

# 地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係

末富岩雄<sup>1</sup>・澤田純男<sup>2</sup>・吉田望<sup>1</sup>・土岐憲三<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

<sup>2</sup>正会員 工博 京都大学助教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup>フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

兵庫県南部地震の際に鉛直アレーで観測されたように、強震時には地盤はそのせん断強度以上のせん断力を上層に伝えることができないので、地表での地震動には上限値が存在する。その関係を明らかにするために、H-Dモデルによる非線形解析を内部摩擦角をパラメータとして実施した。その結果、1)最大加速度、計測震度、SI値には上限値が存在する、2)その値は内部摩擦角によって支配され、正接と上限値はほぼ比例関係にある、3)せん断強度が小さい中間弱層により上限値は支配され中間弱層の位置が深く層厚が厚いほど影響が大きい、ということがわかった。

**Key Words :** strong ground motion, shear strength, nonlinear analysis, upper limit of ground motion

## 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降、レベル2地震動を考慮した体系に各種設計指針が改訂されつつある。レベル2地震動とは、当該地点周辺の活断層や歴史地震に基づいて考慮される最大級の地震動である。震源断層を想定して、構造物の耐震設計や被害想定のための地震動予測も行われている<sup>1)</sup>。数値シミュレーションを行うためには、深部地下構造の詳細情報や破壊開始点、アスペリティ分布等の震源パラメータが必要である。これらのパラメータは結果に大きく影響するにもかかわらず、事前に予測することは困難である。活断層や地下構造に関する情報も不十分であり、レベル2地震動の設定には課題も多い。

一方、1995年兵庫県南部地震の際、ポートアイランドの鉛直アレーで埋土の液状化により地表での加速度が地中での加速度よりも小さくなる現象が観測された。地盤がそのせん断強度以上のせん断力を上層に伝えることができないためである<sup>2)</sup>。つまり、地盤のせん断強度に起因して地震動には上限値が存在することが考えられる。もし、上限値が存在するとすれば、地盤条件による上限値を把握することにより、レベル2地震動を考慮した耐震設計を合理化することができる可能性がある。

1995年兵庫県南部地震の際には、地震被害情報の収集が遅れ、その後の国・自治体等の救助・救援活動の遅れを招いたという反省から、地震防災システムの開発・改良が様々な機関により進められている。

高精度の地震動分布推定を行うためには、密な地震計配置と表層地盤増幅度を精度良く評価することが必要である。地盤の非線形性を考慮することが重要であり、地盤のせん断強度に起因する上限値が存在するならば、これを反映して精度を高める必要がある。

地盤の非線形化の影響に関しては、極めて大きな地震動のもとでは、硬質地盤での最大加速度の方が軟弱地盤でのそれより大きくなるという研究は、これまでに行われている<sup>3),4)</sup>。しかしながら、上限値にまで言及した研究はこれまで行われていない。上限値が存在するならば、上述のように耐震設計と地震防災システムの2つの目的において重要である。

本研究では、内部摩擦角をパラメータとしてせん断強度を与えた簡易な地盤モデルについて、地盤の非線形地震応答解析を行い、地震動代表値の上限値を評価する。また地震動代表値による非線形特性の差異を把握し、パラメータ・スタディにより、地震動上限値への影響因子を抽出する。最後に、実務へ適用するためには、中間軟弱層の影響が重要であることから、中間軟弱層の深度や層厚の影響について検討を行う。

## 2. 解析方法と解析条件

本論で目的としている地盤の強度が地震動へ与える影響を捉えやすくするために、単純化した地盤モデルを用いた解析を行う。まず、表層地盤は砂の水

平成層地盤とし、これを一次元モデル化し解析を行う。水平成層地盤でなくても一次元解析で地盤の挙動が表現できることは多いので、この仮定は実用上の目的からは許容されると考えられる。

解析のパラメータとして、地盤の層厚、S波速度、および内部摩擦角を選び、その他の地盤条件と合わせて、表-1のように設定する。すべてのパラメータの組み合わせに対して計算を行うので、計60の計算を行うことになる。なお、実地盤であれば、S波速度と内部摩擦角は独立とは言えないが、ここでは議論がしやすいように独立なパラメータとして扱っている。また、10度以下の内部摩擦角の砂も実在しないと考えられるが、液状化などで強度が低下する効果を表現するためにパラメータに加えている。

解析は、非線形の応力-ひずみ関係を用いた逐次積分による全応力地震応答解析である。したがって液状化のような複雑な現象は表現できないが、前述のように小さい内部摩擦角に対する計算を行うことにより、定性的な地盤震動の性格は捉えられると考えられる。応力-ひずみ関係として、砂の動的変形特性特性として、実用的にも使われることが多い、Hardin-Drnevichモデルを用いる<sup>3)</sup>。このモデルでは、割線せん断定数  $G$  と等価減衰定数  $h$  は次式で表される。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}}, \quad \frac{h}{h_{max}} = \left(1 - \frac{G}{G_0}\right) \quad (1)$$

ここで基準ひずみ  $\gamma_r$  は、せん断強度  $\tau_{max}$  とせん断弾性定数  $G_0$  を用い、 $\gamma_r = \tau_{max} / G_0$  で与えられる。砂地盤では、 $\tau_{max} = \sigma'_v \tan \phi$  と表される ( $\sigma'_v$ : 有効拘束圧) ので、 $\phi$  と  $G_0$  を与えれば、 $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$  関係が決定される。 $G_0$  についても拘束圧依存性を考慮し、深度 5m で表-1に示した所定のS波速度となるようにすれば、

$$G_0 = G_n \cdot \left(\frac{\sigma'_v}{\sigma_n}\right)^{0.5} \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_n$  は基準深さ (5m) での上載圧、 $G_n$  は基準深さでのせん断弾性定数である。

式(1)から非線形の応力-ひずみ関係を構築する方法は、文献 6) による。この方法では、 $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$  関係を完全に満足する応力-ひずみ関係が得られる。所定のS波速度を与える深度 5m での  $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$  関係を図-1に示す。内部摩擦角  $\phi$  により、動的変形特性が大きく変化する。特に、 $\phi$  が小さくなると  $G$  と  $h$  の変化は大きい。解析では、一次固有振動数で 0.5% とする剛性比例減衰を導入している。

入力地震波として、1995年兵庫県南部地震時のポ

表-1 地盤条件

単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	18
S波速度 (m/s)	100, 150, 200, 250
内部摩擦角 $\phi$ (°)	5, 10, 20, 30, 40
最大減衰定数 $h_{max}$ (%)	22
層厚 (m)	10, 20, 30
地下水位	GL-3.0m
基盤 S 波速度(m/s)	350

