

# 地盤の地震時せん断応力の簡易推定法

佐藤正行<sup>1</sup>・安田 進<sup>2</sup>・吉田 望<sup>3</sup>・増田民夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 東電設計(株) 技術開発本部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京電機大学教授 理工学部建設工学科 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山石坂)

<sup>4</sup>正会員 工博 佐藤工業 中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>3</sup>正会員 工修 東京電力(株) 建設部 (〒100-0011 東京都千代田区内幸町1-1-1)

地表面の最大加速度及び Spectrum Intensity (SI) を用いて液状化判定に用いる地震時の地盤のせん断応力を精度良く求めるための推定式を提案している。ここで提案した方法は、従来の簡易判定法における推定式と同じ情報に SI を加味するだけで地震時の地盤のせん断応力比を推定でき、地盤剛性や基盤深さ等の地盤の詳細データは不要であるという特徴がある。SI は最大加速度と同じく地表面加速度波形から得られる情報であるので、この方法は簡便な方法といえる。この方法を用いて、兵庫県南部地震におけるポートアイランド及び第二鹿児島県西北部地震における阿久根市と川内市の地震時最大せん断応力分布の推定を行い、従来法による結果と比較して、提案した手法の有効性について検討している。

**Key Words :** *liquefaction, spectrum intensity, peak acceleration, shear stress ratio, earthquake simplified procedure for evaluating liquefaction potential*

## 1. はじめに

沖積地盤や埋立地盤における構造物の設計に際しての簡易液状化判定、及び被害想定や耐震診断の際の広範囲の地域を対象とした液状化判定には、道路橋示方書<sup>1)</sup>や建築基礎構造設計指針<sup>2)</sup>等に示された FL 値による簡易判定が行われることが多い。これらの方法は、いずれも新潟地震 (1964) の直後に Seed ら<sup>3)</sup>によって考え出された方法に端を発している。基本的には、液状化応力比 (R) を N 値や粒度分布等の原位置から得られる基本的な地盤のデータから求め、他方で地震時の地表面における最大加速度 ( $\alpha_{max}$ ) または震度 ( $k_n$ ) から繰返しせん断応力比 (L) を求めて、液状化発生に対する抵抗率 (FL) を、 $FL=R/L$  として求める方法である。

この方法の妥当性については、新潟地震 (1964) や日本海中部地震 (1983) などの液状化による被害が大きかった地震に対する液状化事例及び非液状化事例から検証されているが、いずれの事象も震央から遠く、200Gal 前後の地表面加速度のものである。ところが最近の強震記録では、高周波成分の測定精度の向上などの理由も手伝って、液状化が発生したと思われる埋立地盤の地表面においても 500Gal 程

度以上の記録が得られる例が多く見られるようになってきている。

このような観測記録に基づいた距離減衰式により近距離地震を想定すると、震央近くの地域では、400Gal ~ 500Gal 程度以上の地表面加速度を設定して液状化の予測を行うことになる。従来の簡易推定法に従って地震時せん断応力比 (L) を求める場合 L の大きさは地表面最大加速度に正比例するため、その値はかなり大きなものとなる。

しかし、実際には地震時の地中せん断応力は単に地表面最大加速度のみに依存するわけではない。たとえば、高周波成分が卓越している地震波や瞬間的なスパイクを有する地震波が入力した場合には、地表面最大加速度は大きくなって、地中せん断応力はあまり大きくはならない。また、同じ地表面最大加速度であっても、例えば兵庫県南部地震 (1995) のように低周波領域においても大きなエネルギーを持つ地震であれば地中せん断応力は非常に大きなものとなるはずである。

本論文では、このような違いを地震時の地中せん断応力の推定に考慮する簡易的な方法として、 $\alpha_{max}$ だけでなく Housner ら<sup>4)</sup>が提案した Spectrum Intensity (以下 SI と呼ぶ) を用いる方法を提案している。ここで、 $\alpha_{max}$ 以外のもう一つの指標として

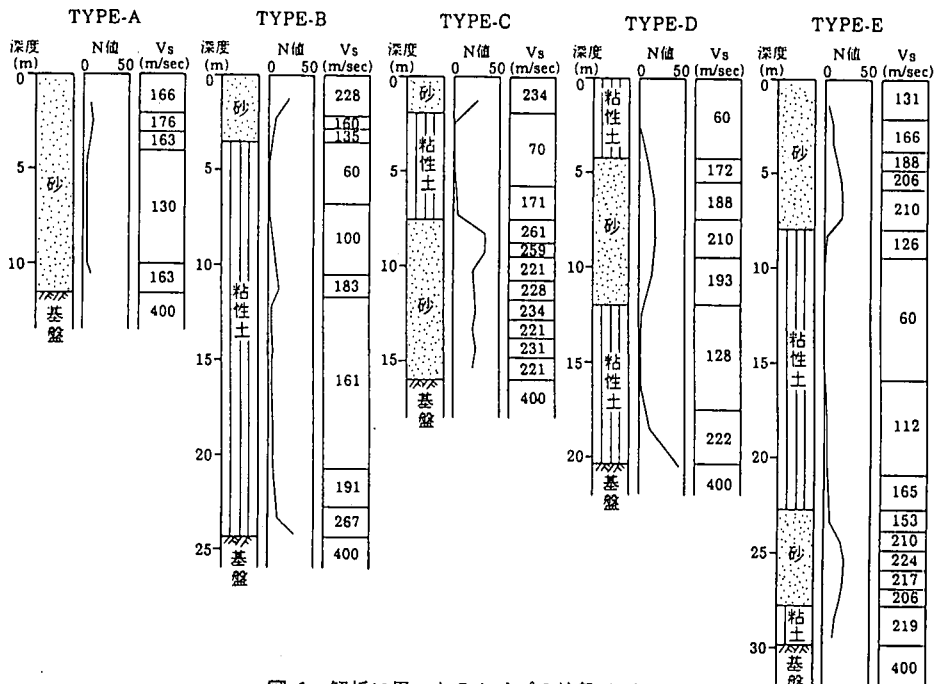


図-1 解析に用いた5タイプの地盤モデル

表-1 土質名と $\gamma_t$ の対応

土質名	$\gamma_t$ (tf/m <sup>3</sup> )
砂	1.95
粘性土	1.75
基盤	2.10

SI を選定したのは、比較的深い位置の地中せん断応力は、地表面近傍地盤による狭い周波数帯の増幅特性の影響を受けにくい、このような影響を受けにくい指標としては、周期0.1秒~2.5秒の平均速度応答スペクトルである SI が適当と思われたためである。

簡易的な地震時せん断応力の推定方法としては、 $\alpha_{max}$ は用いず SI のみから推定する方法を安田ら<sup>9)</sup>が、また応答スペクトルから精度のよい推定を行う方法を澤田ら<sup>6)</sup>が提案している。しかし、安田らの方法では、特に地表面近傍の有効上載圧の小さな領域において、推定式を設定した際のデータのばらつきが大きく、澤田らの方法では、地震時の地盤のせん断剛性や基盤位置といったより多くの地盤情報が必要であるといった問題がある。

本論文では、地表面最大加速度と SI を指標として地震時せん断応力比を精度良く推定する方法を提案しているが、この方法では、道路橋示方書等の簡易判定法における従来の推定式で用いられるものと同じ情報に SI を加味するだけで地中せん断応力を推定でき、地盤剛性等の変形特性や基盤深さ等の地盤の詳細データは不要である。また、SI は  $\alpha_{max}$  と同じく地表面加速度波形から得られる情報であるため、簡便な方法といえる。

## 2. 地盤の応答解析

### (1) 地盤の応答解析の目的

地震時地中せん断応力の簡易推定法の検討には地盤の最大せん断応力の深度分布が必要となる。本研究では、千葉県東方沖地震(1987)において震央距離の異なる8箇所で見測された14の地震波と地層構成の異なる5タイプの地盤モデルを用いて70ケースの地盤の一次元等価線形解析を行い、地盤の最大せん断応力の深度分布及び地表面の加速度波形を求めた。次にこれらの解析結果を正解と考え、最大せん断応力の深度分布を精度良く近似できる簡易推定式の検討を行った。

