

盛土や不整形地盤に適用できる 地震動伝達関数の簡易推定法

古本吉倫¹・杉戸 真太²・細木洋輔³

¹ 岐阜大学工学部社会基盤工学科助手 (〒 501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: furumoto@cive.gifu-u.ac.jp

² 岐阜大学流域圏科学研究センター教授 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: sugito@cc.gifu-u.ac.jp

³ 岐阜大学大学院工学研究科学生 (〒 501-1193 岐阜市柳戸 1-1)
E-mail: j3101014@guedu.cc.gifu-u.ac.jp

盛土や工学的基盤が傾斜している不整形地盤では、地震動伝達関数を求める際に2次元、3次元によるモデル化を必要とし、等価線形化法等を用いて解放基盤波形から地表波形を解析することが難しい。本研究では、傾斜基盤面上の先端と下端における地盤モデルから1次元的に地震動伝達関数を求め、それらを重ね合わせることで傾斜基盤上の堆積地盤面における伝達関数を推定する手法を提案する。ここに、1次元伝達関数は周波数依存型等価線形化法 FDEL を用いて算出し、傾斜基盤先端からの距離と傾斜基盤の長さをパラメータとして重みをつける。提案法により求めた伝達関数は、有限要素法を用いた解析結果と比べ矛盾のないことを確認した。

Key Words: *Seismic transfer function, Inclined base layer, Frequency-dependent equivalent linearized method*

1. はじめに

地震動の伝達特性は基盤の傾斜により複雑に変化する。盛土や工学的基盤が傾斜している不整形地盤において地盤震動解析を行うためには、十分な広がりをもつ領域にわたって2次元または3次元によるモデル化をすることが必要である。ところが耐震設計の実務では種々の制約から深層基盤構造までを調査対象とすることは稀で、当該地点直下付近の $V_s=400\text{m/sec}$ 以下のごく浅い表層地盤のみを対象とすることが多い。このため室野ら¹⁾は、1次元解析の結果に反射波の影響を重ね合わせて補正することにより不整形性の影響を考慮する方法を提案している。

水平に堆積した成層地盤における1次元地盤震動解析は古くから行われており、これまでに等価線形化法 SHAKE²⁾ やこれを改良した周波数依存型等価線形化法 FDEL³⁾ などが開発されている。これらは高速フーリエ変換を巧みに応用した周波数領域での解法であるため、地盤のひずみ依存性に強い非線形性があるときには適用が難しい。しかし、計算に必要な地盤パラメータが容易に得られることや、地表の観測波から基盤の入射波を逆解析することも可能であることから、多くの地盤パラメータを必要とする時刻歴非線形解析に比べ、実用性が非常に高いといえる。なお、FDEL では、土の剛性と減衰特性のひずみとの非線形関係を等価な線形関係に置き

換える際に、ひずみ波形のスペクトル振幅を考慮するため、SHAKE のように高周波数領域において地震動増幅率を過小評価することが起こりにくい。

著者らは既に、FDEL を2次元 FEM 化した地盤震動解析により、傾斜基盤をもつ仮想地盤モデルを用いて SH 波の伝達関数を計算し、1次元解析との比較を行いながら基盤の傾斜による伝達関数の変化を検討し、その結果、傾斜部分の伝達関数は両側自由地盤の卓越周波数の影響を強く受けることを明らかにしている。⁴⁾ そこで本研究では、傾斜基盤面上の先端と下端における地盤モデルから1次元的に地震動伝達関数を求め、それらを重ね合わせることで傾斜基盤上の堆積地盤面における伝達関数を再現することを試みた。その際に用いる重み係数は、傾斜基盤先端からの距離と傾斜基盤の長さをパラメータとし、2次元 FEM による伝達関数との残差を最小化する重回帰分析により決定した。

2. 不整形地盤の FEM 地盤震動解析⁴⁾

(1) 周波数依存型等価ひずみの導入

Lysmer ら⁵⁾の方法に従い周波数領域で FEM 定式化し、そこに杉戸ら³⁾の周波数依存型等価ひずみを導入する。各周波数毎にそれぞれのひずみ波形に寄与する割合に応じて、適切なせん断剛性と減衰定数を与える周波数依存型の等価ひずみを次式のように定義する。

$$\gamma_f(\omega) = C\gamma_{max} \frac{F_\gamma(\omega)}{F_{\gamma_{max}}} \quad (1)$$