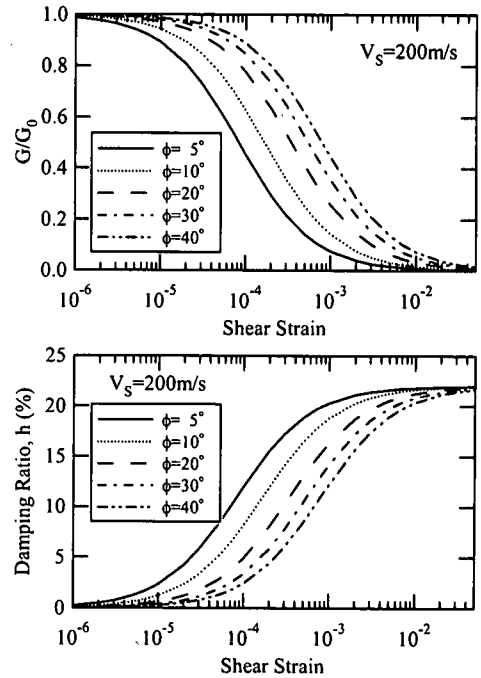


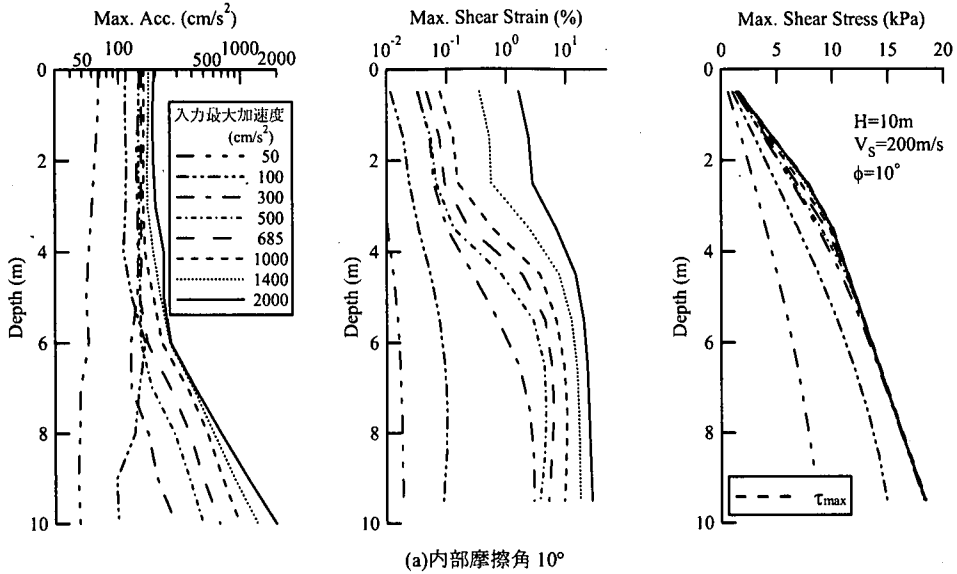
図-1 H-Dモデルによる  $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$  関係の例

ートアイランド GL-83m における観測記録 (NS 成分) を用いる。地中観測波は入射波 E と反射波 F の和であり、反射波は表層地盤の影響を受けているので、入射波 E を抽出した工学的基盤入射波 (最大加速度 343 cm/s<sup>2</sup>) を用いる<sup>4)</sup>。これを解放基盤複合波 2E 波で 50~2000cm/s<sup>2</sup> まで振幅調整して入力する。地中基盤での値は、この値と一致しない。なお、入力地震動特性が解析結果に影響する可能性もあるので、他の観測波を用いた場合の考察も後で行う。

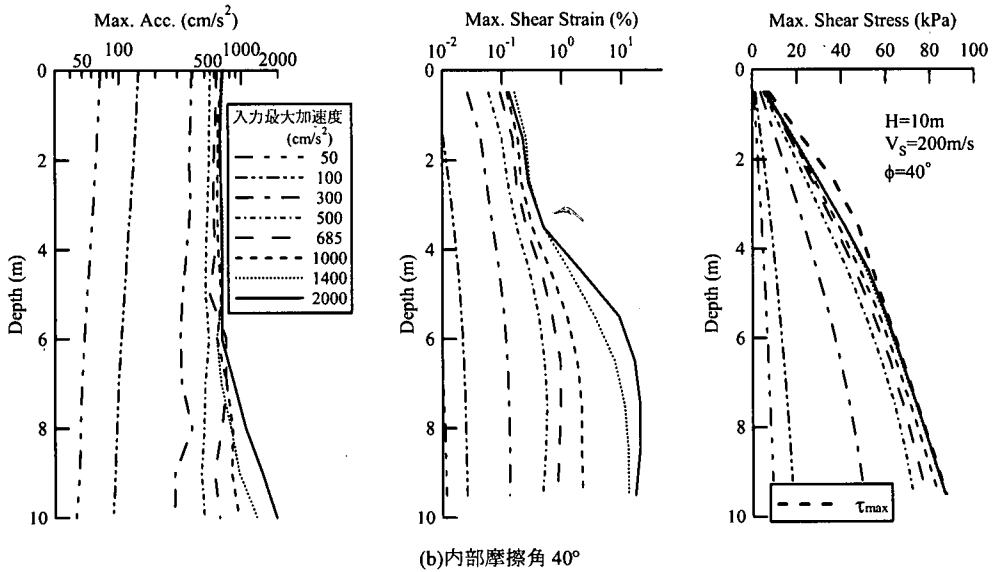
### 3. 解析結果と考察

#### (1) 最大加速度等の鉛直分布

最大加速度、最大せん断ひずみ、最大せん断応力の鉛直分布を、内部摩擦角  $\phi$  が 10° と 40° の場合について図-2に示す。 $\phi=10^\circ$  の場合、最大加速度は深度 4m 以浅では入力加速度によらず一定であり、せん



(a)内部摩擦角  $10^\circ$



(b)内部摩擦角  $40^\circ$

図-2 最大加速度，最大せん断ひずみ，最大せん断応力の鉛直分布（層厚 10m，S 波速度 200m/s）

断応力も基盤から深度 10m までのほぼ全層でせん断強度に達している。一方，最大せん断ひずみは入力加速度が大きくなるにつれて大きくなっている。

$\phi=40^\circ$  の場合，最大せん断応力がせん断強度に達するのは，入力最大加速度が  $1000\text{cm/s}^2$  以上の場合であり，その場合でも 4m 以浅では最大せん断応力はせん断強度より小さい。 $\phi=10^\circ$  の場合より大きなせん断力が上層に伝わっているので，地表での最大加速度は  $600\sim 700\text{cm/s}^2$  と  $\phi=10^\circ$  の場合より大きい。

$10^\circ$  のケースにおける応力-ひずみ関係（深度 4.5m 位置）を示す。入力最大加速度（2E 波，以下同様）が  $200\text{cm/s}^2$  では，最大せん断応力は図中に破線で示したせん断強度  $\tau_{max}$  より小さく，非線形化の初期段階である。入力最大加速度が  $500\text{cm/s}^2$  では最大せん断応力がせん断強度に達している。さらに，入力加速度が大きくなると，せん断応力はせん断強度  $\tau_{max}$  で頭打ちとなり，せん断ひずみのみが次第に大きくなる。

