



海溝型長継続時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性

吉田 望¹⁾, 大矢陽介²⁾, 澤田純男³⁾, 中村 晋⁴⁾

1)正会員 東北学院大学工学部環境建設工学科, 教授 工博
e-mail: yoshidan@tjcc.tohoku-gakuin.ac.jp

2)正会員 東北学院大学大学院工学研究科土木工学専攻
e-mail: ooya-y@pari.go.jp

3)正会員 京都大学防災研究所, 教授 工博
e-mail: sawada@catfish.dpri.kyoto-u.ac.jp

4)正会員 日本大学工学部土木工学科, 教授 工博
e-mail: s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

要 約

海溝型地震に対する液状化抵抗率に基づく簡易液状化判定法を提案する。長周期、長継続時間の海溝型地震に対しては液状化事例がほとんどないので、過去の液状化研究で用いられた地盤データを集め、有効応力地震応答解析を行った。その結果を既往液状化簡易判定法と比較し、精度を検証したところ、既往の方法はいずれも内陸地殻内地震に対してはある程度合理的な結果を得ることができたが、海溝型地震に関しては繰返し載荷の影響を小さく評価しすぎ、危険側の評価となることがわかった。海溝型地震では、繰返し数は従来の判定法で対象としているのに比べ非常に多いことが原因と考え、長周期、長継続時間海溝型地震に対する繰返し回数補正係数を提案した。それは、液状化強度を既往の半分程度に設定することであり、この結果、内陸地殻内地震と同程度の精度で判定することができるとわかった。

キーワード: 液状化, 簡易判定法, 有効繰返し数, 海溝型地震, 直下型地震

1 はじめに

液状化は地震時に大きな地盤災害を発生させ、また支持力の喪失や地盤の大変形に起因する構造物被害発生の原因ともなるので、その予測は重要である。液状化の発生予測を行うには有効応力に基づく地震応答解析、全応力解析に基づく地震応答解析、および簡易判定法などがある¹⁾。有効応力解析は最も精度が高くなる可能性を有した予測法であるが、一方では多くの地盤データを必要とし、また解析に技術が必要ということもあり、特殊な目的以外では用いられていない。一般の設計に用いられるのは簡易判定法で、各種の設計指針（例えば、道路橋示方書²⁾、基礎構造設計指針³⁾、鉄道構造物等設計標準⁴⁾、港湾の施設の技術上の基準⁵⁾など）ではその方法を示している。このうち、港湾の基準は判定時のせん断応力の算定に全応力地震応答解析を行うが、その他の方法では液状化強度と地表の最大加速度から評価された地震時最大せん断応力の比である液状化抵抗率 F_L に基づく判定が用いられている。被害想定でも通常は簡易判定法が用いられる。

これらの簡易判定法は一般に過去の地震による液状化の発生が評価できたか否かで妥当性が示されてきている。しかしながら、本論文で検討しようとしている南海、東南海地震の様な巨大なプレート

境界型地震は、液状化の研究が始まって以降大きな被害事例がないことから、実地震で検証されているわけではない。筆者等は、内陸地殻内地震と東南海地震を想定した海溝型地震では、繰返し数が異なるために、同じレベルの最大加速度の地震でも後者の方が液状化発生の可能性が高いことを有効応力解析によるケーススタディにより示した⁶⁾。このことは、地震時外力を最大せん断応力で評価しているほとんどの簡易判定法は危険側の評価を行っている可能性を示唆している。しかし、海溝型巨大地震に関しては被害事例がないことから、被害事例に基づいて簡易判定法の有効性を検証することができない。また、被害事例に基づくと、同じ場所で判定結果を比較することができないであろうから、同じ判断基準で直下型と海溝型の評価を行うことも困難である。そこで、本論文では有効応力地震応答解析 YUSAYUSA⁷⁾を用いた地震応答解析を用いて既往の液状化判定法の精度を検証し、さらにその結果に基づいて海溝型巨大地震に対する補正法を提案する。