ただし、 γ_{max} : ひずみの時刻歴波形の最大値、 $F_\gamma(\omega)$: ひずみ波形のフーリエスペクトル、 $F_{\gamma_{max}}$: ひずみ波形のフーリエスペクトルの最大値である。係数 C は、周波数軸上で等価ひずみの全体のレベルを調整するものであり、例えば $F_\gamma(\omega)/F_{\gamma_{max}} = 1.0, C = 0.65$ とすると、SHAKE と同等になる。ここでは、土の非線形な応力-ひずみ関係を Hardin-Drnevich⁶⁾ モデルを用いて表現する。式 (1) の周波数依存型等価ひずみを適用すると土のせん断剛性 G 、減衰定数 h は周波数の関数として次式で与えられる。

$$\frac{G(\omega)}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma_f(\omega)/\gamma_\gamma} \quad (2)$$

$$\frac{h(\omega)}{h_{max}} = \frac{\gamma_f(\omega)/\gamma_\gamma}{1 + \gamma_f(\omega)/\gamma_\gamma} \quad (3)$$

ここに G_{max} は初期せん断剛性、 h_{max} は最大減衰定数、 γ_γ は規準化ひずみ ($= \tau_{max}/G_{max}$)、 $\gamma_f(\omega)$ は周波数依存型の等価ひずみをそれぞれ表すものとする。このとき、ひずみに依存せずポアソン比 ν が一定であると仮定すれば、平面ひずみ条件下における応力とひずみ関係式は以下のように書ける。

$$(\sigma_x \quad \sigma_y \quad \tau) = D(\epsilon_x \quad \epsilon_y \quad \gamma)^T \quad (4)$$

$$D = \begin{pmatrix} \frac{2G^*(1-\nu)}{1-2\nu} & \frac{2\nu G^*}{1-2\nu} & 0 \\ \frac{2\nu G^*}{1-2\nu} & \frac{2G^*(1-\nu)}{1-2\nu} & 0 \\ 0 & 0 & G^* \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$G^* = G(\omega) + i2\omega h(\omega) \quad (6)$$

(2) 傾斜基盤を持つ不整形地盤の震動特性

a) 解析に用いた地盤モデル

図-1 に示す傾斜基盤を持つ不整形地盤の震動特性について考察する。長さ 80m、深さ 30m を 500 個の有限要素で分割し、基盤の傾斜角を 1/4 とした。表-1 に示す P 波および S 波の速度構造を与え、減衰 h に下限値を設け 5% とした。左右両側に粘性境界を配置し、領域内における波動の反射を吸収している。なお、底面は固定境界とした。

b) 解析条件

神戸ポートアイランド鉛直アレー観測システムで得られた観測記録 (GL-83m, NS 成分) を最大加速度 600m/sec^2 に振幅調整し、地盤モデル (図-1) の底面に入射した。前節で導入した周波数依存型等価ひずみによる FEM 解析 (FDEL-FEM) に加え、従来の等価ひずみによる解析 (FLUSH 相当) も行った。さらに、比較のため、初期剛性、初期減衰定数 ($=5\%$) のみを用いて繰り返し計算を行わない解析 (以下線形解析と表記する) も

行った。

図-1 に示す地盤モデルの地表面にあたる節点 A,B,C について、A 地点は、地中傾斜基盤面の頂上の直上にあたる点で、B 地点は、地中傾斜基盤面中間地点の直上、C 地点は、地中傾斜基盤面の先端の直上に相当する。

c) 繰り返しを伴わない線形解析

図-2(a),(b),(c) は、線形解析による A,B,C 各地点における基盤から地表への伝達関数である。図中、灰色の太線は左右自由地盤の伝達関数を示し、実線は 2 次元解析による伝達関数を、破線は 2 次元解析と同じ深さの成層地盤を仮定し 1 次元解析を行った場合の伝達関数をそれぞれ示す。A 地点では、左側自由地盤の伝達関数の卓越周波数付近において、2 次元解析の伝達関数は卓越周波数となり、左側自由地盤の伝達関数付近に第 2 次卓越周波数を持つ。逆に、C 地点では、右側自由地盤の伝達関数の卓越周波数付近において、2 次元解析の伝達関数は卓越周波数となり、左側自由地盤の伝達関数付近に第 2 次卓越周波数を持つ。

