

## ◆ 耐震・危機管理技術特集 ◆

## 不整形地盤における地震動の増幅特性

千葉 光\* 本田利器\*\* 田村敬一\*\*\* 中尾吉宏\*\*\*\*

## 1. はじめに

地形や基盤の深さ、地盤の硬さなどが急激に変化する地盤は不整形地盤といわれている。過去の地震の被害調査や強震観測記録等の検討から、このような不整形地盤では地震動が局所的に増幅することが指摘されている。しかし、不整形地盤における地震動増幅のメカニズムは、多くの要因が影響する複雑なものであるため、その増幅特性を簡便かつ正確に評価することは困難である。

本研究では、不整形地盤として、軟質層と硬質層からなる2層系の地盤で両者の境界が傾斜しているという比較的単純化された地盤モデルを想定し、これらを対象として地震応答解析を行った。その結果に基づき、道路橋等の一般的な土木構造物の規模を考慮して、数10~数100m程度の規模の不整形地盤における地震動増幅特性の評価手法について取りまとめた。

## 2. 地盤モデル及び解析条件

## 2.1 地盤モデル

解析に用いた地盤モデルは、軟質層と硬質層からなる2層系の地盤とし、2層の境界の形状を変化させ、次のとおり設定した。

- (a) 片側傾斜基盤：2層の境界の片側だけが傾斜しているモデル。
- (b) 両側傾斜基盤：2層の境界の両側が傾斜しているモデル。
- (c) 埋没片側傾斜基盤：2層の境界の片側だけが傾斜し、硬質層が軟質層下に埋没しているモデル。
- (d) 埋没両側傾斜基盤：2層の境界の両側が傾斜し、硬質層が軟質層下に埋没しているモデル。
- (e) 半埋没両側傾斜基盤：両側傾斜基盤の片側だけが埋没しているモデル。

これらの5つの地盤モデルを図-1(a)~(e)に示す。片側傾斜基盤及び両側傾斜基盤については、軟質層の厚さ  $H_1$ (10~40m)、傾斜区間の長さ  $L_s$ (20~

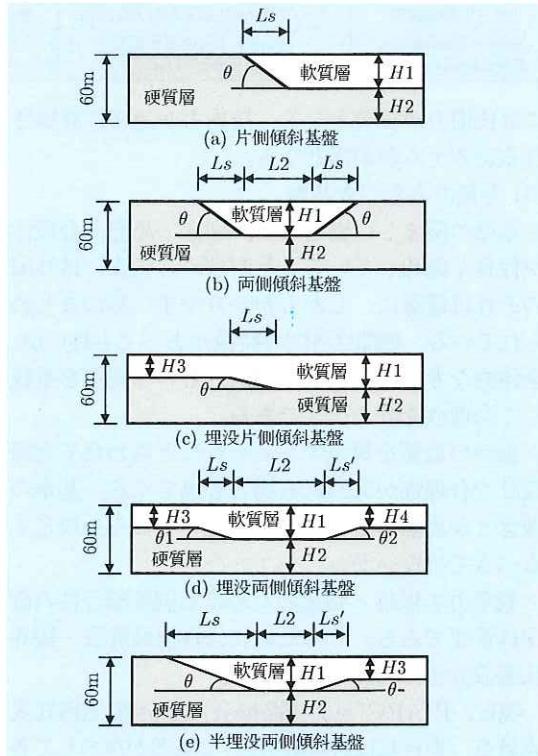


図-1 地盤モデル

1,440m)、軟質層底辺の長さ  $L_2$ (50~600m)、軟質層のせん断弾性波速度(100~200m/s)及び硬質層のせん断弾性波速度(180~405m/s)等のパラメータを変えて、それぞれ40ケース及び30ケースを設定した。その他のモデルについては、前述のパラメータの他に埋没深さ  $H_3$  及び  $H_4$ (10~35m)等を変化させて、埋没片側傾斜基盤は15ケース、埋没両側傾斜基盤は13ケース、半埋没両側傾斜基盤は8ケースを設定した。

## 2.2 解析条件

地震応答解析は二次元の有限要素法プログラム FLUSH<sup>1)</sup>を用いて行った。また、二次元地震応答解析結果の比較のために、水平成層地盤を想定した重複反射理論による一次元地震応答解析をSHAKE<sup>2)</sup>を用いて行った。

