

# 地震動特性と地盤特性を考慮した 地中せん断応力の低減係数 $r_d$ の評価方法の検討

地蔵 智樹<sup>1</sup>・谷本 俊輔<sup>2</sup>・佐々木 哲也<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 国立研究開発法人土木研究所 交流研究員 地質・地盤研究グループ土質・振動チーム (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

E-mail:t-jizou44@pwri.go.jp

<sup>2</sup> 正会員 国立研究開発法人土木研究所 研究員 同上

E-mail:s-tanimoto@pwri.go.jp

<sup>3</sup> 正会員 国立研究開発法人土木研究所 上席研究員 同上

E-mail:t-sasaki@pwri.go.jp

本研究は、 $F_L$ に基づく簡易液状化判定法における地震時せん断応力比  $L$  について、地震動特性および表層地盤の非線形性に基づく増幅特性の影響を加味する方法を検討したものである。

本報では、著者らが提案した、地表地震記録から地中せん断応力を評価する手法の適用範囲の拡大を図るため、強震記録から地中せん断応力を直接的に推定する際にポイントとなる表層地盤のひずみ依存性による  $S$  波速度の低下率  $c_r$  について、地表の地震記録から簡易に設定する手法を検討し、その適用性について検証した。さらに、多数の強震観測記録において、一連の手法により計算した地中せん断応力の低減係数と地表地震動および地盤に関する指標の関係性について回帰分析を行い、各地点の  $r_d$  深度分布を設定するための回帰式を組み立てた。

**Key Words:** Assessment of liquefaction, Seismic shear stress, Earthquake motion characteristics

## 1. はじめに

本研究は、 $F_L$ に基づく簡易液状化判定法における地震時せん断応力比  $L$  について、地震動特性および表層地盤の非線形性に基づく増幅特性の影響を加味する方法を検討したものである。

現行の液状化判定法<sup>1)</sup>では、地震時の地中せん断応力比  $L$  を式(1)により求める。

$$L = r_d k_{lg} \alpha_v / \sigma'_v \quad (1)$$

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (2)$$

ここに、 $r_d$  は深さ方向の低減係数、 $k_{lg}$  は地表の水平震度、 $\alpha_v$  は深さ  $z$  における全上載圧、 $\sigma'_v$  は深さ  $z$  における有効上載圧である。式(2)は、地震応答解析の結果から深さ  $z$  のみの関数として与えられている<sup>2)</sup>。地震動特性や地盤特性が  $r_d$  に与える影響を考慮するため、数値モデルにより多様な条件において地震応答解析を行い、 $r_d$  の計算結果による統計量や経験則により  $r_d$  を推定する方法がとられた<sup>3)</sup>が、これらの方法では、数値モデルが実地盤の挙動と近い解を与えているとは限らず、また、得られた統計量や構築された経験則も数値モデルの違いによって異なった結果となる可能性がある。そこで、著者ら

は、地中せん断応力分布に関するデータを数多く得ることを目的とし、強震記録から地中せん断応力を直接的に推定する手法を提案している<sup>5)</sup>。これは、地震時の地中せん断応力  $\tau$  を式(3)により算出するものである。

$$\tau = F_r \ddot{u}_s \cdot (\sigma_v / g) \quad (3)$$

$$F_r = \frac{\sin(\omega z / c_v AVS^*)}{\omega z / c_v AVS^*} \quad (4)$$

ここに、 $\ddot{u}_s$  は地表加速度、 $\alpha_v$  は深さ  $z$  における全上

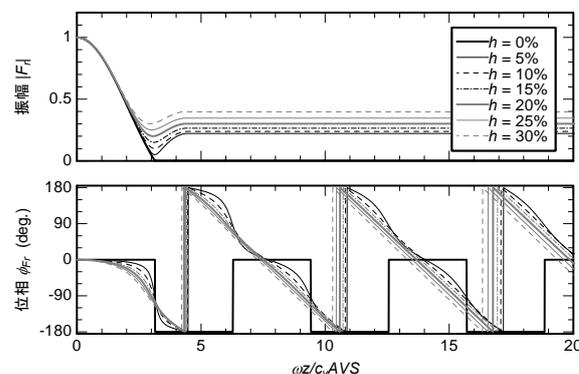


図-1 地中せん断応力を推定するためのローパスフィルタ  $F_r$  の特性

載圧,  $g$  は重力加速度,  $F_r$  は表層地盤の逆増幅関数に相当するローパスフィルタ,  $\omega$  は円振動数,  $c_v$  はひずみ依存性による剛性低下率を表す S 波速度低下率,  $AVS^*$  は複素平均 S 波速度である. 複素平均 S 波速度  $AVS^*$  は地表から着目深さにおける平均 S 波速度  $AVS$  に減衰定数  $h$  の影響を加味したものであり, 等価線形化法で用いられる複素せん断剛性  $G^*$  を変形したものである. 図-1 に示すように,  $F_r$  は正規化振動数  $\omega z/c_v AVS$  に対してユニークな関係を有し, 深さ  $z$  と円振動数  $\omega$  が大きいほど, 平均 S 波速度  $AVS$  とその低下率  $c_v$  が小さいほど, 地中せん断応力が低減しやすい傾向が簡潔に表現される. 文献5)では地表加速度から地中せん断応力分布を推定する手法についての枠組みを構築したが, この手法における地盤の材料非線形性を表現するパラメータである S 波速度低下率  $c_v$  については, 地表加速度記録のみから推定する手法が確立されておらず, 課題として残されている.

本報では, 上記の強震記録から地中せん断応力を評価する手法<sup>9)</sup>の適用範囲の拡大を図るため, 強震記録から地中せん断応力を直接的に推定する際にポイントとなる表層地盤のひずみ依存性による S 波速度の低下率  $c_v$  について, 地表の地震記録のみから簡易に設定する手法を検討し, 鉛直アレー記録および模型実験を対象に, 一連の手法の適用性について検証した.

次に, 多数の強震観測記録に対して, 一連の手法により地中せん断応力の低減係数  $r_d$  の深さ方向分布を算出し, 算出した  $r_d$  と地表地震動および地盤に関する指標との関係について回帰分析を行い, 地点ごとの地表地震動および地盤に関する指標からその地点の  $r_d$  深さ分布を設定するための回帰式を組み立てた.

さらに, 東北地方太平洋沖地震における液状化・非液状化地点において, 作成した回帰式による  $r_d$  を用いた液状化判定を行い, 従来手法である式(2)による  $r_d$  を用いた液状化判定結果と比較した.

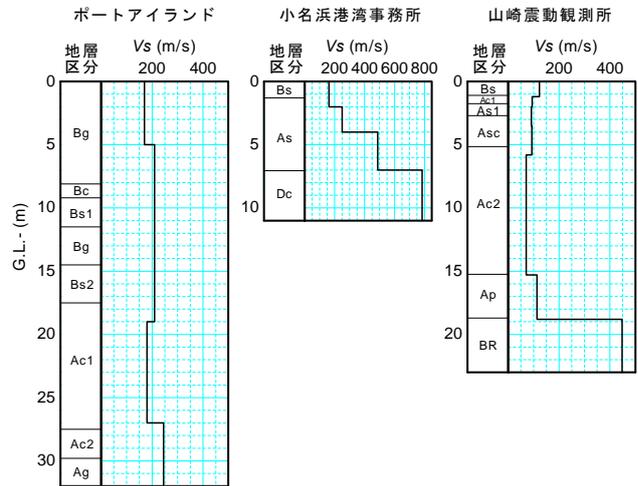


図-2 鉛直アレー記録地点の地盤条件

## 2. S 波速度低下率 $c_v$ の簡易設定手法の構築

### (1) 鉛直アレー記録の波形解析

実地盤における表層の非線形応答に関するデータを得るため, 鉛直アレー記録の波形処理解析を行った. ここでは, 地盤条件が明らかであり, かつ, 少なくとも1度は大規模地震動を記録した観測地点として, ポートアイランド<sup>6)</sup> (GLおよびGL-32m. 以下, PI), 小名浜港湾事務所<sup>6)</sup> (GLおよびGL-11.05m. 以下, 小名浜), 山崎震動観測所<sup>7)</sup> (小段および小段-22m. 以下, 山崎) の3サイトを選定し, 1サイトあたり約20地震の記録について解析を行った.

波形処理解析においては, 水平動が鉛直方向に伝播する際の位相速度  $c$ , 平均せん断ひずみ  $\gamma$  を算出した. 位相速度  $c$  は, 大町・田原<sup>9)</sup>の方法により算出した. 平均せん断ひずみ  $\gamma$  は, 地表・地中の相対加速度の2回積分によって相対変位を求め, それを単に地震計間距離で除すことによって算出した.