一方、傾斜の中間地点にあたる B 地点において、2 次元解析の伝達関数では、左右両自由地盤の卓越周波数の影響が同程度発生している。これは、同じ深さの成層地盤を仮定した 1 次元解析による伝達関数は、左右自由地盤の卓越周波数のほぼ中間に卓越周波数を持つのに対し、顕著な相違と言える。このように、2 次元解析による地表面上の A,B,C 各点における伝達関数は、左右自由地盤の 2 つの固有モードの合成となり、左右自由地盤のうち距離の近い方の伝達関数の影響がより大きくなると考えられる。

d) 2 種類の等価線形解析

図-2(d),(e),(f) は、従来の等価線形解析 (FLUSH 相当) による A,B,C 各地点における伝達関数である。卓越周波数が線形解析の場合と比べやや低周波側に移動するが、線形解析による結果と同様である。すなわち、2 次元伝達関数は、左右自由地盤の卓越周波数付近に 2 つの卓越周波数を持つ。

図-2(g),(h),(i) は、周波数依存型等価線形解析 (FDEL-FEM) による A,B,C 各地点における伝達関数である。他の解析と同様、2 次元伝達関数は、1 次元解析に比べて複雑な周波数特性となり、左右自由地盤の卓越周波数付近に 2 つの卓越周波数を持つ。また、従来の等価線形解析と同様、卓越周波数が線形解析の場合と比べやや低周波側に移動するが、高周波数領域において伝達関数の増幅率が従来の等価線形化法に比べ大きな値となり、むしろ、線形解析の値に近い。換言すると、従来の等価線形化法による解析 (FLUSH) では、高周波数領域において増幅率が低下すると言える。この結果は、1 次元 (SHAKE,FDEL) における数値解析で確かめられている知見と整合する。

表-1 解析ケースと各領域の材料特性

| | Region-1 | | Region-2 |
|--------|-----------------------|-------------------------|---|
| CASE-1 | $V_s=300\text{m/sec}$ | $\rho=1.8\text{g/cm}^3$ | $V_s=600\text{m/sec}$ |
| CASE-2 | $V_s=200\text{m/sec}$ | | $V_p=2400\text{m/sec}$ $\rho=1.8\text{g/cm}^3$ |