以下、簡易推定式の基礎データとなった地盤の一次元応答解析の結果を紹介する。

### (2) 地盤モデル及び解析用地盤物性

1都4県(茨城、埼玉、千葉、神奈川)の地盤柱状

表-2 解析に用いた入力地震波の最大加速度

観測地点	震央距離 (km)	成分	最大加速度 (gal)
東金	29	NS	360
		EW	287
茂原	32	EW	420
千葉	39	NS	173
五井	41	NS	138
		EW	111
袖ヶ浦	48	X	116
		Y	78
上総湊	59	NS	71
		EW	62
大田	64	X	33
		Y	48
横須賀	74	NS	27
		EW	24

図-2 地震波の観測地点(千葉県東方沖地震(1987))

図の中から、軟弱層の厚さや地層構成の異なる5タイプを選定し、モデル化して解析用地盤モデルとした。解析用地盤モデルを図-1に示す。TYPE-A からTYPE-E に向かって次第に地層構成が複雑になっている。地盤モデルの湿潤単位体積重量 ( $\gamma_i$ ) は、柱状図の土質名ごとに表-1の様に設定した。

地盤のせん断波速度 ( $V_s$ ) は式(1)及び式(2)<sup>1)</sup>を用いて設定した。なお、地震波の入力基盤の  $V_s$  は400m/sとした。

$$(砂質土) V_s = 80 \cdot N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 50) \quad (1)$$

$$(粘性土) V_s = 100 \cdot N^{1/3} \quad (1 \leq N \leq 25) \quad (2)$$

ここに、 $V_s$ : 地盤のせん断波速度 (m/s)  
 $N$ : 地盤のN値

せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性としては、式(3)及び式(4)<sup>10)</sup>を用いた。

$$G/G_0 = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (3)$$

$$h = h_{max} \cdot \frac{\gamma/\gamma_r}{1 + \gamma/\gamma_r} \quad (4)$$

$$(砂質土) \gamma_r = 3.3449 \times 10^{-4} + 2.2586 \times 10^{-6} \times V_s$$

$$h_{max} = 0.22$$

$$(粘性土) \gamma_r = 1.416 \times 10^{-4}$$

$$h_{max} = 0.22$$

ここに、 $G$ : せん断弾性係数  
 $G_0$ : 初期せん断弾性係数  
 $h$ : 減衰定数  
 $h_{max}$ : 減衰定数の最大値  
 $\gamma$ : せん断ひずみ  
 $\gamma_r$ : 基準ひずみ ( $G/G_0=0.5$ のときの $\gamma$ )

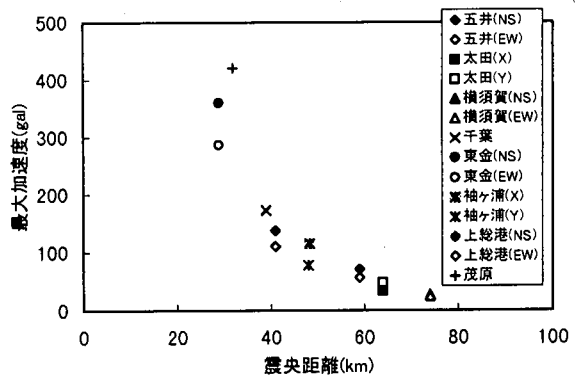


図-3 震央距離と入力地震波の最大加速度の関係

この式は Hardin-Drebnich モデル (H-D モデル) のパラメータ  $\gamma_r$  と  $h_{max}$  を考え、既往の調査試験結果に基づいて、砂質土、粘性土別に  $V_s$  より与えるものである。砂質土の  $G/G_0 \sim \gamma$  曲線及び  $h \sim \gamma$  曲線は  $V_s$  に依存して変化し、粘性土は  $V_s$  に依存しない式となっている。

### (3)入力地震波

入力地震波として千葉県東方沖地震(1987年12月17日、マグニチュード:Mj=6.7、震源深さ:58 km)の際に図-2に示す8地点で観測された14波の加速度波形を用いた。これは、これらの入力地震動が、震源近傍から震央距離90km程度までの比較的広範囲にわたって得られたアレー観測記録に基づくものであり、大加速度から小加速度までの様々な記録が得られていることから、本研究の目的に適していると判断したためである。

なお、これらの波形のうち、表層地盤の表面または表層地盤内で観測された地震波については、観測点の地盤の一次元モデルを用いて基盤入射波を算出し、解析に用いる入力地震波としている。また、解

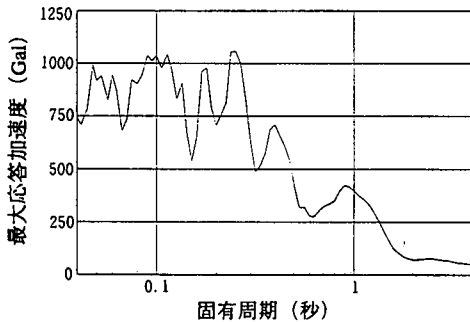
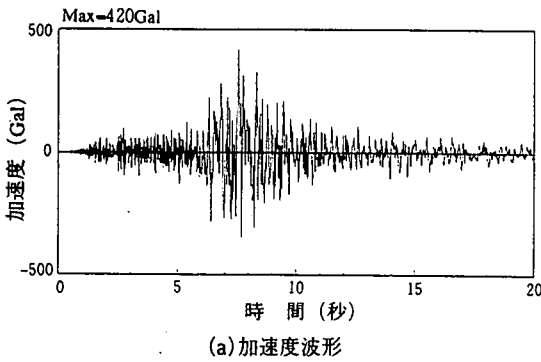


図-4 入力地震波の例 (茂原)

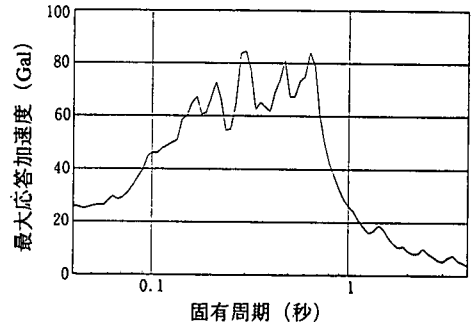
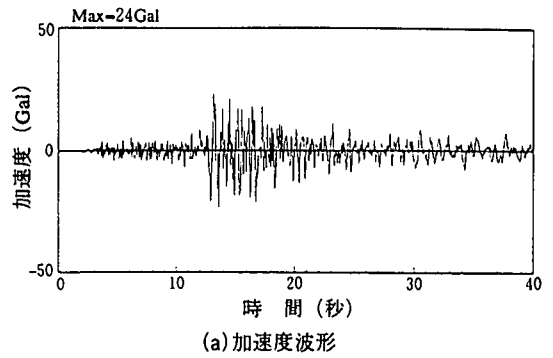


図-5 入力地震波の例 (横須賀(EW))

析には振幅調整をせずにそのままの値で用いている。

入力地震波の一覧表を表-2に、震央距離と入力地震波の最大加速度の関係を図-3に示す。これらの図から、解析に用いた加速度波形の最大値と震央距離との関係に大きなばらつきは見られず、震央距離が大きくなるにつれて最大加速度が急激に減衰していることが分かる。

最大加速度の最大値は茂原の420Gal、最小値は横須賀(EW)の24Galであり、この14の波形を用いた地盤の地震応答解析を行った場合、地盤物性の非線形性があまり現れないものからかなり非線形性が発揮されるものまで、広範囲の解析結果が得られることになる。

例として、茂原と横須賀(EW)の2波の加速度波形の時刻歴と速度応答スペクトルを図-4及び図-5に示す。

#### (4)地震応答解析結果

5タイプの地盤モデルと14波の入力地震波を用い、合計70ケースの地盤の地震応答解析を次元重複反射による等価線形解析により実施した。これらの解析から、後述する地中せん断応力の推定方法の検討に資するために、地表面応答加速度波形及び地中の

