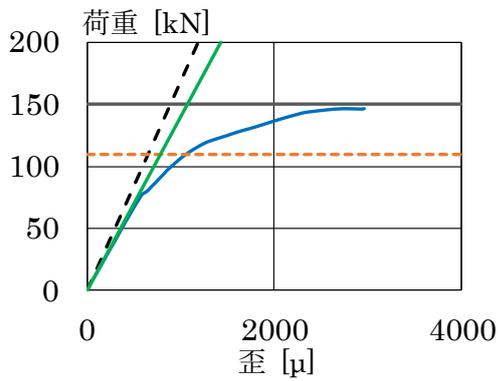
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



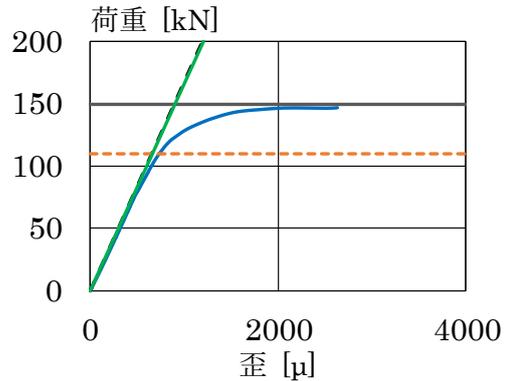
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



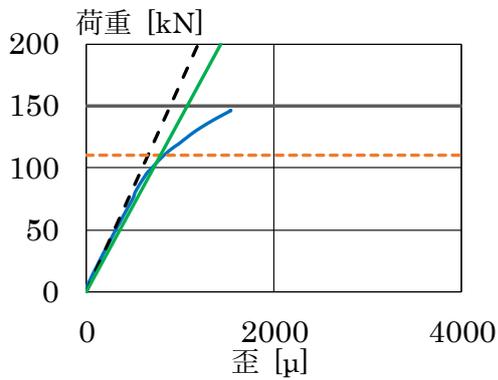
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



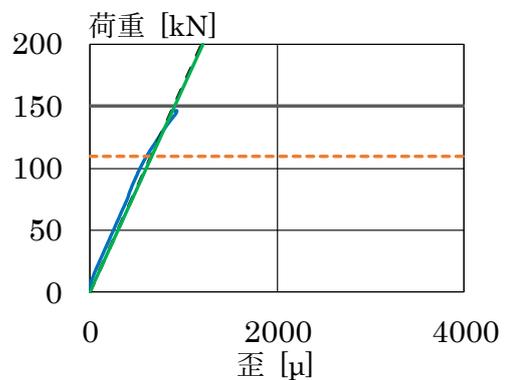
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



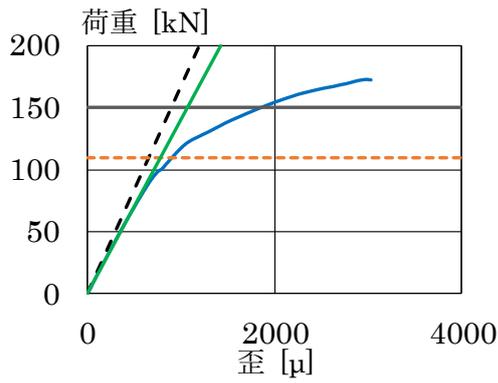
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



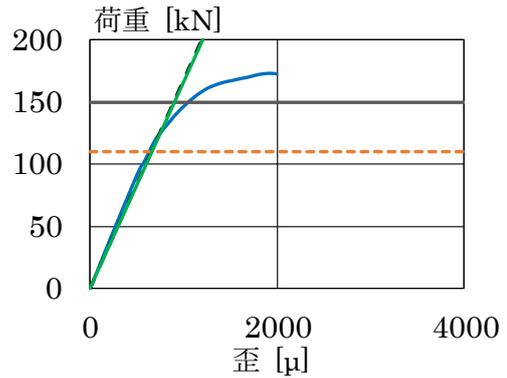
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

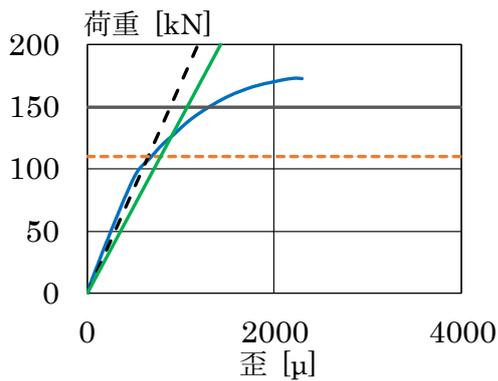
図 5-13 荷重-歪関係 【D-2】



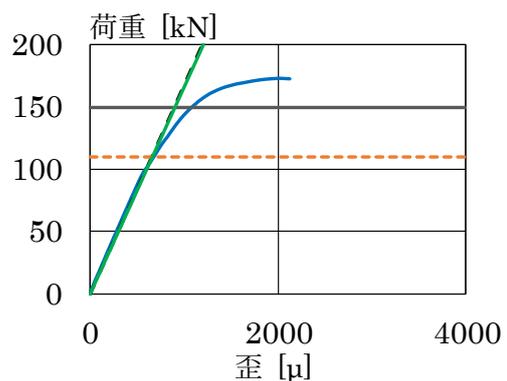
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



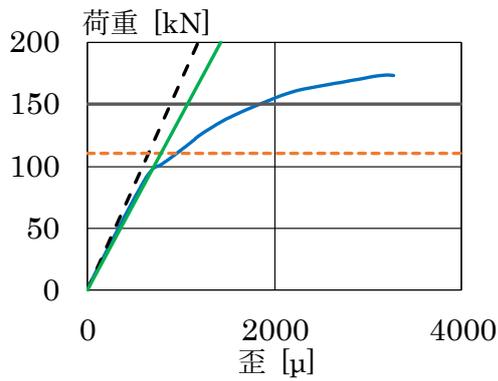
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



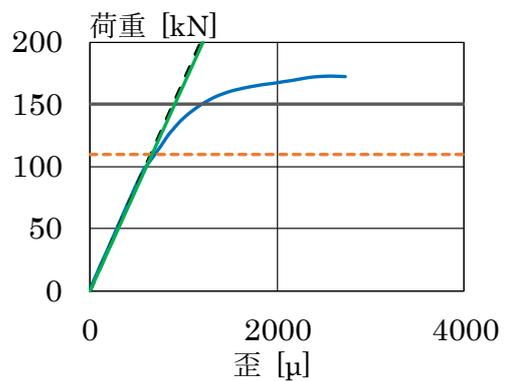
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



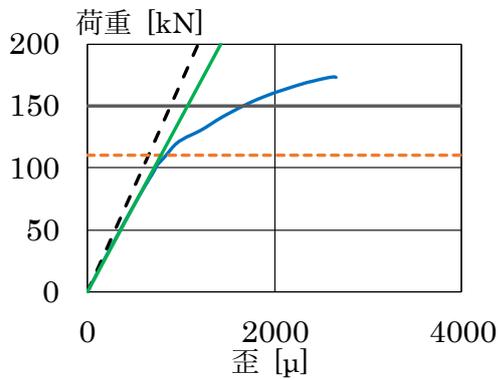
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



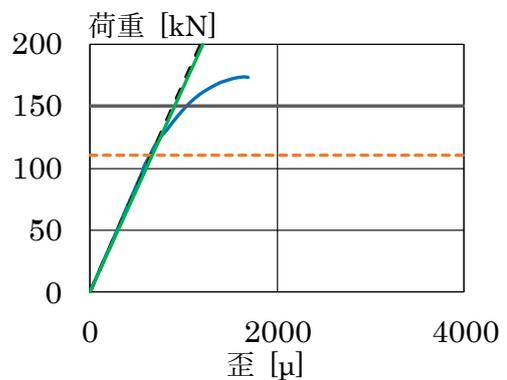
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



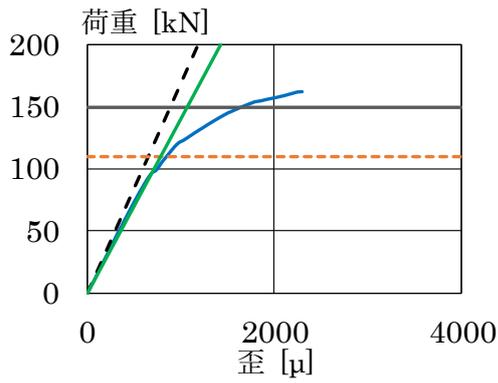
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



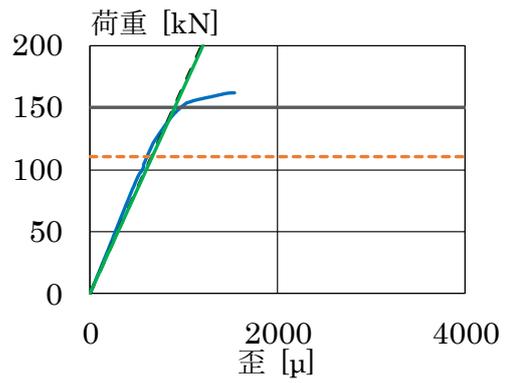
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - - : 式 (17) — : FEA - - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

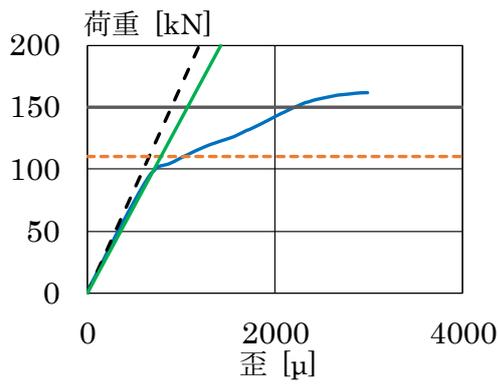
図 5-14 荷重-歪関係 【D-3】



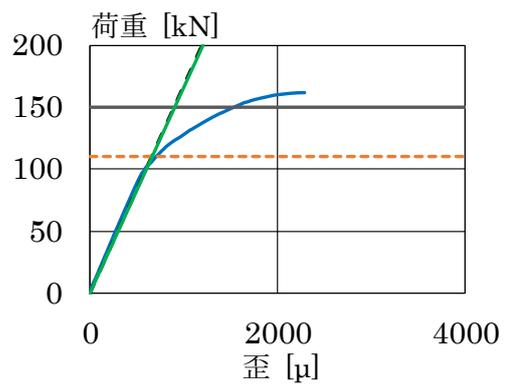
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



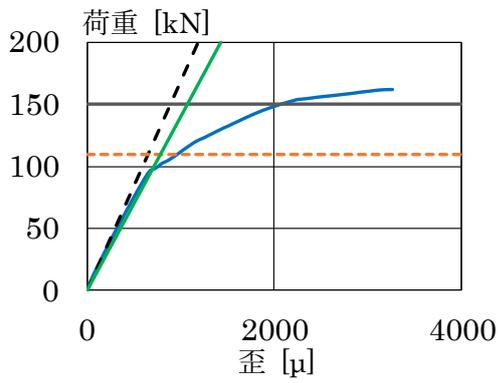
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



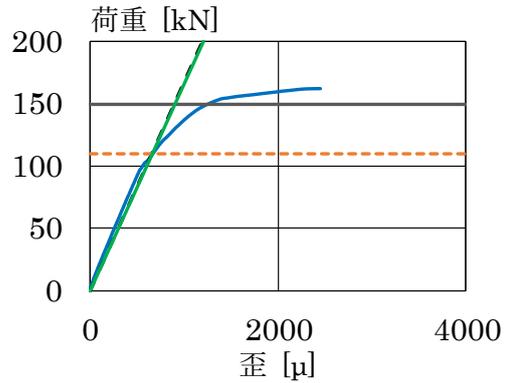
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



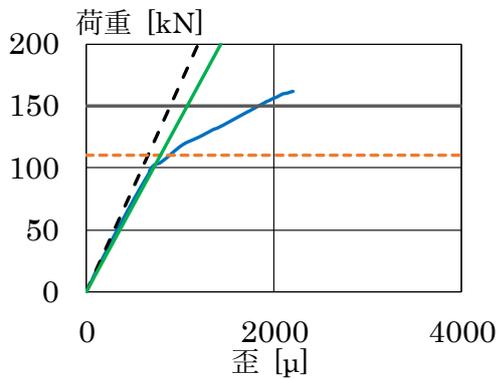
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



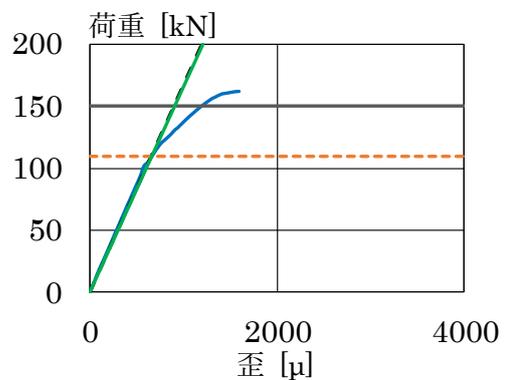
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



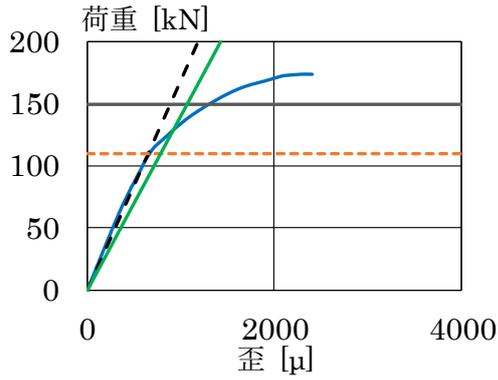
(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



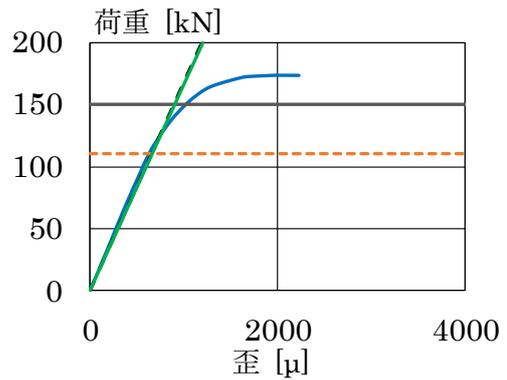
(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

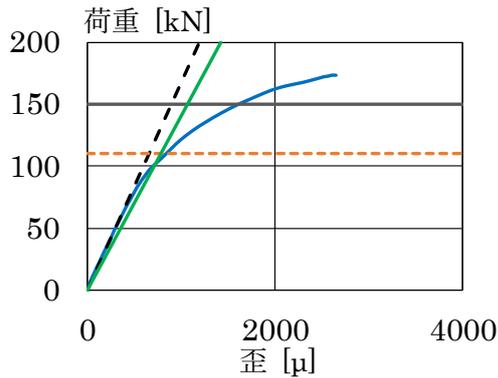
図 5-15 荷重-歪関係 【D-4】



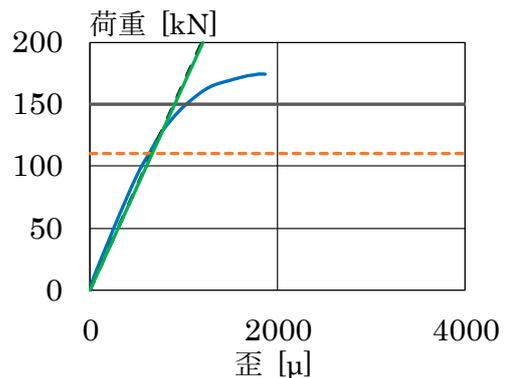
(a) 接着面 A, $x = 50\text{mm}$



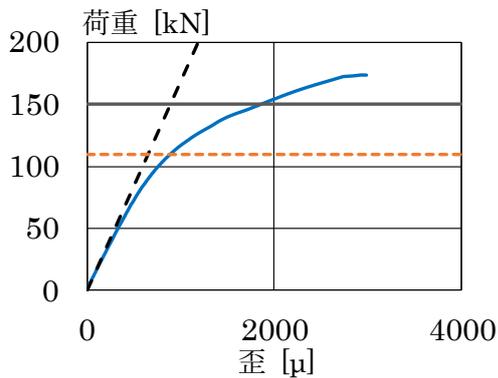
(b) 接着面 A, $x = 75\text{mm}$



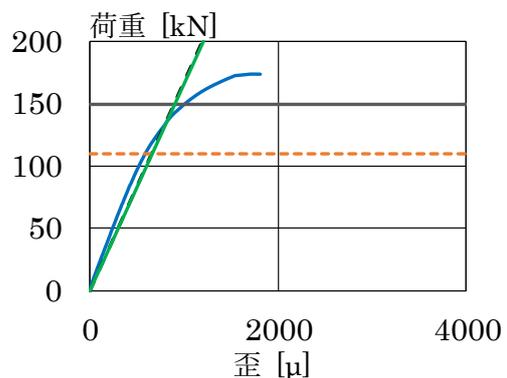
(c) 接着面 B, $x = 50\text{mm}$



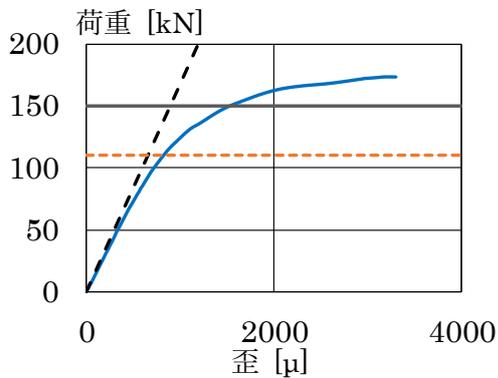
(d) 接着面 B, $x = 75\text{mm}$



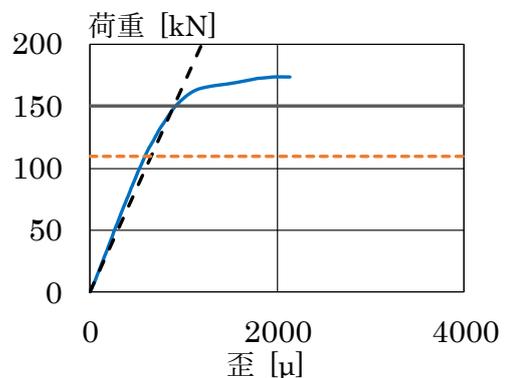
(e) 接着面 C, $x = 50\text{mm}$



(f) 接着面 C, $x = 75\text{mm}$



(g) 接着面 D, $x = 50\text{mm}$



(h) 接着面 D, $x = 75\text{mm}$

— : 実験値 - - - : 式 (17) — : FEA - - - : 36.12MPa 時の荷重 — : 50.26MPa 時の荷重

図 5-16 荷重-歪関係 【D-5】

$$\varepsilon = \frac{P}{b_s t_s E_s + 2b_{cf} t_{cf} E_{cf}} \quad (17)$$

ε : 歪, P : 荷重, b_s : 鋼材の幅, t_s : 鋼材の厚さ, E_s : 鋼材の弾性係数,
 b_{cf} : CFRP の幅, t_{cf} : CFRP の厚さ, E_{cf} : CFRP の繊維軸方向弾性係数

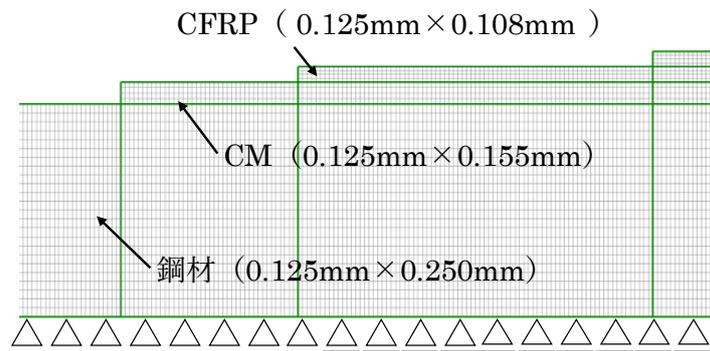
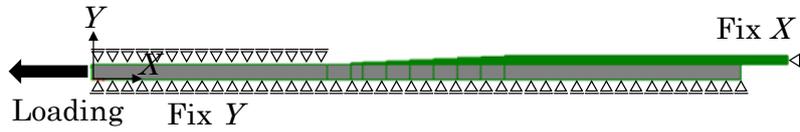
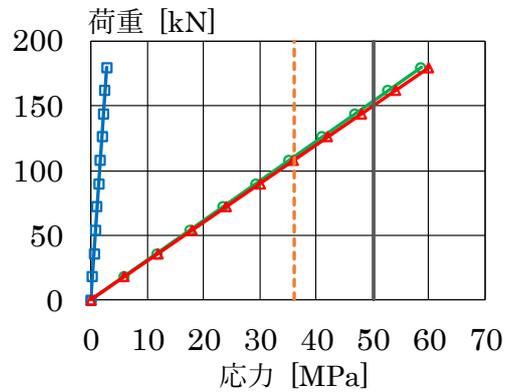


図 5-17 FEA モデル



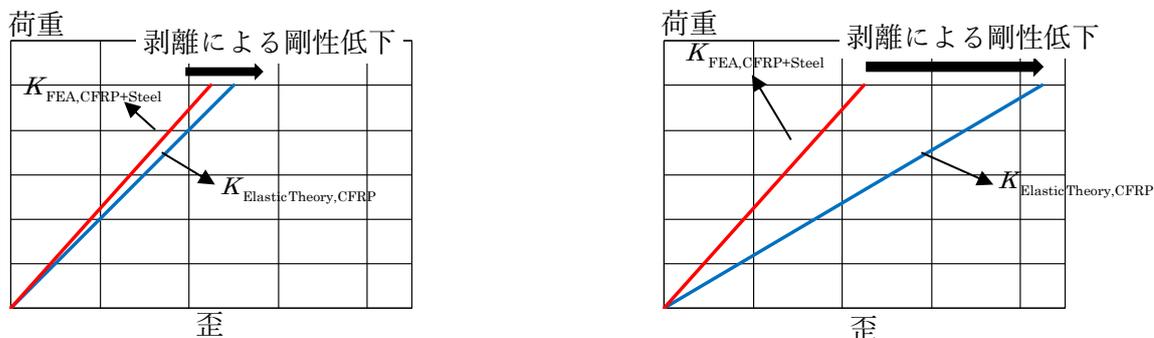
○: 剪断応力 □: 垂直応力 △: 主応力 - - -: 36.12MPa —: 50.26MPa

図 5-18 FEA による荷重-各応力関係

次に、主応力曲線に用いる接着強度を算出する。この接着強度の算出には初めに剥離のクライテリアを作成する必要がある。剥離のクライテリアには様々な評価法が提案されている。文献4)では、最大荷重による評価方法、歪変化点における評価方法が提案されている。最大荷重による評価方法は本論文の4章でも用いたように脆性的に剥離が生じるような破壊モードを有する場合に用いることができる。歪変化点では、剥離の開始位置付近に貼付した歪ゲージから得る方法である。この方法は前者の脆性的な破壊によるものではなく、本試験のように徐々に剥離破壊が進行するような場合に用いられる。母材である鋼材の歪が剥離と共に応力伝達が途切れ、歪が減少する荷重を剥離荷重と判定する。しかし、本試験体のような母材（鋼材）と接合材（CFRP）の幅が等しくない場合、接合材の剥離破壊に対して敏感に母材の歪を計測することは難しい。よって、剥離破壊のクライテリアにはCFRPの歪を用いることが望まれる。そこで、本論文ではCFRPの剛性変化率によって剥離破壊の評価を行う。評価に用いる剛性を式(17)に表す。通常、 $K_{FEA,CFRP+Steel}$ に対して、ある割合を超えた場合を剥離のクライテリアとするのが簡易な評価方法である。しかし、図5-19に示すように、この評価ではCFRPの軸剛性が鋼材に比べて大きい場合は剥離後の剛性が合成断面時とほぼ変化せず、逆にCFRPの軸剛性が小さい場合は剥離と共に急激に変化すると予想される。そこで、軸剛性比に依存しにくい評価方法として式(17)を用いた。式(17)は、図5-20に示すように母材と接合材が共に弾性状態にあることを条件とし、 $K_{FEA,CFRP+Steel}$ と $K_{ElasticTheory,CFRP}$ の和を2で除した剛性になった荷重時を剥離荷重と推定することで、合成断面時の剛性だけに依存しない評価方法となる。また、この式(17)について、各剛性に重みを付与させることによって、より安全側での評価が可能となる。

$$\frac{1}{2} \left(K_{FEA,CFRP+Steel} + K_{ElasticTheory,CFRP} \right) \quad (17)$$

$K_{FEA,CFRP+Steel}$: FEAによる合成断面時の軸剛性 $K_{ElasticTheory,CFRP}$: 弾性理論によるCFRPの軸剛性



(a) 接合材の軸剛性が母材に比べて大きい場合 (b) 接合材の軸剛性が母材に比べて小さい場合

図5-19 母材と接合材の軸剛性比による剥離時の剛性変化

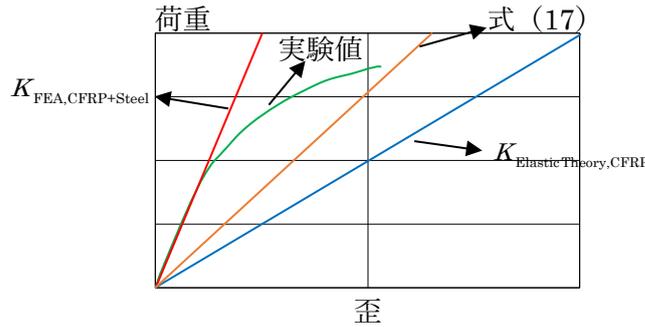


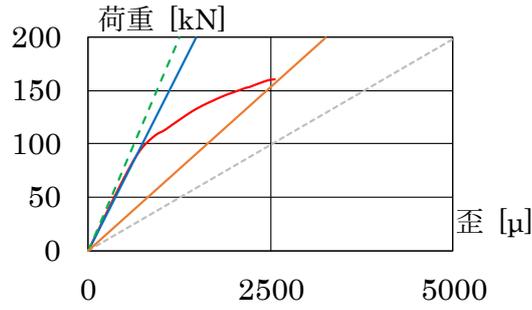
図 5-20 剥離推定方法

図 5-21 から図 5-30 に全試験体の剛性変化を用いた評価結果を示す。図 5-21-1 に示す W-1 試験体の接着面 A を例に剥離のクライテリアを用いた接着強度の算出の手順を示す。図 5-21 から図 5-30 の (a) は荷重-歪関係、(b) は式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係、(c) は式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係を示す。(b) は剛性に対応していると 0 となり、1 に近づくにつれて剥離の進展が観察できる。(c) は初期に負の変化率をとり、0 になると式 (17) の剛性に到達したことがわかる。(b) については FEA への妥当性を確認するためのグラフとなっており、剥離荷重の推定には図 5-19-11 (c) を用いる。剥離荷重の推定にはこの関係で 0 を取った荷重ステップを剥離荷重とする。また、本試験体は剥離の開始位置に最も近い $X=50\text{mm}$ 位置の歪を用いるが、開始位置に近ければ近いほど精度が上昇すると見込まれる。なお、剛性は荷重ステップに対して回帰直線によって算出するが、2 ステップ毎、4 ステップ毎で算出を行った結果、剛性変化のバラつきが大きいことが確認されたため、本論文では 10 ステップ毎の回帰直線を用いた。推定された剥離荷重時について、図 5-18 を用いて主応力を算出することで主応力曲線にプロットする。図 5-21-1 から W-1 試験体の接着面 A の剥離時の荷重は 99.616kN、その時の剪断応力、垂直応力、主応力はそれぞれ 32.464MPa、1.587MPa、33.268MPa となった。これらの結果を表 5-3 に各試験体の剥離荷重、そして図 5-31 に主応力曲線を示す。表 5-3、図 5-31 から、最大荷重がほぼ等しい結果であった両試験体の剥離時の荷重にバラつきが見られることがわかる。剥離時の主応力としては、W 試験体、D 試験体でそれぞれ 34.535MPa、35.802MPa と差は無いものの、変動係数は 0.033、0.094 と最大荷重と同様に約 3 倍のバラツキとなっている。

$$1 - \frac{\Delta K_{\text{Ex}}}{K_{\text{FEA,CFRP+Steel}}} \quad (18\text{-a})$$

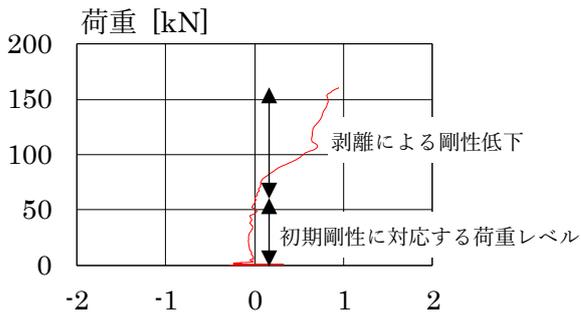
$$1 - \frac{\Delta K_{\text{Ex}}}{\frac{1}{2}(K_{\text{FEA,CFRP+Steel}} + K_{\text{ElasticTheory,CFRP}})} = 1 - \frac{2\Delta K_{\text{Ex}}}{K_{\text{FEA,CFRP+Steel}} + K_{\text{ElasticTheory,CFRP}}} \quad (18\text{-b})$$

ΔK_{Ex} : 歪ゲージから得られる剛性, $K_{\text{FEA,CFRP+Steel}}$: FEA から得られる剛性 (実験値と対応),
 $K_{\text{ElasticTheory,CFRP}}$: 接着された CFRP にのみ引張力が作用すると仮定した弾性理論

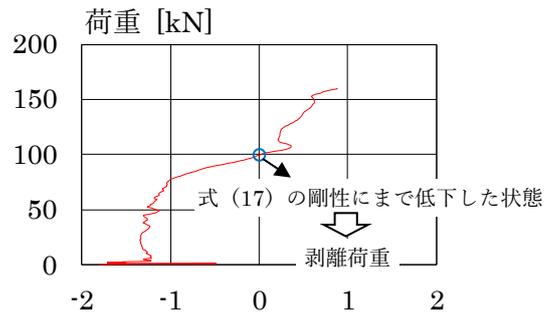


- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

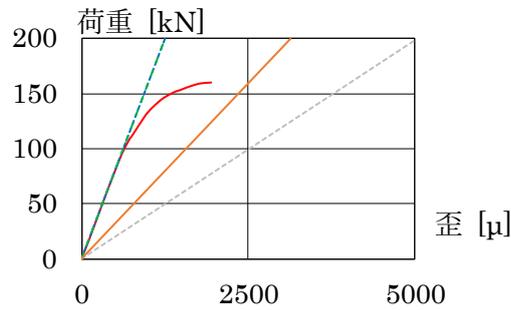


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係



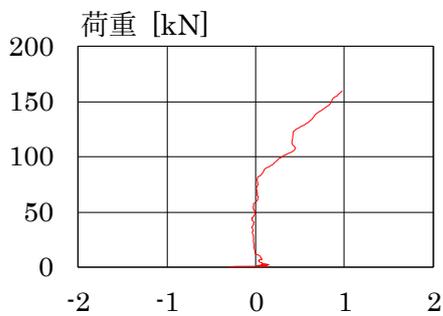
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-1 W-1 試験体 【接着面 A, X=50mm】

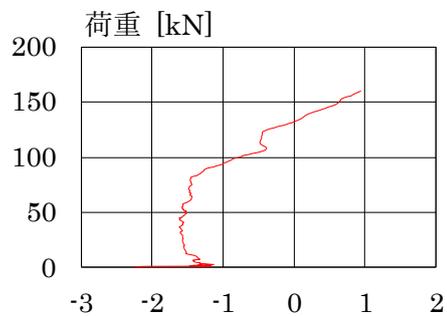


- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

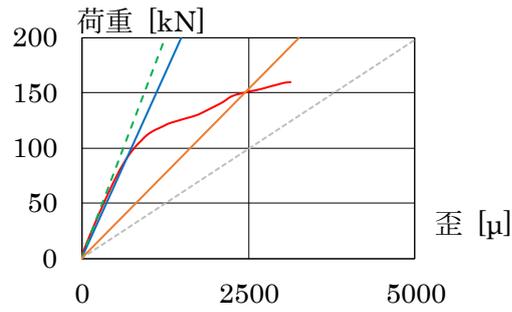


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係



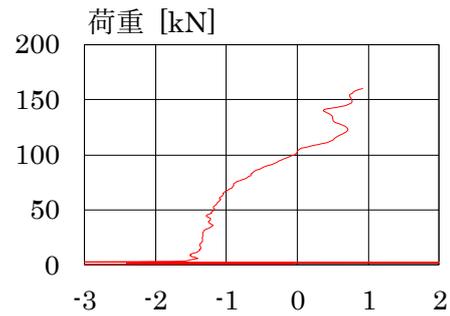
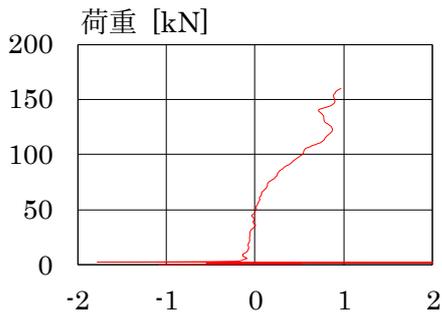
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-2 W-1 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

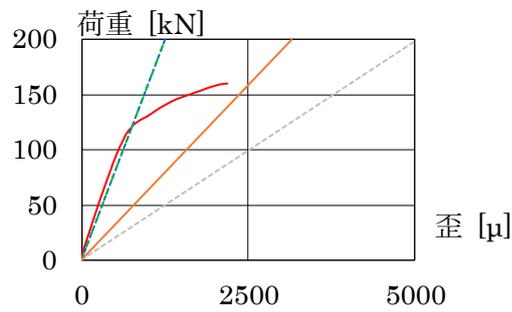
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

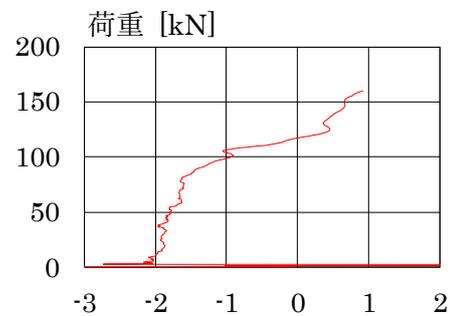
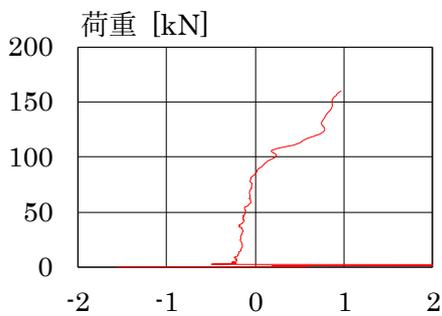
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-3 W-1 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

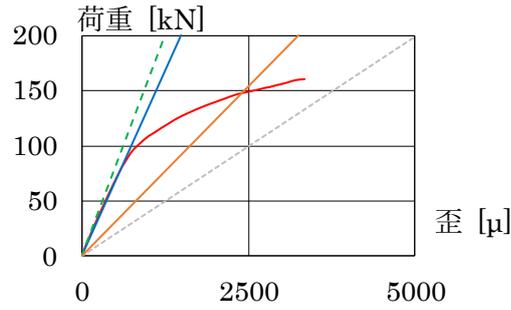
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

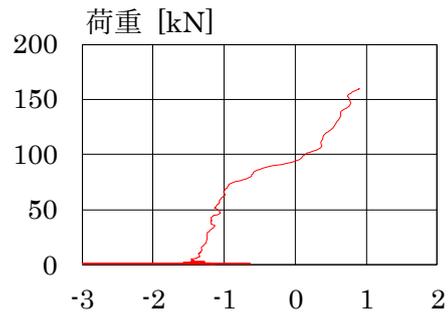
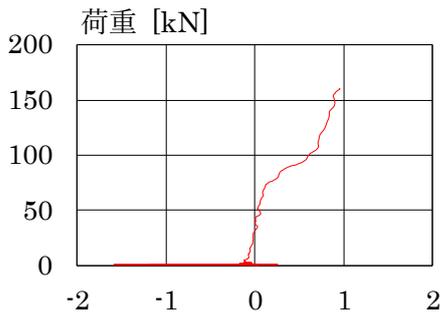
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-4 W-1 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

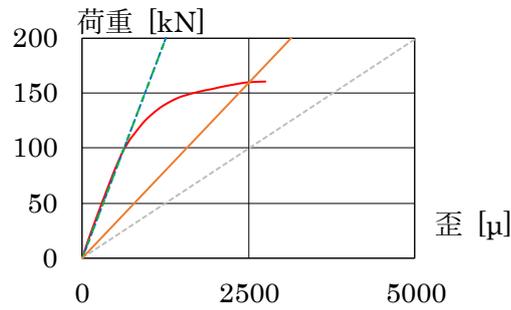
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