なお、本論では海溝型地震と内陸地殻内地震を扱っているが、これらはマグニチュード8クラスの地震時に震源域から少し離れた地域で観測されるであろう地震動継続時間が長い地震波とマグニチュード7クラスの地震時に震源域近傍で観測されるであろう継続時間が短い大きな振幅を持つ地震波を意味している。ここで、内陸地殻内地震は防災上直下型地震と呼ばれることも多いので、本論では、直下型地震と称することにする。

2 計算条件

2.1 対象地盤

過去の地震の際に液状化発生の有無の調査が行われたサイト⁸⁾を検討の対象とする。文献8)に示されるのは275地盤であるが、このうち、後に述べる基準で分類して液状化判定対象層を含んでいない地盤が39地盤あり、これを除く236の地盤が液状化の可能性のある層を含んでいる。

図1に道路橋示方書²⁾に示される簡易法により算出したこれらのサイトの固有周期を示す。図の横軸は、個々のサイトにつけた番号で、特に物理的な意味はない。図には周期の頻度分布も示しているが、周期は0.084~0.609秒までの間に広く分布している。道路橋示方書²⁾による地盤分類では、周期0.2~0.6秒の地盤をⅡ種地盤と設定しているので、多くの地盤はⅡ種地盤であり、Ⅲ種地盤はほとんどない。

2.2 地震波

検討には、海溝型地震による地震波を用いるが、比較のために直下型地震の地震波も用いる。海溝型地震としては東南海地震用に作成された模擬地震動の尼崎の地震動⁶⁾および2003年十勝沖地震の際に苫小牧で観測された波形⁹⁾を用いる。また、直下型地震としては、1995年兵庫県南部地震の際ポートアイランドで観測された GL-33m 記録の NS 成分を用いる。図3にこれらの波形を示す。解析ではこれらの波形を基盤複合波として作用させる。ちなみに、ポートアイランド地震動では主要動部分20秒を、東南海地震模擬地震動では585秒、十勝沖地震地震動では200秒を解析対象とした。また、十勝

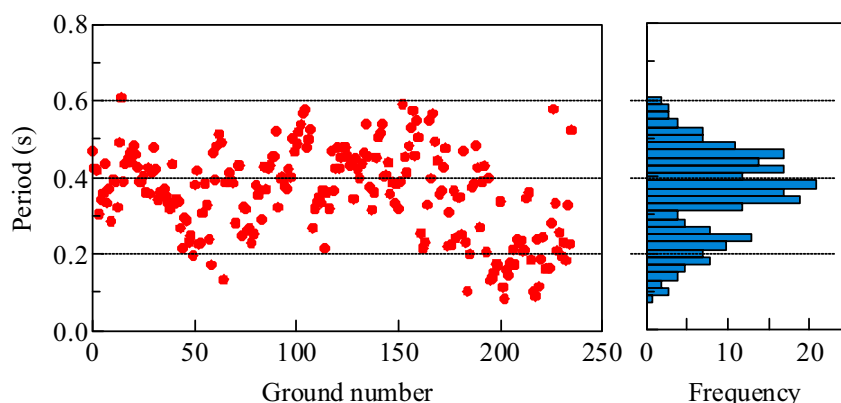


図1 検討対象236地盤の固有周期の分布

沖地震の波形では観測波形を入力したところ、どのサイトでも液状化が発生しなかった。これは、観測サイト（苫小牧）は震源から約 200km も離れているので、地震動が小さかったことが原因と考えられる。そこで、ここでは、振幅を 2 倍したものを入力に用いた。以下では、これらの入力による結果を引用する際、PI 波（Port Island）、東南海波（Tonankai）、苫小牧波（Tomakomai）と表現する。なお、東南海地震の模擬地震波は尼崎のサイトに対して作られたものであるが、わかりやすさから、地震名を用いることにし、地点名では表現しないことにした。