V_s :velocity of S wave, V_p :velocity of P wave, ρ :density

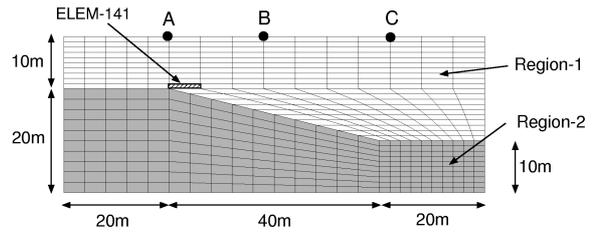


図-1 傾斜基盤を持つ不整形地盤の有限要素メッシュ

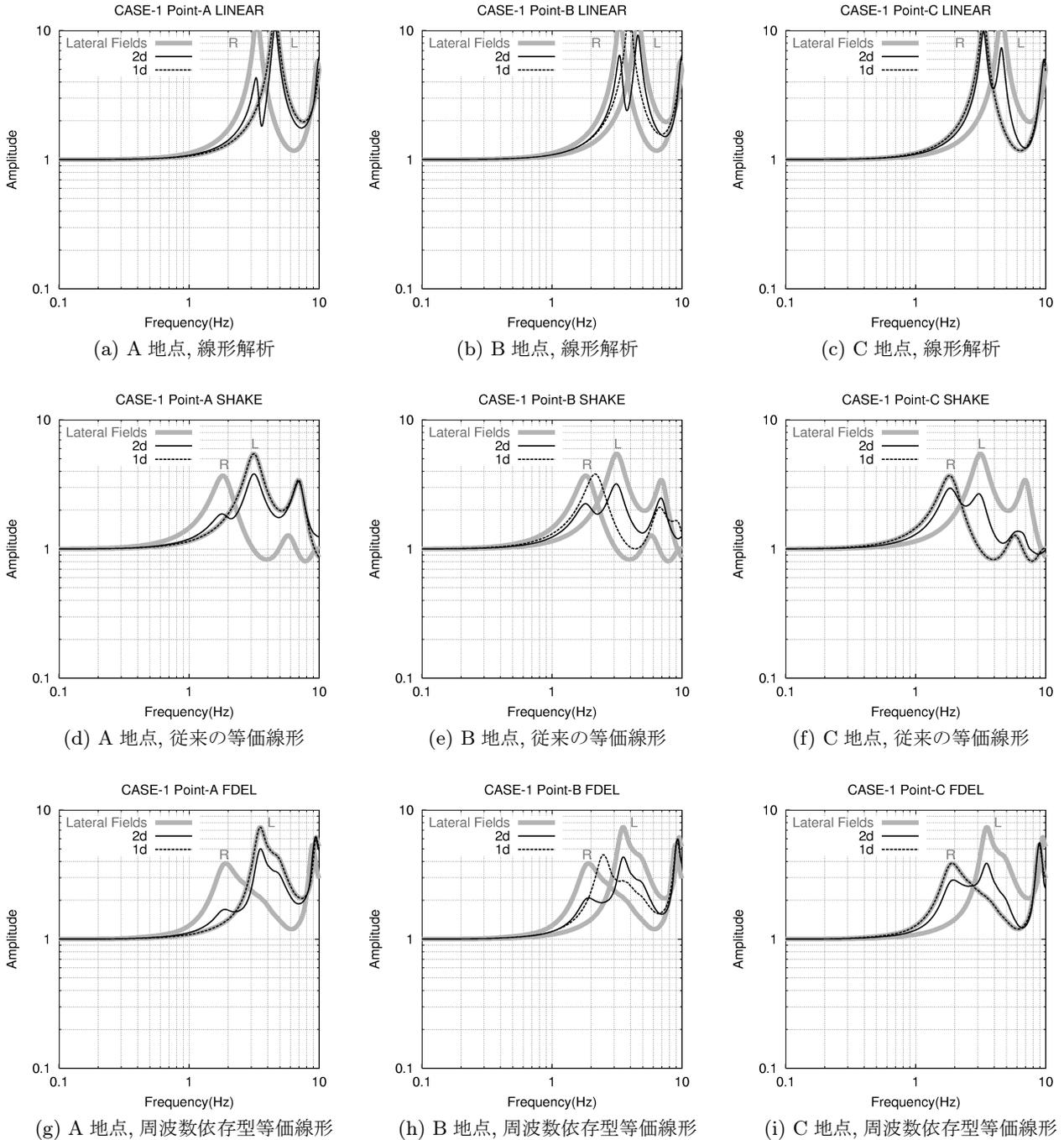


図-2 各節点における水平成分の加速度伝達関数 (CASE-1:堆積地盤において $V_s=300\text{m/s}$)

3. 不整形地盤における伝達関数のモデル化

(1) 解析条件

ここでは、図-3 示すような傾斜基盤を持つ2層より構成される不整形地盤を解析の対象とし、モデル底面におけるSH波の鉛直入射問題を取り扱う。

基盤の傾斜角を1/5,1/4,1/3,1/2の4種類、堆積地盤のせん断波速度を100,200,300m/secの3種類を、基盤面でのせん断波速度を650m/secとして地盤モデルを作成する。(表-2,3)

底面は固定境界とするが、解析領域と左右自由地盤との境界は粘性境界とし、領域内における波動の反射を吸収している。本研究では、ひずみ依存性を考慮した解析を行うため、地震マグニチュードMと震源距離Rによる強震動予測モデルEMPR-I⁷⁾を用い、マグニチュードMを8.0,7.5,7.0,6.5,6.0の5種類、震源距離Rを30,60,100kmの3種類を組み合わせ計15波の入力地震動を作成し、FDEL-FEMにより解析を行った。(表-4)

(2) 解析結果

FEM解析における傾斜領域は両側の自由地盤に挟まれた境界条件下で変形する。このとき基盤から地表面への伝達関数は底面への単位変位に対する変形モードを表す。本来、傾斜領域の変形モードは水平成分と上下動成分の合成により複雑化するが、あまりにも急傾斜でなければ上下動成分の寄与が小さく、両側自由地盤の変形モード(伝達関数)の重ね合わせによってある程度補間することができる。

(3) 地震動伝達関数の簡易推定式

底面から地表面の点xでの伝達関数を $\Omega_x(\omega)$ 、傾斜基盤上端の地盤モデルにより得られる1次元の伝達関数を Ω_1 、傾斜基盤下端での伝達関数を Ω_2 とし、次式により重ね合わせる。ただし、 C_1, C_2 は Ω_1, Ω_2 に対する重みである。

$$\Omega_x(\omega) = C_1\Omega_1(\omega) + C_2\Omega_2(\omega) \quad (7)$$
$$(C_2 = 1 - C_1, 0 \leq C_1 \leq 1)$$