最大せん断応力分布を抽出した。また、各々の地表面応答加速度波形から最大加速度（以下  $\alpha_{max}$  と記す）及びSIを求めた。

なお、Housnerら<sup>9)</sup>の Spectrum Intensity（ここではSI<sub>0</sub>と表す）は、式(5a)に示すような地表面応答加速度波形の減衰定数20%の速度応答スペクトルにおける周期0.1秒～2.5秒間の積分値であるが、この検討における Spectrum Intensity（ここではSIと表す）は、山崎ら<sup>10)</sup>や安藤ら<sup>11)</sup>と同様に、減衰定数20%の速度応答スペクトルにおける周期0.1秒～2.5秒間の平均値として定義したもので、すなわち、式(5b)で表される値である。

$$SI_0 = \int_{0.1}^{2.5} SvdT \quad (5a)$$

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} SvdT \quad (5b)$$

解析結果から得られた  $\alpha_{max}$  及びSIと入力波の最大加速度の関係を図-6及び図-7に、また  $\alpha_{max}$  とSIの関係を図-8にそれぞれ地盤タイプ別に示す。図-6を見ると、入力波の最大加速度が大きくなると地盤の非線形性の影響により、 $\alpha_{max}$  が入力に比例して

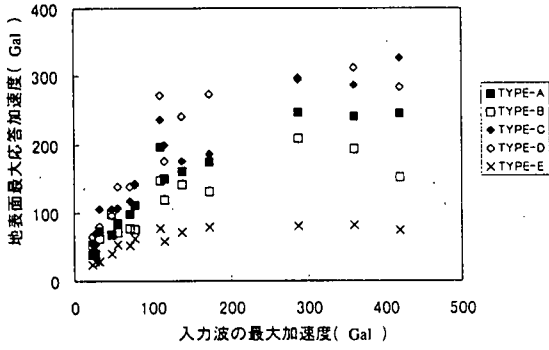


図-6 入力加速度の最大値と  $\alpha_{max}$  の関係

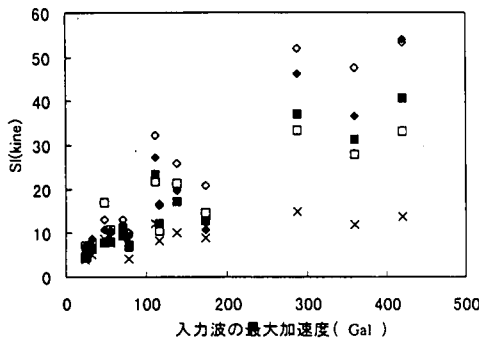


図-7 入力加速度の最大値と SI の関係

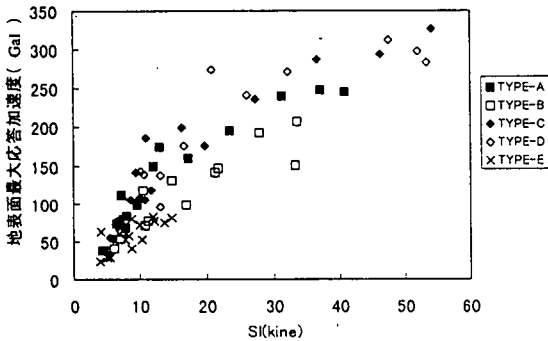


図-8  $\alpha_{max}$  と SI の関係

大きくならないために頭打ちの状態となっていることが分かる。図-7を見ると、SIにも同様の傾向が見られるが、その傾向は  $\alpha_{max}$  ほど明確ではない。このことから図-8を地盤タイプ別に見ると、 $\alpha_{max}$  と SI の比  $\alpha_{max}/SI$  (図中の各点と原点を結ぶ直線の勾配) は SI が小さい場合よりも SI が大きい場合の方が小さくなる傾向が見られる。

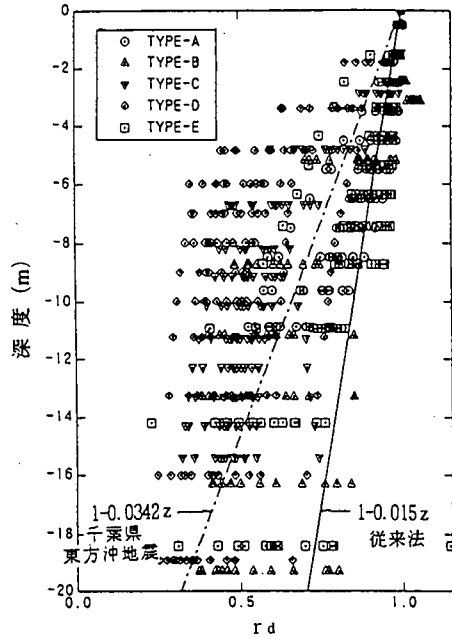


図-9 解析結果と従来法の  $r_d$  の比較

### 3. 低減係数 ( $r_d$ ) の検討

前章の解析で得られた  $\alpha_{max}$ 、 $\tau_{max}$  及び全上載圧  $\sigma_v$  から、式(6)を用いて従来の推定法で用いられるせん断応力比の低減係数に相当する  $r_d$  を求めた。

$$r_d = \frac{\tau_{max} \cdot g}{\alpha_{max} \cdot \sigma_v} \quad (6)$$

ここに、 $r_d$ : 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

$\tau_{max}$ : 各深さにおける最大せん断応力

$\alpha_{max}$ : 地表面の最大加速度

$\sigma_v$ :  $\tau_{max}$  が生じた位置の全上載圧

$g$ : 重力加速度

式(6)によって求めた  $r_d$  の全解析ケースの結果をまとめて図-9に示す。なお、これらの図は通常の液状化判定の際に対象とする深さ20mまでの結果について示している。図中には深さ20mまでの結果から最小自乗法により求めた  $r_d$  の直線近似の結果 ( $r_d = 1 - 0.0342z$ ,  $z$ : 地表面からの深さ) を示しており、また比較のために従来の  $r_d$  の深度分布 ( $r_d = 1 - 0.015z$ ,  $z$ : 地表面からの深さ)<sup>1),2)</sup> も示して