図2に応答スペクトルを示す。疑似速度応答スペクトルの最大値は PI 波、東南海波、苫小牧波の順に小さくなる。また、東南海波、苫小牧波では長周期でスペクトル値が大きくなっている。

2.3 有効応力地震応答解析手法

有効応力地震応答解析には、水平成層に対する解析プログラム YUSAYUSA⁷⁾を用いた。このプログラムではせん断応力-せん断ひずみ関係は双曲線モデルと Masing 則の組み合わせで表現される。また、非排水状態の過剰間隙水圧の発生は、荷重、除荷のそれぞれに対してせん断応力-有効上載圧平面における応力経路を設定することで求められる。

YUSAYUSA では液状化の判定に二つの基準を用いている。一つは有効応力経路が変相線と交わったときである。これは、これ以後急激に過剰間

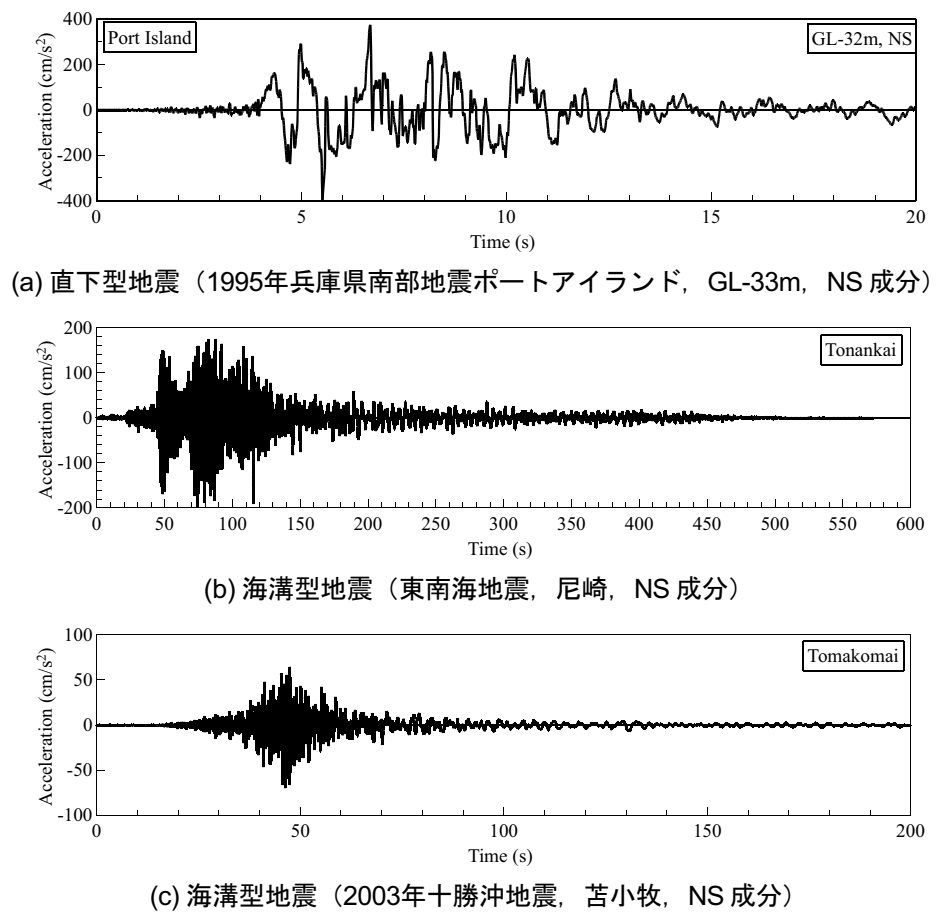


図3 検討に用いた加速度時刻歴

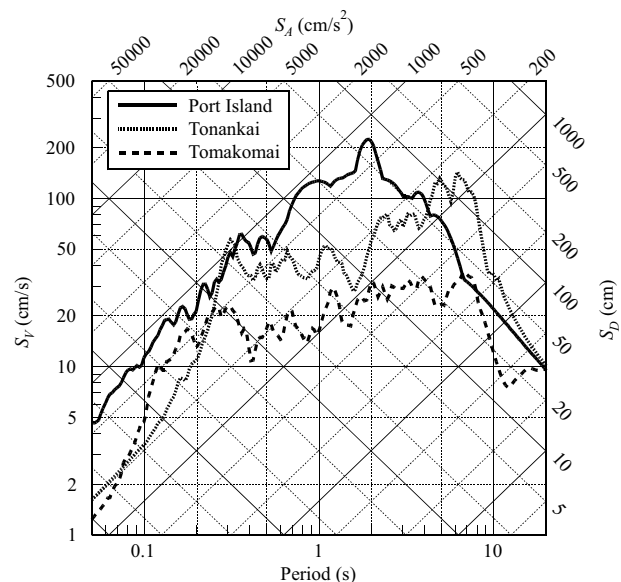


図2 応答スペクトル

隙水圧が発生するようになる状態であり、「初期液状化」と呼ばれている。もう一つは有効上載圧が設定した最小値になる時で、今回の計算では過剰間隙水圧比0.97に相当し、「完全液状化」と呼ばれる。これらの呼び名は YUSAYUSA 独特のものであり、一般的なものではない。一方、広く知られている液状化の定義は、過剰間隙水圧が有効拘束圧にちょうど等しくなった時を表す「初期液状化」と土が液体状になり大きなひずみが発生した時を表す「完全液状化」である¹⁰⁾。また、地盤工学会では過剰間隙水圧が有効拘束圧にちょうど等しくなる代わりに、過剰間隙水圧比（過剰間隙水圧の初期有効拘束圧に対する比）が0.95になった時点を経験液状化と定義している¹¹⁾。この状態は YUSAYUSA の完全液状化とほぼ同じ条件であるので、以下の検討では YUSAYUSA で完全液状化した時を液状化の発生と判定する。なお、YUSAYUSA の初期液状化を用いる際には「変相 (Phase transform)」と呼ぶことにする。

2.4 地盤のモデル化

