

# 東灘ボーリングデータを用いた1次元解析による 大深度地盤の地震動増幅特性

國生剛治<sup>1</sup>・万谷昌吾<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 中央大学教授 理工学部 土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

<sup>2</sup>学生員 中央大学大学院 理工学研究科 土木工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)

都市の厚い第四紀地盤において、硬岩からなる基盤から地表の間での地震動の伝播と増幅のメカニズムを解明することは重要である。しかし、地盤震動の数値解析で、地中深くにおける地震動の解析はあまり行われていないのが現状である。そこで今回、兵庫県南部地震で甚大な被害に見舞われた東灘における大深度ボーリングデータと PS 検層結果に基づき、大深度における地震動増幅のメカニズムを解明するため、1次元等価線形解析を試みた。まず、減衰の振動数依存性の有無や高拘束圧下における非粘性土の規準ひずみの変化の有無を考え、非線形性を考えるべき深度について検討した。さらに、これらの因子が大深度地盤の加速度増幅に与える影響について比較した。

**Key Words:** deep quaternary ground, very deep boring, equivalent linear, multi-reflection analysis, damping model, reference strain, effective confining stress

## 1 はじめに

地盤の地震応答解析で、表層付近における地震の加速度増幅に関する解析は数多く行われてきたが、地中深くにおける地震動の増幅解析はあまり行われていないのが現状である。とくに、都市の厚い第四紀地盤において、硬岩からなる基盤から地表の間での地震動の伝播と増幅のメカニズムを解明することは重要である。そこで今回、兵庫県南部地震で甚大な被害に見舞われた神戸市の東灘の大深度ボーリングデータとPS検層結果に基づき<sup>1),2)</sup>、大深度における加速度増幅のメカニズムを解明するため1次元重複反射解析プログラム<sup>3)</sup>を用いた等価線形解析を行った。

## 2 地盤モデル作成にあたり

図-1は今回の解析で用いた東灘地点の地盤柱状図であり、GL-0m からGL-1691.2m までを全部で172層のサブレイヤーによりモデル化した。図の塗りつぶしの部分は粘性土層(計93層、総層厚995.85m)、空白の部分は非粘性土層(計79層、総層厚695.35m)を示しており、粘性土層のほうが非粘性土層に比べ多く、総層厚も厚い。図-2は大深度ボーリングデータに基づく深度に対するせん断波速度と密度の関係である。基盤のGL-1500m付近で両者共に急増している。今回の解析地盤モデルの作成にあたり、東灘地点で不足して



図-1 地盤柱状図

$$\left. \begin{aligned} G/G_0 &= \frac{1}{1+(\gamma/\gamma_r)^\alpha} \\ \frac{h-h_0}{(h_{\max}-h_0)} &= \left(1-G/G_0\right)^\beta \end{aligned} \right\} \dots \text{式(1)}$$

表-1 土質別の規準ひずみと係数

	規準ひずみ $\gamma_r$	$h_{\max}$ (%)	$h_0$ (%)	$\alpha$	$\beta$
①	8.44E-04	23	2	0.839	1.163
②	1.50E-03	17	2	0.870	1.430
③	8.33E-04	22	2	0.833	1.444
④	3.00E-03	17	2	0.870	1.430
⑤	4.96E-04	18	2	0.833	1.444

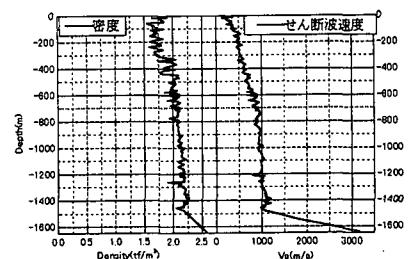


図-2 せん断波速度と密度

いる地表付近のデータを補足するため、阪神高速道路5号湾岸線、魚崎浜南工区下部工事に伴う地質調査結果を用いた<sup>4)</sup>。地盤物性の非線形性を等価線形解析法により考慮するため、地盤の地震時における動的応力-ひずみ関係式として國生の提案による双曲線モデル式(1)を用いた<sup>5)</sup>。土質別の規準ひずみと係数を表す表-1において①は埋土、②は粘土(沖積)、③は砂礫(沖積)、④は粘土(洪積)、⑤は砂礫(洪積)である。ただし、規準ひずみ $\gamma_r$ は有効拘束圧が98kPaの時の値である。ただし、 $G_0$ は初期せん断剛性、 $\gamma_r$ は規準ひずみ、 $\alpha$ 、 $\beta$ は実数、 $h_{max}$ は最大減衰定数、 $h_0$ は最小減衰定数である。