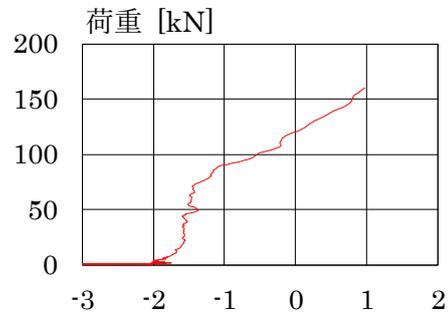
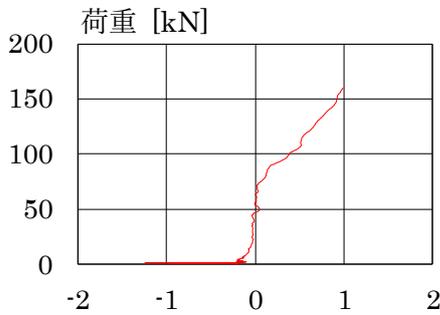
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-5 W-1 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

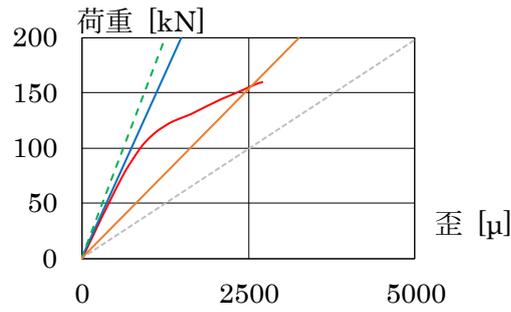
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

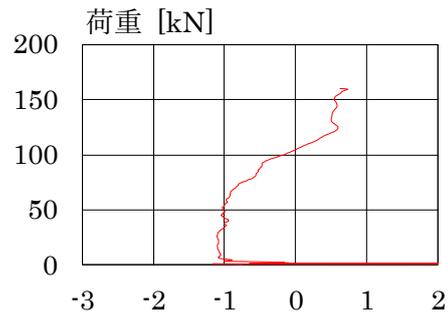
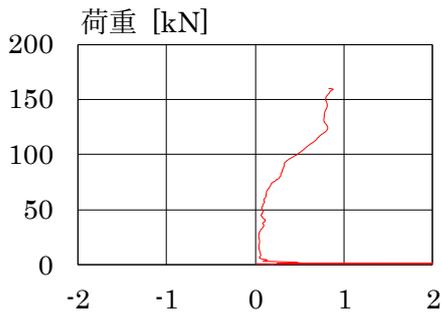
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-6 W-1 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

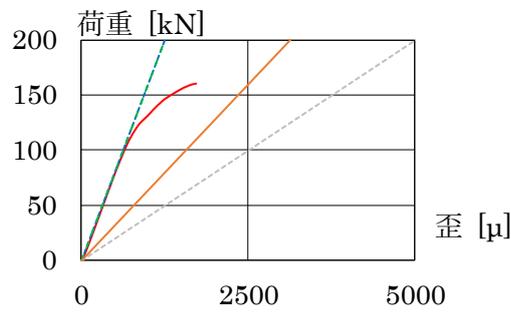
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

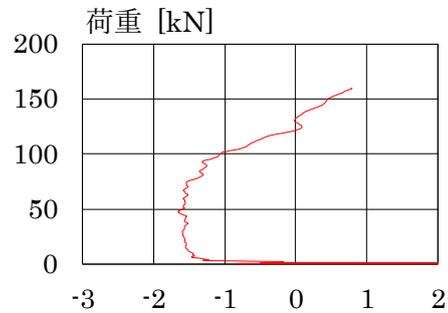
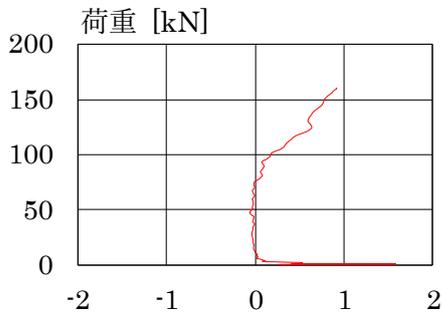
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-7 W-1 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

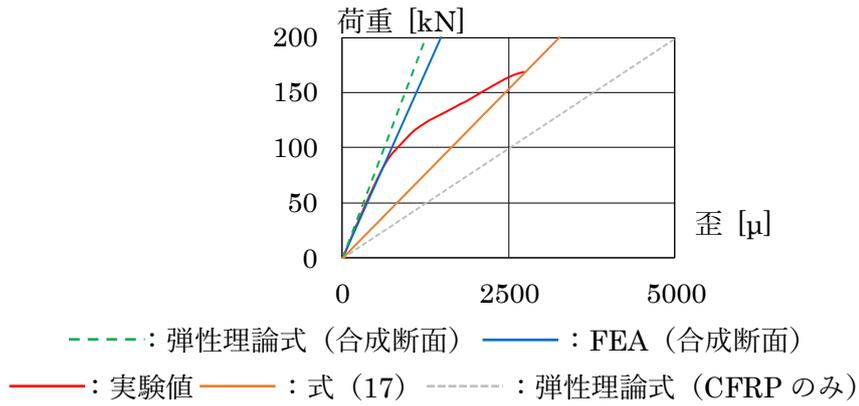


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

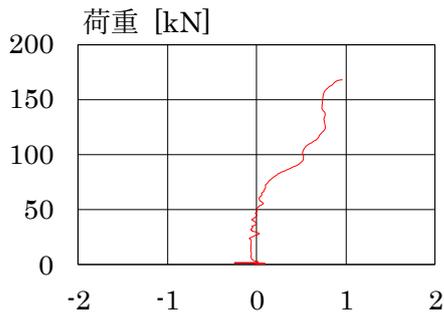
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-21-8 W-1 試験体 【接着面 D, X=75mm】

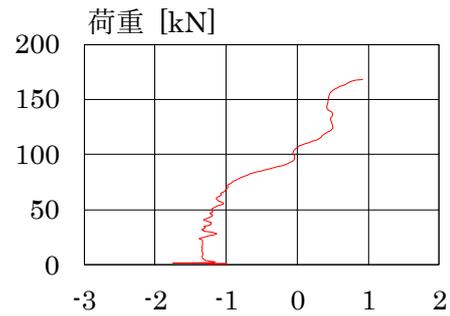
図 5-21 W-1 試験体



(a) 荷重-歪関係

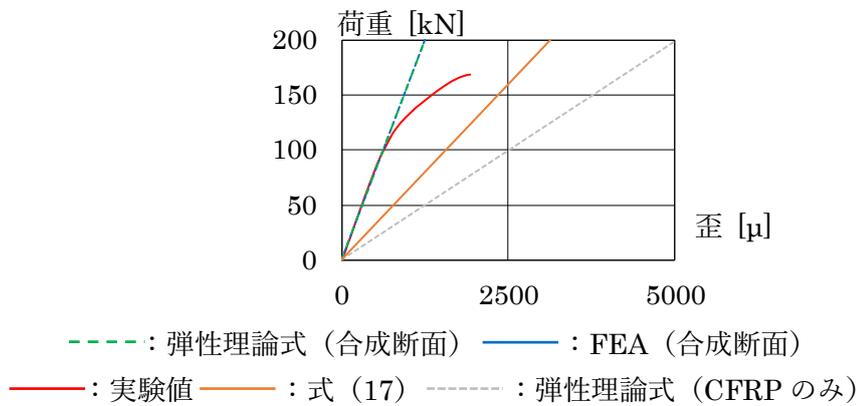


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

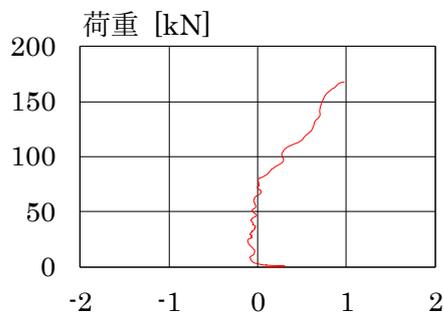


(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

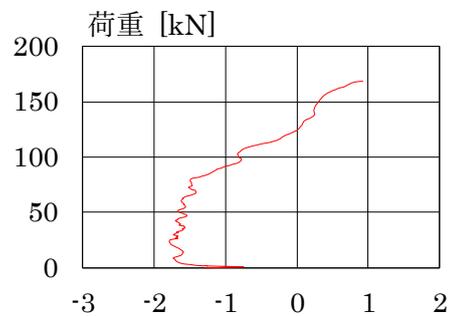
図 5-22-1 W-2 試験体 【接着面 A, X=50mm】



(a) 荷重-歪関係

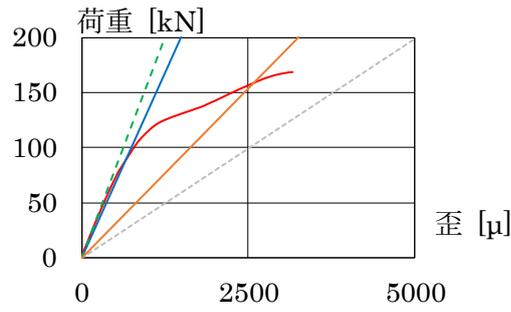


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係



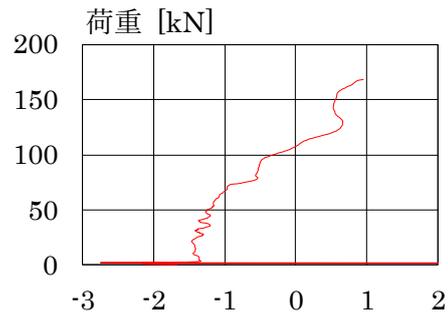
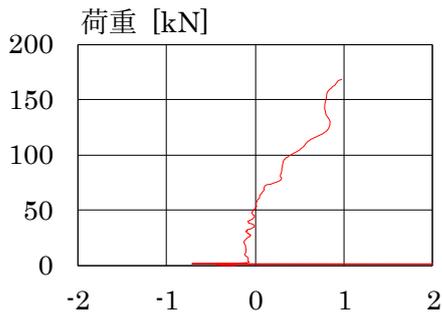
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-22-2 W-2 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

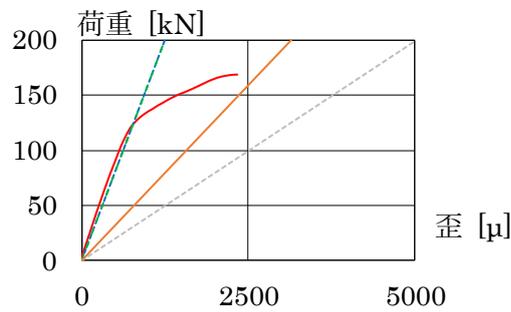
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

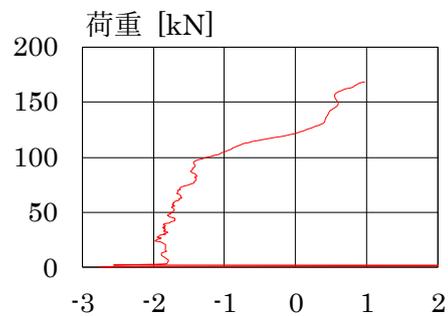
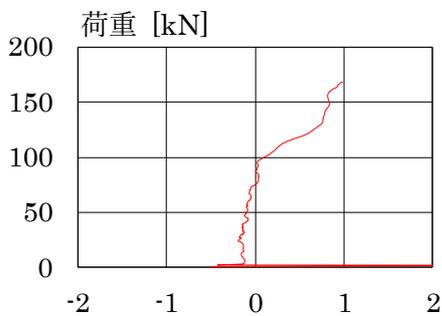
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-22-3 W-2 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

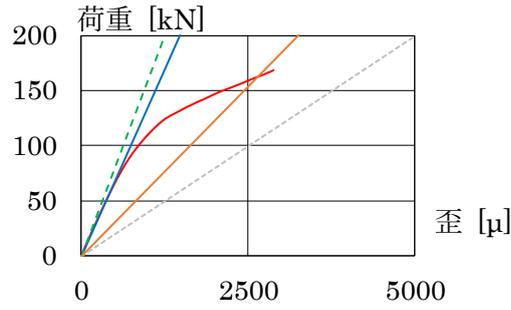
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

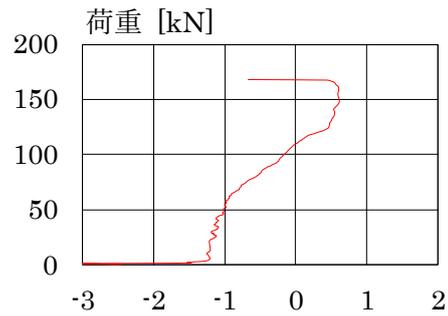
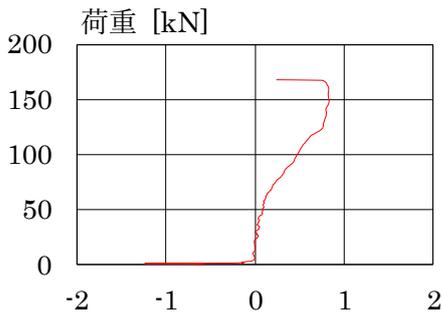
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-22-4 W-2 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

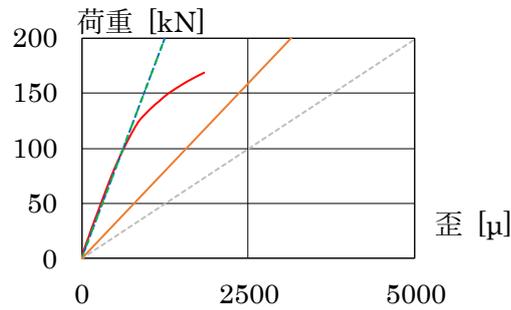
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

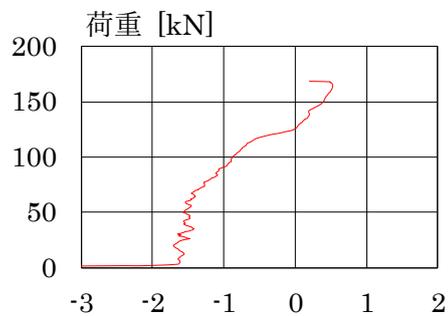
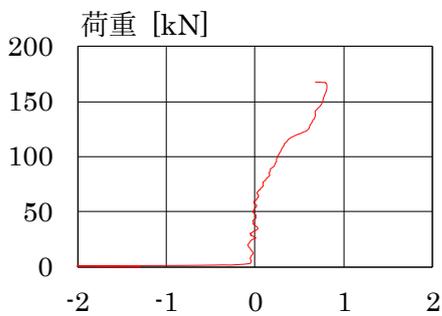
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-22-5 W-2 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

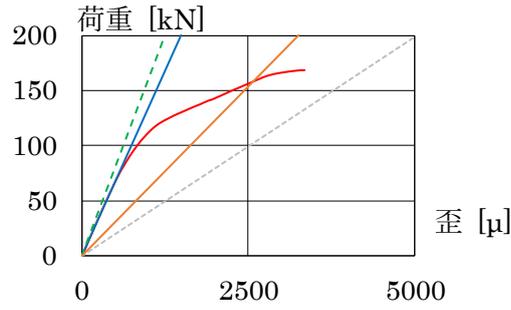
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

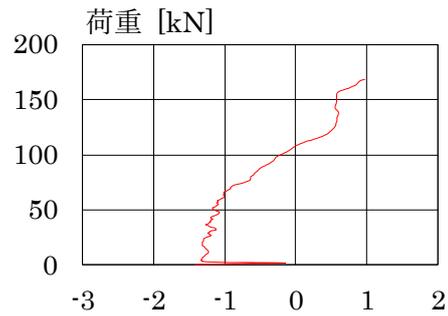
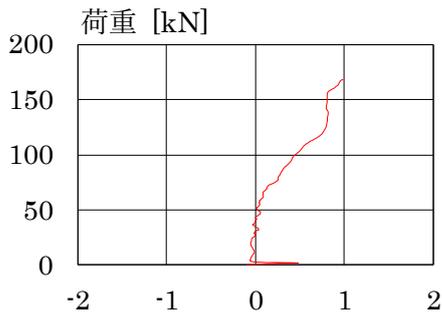
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-22-6 W-2 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

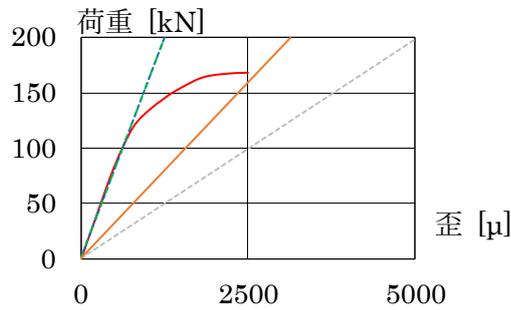
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

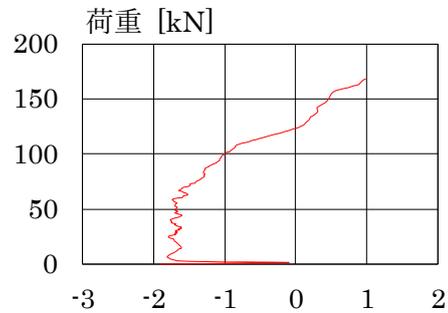
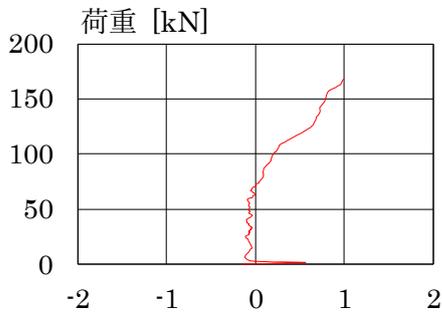
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-22-7 W-2 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

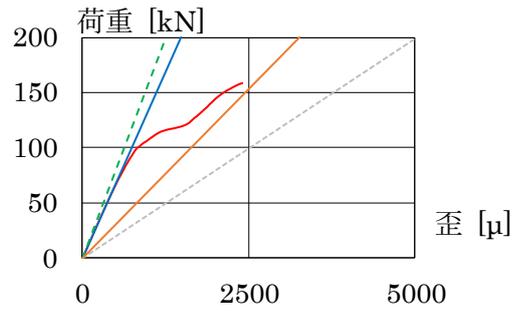


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

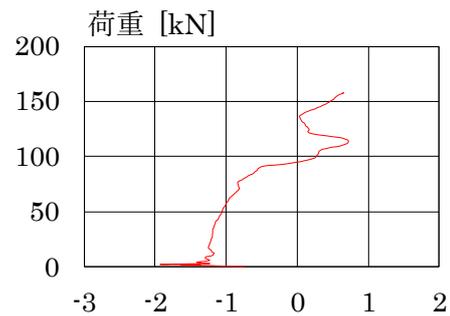
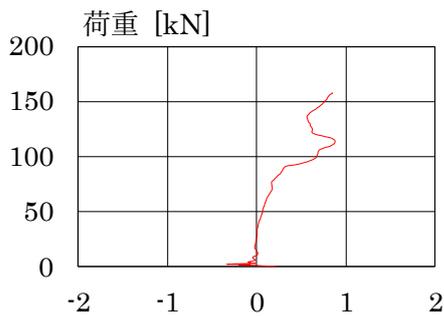
図 5-22-8 W-2 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-22 W-2 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

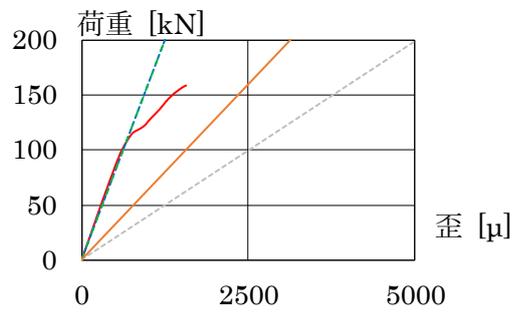
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

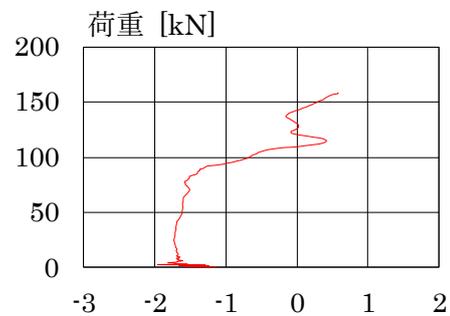
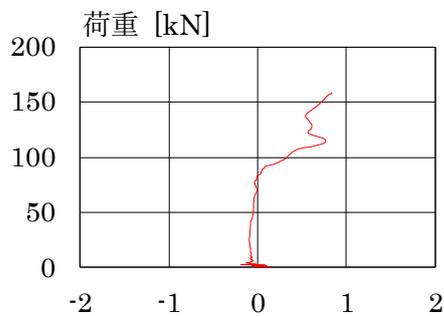
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-23-1 W-3 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

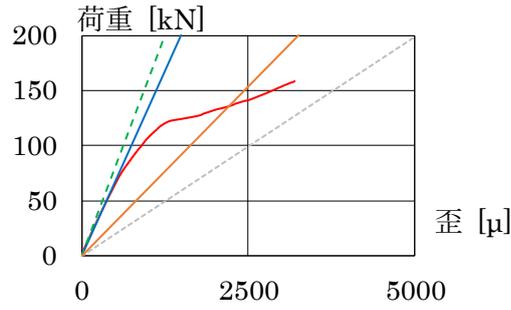
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

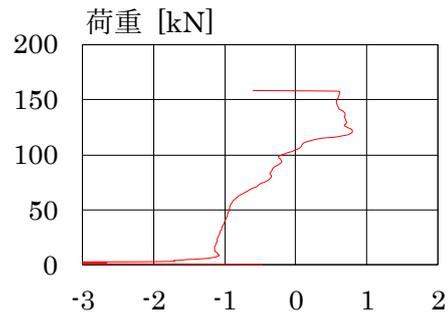
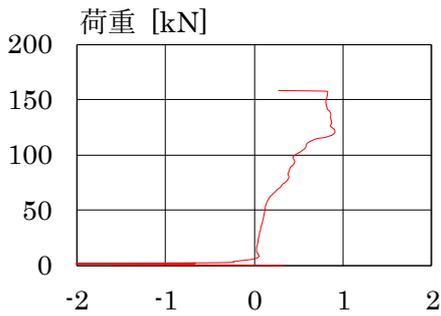
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-23-2 W-3 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

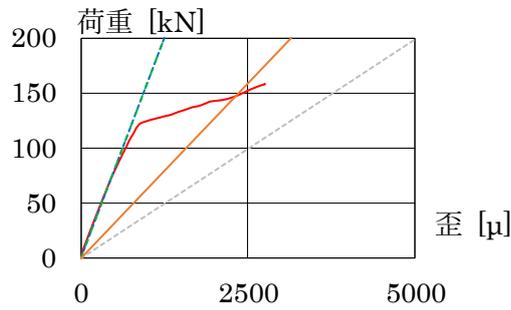
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

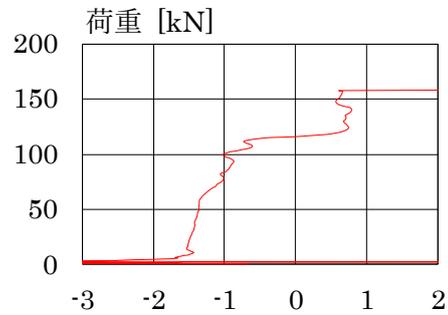
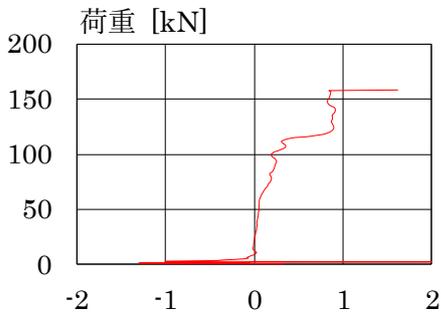
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-23-3 W-3 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

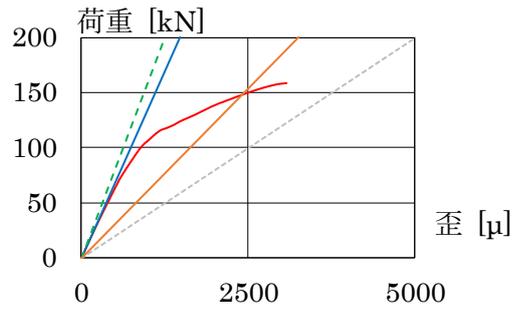
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

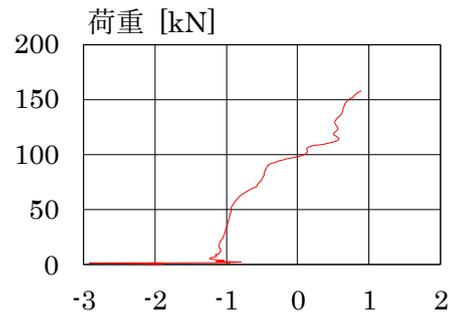
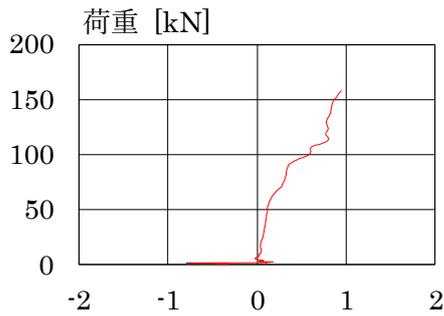
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-23-4 W-3 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

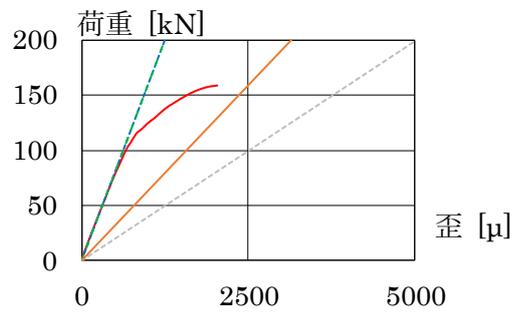
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

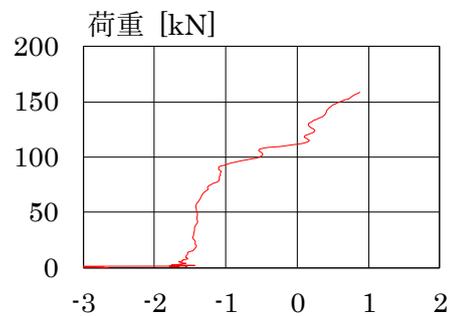
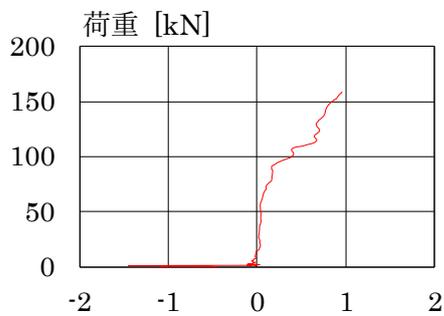
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-23-5 W-3 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

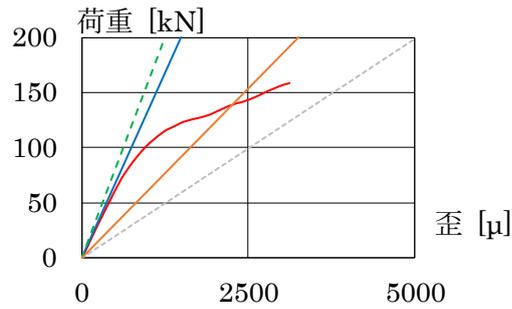
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

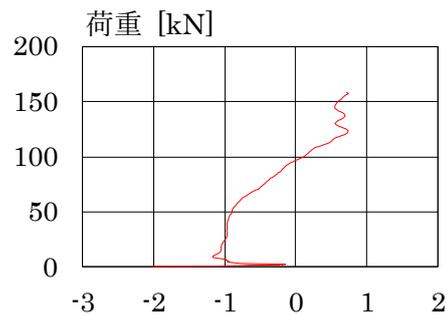
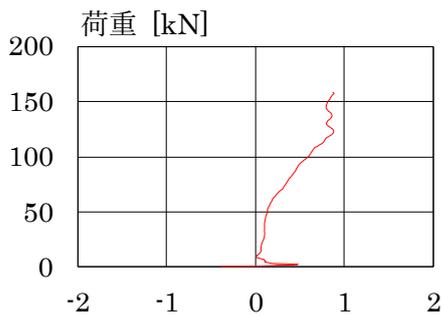
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-23-6 W-3 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

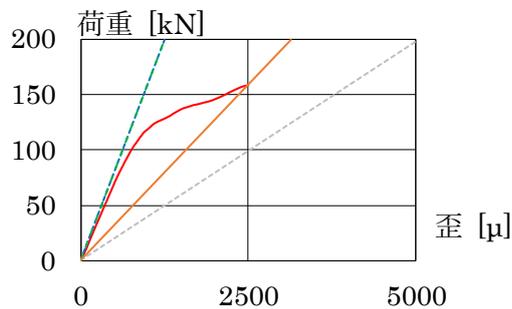
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

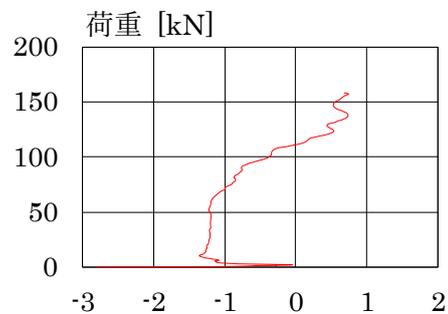
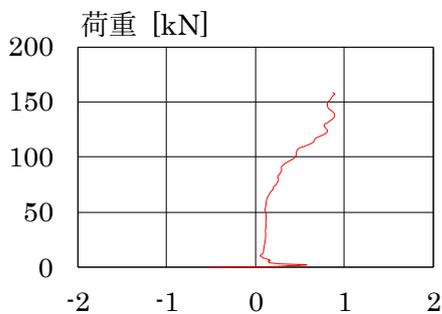
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-23-7 W-3 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

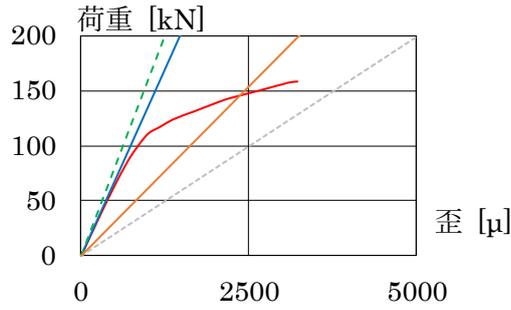


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

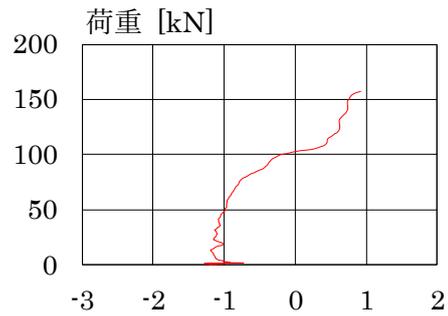
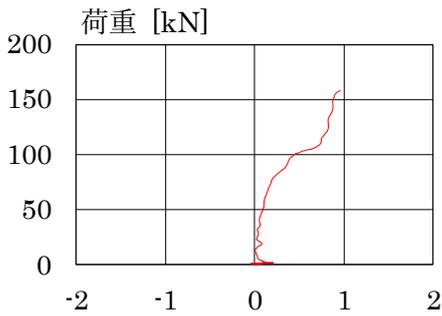
図 5-23-8 W-3 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-23 W-3 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

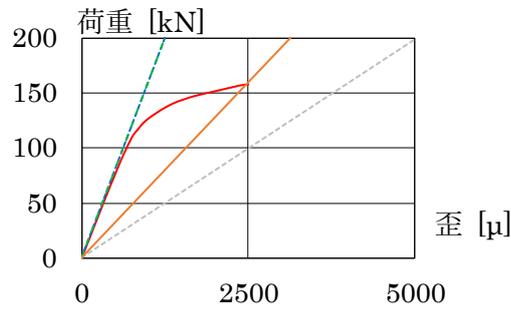
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

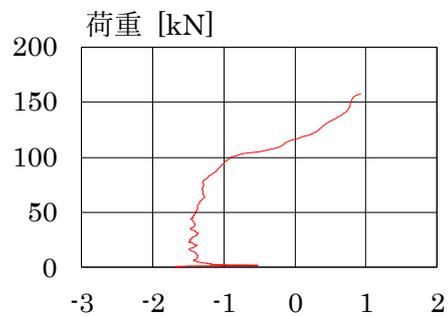
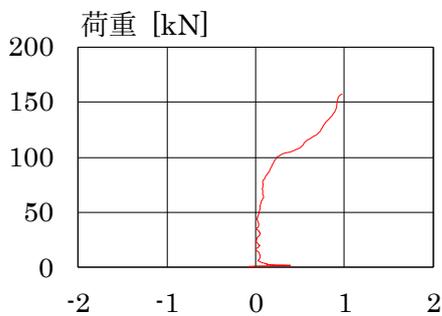
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-24-1 W-4 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

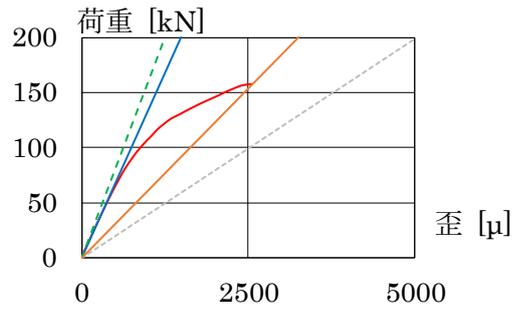
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

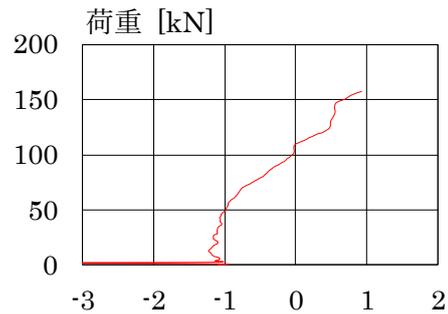
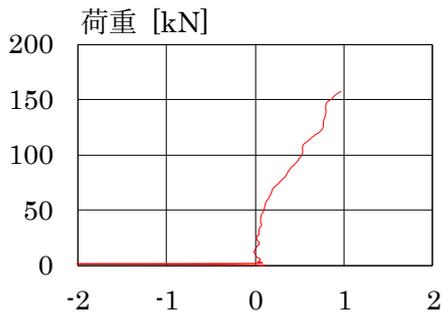
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-24-2 W-4 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

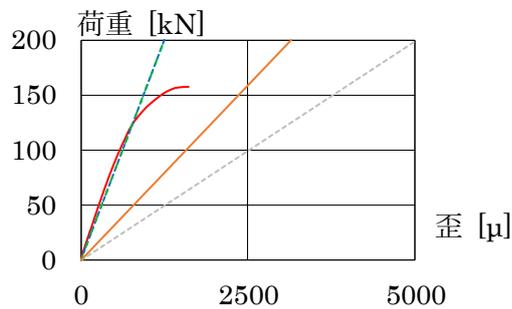
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

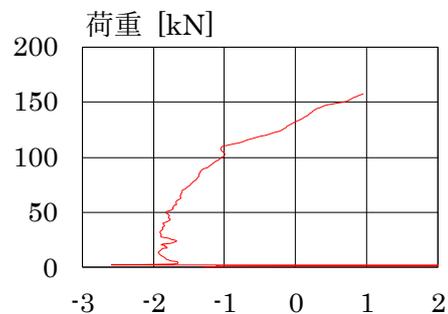
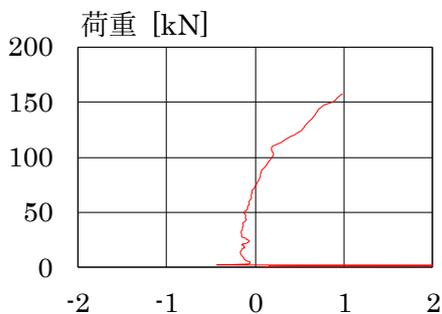
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-24-3 W-4 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

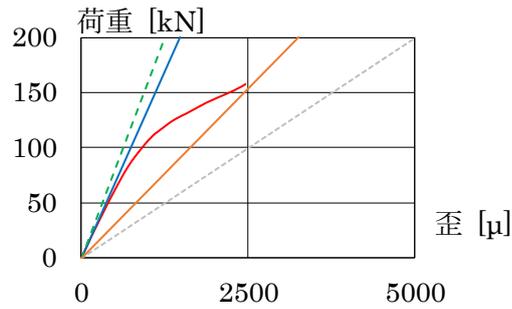
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