収集した柱状図には、基本的には土質分類と単位体積重量、標準貫入試験の N 値は示されているが、地震応答解析を行うのに必要な諸量が全て示されていないわけではない。そこで、必要なデータが無い場合のデータの推定と扱いの簡略化を目的として以下の方針でそれらを設定した。

(1) 土質分類と N 値

礫、砂、シルト、粘土の4種類に分類する。また、対応する層の N 値のデータが無いときにはその層は直下の層と同じ材料として扱う。同じ層に複数の N 値があるときにはその平均をその層の N 値とする。

層厚が厚いと数値解析の際に高振動数成分の波動を通すために層を再分割する必要がある。そこで、層厚の最大値を $V_s/100$ (m) (V_s はせん断波速度) に設定し、この層厚より大きい層は計算上は層を等分に再分割し、最大層厚が最大値を超えないようにした。これにより10~15Hz の波動までは考慮できている¹²⁾。

(2) 弾性定数

以下の式²⁾により、 V_s を N 値より算定する。ただし、筆者らの経験に基づくと都市部では V_s が100m/s を下回る事例はほとんどないことから、 V_s の最小値を100m/s とする。

$$\begin{aligned} V_s &= 100N^{1/3} && \text{粘土} \\ V_s &= 80N^{1/3} && \text{礫, シルト, 砂} \end{aligned} \quad (1)$$

(3) 強度定数

砂の内部摩擦角 ϕ_d は、畑中らの式¹³⁾に基づき、拘束圧補正された N 値である N_1 値より求める。シルト、礫にも同じ式を適用する。

$$\phi_d = \sqrt{20N_1 + 20}, \quad N_1 = N/(\sigma'_v/98)^{0.5} \quad (2)$$

(ただし、最小値は30度とする。)

次に、粘土には以下の式を用いる (文献14)に基づき設定)。

$$c = N/4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)} \approx 25N \text{ (kPa)} \quad (3)$$