両プログラムとも、土の非線形性を等価線形化法により考慮している。等価線形化法とは、発生

するひずみの大きさに応じて変化させたせん断剛性あるいは減衰定数を、非線形性を踏まえた等価な変形特性とみなして線形解析を行う手法である。また、本解析では、軟質層と硬質層の土質定数(せん断弾性係数及び減衰定数)のひずみ依存特性としては、岩崎ら<sup>3),4)</sup>の値を用いた。

境界条件は、地盤モデルの左右側方を水平ローラ(上下動は拘束し、水平動のみを許容する)とし、モデル底面には厚さ10mの基盤層(せん断弾性波速度500m/s)を設け、基盤層の下面は固定境界とした。

入力地震動としては、1978年宮城県沖地震の際に開北橋近傍(I種地盤)で観測された記録及び1983年茨城県南部の地震の際に土木研究所構内(II種地盤)で観測された記録を、最大加速度が100galになるように調整したものを用い、これらを基盤層の下面から入射した。前者は短周期卓越型であるのに対して、後者は若干長い周期領域まで振幅特性が比較的フラットであるという特徴を有している。また、本研究の検討当初は、入力地震動として4波形を用いて解析を行ったが、解析結果に大きな差は無かったため、4波形のうち異なる周期特性を持つ2波形を選定し、解析を行っている。

### 3. 地震動増幅特性の評価方法

#### 3.1 増幅特性の評価指標

地盤の不整形性に起因する地震動の増幅特性を評価するため、地震動の増幅程度を示す指標を加速度応答スペクトルを用いて、次のとおり定義した。ここで、加速度応答スペクトルとは、特定の地震動に対して任意の固有周期及び減衰定数を持つ1自由度振動系の加速度応答の最大値のことであり、フリエスペクトルのように、ある周期の振動成分がどの程度含まれているかを示す指標として活用できる。

まず、地盤モデル地表上の任意の地点における二次元地震応答解析により得られた地震動の加速度応答スペクトル値を  $Sa(T)_{2D}$ 、二次元地盤モデルの各鉛直断面について水平成層地盤を想定し、一次元地震応答解析により得られた地震動の加速度応答スペクトル値を  $Sa(T)_{1D}$  とし、両者の比を  $r(Sa(T))$  とする。

$$r(Sa(T)) = \frac{Sa(T)_{2D}}{Sa(T)_{1D}} \quad (1)$$

ここで、 $T$ は固有周期である。また、減衰定数

は一般的な土木構造物の減衰特性を考慮して0.05とした。 $r(Sa(T))$  は、地表上の各地点において固有周期の数だけ算出されるが、地盤の不整形性により生じる地震動増幅を把握するという耐震設計上への応用を考えると  $r(Sa(T))$  の最大値の評価が重要となる。そこで、地震動の増幅程度を簡便に表す指標として、耐震設計上重要とされる固有周期  $T = \{0.1 \sim 5\text{秒}\}$  における  $r(Sa(T))$  の最大値を、 $R(Sa)$  として用いた。 $R(Sa)$  は地表上の各地点において次式で定義される。

$$R(Sa) = \max_{\{T=0.1 \sim 5.0\}} \{r(Sa(T))\} \quad (2)$$

ここで、 $R(Sa)$  としては、2.2で示した2種類の入力地震動により算出される値の平均値を用いた。

$R(Sa)$  は、図-2に示すように地盤モデル地表上の全ての地点で算出されるため、地盤モデルどうしの比較には適さない。そこで、地盤モデル地表上の全ての地点における  $R(Sa)$  のうち、地震動の増幅程度を代表させる指標として、 $R(Sa)$  の最大値を  $R_{\max}(Sa)$  とした。 $R_{\max}(Sa)$  は、各地盤モデルに対して1つの値として、次のように定義される。

$$R_{\max}(Sa) = \max_{\{\text{地盤上の全ての点}\}} \{R(Sa)\} \quad (3)$$

また、地盤モデルの形状によっては、図-2に示すように、地盤条件の変化部において  $R(Sa)$  が急激に変化し  $R_{\max}(Sa)$  が著しく大きくなる場合がある。そのため、上記の  $R_{\max}(Sa)$  は、耐震設計で考慮すべき地震動の増幅程度を評価する指標として、必ずしも適切ではない可能性が考えられる。そこで、増幅が大きくなる区間での  $R(Sa)$  の平均値を取り、 $R_{ave}(Sa)$  と定義した。平均を取る区間は、片側傾斜モデルについては基盤が傾斜している区間を右側に  $L_s$  だけ延長した区間(図-1(a)及び(c)の  $L_s + L_s$  の区間)とし、両側傾斜モデルにつ