### (2) 応力-ひずみ関係

図-3 に層厚 10m，S 波速度 200m/s，内部摩擦角

### (3) 地表における加速度波形

種々の入力加速度に対する地表面加速度波形を

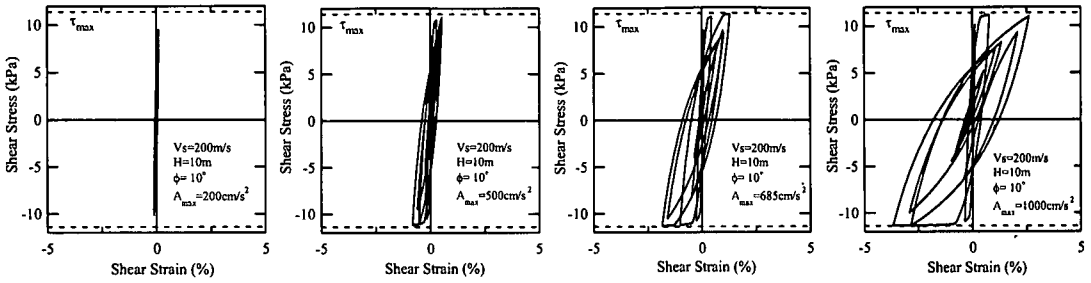


図-3 入力レベルによる応力-ひずみ関係の変化  
(層厚 10m, S 波速度 200m/s, 内部摩擦角 10° の場合)

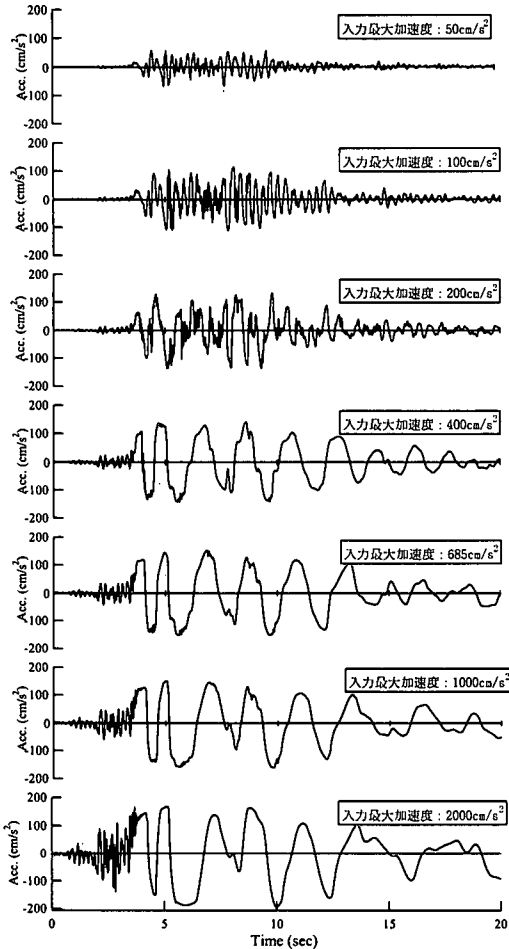


図-4 地表面における加速度波形  
(層厚 10m, S 波速度 200m/s, 内部摩擦角 10°)

図-4 に示す。最大せん断応力がほぼせん断強度と等しくなる、入力加速度が 400cm/s<sup>2</sup> より大きくなっても、地表の最大加速度は変わらないが、その上限加速度が作用する時間は長くなっている。

#### (4) 最大加速度とせん断強度の関係

最大せん断応力がせん断強度に達した位置より上

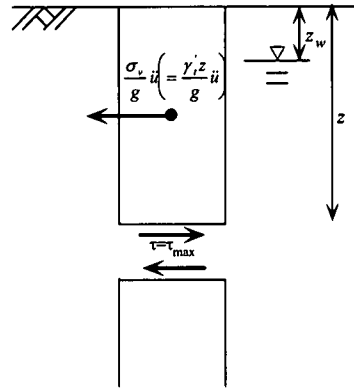


図-5 せん断強度に達した時の土柱に作用する応力

の土柱の力の釣り合いを考えると (図-5) ,

$$\frac{\sigma_v \ddot{u}}{g} = \sigma_v' \tan \phi \quad (3)$$

$g$  は重力加速度である。静的には側圧がかかるが、左右対称であるので、ここでは無視している。式(3)より、加速度  $\ddot{u}$  は式(4)で表され、最大せん断応力がせん断強度に達した状態での最大加速度は一定値となることがわかる。

$$\ddot{u} = \frac{\sigma_v'}{\sigma_v} g \tan \phi \quad (4)$$

この  $\ddot{u}$  はせん断強度に達した位置より上の平均的な加速度であり、地表の加速度ではない。この層より上の自由振動の分は変動がある。これに加え、Rayleigh 減衰による力の伝播があり、この両方で式(4)からのずれが生じる。

#### (5) 内部摩擦角の影響

入力最大加速度が 685cm/s<sup>2</sup> の場合について、内部摩擦角を 5, 10, 20, 30, 40° に設定したケースの応力-ひずみ関係の比較を図-6 に示す。内部摩擦角が 5, 10° の場合にはせん断応力がせん断強度に達し、大きなせん断ひずみが生じているのに対し、30, 40°

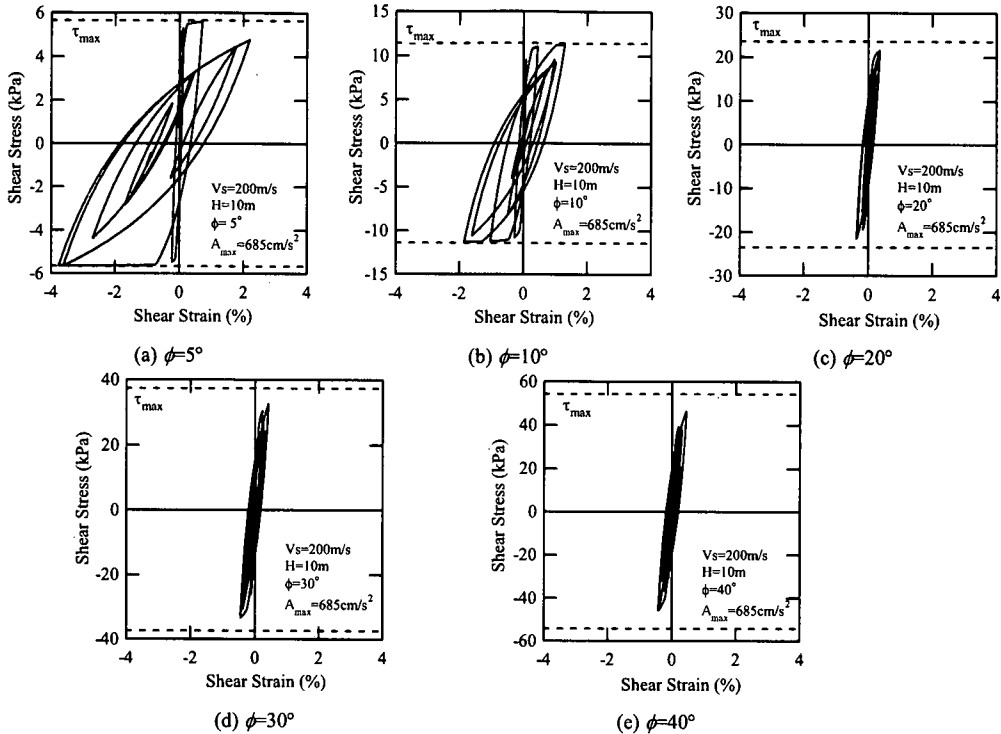


図-6 内部摩擦角の影響 (S波速度 200m/s, 層厚 10m, 振幅調整なしの場合)