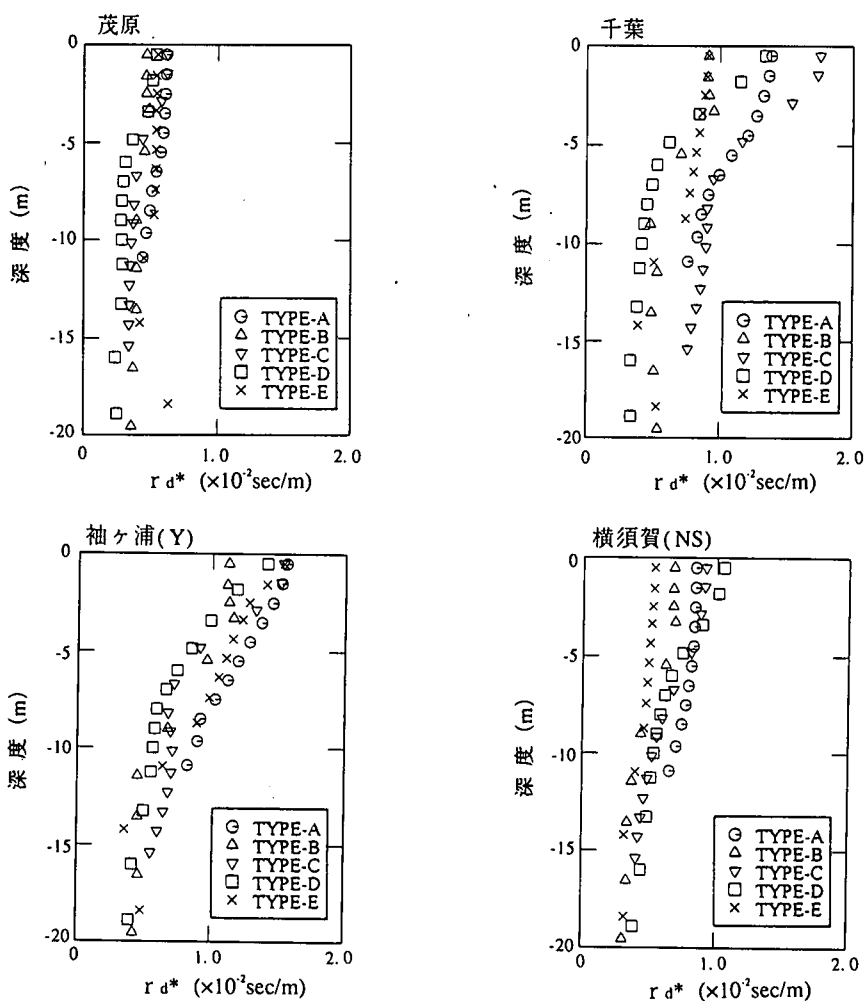


図-10 低減係数  $r_d^*$  の計算例

いる。

図-9から、地盤のタイプや入力波の違いによる  $r_d$  のばらつきはかなり大きいことが分かる。また、従来の方法による  $r_d$  は、地表面から深さ5~6m まではほぼ線形に変化し、この範囲におけるデータの密度が高い部分は従来法による  $r_d$  ともよく一致している。しかし、それ以深ではばらつきが大きくなり、従来法の  $r_d$  はこのばらつきの上限を示す様になる。解析から求められた  $r_d$  がこの様にばらついているのは、 $r_d$  が入力地震波の卓越周期や、地層構成、地盤物性及び地盤物性のひずみ依存性によって左右される地盤の固有周期によって変化する<sup>1)</sup>ためである。深い所で従来の  $r_d$  が実際よりも大きめに評価されていることから、従来の  $r_d$  を用いて地盤内のせん断応力を推定すると、せん断応力をかなり大きめに見積もることになる。

#### 4. SI を用いた繰返しせん断応力比の推定

##### (1) 推定に考慮するパラメータ

ここで、地中に生じる最大せん断応力  $\tau_{max}$  を推定するための指標として  $\alpha_{max}/SI$  という値を考えてみた。

例えば、非常に高周波成分の卓越した地震波が基盤から表層地盤に入射した場合について考えると、地表面近傍で増幅してさらに大きくなった高周波成分の影響で地表面の  $\alpha_{max}$  は非常に大きくなると考えられるが、SI の値は高周波成分の影響をあまり受けないため  $\alpha_{max}/SI$  は大きな値となる。このような状況では、 $\tau_{max}$  は地表面から浅い深さまでの間で急激に大きくなった後、それ以深はあまり増加しなくなり、 $r_d$  は急激に小さくなるはずである。逆

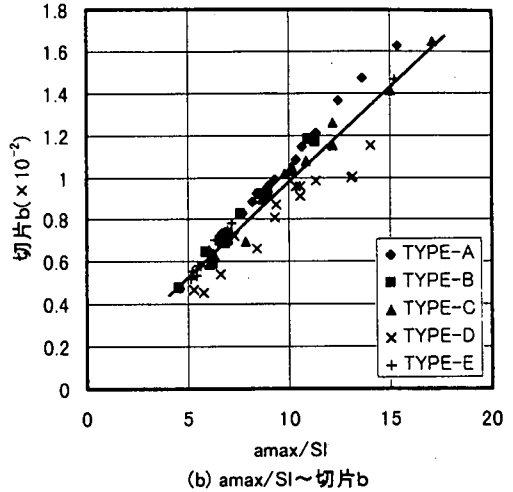
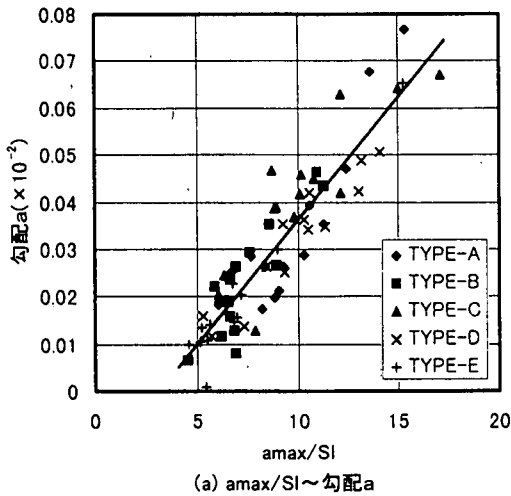


図-11  $r_d^*$ の勾配  $a$  及び地表面位置における切片  $b$  と  $\alpha_{max}/SI$  の関係

に、高周波成分をあまり含んでいない地震波が入射した場合には、 $\alpha_{max}/SI$  は小さな値となり、 $\tau_{max}$  の深度分布は三角形分布に近づいて、 $r_d$  の深さ方向の変化は小さくなるはずである。

そこで、式(6)中の  $\alpha_{max}/g$  の代わりに  $SI$  を用いた式(7)によって定義した低減係数  $r_d^*$  を計算し、その深度分布を入力地震波ごとに整理してみた。

$$r_d^* = \frac{\tau_{max}}{SI \cdot \sigma_v} \quad (7)$$

ここに、 $r_d^*$  :  $SI$  を用いた地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

$\tau_{max}$  : 各深さにおける最大せん断応力

$SI$  : Spectrum Intensity (cm/s)

$\sigma_v$  :  $\tau_{max}$  が生じた位置の全上載圧

この式による  $r_d^*$  は、式(6)の  $r_d$  のように無次元の値ではなく、速度の逆数の次元を持つが、ここでは式(7)を経験式の一つと考えている。

式(7)に基づく  $r_d^*$  の計算結果のうち、例として、茂原、千葉、袖ヶ浦(Y)及び横須賀(NS)の4入力地震波を用いた5タイプの地盤モデルに関する結果を図-10に示す。同図を見ると、同じ地震波を用いた  $r_d^*$  の深度分布は深くなるに従って小さくなるという共通した性質があり、地盤タイプによるばらつきも図-9に示した  $r_d$  ほど大きくない。

また、図-10の計算では、入力地震波の最大加速度が20Gal ~ 400Gal の範囲で変化しているにも関わらず、深さ20m 程度における  $r_d^*$  の値は地表面近傍

ほどは変化しておらず、ほぼ同程度の値となっている。これは、前述した様に、地表面近傍の地盤の  $\tau_{max}$  は地表面近傍で増幅する短周期成分の影響を受けやすい  $\alpha_{max}$  に依存しているのに対して、ある程度深い位置における  $\tau_{max}$  はこのような短周期成分の影響を  $\alpha_{max}$  ほどは受けない  $SI$  との相関が高い結果の反映と考えられる。このことは、地表面近傍では  $\alpha_{max}$  を用いて、またある程度深い位置では  $SI$  を用いることによって  $\tau_{max}$  を精度よく推定できることを示唆しているものと考えられる。

## (2) $SI$ を用いた最大せん断応力の推定方法

上記の推論を裏付けるために、 $r_d^*$  の深さ方向の分布を各解析ケースごとに直線近似し、得られた直線の勾配  $a$  及び地表面位置における切片  $b$  と指標  $\alpha_{max}/SI$  の関係について調べた。この結果を図-11に示す。

同図を見ると、 $a$  と  $b$  は  $\alpha_{max}/SI$  と非常によい相関を示すことが分かる。また、共通の震源による地震波を入力地震波にしているとはいえ、20Gal ~ 400Gal の広い加速度レベルの範囲の入力波を用いた結果であることから、この相関関係は入力レベルによらないもの、すなわち、地盤物性のひずみ依存性(非線形性)にあまり影響されないものであるといえる。なお、図-11に示した  $a$  と  $b$  の平均曲線から、 $\alpha_{max}/SI$  をパラメータとした  $r_d^*$  と深度の関係を求めると図-12に示すようになる。