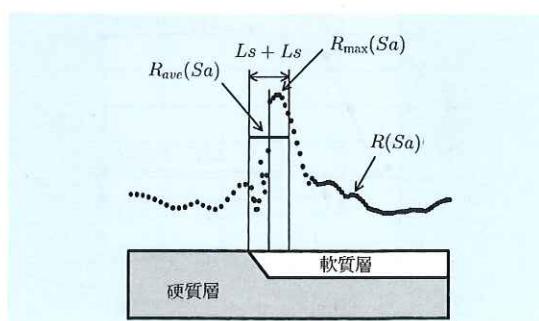


図-2 増幅特性の評価指標の概念

いては地盤モデル地表上の軟質層の区間(図-1(b)、(d)及び(e)の  $L_s + L_2 + L_s$ (または  $L_s'$ )の区間)とした。図-2に地盤の不整形性に起因する増幅特性の評価指標の概念を示す。

### 3.2 地盤の不整形性の評価指標

地盤の不整形性の程度を示す指標としては、道路橋示方書<sup>5)</sup>に示される地盤の特性値(地盤の基本固有周期に相当)  $T_G$ を用い、地盤条件が異なる地点間の  $T_G$ の差により  $\Delta T_G$ を次のとおり定義した。

$$\Delta T_G = T_G^{\max} - T_G^{\min} \quad (4)$$

ここで、 $\Delta T_G$ は地盤の特性値の差[秒]、 $T_G^{\max}$ は軟質層が最も厚い部分の地盤の特性値  $T_G$ [秒]、 $T_G^{\min}$ は軟質層が最も薄い部分の地盤の特性値  $T_G$ [秒]である。

## 4. 解析結果

### 4.1 増幅特性に影響を与えるパラメータ

片側傾斜基盤を対象として、軟質層と硬質層の境界の傾斜角度  $\tan \theta$ 及び地盤の特性値の差  $\Delta T_G$ 等のパラメータが地震動の増幅特性に与える影響について検討した。

傾斜角度  $\tan \theta$ と増幅率  $R_{\max}(Sa)$ 及び  $R_{ave}(Sa)$ との関係を図-3(a)及び(b)に示す。これより、 $R_{\max}(Sa)$ 及び  $R_{ave}(Sa)$ は、傾斜角度が  $\tan \theta \geq 1/8$ では、傾斜角度によりほとんど変化しないが、 $\tan \theta < 1/8$ では、 $\tan \theta$ が小さくなるほど著しく低下することがわかる。なお、他の地盤モデルについても同様の傾向が確認されている。また、 $\Delta T_G$ について増幅率を比較すると、 $\Delta T_G$ が大きいほど増幅率が大きいことがわかる。

### 4.2 不整形地盤における増幅特性の定式化

4.1の検討結果を踏まえ、傾斜角度がある程度大

きな場合には増幅率に及ぼす傾斜角度の影響が小さいことから、 $R_{\max}(Sa)$ 及び  $R_{ave}(Sa)$ を  $\Delta T_G$ から簡便に推定する評価式として、次式を仮定した。

$$R_{\max}(Sa) = \alpha \cdot \Delta T_G + 1.0 \quad (5)$$

ここで、 $\alpha$ は係数であり、回帰分析により地盤モデルごとに算出した。以下に各地盤モデルの増幅特性の評価式を示す。

#### (1) 片側傾斜基盤

片側傾斜基盤については、傾斜区間の長さ  $L_s$ 及び軟質層の厚さ  $H_1$ を変化させ、傾斜角度が  $1/48 \leq \tan \theta \leq 1/2$ の範囲となるケースを設定した。 $R_{\max}(Sa)$ 及び  $R_{ave}(Sa)$ と  $\Delta T_G$ の関係を示すと図-4(a)及び(b)のようになる。傾斜角度が小さい場合( $\tan \theta < 1/8$ )を除けば、それぞれの評価式は次のように表される<sup>6)</sup>。

$$R_{\max}(Sa) = 1.29 \Delta T_G + 1.0 \quad (6)$$

$$R_{ave}(Sa) = 0.69 \Delta T_G + 1.0 \quad (7)$$

(適用範囲は  $\tan \theta \geq 1/8$ )