の場合には非線形化による剛性低下と履歴のふくらみは見られるものの、せん断強度が大きいためせん断応力はせん断強度に達していない。他の条件が同じでも内部摩擦角により応力-ひずみ関係が大きく異なることがわかる。

#### (6) 最大加速度の上限值

層厚 10m の場合の入力最大加速度と地表最大加速度の関係を図-7 に示す。いずれの場合も上限加速度が存在し、その値は内部摩擦角と対応しており、S波速度の影響は小さいことがわかる。S波速度 200m/s で層厚を変えた場合の関係を図-8 に示す。層厚の影響も小さく、内部摩擦角が上限加速度を支配していることがわかる。一部に山谷も見られるが、これは顕著な非線形化を生じる前に最大値が現れる場合があるなど、加速度のピーク値が不安定な性質を有することによる。なおここでは、S波速度と内部摩擦角を独立に与えており、S波速度は卓越周期のみに影響し、せん断強度に影響しない設定となっている。したがって、図-8 の結果は、正確に言えば、卓越周期が上限加速度に及ぼす影響は小さく、せん断強度が支配的であるということである。実際の地盤では、内部摩擦角とS波速度には明瞭な相関関係があるので、S波速度と加速度上限値には相関関係が存在すると考えられる。

#### (7) 各種地震動代表値の上限值

層厚 10m, S波速度 200m/s の場合の計測震度, SI 値, 最大速度, 最大変位についての関係を図-9 に示す。計測震度, SI 値に関しては最大加速度と同様に内部摩擦角に応じた上限値が存在している。なお, (b) の計測震度は対数値であるので, 増幅度は差で表される。一方, 最大速度, 最大変位については, 必ずしも頭打ちとはなっていない。むしろ内部摩擦角が 30~40° の場合には, 卓越周期が伸びることにより増幅度が大きくなる傾向が見られる。すなわち構造物に作用するエネルギー量は入力地震動が大きくなるほど大きくなると思われる。SI 値と最大速度は, 入力値と地表値が比例関係にある間はよく対応しているが, SI 値が上限値に達した後では, 全く異なった特性を示している。SI 値は速度応答スペクトルの周期 2.5 秒までの成分を用いて計算され, 通常観測される地震動では SI 値と最大速度は良く対応する。この場合, 入力地震動にも比較的周期が長い成分が含まれており, さらに地盤の非線形化が顕著になって周期が長い成分が増幅されることにより, 周期 2.5 秒以上の成分の割合が大きくなり, SI 値と最大速度は対応しなくなっていると考えられる。

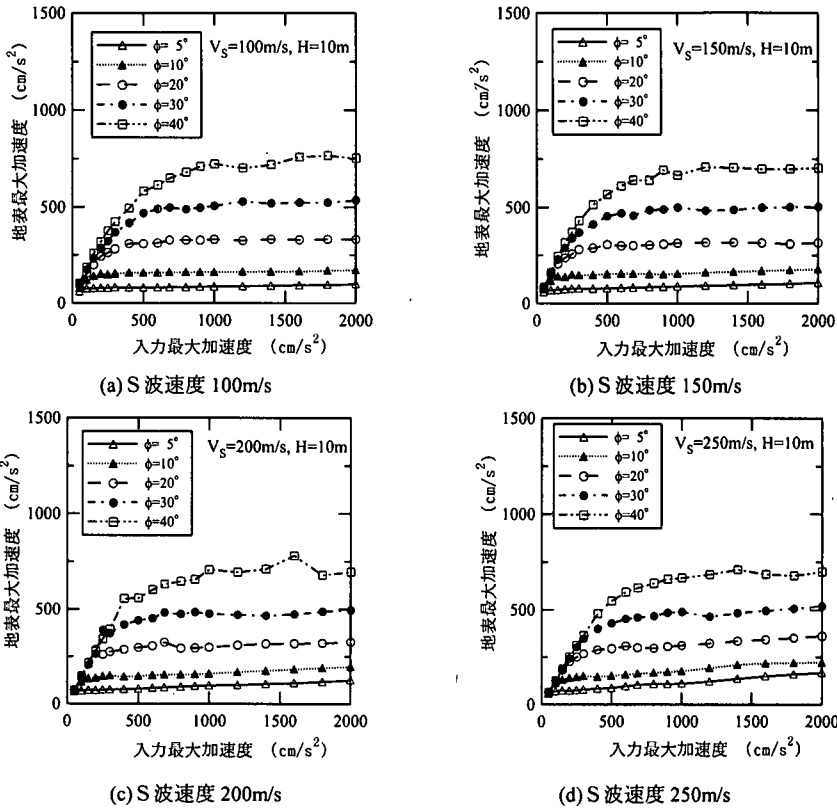


図-7 入力最大加速度と地表最大加速度の関係 (層厚 10m)

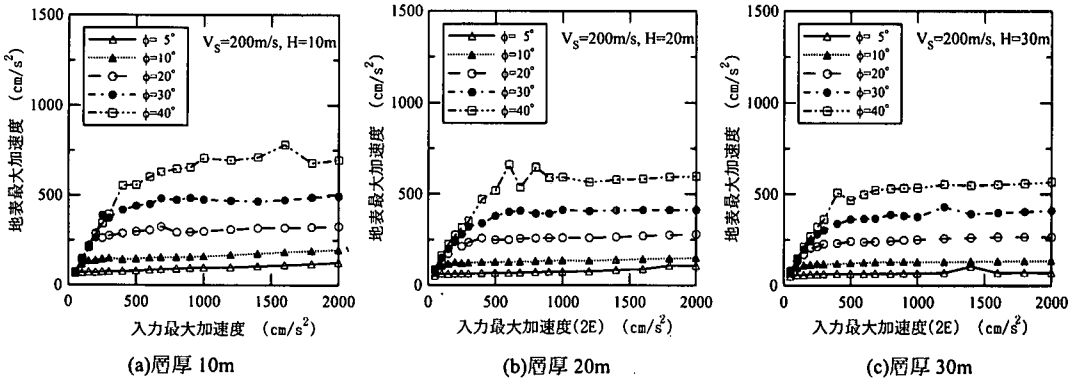


図-8 最大加速度の増幅度 (S波速度 200m/s)

(8) 内部摩擦角と上限値の関係

最大加速度、計測震度、SI 値について、内部摩擦角と上限値の関係を図-10に示す。いずれについても内部摩擦角が支配的であり、 $\tan\phi$ とほぼ比例関係にある。S波速度(初期剛性)の影響は小さく、層厚が薄いほど上限値が大きくなる傾向が見られる。

1995年兵庫県南部地震の際にポートアイランドで観測された値を同図に示す。内部摩擦角は平均N値15から評価される $32.6^{\circ}$ (2)を用いて図示している。図-11にポートアイランドにおける地盤柱状図を示す。

SI 値に関しては上限値に達していない可能性があるが、液状化によりせん断強度が低下することを考慮すると、概ね計算値と観測値は対応していると考えられる。今後、有効応力解析等を用いて液状化によるせん断強度の低下を評価することにより、液状化の可能性が高い埋立地盤の上限値を評価することも可能と考えられる。