(4) 液状化強度

20回の繰返し載荷に対応する液状化強度 R_L を道路橋示方書²⁾に基づき決定する。次に、静止土圧係数 $K_0=0.5$ を仮定し、初期有効上載圧で無次元化した液状化強度 R_{L20} を求める。すなわち、液状化強度はせん断応力振幅を初期有効拘束圧で無次元化すると拘束圧にかかわらず単一の曲線として表される

¹⁵⁾ので、 R_{L20} は次式により求められる。

$$R_{L20} = \frac{1+2K_0}{3} R_L = \frac{2}{3} R_L \quad (4)$$

次に、文献16)に示されるマグニチュードごとの等価繰返し回数と液状化強度の関係をを用いて、繰返し回数5回に対応する液状化強度比 R_{L5} を求めると、次式となる。

$$R_{L5} = R_{L20} \times 1.31 / 0.924 = 1.43 R_{L20} \quad (5)$$

最後に、得られた R_{L5} と R_{L20} が要素に対する計算結果から求められる液状化強度（曲線）と一致するように、YUSAYUSA で過剰間隙水圧の発生を制御するパラメータ B_p と B_u を求める。なお、 R_{L20} が 0.6 より大きい層、 N 値が 25 より大きい層は液状化判定の対象としなかった。

このほか、最小の有効上載圧比は0.03、過剰間隙水圧を発生しないせん断応力比は0.06と設定した。これらは YUSAYUSA で標準的に用いられる値である⁷⁾。

(5) その他

地震応答に際しては、Rayleigh 減衰の内、剛性に比例する減衰のみを採用し、減衰定数は図1に示す固有周期で3%に設定した。

2.5 簡易判定法

本論文では道路橋示方書の砂に対する簡易判定法を準用して液状化を判定する。

(1) 基礎式

道路橋示方書では液状化に対する抵抗率 F_L は次のように求められる。

$$F_L = R / L \quad (6)$$

ここで、

$$L = r_d k_{hg} \sigma_v / \sigma'_v \quad \text{地震時せん断応力比} \quad (7)$$

$$r_d = 1 - 0.015z \quad \text{地震時せん断応力比の深さ方向低減係数}$$

$$R = c_w R_L \quad \text{動的せん断強度比}$$

$$R_L = \begin{cases} 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882 \sqrt{N_a / 1.7} + 1.6 \times 10^{-6} (N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases} \quad \text{繰返し三軸強度比}$$

$$N_a = c_1 N_1 + c_2 \quad \text{粒度の影響を考慮した補正 } N \text{ 値}$$

$$N_1 = 170N / (\sigma'_v + 70) \quad \text{有効上載圧100kPa 相当に換算した } N \text{ 値}$$

$$c_1 = \begin{cases} 1 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c + 40) / 50 & (10\% \leq F_c < 60\%) \\ F_c / 20 - 1 & (60\% \leq F_c) \end{cases} \quad \text{細粒分含有率による補正係数}$$

$$c_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c - 10) / 18 & (10\% \leq F_c) \end{cases} \quad \text{細粒分含有率による補正係数}$$

また、 c_w は地震動特性による補正係数で、レベル 2 地震動の内、タイプ I 地震動に対しては 1.0、タイプ II 地震動に対しては次の式で補正する。

$$c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

なお、設計震度 k_{hg} は道路橋示方書では地域別補正係数と設計水平震度の標準値との積で表されているが、本論文では有効応力地震応答解析で得られた地表の最大加速度を重力加速度で除した震度を用いる。

(2) 補正係数

道路橋示方書の基となった、岩崎らの論文¹⁷⁾では、三軸試験で得られたせん断応力比 R_L を地震によるせん断応力比 L と比較する際に、本来は L に対応する液状化強度比 R を用いるべきであるとし、 L が最大加速度に対して設定されたものなので、液状化強度もこれに対応する R_{max} であるべきとし、その補正方法として式(8)が示されている¹⁷⁾。

$$R_{max} = C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 R_L \quad (8)$$