### 3 入力地震動について

図-3は入力地震動の加速度時刻歴である。兵庫県南部地震におけるポートアイランドのGL-83.4mで観測された本震記録から、最大加速度が現れる主方向に回転させたものの入射波を算定し、これを入力地震動とした。入力の仕方については、ポートアイランドのGL-83.4mと同じ地層に対応した東灘地点のGL-73.7mから、入射波として入力した。なお、今回の解析の対象とした振動数領域は、20Hzまでとした。

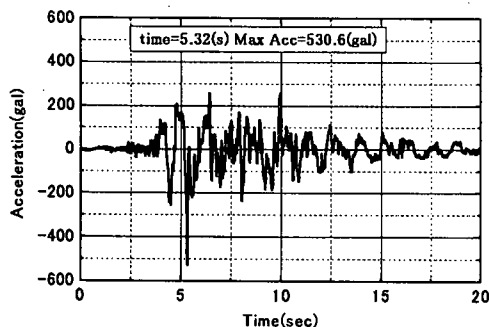


図-3 入力地震動の加速度時刻歴

### 4 解析における減衰モデルについて

まず、深度と微小ひずみ時の減衰定数の関係を文献6)を参考に図-4の実線カーブのように設定した。このカーブは既往の研究に基づいて深度と減衰定数の関係を仮定したもので、深度300m以下は一定値としている。さらにこの設定値を全体的に1/2、1/4と変化させ、減衰定数の絶対値の影響を検討する。減衰定数 $h$ の振動数 $f$ に対する依存性については、以下の3つのモデルを仮定した。

- ①非粘性モデル( $h = \text{一定(振動数 } f \text{ によらない)}$ )。
- ②  $h = a / (2\pi f)^{0.5}$ 。
- ③ Maxwell モデル( $h = b / (2\pi f)$ )。

ただし、減衰モデル②、③の係数 $a$ 、 $b$ の値は図-3の入力地震動のフーリエスペクトルが最大値を示す振動数

( $f=0.78\text{Hz}$ )において減衰定数が図-4に示す値となるように決めた。

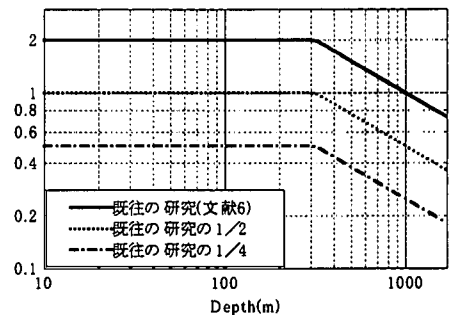


図-4 深度と減衰定数 $h$

### 5 規準ひずみの有効拘束圧依存性について

規準ひずみ $\gamma_r$ は、地盤の非線形性の程度を示し、その値が小さければ非線形性の程度が大きくなる。一般に通常の拘束圧下では、非粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ は有効拘束圧に依存し、粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ は有効拘束圧には依存せず塑性指数 $I_p$ に依存するとされている。今回は地震動の数値解析を行っており、拘束圧の極めて大きな深部地盤において粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ が有効拘束圧に依存するのかわからないため、規準ひずみ $\gamma_r$ の決め方について以下の2つの考え方に基いて以後の解析を進めた。

ケース(A)：非粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ に下記の式(2)を適用し、粘性土については、表-1に示す規準ひずみ $\gamma_r = \text{一定値}$ として解析する場合。

ケース(B)：あらゆる土質に対し、規準ひずみ $\gamma_r$ に下記の式(2)を適用して解析する場合。

$$\gamma_r = (\sigma'_m / \sigma'_0)^{0.5} \gamma_r^* \quad \text{式(2)}$$

(ただし、 $\sigma'_m$ ：有効拘束圧、 $\gamma_r$ ：規準ひずみ、 $\gamma_r^*$ ： $\sigma'_m = \sigma'_0$ の時の規準ひずみ、 $\sigma'_0 = 98\text{kPa}$ )