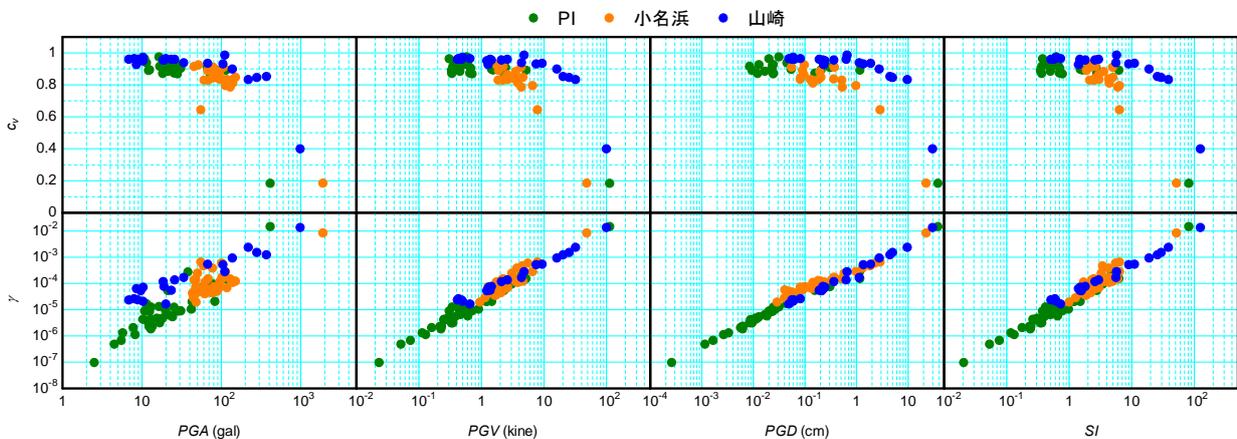


図-3 S 波速度低下率  $c_v$ , 平均せん断ひずみ  $\gamma$  と地表地震動指標の相関関係

(2)  $c_v$ ,  $\gamma$  と地表地震動指標の相関鉛直アレー記録の波形解析

$c_v$ ,  $\gamma$  と地表地震動指標 ( $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $SI$ ) の相関関係を図-2 に示す. 同図に示す  $c_v$ ,  $\gamma$  は, 1 地震ごとのそれぞれ最小値, 最大値である.  $c_v$  については, どの指標で見ても地震動強さに応じて低下する傾向がある. 一方,  $\gamma$  は  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $SI$  に対して線形に近い関係を有し,  $PGA$  との相関が悪いことが分かる. 各指標の優劣を見極めるためにはさらなるデータの充実を図る必要があるが, ここでは  $c_v$  の簡易評価に用いる指標として  $PGV$  を選定することとする. これは, 後述のように地表速度が地中せん断ひずみとの間に理論的關係を有し, 定式化を行う上で都合であるためである.

$c_v$  と  $PGV$  の相関をより詳細に調べるため, 各地震記録において,  $c_v$  と  $PGV$  を約 2.56 秒間隔で求めた. その結果を図-4 に示す. 個々のサイトで見れば,  $c_v$  と  $PGV$

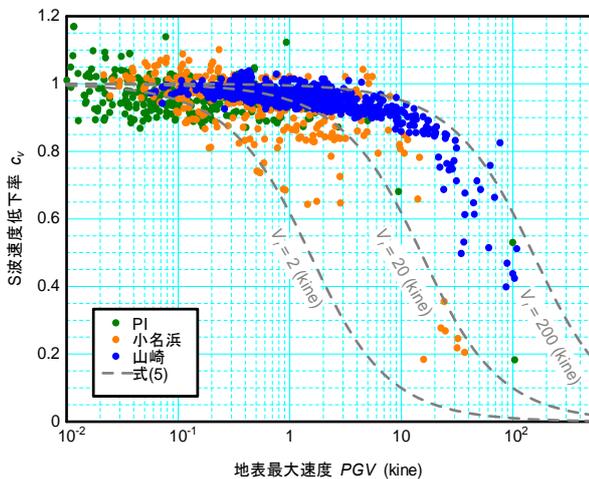


図-4  $c_v$ ・ $PGV$ 関係

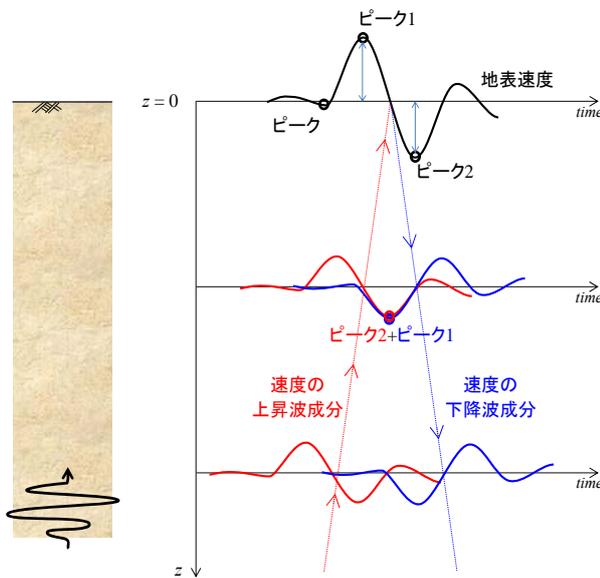


図-5 一様地盤とした場合の地表速度と地中せん断ひずみの関係

の相関は良好である. 一方, 軟弱粘土を主体とする山崎では  $c_v$  が低下しにくく, 砂を主体とする小名浜では  $c_v$  が低下しやすいなど, サイト依存性が認められる.

(3) S波速度低下率  $c_v$  の簡易設定法の定式化

上記の検討結果を踏まえ,  $c_v$  の簡易設定法の定式化について検討する. 表層地盤を一様とみなして単純化すると, 地中せん断ひずみ  $\gamma(z, t)$ , 地表速度  $\dot{u}_s(t)$  の関係は式(5)となる<sup>9)</sup>.

$$\gamma(z, t) = \{ \dot{u}_s(t + z/c_s, AVS) - \dot{u}_s(t - z/c_s, AVS) \} / (2c_s, AVS) \quad (5)$$

右辺{ }内の第1項, 第2項はそれぞれ速度の上昇成分, 下降成分である. 式(5)の速度の最大値のみに着目すると式(5)を変形し,  $\gamma_{max}$ ・ $PGV$ 関係を導くことができる.

$$\gamma_{max} = \alpha_v \cdot PGV / c_s, AVS \quad (6)$$

ここに,  $\alpha_v$  は, 速度の上昇・下降成分の重ね合わせに関する定数であり,  $PGV$  が発生する前後の速度ピークの比率を表す. 理論上, 図-5 に示すように, ピーク 1・2 が最大振幅のときに, 速度の上昇成分と下降成分でこの振幅が重り合う, ある深度およびある時刻において  $\alpha_v$  は最大の 1.0 となり, ピーク 3 のような振幅が小さいものが重り合うある深度およびある時刻において  $\alpha_v$  は最小で 0.5 となり,  $\alpha_v$  の範囲は 0.5~1.0 となるものと考えられる.

次に, 表層地盤の平均的な動的変形特性を, Hardin-Drebnich モデルにより近似的に与えることとする.

$$G/G_0 = c_v^2 = 1/(1 + \gamma/\gamma_r), \quad h = h_{max}(1 - G/G_0) = h_{max}(1 - c_v^2) \quad (7)$$

$\gamma_r$  は表層地盤全体の平均的な規準ひずみ,  $h_{max}$  は最大減衰定数であり, これらの設定方法は後述する. 式(6)により得られる最大ひずみ  $\gamma_{max}$  を式(7)の  $\gamma$  に代入して整理することで, 式(8)が得られる.

$$c_v = \sqrt{1 + (PGV/V_r)^2} - PGV/V_r, \quad V_r = 2AVS \cdot \gamma_r / \alpha_v \quad (8)$$

$V_r$  は表層地盤の S 波速度とその低下特性を簡潔に表す定数であり, 規準速度と呼ぶこととする. 図-4 に, 式(8)による  $c_v$ ・ $PGV$  関係をいくつかの  $V_r$  に対して描いてみると,  $V_r$  を適切に設定すれば実地盤における S 波速度の低下傾向を再現できそうなことが分かる.

(4)  $PGV$  と非線形応答の関係

$c_v$ ・ $PGV$  関係のさらなる検証は後述するものとし, ここでは式(6)を検証するため, 地震記録から算出した平均せん断ひずみ  $\gamma$  と,  $PGV/c_s (= PGV / (c_s \cdot AVS))$  の関係を図-6 で確認する. サイトごとに見れば  $\gamma$  と  $PGV/c_s$  の相関は良好であり, 比例定数  $\alpha_v$  を適切に設定できれば一定の適用性があると考えられる. ただし,  $\alpha_v$  はサイトによ

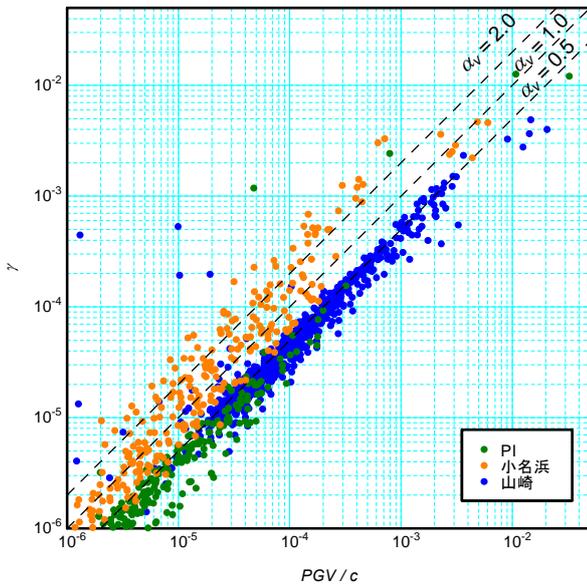


図6  $\gamma$  と  $PGV/c$  の関係

て異なり、表層地盤の主体が粘性土となるほど  $\alpha_v$  が小さくなる傾向が認められる。これは、高次モードの影響によるものと考えられる。つまり、縦軸  $\gamma$  は地震計間での相対変位を単に距離で除したものであるため、高次モードが卓越する場合はひずみを過小評価する。一方、式(5)、(6)から分かるように  $PGV/c$  は深さ方向の局所的なひずみに相当するため、高次モードが卓越してもひずみを過小評価することはない。この違いが  $\alpha_v$  のサイト依存性として現れたものと考えられる。

以上の考察に基づくと、 $\alpha_v$  をサイトごとに与えることは容易でない。そこで、本検討の最終目的である液状化判定において安全側の結果を得ることを考え、 $\alpha_v = 0.5$  程度と小さめに設定することとする。

#### (5) 表層地盤全体系の基準ひずみ $\gamma_r$ の設定手法

表層地盤の地震応答解析では、レベル2地震動と呼ばれるような極めて強い地震動に対して、地中のごく一部の地層にひずみが局所化する結果となりやすく、かつ、局所化の発生位置は各層の剛性・強度バランスや地震動によって複雑に変化する。こうした問題の性格上、ひずみ依存性の影響を含めた S 波速度の深さ方向分布を精度よく把握することは容易でないため、非線形応答の影響を一定の精度で推定する上での工学的判断として、表層地盤の非線形性を地盤全体で平均的に捉える方法があると考えられる。