ここで、 C_1 は繰返し三軸試験と原位置の拘束圧に関する補正係数で $(1+2K_0)/3$ 、 C_2 は地震波形の不規則性に関する補正係数で $1/0.55 \sim 1/0.7$ 、 C_3 、 C_4 はサンプリングから試験までの試料の乱れと密実化に関する補正係数でその積は 1.0、 C_5 は揺れの二次元性に関する補正係数で 0.9 である。これらを掛け合わせると、結局 $R_{max}=R_L$ となることが示されている。道路橋示方書では、その後、兵庫県南部地震のような直下型地震（タイプ II 地震動）では繰返し数が少なく液状化することを考慮して液状化強度を大きく評価してよいことが示され、補正項として c_w が加えられた。これは、 C_2 に対する新たな補正項と考えることができる¹⁸⁾。

(3) 地震時せん断応力比の改良法

道路橋示方書では地震時せん断応力比を地表の最大加速度（実際には水平震度）から求めている。直下型地震では観測される地表の加速度が非常に大きいので、至る所で地盤が液状化すると判定されるが、SI 値を用いると断層近辺でもそれほど大きな値にならない¹⁹⁾、最大加速度はパルスのような時もあるが地中のせん断応力にはそれほど影響しない²⁰⁾、液状化には最大値以外に繰返し数も重要であるが、最大加速度では繰返し数の影響は考慮されない²¹⁾、等の理由により問題が指摘され、改善する方法が提案されている。ここでは、(2)で述べた道路橋示方書を準用した方法以外に、以下の三つの方法を検討の対象とする。なお、SI は SI 値、 α_{max} 、 v_{max} は地表の最大加速度と最大速度である。

・安田らの方法¹⁹⁾

$$L = 0.01 \frac{SI}{\sigma_v^{r_{0.1}}} \quad (9)$$

・佐藤らの方法²⁰⁾

$$L = r_d^* \frac{SI \sigma_v}{\sigma_v'}, \quad r_d^* = b - az \quad (10)$$

ここで、 $a = \{0.0052(\alpha_{max} / SI) - 0.0163\} \times 10^{-2}$ 、 $b = \{0.0910(\alpha_{max} / SI) + 0.0787\} \times 10^{-2}$

・Orense の方法²¹⁾

$$L = r_d^* \frac{SI \sigma_v}{\sigma_v'}, \quad \ln(r_d^*) = (0.01034 + 0.00321\alpha_{max} / v_{max})z \quad (11)$$

3 有効応力地震応答解析結果の分析

3.1 地表の最大応答

まず、簡易判定法に用いられる地表の応答値の傾向を把握するために、図4～図6に各地盤の最大加速度、最大速度および SI 値をまとめて示す。

図4は地表の最大加速度 PGA（絶対加速度）である。直下型地震（PI 波）では、計算で得られた最大加速度は水平震度0.6にほぼ相当する 600cm/s^2 よりすべて小さい。また、海溝型地震（東南海波、苫小牧波）では、最大加速度が 300cm/s^2 を超えるケースはそれほど多くなく、 400cm/s^2 を超えることはない。地盤が非線形挙動すると、地表の加速度には、一番弱い層の強度により支配される上限の加速度があり²²⁾、せん断応力が一定値に収束するようなせん断強度を持つ地盤が存在する場合には最大加速度も一定値になる。したがって、図4の様に最大加速度がばらつくのは二つの原因が影響していると考えられる。一つは、地盤のせん断強度の違いがあれば、最大加速度も異なることである。しかしこれが原因であれば、三つの地震波で地盤ごとに同じ程度の加速度となるはずであるが、解析値は地震毎に差がある。したがって、液状化が発生すると、サイクリックモビリティによる強度の回復に伴い大きい加速度が発生する²³⁾という、もう一つの原因が主な要因と考えられる。すなわち、直下型と