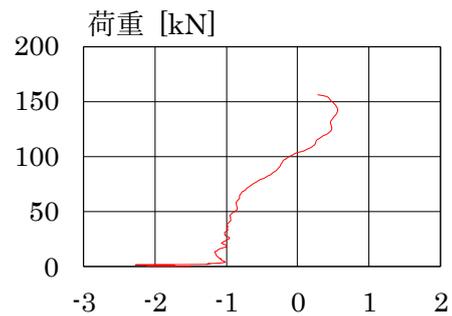
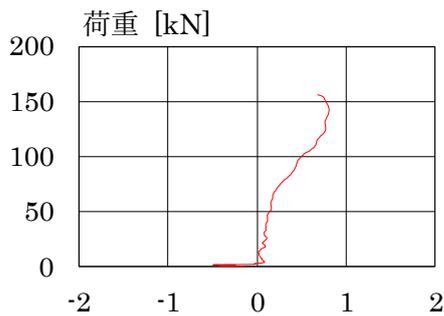
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-24-4 W-4 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

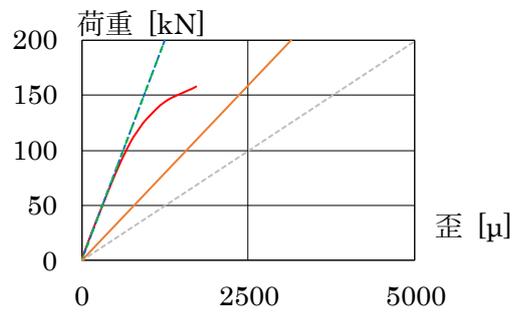
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

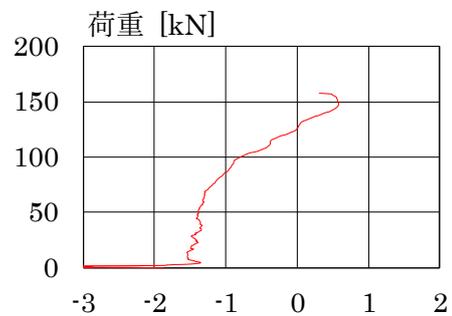
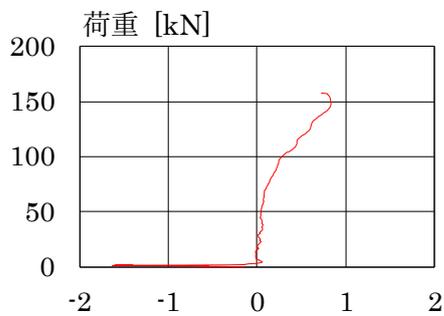
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-24-5 W-4 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

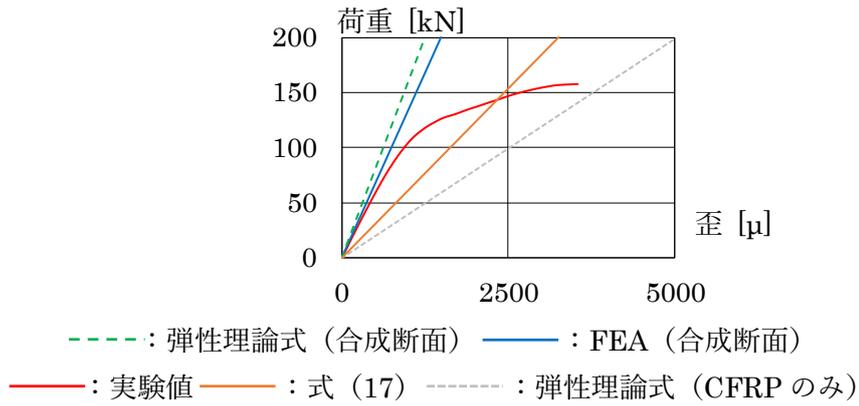
(a) 荷重-歪関係



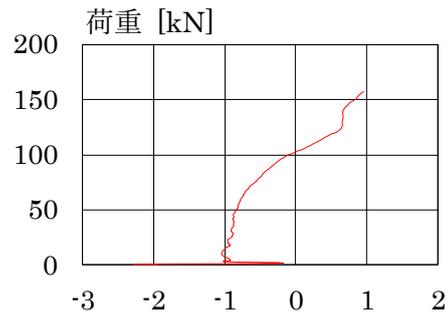
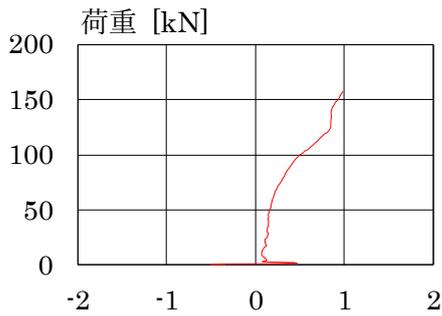
(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-24-6 W-4 試験体 【接着面 C, X=75mm】



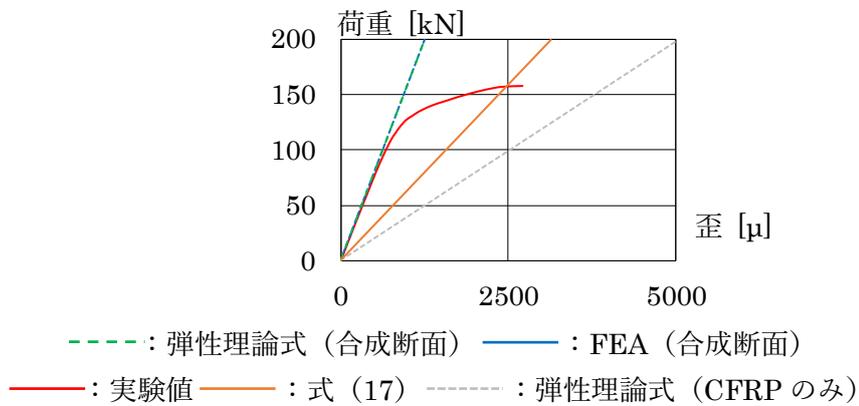
(a) 荷重-歪関係



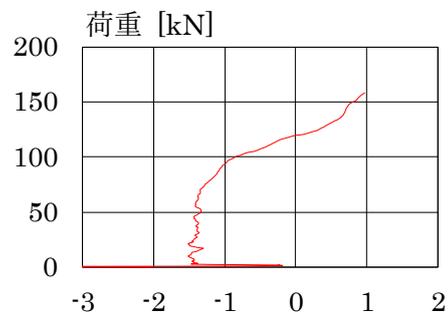
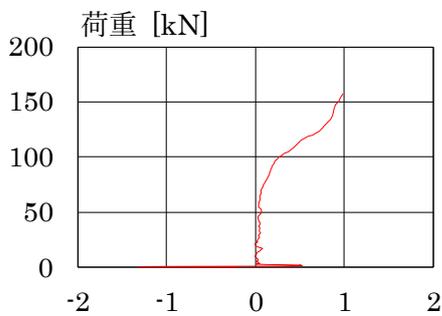
(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-24-7 W-4 試験体 【接着面 D, X=50mm】



(a) 荷重-歪関係

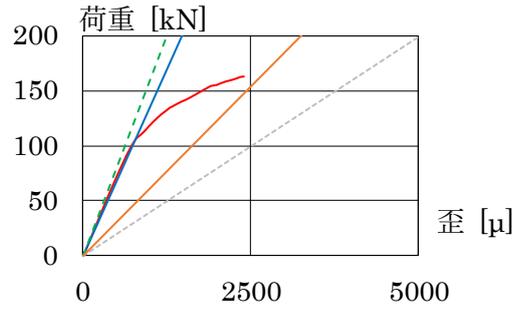


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

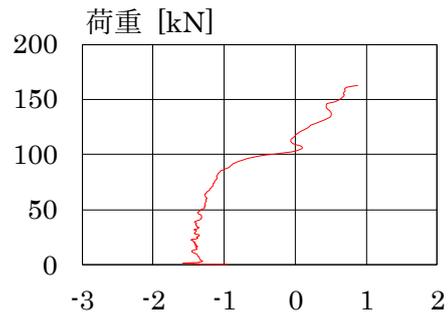
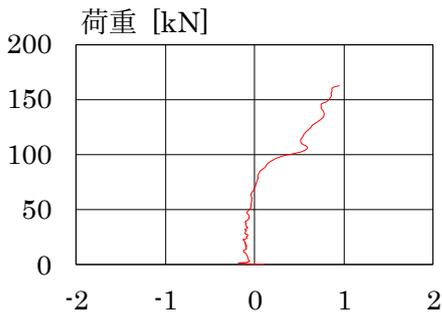
図 5-24-8 W-4 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-24 W-4 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

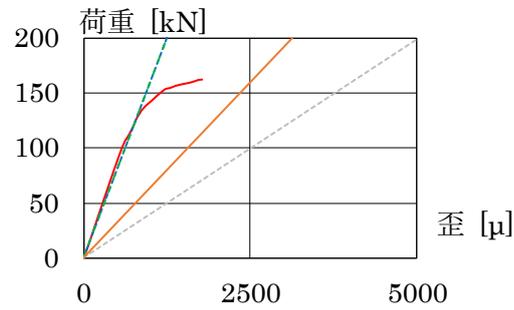
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

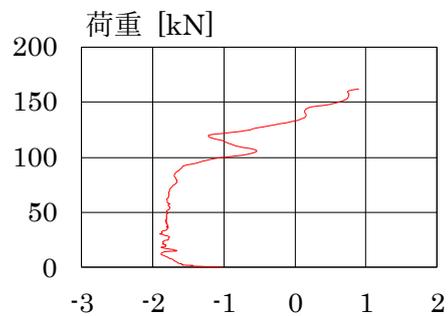
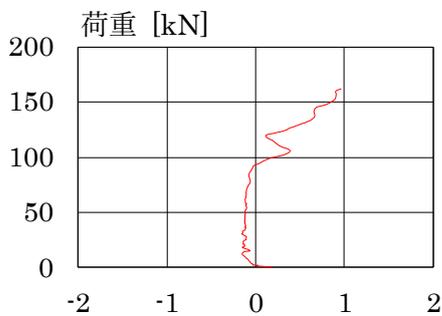
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-25-1 W-5 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

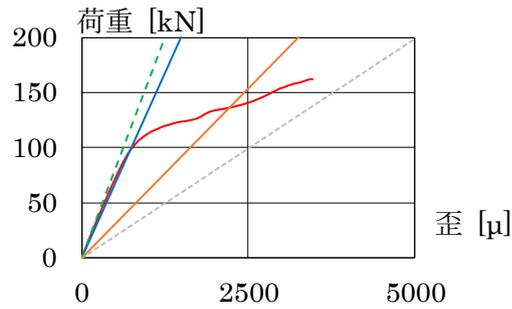
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

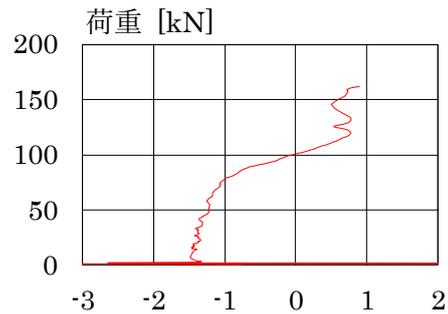
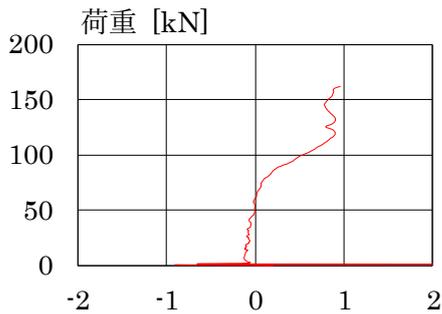
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-25-2 W-5 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

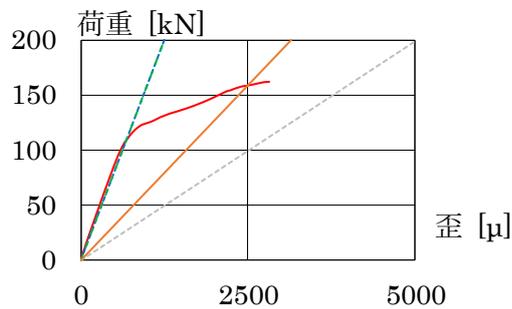
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

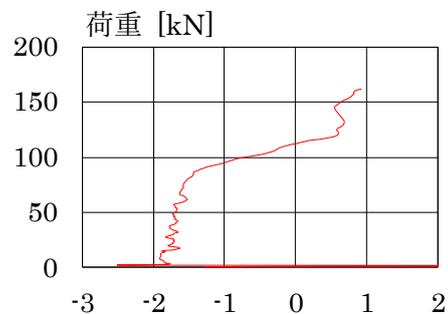
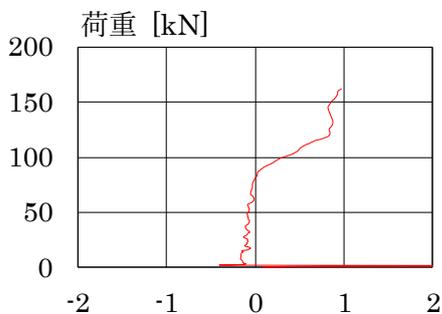
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-25-3 W-5 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

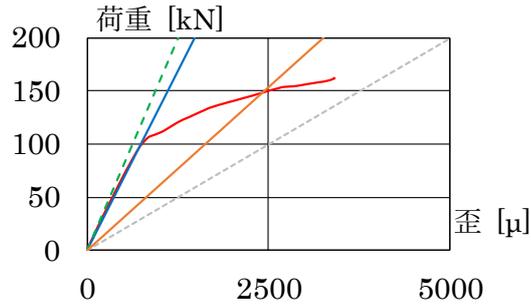
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

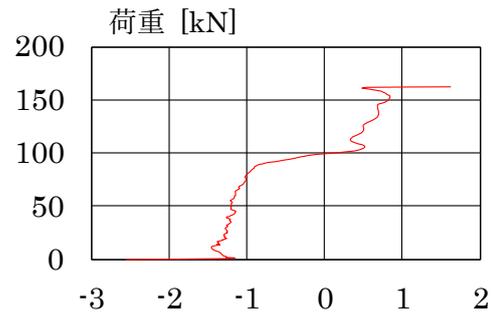
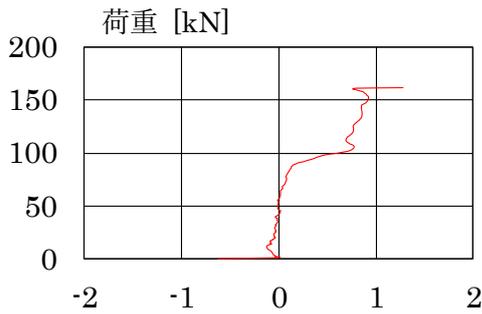
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-25-4 W-5 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

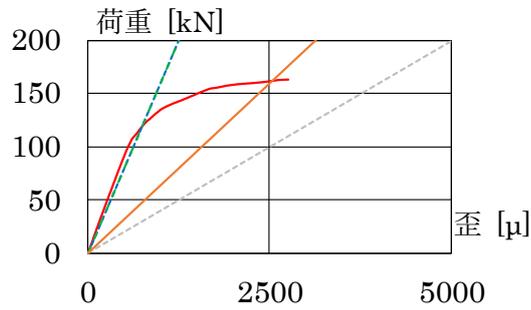
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

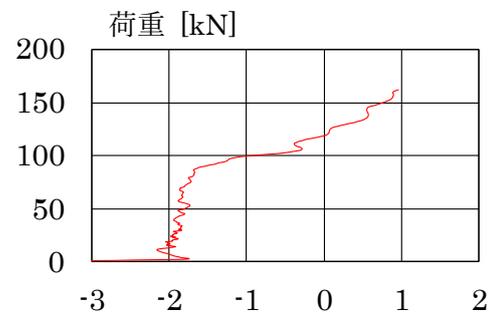
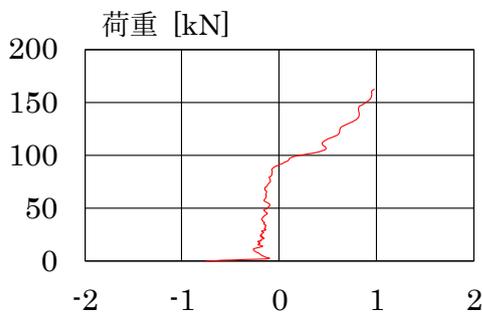
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-25-5 W-5 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

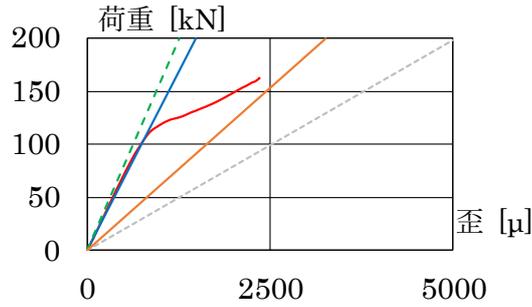
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

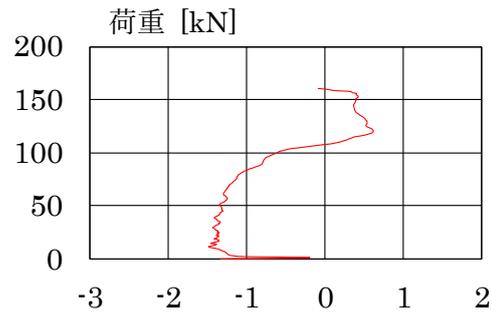
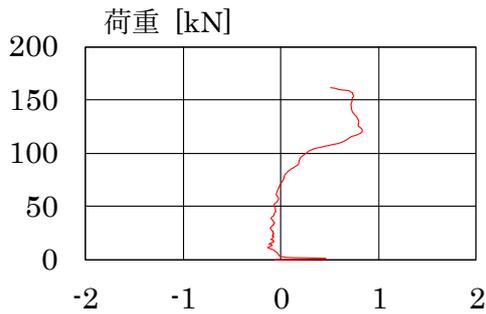
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-25-6 W-5 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

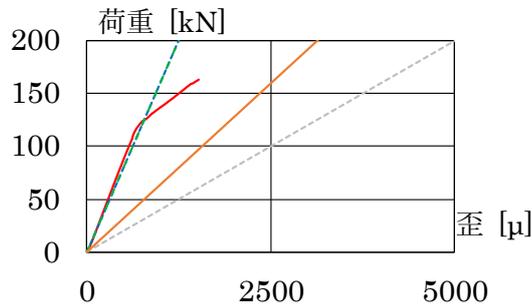
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

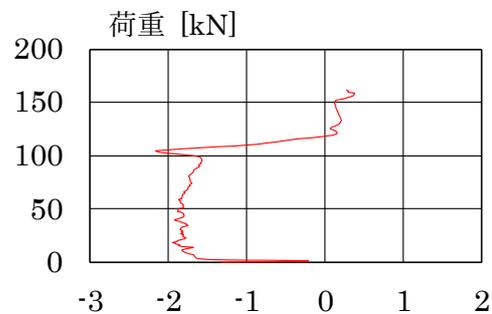
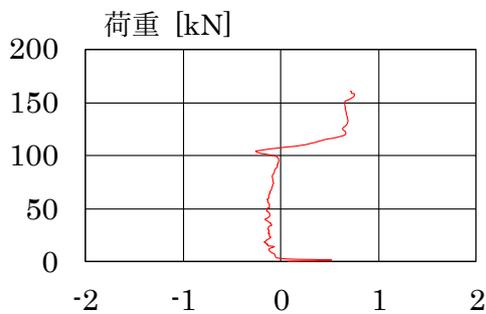
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-25-7 W-5 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

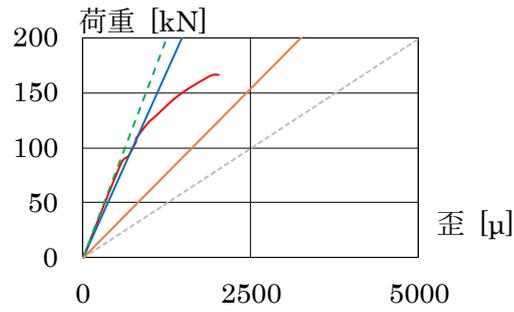


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

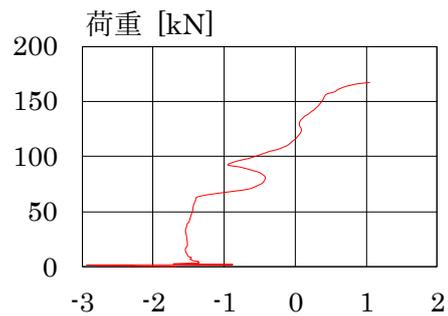
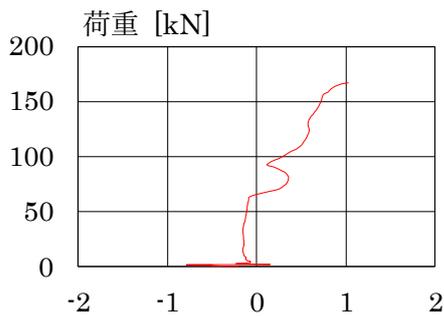
図 5-25-8 W-5 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-25 W-5 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

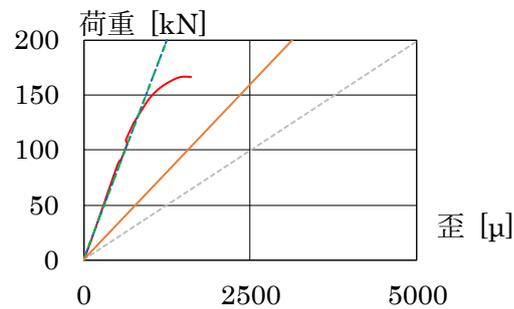
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

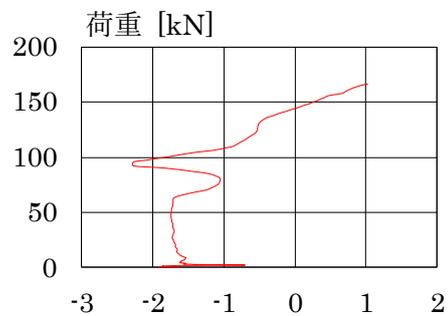
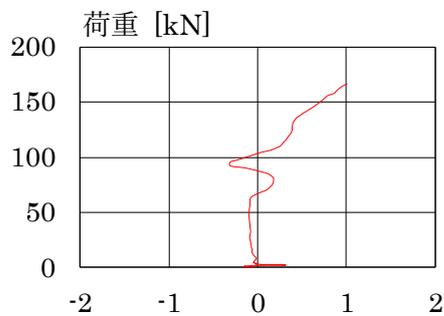
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-26-1 D-1 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

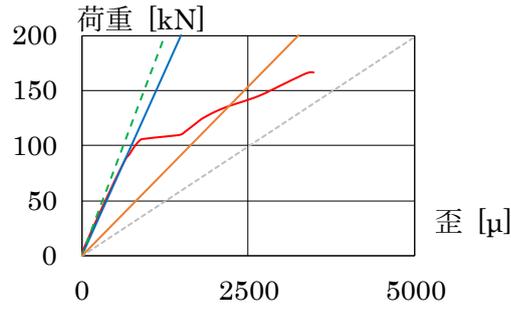
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

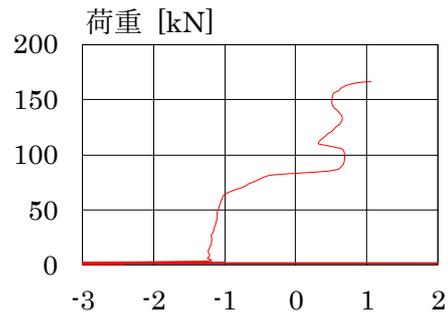
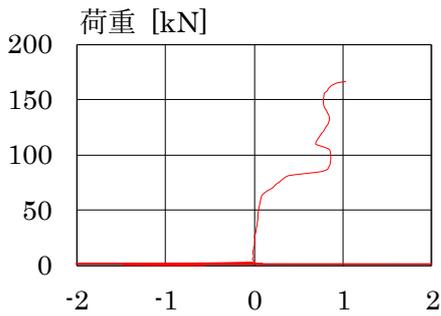
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-26-2 D-1 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

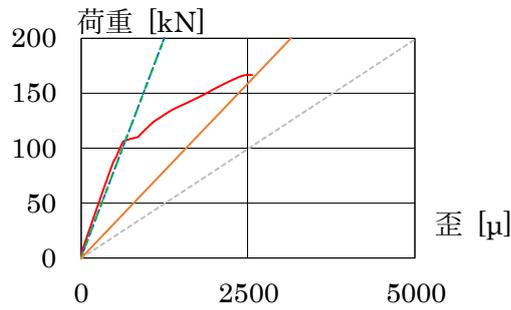
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

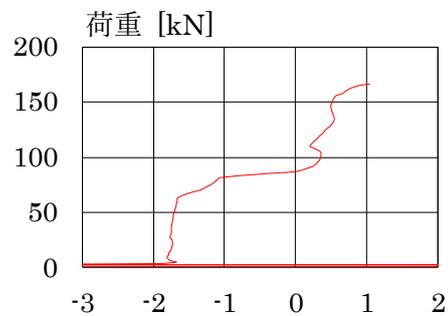
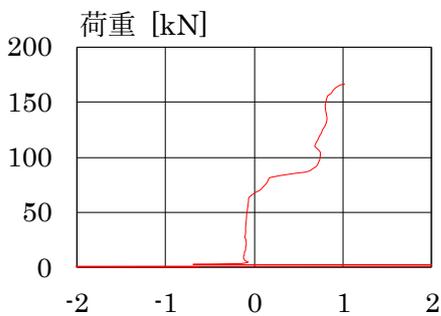
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-26-3 D-1 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

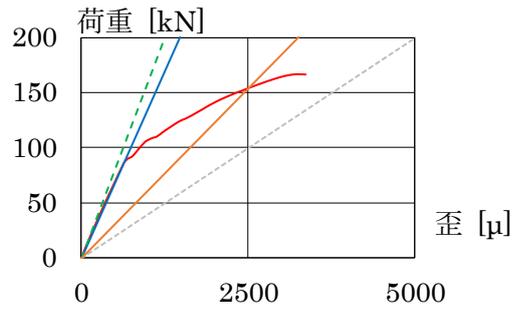
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

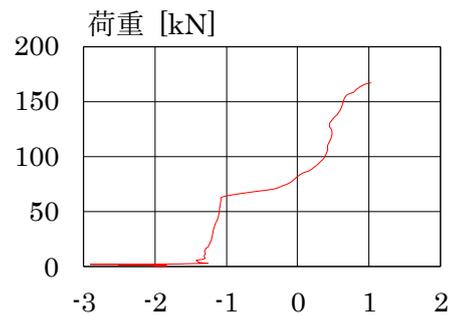
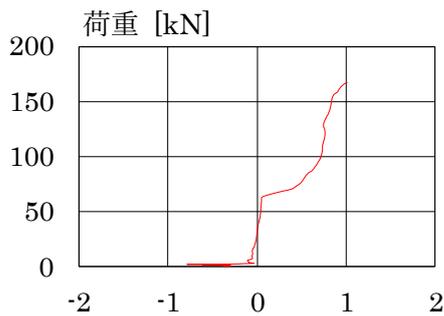
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-26-4 D-1 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

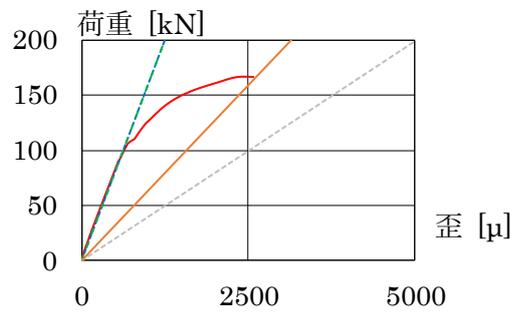
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

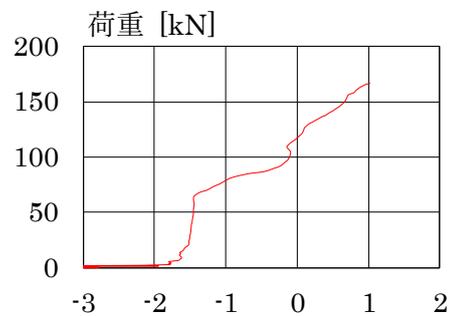
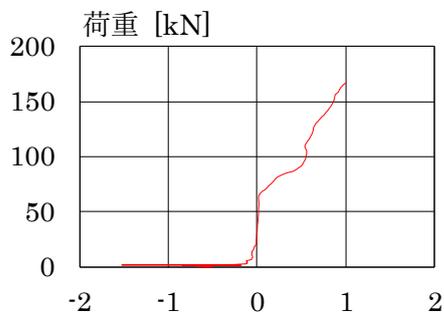
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-26-5 D-1 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

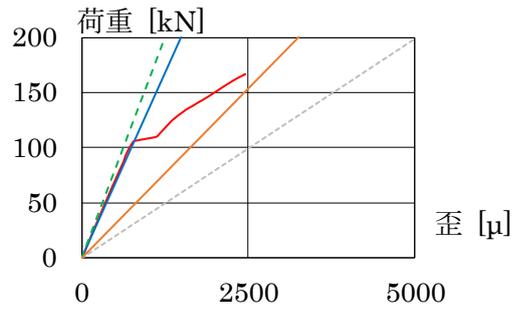
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

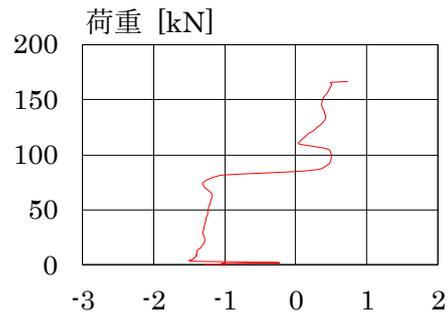
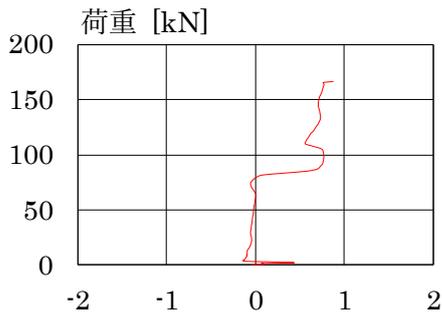
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-26-6 D-1 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

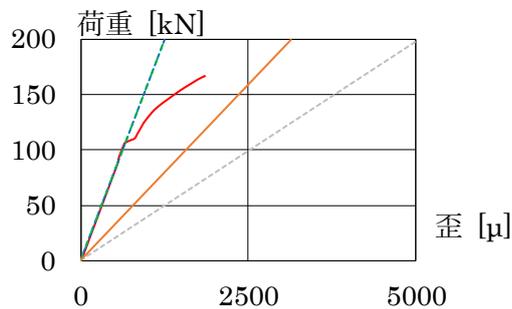
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

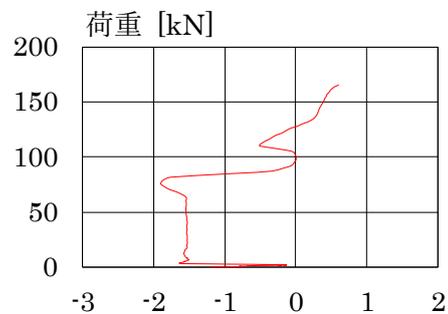
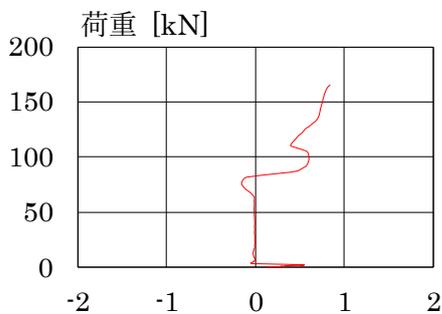
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-26-7 D-1 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

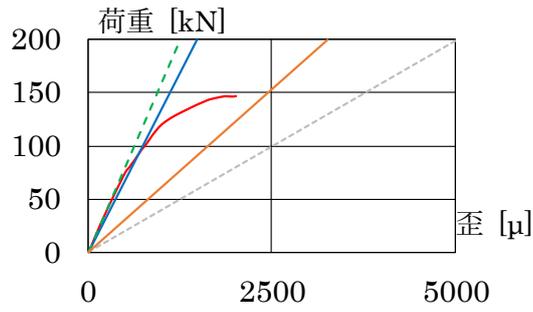


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

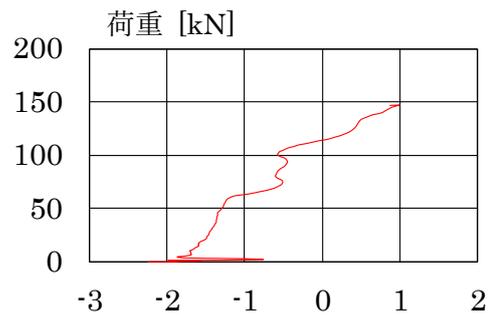
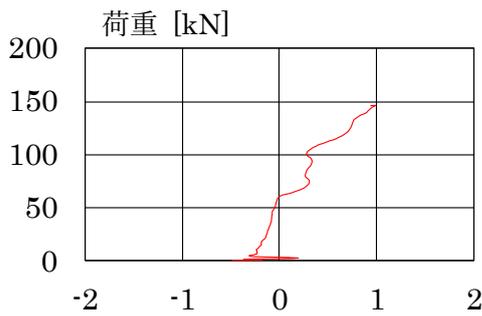
図 5-26-8 D-1 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-26 D-1 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

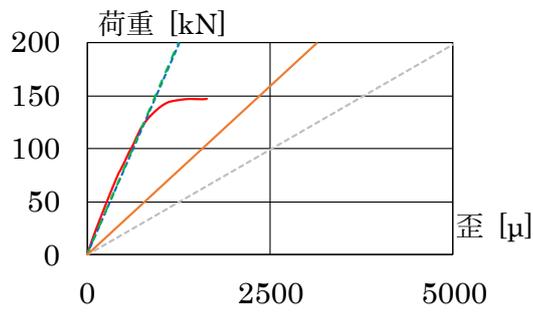
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

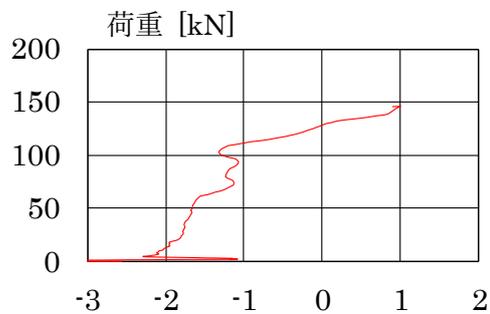
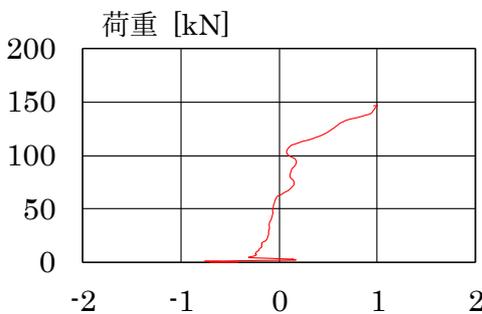
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-27-1 D-2 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

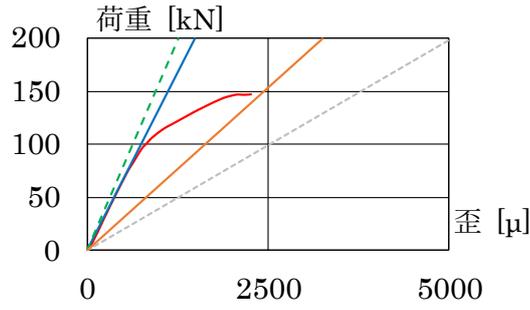
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

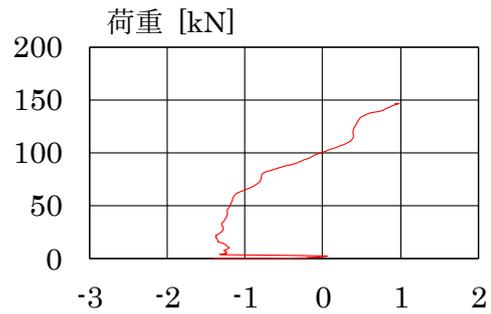
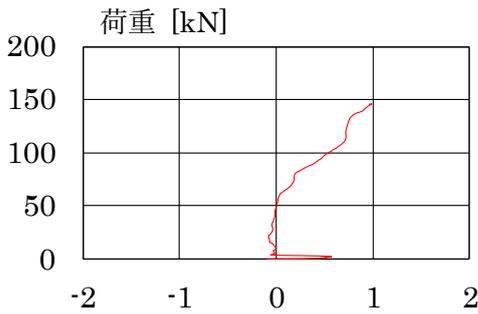
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-27-2 D-2 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

