

## 地震応答解析のための土の動的性質

### 1. 地震応答解析法

くり ぼやし えい いら  
栗 林 栄 一\*

#### 1.1 まえがき

1世紀のはじめのころ、ローマの詩人であり哲学者であった Lucretius (ルクレチウス, BC 95~AD 54) が説いた自然科学の中で、地震は地下にある空洞の壁の墜落に起因しているとしている。今日、この説を信ずるものはまれであろう。しかし、2千年前にはこの説が学説として受け入れられ、地震に自然現象としての地位を与え、不可思議な神の支配する恐怖の呪詛<sup>じゆそ</sup>から民衆を解き放した。

地震の原因はさておくとして、地震現象については波動としての理論の体系が前世紀の初めころから形成されてきた。1829年ころ S.D. Poisson (ポアソン) が実体波として伝ば速度の異なる2種の弾性波動、つまりP波(縦波)とS波(横波)が存在することを示した。今日では誰もが承知しているように縦波は疎密波として弾性固体、液体、気体中を伝わり、横波はせん断波として弾性固体中のみを伝わる。

当時を振り返ってみると、物理学の分野では弾性学の基礎方程式(1821年, Navier), カルノーの原理(1824年, Carnot), オームの法則(1826年, Ohm), ブラウン運動(1827年, Brown), 電磁誘導(1831年, Faraday), ハミルトンの原理(1834年, Hamilton)など現代の科学の基礎となる重要な発見が、目白押しに続いていた<sup>1)</sup>。

1885年には Lord Rayleigh(レイリー)により地表面に沿って伝わるレイリー波の存在が示され、今世紀に入り1911年には A.E.H. Love(ラブ)により地表部に内部と密度の異なる表層がある場合に波動の進行方向と直交して誘起されるラブ波の存在が示された<sup>1)</sup>。これら4種の波動によって波動の基礎理論が確定されたと思われるが、第5、第6の波動の存在が否定されているわけではない。弾塑性体などにおける波動をさばく、切れ味のよいメスを人類は手中にできるのであろうか。

地盤ならびに構造物の地震応答を予測したり、検証したりするための解析法については、人類がまだ多くの未解決な課題を抱えているとはいえ、その時代の知識と技術に合った妥当性のある解答が示されてきた。

まず、震度法は1915年、佐野利器によって提案された<sup>2)</sup>。この方法では構造物の地震応答を静的に作用する水平力に

置換した。単純明解な手法である故に今や全世界でこの方法が耐震設計法の主流となっている。

1924年には震度法に相当する一手段として岡部三郎により地震の影響を考慮した土圧の評価法が提案された<sup>3)</sup>。この方法では地震の影響を代表する水平力と重力の合力の作用線に直交する仮想の水平面を想定して地震時土圧を静的に得ようとする。これもまた、今や全世界に普及している。

上記の二つの方法では土の動的な諸定数を必要としないが、地震時においても初期の形状や性質が変化しないという前提を採っている。この点で土の動的性質と消極的ではあるがかわってくる。

さて、初めての地震応答解析は1940年にカリフォルニア州土木局の N.C. Raab(ラーブ)と H.C. Wood(ウッド)によって示された<sup>4)</sup>。解析の対象は吊橋であった。ここでは、地震動の入力は1.5秒以下の周期をもち無限に継続する片振幅0.1g(gは重力の加速度)以下の正弦波であると仮定していた。

この論文に対して、当時、コロンビア大学の助教授であり、カリフォルニア工科大学の客員研究員でもあった M.A. Biot(ビオー)が記録された二つの地震動加速度の応答加速度を用いた地震応答解析法を提示した<sup>5)</sup>。この論文こそが今日の地震応答解析法の、実用問題への応用のはしりであったといえよう。

地震応答解析法に飛躍的發展を促した背景には、1932年に始まった米国西部における強震観測による強震記録の採取ならびに機械式積分器の実用化などの技術革新が伴っていた。

上述のように、方法論については既に1930年代に一応の成果を得ていたのであるが、入力すべき物理量についてはまだ研究の途上であった。また、計算の技術も電子計算機の出現を待つほかはなかった。

地震動の入力については1930年代になって妹沢克惟と金井清により、地盤の固有振動の存在の可能性が提起された<sup>6)</sup>。1956年には金井清・吉沢静代により表層地盤の地震動振幅が示された<sup>7)</sup>。一方、1953年には工学的強震計による加速度の記録から得た地震応答スペクトル曲線が G.W. Housner(ハウスナー), R.R. Martel(マーテル), J.L. Alford(アルフォード)によって示された<sup>8)</sup>。我が国では、翌1954年高橋忠がダム地点での加速度記録から地震応答ス

\*豊橋技術科学大学教授 工学部



講座

この系の出力つまり地震応答は線型な系の場合には式(1.3)で与えられる。

$$y(t) = \frac{1}{p_a} \int_0^t \ddot{z}(\tau) e^{-n(t-\tau)} \sin p_a(t-\tau) d\tau \dots\dots(1.3)$$