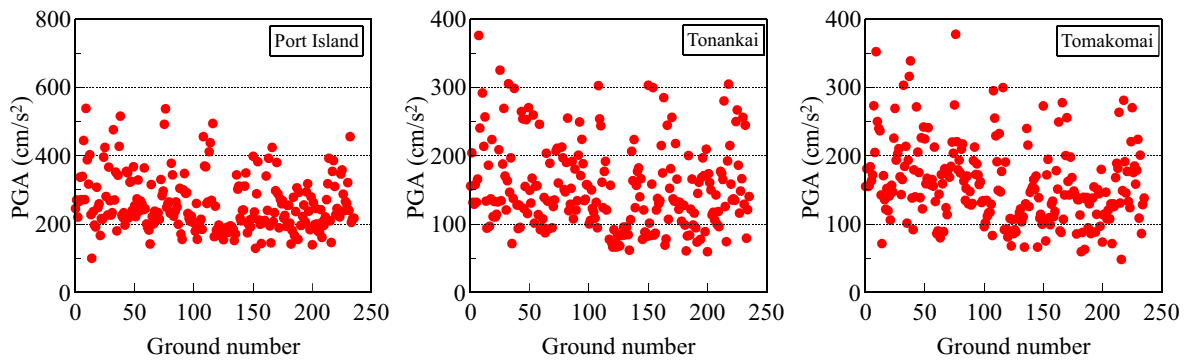


図4 最大加速度分布

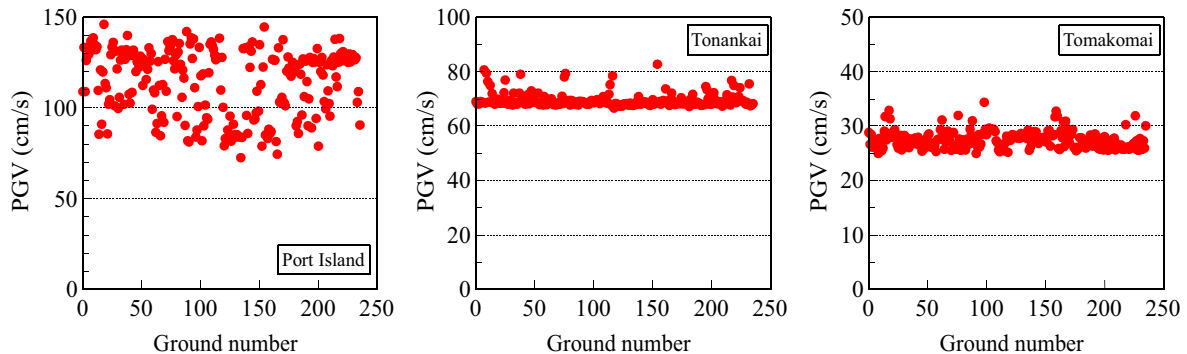


図5 最大速度分布

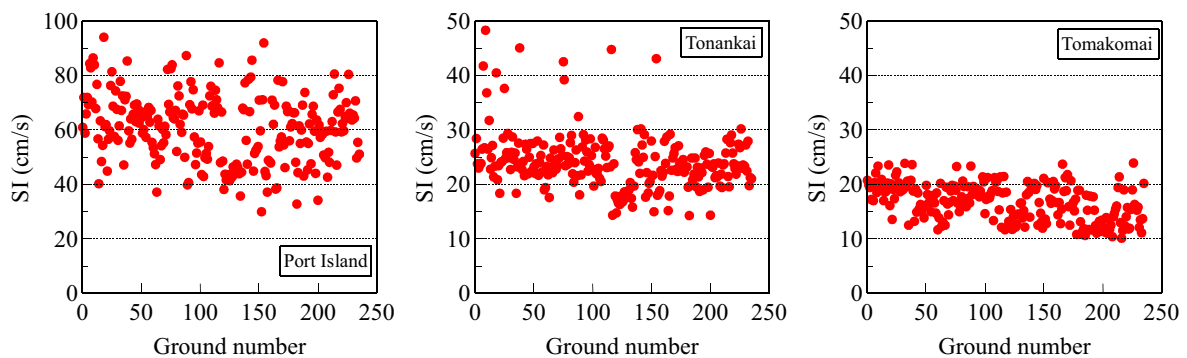


図6 SI 値分布

海溝型を比較すると、海溝型地震の方が入力はいくらか小さく、対応してサイクリックモビリティによる強度の増加も小さかったことが考えられる。つまり、地盤ごとのばらつきは地盤の構造や力学特性、地震毎の違いは入力地震動の大きさの違いが反映された結果であると考えられる。