(9) 入力地震動特性の影響

入力地震動特性による影響も重要であるので、他

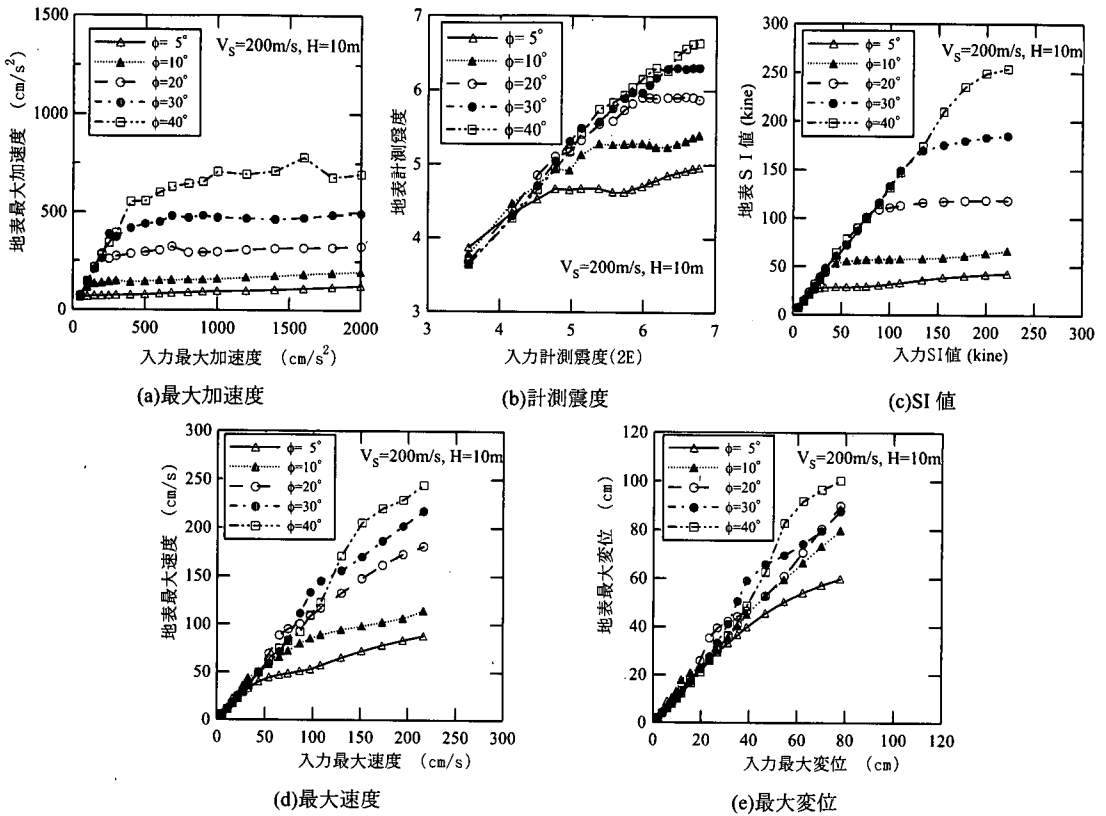


図-9 地震動代表値の増幅特性の比較 (層厚 10m, S波速度 200m/s)

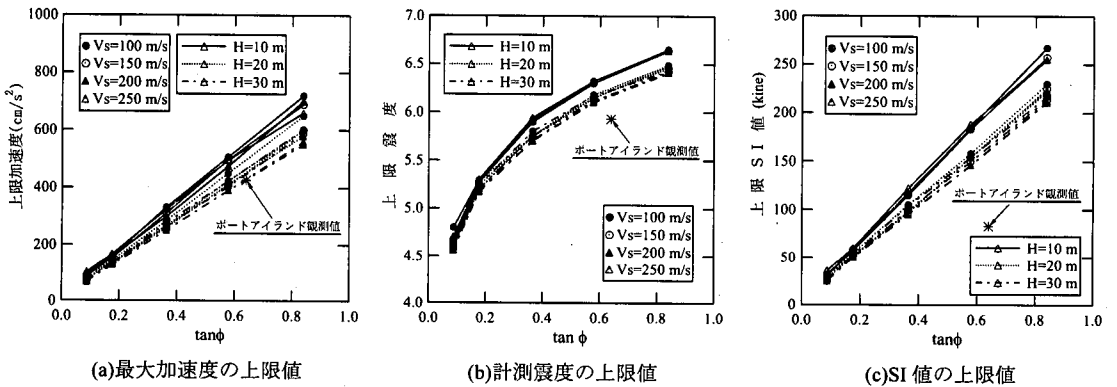


図-10 地震動代表値の上限値と内部摩擦角の関係

の入力地震波を用いて同様に上限値を求めた結果を図-12に示す。釧路港湾は1993年釧路沖地震の際に、釧路港湾のGL-77mでの観測記録から等価線形解析により入射波成分を抽出した波、寿都は1993年北海道南西沖地震の際に、気象庁87型強震計により寿都で得られた記録である。せん断強度が大きくなるにつれ、最大加速度、SI値の上限値は入力地震波による差が大きくなる傾向にはあるものの、最大に対する最小の比は0.6程度に収まっている。

式(4)における  $\sigma_v' / \sigma_v$  の値を求めると、

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_v'}{\sigma_v} &= \frac{\gamma_t z_w + (\gamma_t - \gamma_w) \cdot (z - z_w)}{\gamma_t z} \\ &= 1 - \frac{\gamma_w}{\gamma_t} \left( 1 - \frac{z_w}{z} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 $z$  は最大せん断応力がせん断強度に達している位置の深度、 $z_w$  は地下水位、 $\gamma_t$  は土の湿潤密度、 $\gamma_w$  は水の密度である。したがって、 $\ddot{u}$  が降伏深さ  $z$  の影響を受け、 $z$  が深いほど  $\ddot{u}$  は小さくなることがわかる。