また、有効拘束圧 $\sigma'_m$ の算定に当っては静止土圧係数

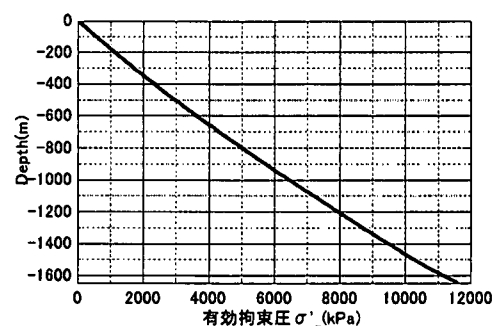


図-5 深度に対する有効拘束圧 $\sigma'_m$

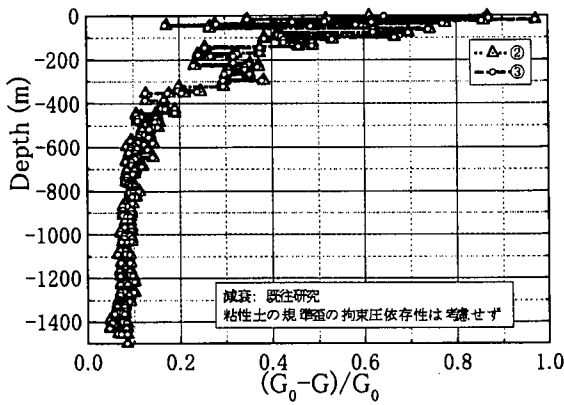


図-6 ケース(A)の深度方向の剛性低減率

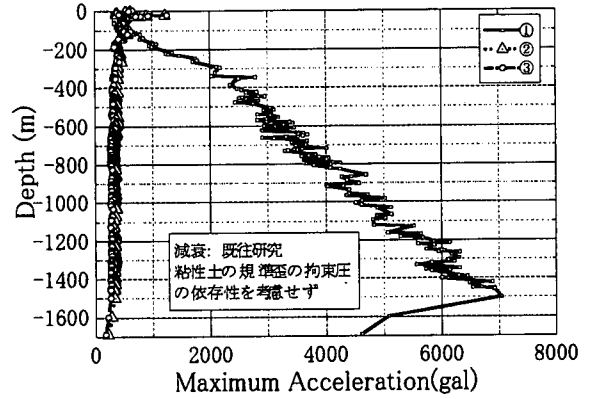


図-8 ケース(A)の深度に対する最大加速度

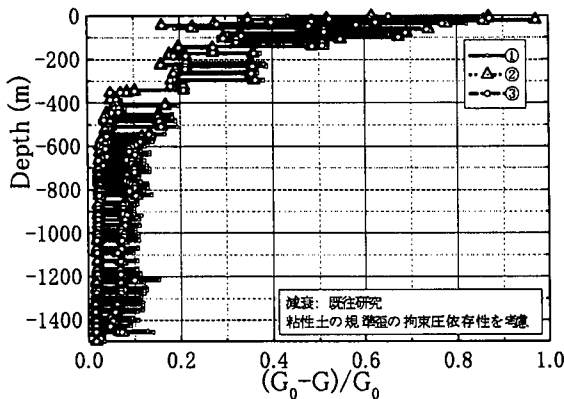


図-7 ケース(B)の深度方向の剛性低減率

$K_0$  の大深度での値が不明であるため、とりあえず  $K_0 = 0.5$  とし、鉛直1方向と水平2方向の有効応力の平均から求めた。なお、深度に対する有効拘束圧  $\sigma'_m$  の変化については、図-5に示した。

## 6 解析を行う上で考慮すべき非線形領域

今回の解析では、まずGL-1500mより上の層を全て等価線形解析の対象とした。せん断波速度、密度から求まる初期せん断剛性  $G_0$  と、計算時に収束した割線剛性  $G$  から、深度に対するせん断剛性低減率  $(G_0 - G)/G_0$  の関係を図-6、7に示した。図-6はケース(A)、図-7はケース(B)の場合である。ケース(A)で減衰モデル①を用いた時、計算が収束しなかった。ケース(A)、(B)あるいは減衰モデル①~③のいずれの場合も、表層付近においてせん断剛性低減率は、深部地盤に比べ大きい値を示しており、表層付近の地盤は深部地盤に比べ剛性の低下が激しい。粘性土の規準ひずみの有効拘束圧依存性を考慮しないケース(A)の場合、深い地盤でも変化の幅が0.05~0.1程度あることが読み取れる。これは非粘性層と粘性層の剛性の差によるものである。約GL-300m付近から深い地盤では、せん断剛性低減率の値