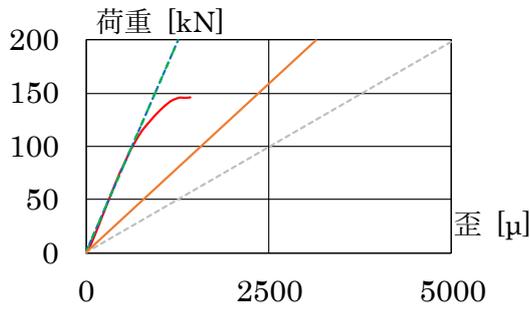
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

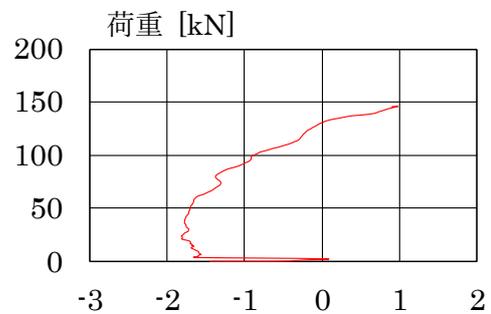
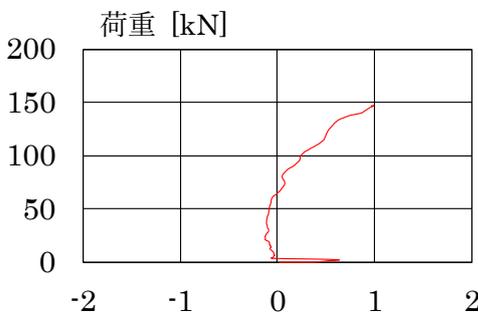
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-27-3 D-2 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

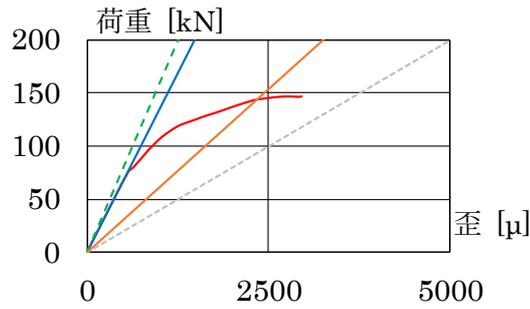
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

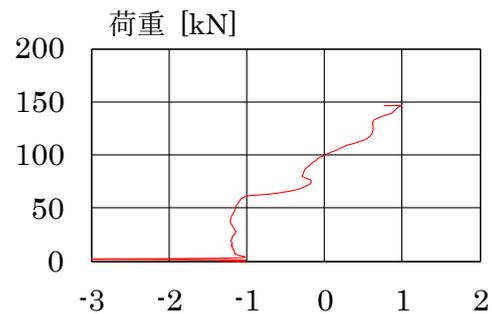
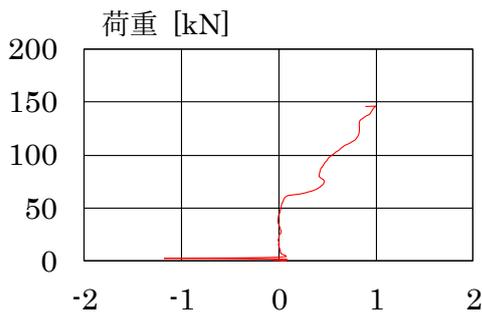
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-27-4 D-2 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

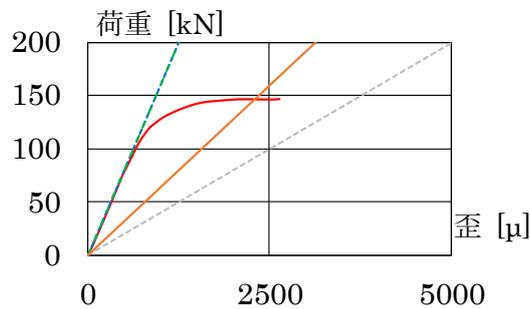
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

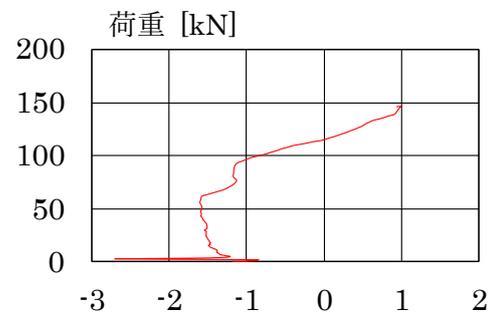
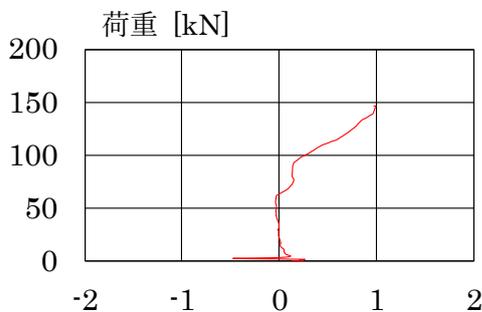
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-27-5 D-2 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

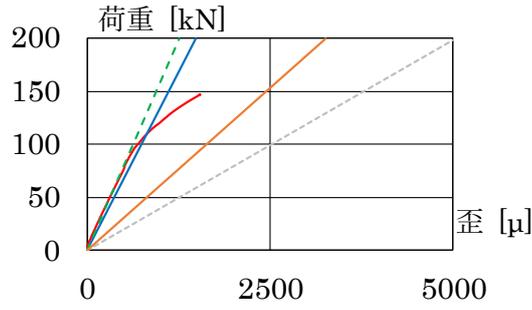
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

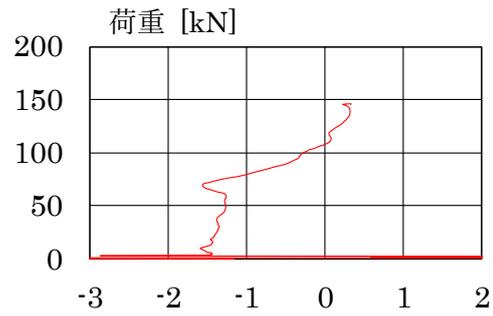
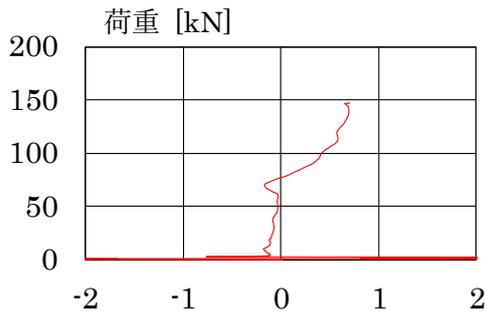
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-27-6 D-2 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

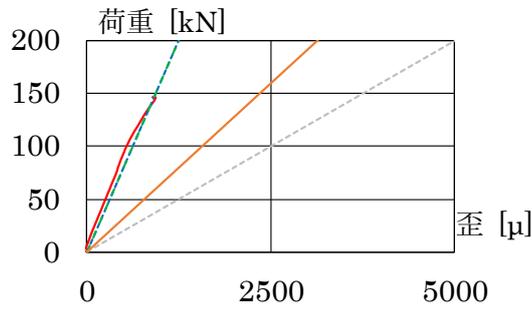
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

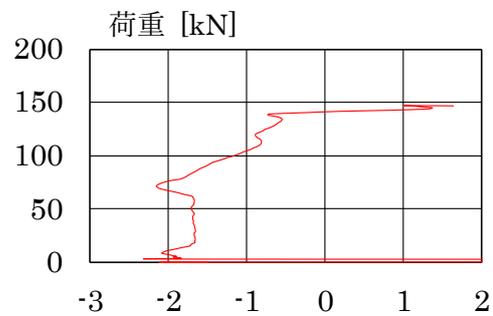
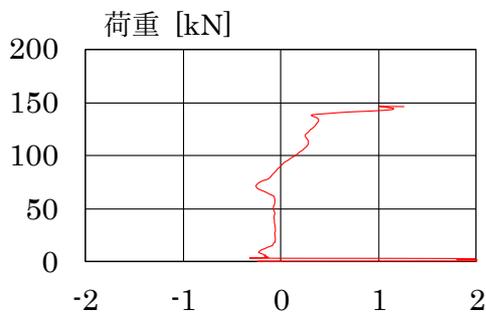
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-27-7 D-2 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

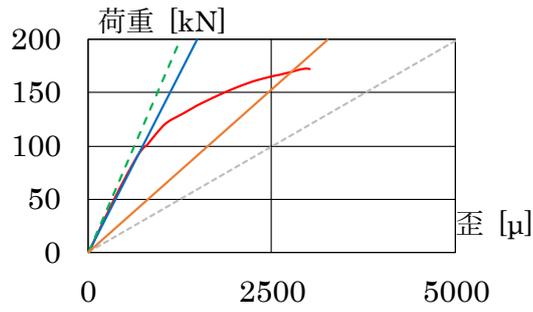


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

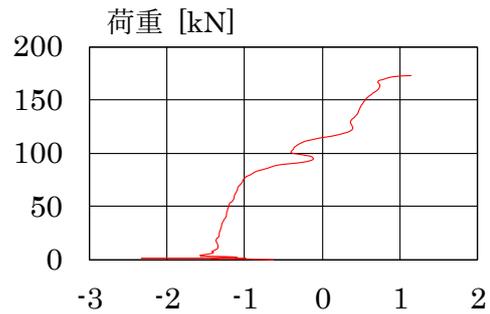
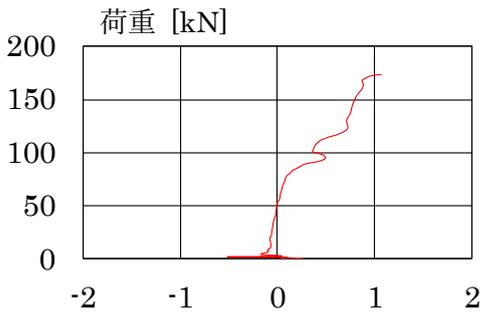
図 5-27-8 D-2 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-27 D-2 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

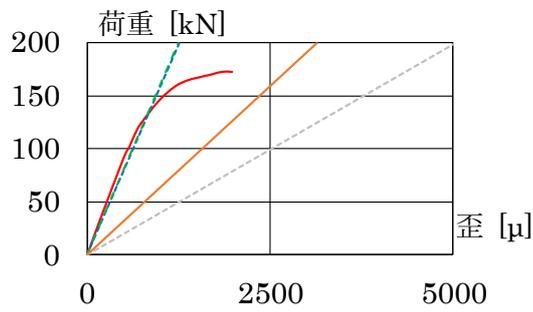
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

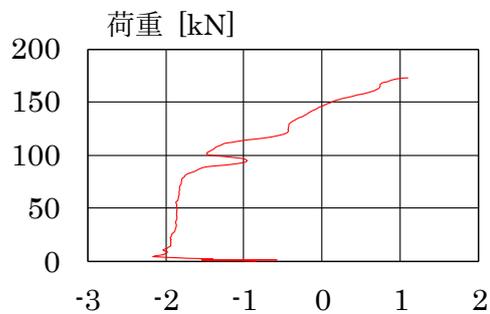
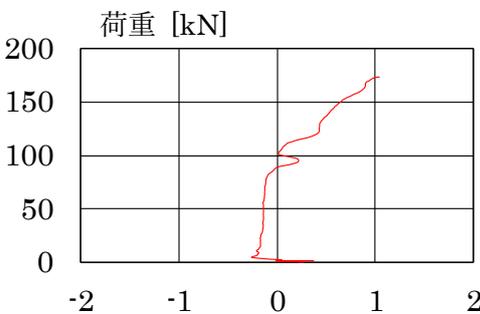
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-28-1 D-3 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

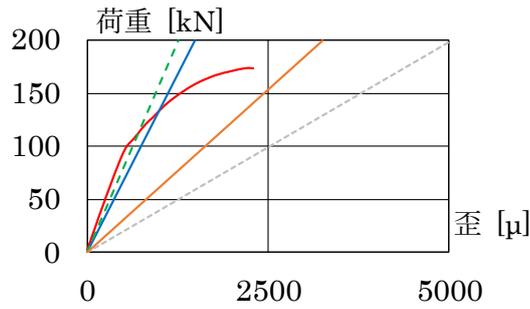
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

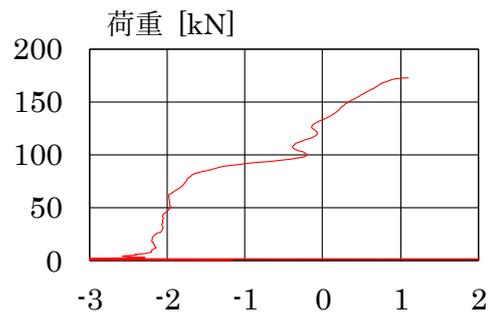
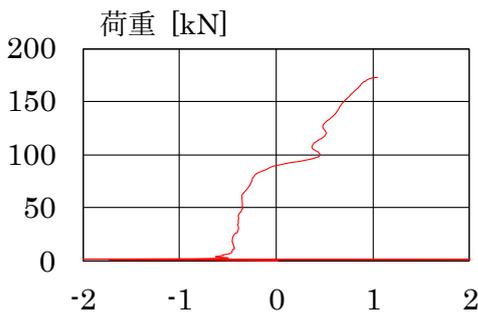
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-28-2 D-3 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

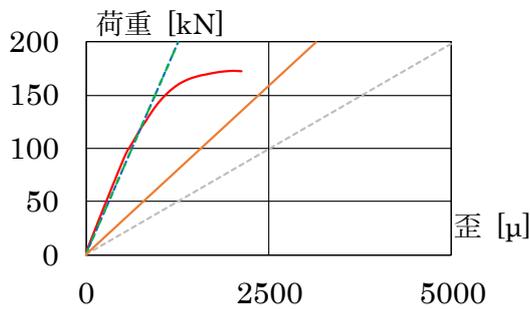
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

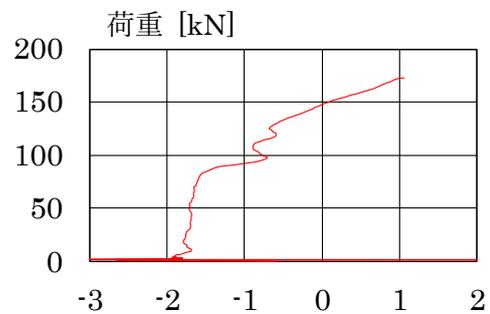
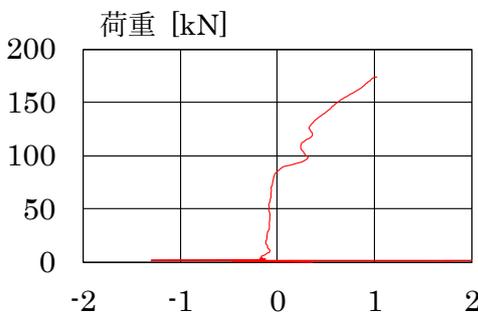
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-28-3 D-3 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

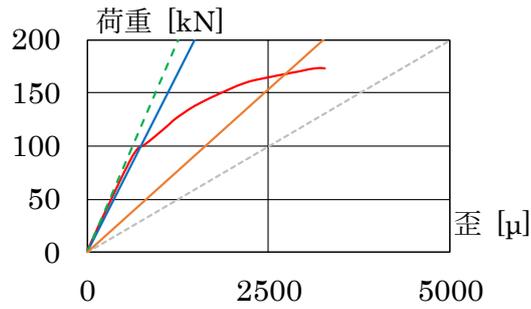
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

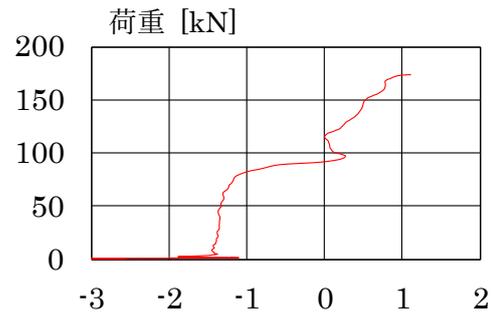
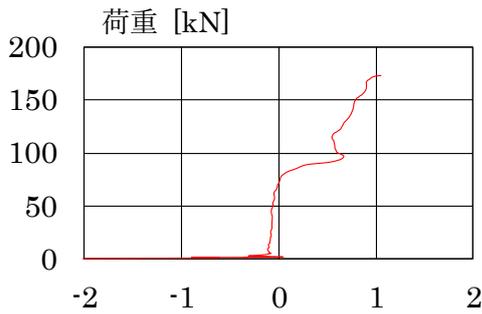
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-28-4 D-3 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

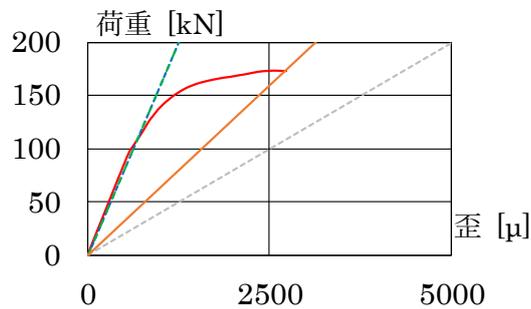
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

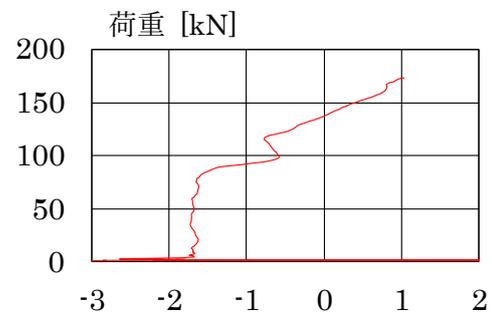
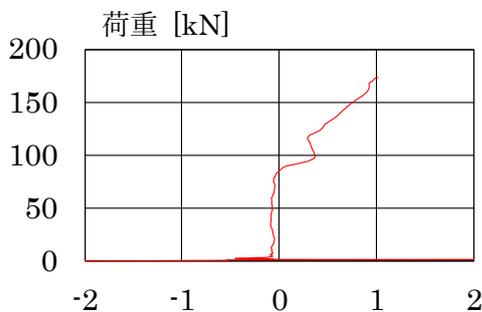
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-28-5 D-3 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

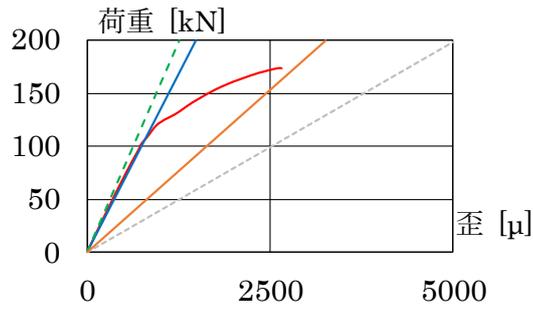
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

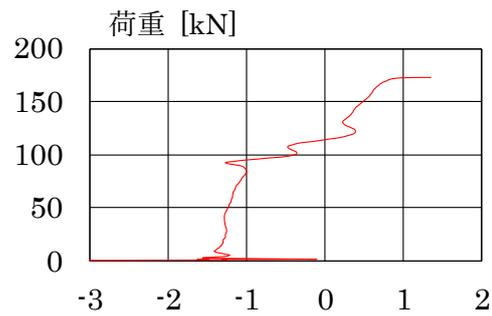
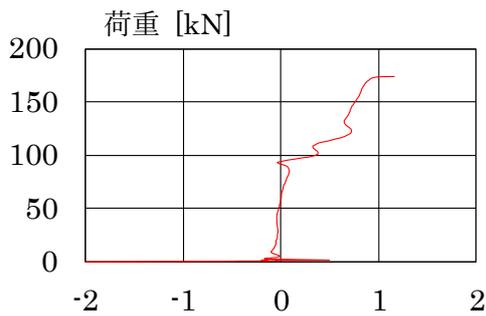
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-28-6 D-3 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

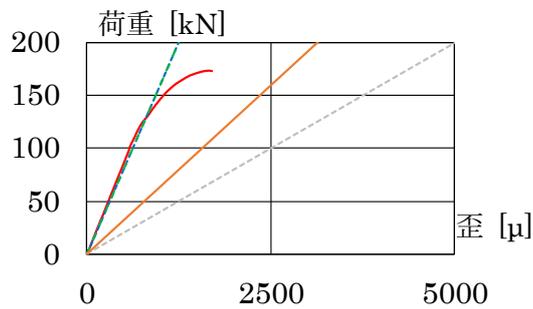
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

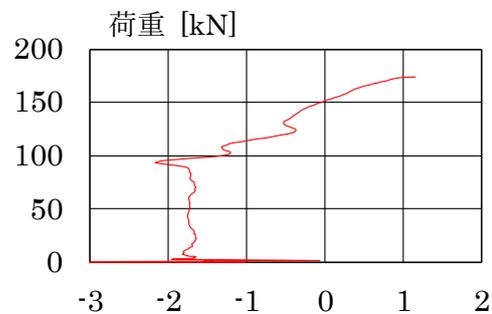
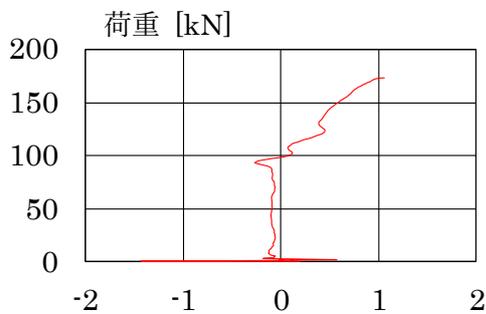
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-28-7 D-3 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

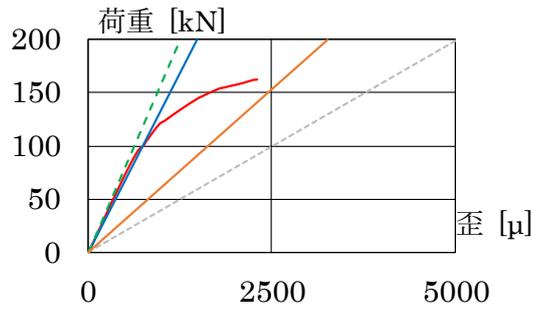


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

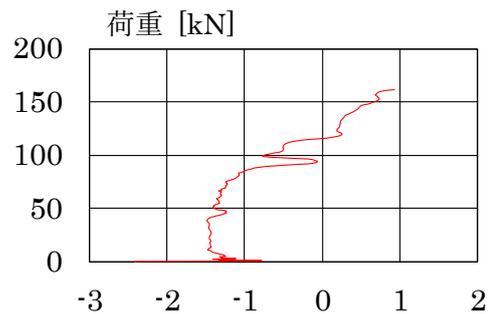
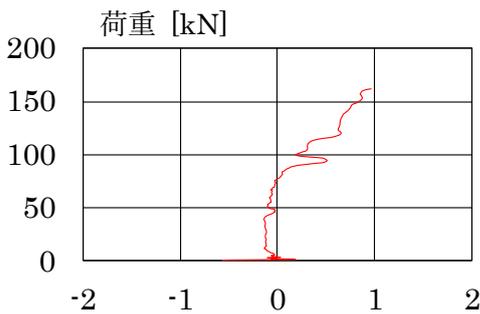
図 5-28-8 D-3 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-28 D-3 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

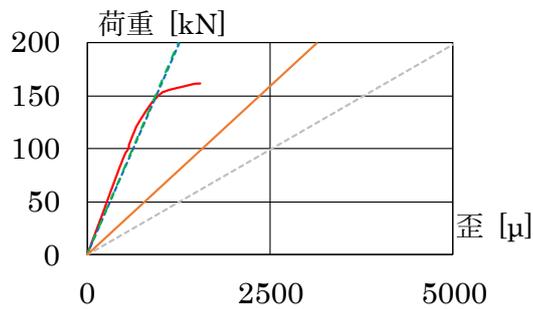
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

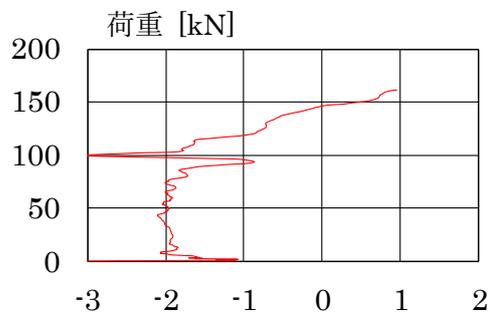
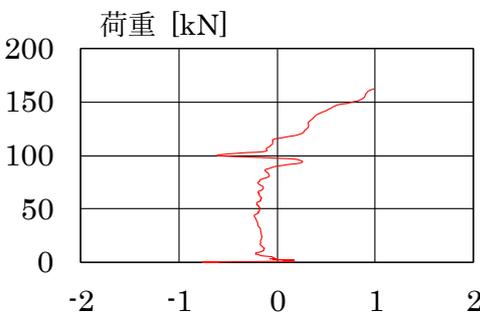
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-29-1 D-4 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

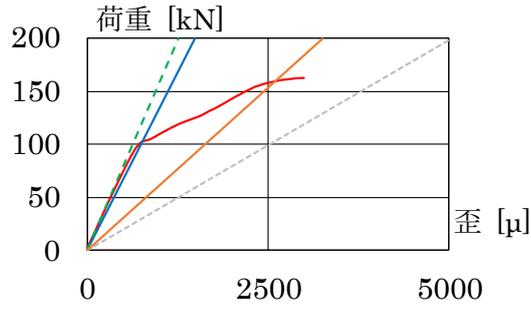
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

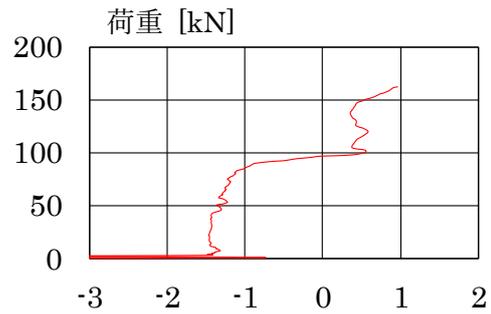
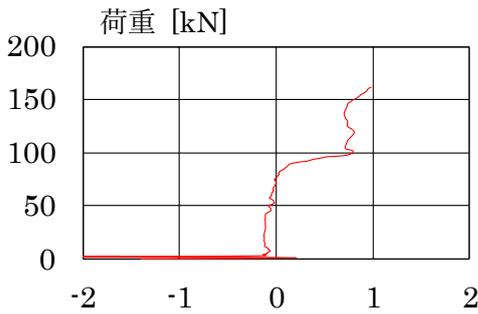
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-29-2 D-4 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

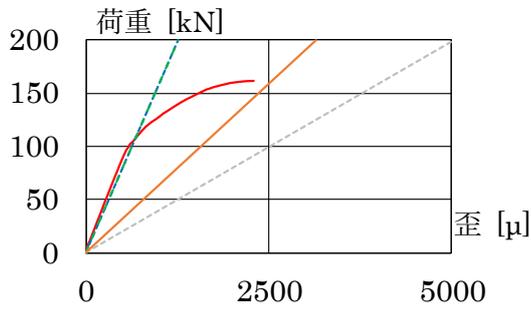
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

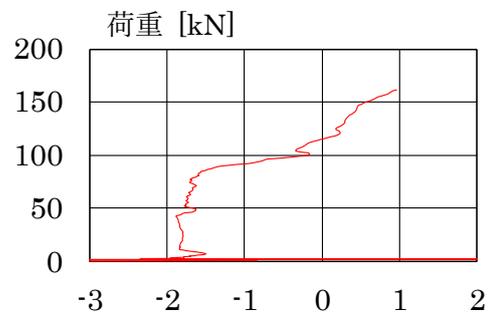
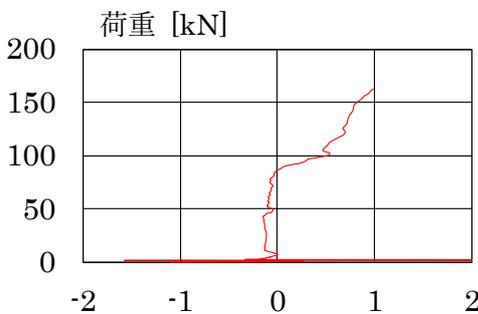
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-29-3 D-4 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

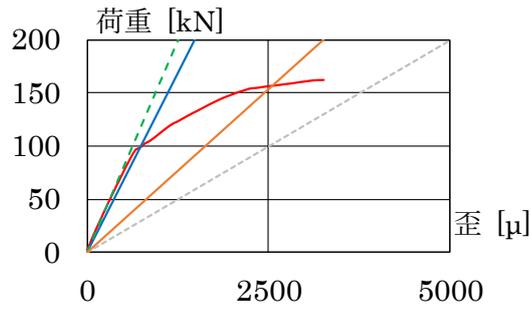
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

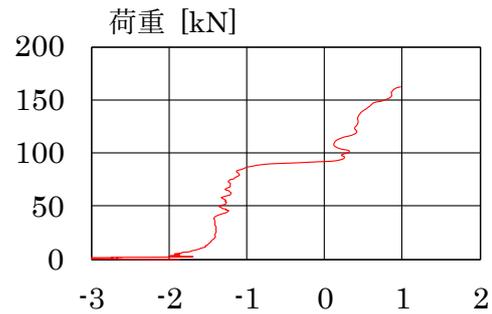
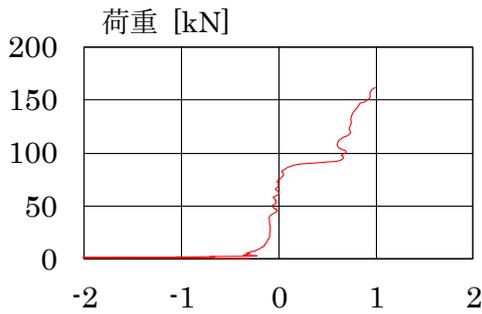
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-29-4 D-4 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

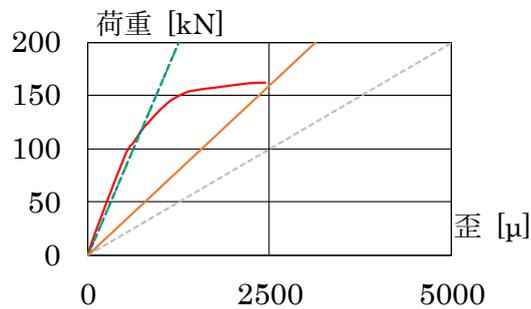
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

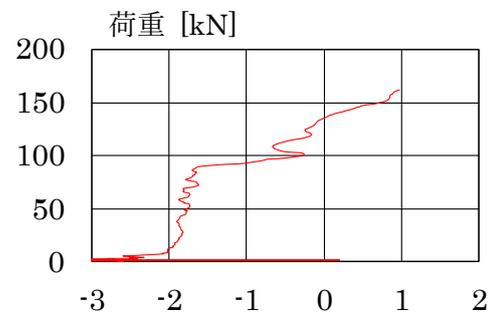
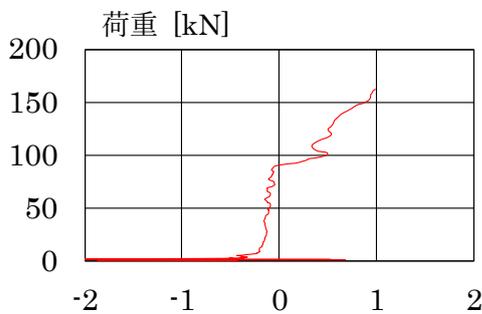
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-29-5 D-4 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

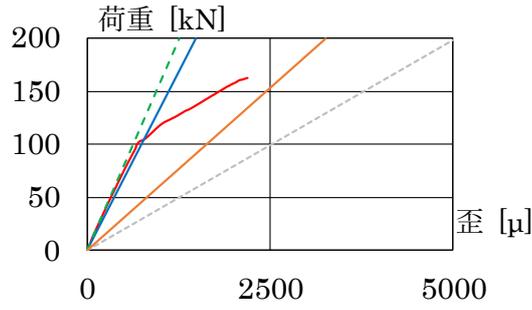
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

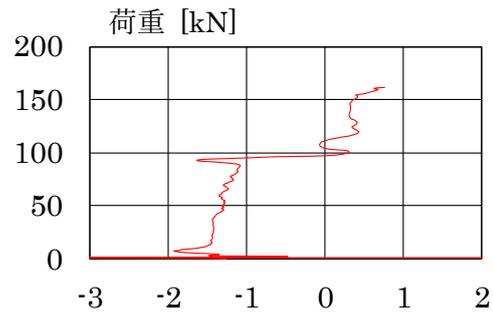
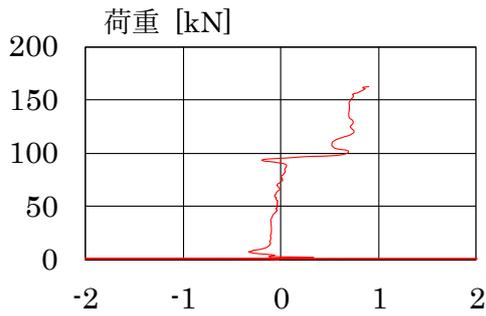
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-29-6 D-4 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

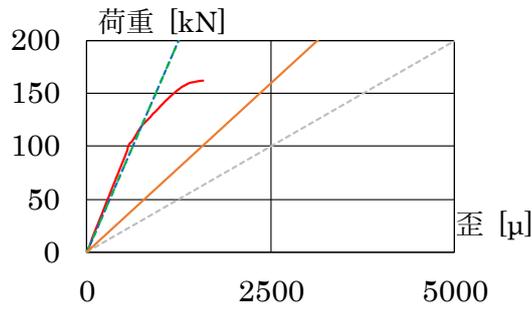
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

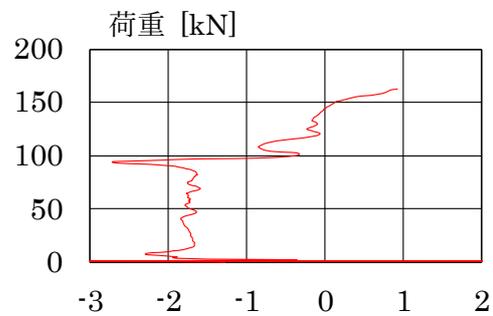
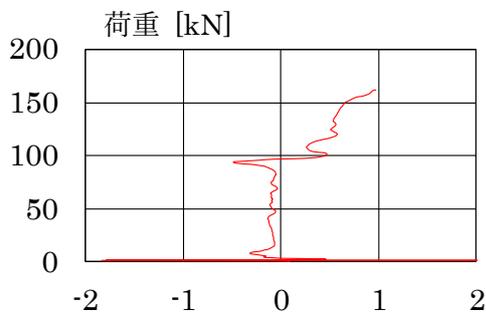
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-29-7 D-4 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係

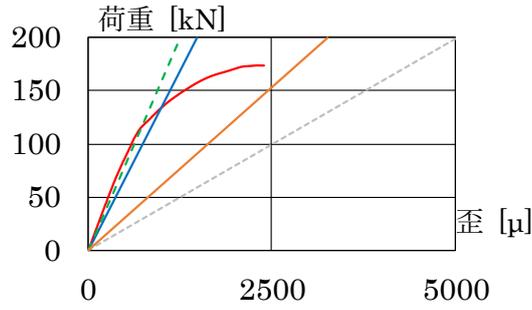


(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

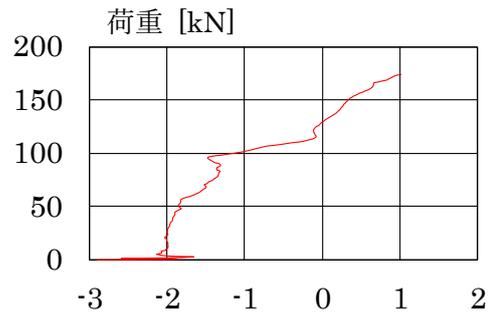
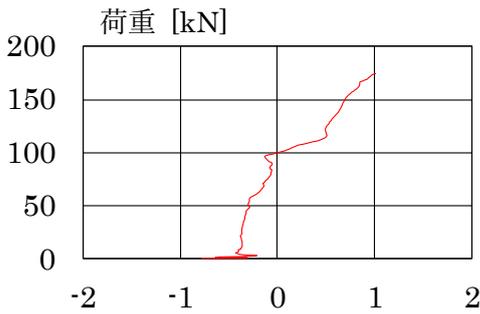
図 5-29-8 D-4 試験体 【接着面 D, X=75mm】

図 5-29 D-4 試験体



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

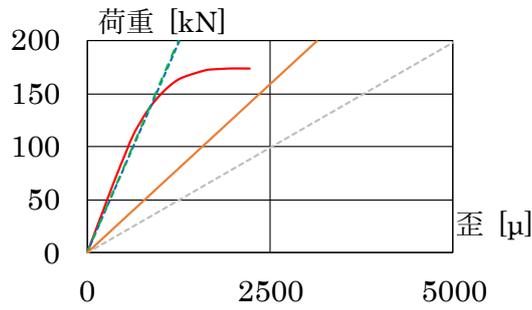
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