そこで、坂井・室野<sup>10)</sup>が提案している簡易な地震応答解析手法(等価1自由度モデル)を参考に、表層地盤全体系の平均的な  $G/G_0 \cdot \gamma$  関係を次の手順で設定した。

1) 表層地盤を構成する各層を水平成層状と見なし、各層の層厚  $H_j$ 、密度  $\rho_j$ 、S 波速度  $V_{s_j}$  ( $j = 1 \sim n$ ) を設定する。また、各層の  $G/G_0 \cdot \gamma$  関係を Hardin-Dmevich モデルに

よって簡易に近似することとし、各層の規準ひずみ  $\gamma_{r,j}$  を設定する。

2) 適当な平均せん断ひずみ  $\bar{\gamma}$  を設定し、これに対応した地表変位  $u_s$  を式(9)により算出する。

$$u_s = \bar{\gamma} \sum_{j=1}^n H_j \quad (9)$$

3) 重複反射理論に基づいて1次モードの変位分布を計算し、地表変位を  $u_s$  としたときの各層のひずみ  $\gamma_j$  を算出する。1回目の計算では各層の S 波速度低下率  $c_{v,j} = 1$  とし、2回目以降の計算では前回の計算における  $\gamma$  から  $c_{v,j}$  を式(10)とする。

$$c_{v,j} = 1 / \sqrt{1 + \gamma_j / \gamma_{r,j}} \quad (10)$$

各層の S 波速度低下率  $c_{v,j}$  が収束するまでこの計算を繰り返す。

4) 表層地盤全体系の平均的な S 波速度低下率  $c_v$  を式(11)により算出する。

$$c_v = \left( \sum_{j=1}^n H_j / V_{s_j} \right) / \left( \sum_{j=1}^n H_j / c_{v,j} V_{s_j} \right) \quad (11)$$

5) 上記1)~4)の計算をいくつかの  $\bar{\gamma}$  に対して行うことで表層地盤全体系の  $c_v \cdot \bar{\gamma}$  関係を求め、さらにそれを Hardin-Dmevich モデルの式で近似することにより、表層地盤全体系の平均的な規準ひずみ  $\gamma_r$  を得る。

以上に示した手順の多くは坂井・室野<sup>10)</sup>の方法と共通するが、Hardin-Dmevich モデルを用いた点と  $c_v$ 、 $\bar{\gamma}$  の算出方法が異なっている。以下、上記1)~4)の手順と式(8)を組み合わせることで S 波速度低下率  $c_v$  の簡易設定法とする。

各層の規準ひずみは、室内試験データが得られている場合はそれを使用し、得られていない場合は吉田・若松が多数の試料による繰返しせん断試験結果を基に提案した土質分類による応力-ひずみ関係モデル<sup>11)</sup>を参考に、砂質土については式(12)、粘性土については式(13)を用いて設定した。

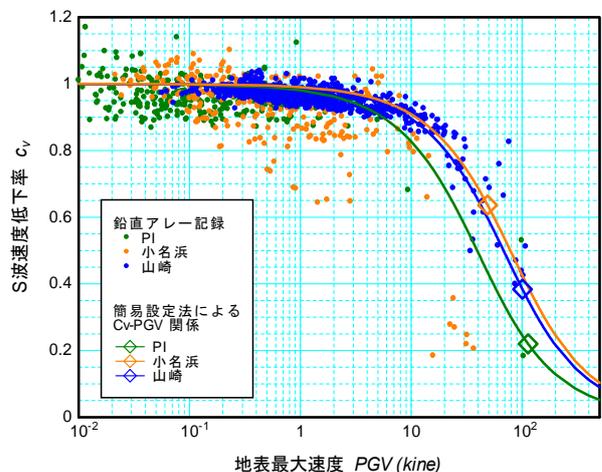


図7  $c_v \cdot PGV$  関係

$$\log \gamma_r = 8.64 \sigma_m \times 10^{-4} - 3.17 \quad (12)$$

$$\log \gamma_r = 7.74 \sigma_m \times 10^{-4} - 2.80 \quad (13)$$

また、減衰定数  $h$  の設定においても、Hardin-Dmievichモデルによる式(12)を用いることとした。

$$h = h_{\max} (1 - c_v^2) \quad (14)$$

$h_{\max}$  についても吉田・若松<sup>11)</sup>を参考に、砂質土、粘性土の両者の平均的な値として  $h_{\max} = 20\%$  とした。

### (6) 鉛直アレー記録に対する検証

解析対象とした3サイトに対して、上記の方法により地盤全体系の規準ひずみ  $\gamma_r$  を算出したところ、山崎で0.247%、小名浜で0.083%、PIで0.074%であった。この  $\gamma_r$  を用いて、式(8)により算出される  $c_v \cdot PGV$  関係を図-7に示す。また、各地点の観測記録のうち最も強い地震動

(山崎、小名浜は東北地方太平洋沖地震、PIは兵庫県南部地震) に対する  $PGV$  から式(8)により算出した  $c_v$  を図-7中に◇印でプロットした。

山崎およびPIは、鉛直アレー記録と比べて  $PGV$  の増加による  $c_v$  の低下傾向を概ね捉えており、最も強い地震動に対する  $PGV$  から式(8)により算出した  $c_v$  についても鉛直アレー記録と同等となった。小名浜は、鉛直アレー記録と比べて大きな  $c_v$  を与えているが、本検討の目的である地中せん断応力の評価に用いることを想定すると、 $c_v$  が大きい場合ほどせん断応力が低減しにくいため、安全側の評価となる。

### (7) 模型実験に対する検証

次に、2ケースの動的遠心模型実験に対して検証を行う。対象とした実験は、著者ら<sup>9)</sup>が地表加速度より地中せん断応力を求める手法を検討する際に解析対象とした

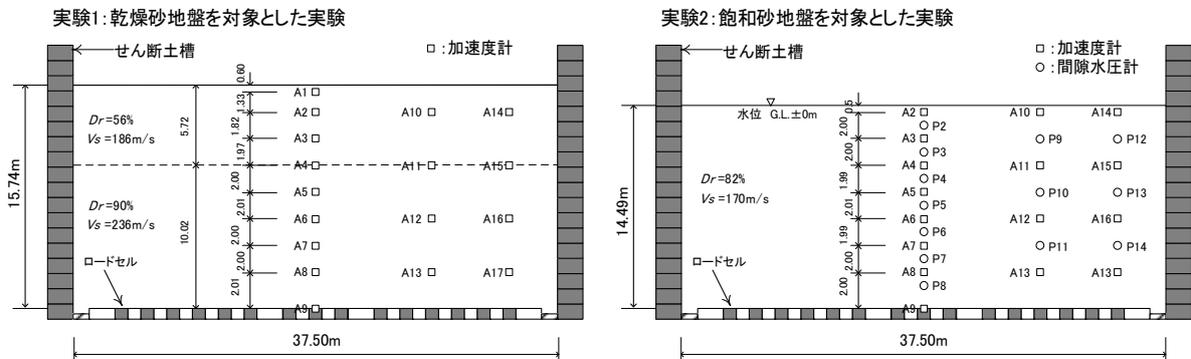


図-8 実験概要図 (実物換算)

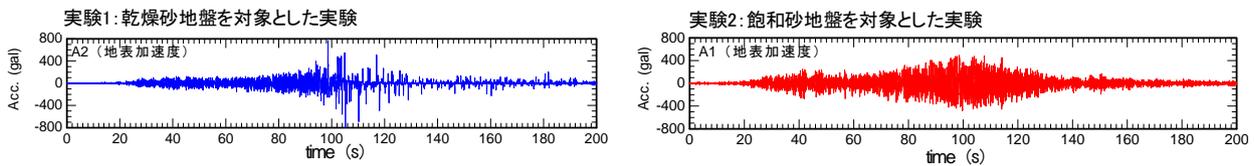


図-9 地表加速度波形

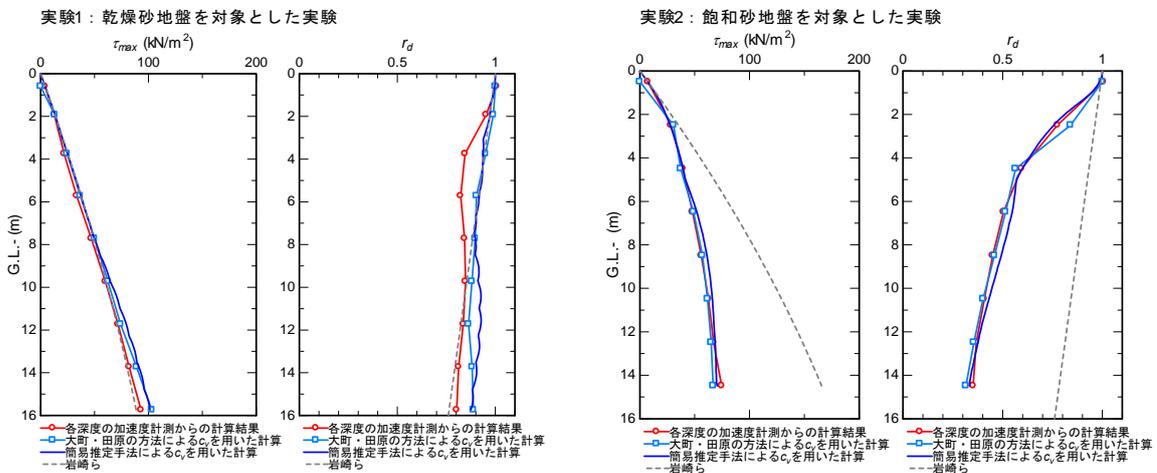


図-10 地中せん断応力および  $r_d$  深さ方向分布図

実験で、図-8に示すように乾燥砂地盤を対象とした実験1、および飽和砂地盤を対象とした実験2の2ケースであり、概ねレベル2地震動に相当する地震動を土槽底面から入力し、模型地盤内の深度方向に一定間隔で設置された多数の加速度計により各深度における加速度時刻歴の計測を行ったものである。文献5)では、図-9に示す地表で得られた加速度計測結果から、一連の手法により地中せん断応力の最大値 $\tau_{max}$ 、およびその低減係数 $r_d$ の深さ方向分布を算出しており、各深度の加速度計測結果から算出したそれと一致することを確認している。