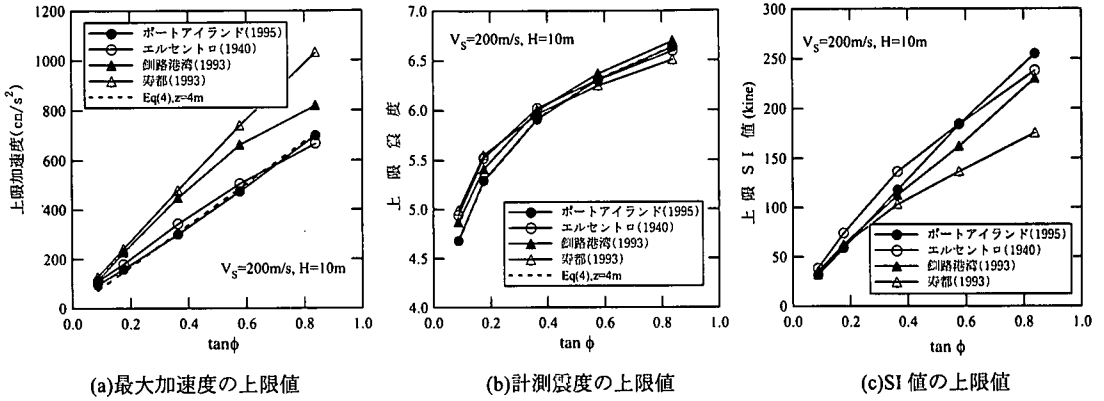


図-12 地震動代表値の上限値と入力地震波の関係

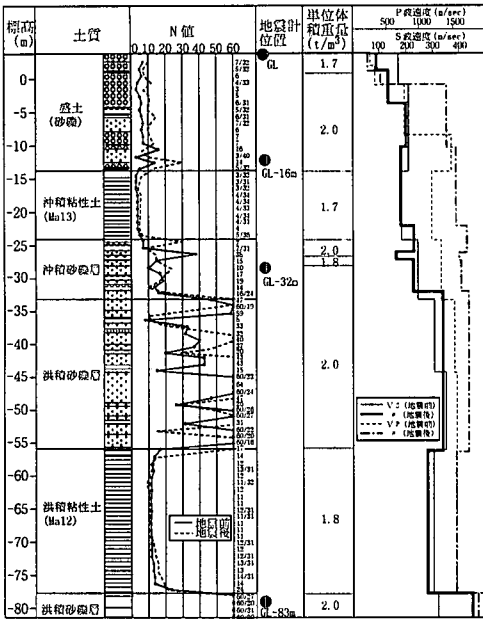


図-11 ポートアイランドにおける地盤柱状図<sup>7)</sup>

澤田ら<sup>8)</sup>による式

$$\tau(z) = \tau_{max} \sin\left(\frac{\pi}{2H} z\right) \quad (6)$$

を用いて、最深部でせん断強度に一致するようにせん断応力の鉛直分布を求め、これがせん断強度の鉛直分布と交わる深さを求めると、 $z=4m$ となる。ここで、 $H$ は表層厚である。式(5)に $z=4m$ を代入して得られる式(4)の値を図-12(a)に示す。(b)の計測震度についても、実効加速度<sup>9)</sup> $a_0$ の値に式(4)を用いて、

$$I = 2 \log(a_0) + 0.94 \quad (7)$$

により計測震度 $I$ を算出<sup>9)</sup>して図示している。短周期成分の影響が小さい場合の最大加速度、計測震度とよく対応していることがわかる。

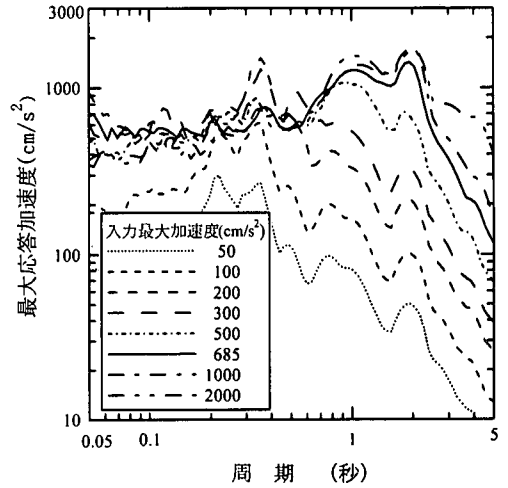


図-13 加速度応答スペクトル(層厚10m, S波速度200m/s,  $\phi=20^\circ$ の場合)

### (10) 周期特性

ポートアイランド波を入力した時の加速度応答スペクトル(減衰5%)の例を図-13に示す。周期帯により様相は異なり、周期0.5秒以下、0.5~2秒、2秒以上の3つに大別される。周期0.5秒以下では入力最大加速度が200 $cm/s^2$ 程度でほぼ頭打ちとなり、それ以上入力加速度は大きくなっても最大応答加速度の変化は小さい。0.5~2秒では入力最大加速度が500 $cm/s^2$ 程度で頭打ちとなっている。周期2秒以上では入力最大加速度が大きくなるほど、最大応答加速度も大きくなっている。周期帯による非線形化の影響の違いが、「最大加速度は他より小さな入力で上限値に達する、計測震度・SI値が上限値を有する、最大速度・最大変位では上限値が見られない」ということと対応していることがわかる。地震動代表値の非線形特性と対応する応答スペクトルの周期帯に関する関係は、神戸市中央区の三宮~ポートアイランド断面の次元解析の結果<sup>4)</sup>と良く対応している。



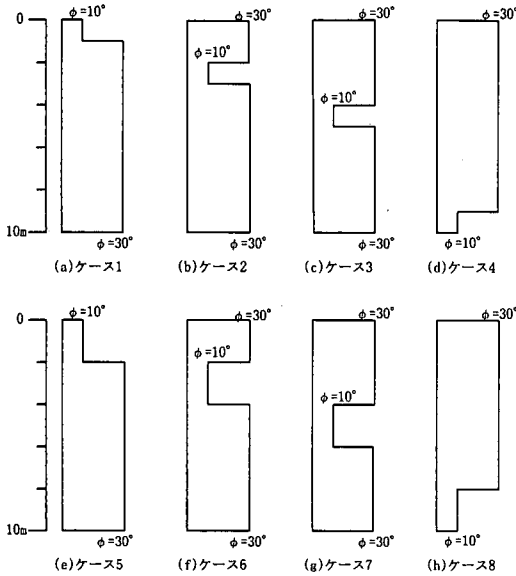


図-14 中間弱層が介在する場合の検討ケース

#### 4. 中間弱層の影響

表層地盤の中間にせん断強度が小さい（内部摩擦角が小さい）層が介在する時、地表面での地震動上限値がどの程度、その中間弱層（一般にはS波速度が小さい層を指すが、ここではせん断強度が小さい層を意味する）のせん断強度に支配されるかを把握しておくことが、より実用的である。

ここでは、層厚 10m、S波速度 200m/s の場合について、内部摩擦角  $\phi=30^\circ$  の地盤に図-14 に示す 8 ケースの内部摩擦角  $10^\circ$  の中間弱層が介在する場合を考える（S波速度は中間層も 200m/s である）。

##### (1) 地震動代表値の上限値への影響

8 ケースの結果を全層  $10^\circ$  の場合、全層  $30^\circ$  の場合と比較することで、それぞれのケースの中間弱層の影響を評価する。図-15 に最大加速度、図-16 に計測震度、図-17 に SI 値に関する結果を示す。8 ケースで取りうる値は、 $10^\circ$  と  $30^\circ$  の間になるが、高次モードの影響等で一部やや逆転する場合も見られる。いずれの場合も、中間弱層の位置が深いほど、全層  $10^\circ$  の結果に近く、弱層の層厚が 2m の場合の方がより明確である。以上より、中間弱層の位置が深いほど、地表面地震動への影響が大きいことがわかる。

##### (2) 最大加速度等の鉛直分布

図-18 にケース 4、6、8 における最大加速度、最大せん断ひずみ、最大せん断応力の鉛直分布を示す。弱層の層厚が薄いケース 4 はケース 8 に比べ、比較的大きなせん断力が上層に伝わり深度 8m 以浅でも