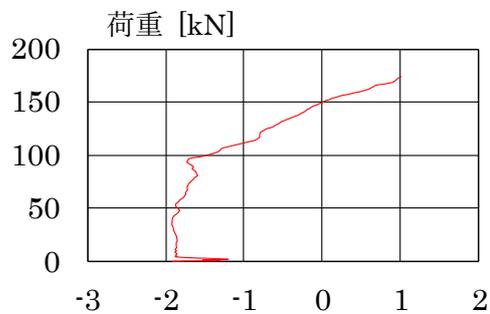
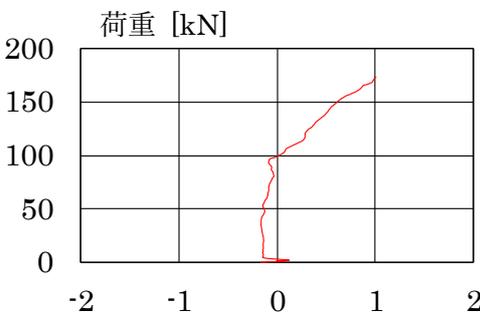
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-1 D-5 試験体 【接着面 A, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

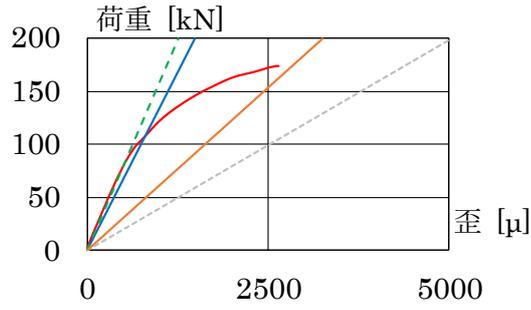
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

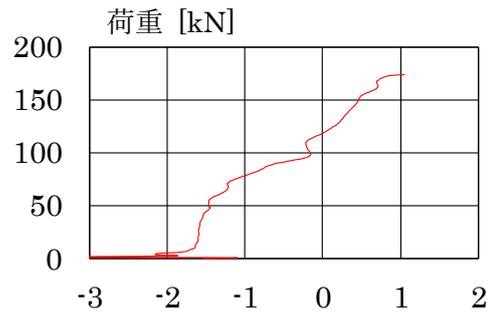
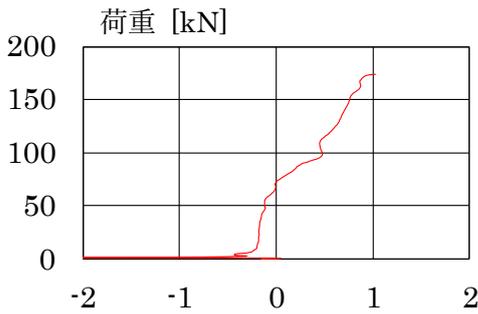
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-2 D-5 試験体 【接着面 A, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

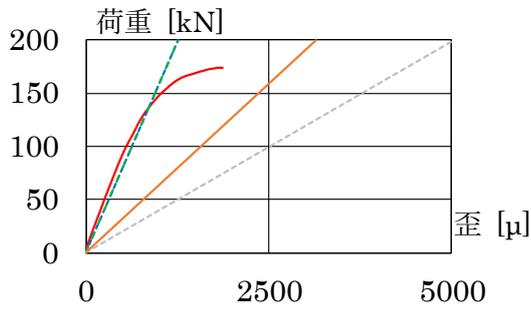
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

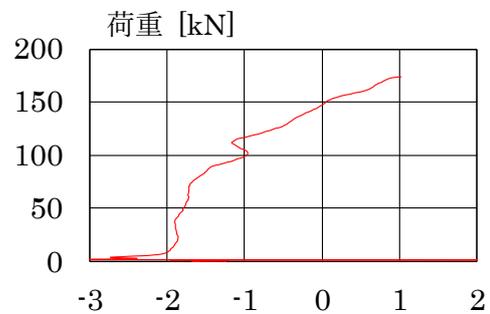
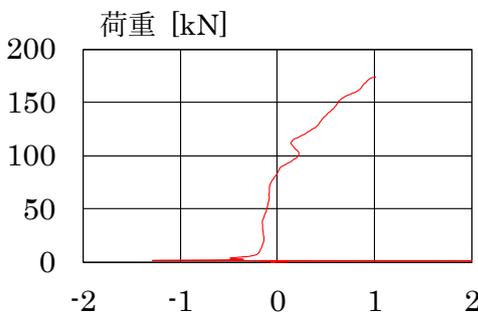
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-3 D-5 試験体 【接着面 B, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

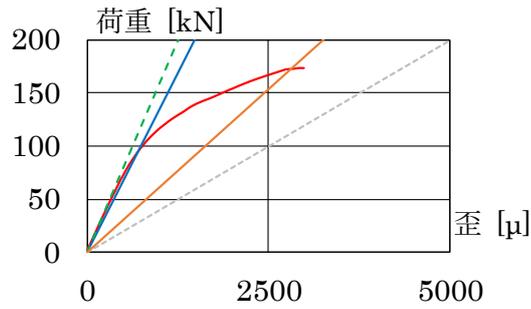
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

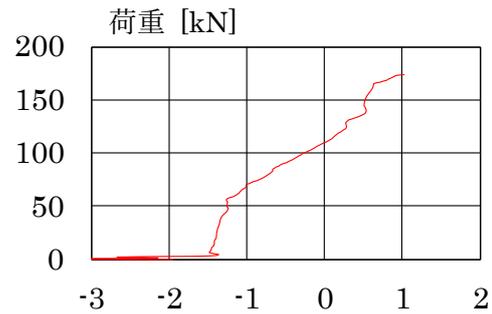
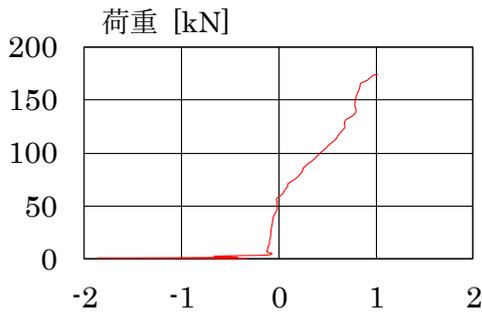
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-4 D-5 試験体 【接着面 B, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

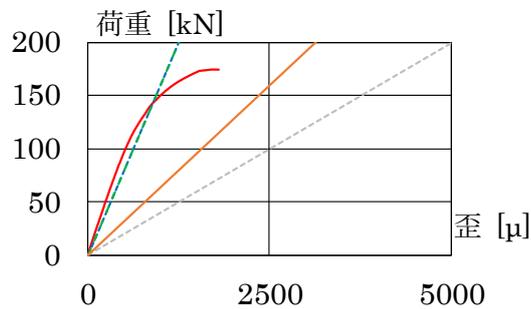
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

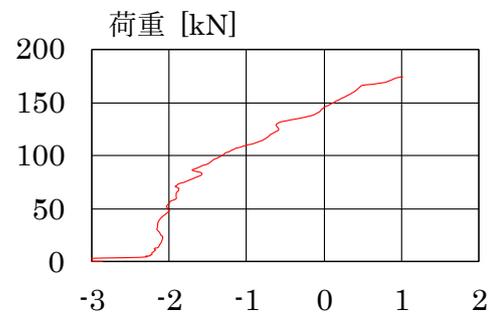
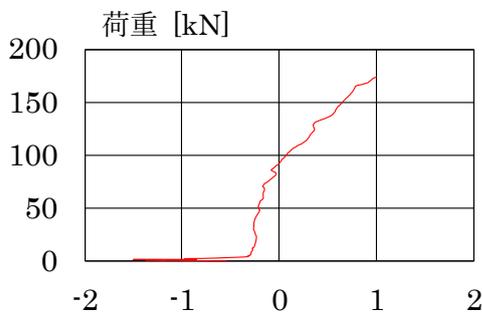
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-5 D-5 試験体 【接着面 C, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

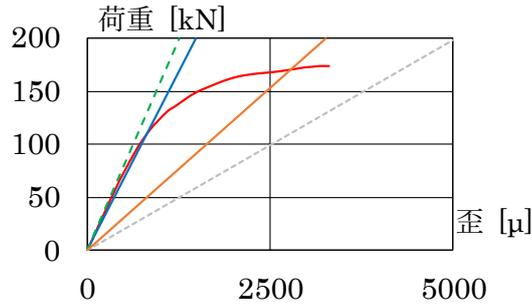
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

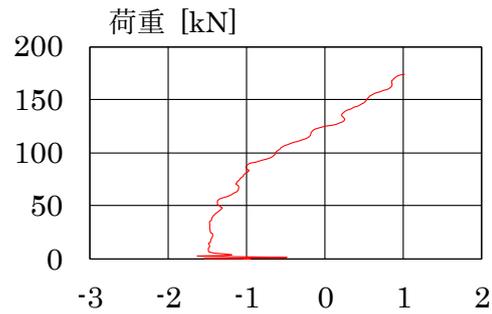
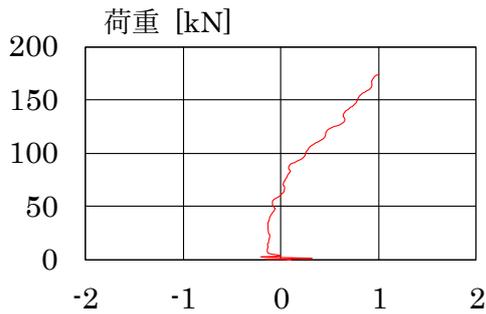
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-6 D-5 試験体 【接着面 C, X=75mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

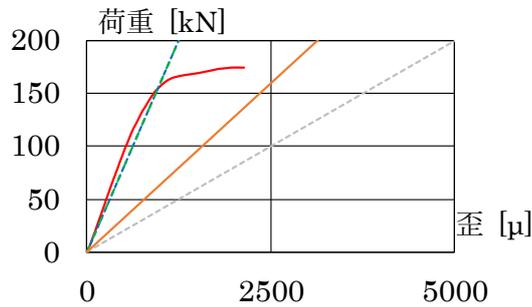
(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

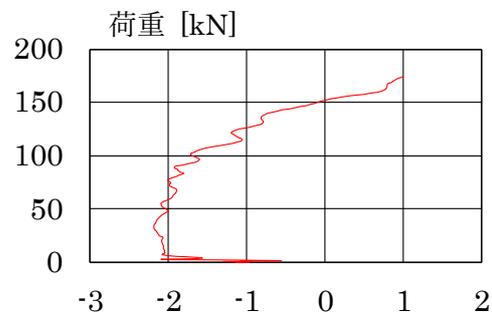
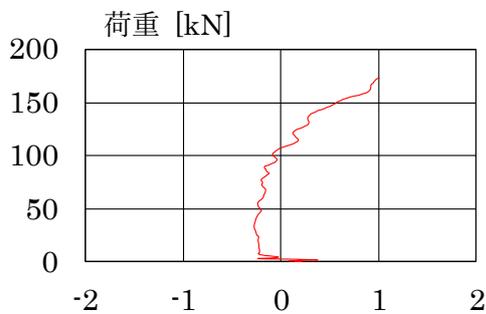
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-7 D-5 試験体 【接着面 D, X=50mm】



- - - : 弾性理論式 (合成断面) — : FEA (合成断面)
 — : 実験値 — : 式 (17) - - - : 弾性理論式 (CFRP のみ)

(a) 荷重-歪関係



(b) 式 (18-a) を用いた荷重-剛性変化率関係

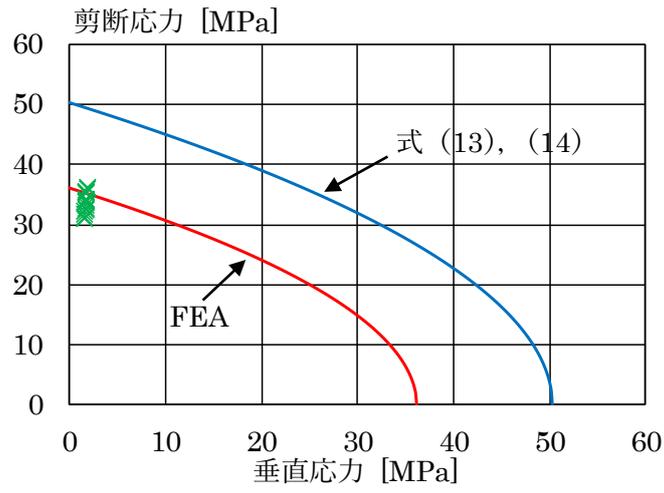
(c) 式 (18-b) を用いた荷重-剛性変化率関係

図 5-30-8 D-5 試験体 【接着面 D, X=75mm】

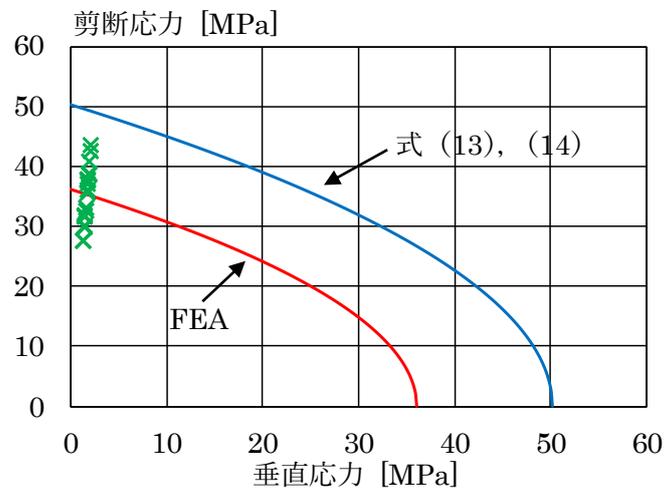
図 5-30 D-5 試験体

表 5-3 推定剥離荷重

試験体	接着面	最大荷重 [kN]	剥離荷重 [kN]	応力度[MPa]						
				τ	σ_y	σ_p	平均	変動係数	平均	変動係数
W-1	A	160.320	99.616	32.464	1.587	33.268	33.611	0.039	34.54	0.033
	B		103.244	33.646	1.645	34.479				
	C		94.776	30.887	1.510	31.651				
	D		104.944	34.200	1.672	35.047				
W-2	A	168.304	107.392	34.998	1.711	35.864	36.223	0.008		
	B		108.268	35.284	1.752	36.714				
	C		109.936	35.827	1.752	36.714				
	D		108.268	35.284	1.725	36.157				
W-3	A	158.868	95.360	31.077	1.520	31.846	33.066	0.036		
	B		104.836	34.165	1.671	35.011				
	C		98.492	32.098	1.570	32.892				
	D		97.364	31.730	1.552	32.515				
W-4	A	157.896	103.936	33.872	1.656	34.710	35.285	0.028		
	B		110.824	36.117	1.766	37.011				
	C		103.936	33.872	1.656	34.710				
	D		109.936	33.872	1.656	34.710				
W-5	A	162.480	103.164	33.620	1.644	34.452	34.490	0.032		
	B		101.252	32.997	1.614	33.814				
	C		100.044	32.604	1.594	33.410				
	D		108.644	35.406	1.731	36.282				
D-1	A	166.756	85.040	27.714	1.355	28.400	30.994	0.145		
	B		116.116	37.841	1.850	38.778				
	C		85.040	27.714	1.355	28.400				
	D		85.040	27.714	1.355	28.400				
D-2	A	146.640	113.980	37.145	1.816	38.064	35.506	0.053		
	B		101.652	33.128	1.620	33.947				
	C		100.324	32.695	1.599	33.504				
	D		109.324	35.628	1.742	36.510				
D-3	A	173.300	115.712	37.710	1.844	38.643	38.348	0.129		
	B		133.488	43.503	2.217	44.579				
	C		91.952	29.966	1.465	30.708				
	D		118.160	38.507	1.883	39.460				
D-4	A	162.052	116.016	37.809	1.849	38.744	33.639	0.090		
	B		96.980	31.605	1.545	32.387				
	C		92.196	30.046	1.469	30.790				
	D		97.716	31.845	1.557	32.633				
D-5	A	173.880	130.400	42.496	2.078	43.548	40.524	0.061		
	B		119.156	38.832	1.899	39.793				
	C		110.516	36.016	1.761	36.908				
	D		125.308	40.837	1.997	41.848				

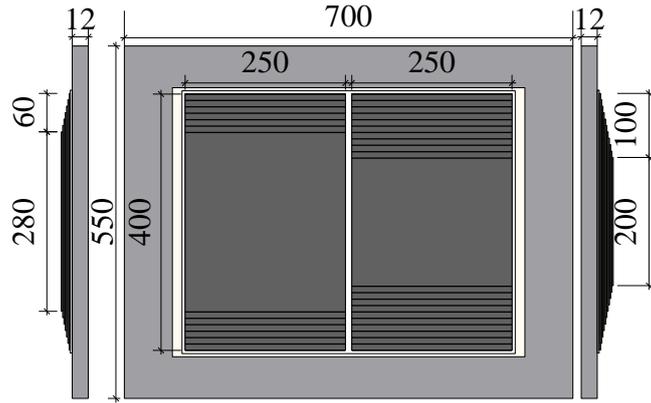


(a) W 試験体

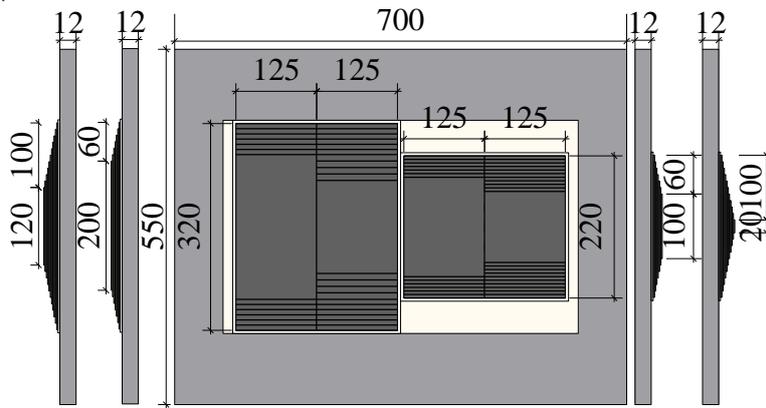


(b) D 試験体

図 5-31 主応力曲線



(a) L400 試験体



(b) L220, L320 試験体

図 5-33 成形の概要【単位：mm】



(a) 下地処理後



(b) 表面粗さの計測



(c) 含浸樹脂の事前塗布



(d) CM の設置



(e) 炭素繊維シートの設置



(f) 真空吸引 (-100kPa)



(g) 含浸中



(h) 脱型後

図 5-34 成形時の様子

表 5-5 に各試験体について FRP 厚を膜厚計によって 6 点計測し繊維体積含有率を算出した結果、表 5-6 に各試験体の寸法を示す。繊維体積含有率は式 (15) を用いて算出している。CM 厚については樹脂の含浸後で膜厚計により実測した結果、0.56mm であった。表 5-5 より 7 層試験体、11 層試験体で平均 CFRP 厚は 3.455mm, 5.37mm, 平均繊維体積含有率は 43.97%, 44.45%, 変動係数は 4.4%, 2.0% となり、高く安定した繊維体積含有率が得られたことを確認した。

表 5-5 試験体の繊維体積含有率

試験体	FRP 厚さ [mm]	CFRP 厚さ [mm]	繊維体積含有率					
			含有率 [%]	平均 [%]	変動係数	平均 [%]	変動係数	
L400-7-1	4.12	3.56	42.67	42.19	0.0199	44.27	0.0349	
L400-7-2	4.20	3.64	41.73					
L400-7-3	4.16	3.04	42.19					
L400-7-4	4.16	3.04	42.19					
L400-11-1	5.73	5.17	46.17	50.04	0.0305			
L400-11-2	5.99	5.43	43.96					
L400-11-3	6.07	5.51	43.42					
L400-11-4	6.06	5.50	43.40					
L320-7-1	3.84	3.28	46.31	46.31				0.0305
L320-7-2	3.84	3.28	46.31	44.37				
L320-11-1	5.91	5.35	44.62					
L320-11-2	5.97	5.41	44.12	45.50				
L220-7-1	3.98	3.42	44.41			45.08		
L220-7-2	3.82	3.26	46.59					
L220-11-1	5.88	5.32	44.87	45.08				
L220-11-2	5.83	5.27	45.29					

表 5-6 試験体寸法

試験体	試験体幅 [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]
<i>L400-7-1</i>	44.16	280	60
<i>L400-7-2</i>	42.34		
<i>L400-7-3</i>	42.91		
<i>L400-7-4</i>	43.35		
<i>L400-11-1</i>	43.34	200	100
<i>L400-11-2</i>	42.76		
<i>L400-11-3</i>	44.12		
<i>L400-11-4</i>	43.43		
<i>L320-7-1</i>	39.78	200	60
<i>L320-7-2</i>	37.38		
<i>L320-11-1</i>	38.07	120	100
<i>L320-11-2</i>	38.77		
<i>L220-7-1</i>	41.59	100	60
<i>L220-7-2</i>	39.43		
<i>L220-11-1</i>	38.96	120	100
<i>L220-11-2</i>	38.20		

図 5-35 に試験時の様子，図 5-36 に荷重-変位関係を示す．変位は図 5-32 の試験体概要図に示す変位計から得られる値の平均値とし，無補強時の曲げ降伏荷重の計算値 P_y および合成断面とした梁理論によって算出された理論式を加えている．理論式は各試験体の実測から得られた平均 CFRP 厚を用いて，複合則によって CFRP の弾性係数を算出している．テーパー積層においては，10mm 毎に合成断面における断面二次モーメントを算出し描いている．表 5-6 に各試験体の最大荷重と破壊モード，図 5-37 に試験後の様子を示す．破壊モードは L220 試験体では，鋼材が弾性状態を保ったまま CFRP が剥離破壊し，L320 試験体は鋼材の降伏後に CFRP が剥離した．また，L400 試験体は CFRP の剥離破壊は生じず，CFRP 中央部において CFRP の破断が生じる結果となった．図 5-36，表 5-7 から確認できるように，各パラメータでの耐力および最大変形量は概ね安定した結果が得られており，梁理論による理論式との対応についても得られたことが確認できた．しかし，CFRP の積層数の増加に伴い，L220 試験体では最大変形量は同等であったが，L320 試験体は大きく減少する結果となった．

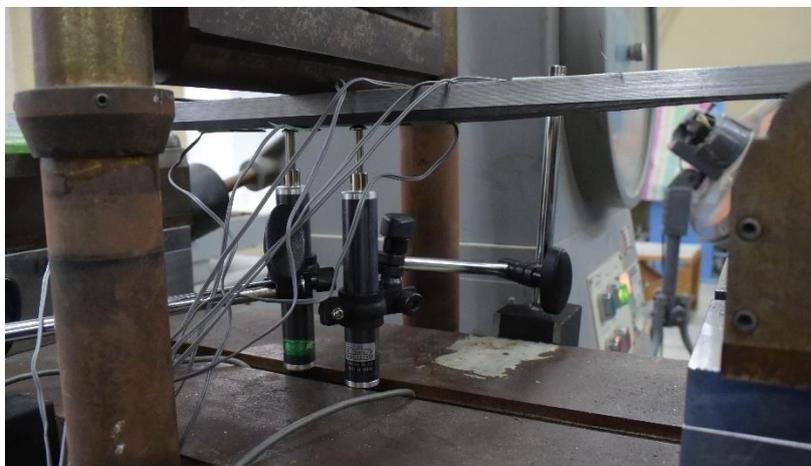
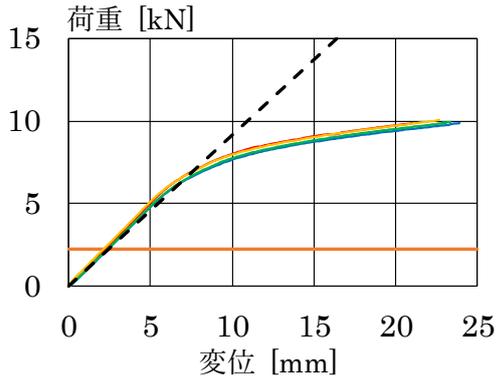
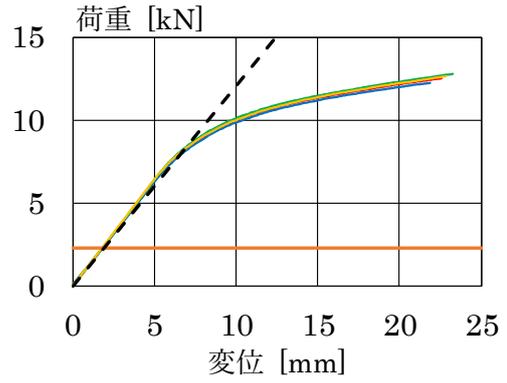


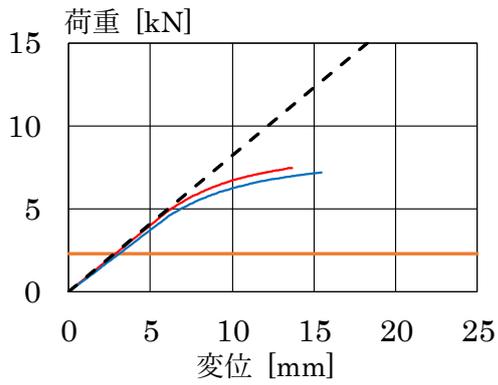
図 5-35 試験時の様子



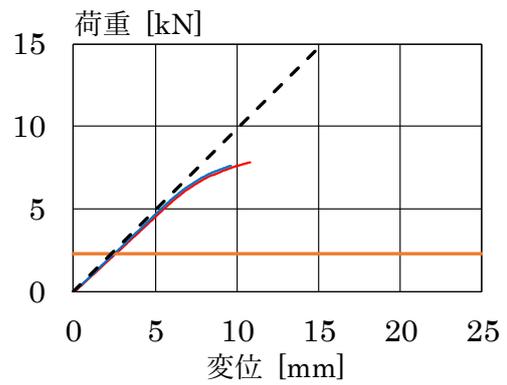
(a) L400-7 試験体



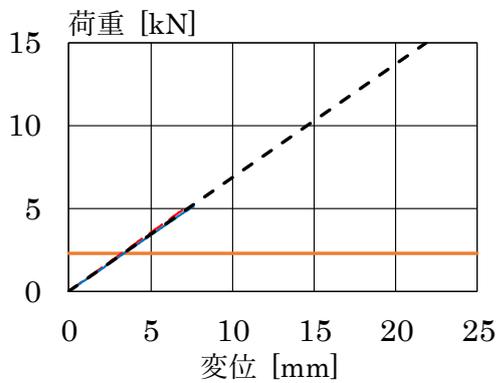
(b) L400-11 試験体



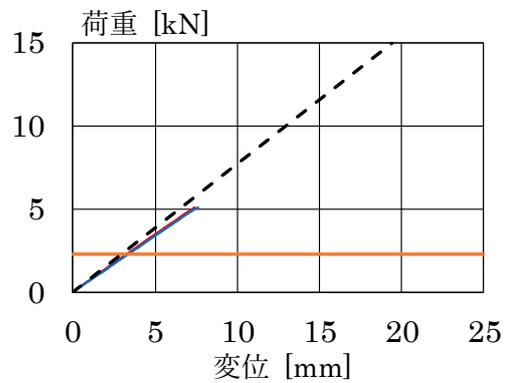
(c) L320-7 試験体



(d) L320-11 試験体



(e) L220-7 試験体



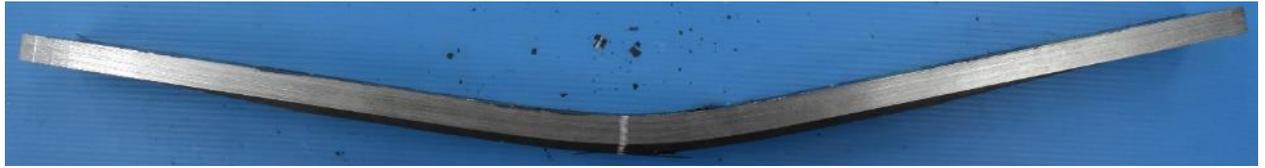
(f) L220-11 試験体

— : 試験体 1 — : 試験体 2 — : 試験体 3 — : 試験体 4
 — : P_y - - - : 梁理論

図 5-36 荷重・変位関係

表 5-7 試験結果

試験体	最大荷重 [kN]	最大変形量 [mm]	破壊モード
<i>L400-7-1</i>	11.241	-----	CFRP の破断
<i>L400-7-2</i>	10.544	-----	
<i>L400-7-3</i>	11.009	-----	
<i>L400-7-4</i>	11.102	-----	
<i>L400-11-1</i>	13.796	-----	
<i>L400-11-2</i>	13.471	-----	
<i>L400-11-3</i>	14.075	-----	
<i>L400-11-4</i>	13.540	-----	
<i>L320-7-1</i>	7.455	13.681	鋼材が降伏後, CFRP が剥離破壊
<i>L320-7-2</i>	7.200	15.463	
<i>L320-11-1</i>	7.827	10.800	
<i>L320-11-2</i>	7.594	9.6480	
<i>L220-7-1</i>	4.900	6.953	鋼材が弾性状態のまま, CFRP が剥離破壊
<i>L220-7-2</i>	4.624	6.920	
<i>L220-11-1</i>	5.109	7.416	
<i>L220-11-2</i>	5.086	7.636	



(a) *L400-7-1*



(b) *L400-7-2*



(c) *L400-7-3*



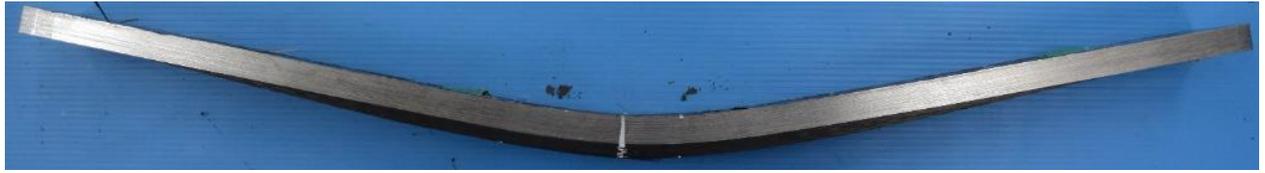
(d) *L400-7-4*



(e) *L400-11-1*



(f) *L400-11-2*



(g) *L400-11-3*



(h) *L400-11-4*



(i) *L320-7-1*



(j) *L320-7-2*



(k) *L320-11-1*



(l) *L320-11-2*



(m) L220-7-1



(n) L220-7-2



(o) L220-11-1



(p) L220-11-2

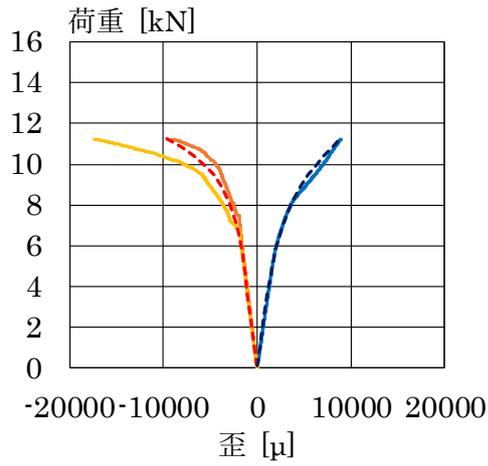


(q) L400 試験体の中央部

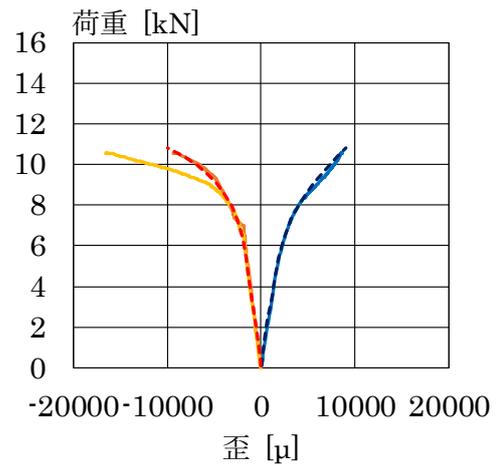
図 5-37 試験後の状態

図 5-38 に荷重-歪関係を示す。歪は図 5-32 に示している SG1, SG2 の平均, SG3 の値としている。図 5-32 の SG1, SG2 の平均から, L220 試験体は鋼材の弾性範囲内で, L320 試験体は鋼材の降伏後に CFRP の剥離が生じていたことがわかる。また, L400 試験体では図 5-37 (q) に示したように破壊モードが CFRP 中央部での破断であり, この位置の歪が最終的に約 8000 μ から 9000 μ の間で CFRP 表面に目視で確認できるような破断が生じていたことが確認された。これらの結果から, L400 試験体のように一定の定着長によって接着補強された場合は鋼材の降伏後も CFRP の剥離破壊が生じずに鋼材の変形に追従することが確認できた。

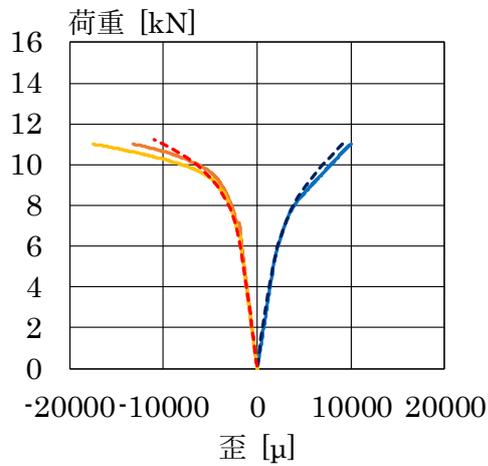
これらの曲げ変形の下での挙動を 4 章にて評価した CFRP の剥離破壊時の主応力を用いて評価する。まず, 本試験の FEA を行う。FEA は図 5-39 に示すような平面応力状態を仮定した 2 次元解析, 鋼材・CM を等方性弾性材料, CFRP を異方性弾性材料として, 機械的性質を複合則によって算出し, 試験体の対称性を考慮したモデルとなっている。鋼材は図 5-40 に示すような等方性弾塑性材料のバイリニアモデルとしている。図 5-38 より, 実験値と FEA は概ね対応を示していることが確認された。主応力の算出位置は CFRP の 1 層目と 2 層目のテーパ部境界とする。これは FEA による主応力が最大になる位置であり, 試験による破壊モードも CM と鋼材界面での剥離及び CFRP1 層目と 2 層目の層間破壊で生じていたことを考慮し決定した。図 5-41 に各試験体の最大荷重時の各応力を示す。なお, L400 試験体に関しては剥離が生じずに中央部にて CFRP が破断したため破断後は中央の曲げ剛性が低下し, 主応力の評価が困難なため, 材料試験より得られた CFRP の破断歪である 7500 μ に到達した荷重を採用した。図 5-41 から, 剥離破壊が生じた L220・L320 試験体は FEA によって算出された主応力 36.12MPa と式 (13), (14) から算出された 50.26MPa に概ね対応を示していることが確認できた。図 5-42 に図 4-13 に示した主応力曲線へのプロットを剥離破壊が生じた L220・L320 試験体について行う。なお, 比較のために図 5-31 に示した二面引張剪断試験の結果についても示している。剥離時の主応力の平均は L220・L320 試験体でそれぞれ 45.091MPa, 49.546MPa と L320 試験体の方がやや高い結果となっている。変動係数は L220 試験体で 0.076, L320 試験体で 0.048 と安定性は L320 試験体の方が低い結果となっている。しかし, 両試験体で安定した接着強度を有しており, 鋼材の弾塑性状態に関係なく, 4 章で評価した剥離破壊時の主応力によって評価可能な範囲であることがわかった。



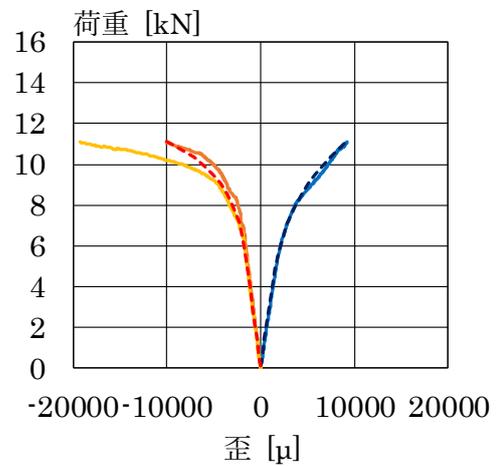
(a-1) L400-7-1



(a-2) L400-7-2



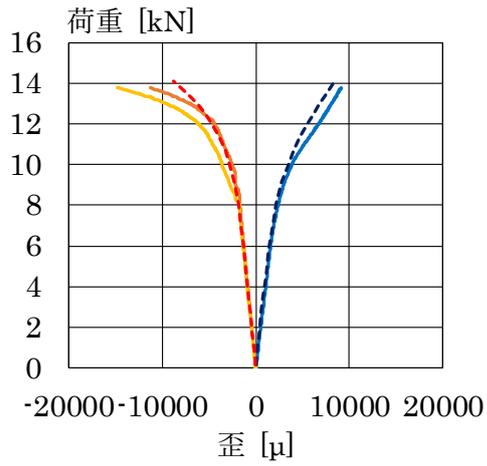
(a-3) L400-7-3



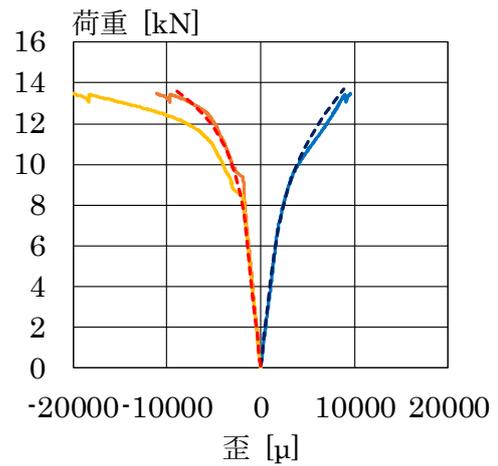
(a-4) L400-7-4

—: SG1 —: SG2 —: SG3
 - - - : FEA (鋼材, $x = \pm 50\text{mm}$) - - - : FEA (CFRP, $x = 0\text{mm}$)