#### (2) 両側傾斜基盤

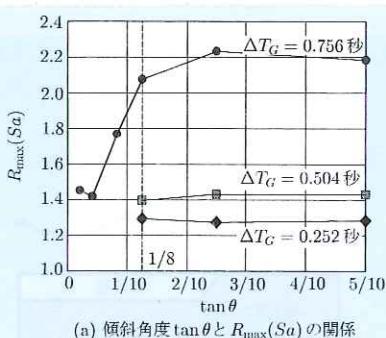
両側傾斜基盤については、傾斜角度を  $\tan \theta = 1/4$ 及び  $1/2$ とし、軟質層底辺の長さが  $50m \leq L_2 \leq 600m$ の範囲となるケースを設定した。片側傾斜基盤の場合と同様に、 $R_{\max}(Sa)$ 及び  $R_{ave}(Sa)$ と  $\Delta T_G$ の関係を図-5(a)及び(b)に示す。評価式は次のように表される<sup>6)</sup>。

$$R_{\max}(Sa) = 2.31 \Delta T_G + 1.0 \quad (8)$$

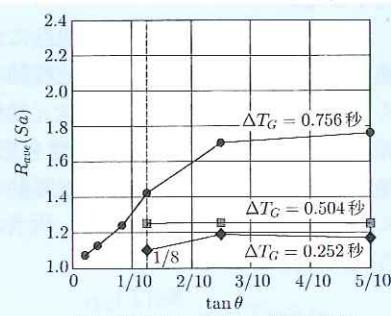
$$R_{ave}(Sa) = 0.99 \Delta T_G + 1.0 \quad (9)$$

#### (3) 埋没片側傾斜基盤

埋没片側傾斜基盤については、傾斜角度を  $\tan \theta = 1/8$ 、 $1/4$ 及び  $1/2$ とし、埋没深さが  $10m \leq H_3 \leq$

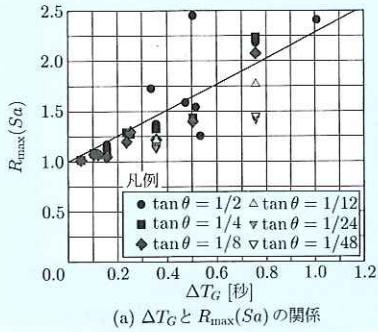
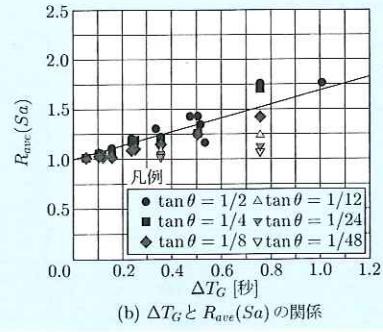
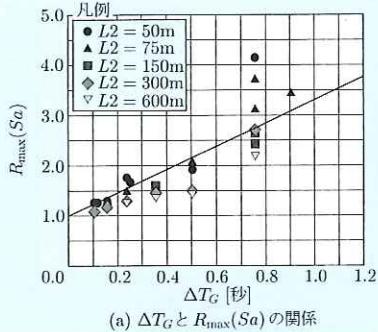
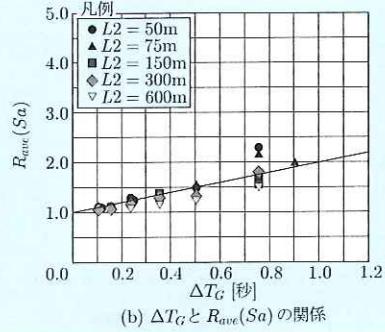
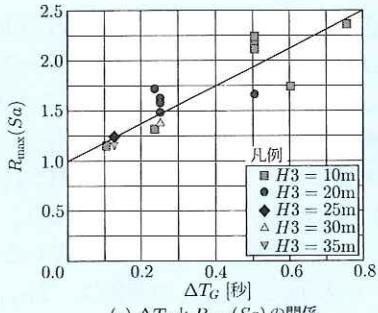
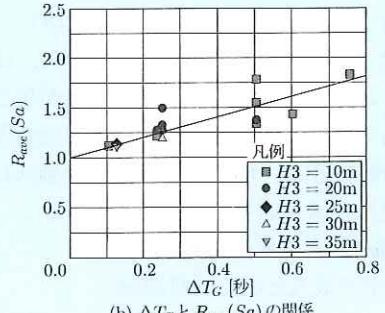