以上をまとめると、最大せん断応力  $\tau_{max}$  及び最大せん断応力比  $L$  は式(8)及び式(8)から推定することが出来る。

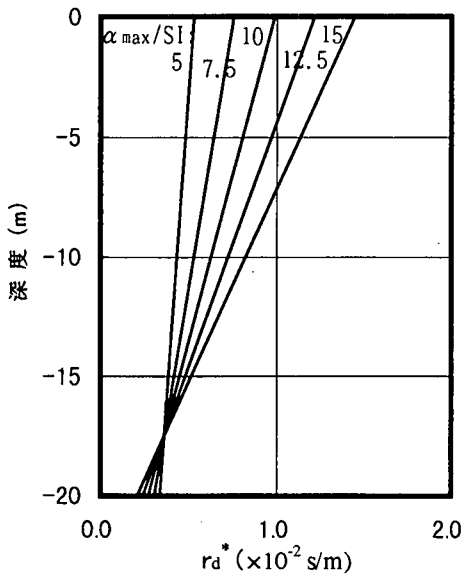


図-12  $\alpha_{max}/SI$  をパラメータとした  $r_{d^*}$  と深度の関係

$$\tau_{max} = r_{d^*} \cdot SI \cdot \sigma_v \quad (8)$$

$$L = r_{d^*} \cdot \frac{SI \cdot \sigma_v}{\sigma_v'} \quad (8')$$

ここで、 $r_{d^*} = b - a \cdot z$  ( $z$ : 地表面からの深さ)

$$a = \{0.0052 \times (\alpha_{max}/SI) - 0.0163\} \times 10^2 \quad (9)$$

$$b = \{0.0910 \times (\alpha_{max}/SI) + 0.0787\} \times 10^2$$

$\sigma_v'$ : 有効上載圧

単位体積重量が  $\gamma = 2.0 \text{ tf/m}^3$  の均一な地盤上に地表面最大加速度  $\alpha_{max} = 300 \text{ Gal}$  を想定し、SI を 30kine から 60kine まで変化させた場合の式(8)による  $\tau_{max}$  の深度分布の推定結果を図-13に示す。本研究で提案した推定法では、 $\alpha_{max}$  が一定であっても SI の違いによって深い位置における  $\tau_{max}$  が特に大きな影響を受け、SI が大きいほど  $\tau_{max}$  は大きくなる。一方、同図には従来の方によって  $\alpha_{max} = 300 \text{ Gal}$  から推定した  $\tau_{max}$  の深度分布も併せて示しているが、この方法では  $\tau_{max}$  は  $\alpha_{max}$  のみに依存するため、 $\tau_{max}$  の分布は唯一定められることになる。

図-13を見ると、今回提案法では SI が小さくなると深い位置において  $\tau_{max}$  が深さ方向に減少する傾向が見られるが、これは  $\alpha_{max}/\tau_{max}$  が大きな値となり、図-12に示すように  $r_{d^*}$  の深度分布が鉛直軸に対して急勾配となったためである。前述のように、 $\alpha_{max}/\tau_{max}$  が大きな値となるということは、表層近傍で地震波が増幅するような現象が生じている場合であると考えられることから、実際の地震応答解析結果においてもこのような  $\tau_{max}$  の分布となること

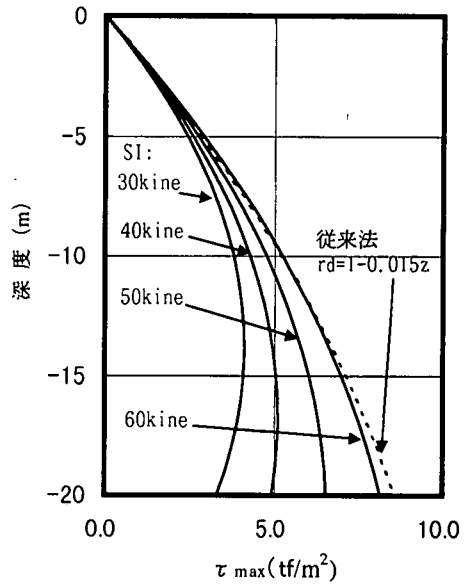


図-13  $\alpha_{max}$  を一定とし SI を変化させた時の  $\tau_{max}$  の推定値 ( $\alpha_{max} = 300 \text{ Gal}$ )

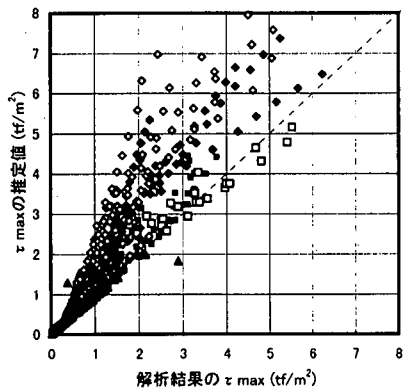
も十分考えられる。しかし、ここで提案した推定法が簡易法であることを考慮すれば、実際の適用に際しては安全側を考慮して、最大値となった深さで深さの  $\tau_{max}$  は減少させず、最大値で一定と仮定するといったような制限を設けることが適切と思われる。

前述の70ケースの地盤の応答解析結果による地表面最大加速度値  $\alpha_{max}$  を用いて従来の方により推定した地盤内の  $\tau_{max}$  と、同じ波形から求めた SI を用いて安田ら<sup>5)</sup>の方法により推定した  $\tau_{max}$ 、及び  $\alpha_{max}$  と SI の両方を用いて今回提案法により推定した  $\tau_{max}$  を、解析結果による  $\tau_{max}$  と比較して図-14～図-16に示す。

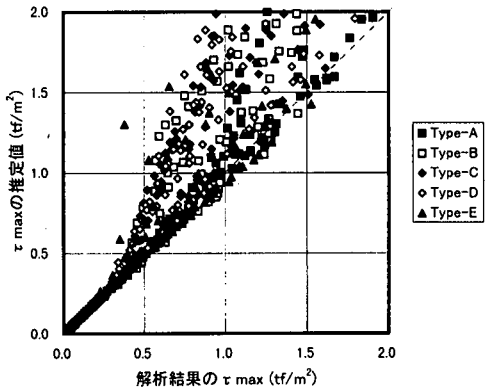
図-14を見ると従来の方では  $\tau_{max}$  が小さい範囲、すなわち地表面近傍では解析結果との対応がよいが、 $\tau_{max}$  が大きくなると次第に解析結果とかけ離れたデータが多くなっており、深度が深くなると推定精度が悪くなっていることが分かる。また、安田らの方法では、比較的大きな  $\tau_{max}$  の範囲では従来法に比べてばらつきが小さく、解析結果との対応が良くなるが、逆に  $\tau_{max}$  が小さい範囲ではばらつきが大きく、地表面近傍の領域の推定精度があまり良くない結果となっている。

これに対して今回提案法では、 $\tau_{max}$  が小さい範囲から大きな範囲まで、すなわち地表面近傍から深い深度までの全ての領域において他の推定法よりもデータのばらつきが少なく、推定精度の向上が見込めることが分かる。