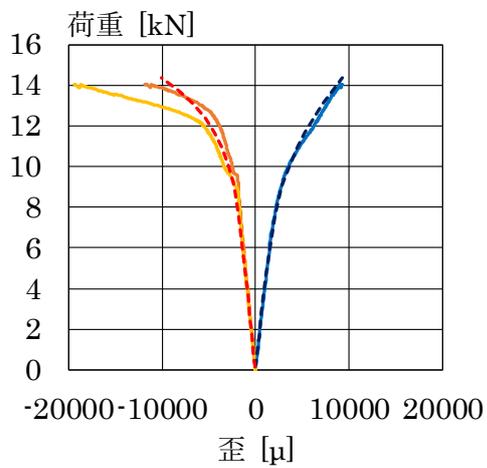
(a) L400-7 試験体



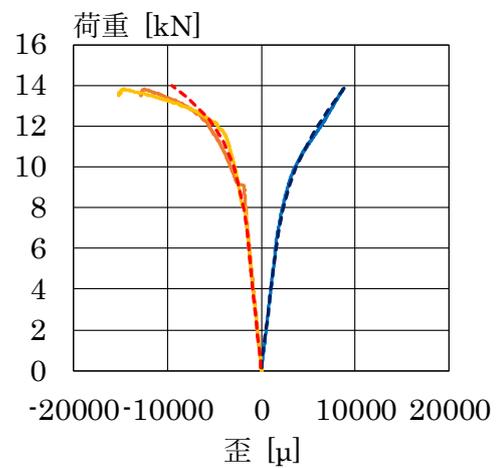
(b-1) L400-11-1



(b-2) L400-11-2



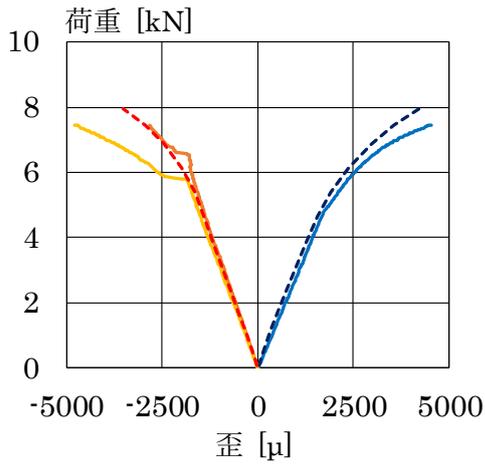
(b-3) L400-11-3



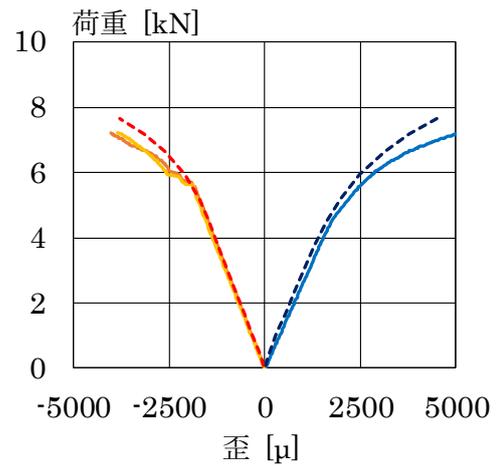
(b-4) L400-11-4

— : SG1 — : SG2 — : SG3
 - - - : FEA (鋼材, $x = \pm 50\text{mm}$) - - - : FEA (CFRP, $x = 0\text{mm}$)

(b) L400-11 試験体



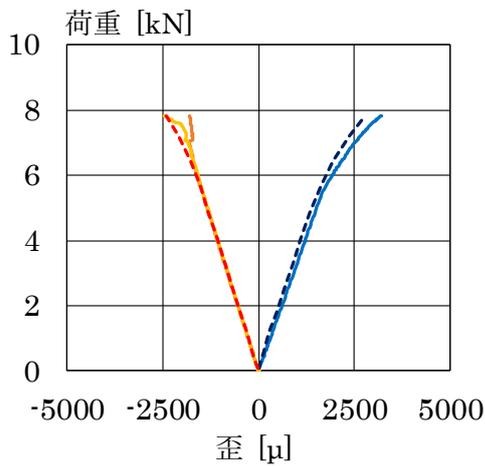
(c-1) L320-7-1



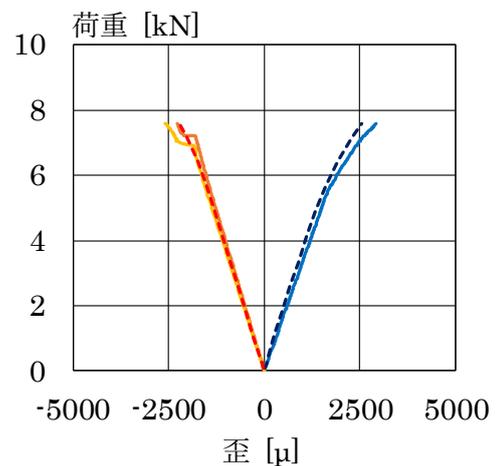
(c-2) L320-7-2

—: SG1 —: SG2 —: SG3
 - - -: FEA (鋼材, $x = \pm 50\text{mm}$) - - -: FEA (CFRP, $x = 0\text{mm}$)

(c) L320-7 試験体



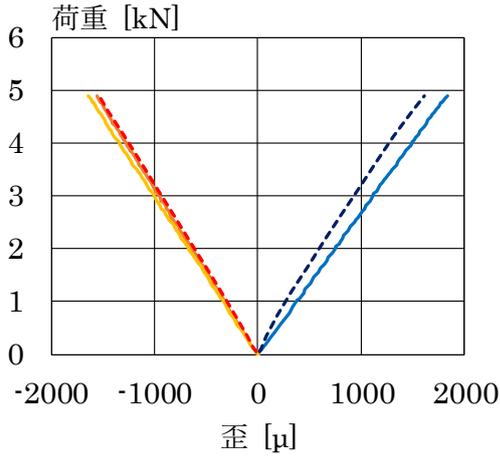
(d-1) L320-11-1



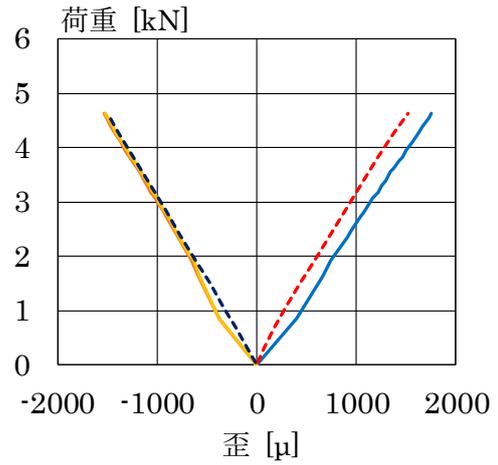
(d-2) L320-11-2

—: SG1 —: SG2 —: SG3
 - - -: FEA (鋼材, $x = \pm 50\text{mm}$) - - -: FEA (CFRP, $x = 0\text{mm}$)

(d) L320-11 試験体



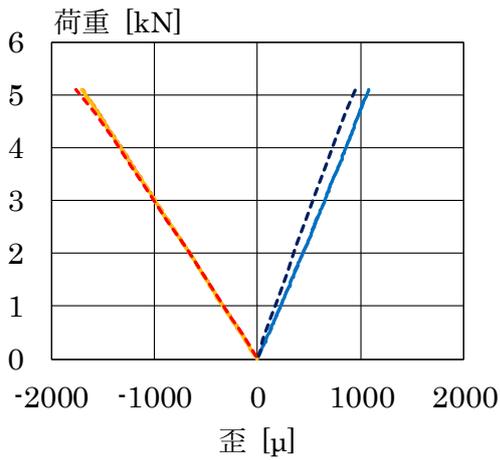
(e-1) L220-7-1



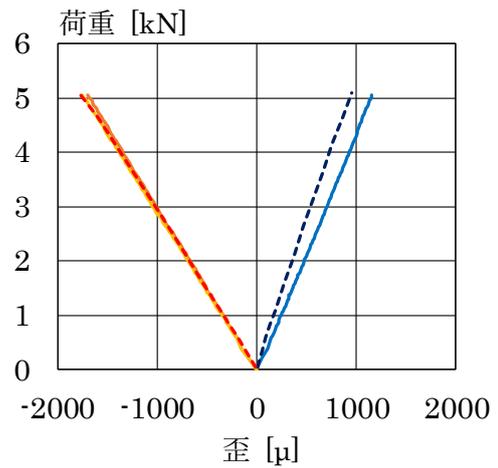
(e-2) L220-7-2

—: SG1 —: SG2 —: SG3
 - - -: FEA (鋼材, $x = \pm 50\text{mm}$) - - -: FEA (CFRP, $x = 0\text{mm}$)

(e) L220-7 試験体



(f-1) L220-11-1



(f-2) L220-11-2

—: SG1 —: SG2 —: SG3
 - - -: FEA (鋼材, $x = \pm 50\text{mm}$) - - -: FEA (CFRP, $x = 0\text{mm}$)

(f) L220-7 試験体

図 5-38 荷重-歪関係

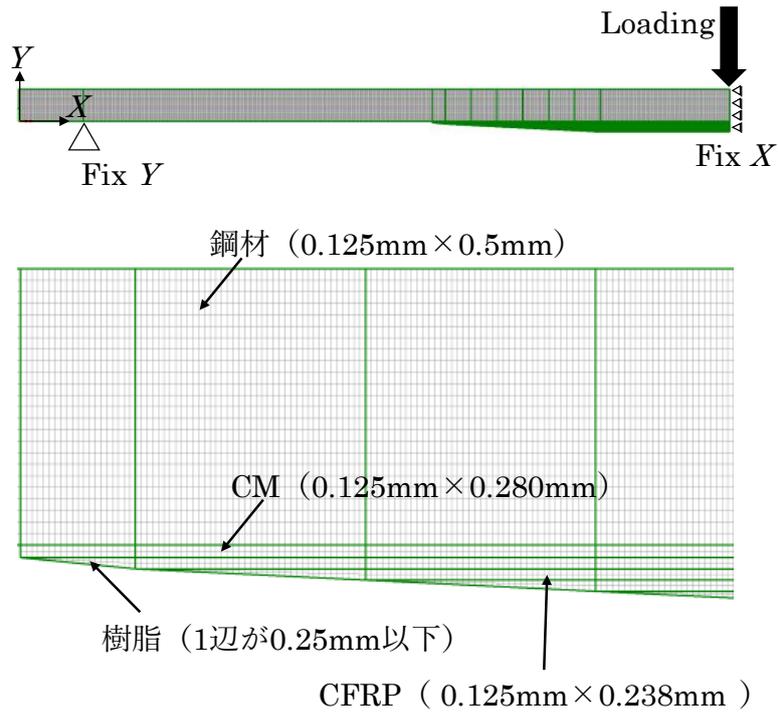


図 5-39 FEA モデル

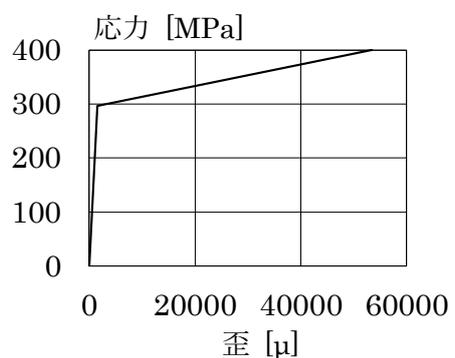


図 5-40 FEA に用いる鋼材の構成則

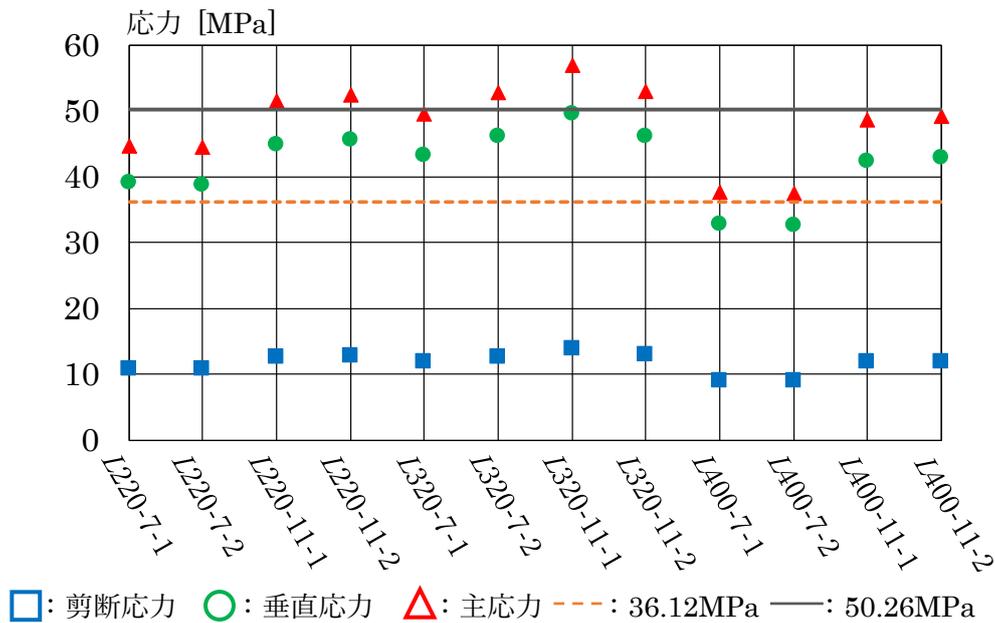


図 5-41 試験体毎の剥離時の応力

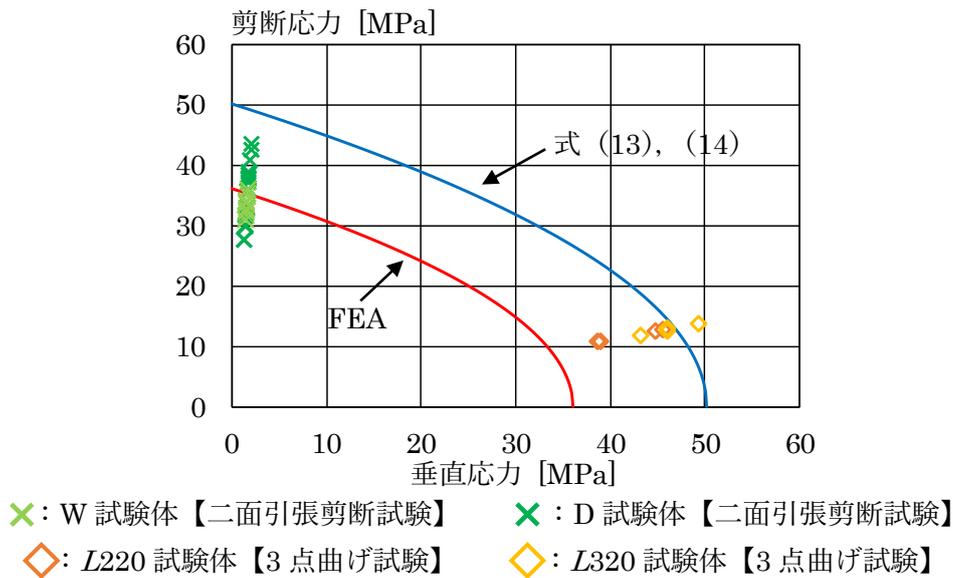


図 5-42 主応力曲線

これらの結果，4章で示された主応力を用いることで，鋼材の弾性状態，降伏後のどちらも接着層に生じる主応力の評価が可能であることがわかった．また，FEAによって，式(13)，(14)による主応力以下となるような複合構造体を設計することで，CFRPの剥離破壊を抑制し，降伏後の鋼材の変形に追従し続ける設計が可能である．その場合，破壊モードはCFRPの破断になり，設計強度はCFRPの引張強度となることから安定した接着設計が期待できるといえる．

参考文献

- 1) 三枝玄希, 松本幸大, 藤本信介: 鋼/CFRP 接着接合強度に影響する各種因子の考察, 日本建築学会 学術講演梗概集, 2016.9
- 2) 土木学会: 複合構造レポート 09 FRP 部材の接合および鋼と FRP の接着接合に関する先端技術, 2013
- 3) 清水優, 石川敏之, 堀井久一, 服部篤史, 河野広隆: 当て板接着された突合せ鋼板のはく離強度の評価, 鋼構造論文集 第 22 卷第 86 号, pp. 86_1-86_11, 2015.6
- 4) 土木学会: 複合構造シリーズ 09 FRP 接着による構造物の補修・補強指針 (案), 2018

第6章 曲げ補強を目的とした鋼板に対する CFRP の断面設計

4章では、鋼/CFRP 接着接合試験体の主応力評価試験法を提案し、実際に VaRTM 法によって鋼材表面へ成形接着し、試験を行った。そこで CFRP の剥離時に接着層である CM に生じると推定される主応力は FEA で 36.12MPa、既往の提案式で 56.26MPa であった。5章では、VaRTM 法による鋼/CFRP 接着接合試験体の基礎的な接着強度の評価のため、接着層に剪断応力が支配的に生じる二面引張剪断試験、剪断応力に加え垂直応力が生じる 3 点曲げ試験を行った。その結果、二面引張剪断試験では、FEA によって推定された主応力時の荷重が CFRP の剥離破壊時と対応を示した。そして、既往の提案式による推定主応力が最大荷重以下であり、安全側評価となることも確認した。3 点曲げ試験では、鋼材が弾性域内での CFRP の剥離破壊、鋼材の降伏後に CFRP が剥離破壊、鋼材の降伏後、CFRP の剥離破壊は生じずに破断する 3 種類の破壊モードを有する試験を行った。各試験体の主応力を評価した結果、概ね FEA によって推定される主応力で評価が可能であることがわかった。

以上の基礎的な試験結果を踏まえ、本章では鋼板に対する曲げ補強を目的に剛性及び強度設計を行い、成形接着、試験、分析を行う。以下に示す条件のように、1)によって剛性設計、2)によって設計耐力を設定し、3)によって強度設計を行う。1)の剛性設計では、積層材量によって補強を行う場合、前述したように従来の平面積層型では効率的とは言い難い。そこで、効率的に曲げ剛性を増加させることができる立体型の CFRP を成形することで剛性の確保が容易となる。2)の設計耐力では、接着接合法による合成断面設計の場合は接合材の剥離破壊によって設計耐力は接着強度で決まってしまう。よって、接着接合法における設計耐力は剥離破壊を避けた上での合成断面における設計耐力の設定が必要となる。3)の強度設計では、剛性と強度には相互作用があり、剛性を増加させるために断面を増大させると、応力が下がることから必要強度は減少する傾向にある。CFRP は軽量・高強度である面からも大断面化には適しているといえる。しかし、接着接合法の場合、過度な剛性の増加は母材と接合材の剛性比に準じて剥離破壊の抑制が困難になり、特に母材である鋼材の降伏後には変形が増大し剥離破壊の抑制がより一層困難になることから、高い剛性増加を要する場合、母材は弾性状態である必要があり、高い剛性増加が不要な場合は、5章で示したような鋼材の降伏後にも CFRP が曲げ変形に追従し材料破壊で終局耐力を迎える設計となる。

- 1) CFRP による補強後の剛性は無補強 (NS) 時の 1.5 倍程度を目標とする
- 2) 設計耐力は合成断面における CFRP の破断歪到達時の荷重とし、その荷重以前に接着面に生じる主応力が 36.12MPa を超えないような断面とする
- 3) 終局耐力は鋼材の降伏後、CFRP の材料強度によって決定される

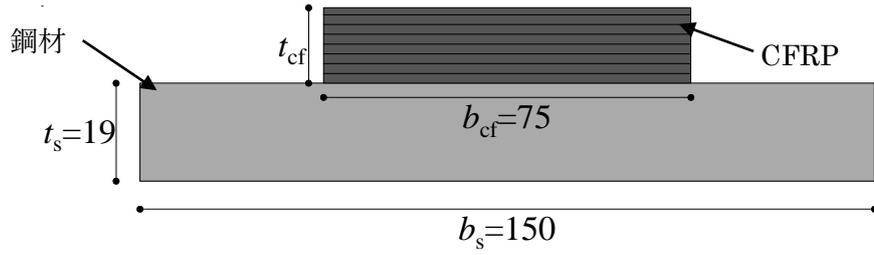
6-1 曲げ補強設計の概要

曲げ補強設計は厚さ 19mm，幅 150mm の SS400 鋼材を対象として，曲げ補強設計を曲げスパン 900mm，繊維体積含有率を 45%と仮定した CFRP による補強長さ 800mm，補強幅 75mm の 3 点曲げ試験として行う。表 6-1 に使用した被補強材及び補強材の機械的性質を示す。CFRP は図 6-1 に示すような 3 種類の補強断面を採用し，補強設計を行った。採用した断面の形状は，図 6-1 (a) は従来の補修・補強設計に用いられている平面積層型，図 6-1 (b)，(c) は効率的な曲げ剛性の向上を目的とした立体成型型となっている。

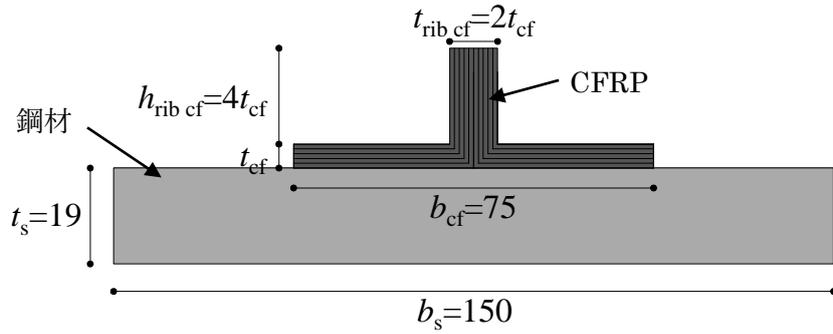
補強設計では初めに合成断面を考慮した梁理論によって線形解析を行うことで断面の算定を行い，補強量を決定する。次に FEA による非線形解析を行い，以下に示す条件を満たすことを目標とした。

表 6-1 使用材料の機械的性質

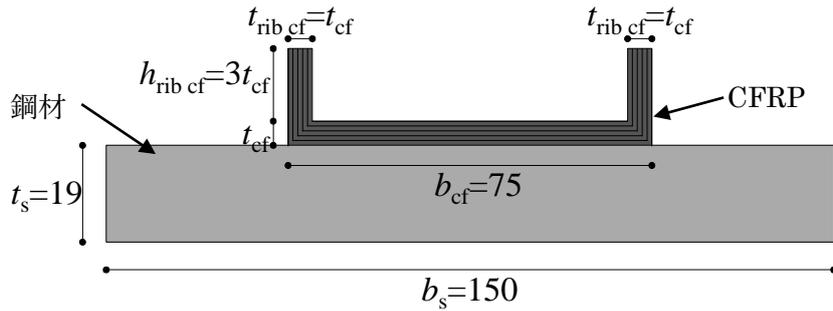
(a) 鋼材	
厚さ [mm]	19
弾性係数 [GPa]	200
ポアソン比	0.3
降伏点 [MPa]	289, 304
(b) 炭素繊維シート	
目付量 [gsm]	190
厚さ [mm/ply]	0.105
繊維軸方向弾性係数 [GPa]	294
引張強度 [MPa]	5900
(c) CM	
目付量 [gsm]	450
弾性係数 [GPa]	8.0
(d) 含浸樹脂	
弾性係数 [GPa]	3.0
ポアソン比	0.35



(a) Type-F



(b) Type-T



(c) Type-C

図 6-1 FEA モデル 【単位：mm】

6-2 設計耐力の算出

曲げ補強設計に際し、設計耐力を鋼/CFRP 接着接合試験体を合成断面とした場合の CFRP の破断歪到達時の荷重とする。この荷重は図 6-2 に示すような CFRP の幅を鋼材と等価な幅に置換した応力状態を仮定することで式 (19) によって算出する。なお、この応力状態は中立軸が鋼材内部に留まっているものとする。式 (19) は図 6-1 (b) に示しているように平面積層部分とリブ部分の幅が異なっている Type-T, C について等価な CFRP 幅を $b_{CF1.eq}$, $b_{CF2.eq}$ として導出している。そのため、Type-F の場合はリブ部分の項を除くことで算出が可能となる。

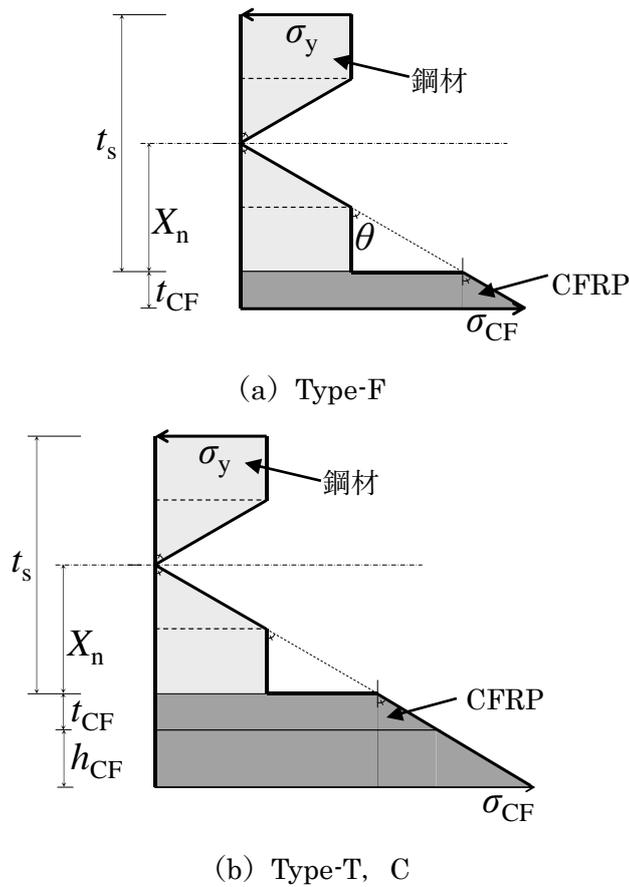


図 6-2 合成断面における応力状態の仮定

$$\left\{ 2\sigma_y b_s \right\} X_n^2 + \left\{ \sigma_{CF} t_{CF} b_{CF1.eq} + 2\sigma_y t_{CF} b_s + \sigma_{CF} h_{CF} b_{CF2.eq} + 2\sigma_y h_{CF} b_s - \sigma_y t_s b_s \right\} X_n + \left\{ \frac{1}{2} t_{CF}^2 \sigma_{CF} b_{CF1.eq} - \sigma_y t_s t_{CF} b_s + \frac{1}{2} h_{CF}^2 \sigma_{CF} b_{CF2.eq} - \sigma_y t_s h_{CF} b_s - \sigma_{CF} t_{CF} h_{CF} b_{CF2.eq} \right\} = 0 \quad (19)$$

$$b_{CF1.eq} = \frac{E_{CF}}{E_s} b_{CF1}, \quad b_{CF2.eq} = \frac{E_{CF}}{E_s} b_{CF2}$$

σ_y : 鋼材の降伏点, b_s : 鋼材の幅, X_n : 中立軸距離, σ_{CF} : CFRP の引張応力,
 t_{CF} : CFRP の厚さ, $b_{CF1.eq}$: 鋼材と等価な平面積層部の CFRP 幅, h_{CF} : CFRP のリブ部高さ,
 $b_{CF2.eq}$: 鋼材と等価なりブ部の CFRP 幅, t_s : 鋼材の厚さ, E_{CF} : CFRP の弾性係数,
 E_s : 鋼材の弾性係数, b_{CF1} : 平面積層部の CFRP の幅, b_{CF2} : リブ部の CFRP の幅

6-3 使用する炭素繊維の材料試験

本章で用いる炭素繊維について、VaRTM 法による成形を行い、JIS K 7164 を参考にし、引張試験を行った。図 6-3 に試験体寸法、図 6-4 に試験時の状況を示す。試験は繊維軸方向および繊維軸直角方向の歪を計測した。試験体は積層数を 5 層、試験体数を 5 体とした。図 6-5 に試験より得られた応力-歪関係を示し、表 6-2 に試験結果の平均を示す。なお、弾性係数については最大応力の 0.2~0.5 の範囲において算出した。これによって得られた結果を補強設計に用いることとする。なお、材料試験での繊維体積含有率は 39.0%であったため、設計時には表 6-3 のように 45%に換算する。

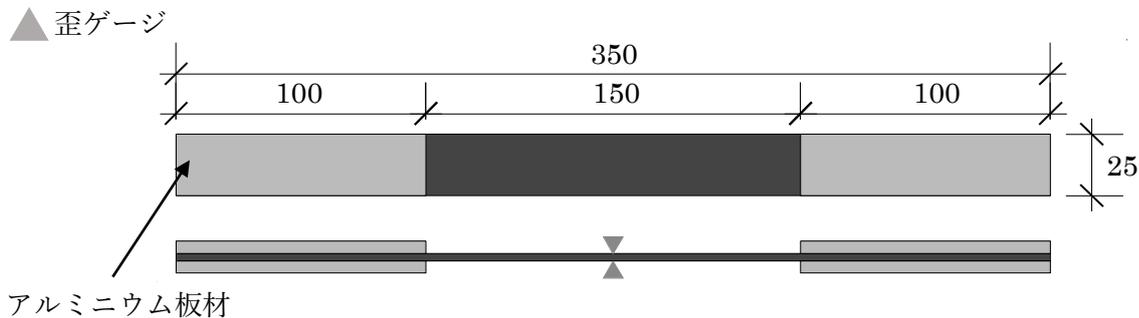
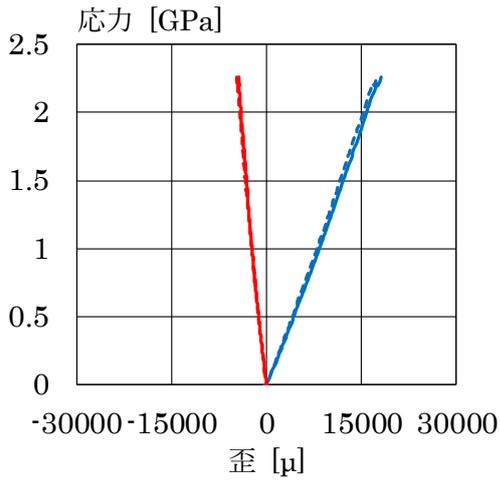


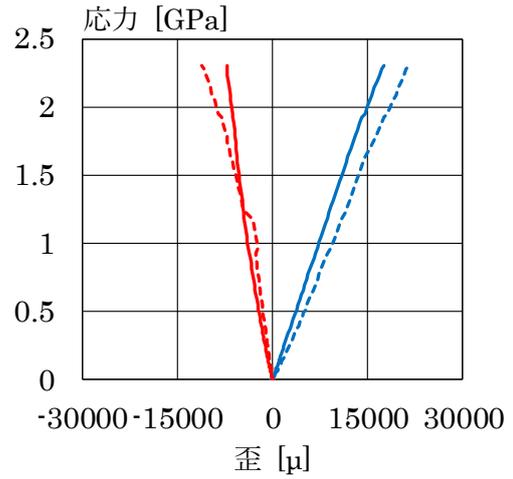
図 6-3 試験体寸法【単位：mm】



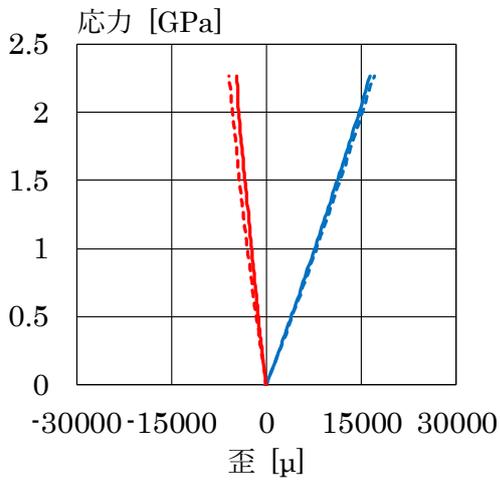
図 6-4 試験時の様子



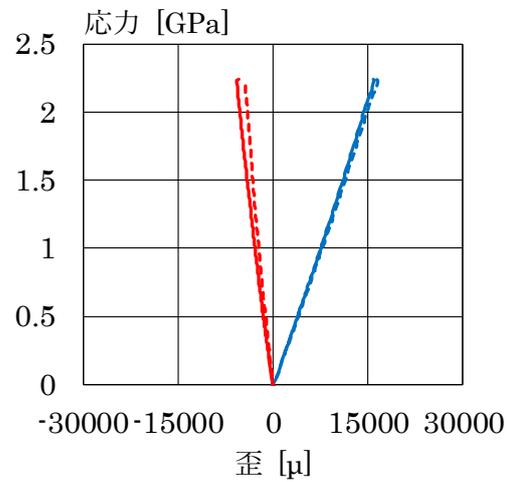
(a) 試験体 1



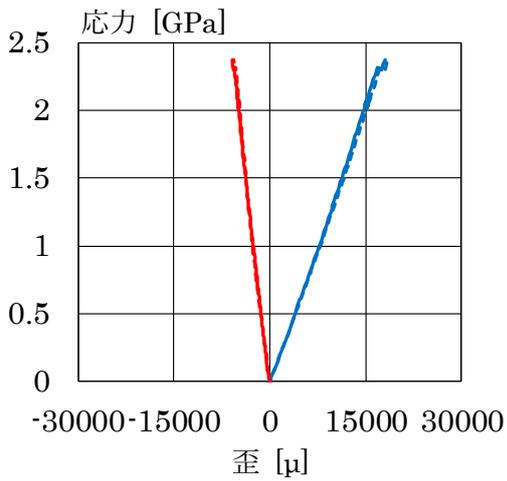
(b) 試験体 2



(c) 試験体 3



(d) 試験体 4



(e) 試験体 5

— : 歪ゲージ 1 (繊維軸方向) — : 歪ゲージ 1 (繊維直角方向)
 - - - : 歪ゲージ 2 (繊維軸方向) - - - : 歪ゲージ 2 (繊維直角方向)

図 6-5 応力-歪関係

表 6-2 材料試験の結果

繊維軸方向弾性係数 [GPa]	111.60 (変動係数 2.72%)
引張強度 [MPa]	2120 (変動係数 1.97%)
ポアソン比	0.33 (変動係数 11.35%)
破断歪 [μ]	17232 (変動係数 6.85%)

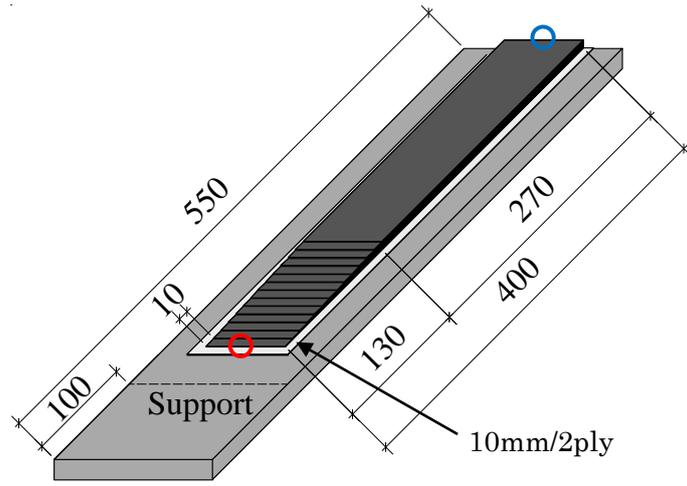
表 6-3 CFRP の設計用値 (繊維体積含有率 45%)