ここで

$y(t)$  : 時刻  $t$  における系の振動振幅, cm

$p_a$  : 減衰を伴う固有円振動数, rad/s

$\ddot{z}(\tau) = \frac{d^2 z(\tau)}{d\tau^2}$  : 地震動の加速度, cm/s<sup>2</sup>

$n = \frac{c}{2m}$  : 減衰指数, rad/s

$c$  : 減数係数, KNs/cm

$m$  : 質量, kg

もし、質点が多数あれば、そのことを加味しなければならない。また非線型な系であればそのことを加味しなければならない。このような面倒な手続きは専門家に委ねればよいのであり、式(1.3)は基本的には式(1.2)と同等であると理解しておけばよいと思われる。

第2例として、均質で一層の地盤の場合の地震応答は図-1.3に示すように考えることができる。図中の(a)の場合には地盤のあらゆる点で一様なせん断ひずみが生じたとしている。第一近似解としてはそれほど不当な仮定ではない。(b)では深さの方向にせん断ひずみが増加して変化するとしている。第二近似解として実用上必要とする確かさをもっている。

(a), (b)のいずれもが、表層地盤の一次の振動モードに対応する応答である。これに加えて二次以上の高次の振動モードに対応する応答を加算すれば、確かさはより向上する。

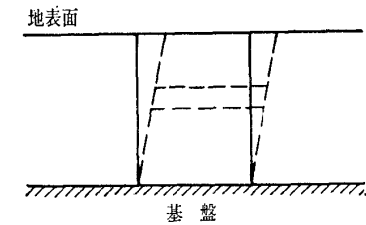
第3例として、地盤中に構造物が共存している図-1.4に示すような場合について考えてみよう。基盤に生じた地震動により表層の地盤が励起され、やがて構造物が振動し始める。構造物が振動し始めると同時に構造物は周囲の地盤を励起させ、それは波動として地盤中を伝播する。

この現象を波動の逸散といっている。つまりエネルギーが放射されて永久に戻ってこない。そのエネルギーに相当する分だけ構造物の振動振幅は減少する。構造物の方からみると丁度、減衰の作用に似ているのでこれを逸散減衰とよんでいる。

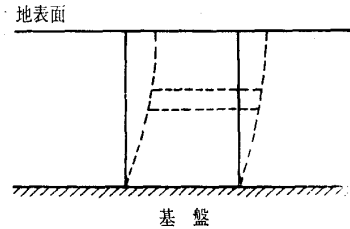
さて、実際の地盤はここにひいた例のように、単純に仮定してもよい場合はむしろまれである。豪雨や地震などによって崖崩れや山腹崩壊や地盤の液状化などが起こり世間の耳目を引くが、その度に人知の至らざることを思い知らされ、大自然の神秘におそれを抱かざるを得なくなる。

精緻な理論解析には必ず前提条件がある。その条件が正しくとも真実のすべてを覆っているものでなければ、いずれ自然現象と背馳する日を迎えることになる。しかし、立ち向かって謎を解き明すことは何ら自然を冒瀆することにはならないと思われる<sup>14)</sup>。

また観点を変えると、土という材料は一般には自然物で



(a) 表層が一様にせん断変形するとした場合



(b) 表層のせん断ひずみが深さごとに増加する場合

図-1.3 均質で一層の地盤の地震応答

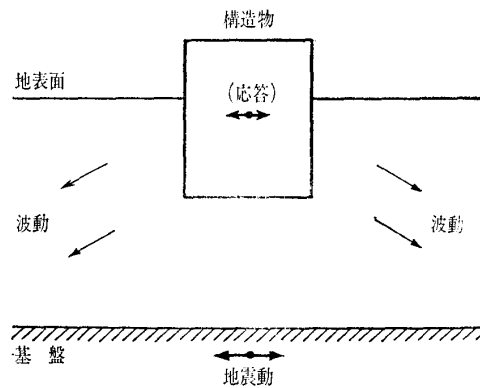


図-1.4 構造物の振動に伴う地中へのエネルギーの逸散

ある。その性質にある一定の規則性があるとしても金属などのような人工物とは異なり多様性が卓越しているといわざるを得ない。つまり、土に関して解き明された謎の多くは個別的な事実過ぎない場合が多い。

三相混在する土や地盤を主とした対象物の地震応答解析は原理的には可能性がおおいにあるが、実地に応用することはそれほど容易ではないことにお気づきであろう。

### 1.4 解析結果の評価

地震応答解析の結果を評価するには安全性もしくは信頼性の尺度を当てるのが妥当であろうと思われる。そこで要求されている性能に対して保証しうる性能を比較して検討すべき工学上の安全性もしくは信頼性である<sup>15)</sup>。

工学上の安全性については次のような比較の方法がある。

i 中央安全率

保証性能と要求性能の平均値の比をもって表す。

ii 公称安全率

上記の平均値のほか統計的なばらつきをも考慮した比をもって表す。

## iii 安全指数

上記の平均値の差に比例し、ばらつきの和に逆比例する値をもって表す。

次に、工学上の信頼性については次のように比較する。

要求性能が保証性能を満足しない確率すなわち破滅（または破壊）の確率を求める。確率 1.0 から破滅の確率を差し引くと生存の確率となる。生存の確率が信頼性である。ただし破滅の確率を求める際に破滅の限界または生存の限界を指定することが必要となる。