ただし、このとき一連の手法に用いた $c_v$ については、大町・田原<sup>8)</sup>の方法により地中の加速度計測値から設定している。具体的な算出方法としては、PGAが記録された時間帯における地表および土槽底面の加速度波形の2つのフーリエ位相スペクトルの差と周波数の関係から、直線近似したときの勾配 $t_p$ (2波形間のタイムラグに相当)で、加速度計間の距離 $d$ で除すことで、ひずみ依存性の影響を含めたS波速度 $c_v$ を求め、これを、微小加振により求めた平均 $V_S$ で除すことにより、模型地盤全体の平均的なS波速度低下率 $c_v$ を求めるもので、実験1で $c_v=0.66$ 、実験2で $c_v=0.39$ であった。

これに対し、本報で提案した $c_v$ の簡易設定法を用いて $c_v$ を算出した結果、実験1で $c_v=0.52$ 、実験2で $c_v=0.44$ が得られ、地中の加速度計測値を用いて算出した $c_v$ と比べ1割程度の差が生じる結果となった。 $c_v$ の簡易設定法により算出した $c_v$ を用いて一連の手法により地中せん断応力の最大値 $\tau_{max}$ 、およびその低減係数 $r_d$ の深さ方向分布を算出し、地中の加速度計を基に算出した $c_v$ を用い計算した $\tau_{max}$ 、 $r_d$ 分布と比較した結果を図-10に示す。提案手法によって算出された $\tau_{max}$ および $r_d$ の深さ方向分布は、多数の加速度計測値から直接的に算出されたそれらとよく一致している。このことから、今回提案した $c_v$ の簡易推定法を用いて算出される $c_v$ は、 $r_d$ の深さ方向分布を得る上で十分な精度を有していると考えられる。

### 3. 数多くの強震記録における地中せん断応力の低減係数の算出および回帰

多数の強震記録から地中せん断応力の低減係数 $r_d$ の深さ方向分布を算出し、算出した $r_d$ と地表地震動および地盤に関する指標との関係性について回帰分析を行い、ある地点の地表地震動および地盤に関する指標からその地点の $r_d$ の深度分布を算出する回帰式を作成した。

#### (1) 強震記録の選定

検討対象とする強震記録の選定にあたっては、多数の地震観測記録から地中せん断応力の評価手法における地震動指標として採用したPGVが大きい記録を優先して、

地震、地域、地盤種別が大きく偏らないように、K-NET、KiK-NET<sup>12)</sup>、港湾地域強震観測<sup>9)</sup>、気象庁、国土技術政策総合研究所等<sup>13)14)</sup>の記録から152記録を選定した。表-1、表-2に地盤種別ごとにPGVおよびPGAについて分類した結果を示す。

#### (2) 提案手法による $c_v$ 、 $r_d$ の算出結果

2.に示した $c_v$ の簡易設定手法により152の強震記録について $c_v$ を算出した。152記録の $c_v$ -PGV関係について平均S波速度AVSにより分類したものを図-11に示す。なお、AVSの算定については、各地点の柱状図を基に工学的基盤面までの深度を対象としている。ただし、全記録の約1/3については、基盤面深度が20mより深いこ

表-1  $r_d$ の算出対象とした地震記録の地盤種別とPGV

単位：記録				
PGV(kine)	I種地盤	II種地盤	III種地盤	計
0~20	0	2	2	4
20~40	15	29	22	66
40~60	21	23	7	51
60~80	2	10	3	15
80~100	2	3	0	5
100~	1	6	4	11
計	41	73	38	152

表-2  $r_d$ の算出対象とした地震記録の地盤種別とPGA

単位：記録				
PGA(gal)	I種地盤	II種地盤	III種地盤	計
0~200	0	4	9	13
200~400	5	26	20	51
400~600	12	21	7	40
600~800	6	8	0	14
800~1000	7	6	2	15
1000~	11	8	0	19
計	41	73	38	152

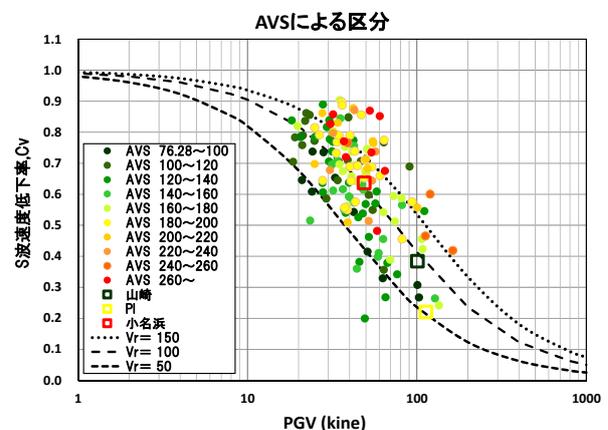


図-11 強震記録における地中せん断応力の低減係数の計算結果

とが想定されるものの、地盤データが深度 20m までしか存在しないため、これらの地点については 20m までを計算深度としている。

検討結果については、図中の上側にあるほど剛性が低下しにくい地盤であり、AVS が大きい地盤ほどその傾向が現れている。図中の左下側にプロットされた同様な PGV に対し極端に  $c_v$  が小さい記録があるが、これらの記録は、基盤深度が浅い地層で、表層に S 波速度が小さく剛性低下しやすい緩い砂質土層が存在している地点で、剛性が急激に低下したケースを示している。

上記で検証した鉛直アレー地点について、PI は比較的剛性が低下しやすい地盤であったことが言える。また、山崎は、粘性土が卓越する地盤であり中間的な剛性低下の傾向を示した。小名浜は、表層の緩い層で剛性が低下するが、他の 2 地点と比べ剛性が低下しにくい地盤といえる。

次に 152 記録において、 $c_v$  の簡易設定手法により算出した  $c_v$  を用いて、著者らが提案した地中せん断応力の評価方法<sup>9)</sup>により地中せん断応力の低減係数  $r_d$  の深さ方向分布を計算した。なお、計算深度は、AVS の算定と同様に基盤面深度、あるいは 20m 以深の地盤データがない記録については 20m とした。

計算の結果は、図-12 に示すように、表層において急激に低減するケースやほぼ直線的に低減するケース等サイトごとに分布形状が様々であるが、岩崎ら<sup>2)</sup>の提案した直線式と比べ  $r_d$  が小さくなるケースが多いことが分かった。

### (3) 地表地震動および地盤に関する指標による $r_d$ の回帰分析

152 記録の  $r_d$  深さ方向分布についての近似式を作成し、近似式のパラメータとなる定数と地表地震動および地盤に関する指標との相関関係から、検討サイトにおいてその地点の地表地震動および地盤に関する指標からその地点の  $r_d$  深さ方向分布を設定する回帰式を組み立てた。

#### a) $r_d$ 深さ方向分布の近似式の作成

図-12 に示す個々の地震記録から計算した地中せん断応力の低減係数  $r_d$  の深度分布は、図-13、および式(15)に示す双曲線関数により近似する。

$$r_d(z) = 1 - \frac{z}{\alpha + \left( \frac{1}{1-r_{db}} - \frac{\alpha}{z_b} \right) z} \quad (15)$$

ここに、近似式の特徴として、図-13 に示すように、地表における  $r_d$  の接線勾配は  $-1/\alpha$  となり、 $\alpha$  は近似曲線の初期勾配を規定する定数であることがわかる。 $r_{db}$  は地中せん断応力の評価方法により計算した結果の近似範囲の下端深度  $z_b$  における低減係数  $r_d$  である。

なお、 $1/(1-r_{db}) - \alpha/z_b = 0$  の時、 $r_d$  は  $\alpha$  の一次関数と

なり、 $z_b = 20$ 、 $r_{db} = 0.70$  で  $\alpha = 66.666$  の時、 $r_d$  の近似線は岩崎らの式(2)に一致する。

ここでは、最小二乗法により  $\alpha$ 、 $r_{db}$  の 2 つの定数を同定する。ただし、前述したように、地中せん断応力の評価方法により計算した  $r_d$  の計算下端深度は 20m までのものが殆どであるため、近似範囲の下端深度  $z_b$  は 20m を下限とした。なお、収集記録の中には、ごく一部ではあるが 20m を越える基盤層までの地盤データが存在する記録も含まれているが、これらについても近似範囲の下端深度  $z_b$  は 20m に統一することとした。