繊維軸方向弾性係数 [GPa]	128.77
引張強度 [MPa]	2446
ポアソン比	0.33
破断歪 [μ]	17232

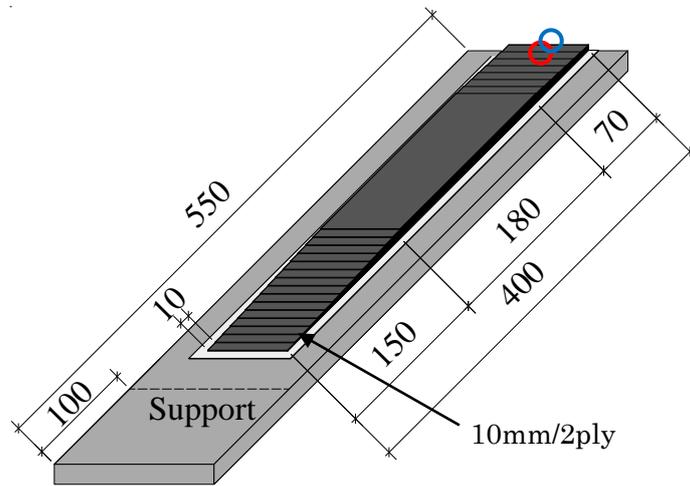
6-4 補強設計

図 6-6 に補強設計を行った各試験体の概要図，表 6-4 に各試験体の概要を示す。なお，図 6-6 は上下を反転させ，対象に描いている。試験体名は「Type-CFRP の断面の形状-試験体番号 (試験体が 1 体の場合は省略)」とする。設計に用いる FEA は対称条件を考慮した 2 次元モデル，要素は平面応力状態を仮定した 2 次要素三角形及び四角形要素とした。また，鋼材の構成則は図 6-7 に示すような等方性弾塑性材料のトリリニアモデルとし，CM は等方性弾性材料，CFRP は異方性弾性材料とした。なお，鋼材は Type-F-1 と Type-T は降伏点 289MPa，Type-F-2 と Type-C は 304MPa のものを使用している。図 6-6 (a)，(b)，(d) は端部に施すテーパ状積層を 10mm/2 層とした。図 6-6 (b) は図 6-6 (a) に対し，中央部についても 19 層以降に 10mm/2 層でテーパ状積層を行った設計となっている。図 6-6 (c)，(d) は立体成形による効率的な曲げ剛性の向上を目的とした設計である。図 6-6 (d) は CFRP の剥離破壊を抑制するために端部に Type-F と同様のテーパ状積層を施し，リブ部の形状は FEA によって剪断遅れが発生する部分，中央部の主応力を考慮し除去した設計となっている。図 6-8 に FEA による荷重-主応力関係，図 6-9 に荷重-歪関係，図 6-10 に荷重-変位関係を示す。荷重-主応力関係に用いる主応力は図 6-6 に示す最大発生位置とし，式 (19) によって算出される設計荷重を描いている。図 6-9 の歪は図 6-6 に示す CFRP の最大軸方向歪の発生位置と表 6-2 に示した CFRP の破断歪を示している，図 6-10 の変位は曲げスパン中央の鋼材の鉛直変位とし，無補強材 (以下，NS) の剛性との比較を行う。

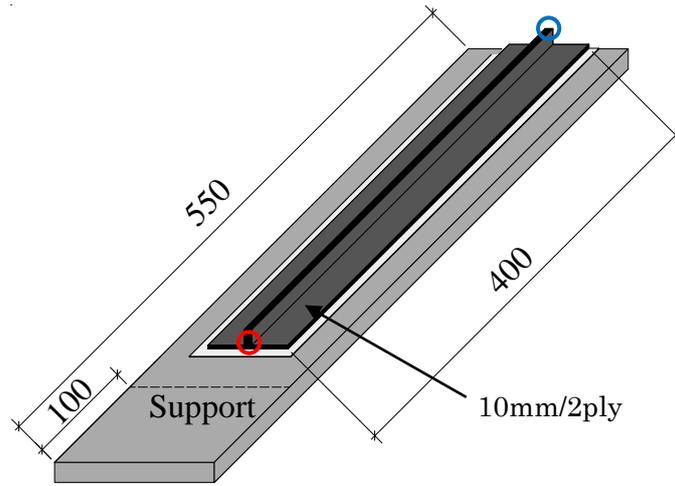
図 6-8，図 6-9 より，設計荷重までに Type-F-1 は CFRP の剥離・破断は生じない結果となり，鋼材の降伏後も変形に追従すると予想された。Type-F-2 は約 20~25kN で中央側テーパ積層部の 18・19 層間で設計値である主応力に到達するため，19 層以降が徐々に剥離すると予想される。Type-T については設計荷重と同程度で剥離破壊が生じると予想される。Type-C では設計荷重以下で中央側のリブ部において CFRP の破断歪へ到達すると予想される。図 6-10 から，全モデルにおいて NS の 1.5 倍の曲げ剛性を満足していることを確認した。



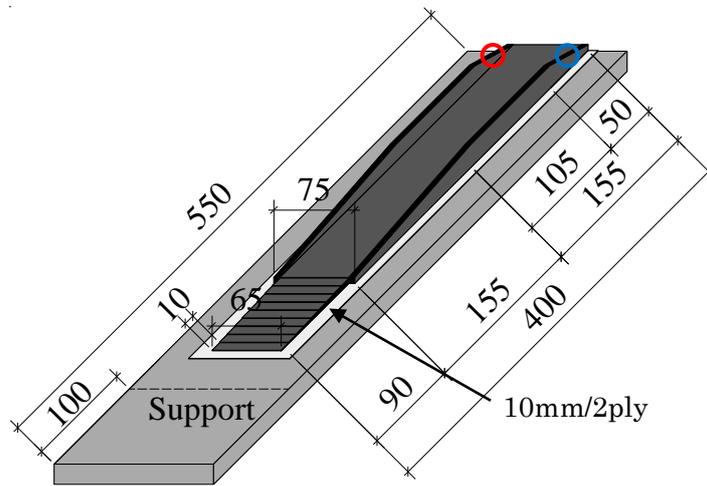
(a) Type-F-1



(b) Type-F-2



(c) Type-T

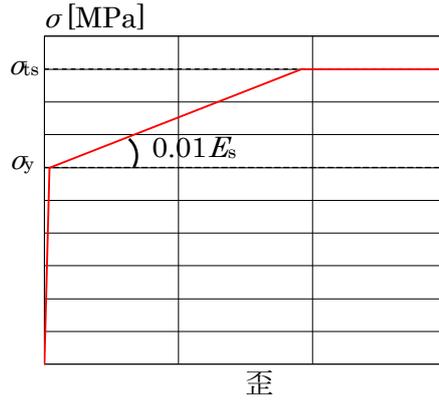


(d) Type-C

図 6-6 試験体概要図【単位：mm】

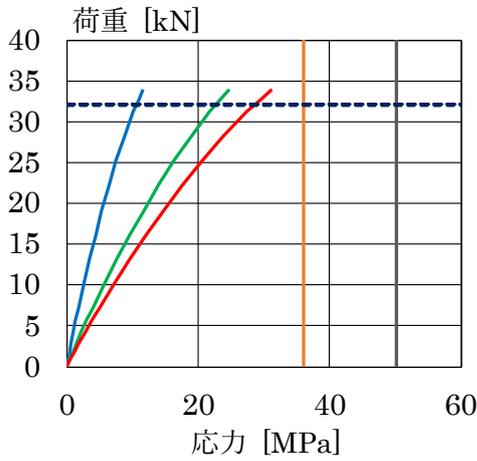
表 6-4 試験体概要

設計モデル	最大積層数	t_{CF} [mm]	$h_{rib CF}$ [mm]	$t_{rib CF}$ [mm]	炭素繊維使用量 [m ²]
Type-F-1	28	6.524			1.407
Type-F-2	32	7.456			1.476
Type-T	14	3.262	13.048	3.262	1.350
Type-C	20	4.660	13.980	4.660	1.377

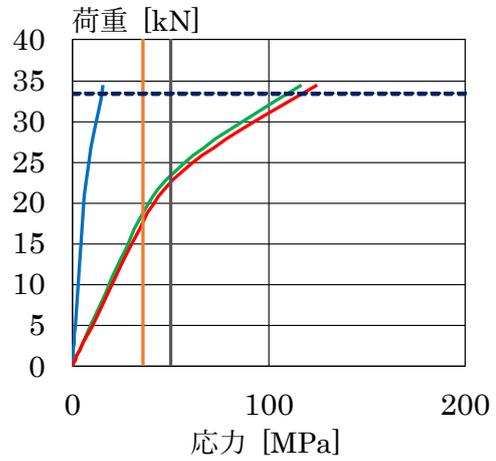


σ_y : 鋼材の降伏点 σ_{ts} : 鋼材の引張強度 E_s : 鋼材の弾性係数

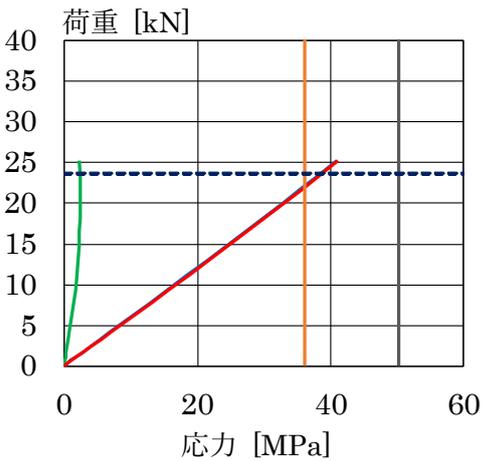
図 6-7 FEA に用いる鋼材の構成則



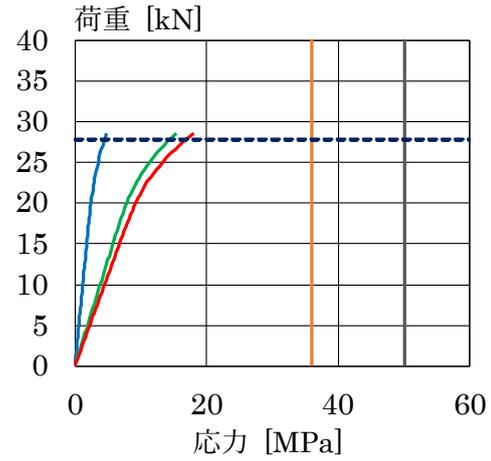
(a) Type-F-1



(b) Type-F-2



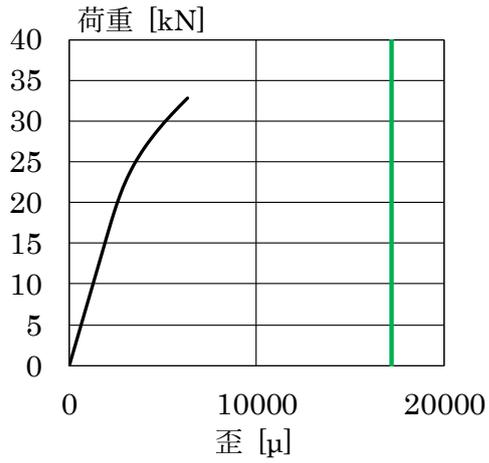
(c) Type-T



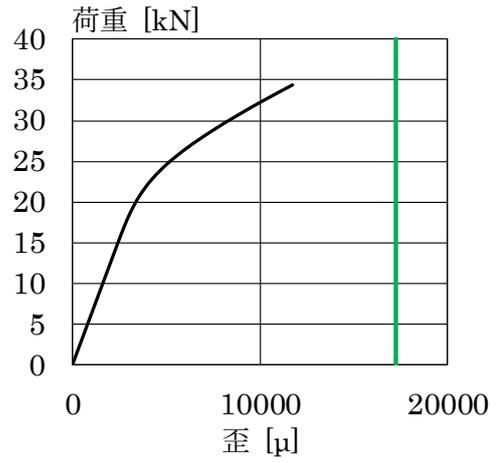
(d) Type-C

— : 剪断応力 — : 垂直応力 — : 主応力 — : 36.12MPa — : 50.26MPa - - - : 式 (19)

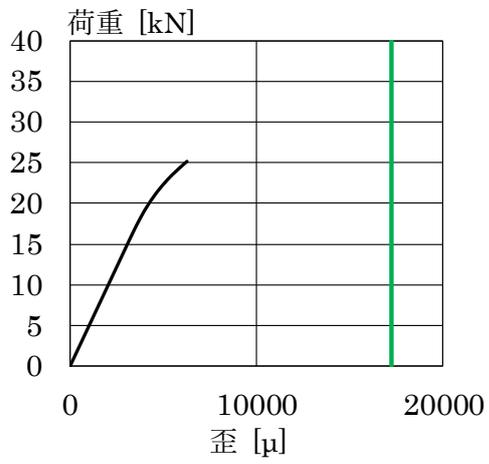
図 6-8 荷重-応力関係



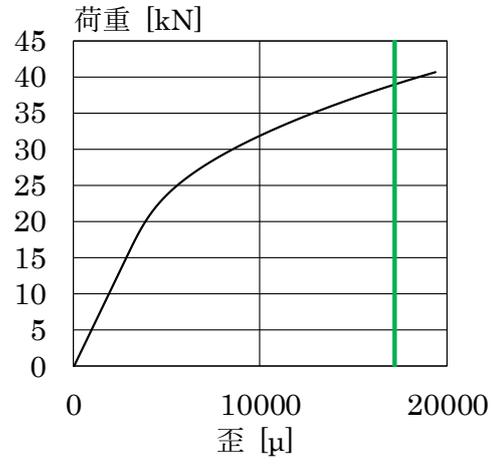
(a) Type-F-1



(b) Type-F-2



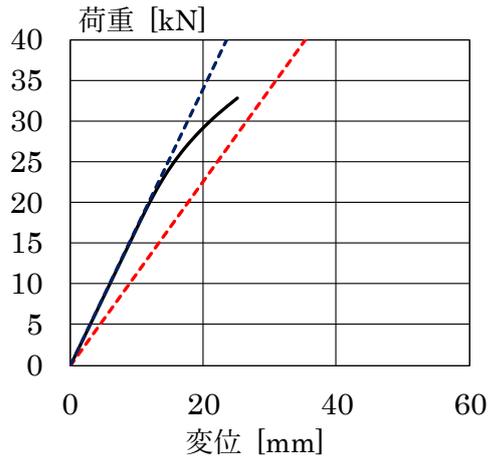
(c) Type-T



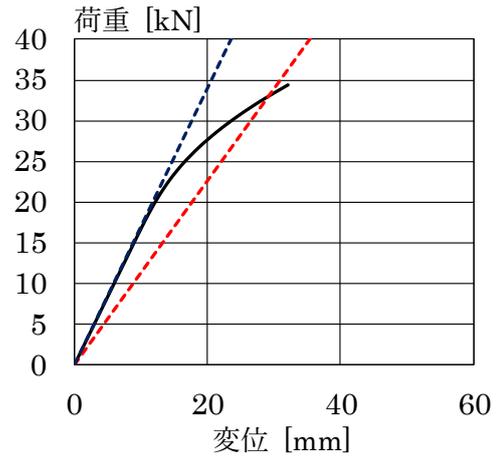
(d) Type-C

— : FEA — : CFRP の破断歪

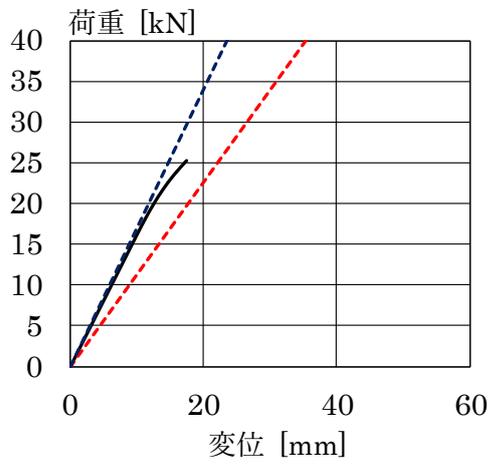
図 6-9 荷重-歪関係



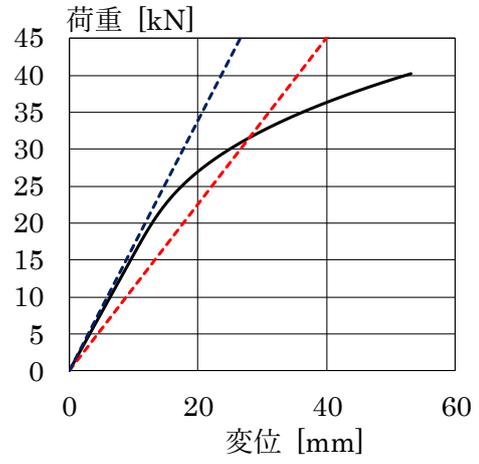
(a) Type-F-1



(b) Type-F-2



(c) Type-T



(d) Type-C

— : FEA - - - : NS の剛性 - - - : NS の剛性の 1.5 倍

図 6-10 荷重-変位関係

6-5 試験体の施工

表 6-5 に成形後の試験体寸法を示す。表中には設計時の寸法も示している。全試験体を通して、やや繊維体積含有率が設計値よりも下回ったものの、ほぼ設計通りの施工ができた。

表 6-5 試験体寸法

設計モデル		t_{CF} [mm]	$h_{rib\ CF}$ [mm]	$t_{rib\ CF}$ [mm]	繊維体積含有率 [%]
Type-F-1	設計値	6.524			45.0
	実測値	7.056			41.7
Type-F-2	設計値	7.456			45.0
	実測値	8.448			39.7
Type-T	設計値	3.262	13.048	6.524	45.0
	実測値	3.920	15.280	8.520	36.0
Type-C	設計値	4.660	13.980	4.660	45.0
	実測値	4.850	15.150	4.917	43.3

6-6 試験結果と考察

図 6-11 に試験時の様子、図 6-12 に試験後の試験体の様子を示す。図 6-12 に示す通り、破壊モードは Type-F-1 は剥離破壊が生じず、鋼材の降伏後にも CFRP は変形に追従することができた。Type-F-2 は設計時に想定された通り、中央側のテーパ部 18・19 層間で剥離破壊が生じ、その後は 18 層が鋼材の変形に追従した。Type-T は図 6-6 (d) に示した CFRP の層間剥離は生じずに、鋼/CM 界面での剥離破壊となった。Type-C では、中央リブ部の平面積層部との境界で約 100mm の剥離が発生・進行し、最終的には CM/CFRP 層で剥離が生じた。



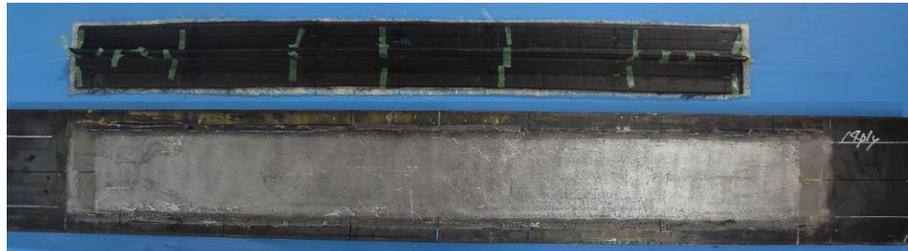
図 6-11 試験時の様子



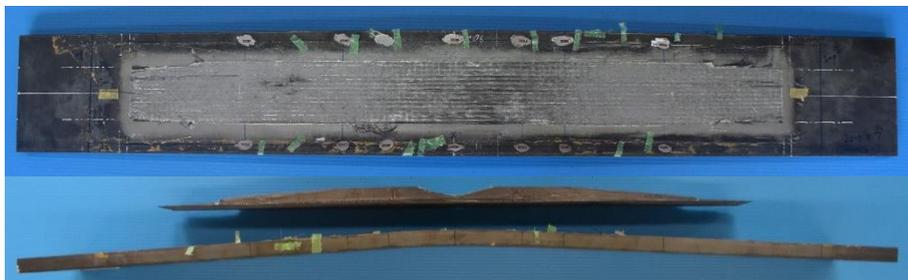
(a) Type-F-1



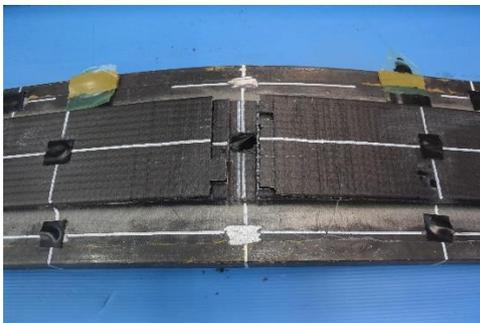
(b) Type-F-2



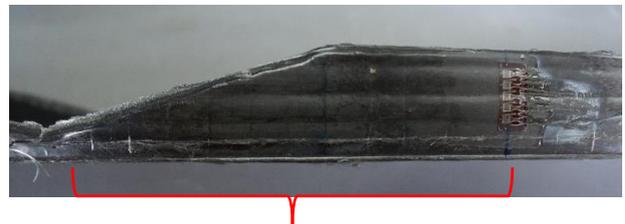
(c) Type-T



(d) Type-C



(e) Type-F-2 の中央側テーパ部

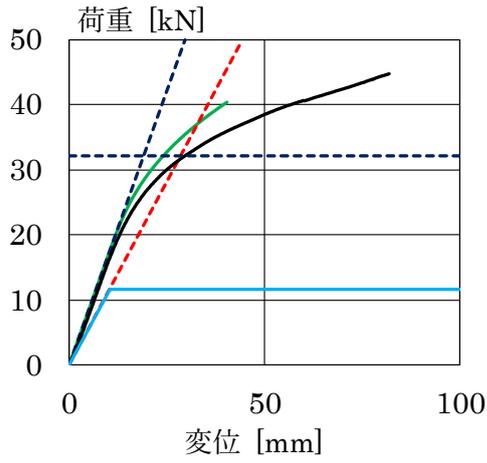


約 100mm の層間剥離

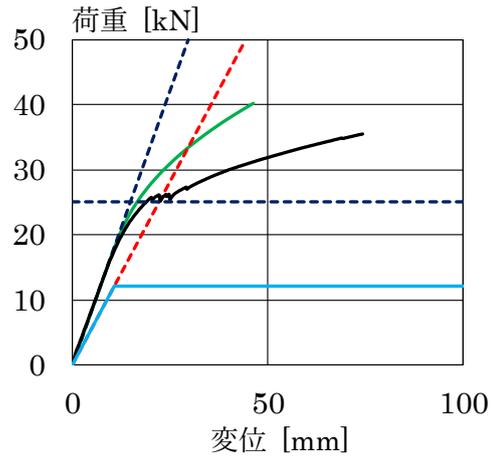
(f) Type-C の中央側リブ部

図 6-11 試験時の様子

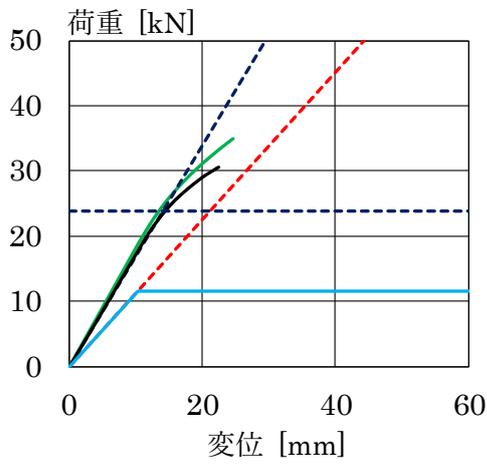
図 6-12 に荷重-変位関係を示す。変位は曲げスパン中央部の鋼材の変位とする。図には実験値、試験体寸法に沿った FEA を示している。全ての補強試験体で曲げ剛性の増加を確認した。曲げ剛性の向上は Type-T は 1.5 倍を満足し、Type-F-1, F-2, C は順に 1.42, 1.41, 1.35 倍程度となった。また、全ての試験体が設計荷重を満足していることがわかる。NS の降伏荷重に対して終局耐力は 3 倍以上の結果が得られている。図 6-13 に剥離が生じた位置における荷重-応力関係を示す。図 6-13 から、Type-F-1 は 35kN を超えたところで主応力が 36.12MPa に到達しているが、鋼材の変形に追従する結果となった。図 6-14 (a) に曲げスパン中央部の CFRP から得られる荷重-歪関係を示すが、40kN を超えたところで急激に歪が増加していることがわかる。試験機の都合のため、試験を中断したが、CFRP の破断歪に到達していることがわかった。これにより、主応力評価を用いて剥離破壊を抑制できるような設計が可能であることを示した。Type-F-2 は中央側のテーパ部 18・19 層間で剥離破壊が生じる結果となったが、主応力を見ると、約 25kN で主応力が 50.26MPa を超えていることがわかる。また、図 6-14 (b) を見ると、残存した 18 層の中央部で歪が増加しており、Type-F-1 と同様の挙動となった。Type-T では、剥離破壊が生じた鋼材/CM 界面の荷重-応力関係としている。結果として、剥離が生じた 36.12MPa に到達するのが約 30kN であり、最大荷重と対応を示した。しかし、設計時には鋼材/CM 界面ではなく、CFRP のリブ部と平面積層部の層間剥離が生じると予想されたため、Type-T では CFRP の層間接着強度が鋼材/CM 界面の接着強度よりも高かったといえる。Type-C では、FEA の結果からは 40kN を超えるまで主応力は低く抑えられているが、実験結果としては約 20kN で層間剥離が生じる結果となった。図 6-14 (c) にはリブ部の歪を描いているが、载荷直後から歪が増加しておらず、これによって応力集中が生じ剥離破壊が先行したと予想される。剥離破壊が生じた Type-F-2 の中央部、Type-T について主応力曲線にプロットしたものを図 6-15 に示す。この主応力曲線からもわかる通り、Type-F-2 の剥離時の主応力はやや接着強度が高いものの、推定可能な範囲に位置していると考えている。また、この応力は荷重が低下した際の応力をプロットしているが、二面引張剪断試験に用いたような剥離のクライテリアを設定することで、より精度の高い推定が可能である。しかし、3 点曲げ試験体や本試験体のような鋼材の降伏を伴う場合は剛性による評価が困難なため、荷重低下時を用いることが適当である。よって、曲げを受ける試験体はやや推定される主応力が高い結果となる。Type-T についても、端部にはほとんど剪断応力が発生しないため、垂直応力が支配的になっているがやや高い結果となった。



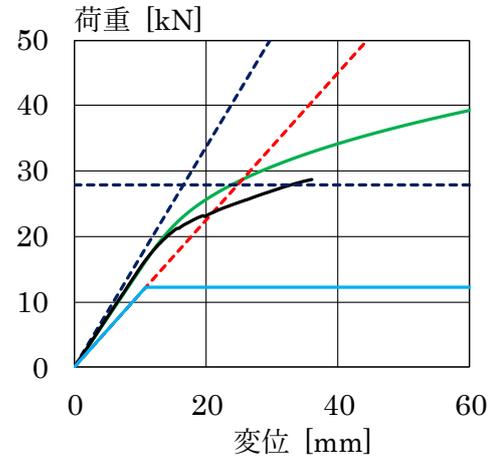
(a) Type-F-1



(b) Type-F-2



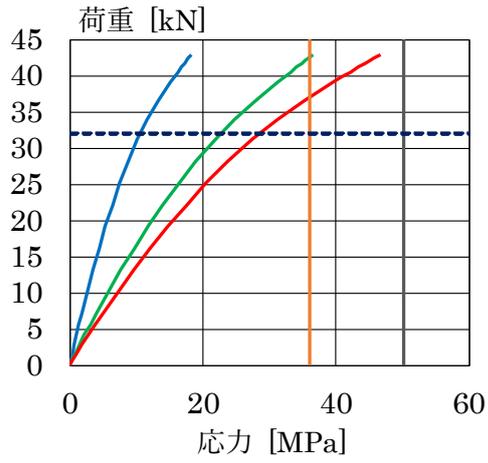
(c) Type-T



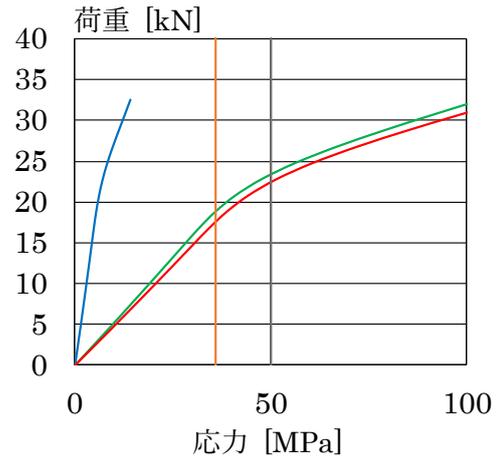
(d) Type-C

— : FEA — : 実験値 - - - : NS の剛性 - - - : NS の剛性の 1.5 倍 - - - : 式 (19)
 — : NS の降伏荷重

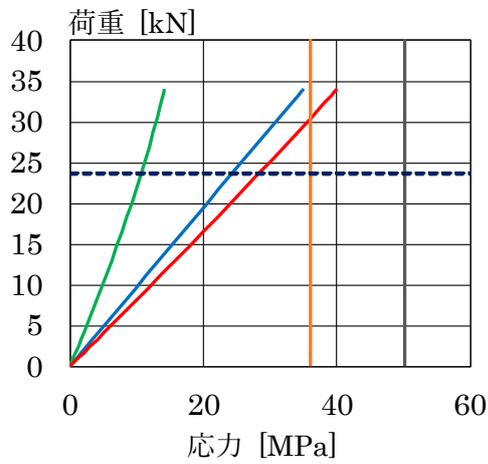
図 6-12 荷重-変位関係



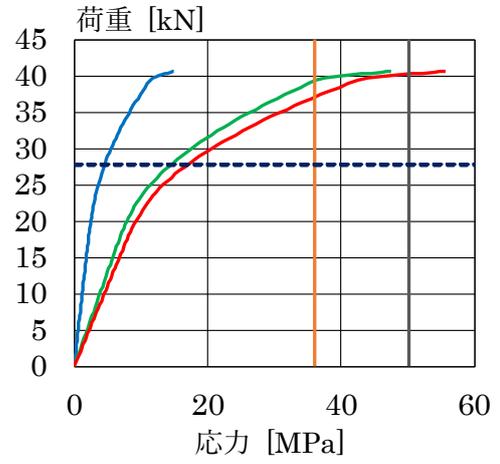
(a) Type-F-1



(b) Type-F-2



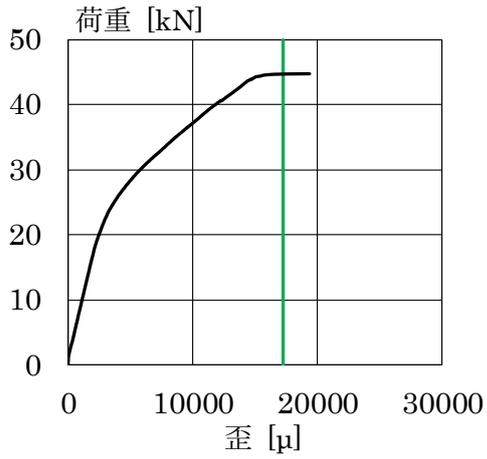
(c) Type-T



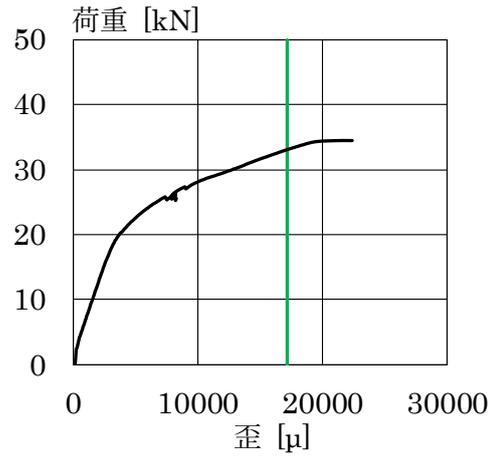
(d) Type-C

— : 剪断応力 — : 垂直応力 — : 主応力 — : 36.12MPa — : 50.26MPa - - - : 式 (19)

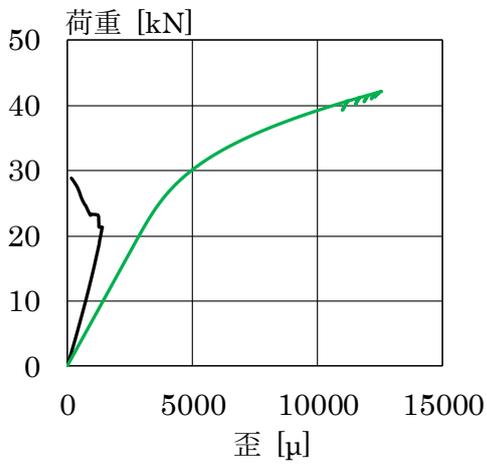
图 6-13 荷重-応力関係



(a) Type-F-1



(b) Type-F-2



(c) Type-C

— : 剪断応力 — : 垂直応力 — : 主応力 — : 36.12MPa — : 50.26MPa - - - : 式 (19)

图 6-14 荷重-歪関係

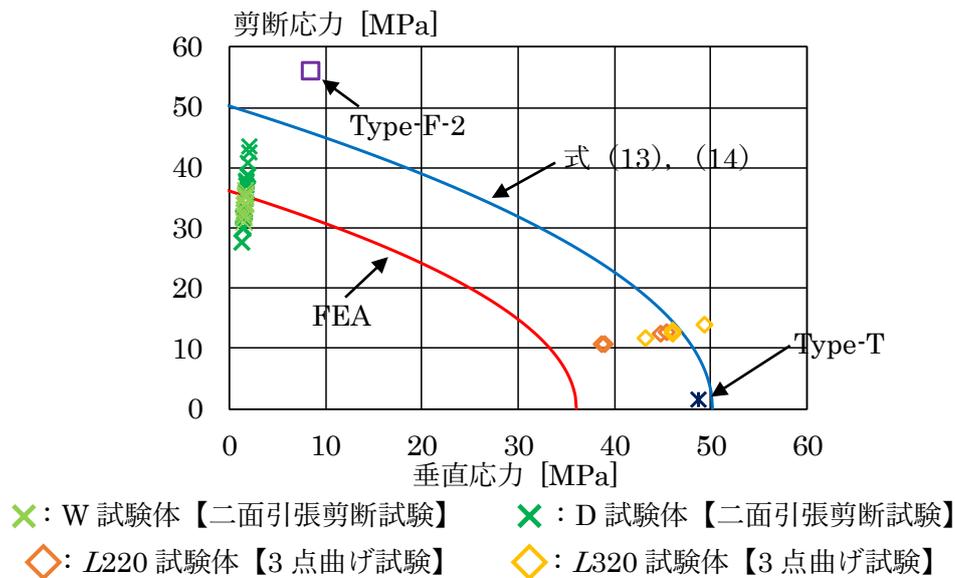


図 6-15 主応力曲線

以上をまとめると、全ての試験体で曲げ剛性の増加を確認できた。また、事前に評価を行った主応力によって設計することで被補強材である鋼材の弾性、塑性状態に左右されずに CFRP の剥離破壊を抑制するような断面設計が可能であることを示した。また、剪断応力が支配的な場合、垂直応力が支配的な場合の両方において、主応力によって剥離破壊が生じるとされる荷重の予測は概ね対応を示していることも確認した。

設計の適応が可能と予想されるの積層方法は従来の平面積層に限られ、立体型での設計を行う場合は鋼材の降伏後の変形に追従することは難しく、弾性範囲内のみでの応用に限られる。

第7章 結論

本論文では、CFRPを用いた鋼構造部材に対する補修・補強を目的に鋼/CFRP接着接合試験体の力学性状の分析を行った。まず初めに、従来の補修・補強工法には用いられていないVaRTM法による鋼構造部材への成形接着法の実現のため、界面分析を交えてVaRTM法による成形接着法を提案した。次に、VaRTM法によって成形接着された鋼/CFRP接着接合試験体の接着強度を接着層に生じる主応力によって評価をした。そして、二面引張剪断試験、3点曲げ試験を通して評価した主応力の妥当性について分析と評価を行った。最後に、鋼構造部材の曲げ補強を目的として、評価した主応力を用いてCFRPを設計し、3点曲げ試験を通して設計との比較を行うことでVaRTM法による鋼構造部材への補修・補強への適用性について検討した。

以下に得られた知見を述べる。

第3章 「VaRTM法による鋼構造部材への成形接着工法」より

- [1] 鋼構造部材に対してCFRPを接着と同時に成形を行う成形接着法を提案した。
- [2] 鋼材表面の下地処理後に処理面に強化材を設置し、成形接着を行った試験体に対して二面引張剪断試験を行った。その結果、既往研究と比較して、低い接着強度となったため試験後の剥離面についてSEMを用いて界面を分析した。すると界面からガラス繊維の主成分であるケイ素が見受けられた。これにより、含浸樹脂が十分に界面に行き渡っていないことが判明したため、本工法を用いる場合、鋼材表面の下地処理後に含浸樹脂によって事前塗布を行うことで接着不良を抑制できる可能性を示した。

第4章 「VaRTM法による鋼/CFRP接着接合試験体の接着強度評価法」より

- [3] 既往の接着強度評価法を基に、3点曲げ試験による評価法を提案した。
- [4] 提案された評価法を用いてVaRTM法による鋼/CFRP接着接合試験体の接着強度を評価した。その結果、CFRPの剥離時に接着層に生じる主応力はFEAで36.12MPa、石川らによる提案式で50.26MPaという値を得た。