さて、土構造物や地盤に限らず一般の構造物の地震応答解析の結果の評価法について定説があるわけではない。しかし多くの場合、上述の工学上の安全性で比較吟味している。

しかし、この考え方には大きな齟齬がある。地震応答解析の結果は完全な物理現象としての事柄である。しかし工学上の安全性は、社会的に認知された荷重体系に対する事柄であり、いわば一種の経済現象としての事柄である。

つまり、理科の教科における物理実験の結果を社会の教科において評価する風な印象をぬぐい得ない。この齟齬を克服していくことが求められよう。

地震動の入力をはじめとする地震応答解析ならびに安全性の評価に関する諸数値の統計的性質を吟味検討して信頼性の手法を用いた安全性評価の一貫した手続きを確立することが望まれるのではないか。

## 1.5 あとがき

地震応答解析法を中心に周辺の領域についても触れてきたが、不十分のそしりを免かれたいであろうと思う。満た

ぬところは第 2 章以降の著者らによって埋め尽くされることを期待している。

最後に、ここに掲示した文献にとどまらず多くの文献を参照させていただいた。ここに記して厚く御礼を申し上げる。

## 参 考 文 献

- 1) 理科年表, 第58冊, 東京天文台編纂, 丸善, 1985.
- 2) 佐野利器: 家屋耐震構造要梗, 建築雑誌 341 号, 1915.
- 3) S. Okabe: General Theory on Earth Pressures and Seismic Stability of Retaining Walls and Dams. 土木学会誌10巻6号, 1924, 1277/1323.
- 4) N.C. Raab and H.C. Wood: Earthquake Stresses in the San Francisco-Oakland Bay Bridge, Trans., ASCE, Paper No. 2123, 1941.
- 5) M.A. Biot: Analytical and Experimental Methods in Engineering Seismology, Trans., ASCE, Paper No. 2183, 1943.
- 6) 妹沢克惟・金井 清: 地震波によって土地の固有振動が誘起される可能性(第4報), 震研彙報, 第10巻, 1932.
- 7) 金井 清・吉沢静代: 地震動振幅と地表層の性質との関係(第4報), 震研彙報, 第34巻, 1956.
- 8) G.W. Housner, R.R. Martel, J.L. Alford: Spectrum Analysis Strong-Motion Earthquakes, Bull., Seismological Society of America, Vol. 43, No. 2, April, 1953.
- 9) 高橋 忠: ダム地点の地震動と構造物の Response について, 電研月報, Vol. 4, No. 5 と 6 (合併号), 1954.
- 10) 妹沢克惟・金井 清: 勢力の地下逸散の為に生ずる高層構造物の震動減衰, 震研彙報, 第13巻, 1935.
- 11) 大森房吉: 鉄道橋梁の「曲り」および振動の験測, 震災予防調査会報告, 第37巻, 1901.
- 12) 末広恭二論文集 (Scientific and Technical Paper by Kyoji Suyehiro), Compiled and Published by the Suyehiro Memorial Committee, Tokyo, 1933.
- 13) 地震応答解析と実例, 土木学会編, 1973.
- 14) 地盤の液化化, 土質工学会講習会資料, 1984.
- 15) 新耐震設計法(案), 建設省土木研究所, 1977.

(原稿受理 1685.3.22)

ニユーズ

## 熱帯地域のラテライト性およびサプロライト性土質に関する

## 第 1 回国際会議に参加して

熱帯地域における Lateritic(ラテライト) および Saprolitic (サプロライト) 土質の地盤力学に関する第 1 回国際会議 (略称 Tropica LS' 85) が, 1985 年 2 月 11 日~14 日の間, ブラジルの首都ブラジリアで開催された。この会議は, 国際土質基礎工学会のもとに置かれている Committee on Tropical Soils of ISSMFE およびブラジル土質工学会が開催したもので, 熱帯地方 (亜熱帯地方も含めて) のラテライト性および風化残積性土質と限定した地盤力学国際会議というわけである。この 4 日間の会議のあと, 現地視察小旅行 (3 コース) が企画され, 筆者らは, リオの野外巡検 (斜面災害現場) や都市施設観光に参加した (口絵写真参照)。

熱帯性ラテライトおよびサプロライト土質は, 地球のかなりの部分を占めており, 開発途上国または熱帯亜熱帯地域の開発の進展に伴い, その工学的性状について, 世界の研究者, 技術者が共通のテーマとして取り上げるようになっていく。国際土質基礎工学会でも, 熱帯性土質の前記委員会を 1981 年に発足させ, 現在までのこの分野の各国研究成果を踏まえたリポートを提示することの目的もあって, 初の国際会議を開いたものである。会議は, 以下に示す 6 セッション (Themes and Topics) から成っており, 特別講演として, E.W. Brand (ブランド) 教授, M. Vargas (バルガス) 教授が初日と終日に, それぞれ Geotechnical Engineering in Tropical Residual Soils, The Concept of