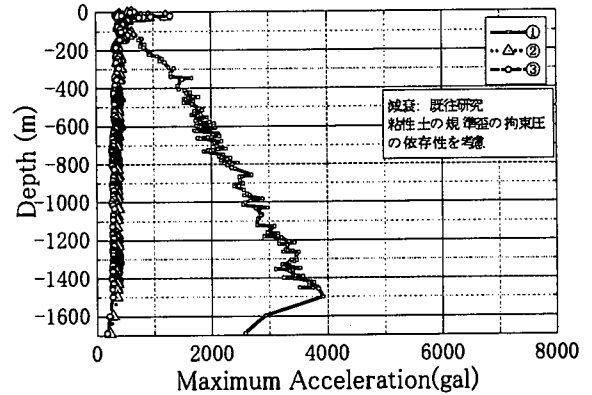


図-9 ケース(B)の深度に対する最大加速度

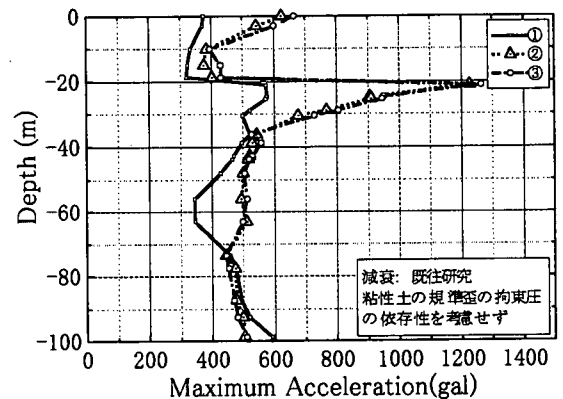


図-10 ケース(A)の地表付近の最大加速度

は幅があるものの、0.2以下に収まってくる。一方、粘性土の規準ひずみの有効拘束圧依存性を考慮するケース(B)の場合、粘性土の規準ひずみ  $\gamma_r$  の有効拘束圧依存性を考慮しないケース(A)の場合に比べて深い地盤において剛性低減率はゼロに近づく。粘性土の規準ひずみの有効拘束圧依存性を非粘性土と同様に考慮していることでケース(A)の場合に比べ地盤物性の線形性が

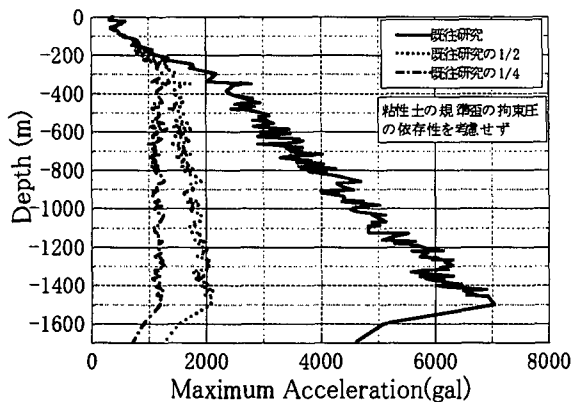


図-11 ケース(A)、減衰モデル①を用い、減衰定数を変化させた時の深度に対する最大加速度

強くなるがこの違いを作っていると思われる。いずれの場合にも、約 GL-300m 以深において剛性低減率は 0.2 以下となり、粘性土の規準ひずみの有効拘束圧依存性を考慮する・しないに関わらず、ほぼ線形物性としての取り扱いが可能である事がわかった。また、ケース(B)において、減衰モデル①は減衰モデル②、③に比べ剛性低減率が多少大きい事がわかった。