第5章 「二面引張剪断試験および鋼材の降伏を伴う3点曲げ試験による力学性状分析」より

- [5] 二面引張剪断試験に用いる試験体を本工法によって施工した。成形接着されたCFRPの繊維体積含有率は50%を超え、変動係数が1%未満と極めて安定した施工が可能であることを示した。

- [6] 第3章にて可能性が示唆された、鋼材表面の下地処理後に含浸樹脂によって事前塗布することによる接着性能の向上について、含浸樹脂による事前塗布の有無をパラメータとして二面引張剪断試験を行った。その結果、事前塗布を行った試験体は耐力の変動係数が約2.2%と極めて耐力が安定した。また、事前塗布を行っていない試験体の歪の挙動は大きくバラついたので、事前塗布を行った試験体は歪の挙動も安定していることがわかった。
- [7] 二面引張剪断試験によって得られた平均剪断強度は16.83MPaであった。この値は既往研究と比較し、高い平均剪断強度であることから、本工法によって優れた接着性能が得られることを示した。
- [8] 第4章にて示した主応力を用いて、CFRPの剥離破壊が生じる荷重をFEAによって推定した。すると、FEAによって得られた36.12MPaを用いて評価を行うと歪の挙動が変化する荷重レベルに良い対応を示した。石川らによる提案式で得られた50.26MPaを用いた荷重レベルは試験体の最大耐力と概ね対応し、どちらも評価可能な応力レベルにあることを確認した。
- [9] 合成断面理論および接合材の弾性理論を用いて、母材と接合材の軸剛性比に依存しないようなクライテリアを設定し、これを基に剥離が生じた荷重およびその時の主応力を推定した。その結果、耐力と同様に鋼材表面の下地処理後に含浸樹脂によって事前塗布することによる接着性能の向上について、効果が見受けられた。
- [10] 曲げ変形によって、①鋼材が弾性状態でのCFRPの剥離破壊、②鋼材が塑性状態でのCFRPの剥離破壊、③鋼材が塑性状態でもCFRPの剥離破壊は生じずにCFRPの材料破壊となる3つの破壊モードを有する3点曲げ試験を行った。試験体は接着長を220mm, 320mm, 400mm, 各接着長でCFRPの積層数を7層, 11層とした。CFRPが剥離破壊した試験体は鋼材の弾性・塑性状態に問わず、剥離時の主応力は45~55MPaと安定した結果を得ることができ、4章で得られた主応力で評価が可能であることを確認した。また、CFRPの剥離破壊が生じずにCFRPの破断による材料破壊が生じた試験体は剥離破壊が生じた試験体の主応力よりも低い結果となっており、推定した主応力を用いることでCFRPの剥離破壊を抑制し、鋼材の降伏後にも曲げ変形に追従し続ける設計ができることを示した。

第6章 「曲げ補強を目的とした鋼板に対するCFRPの断面設計」より

5章にて、二面引張剪断試験による剪断応力が支配的な場合と3点曲げ試験による垂直応力が支配的な場合の主応力評価を行った。それらの結果から、主応力評価によってCFRPの剥離破壊を抑制し、鋼材の降伏後にも曲げ変形に追従し続ける設計が可能であることを示した。これを基に、曲げ補強を目的に鋼板に対してCFRPの断面設計を行った。

- [11] 設計荷重を中立軸が鋼材内部に留まっていると仮定した鋼/CFRP 接着接合試験体の合成断面とした CFRP の破断歪到達時の応力状態を仮定することで荷重を設定した。そして、設計を行った全ての試験体でこの荷重を満足することを確認した。
- [12] CFRP の剥離破壊を抑制するような試験体では、設計と同様に試験結果が対応し、CFRP の破断による材料破壊が終局耐力となるような設計が行えることを示した。これにより、安定した耐力での接着接合工法が実現可能であることを示した。
- [13] 効率的な曲げ剛性の増加を図るため、立体型による曲げ補強を行った。平面積層型に比べ、少ない使用量で曲げ剛性の増加は得られたが主応力を抑えた設計は困難であり、鋼材の弾性範囲に限定した設計であれば適用が可能であることがわかった。
- [14] 剥離破壊が生じた試験体では、FEA によって推定される剥離時の主応力と荷重が対応を示した。この事から、設計に際して FEA によって主応力の推定をしておくことで、剥離荷重の推定も可能であることを示した。

以上、本論文は鋼構造部材に対する補修・補強を目的に、CFRP を VaRTM 法によって成形接着を行った鋼/CFRP 接着接合試験体の力学性状の分析を行った。本論文で得られた主応力は今後、VaRTM 法を用いた鋼/CFRP 接着接合試験体の強度評価の 1 つに成りえると確信する。

謝辞

本論文を纏めるにあたり，豊橋技術科学大学 准教授の松本幸大博士には，本研究の当初より懇切丁寧なご指導とご鞭撻を賜りました．ここに深く感謝の意を表します．

本論文の審査では，豊橋技術科学大学 教授・中澤祥二博士，豊橋技術科学大学 准教授・松井智哉博士，首都大学東京 准教授・中村一史博士には大変貴重なご助言を頂き，深く御礼を申し上げます．

本研究の実施にあたり，東レ株式会社 ACM 技術部の松井孝洋氏，東レ株式会社 アドバンスドコンポジットセンターの越智寛氏には実験の遂行に際して多大なご協力を頂きました．深く感謝の意を表します．

本研究の実験に際し，豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 構造工学研究室の皆様にご協力を頂きました．厚く感謝の意を表します．

最後に，長い学生生活を支援し続けてくれた両親に心より感謝の意を表します．

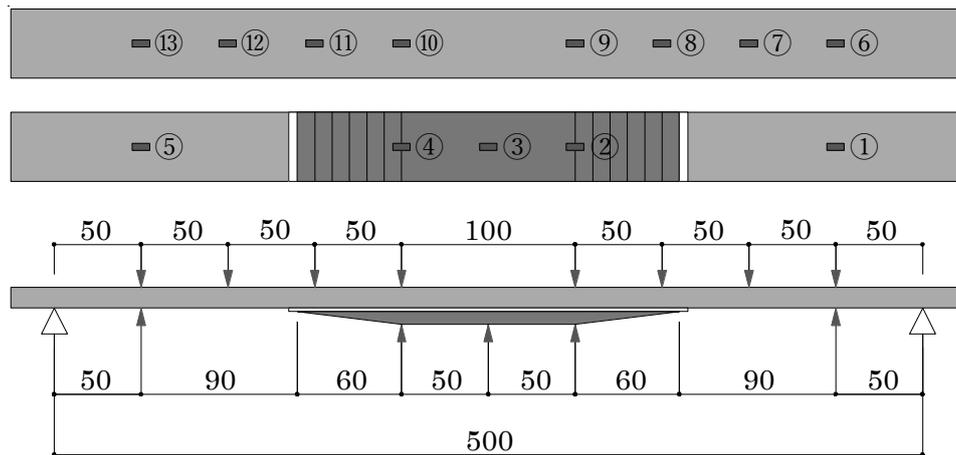
2020年3月

三枝 玄希

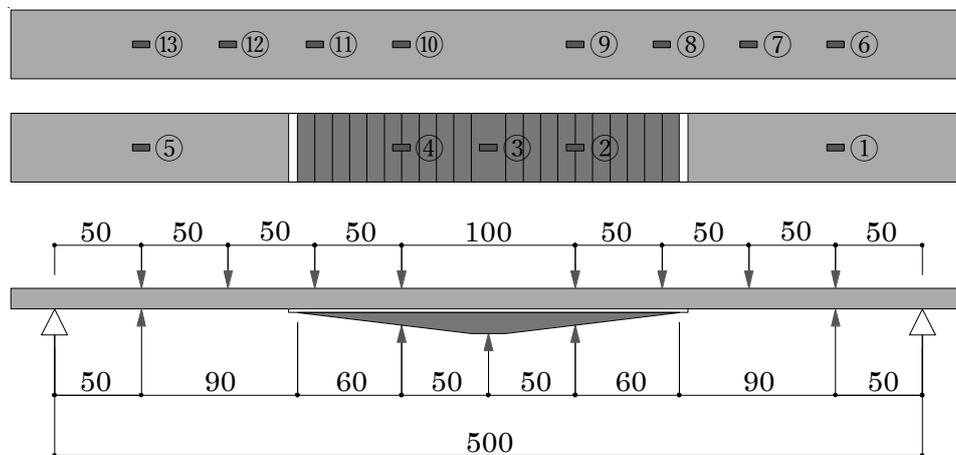
付録

A) 「5-2 鋼材の降伏を伴う 3 点曲げ試験」に示した試験体 16 体の荷重-歪関係

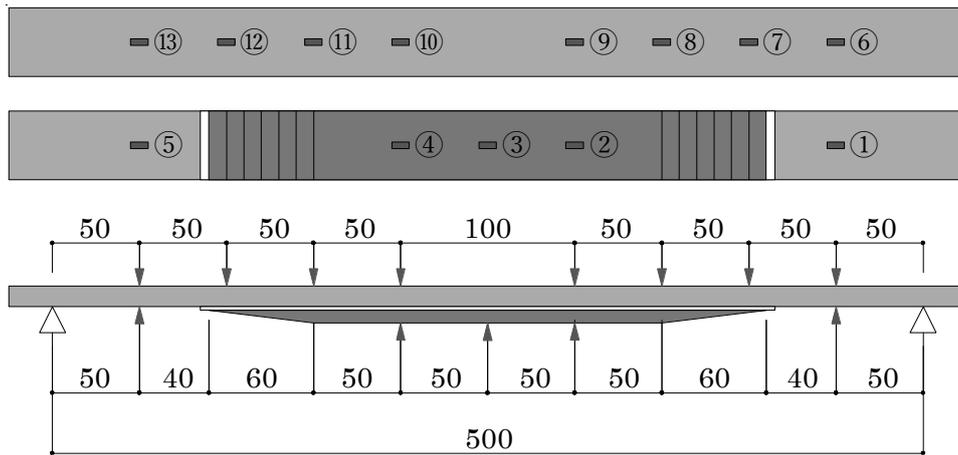
図 1 に試験体に貼付した歪ゲージ位置を示す。L400 試験体のみ、歪ゲージ①、⑤は貼付するスペースが無いため、貼付していない。図 2 に荷重-歪関係を示す。



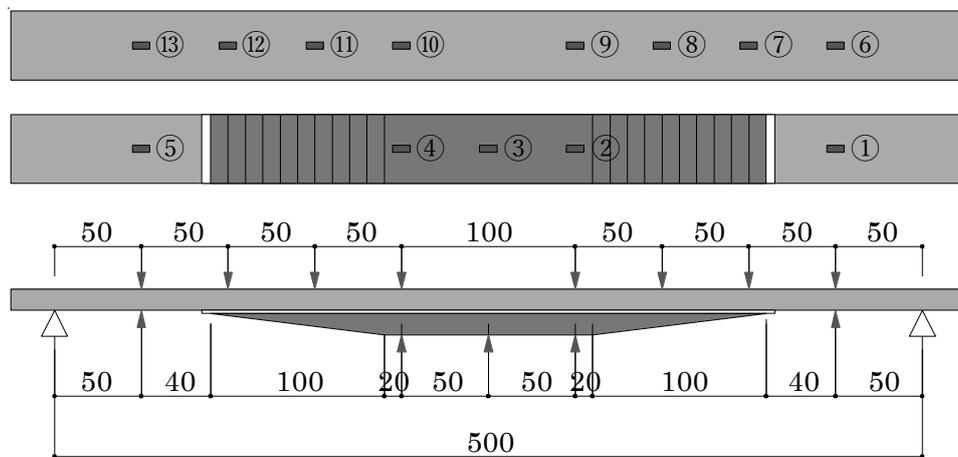
(a) L220-7 試験体



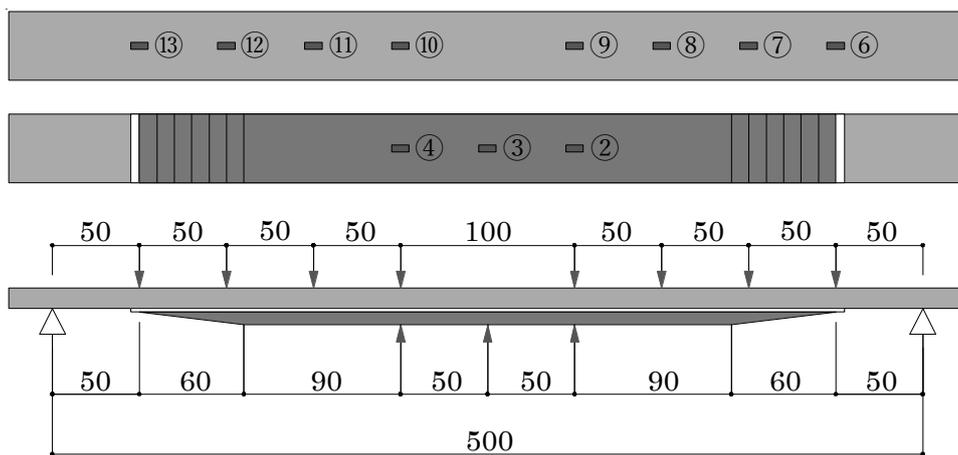
(b) L220-11 試験体



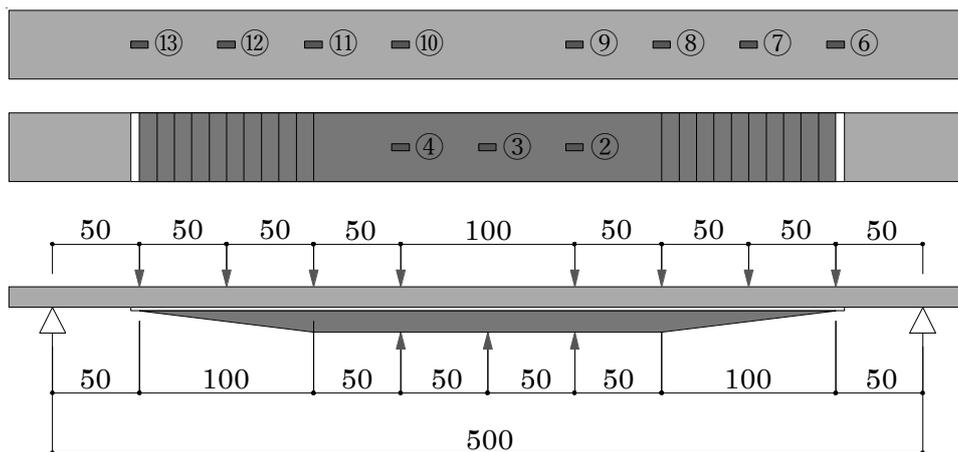
(c) L320-7 試験体



(d) L320-11 試験体

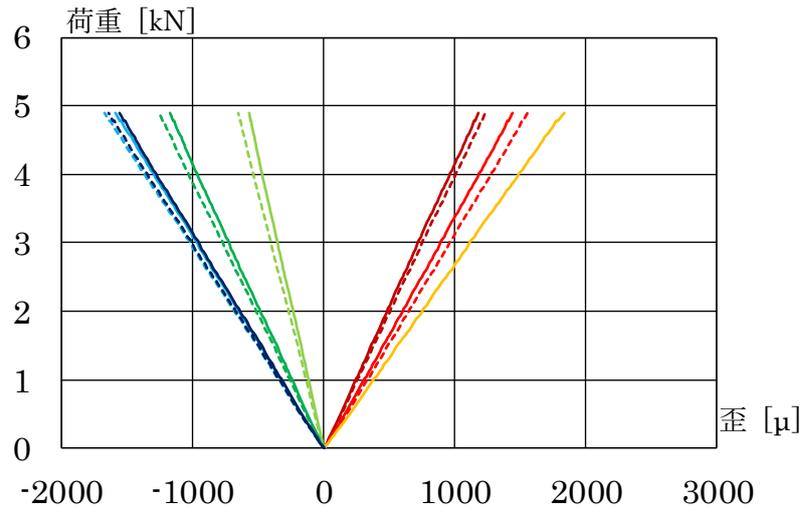


(e) L400-7 試験体

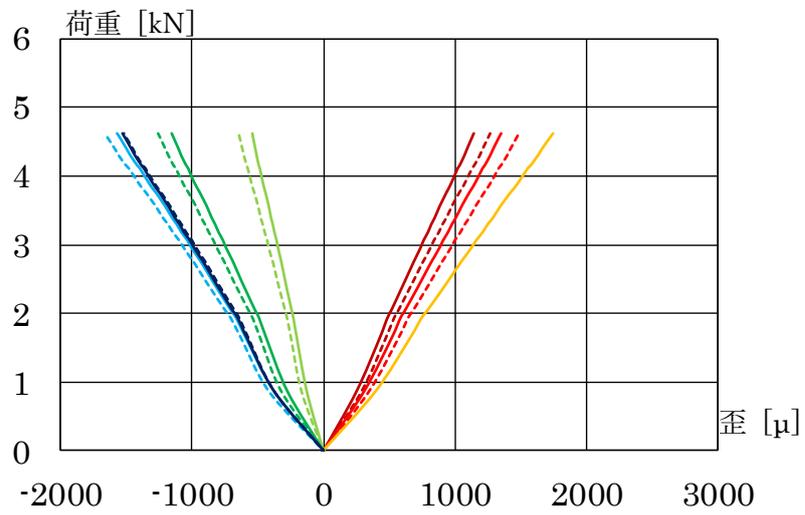


(f) L400-11 試験体

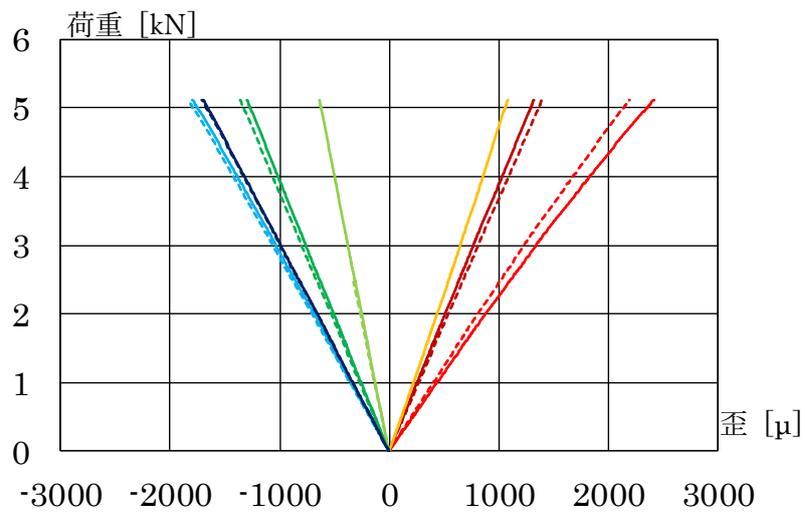
図1 歪ゲージ位置 【単位：mm】



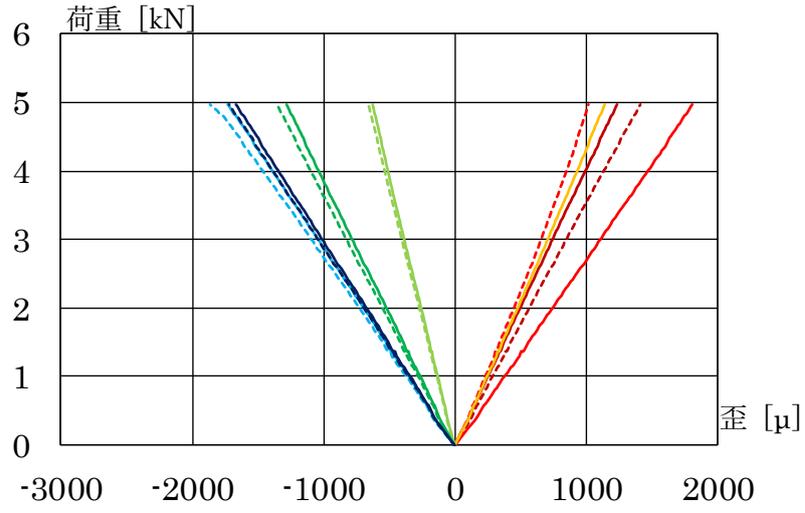
(a) L220-7-1



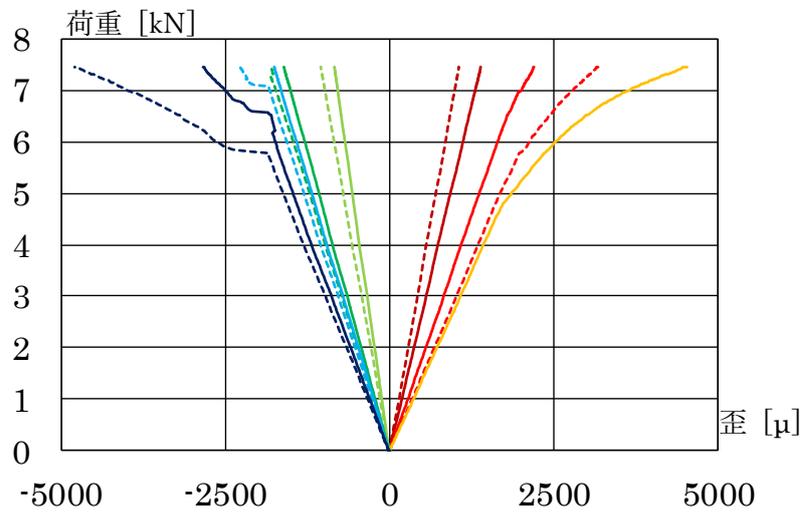
(b) L220-7-2



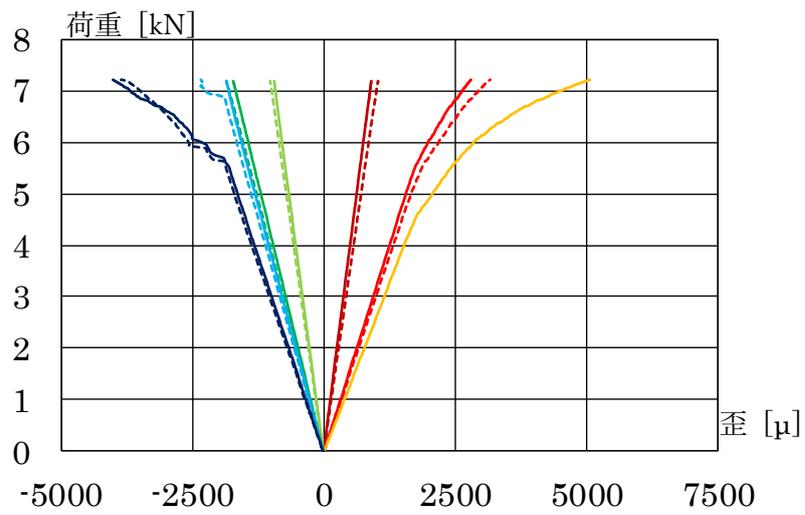
(c) L220-11-1



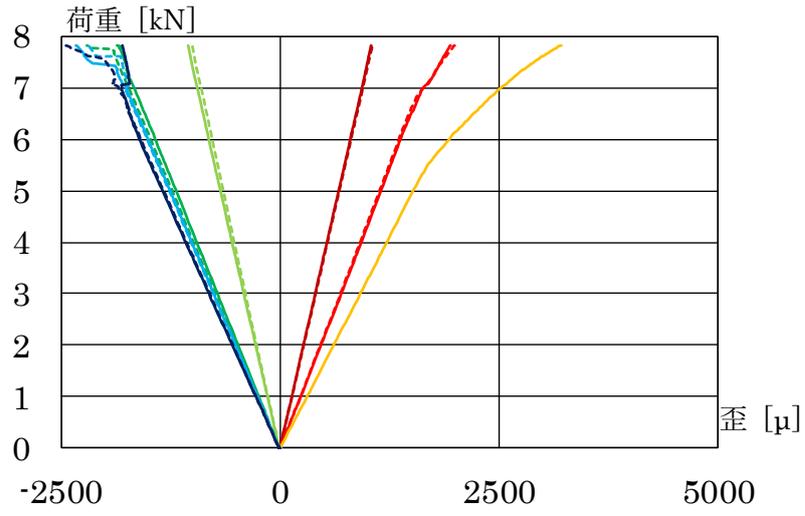
(d) L220-11-2



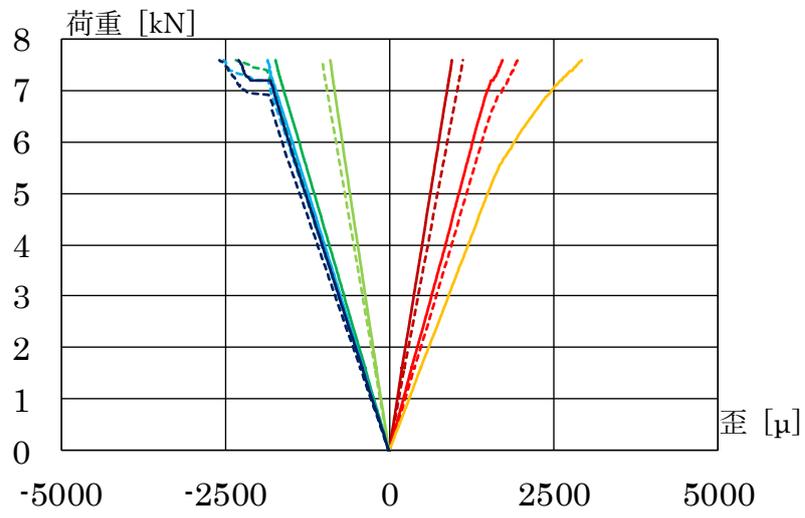
(e) L320-7-1



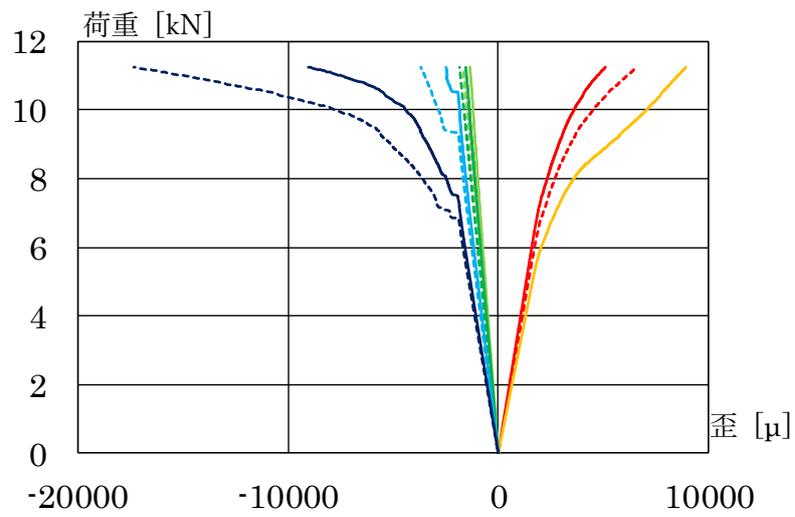
(f) L320-7-2



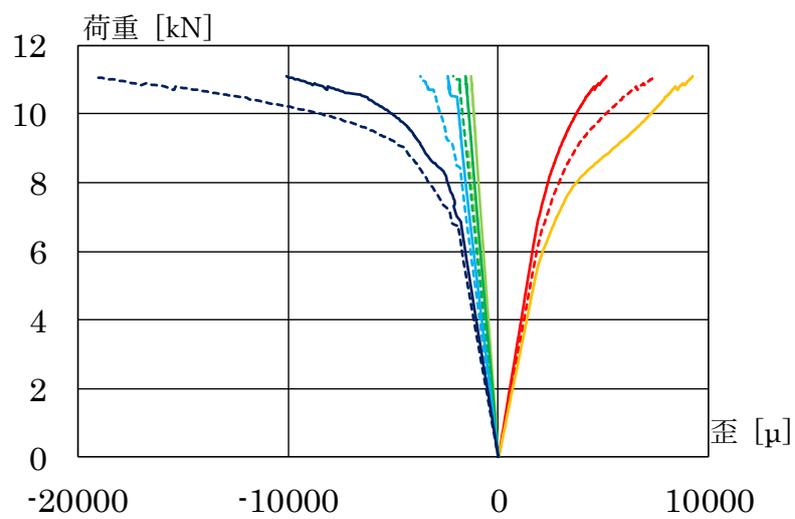
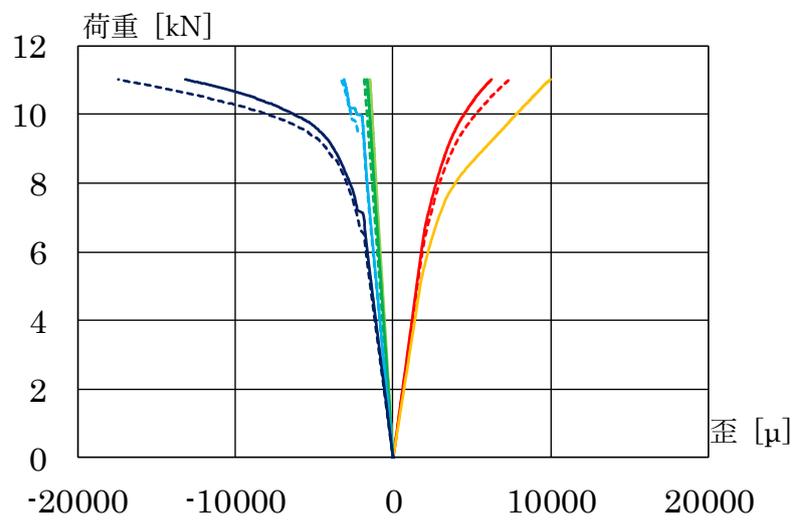
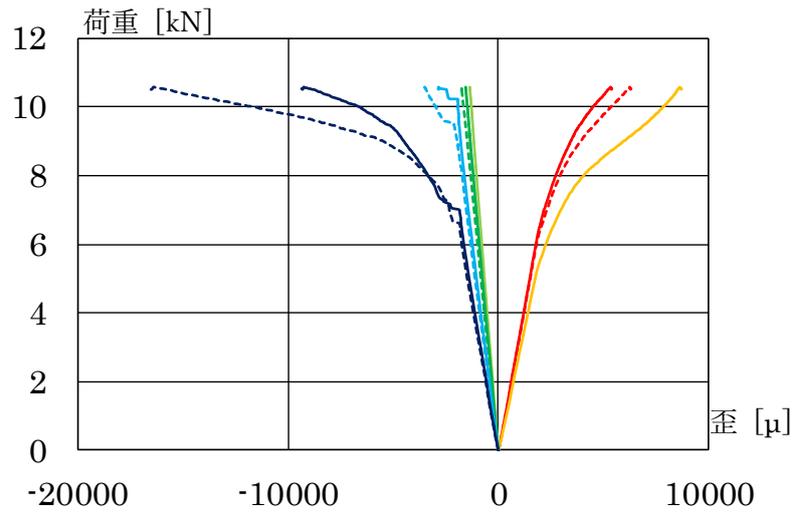
(g) L320-11-1

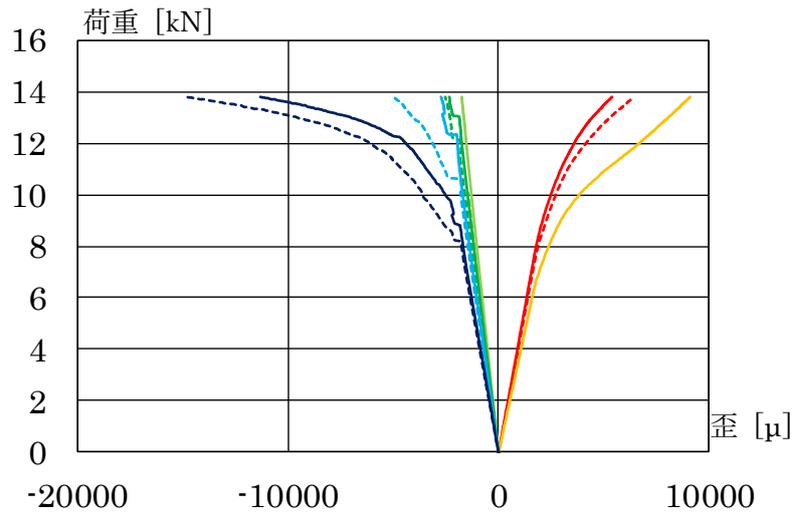


(h) L320-11-2

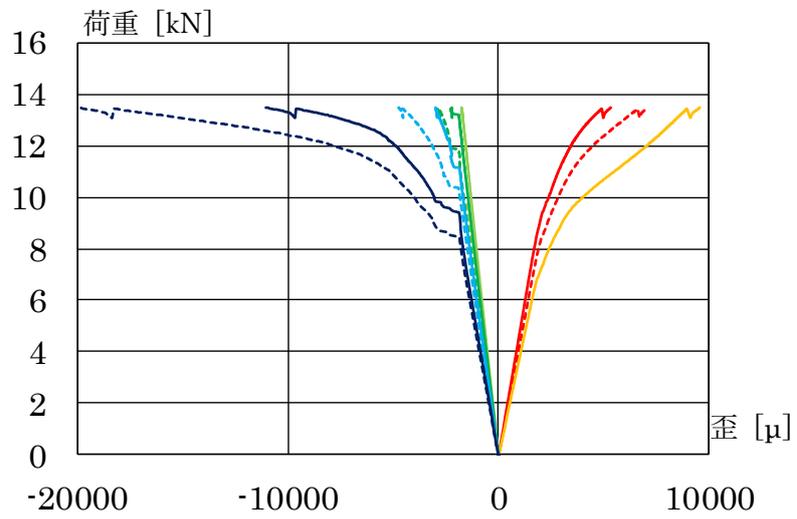


(i) L400-7-1

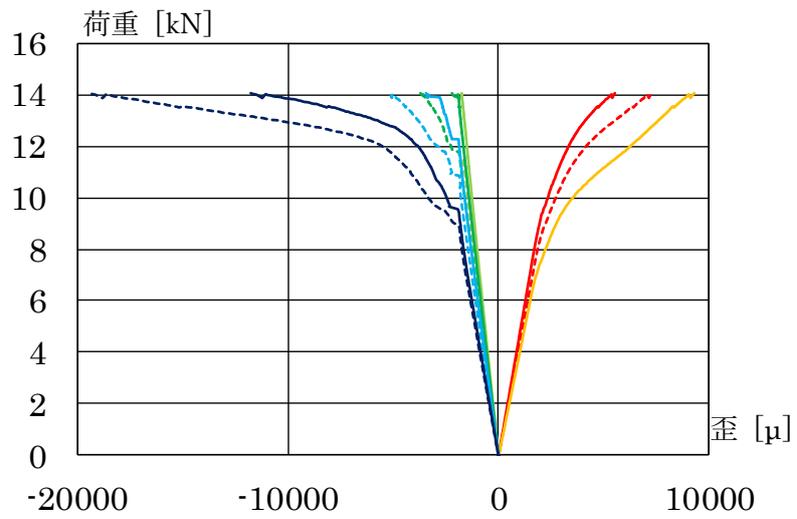




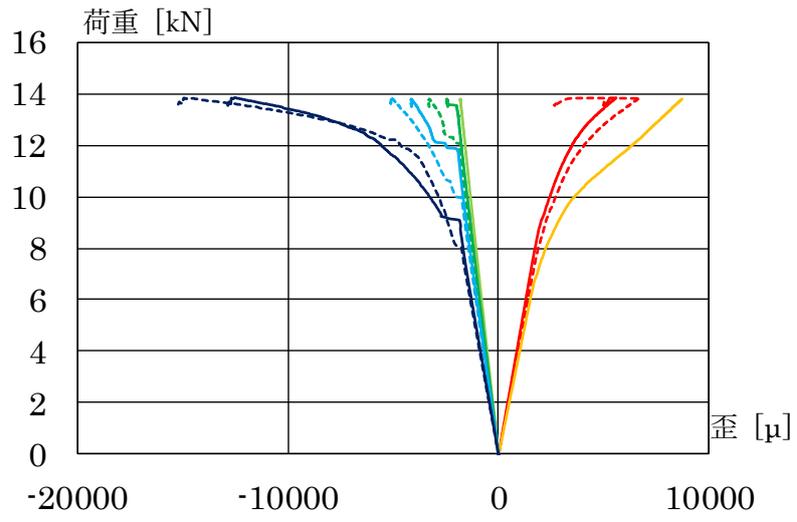
(m) L400-11-1



(n) L400-11-2



(o) L400-11-3



(p) L400-11-4

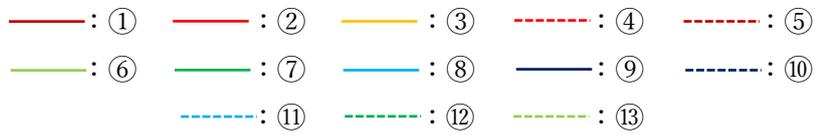


图 2 荷重-歪關係