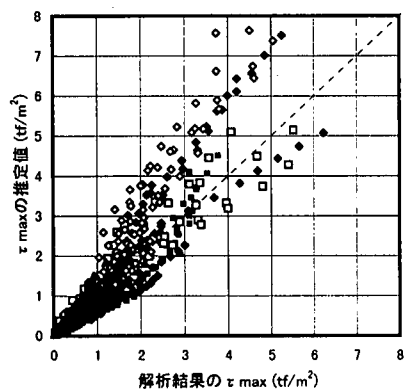


(a)全データ

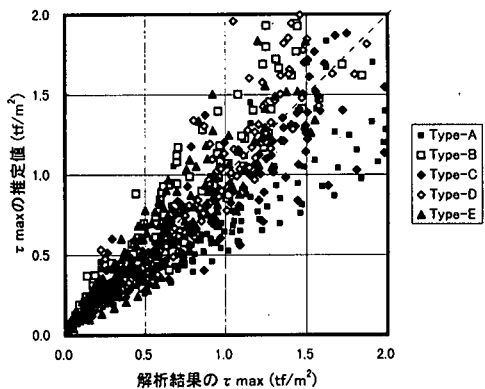


(b)  $\tau_{max}$ が $2.0\text{tf/m}^2$ までの範囲のデータ

図-14 従来法による  $\tau_{max}$  の推定値と解析結果の比較

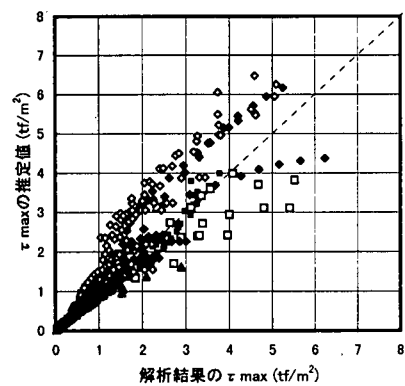


(a)全データ

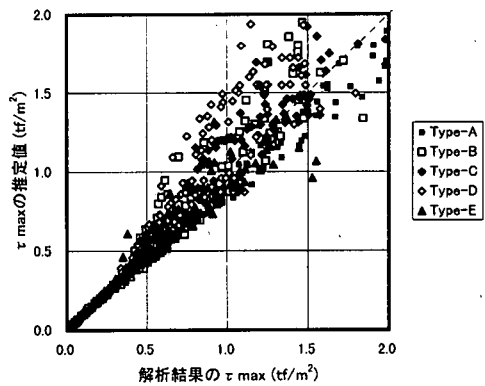


(b)  $\tau_{max}$ が $2.0\text{tf/m}^2$ までの範囲のデータ

図-15 安田ら<sup>9)</sup>の方法による  $\tau_{max}$  の推定値と解析結果の比較



(a)全データ



(b)  $\tau_{max}$ が $2.0\text{tf/m}^2$ までの範囲のデータ

図-16 今回提案法による  $\tau_{max}$  の推定値と解析結果の比較

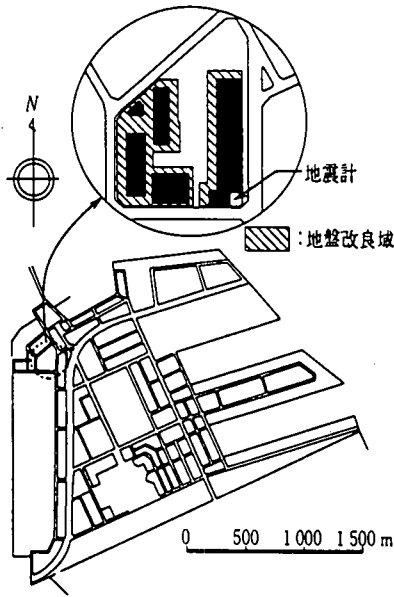


図-17 ポートアイランド第1期造成地平面図と地震計設置位置図<sup>8)</sup>

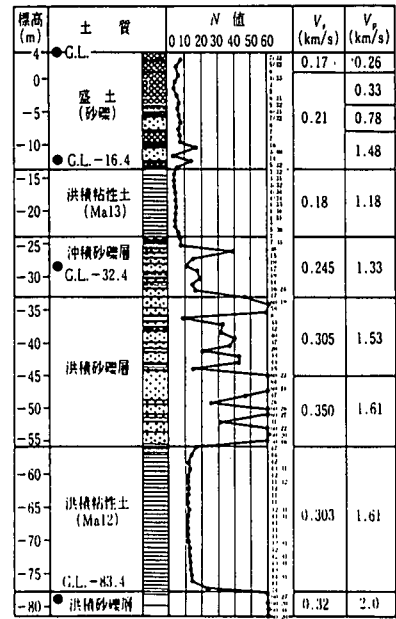


図-18 地震観測位置の柱状図<sup>8)</sup>

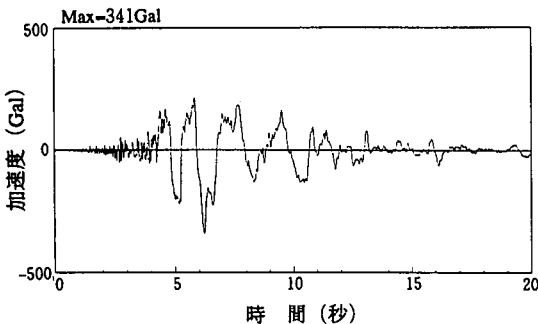


図-19 ポートアイランドの地表面加速度記録(NS)

## 5. 実地震への適用例

前章では、千葉県東方沖地震 (1987) の観測結果を用いて  $\tau_{max}$  の簡易推定式を導いた。ここでは、この結果を他の実際の地震及び地盤の条件に適用し、その適用性を検討する。

### (1) 推定に用いた観測地震波

検討には、兵庫県南部地震 (1995) の際にポートアイランドにおいて観測された地震波と、第二鹿児島県北西部地震 (1997) において川内市及び阿久根市で観測された地震波を用いた。

ポートアイランドにおいて神戸市により鉛直アレ

ー観測記録が得られた観測位置は、図-17に示すようにポートアイランドの北西部に位置している。観測地点のある敷地内の建物近傍には液状化対策が施されており、液状化被害はなかったとされている<sup>13)</sup>が、観測位置は敷地の東南端に位置し、この部分は対策は施されておらず、液状化が発生したと想定されている<sup>7)</sup>。地震観測位置の柱状図を図-18に示す。厚さ約18mの盛土(埋立地盤)はまさ土である。この地点で観測された地表面の加速度記録(NS)は図-19に示すとおりであり最大加速度  $a_{max}$  は341Galである。

阿久根市の観測点は、図-20に示すように阿久根市役所内に設置されており、阿久根新港、阿久根港のやや南に位置している。被害調査<sup>14)</sup>によると、「阿久根新港及び阿久根港では、主に3月26日の第一地震によって液状化によると思われる護岸の被害や噴砂が若干見られ、5月13日の第二地震によってさらにクラックや沈下が大きくなったが、市役所周辺では特に液状化の痕跡は認められず、建物の被害もなかった。」と記述されている。地震観測位置の柱状図を図-21に示す。GL-約5m~10mの間にN値が6~10程度の砂層が存在する。この地点で観測された地表面の加速度記録(NS)は図-22に示すとおりであり最大加速度は156Galである。