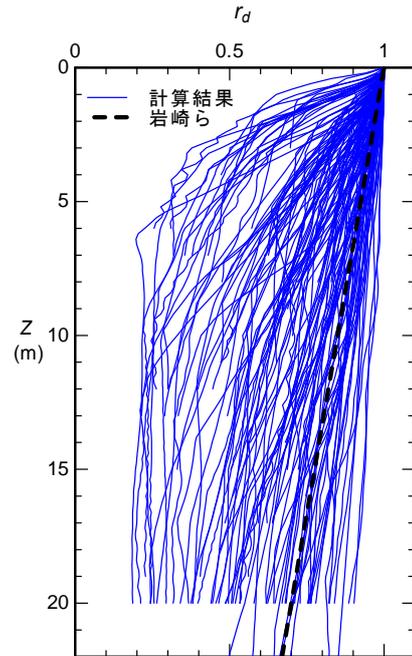


図-12 強震記録における地中せん断応力の低減係数の計算結果

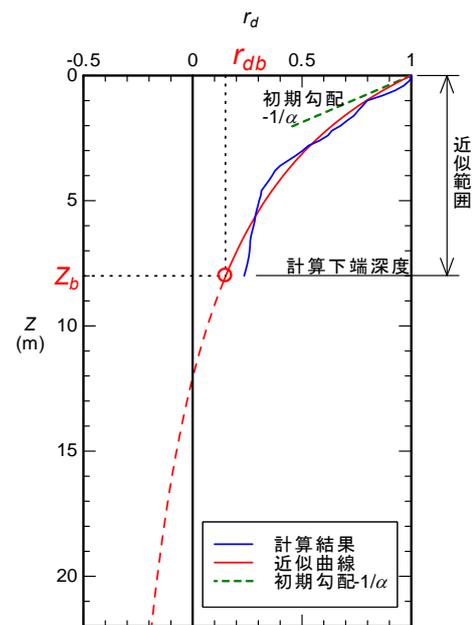


図-13 近似曲線式の特徴

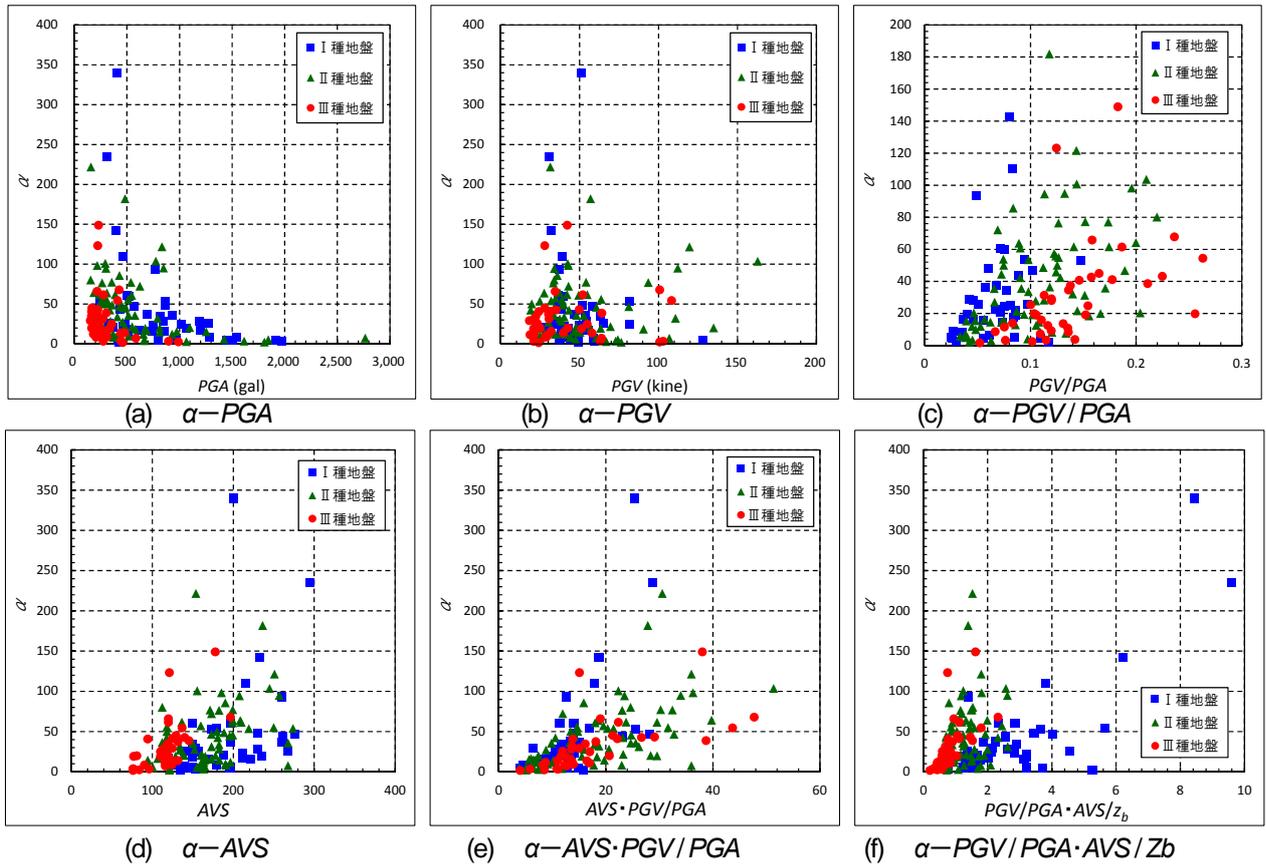


図-14  $\alpha$ と地震動諸元および地盤に関する指標との相関関係

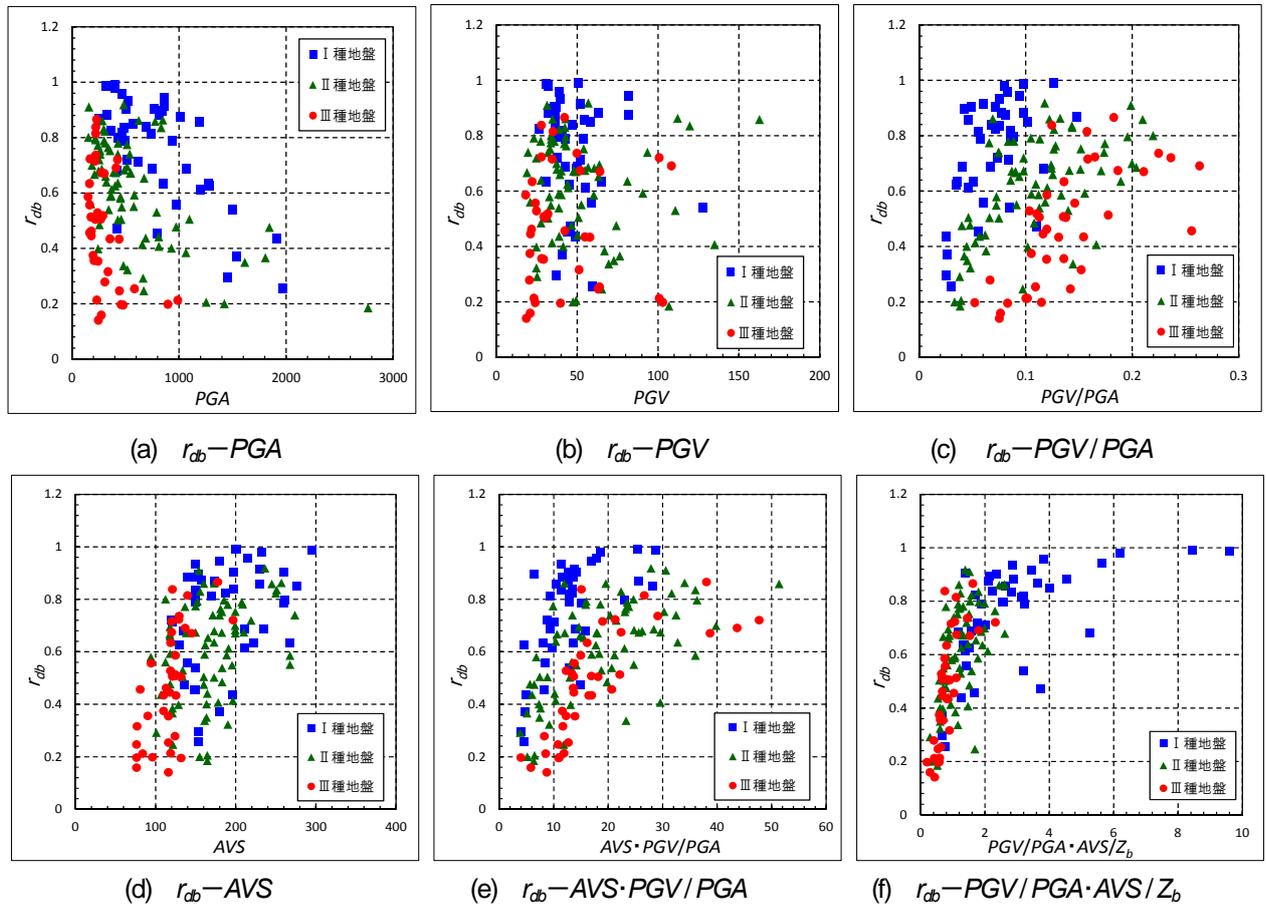


図-15  $r_{db}$ と地震動諸元および地盤に関する指標との相関関係

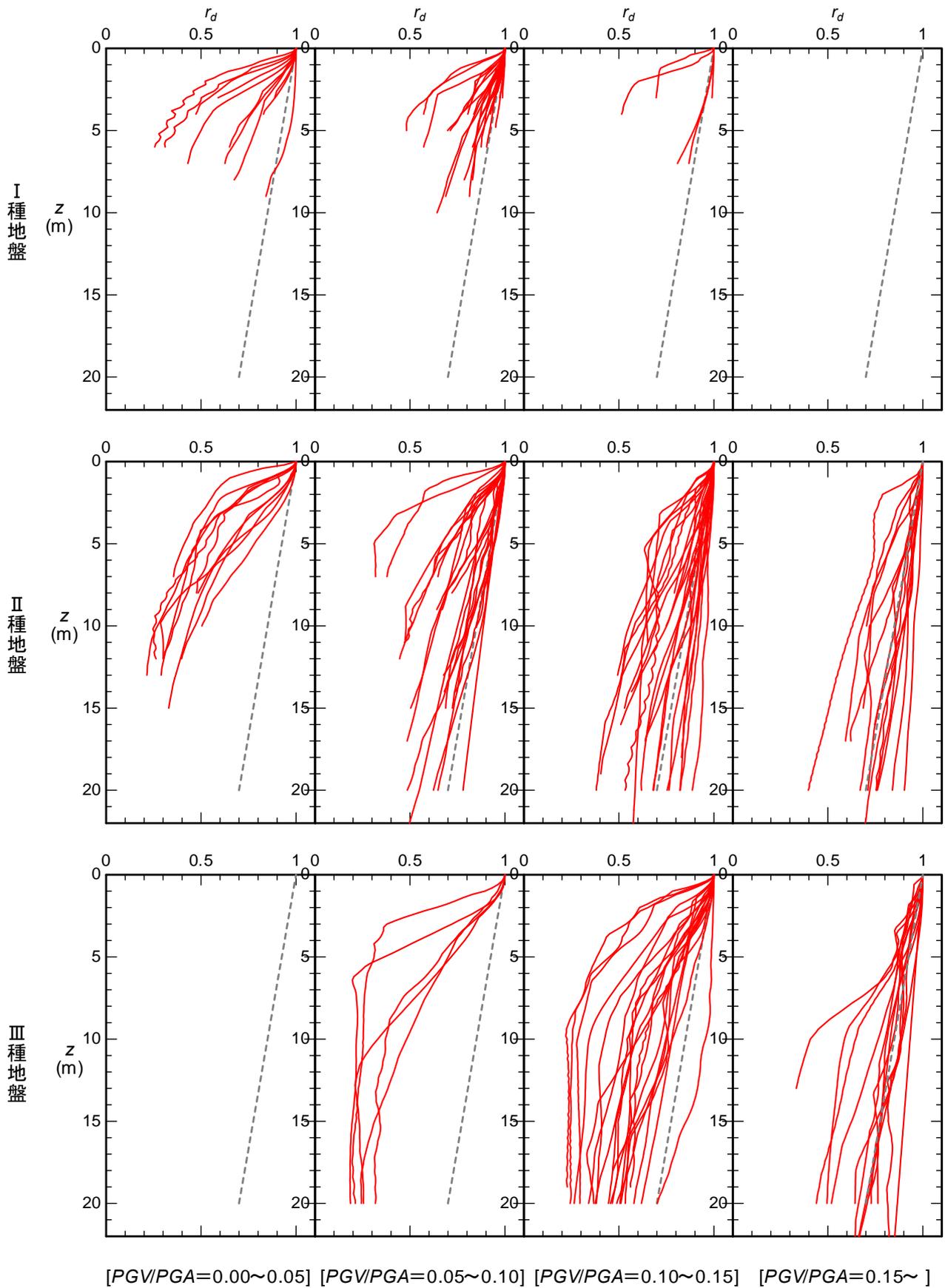


図-16 PGV/PGA, 地盤種別毎の  $r_d$  分布傾向

b) 理論的考察

地中せん断応力の低減係数と地震動および地盤に関する指標についての理論的な関連性について以下に示す。

表層地盤を一様と仮定すると、重複反射理論から地中せん断応力は式(16)で表すことができる。

$$\tau = \rho \cdot (c_v \cdot AVS) \cdot \left\{ \dot{u}_s \left( t + \frac{z}{c_v \cdot AVS} \right) - \dot{u}_s \left( t - \frac{z}{c_v \cdot AVS} \right) \right\} \quad (16)$$

式(16)より、速度の最大値に着目することとすると  $\tau_{max}$  は式(17)のように表すことができる

$$\tau_{max} = \rho \cdot (c_v \cdot AVS) \cdot \alpha_v \cdot PGV \quad (17)$$

$r_d$  は、地盤が剛体であると仮定したときの地中せん断応力  $\tau_0$  の最大値に対する実際のせん断応力  $\tau$  の最大値の比であり、式(19)で表すことができる。式(18)に式(17)を代入して解くと、ある深度における地中せん断応力の低減係数は式(19)となり、 $r_d$  と地表地震動指標および地盤に関する指標との関係性を導くことができる。

$$r_d = \frac{\tau_{max}}{k_{hg} \cdot \sigma_v} \quad (18)$$

$$r_d = \frac{PGV}{PGA} \cdot \alpha_v \cdot \frac{c_v \cdot AVS}{z} \quad (19)$$

式(19)について、計算深度における  $z$  を  $z_b$  とし、深度  $z_b$  における地中せん断応力の低減係数を  $r_{db}$  とすることで、式(20)のように表すことができる。この式から計算深度  $z_b$  における地中せん断応力の低減係数  $r_{db}$  は地表地震動諸元  $PGA$ ,  $PGV$  および地盤の特性を表す  $S$  波速度低下率  $c_v$ , 表層地盤全体の平均  $S$  波速度  $AVS$ , 計算深度  $z_b$  と一定の関係を持つことが分かる。

$$r_{db} = \frac{PGV}{PGA} \cdot \alpha_v \cdot \frac{c_v \cdot AVS}{z_b} \quad (20)$$

c)  $\alpha$ ,  $r_{db}$  と地表地震動および地盤に関する指標との相関

$r_d$  と理論的な関係性をもつ  $PGA$ ,  $PGV$ ,  $AVS$ ,  $z_b$  について単独、または組み合わせた複数のケースについて  $\alpha$  および  $r_{db}$  との相関を検討した。 $\alpha$  との相関図を図-14 に、 $r_{db}$  との相関図を図-15 に示す。

検討結果は、 $\alpha$  と地震動諸元等との相関性が低いのに対し、 $r_{db}$  と地震動諸元等との相関が良い結果となった。これは、 $\alpha$  が地表地点の  $r_d$  深度方向分布の勾配を表す定数であるのに対し、 $r_{db}$  は計算下端深度における  $r_d$  を表すもので、計算対象とした地盤全体の地震動および地盤に関する指標の傾向を示すものであり、地盤の振動周期を表す  $PGV/PGA$  や、計算対象とした地盤全体の平均  $S$  波速度  $AVS$  との相関は良い結果となった。

さらに、図-16 に示すように 152 記録について  $r_d$  と相関の良かった  $PGV/PGA$  の大小および地盤種別で区分し  $r_d$  深さ方向分布の傾向を確認した。