C_1 は重ね合わせた伝達関数と2次元解析による伝達関数を Ω_1, Ω_2 の固有振動数で比較し、増幅率の差を残差として最小二乗法を用いて決定した。決定した C_1 と距離xの関係を図-4(a),(b),(c),(d)に示す。ただし、距離xは傾斜上端から成層地盤方向に正とする。 C_1 とxは明らかに負の相関がある。地盤が固いA群、B群はばらつきが小さいのに対して、地盤が軟らかいC群、特に地盤が軟らかく入力地震動の大きいD群はばらつきが大きくなっているところが見られる。

また、 C_1 と傾斜基盤の水平距離 L_s の関係を図-5(a),(b),(c)に示す。図-5を見ると C_1 と L_s には正の

相関があることが確認できる。

そこで、 C_1 と距離x(m)、傾斜基盤の長さ L_s (m)を用い、重回帰分析を行ったところ式(8)を得た。

$$C_1 = -1.25 \times 10^{-3}x + 0.560 \times 10^{-3}L_s + 0.562 \quad (8)$$

図-6(a),(b),(c)中の青色の実線は2次元解析、緑色の実線は1次元解析、赤色の実線は簡易推定法により算出した伝達関数である。A地点では1(Hz)あたりに違いがみられるものの2次元解析による伝達関数とほぼ一致している。B地点、C地点では、卓越周波数付近において2次元解析による伝達関数とほぼ一致しており、基盤の傾斜領域では、1次元解析による伝達関数と異なることが確認できる。しかし、高周波数領域において簡易推定法により算出した伝達関数と、2次元解析による伝達関数は一致しておらず、今後の検討課題である。

図-7はA,B,C各地点の加速度時刻歴である。各地点とも簡易推定法により算出した加速度波形(図中赤色)と2次元解析による加速度波形(図中青色)の振幅および位相がほぼ一致していることが確認できる。

4. まとめ

工学的基盤が傾斜している不整形地盤を対象に地盤震動解析を行った。地震入力基盤から地表面への2次元解析による伝達関数は、左右自由地盤の伝達関数に比べ複雑な周波数特性となるが、左右自由地盤のうち距離の近い方の伝達関数の影響がより大きくなる。また、従来の等価線形化法による解析(FLUSH相当)では、高周波数領域において増幅率が低下することが1次元解析と同様に確認できる。

傾斜基盤面の上端と下端における地盤モデルからそれぞれ地震動伝達関数を求め、それらを重ね合わせることで傾斜基盤上の堆積地盤面における地震動伝達関数を推定することができる。推定式により求めた地表面における地震動伝達関数は、有限要素法を用いた解析結果と比べ矛盾のないことを確認した。

参考文献

- 1) 室野剛隆, 西村昭彦, 室谷耕輔: 地震動に与える表層地盤の局所的变化の影響と耐震設計への適用性に関する提案, 土木学会ローカルサイト・エフェクト・シンポジウム論文集, pp.183-188, 1998.
- 2) P.B.Schnabel, J.Lysmer and H.B.Seed: SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972.
- 3) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58, 1994.6.
- 4) 古本吉倫, 杉戸真太, 八嶋厚: 周波数依存型等価線形化法による不整形地盤の震動特性について, 土木学会地震工学論文集, Vol.27, paper No.201(CD-ROM), 2003.12.
- 5) J.Lysmer, T.Udaka, C.-F.Tsai and H.B.Seed: FLUSH a computer program for approximate 3-D analysis

of soil-structure interaction problems, EERC, 75-30,1975

- 6) B.O.Hardin and V.P.Drnevich : Shear modulus and damping in soils, ASCE, Vol.98, SM6, SM7, pp.667-692,1972.

- 7) M.Sugito, Y.Furumoto, T.Sugiyama : Strong Motion Prediction on Rock Surface by Superposed Evolutionary Spectra, 12WCEE, 2000.2 in Auckland, New Zealand (CD-ROM)

(2005. 6.16 受付)