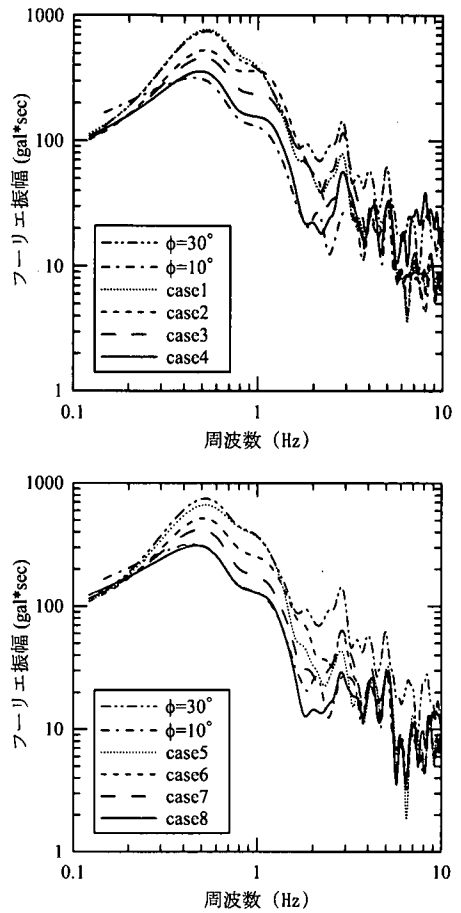


図-19 フーリエ・スペクトルの比較

比較的大きなせん断ひずみが発生している。ケース 8 では深度 8m でのせん断応力はせん断強度よりもかなり小さい。ケース 4、8 とも最大加速度は深度 8m 以浅ではほとんど変化していないが、ケース 8 の方が最大加速度は小さい。弱層の位置が浅いケース 6 の場合、深度 4m 付近まで大きなせん断力が伝わり、浅い部分のせん断強度は小さいので、ほぼ全層でせん断強度に達した状態となり、最大加速度の低減効果は小さい。

##### (3) 周波数特性

図-19 にフーリエ・スペクトルの比較を示す。卓越周波数 0.5Hz 付近では、図-15~17 における地震動代表値の大きさの順に対応しており、また中間弱層が最上層にあるケース 1,5 の結果は全層  $30^\circ$  の結果とよく一致し、中間弱層が最下層にあるケース 4,8 の結果は全層  $10^\circ$  の結果とよく一致する点も図-15~17 と対応している。

高振動数側では順番は異なり、1~1.5Hz でケース 1 とケース 2 が逆転し、2Hz 付近でケース 2 とケー

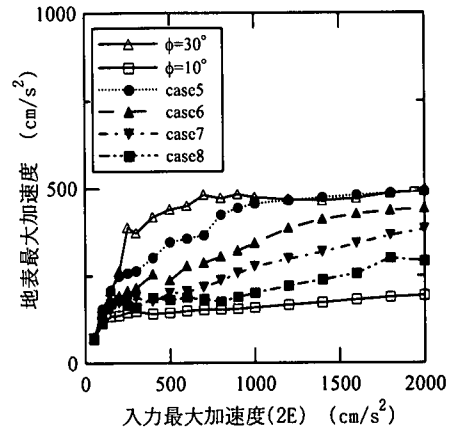
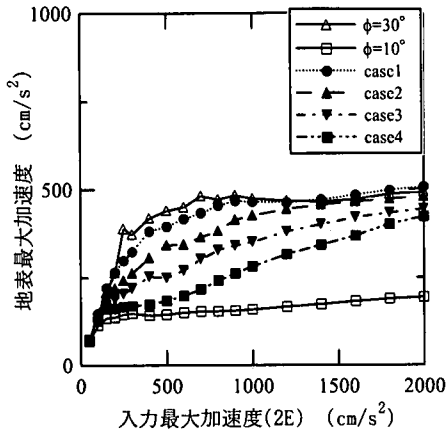


図-15 最大加速度増幅度における中間層の影響

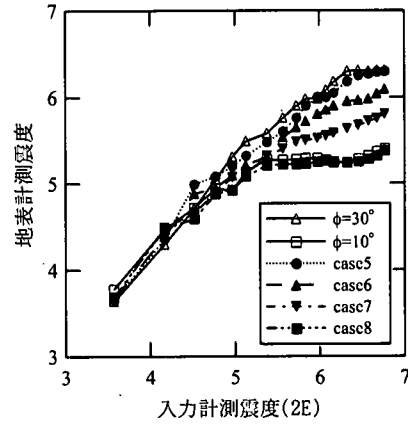
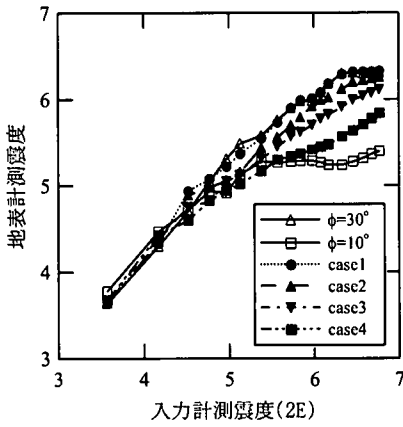


図-16 計測震度増幅度における中間層の影響

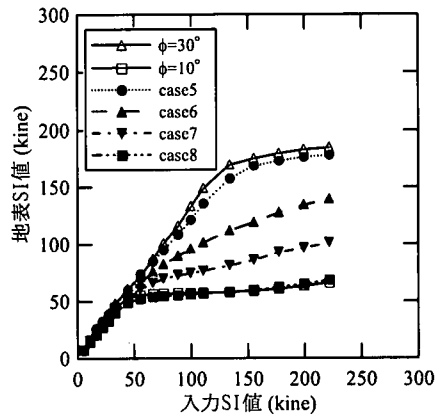
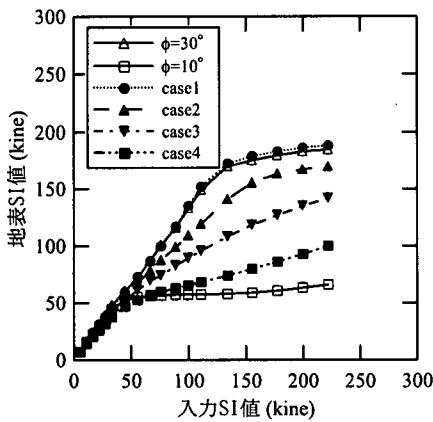
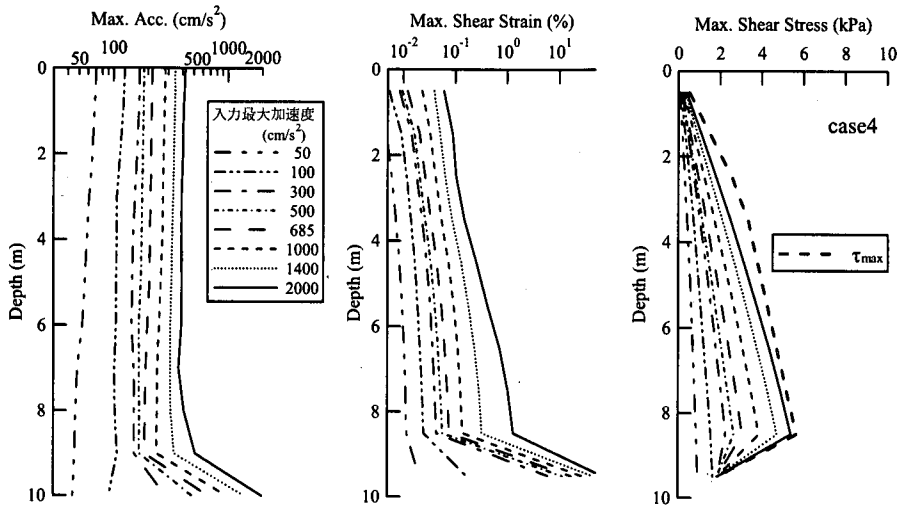
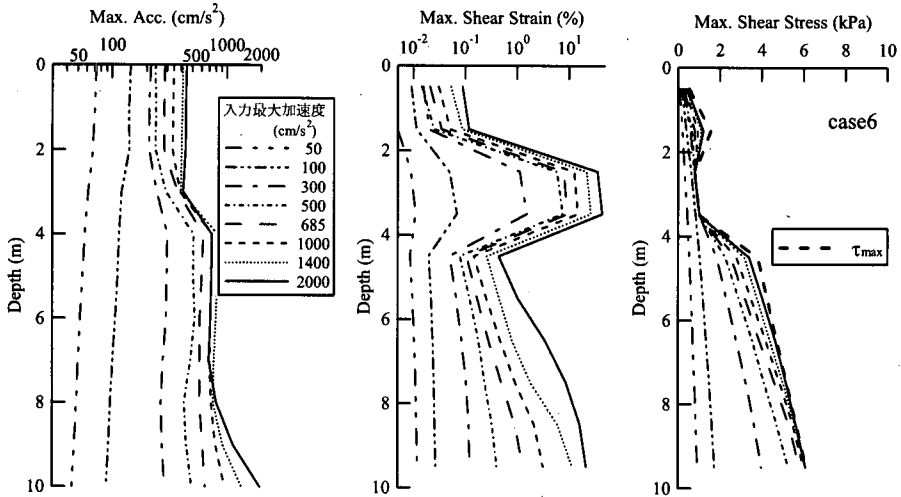