地中せん断応力と地盤振動周期との関係は、地盤の卓越周期が長周期となる程、地盤の慣性力が大きくなり、地中せん断応力は低減しないという関係性がある。そのため、地盤の卓越周期の指標である  $PGV/PGA$  が大きく、長周期が卓越する地盤ほど、地中せん断応力は低減しにくい傾向となる。また、地盤種別については、軟弱な III 種地盤ほど地中せん断応力は低減しやすく、硬質な I 種地盤ほど低減しにくい傾向となる。

図-16 の  $r_d$  深さ方向分布においても  $PGV/PGA$  が大きい右側の範囲のケースほど地中せん断応力が低減せず、左側の範囲のケースはよく低減する傾向を概ね捉えている。

d)  $\alpha \cdot r_{db}$  関係式

$\alpha$  については、地震動諸元等との相関が悪いため、図-17 に示す  $r_{db}$  との相関関係から導くこととした。

$\alpha \cdot r_{db}$  の関係について、前述したように  $r_d$  は 1.0 を超えないため、 $r_{db}$  が 1.0 に漸近する下に凸の双曲線型の回帰曲線式(21)で近似することとした。

$$\alpha = \frac{m r_{db}}{1 - n r_{db}} \quad (21)$$

回帰曲線の  $\alpha$  は初期勾配を規定する定数であり、 $n$  は  $\alpha$  が無限大となる場合の  $r_{db}$  を示し、 $r_{db}$  の漸近値を示す値であるため、 $n=1.0$  とする。 $m$  については、下に凸の曲線度合いを規定する定数であり、最小二乗法により平均をとる曲線とした場合、 $r_d$  深度分布の初期勾配を表す  $\alpha$  を小さく評価するケースが多くなる。 $\alpha$  を小さく評価することは、 $r_d$  深度分布の初期勾配が水平に近い勾配となるため、地中せん断応力が表層付近で大きく低減することを示す。これは設計に用いる場合に危険側の結果となるため、安全側となるように、曲線が  $\alpha \cdot r_{db}$  プロットの概ね上面を通るように  $m=24.5$  とし、 $\alpha$  は式(22)とした。

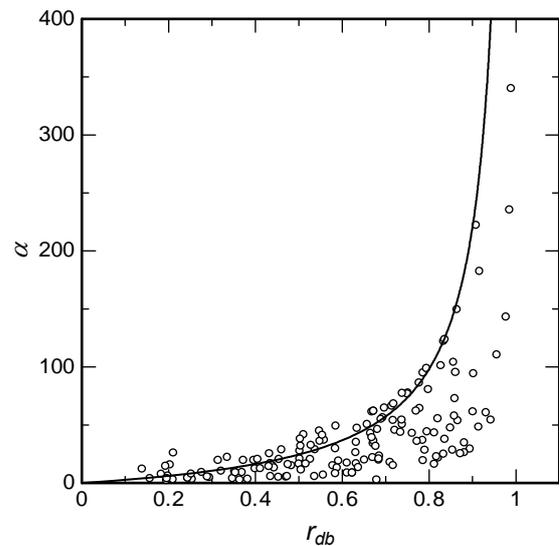


図-17 強震記録における地中せん断応力の低減係数の計算結果

$$\alpha = 24.5 \times \frac{r_{db}}{1 - r_{db}} \quad (22)$$

ここで、深度  $z$  が無限遠となる  $r_d(\infty) = 1 - 1/\beta$  において、 $\beta < 0$  となった場合、 $r_d$  が 1 以上となり計算が破綻するため、 $\beta \geq 0$  の制約条件を設定する必要がある。

$$\alpha \leq \frac{z_b}{1 - r_{db}} \quad (23)$$

よって、 $\alpha$  は式(23)の条件を含めた式(24)により求まる。

$$\alpha = \min\left(\frac{24.5r_{db}}{1 - r_{db}}, \frac{z_b}{1 - r_{db}}\right) \quad (24)$$

#### e) $r_d$ 回帰式の設定

$r_{db}$  を回帰する指標については、図-15 に示した  $r_{db}$  と理論的關係性をもつ各種指標との相関モデルのうち、最も相関性が高く、 $AVS$  及び  $z_b$  を含むことで各サイトの地盤特性の違いを捉えることのできる  $PGV/PGA \cdot AVS/z_b$  を選定し、図-18 に示すように  $r_{db}$  との回帰式を設定した。

$r_{db}$  と  $PGV/PGA \cdot AVS/z_b$  との関係は、図-18 に示すとおり、上に凸の双曲線関数により近似することができ、前述したように  $r_d$  は 1 を超えないため、1 に漸近し、概ね平均をとる以下の曲線式を設定した。

$$r_{db} = \frac{A \cdot x}{1 + A \cdot x} \quad (25)$$

$$x = \frac{PGV \cdot AVS}{PGA \cdot z_b}, \quad A = 1.5$$

なお、 $r_{db}$  と  $PGV/PGA$  の関係には図-19 に示すように地盤種別毎に分かれる傾向があり、これを指標とし地盤種別で分ける式についてもケース 2 として作成した。地盤種別ごとに原点を通る直線近似により概ね平均をとる一次関数式(26)~(28)を設定した。

$$r_{db} = \begin{cases} 10.06(PGV/PGA) & \text{I 種地盤} & (26) \\ 5.19(PGV/PGA) & \text{II 種地盤} & (27) \\ 3.53(PGV/PGA) & \text{III 種地盤} & (28) \end{cases}$$