川内市の観測点は、市の中心部にある川内市役所隣の向田公園内に設置されており、被害調査<sup>14)</sup>によ

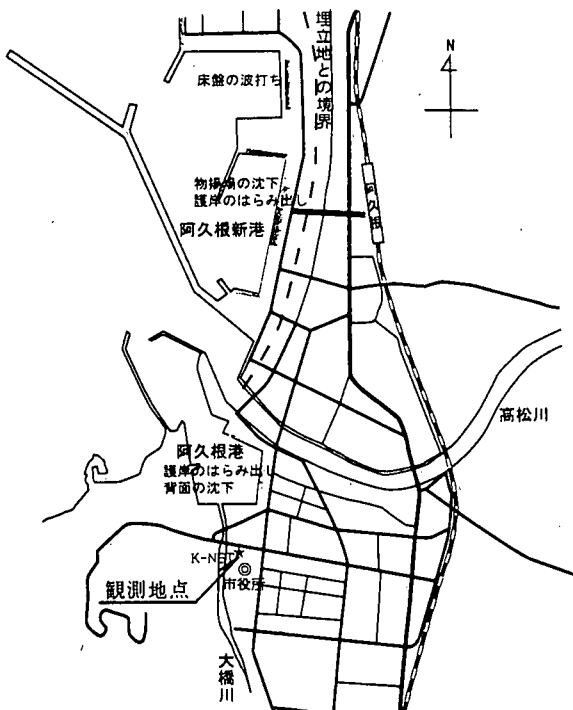


図-20 阿久根観測地点 (k-net) の位置<sup>14)</sup>

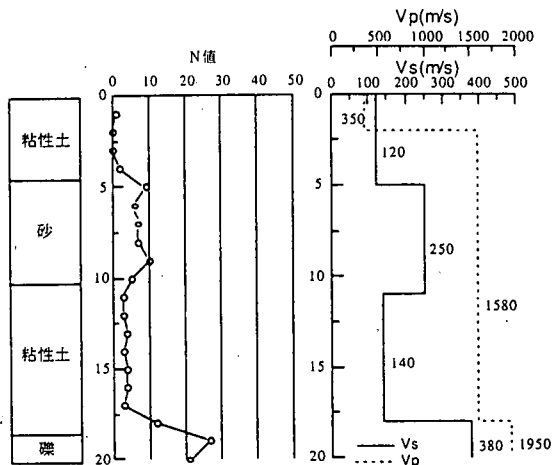


図-21 阿久根観測地点における地盤構造<sup>14)</sup>

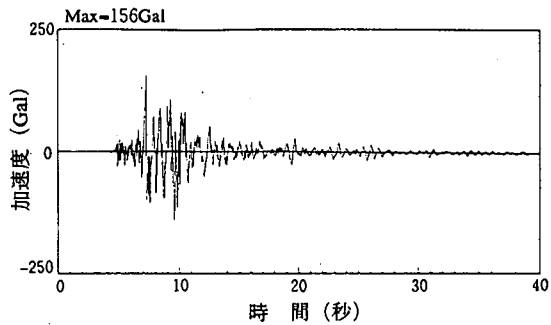


図-22 阿久根観測地点の地表面加速度記録(NS)

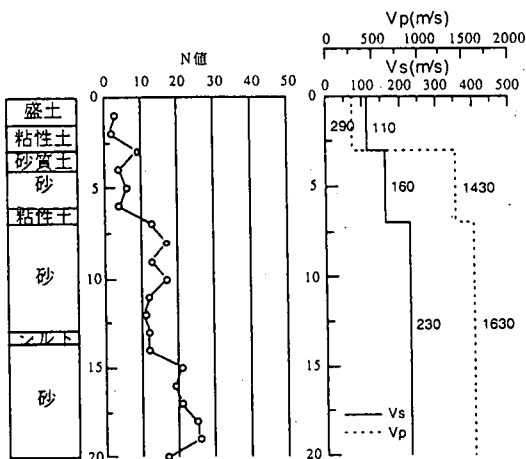


図-23 川内観測地点における地盤構造<sup>14)</sup>

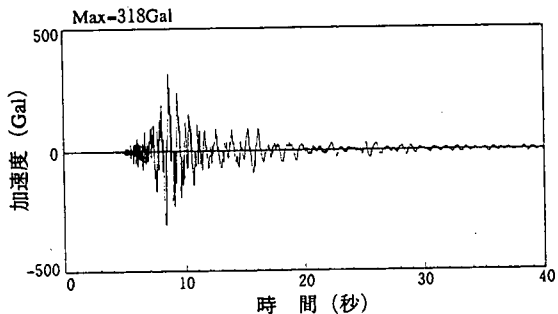


図-24 川内観測地点の地表面加速度記録(EW)

表-3 3加速度記録の  $\alpha_{max}$ , SI 及び  $\alpha_{max}/SI$

	ホートアイランド*	阿久根	川内
$\alpha_{max}$ (Gal)	341	156	318
SI (kine)	71	20	38
$\alpha_{max}/SI$	4.8	7.8	8.4

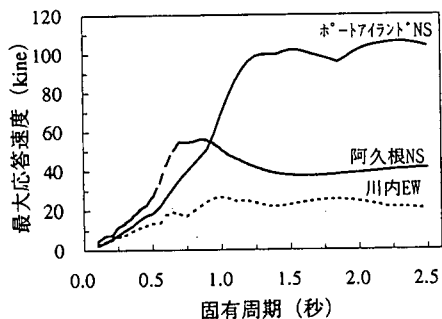


図-25 3加速度記録の速度応答スペクトル(h=20%)

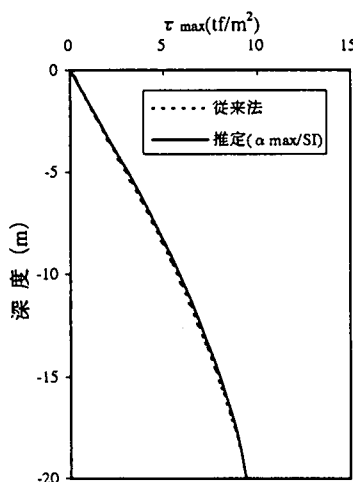


図-26  $\tau_{max}$ の推定  
(ポートアイランド NS)

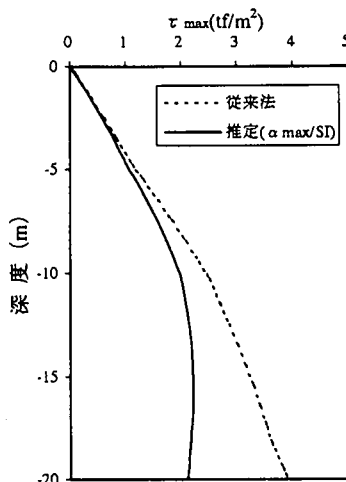


図-27  $\tau_{max}$ の推定  
(阿久根 NS(5/13))

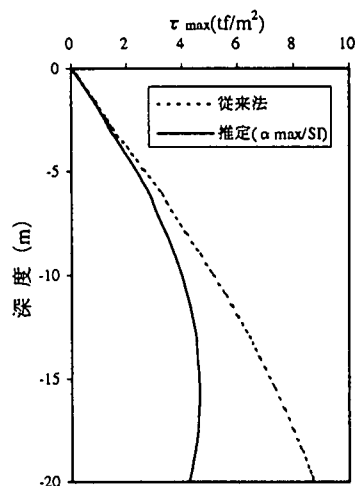


図-28  $\tau_{max}$ の推定  
(川内 EW(5/13))

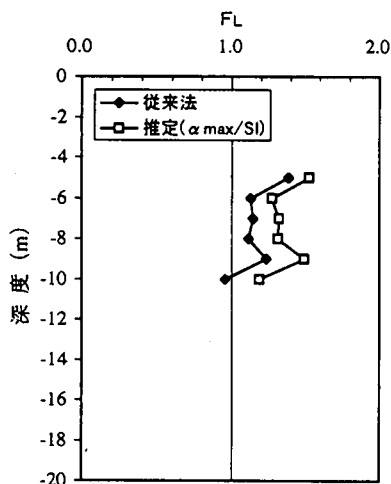


図-29 従来法と今回提案法のFLの比較  
(阿久根 NS(5/13))

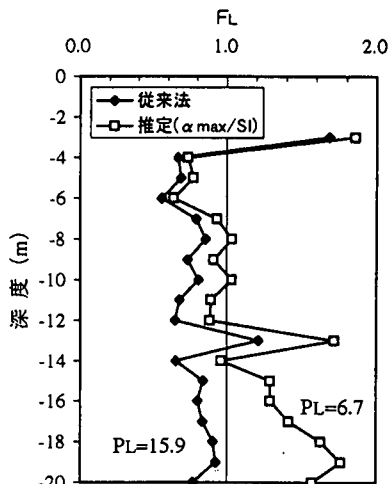


図-30 従来法と今回提案法のFLの比較  
(川内 EW(5/13))

ると、「この地域では顕著な被害はなかったが、公園の周囲では道路脇の舗装の隙間から若干砂が吹き出しているように見えた。」と記述されている。地震観測位置の柱状図を図-23に示す。GL-4m ~ -6mの間にN値が4~6の緩い砂層があり、GL-7m ~ -14mにはN値10以上、それ以下にはN値20以上の砂層が続いている。この地点で観測された地表面の加速度記録(EW)は図-24に示すとおりであり最大加速度は318Galである。