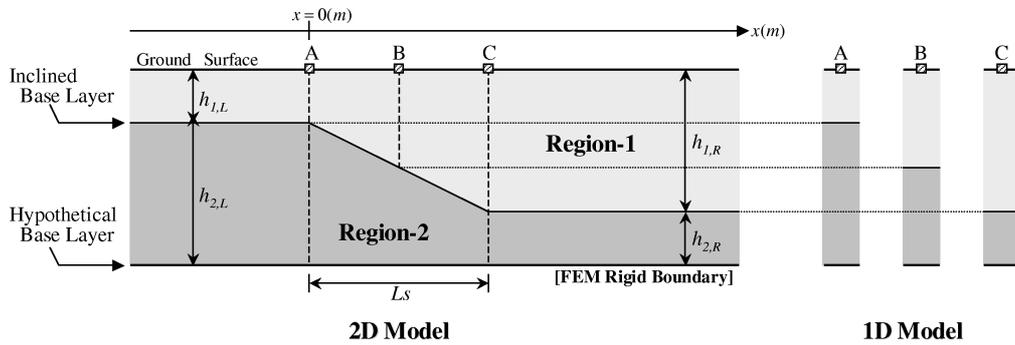


図-3 解析モデル

表-2 解析条件

| θ | L_s (m) | $h_{1,L}$ (m) | $h_{2,L}$ (m) | $h_{1,R}$ (m) | $h_{2,R}$ (m) |
|----------|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1/5 | 200 | 20 | 80 | 60 | 40 |
| 1/4 | 160 | | | | |
| 1/3 | 120 | | | | |
| 1/2 | 80 | | | | |

表-3 地盤条件

| | Region-1 | Region-2 |
|-----------------------------|----------|----------|
| ρ (g/cm ³) | 1.50 | 1.80 |
| V_s (m/sec) | 100 | 650 |
| | 200 | 650 |
| | 300 | 650 |

表-4 入力地震動の諸元

| No. | M | R(km) | A_{max} (gal) | 計測震度 |
|-----|-----|-------|-----------------|------|
| 1 | 6.0 | 100 | 32.35 | 2.8 |
| 2 | 6.0 | 60 | 55.72 | 3.3 |
| 3 | 6.5 | 100 | 54.34 | 3.3 |
| 4 | 6.5 | 60 | 93.60 | 3.8 |
| 5 | 7.0 | 100 | 94.34 | 3.9 |
| 6 | 6.0 | 30 | 114.82 | 4.0 |
| 7 | 7.0 | 60 | 152.34 | 4.4 |
| 8 | 7.5 | 100 | 169.25 | 4.4 |
| 9 | 6.5 | 30 | 197.60 | 4.5 |
| 10 | 7.5 | 60 | 281.40 | 4.9 |
| 11 | 8.0 | 100 | 283.13 | 5.0 |
| 12 | 7.0 | 30 | 319.55 | 5.0 |
| 13 | 8.0 | 60 | 483.18 | 5.5 |
| 14 | 7.5 | 30 | 547.32 | 5.6 |
| 15 | 8.0 | 30 | 986.98 | 6.2 |