(a) 傾斜角度  $\tan \theta$ と  $R_{\max}(Sa)$ の関係



(b) 傾斜角度  $\tan \theta$ と  $R_{ave}(Sa)$ の関係

図-3 増幅率とパラメータの関係

(a)  $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  の関係(b)  $\Delta T_G$  と  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係図-4 片側傾斜基盤における  $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係(a)  $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  の関係(b)  $\Delta T_G$  と  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係図-5 兩側傾斜基盤における  $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係(a)  $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  の関係(b)  $\Delta T_G$  と  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係図-6 埋没片側傾斜基盤における  $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係

35mの範囲となるケースを設定した。 $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  と  $\Delta T_G$  の関係を図-6(a) 及び (b) に示す。評価式は次のように表される<sup>6)</sup>。

$$R_{\max}(Sa) = 1.88\Delta T_G + 1.0 \quad (10)$$

$$R_{\text{ave}}(Sa) = 1.02\Delta T_G + 1.0 \quad (11)$$

#### (4) 埋没両側傾斜基盤

埋没両側傾斜基盤については、傾斜角度を  $\tan \theta = 1/4$  及び  $1/2$ 、軟質層底辺の長さを  $L2 = 75$  及び  $150m$  とし、埋没深さが  $H3 = 10m \leq H4 \leq 25m$  の範囲となるケースを設定した。 $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  と  $\Delta T_G$  の関係を図-7(a) 及び (b) に示す。評価式は次のように表される<sup>6)</sup>。

$$R_{\max}(Sa) = 4.21\Delta T_G + 1.0 \quad (12)$$

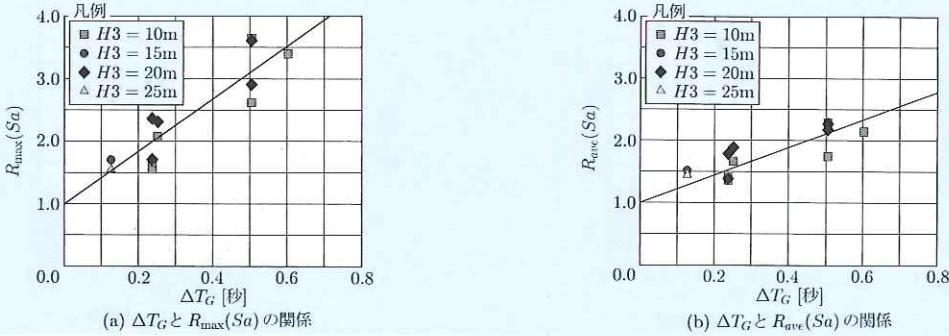
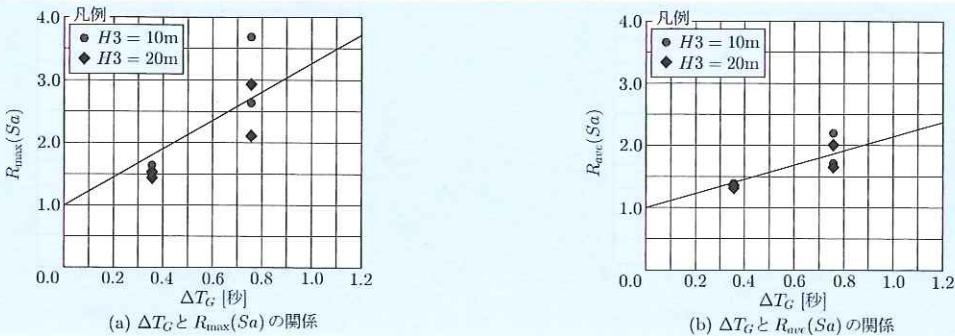
$$R_{\text{ave}}(Sa) = 2.22\Delta T_G + 1.0 \quad (13)$$