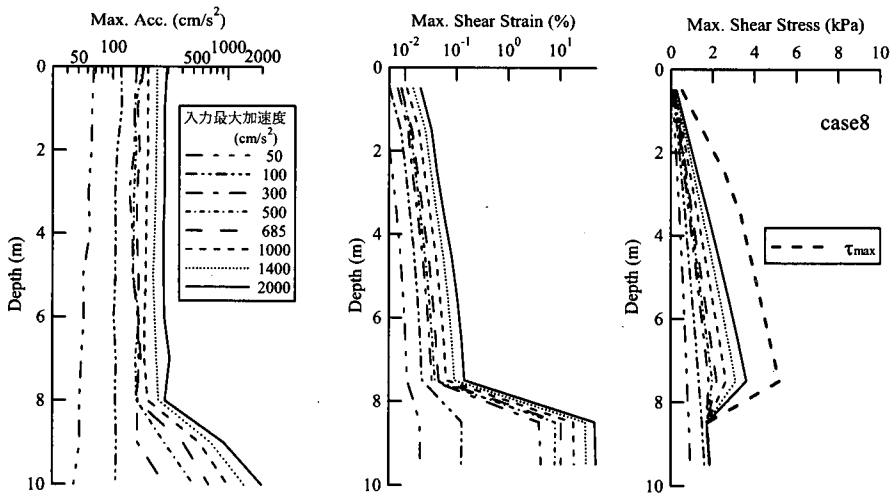
図-17 SI値増幅度における中間層の影響



(a) ケース 4 における鉛直分布



(b) ケース 6 における鉛直分布



(c) ケース 8 における鉛直分布

図-18 鉛直分布に見られる中間層の影響

ス3が逆転し、5Hz付近でケース3とケース4が逆転している。中間弱層が深いほど、また厚いほど、波長が長い成分を遮断するフィルターとなっていることがわかる。浅い位置に弱層があっても高振動数成分にのみ影響するので、地震動代表値への影響は小さい。

以上より、一次の卓越振動数に対応する工学的基盤に近い位置に弱層がある場合には、その層が地表まで続いているとした時の上限値、地表に近い位置に弱層がある場合には、その層を無視した時の上限値を用いることができると考えられる。その中間に弱層がある場合には、動的解析が必要となると考えられる。

## 5. まとめ

非線形全応力解析によりせん断強度に着目したパラメータスタディを実施した。本研究により、地震動代表値の上限値に関して以下のことが明らかになった。

- 1) 地盤の内部摩擦角を要因とする上限値が、最大加速度、計測震度、SI値について存在する。ただし、構造物に作用するエネルギー量と関連が深い最大速度、最大変位には上限値は見られない。
- 2) 内部摩擦角が小さいほど、小さな入力レベルで地震動の上限値に達する。
- 3) 表層地盤の卓越周期（S波速度、層厚）が上限値に与える影響は小さい。
- 4) 入力地震動特性は最大加速度の上限値には影響するが、計測震度、SI値の上限値に及ぼす影響は小さい。
- 5) 中間弱層のせん断強度が上限値に及ぼす影響は大きく、基盤に近い位置に弱層がある場合にはその弱層が地表まで続いている時の上限値にほぼ一致する。

本研究では、1995年兵庫県南部地震における神戸市開発局によるポートアイランド、1993年釧路沖地震における運輸省港湾技術研究所による釧路港湾、1993年北海道南西沖地震における気象庁による寿都での観測記録を使用させて頂きました。関係各位に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 入倉孝次郎: 大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測, 第24回地盤震動シンポジウム, pp.91-100, 1996.
- 2) 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.43, No.10, pp.49-54, 1995.
- 3) Idriss, I.M.: Response of soft soil sites during earthquakes, *Proc., H. Bolton Seed memorial symposium*, Berkeley, California, Vol. II., 1990.
- 4) Suetomi, I. and Yoshida, N.: Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, *Special issue of Soils and Foundations*, pp.11-22, 1998.
- 5) Hardin, B.O. and Drnevich, V.P.: Shear moduli and damping in soils: Design equations and curves, *J.SMFD, ASCE*, 98(SM7), pp.667-692, 1972.
- 6) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S.: Modelling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, *Proc. 5th International Conference for Numerical Method in Geomechanics*, Nagoya, Vol. 1, pp. 373-380, 1985.
- 7) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド) 報告書, 1995.
- 8) 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, pp.675-678, 1995.
- 9) 気象庁: 震度を知る - 基礎知識とその活用 -, ぎょうせい, 1996.

(1999. 11. 8 受付)

## RELATION BETWEEN SHEAR STRENGTH OF SOIL AND UPPER LIMIT OF EARTHQUAKE GROUND MOTION

Iwao SUETOMI, Sumio SAWADA, Nozomu YOSHIDA and Kenzo TOKI

As seen at Port Island vertical array record during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, the soil deposits have the upper limit of ground motions because the soil layer can not transfer the shear force larger than its shear strength to upper layers. In order to clarify the relation between the shear strength of soil and upper limit of ground motion, nonlinear analyses are carried out focused on the angle of internal friction. It is shown that upper limit of PGA, JMA seismic intensity scale and SI value are controlled by the angle of internal friction.