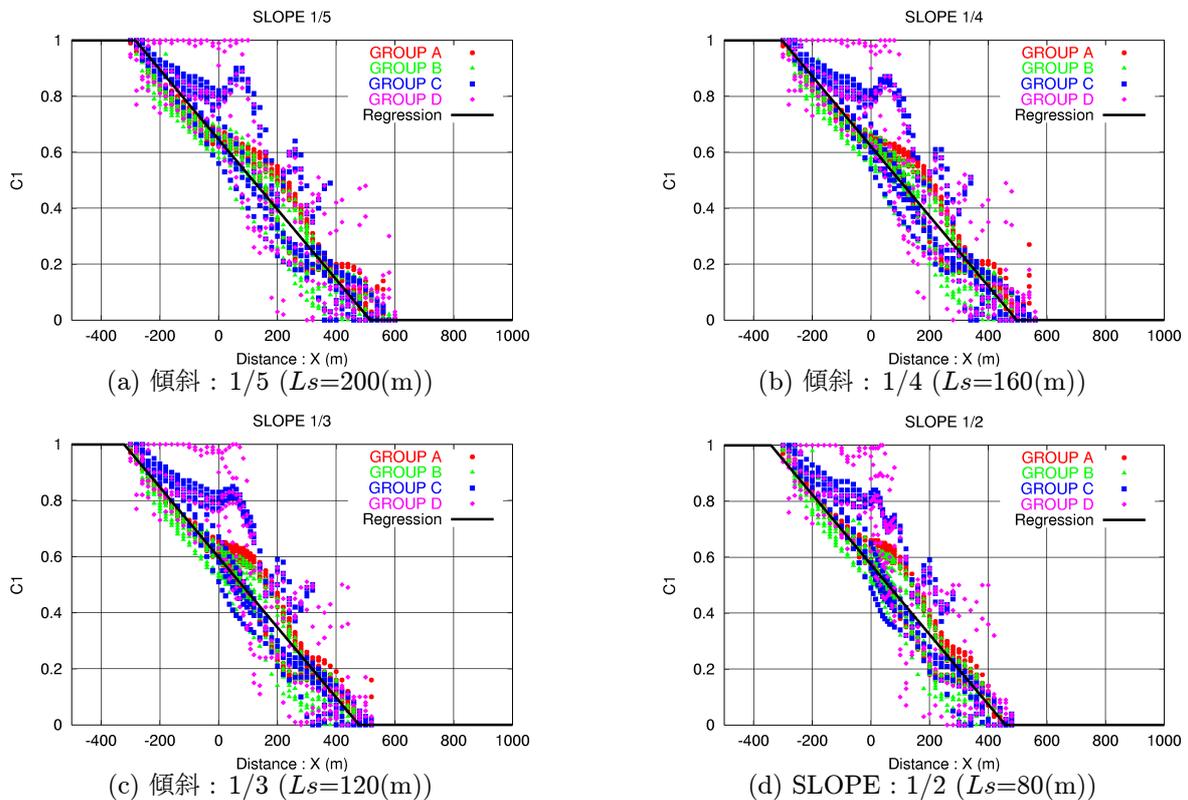


図-4 係数 C_1 と傾斜の頂点からの距離 x (m) の関係

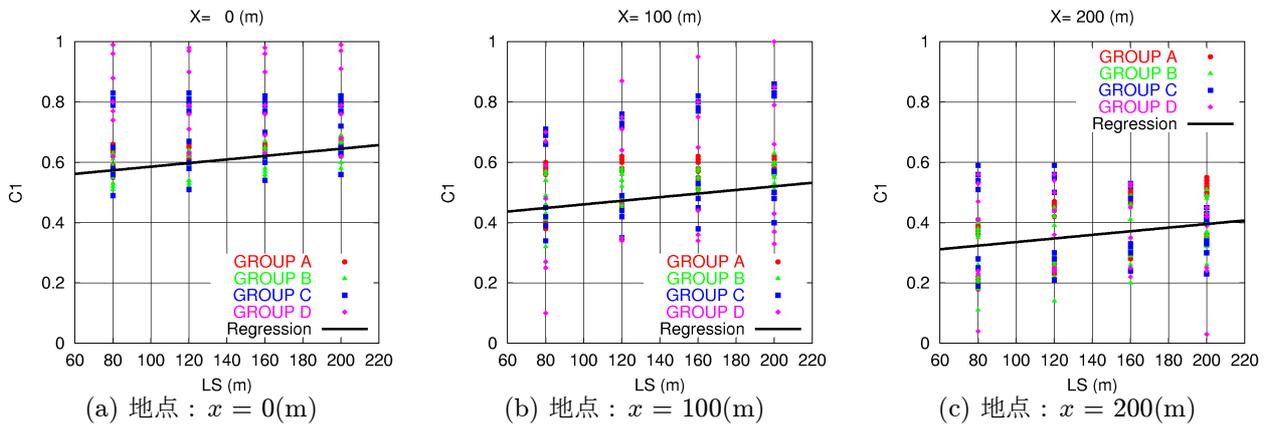


図-5 係数 C_1 と傾斜基盤の水平長さ $Ls(m)$ の関係

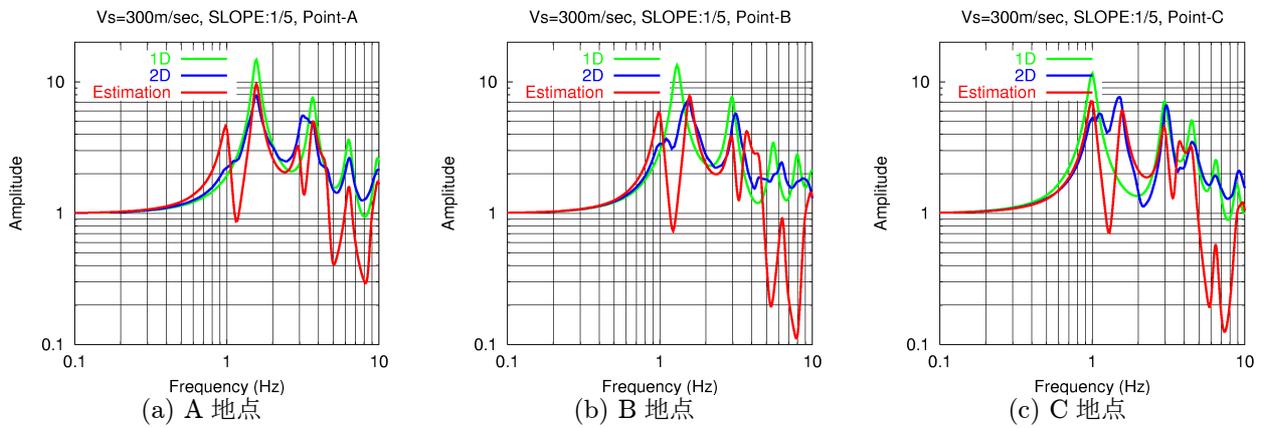


図-6 解析領域底面から地表面への地震動伝達関数 [傾斜:1/5, $Vs=300(m/sec)$, AccNo.11]

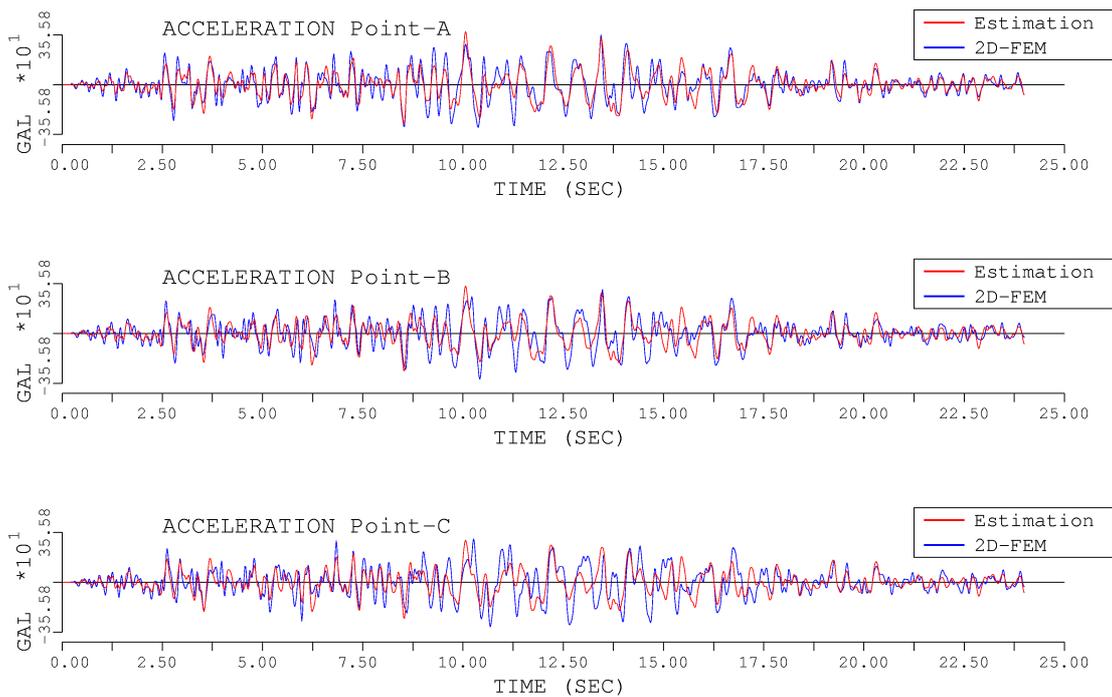


図-7 地表の各点における加速度時刻歴 [傾斜:1/5, $Vs=300(m/sec)$, AccNo.11]

ON THE SIMPLE MODELING FOR SEISMIC TRANSFER FUNCTION OF
GROUND ON INCLINED BASE LAYER

Yoshinori FURUMOTO, Masata SUGITO and Yohsuke SAIKI

Since the transfer function of an earthquake motion changes with the geometric conditions, in the case of embankments or grounds on inclined base layer, two or three-dimensional analysis is necessary.

In this research, a simple modeling method for seismic transfer function of ground on inclined base layer is proposed by superposing one-dimensional transfer functions on upper and lower sides of the slope. The weighting coefficients are determined by multiple linear regression analysis with the distance from the top of inclined basement and the length of the inclined basement as parameters.

It was confirmed that the transfer function obtained by the proposed method is consistent with the analytical result using the two-dimensional finite element method.