#### (5) 半埋没両側傾斜基盤

半埋没両側傾斜基盤については、傾斜角度を  $\tan \theta = 1/2$ 、軟質層底辺の長さを  $L2 = 75$  及び  $150m$  とし、埋没深さが  $H3 = 10$  及び  $20m$  となるケースを設定した。 $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  と  $\Delta T_G$  の関係を図-8(a) 及び (b) に示す。評価式は次のように表される。

$$R_{\max}(Sa) = 2.26\Delta T_G + 1.0 \quad (14)$$

$$R_{\text{ave}}(Sa) = 1.15\Delta T_G + 1.0 \quad (15)$$

図-7 埋没両側傾斜基盤における $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係図-8 半埋没両側傾斜基盤における $\Delta T_G$  と  $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{\text{ave}}(Sa)$  の関係

式(14)と両側傾斜基盤の場合の式(8)、また、式(15)と式(9)を比較すると、それぞれ、ほぼ等しい値をとっている。このような現象が生じる理由は現状でははっきりしないが、半埋没両側傾斜基盤の増幅特性は、両側傾斜基盤の評価式によつても、概ね評価可能であることがわかる。

#### 4.3 増幅が大きくなる周期帯の評価

##### (1) 増幅率が最大となる固有周期

次に、不整形地盤における地震動増幅が大きくなる周期帯について検討を行った。なお、いずれの地盤モデルにおいても増幅が大きくなる周期帯は地点に依らずほぼ一定であったので、 $R_{\max}(Sa)$  が出現する地点を検討の対象とした。評価指標としては、次の2つを用いた。

- ① 軟質層のみから計算した地盤の特性値  $T_{G^{AC}}$
- ② 水平成層地盤におけるレーリー波の群速度が最小となる周期  $T_S$

ここで、 $T_{G^{AC}}$  を用いたのは、地震動の増幅特性には軟質層の物性の影響が大きいことを想定したものであり、また、 $T_S$  を検討対象としたのは、地震動の増幅に表面波が影響を及ぼす可能性を考慮するためである。

上記①及び②の評価指標の妥当性を確認するた

めに、地震動の増幅特性を工学的に評価する上で有意と考えられる  $R_{\max}(Sa) \geq 1.2$  となるケースについて、 $R_{\max}(Sa)$  が出現する地点における  $r(Sa(T))$  が最大値を示す固有周期  $T_{R\max}$  と  $T_{G^{AC}}$  または  $T_S$  との関係について検討した。図-9に  $T_{R\max}$  と  $T_{G^{AC}}$  または  $T_S$  との関係を示す。図より、 $T_{G^{AC}}$  と  $T_{R\max}$  は広い周期帯で概ね整合していることがわかる。一方  $T_S$  と  $T_{R\max}$  の関係は、 $T_{R\max}$  が小さい範囲では両者は比較的よく一致しているが、 $T_{R\max}$  が大きくなると両者は乖離している。以上より、 $T_{R\max}$  を評価する指標として、 $T_{G^{AC}}$  が有効であることがわかる。

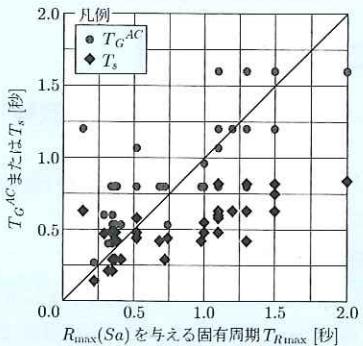
##### (2) 増幅が大きくなる周期帯の定式化

前述の結果を踏まえて、全ての地盤モデルを対象として増幅が大きくなる周期帯を、 $T_{G^{AC}}$  を用いて定式化した。まず、 $R_{\max}(Sa)$  が出現する地点において  $r(Sa(T)) \geq 1.2$  を示す最小及び最大の固有周期を  $T_{\min}$  及び  $T_{\max}$  とした。次に次式を仮定し、回帰分析により係数  $\alpha$ 、 $\beta$  を算定した。