ただし、 $r_{db} \leq 1.0$  とする。

#### (4) $r_{db}$ 回帰式の検証

図-20 に示す東北地方太平洋沖地震における液状化・非液状化地点において、地表地震動および地盤に関する指標より回帰した地中せん断応力の低減係数  $r_d$  式(15)および細粒分を含む砂の液状化強度評価式<sup>15)</sup>を適用し、液状化判定を行い、現行基準である H24 道路橋示方書<sup>1)</sup>による液状化判定結果と比較した。

$r_d$  のパラメータとなる  $PGA$ 、 $PGV$  は国総研地震動メッシュ推定値<sup>7)</sup>から地点ごとに設定し、 $AVS$ 、 $z_b$  は各地点の  $N$  値から設定した。

比較においては、液状化の有無と地盤の強度の影響を

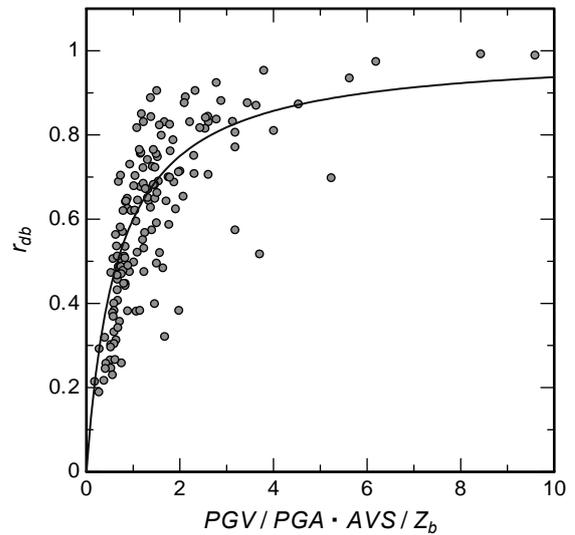


図-18 強震記録における地中せん断応力の低減係数の計算結果

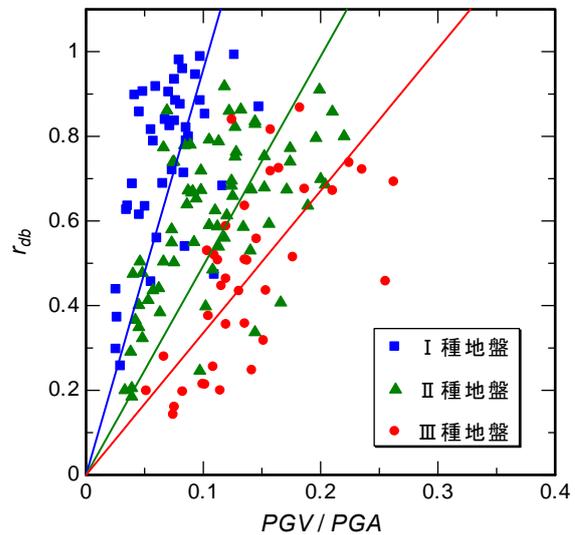


図-19  $r_{db}$  と  $PGV/PGA$  の関係

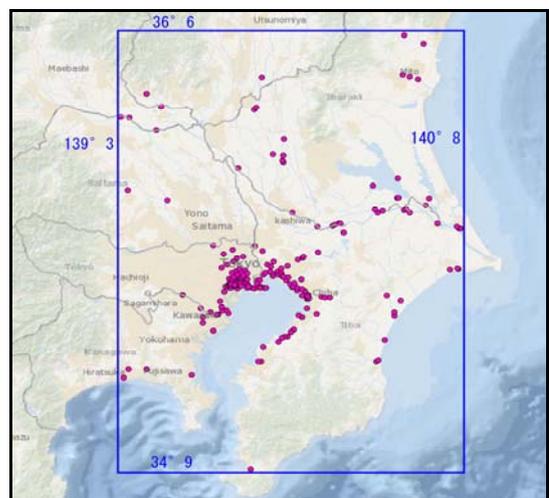


図-20 液状化判定地点とその範囲

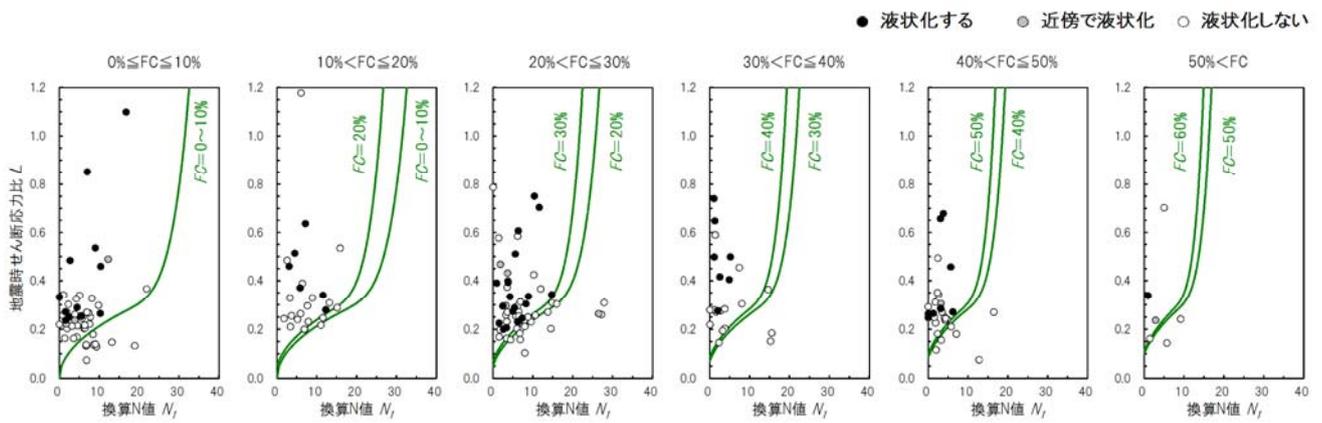


図-21 現行道路橋示方書による液状化判定における最小 $F_L$ 深度の $L \cdot N_1$ 図（全データ）

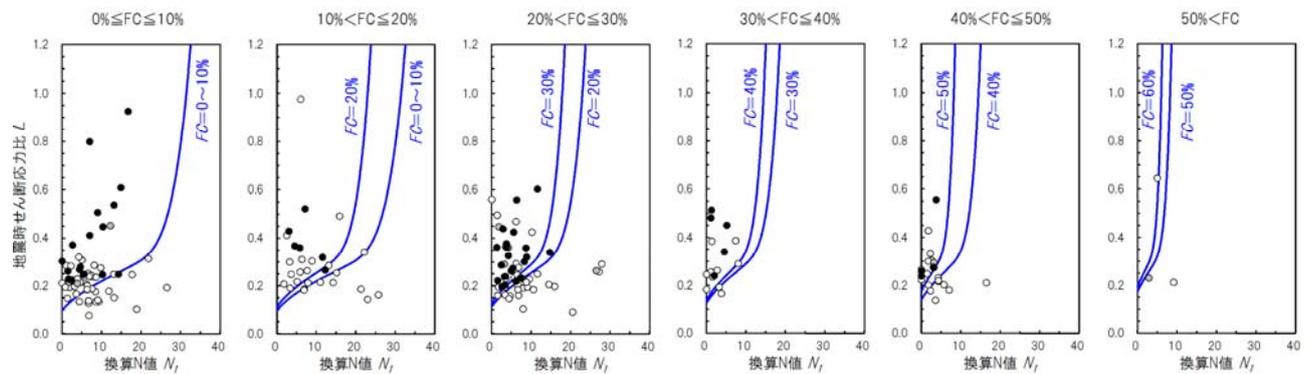


図-22  $r_0$ 提案式による液状化判定における最小 $F_L$ 深度の $L \cdot N_1$ 図（全データ）

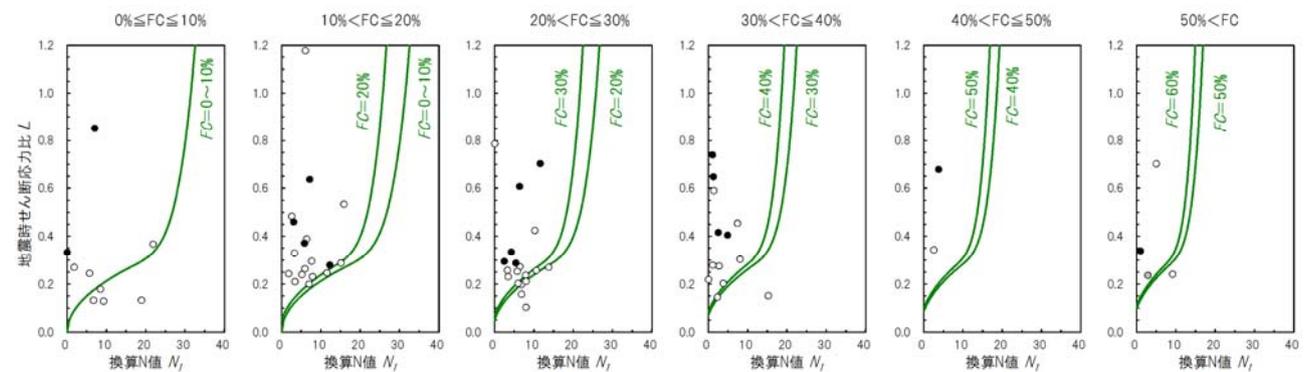


図-23 現行道路橋示方書による液状化判定における最小 $F_L$ 深度の $L \cdot N_1$ 図（物理試験結果のあるデータのみ）

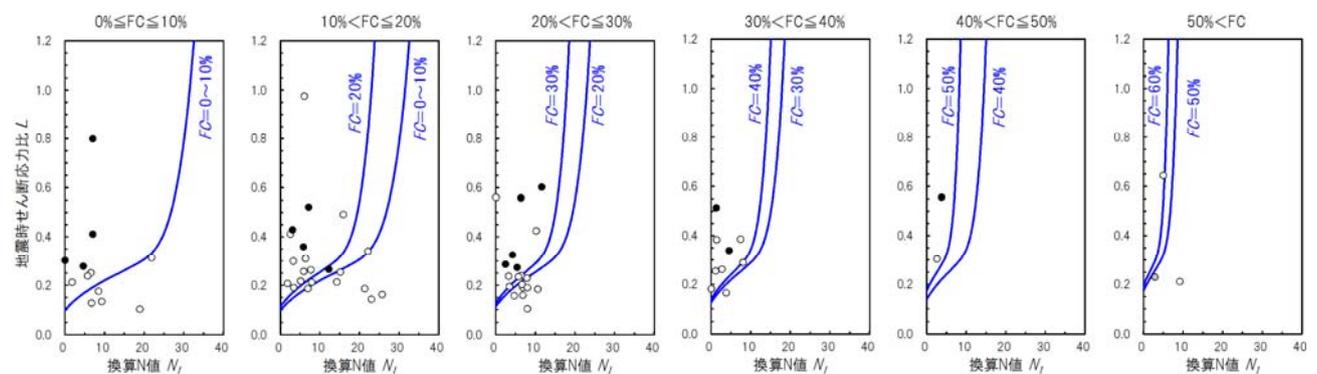


図-24  $r_0$ 提案式による液状化判定における最小 $F_L$ 深度の $L \cdot N_1$ 図（物理試験結果のあるデータのみ）

検討するために、図-21～図-24に示すように換算  $N$  値  $N_1$  と地震時せん断応力比  $L$  との関係図を作成した。図中のプロットは各地点で最小  $F_L$  値となった深度の  $N_1 \cdot L$  をプロットし、曲線は液状化強度推定式（細粒分含有率の区分に対応した換算  $N$  値と液状化強度比  $RL$  の関係）を示しており、この曲線の上側では液状化すると判定され、これより下側では液状化しないと判定されることになる。図-21、図-23は道路橋示方書の細粒分による液状化強度推定式、図-22、図-24は、前述の細粒分による液状化強度推定式を適用した曲線としている。

図-21に示す H24 道路橋示方書による液状化判定結果においては、液状化強度推定式の左上に液状化しなかった箇所が多数存在したが、図-22に示す本検討で提案した  $r_d$  による地中せん断応力比  $L$  の補正を行った結果は、右下に存在する液状化しない箇所が増えていることから実際は液状化しなかったと考えられる地点で液状化すると判定されるケースが減少したことが確認できた。このことから、細粒分含有率による液状化強度の見直しおよび地中せん断応力比の低減係数の見直しにより液状化しない箇所の判定精度が向上したといえる。

ただし、図-22のケースでは液状化した箇所でわずかに  $F_L > 1$  となる実際液状化したと考えられる箇所で僅かな差で液状化しないと判定された箇所が数箇所存在する結果となった。これは、細粒分含有率の値を代表粒径による一般値により設定していることが要因と考えられたため、図-23、図-24に示すように、最小  $F_L$  となっている深度で細粒分含有率を物理試験により評価している箇所のみを抽出した結果、実際液状化したと考えられる箇所で液状化しないと判定された箇所は存在しない結果となった。また、図-23、図-24を比較すると、 $10\% < FC \leq 20\%$ 、 $20\% < FC \leq 30\%$  のグラフで液状化しなかった地点が  $R_L$  曲線よりも右下側に移動してはっきりと分かれており、精度の向上が確認できた。

なお、式(28)～(30)を用いた液状化判定による  $L \cdot N_1$  図についても式(27)とほぼ同様の結果であった。

#### 4. まとめ

簡易液状化判定に用いる地震時せん断応力比の低減係数  $r_d (= 1-0.015z)$  の検証および見直しに資するため、強震記録から地中せん断応力を直接的に推定する手法においてポイントとなる表層地盤のひずみ依存性による  $S$  波速度低下率  $c_v$  について、簡易設定法の構築を試み、鉛直アレー記録および模型実験を対象に同手法の検証を行った。

さらに、この一連の手法を数多くの強震記録に適用することで、実地盤・実地震における数多くの地中せん断応力分布を算出した。また、その結果と地表地震動およ

び地盤に関する指標との関係についての相関性を分析し、回帰式を作成した。その結果は次のとおりである。

- 1)  $PGV$  を指標とし、坂井・室野の等価 1 自由度モデルに Hardin-Dmievich モデルを組み込むことで、地盤全体の平均的な  $S$  波速度低下率  $c_v$  を簡易的に設定する手法を構築した。
- 2) 鉛直アレー記録について簡易設定法により算出した結果、 $PGV$  の増加による  $c_v$  の低下傾向および最も強い地震動に対する  $PGV$  から算定した  $c_v$  は鉛直アレー記録と同等、またはそれ以上の値が得られた。なお、 $c_v$  が大きな値となることは、 $c_v$  が大きい場合ほどせん断応力が低減しにくいいため、液状化判定においては安全側の評価が得られることとなる。
- 3) 模型実験において、簡易設定法により算出した  $c_v$  は、加速度計測値より算出した  $c_v$  と比べ 1 割程度の差が生じたが、 $\tau_{max}$  および  $r_d$  の深さ方向分布を算出した結果、多数の加速度計測値から直接的に算出されたそれらとよく一致した。
- 4) 多数の強震観測地点において地中せん断応力の低減係数  $r_d$  深度分布を計算し、 $r_d$  深度分布についての近似式を作成した。また、地中せん断応力と地表地震動及び地盤に関する指標である  $PGV/PGA \cdot AVS/z_b$  との理論的關係を明らかにし、この指標について作成した近似式の定数との関係から回帰式を作成した。