これらの3波の $\alpha_{max}$ とSI及び $\alpha_{max}/SI$ の値を表-3に、また、SI値の元となった減衰20%の速度応答スペクトルを図-25に示す。表-3を見ると、ポートアイランドと川内市の $\alpha_{max}$ はともに300Galを越える

大きな加速度値でほぼ同じ値となっているが、固有周期が1秒程度以上のSI値はポートアイランドの波形の方が圧倒的に大きく、約2倍の値となっている。その結果、 $\alpha_{max}/SI$ の値はポートアイランドで4.8、川内市で8.4とかなりの差が生じている。

## (2) $\tau_{max}$ の推定

表-3に示した $\alpha_{max}$ の値と深さ方向の低減係数 $r_d$ ( $r_d=1-0.015z$ ,  $z$ :深さ)を用いて従来の方法で推定した $\tau_{max}$ の深度分布と、SI及び $\alpha_{max}/SI$ の値を式(8)式に適用して推定した $\tau_{max}$ の深度分布を比較し図-26~図-28に示す。なお、この $\tau_{max}$ の推定に際して、地盤の単位体積重量はポートアイラン

ドの地盤については図-18に示された値をそのまま用いた。阿久根市と川内市の地盤については土質名から推定した。

図-26を見ると、兵庫県南部地震におけるポートアイランドの記録では、本研究による推定の方が従来法による推定よりもわずかに大きな値となっているが、両者にほとんど差はない。一方、阿久根市の図-27と川内市の図-28を見ると、地表から GL-3m 程度までは両者に大きな差はないが、それ以深で次第に差が大きくなっている。

### (3) $F_L$ の推定

上記で推定した  $\tau_{max}$  の深度分布のうち、従来の推定法と本研究の推定法で差が見られた第二鹿児島県北西部地震における阿久根市の結果(図-27)及び川内市の結果(図-28)を有効上載圧で除して地震時せん断応力比  $L$  を求め、 $N$  値から道路橋示方書<sup>1)</sup>の方法で動的せん断強度比  $R$  を求めて、液状化に対する抵抗率  $F_L (=R/L)$  を算出した。この結果を図-29及び図-30に示す。同図中には液状化指数  $P_L$  も示している。

なお、この  $F_L$  の推定に当たり、地下水位については、図-21及び図-23に示された  $V_p$  の結果から、阿久根市の観測地点で GL-2.0m、川内市の観測地点で GL-3.0m と仮定した。また、液状化判定の対象となる砂については、 $N$  値から推定されるよりも大きな  $V_s$  の値を示す傾向があることから細砂と仮定し、平均粒径  $D_{50}$  を 0.15mm、細粒分含有率  $FC$  を 30% と仮定した。

図-29に示した阿久根市観測地点の結果を見ると、従来法の推定では GL-10m の深さで  $F_L < 1.0$  となっているが、本研究による推定では全て  $F_L > 1.0$  となっている。また、図-30に示した川内市観測地点の結果を見ると、従来法の推定では GL-4.0m 以深の砂層は全て液状化しており、 $P_L$  の値も 16程度と、かなりの液状化被害が予想される結果になっている。これに対して、本研究による推定では、GL-4.0m ~ -14m の間の一部で  $F_L < 1.0$  となる部分が見られるものの、GL-7m ~ -14m では  $F_L$  は 1.0前後の値となっており、 $P_L$  の値も 7程度とそれほど大きな値にはなっていない。

以上の3つの事例から、本手法の適用により、従来法に比べてより実状に近い液状化予測を行うことが出来たものと思われる。

## 6. まとめ

本研究では、 $SI$  を用いて地中の最大せん断応力

$\tau_{max}$  及び液状化判定に用いるせん断応力比  $L$  を精度良く推定する方法について検討した。

地震波の卓越周期、地盤特性及び地盤物性の非線形性の程度の違いが地中せん断応力の推定精度を低下させているのではないかという問題点に対して、 $\alpha_{max}/SI$  という指標を持ち込むことにより、簡易推定法の域において推定精度を向上させる見通しが得られたものと思われる。

提案した手法の適用方法としては、例えば、広域の被害想定を特定の震源に対して行う場合に、震源の性質から地震波の性質を特定し、予め地表面の最大加速度マップと  $SI$  マップを解析結果等に基づいて作成しておき、この結果から液状化マップを作成することが考えられる。また、地震発生の際に地表面の加速度観測記録から即座に  $\alpha_{max}$  及び  $SI$  を求めて、リアルタイムで液状化判定を行うことが考えられる。この場合についても、地表面における加速度観測記録という同じ情報源から得られる2つの情報 ( $\alpha_{max}$  と  $SI$ ) 及び地層構成と単位体積重量のみから液状化判定が可能であり、基盤の位置、地盤の  $V_s$  やせん断剛性  $G$  等の地盤の変形特性といったデータは不要である。ただし、この場合、当然のことながら、精度の良い液状化強度の推定法は別途必要となる。

謝辞：本研究の実施に当たり、第二鹿児島県北西部地震の記録及び観測地点の地盤調査データについては、科学技術庁により設置された地震計 ( $k$ -net) の情報としてインターネットを通じて入手し使用させていただきました。ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，1990。
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，1988。
- 3) Seed, H.B. and Idriss, I.M.: Analysis of Soil Liquefaction: Niigata Earthquake, *J.SMFD*, ASCE, Vol.93, No.SM3, pp.83-108, 1967。
- 4) Housner, G. W. and Jennings, P. C.: Generation of Artificial Earthquakes, *J. EMD*, ASCE, Vol.90, No.EM1, pp.113-150, 1963。
- 5) 安田進, 吉川洋一, 牛島和子, 石川利明:  $SI$  値を用いた液状化予測手法, 第28回土質工学研究発表会講演集, pp.1325~1328, 1993。
- 6) 澤田純男, 土岐憲三, 中村純二: 応答スペクトルを用いた液状化判定法, 第23回地震工学研究発表会講演概要集, pp.675-678, 1995。
- 7) 佐藤正行, 黒瀬浩公, 安田進, 増田民夫, 悦永賢司: 液状化判定における地中せん断応力の推定方法に関する一考察, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要/I, pp.1388-1389, 1993。
- 8) 吉田望: 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎, Vol. 33, No. 10, pp.

- 39-53, 1995.
- 9) Ohsaki, Y. and Sakaguchi, O.: Major Types of Soil Deposits in Urban Areas in Japan, *Soils and Foundations*, 1973.
  - 10) 東京電力(株)構築物合理化タスク技術チーム:構築物合理化タスク技術チーム 技術資料, 1986.
  - 11) 山崎勝幸, 佐藤暢彦, 大保直人, 片山恒雄:SI 値による地震動強さの評価, 土木学会第31回年次学術講演会講演概要集/ I, pp.1023-1024, 1986.
  - 12) 安藤陽一, 山崎文雄, 片山恒雄:構造物損傷と地震動強さ指標の関係, 土木学会第35回年次学術講演会講演概要集/ I, pp.1290-1291, 1990.
  - 13) 不動建設:平成7年(1995年)兵庫県南部地震調査速報集, 1995.
  - 14) 佐藤工業(株)中央技術研究所:第二鹿児島県北西部地震被害調査報告, 1997.

(1997.12.24受付)

## SIMPLIFIED METHOD FOR ESTIMATING MAXIMUM SHEAR STRESS IN THE GROUND DURING EARTHQUAKES

Masayuki SATO, Susumu YASUDA, Nozomu YOSHIDA and Tamio MASUDA

A simplified procedure for estimating the maximum shear stress in the ground during earthquakes was proposed. In the procedure, the same parameters as conventional method and supplemental parameter SI were used and no precise parameters such as stiffness of the ground or depth of the base ground was necessary. In order to clarify the validity of the procedure, maximum shear stress ratios and liquefaction potentials were estimated for actual ground profiles of Port Island in Kobe-city, Akune-city and Sendai-city in Kagoshima-prefecture by using accelerograms recorded at the surface of each locations, and the results were compared with that of the conventional method.