## 7 加速度増幅特性

図-8、9は、それぞれケース(A)、(B)の減衰モデル①～③について、剛性低減率の結果に基づき、地表から約 GL-300m までを非線形物性(等価線形法により評価)、GL-300m 以深を線形物性として求めた深度に対する最大加速度の分布である。ケース(A)の減衰モデル①の場合も上記の条件と同様に解析した。図-8を見ると、減衰モデル①以外の減衰モデル②や③は似たような変化を辿っており、地表付近で大きい値を示すが、約 GL-100m 付近から値が小さくなり、約 GL-700m 付近から GL-1500m 付近まではほぼ一定値に収まっている。それに対し減衰モデル①は地表から GL-1500m まで増加し続けるという非現実的な深度分布を示している事が読み取れる。図-10はケース(A)の場合の地表から GL-100m までの深度に対する最大加速度であるが、減衰モデル①では地表付近の加速度が減衰モデル②や③に比べ小さい。また、減衰モデル①から③に向かうにつれて加速度増幅率は大きくなっているが減衰モデル②と③に大きな差は見られなかった。次に、図-9を見てみると、減衰モデル②、③は図-8と似たような結果が得られ、GL-300m 以深を線形としているための当然の結果といえる。一方、減衰モデル①に関しては、地表から約 GL-300m までの加速度の変化が緩やかであるため、図-8の減衰モデル①に比べ GL-300m 以深の加速度の値は小さくなったが、分布形は非現実的と判断される。このことは、等価線形法と仮定した地表から約 GL-300m までの間で、粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ の有効拘束圧 $\sigma_m$ 依存性を考慮しない場合に比べて線形物性に近づいたためと思われる。いずれも共通して言えることは、振動数に

依存する減衰モデルは地表付近で大きい加速度が得られ、深い地盤では地表に比べ小さい値を得る。また、非粘性モデルでは地表付近での加速度の値が小さく、深部地盤から地表付近における増幅率も小さい。図-11 は非粘性モデルについて規準ひずみ $\gamma_r$ の仮定を通常行われているようにケース(A)とし、減衰の絶対値を既往の研究に基づいた減衰値からその 1/2 と 1/4 に変化させた場合(図-4 を参照。)について解析した結果である。元の値の場合に不自然と思われた加速度の分布状態は減衰値を 1/2~1/4 に低減することで、元比べ値は小さくなるが、やはり非現実的な結果となった。また、減衰値を 1/2~1/4 に変化させた値は、既往の実験データと比較して小さいと思われる。

## 8 まとめ

- 1) ポートアイランドの強震動記録を用いて東灘の大深度の第四紀地盤について解析した結果、粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ の有効拘束圧 $\sigma_m$ 依存性を考慮する、しないに関わらず、約 GL-300m 以深ではせん断剛性低減率が小さく、ほぼ線形物性として扱えることがわかった。
- 2) 粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ の有効拘束圧 $\sigma_m$ 依存性を考慮する場合、考慮しない場合に比べ剛性低減率が小さくなり、線形物性に近づくことがわかった。
- 3) 粘性土の規準ひずみ $\gamma_r$ の有効拘束圧 $\sigma_m$ 依存性の仮定に関わらず、非粘性減衰を用いた解析は非現実的な加速度の深度分布を示した。
- 4) 今回のような大深度の第四紀地盤の解析をする場合、規準ひずみ $\gamma_r$ の仮定や減衰モデルの振動数依存性の仮定が加速度の深度分布に大きな影響をもたらすことがわかった。
- 5) 非粘性モデルを用いた場合、実測に近い減衰定数を仮定すると、非現実的な加速度分布を示し、より小さい減衰定数を仮定すれば値は小さくなるが、やはり現実的な加速度分布には程遠い結果となった。

## 参考文献

- 1) 衣笠善博 水野清秀 (1996) 神戸地域の地下地質 第 11 回 地質調査所研究講演会資料 pp77-80
- 2) 松本正毅 大石富彦 島田隆一 (1998) 大阪平野の深部地盤構造を考慮した入力地震動策定に関する一考察、電力土木 No.277 pp87-92
- 3) 吉田望 末富岩雄 (1996) DYNEQ:等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム、佐藤工業(株)技術研究所報、pp61-70
- 4) 阪神高速道路公団 (1997) 阪神高速道路地質資料 5)
- 5) 國生剛治 本山隆一 (1998) 等価線形解析の大ひずみレベルへの適用の試み 第 33 回地盤工学研究発表会、pp773-774
- 6) Kokusho.T, (1999) Effect of nonlinear soil properties on seismic amplification in surface layers Earthquake Geotechnical Engineering volume 3, (Lisbon), pp913-918 .