- 5) 東北地方太平洋沖地震における液状化・非液状化地点において、作成した回帰式を用いて地中せん断応力の低減係数  $r_d$  を用いた液状化判定を行い、道路橋示方書における  $r_d$  式を用いた液状化判定結果と比較した結果、精度が向上が確認できた。

謝辞：本報で検討対象として、国土技術政策総合研究所道路構造物研究部 道路地震防災研究室（旧防災・メンテナンス基盤研究センター 国土防災研究室）より鉛直アレー記録および東北地方太平洋沖地震の地震動分布を提供して頂いた。ここに感謝の意を表する。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編，pp.134-141，2012.3.
- 2) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一：N 値等による飽和砂質土の非排水動的強度推定式の検討，第 13 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.473-476，1978 年.
- 3) 佐藤正行，安田進，吉田望，増田民夫：地盤の地震時せん断応力の簡易推定法，土木学会論文集，No.630/III-45，pp.83-96，1998 年 12 月.
- 4) 小林寛，田村敬一，谷本俊輔：地盤の周期特性を考慮した地震時せん断応力比の簡易評価手法に関する検討，土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集，2002 年 9 月.

- 5) 川口剛, 谷本俊輔, 佐々木哲也: 地震動特性と地盤の非線形応答特性を考慮した地中せん断応力の評価方法, 日本地震工学論文集, Vol.16, No.1, pp.1\_106-1\_125, 2016.1.
- 6) 港湾空港技術研究所ほか: 港湾地域強震観測, <http://www.eq.pari.go.jp/kyosin/>
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所 防災研究所国土防災研究室: 東日本大震災関連情報, <http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/>
- 8) Ohmachi, T. & Tahara, T.: Nonlinear earthquake response characteristics of a central clay core rockfill dam, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.2, 2011.4, pp.227-238.
- 9) 時松孝次, 翠川三郎: 地表で観測された強震記録から推定した表層地盤の非線形性状, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 388 号, pp.131-137, 1988.6.
- 10) 坂井公俊, 室野剛隆: 地盤の等価 1 自由度モデルを用いた動的解析法の提案, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, 2014
- 11) 吉田望, 若松加寿江: 土の繰返しせん断特性のモデル化と地質年代・堆積環境の影響, *地盤工学ジャーナル*, Vol.8, No.2, pp.265-284, 2013.6.
- 12) 防災科学技術研究所: 強震観測網(K-NET,KiK-net), <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 13) 国土交通省国土技術政策総合研究所 地震防災研究室: 平成 23 年(2011 年)東北地方太平洋沖地震による強震記録, 国総研資料 726 号
- 14) 建設省土木研究所: 土木構造物における加速度強震記録 (No.21), *土木研究所彙報*第 64 号, 1995.6.
- 15) 国立研究開発法人土木研究所 地質・地盤研究グループ 土質振動チーム: 3.8 液状化判定法の高精度化に関する研究①, pp.1-6, 平成 25 年度プロジェクト研究・重点研究報告書, 2013.

(2016.?? 受付)

## THE ASSESSMENT METHOD OF THE REDUCTION FACTOR $R_d$ OF THE SEISMIC SHEAR STRESS IN CONSIDERATION OF THE EARTHQUAKE MOTION CHARACTERISTICS AND GROUND CHARACTERISTICS

Tomoki JIZO, Shunsuke TANIMOTO, and Tetsuya SASAKI

This study, in assessing the seismic shear stress ratio  $L$  of the assessment method of liquefaction based on  $FL$ , is investigated the method to consider the influence of the earthquake motion characteristic and the amplification characteristics due to the nonlinearity of the surface ground.

In this paper, in order to expand the application scope of the assessment method of the seismic shear stress using the earthquake motion record on ground surface that authors proposed, we investigated a Simplified assessment method based on surface earthquake record about the reduction rate of S-wave velocity of surface ground by strain dependence.

Furthermore, Performed a Regression analysis from the relationship between the calculated reduction factor of seismic shear stress by the proposed method by using a lot of strong motion observation records, and Indicators of surface earthquake motion and the ground. And, assembled a regression formula for estimating the reduction factor  $r_d$  of seismic shear stress.