$$T_{\min} = \alpha \cdot T_{G^{AC}} \quad (16)$$

$$T_{\max} = \beta \cdot T_{G^{AC}} \quad (17)$$

両者の関係は次のように表される<sup>7)</sup>。

図-9  $T_{R\max}$  と  $T_G^{AC}$  及び  $T_S$  の関係

$$T_{\min} = 0.546 T_G^{AC} \quad (18)$$

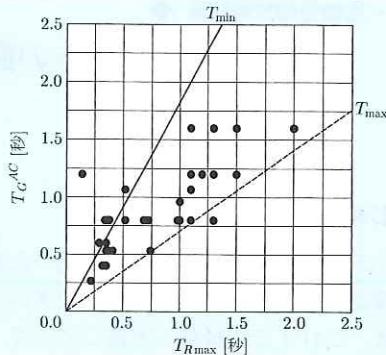
$$T_{\max} = 1.416 T_G^{AC} \quad (19)$$

図-10 に  $T_G^{AC}$  と  $T_{\min}$  及び  $T_{\max}$  の関係を示す。図中の●は  $T_G^{AC}$  と  $T_{R\max}$  の関係を示している。図より増幅が大きくなる周期帯は、概ね式(18)及び(19)により評価可能であることがわかる。

## 5. まとめ

本研究では、不整形地盤を軟質層と硬質層からなる2層系の地盤にモデル化し、2層の境界の形状を変化させ種々の不整形地盤モデルを設定した。そして、二次元地震応答解析及び一次元地震応答解析を行い、両者の結果を比較することにより、地盤の不整形性に起因する地震動の増幅程度を算出した。

解析結果に基づき、加速度応答スペクトルの増幅率  $R_{\max}(Sa)$  及び  $R_{ave}(Sa)$  が地盤の特性値の差  $\Delta T_G$  でよく評価できることを示し、その評価式を提案した。また、地震動の増幅が大きくなる周期帯を軟質層のみから計算した地盤の特性値  $T_G^{AC}$  より評価する式を提案した。これらの評価式により、数10~数100m程度の規模の不整形地盤における地震動の増幅程度を概ね把握することができ

図-10  $T_G^{AC}$  と  $T_{\min}$  及び  $T_{\max}$  の関係

る。本研究成果は単純化された地盤モデルを対象としたものであるが、不整形地盤に位置する構造物の耐震設計において、地震動の局所的な増幅特性の考慮に資するものであると考えられる。

## 参考文献

- 1) Lysmer, J., Ueda, T., Tsai, C. and Seed, H. B. : FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, Earthquake Engineering Research Center Report No.75-30, University of California, Berkeley, November, 1975.
- 2) Schnabel, P.B., Lysmer, J., Seed, H.B. : SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analyses of Horizontally Layered Sites, Earthquake Engineering Research Center Report No.72-12, University of California, Berkeley, December, 1972.
- 3) 岩崎敏男、常田賢一、吉田精一：沖積粘性土の動的変形・強度特性について、第15回土質工学研究発表会講演集, pp.625-628, 1980.3
- 4) 岩崎敏男、龍岡文夫、高木義和：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(II), 土木研究所報告, 第153号の2, 1980.3
- 5) 道路協会：道路橋示方書V 耐震設計編, pp.43-48, 1996.12
- 6) 千葉光、田村敬一、本田利器：地盤の不整形性に起因する地震動増幅特性的評価手法, 第24回地震工学研究発表会講演論文集第1分冊, pp.129-132, 1997.7
- 7) 田村敬一、千葉光、本田利器、中尾吉宏：不整形地盤における地震動増幅特性的簡易評価法, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1998.11(投稿中)

千葉 光\*



建設省土木研究所  
耐震技術研究センター  
振動研究室研究員  
Akira CHIBA

本田利器\*\*



京都大学防災研究所  
耐震基礎分野  
(前 振動研究室研究員)  
Riki HONDA

田村敬一\*\*\*



建設省土木研究所  
耐震技術研究センター  
振動研究室長、工博  
Dr. Keiichi TAMURA

中尾吉宏\*\*\*\*



同 振動研究室研究員  
Yoshihiro NAKAO