図5は地表の最大速度 PGV（絶対速度）である。最大速度は PI 波に対して80～150cm/s の範囲に分布しているが、東南海波、苫小牧波ではそれぞれ70cm/s、28cm/s 付近の狭い範囲に集まっており、平均的に見ると、PI 波、東南海波、苫小牧波の順で小さくなっている。

図6は地表の加速度応答から求めた SI 値（SI）である。SI 値は PI 波に対しては30～100cm/s、東南海波では15～50cm/s、苫小牧波には10～25cm/s の間に分布している。地震波に対する大きさは、加速度、速度と同様の順番となっている。また、最大速度、SI 値とも PI 波に対する応答は二つの海溝型地震の倍程度の値となっている。

次に、図7には最大値どうしの関係を示す。PGA と PGV の関係は、PI 波に対しては正の相関が見られるが、PGA が大きくなると PGV は一定になる傾向がある。一方、東南海波および苫小牧波に対しては PGA に関わらず PGV はほぼ一定であるが、わずかに正の相関があるようにも見える。また、PGA と SI は正の相関があるが、PGA が大きくなると SI 値の増加量が小さくなっていく。また、PGV と SI 値は PI 波に対して正の相関があるが、東南海波、苫小牧波では SI 値に関わらず PGV はほぼ一定値である。さらに、SI 値と PGV は同じ速度の次元であるが、PGV に比べ SI の方が小さい。

3.2 最大値発生時刻

図8～図10に各種の発生時刻の関係を示す。図8では地表の最大加速度発生時刻（time at PGA）とその地盤の液状化の可能性のある層（総計1345）の最大せん断応力発生時刻（time at PT）を比較している。PI 波に対しては最大加速度、最大せん断応力の発生時刻はほぼ5秒付近に固まっているが、これは図3に示した入力加速度が4秒付近から大きくなり出し約5秒でピークとなっていることに対応していると考えられる。これに対して、海溝型地震では最大値の発生時刻はかなりばらついている。それぞれの発生時刻は図3に示される入力地震動のピークとほぼ対応しており、それらのピークのどれかで最大値が発生していることが分かる。それらの間には特に強い相関関係は見られない。これは、一つの大きな波がすべてを決めてしまうのではなく、地盤の応答の程度によって最大となる時間が異なるためである。このことは、既往の簡易法では、最大加速度を最大せん断応力の発生指標として使っているが、それが必ずしも正当化されないことを示している。

図9では横軸は YUSAYUSA という初期液状化（変相時）、縦軸は完全液状化（過剰間隙水圧比0.97）した時刻である（それぞれ、time at phase t と time at liq.）。当然ながら、完全液状化は初期液状化より後で発生するが、両者にほとんど時間の差はなく、初期液状化後、速やかに完全液状化に至っていることが分かる。

図10には最大せん断応力発生時刻と完全液状化した時刻の関係が示されている。ほとんどのデータは図に示された傾き45度の線より上にあり、最大せん断応力が液状化の前に発生していることが分かる。なお、液状化後に最大せん断応力が最大値を示すのは、サイクリックモビリティにより大きなせん断応力が発生したためと考えられる。

3.3 繰返し数との関係

地震波には色々な振幅の波で構成されており、振幅によって過剰間隙水圧の発生に及ぼす影響が異なるため、単純に繰返し数を議論しても工学的には意義は薄い。石原・安田らは、最大せん断応力 τ_{max} が発生した側で、最大値になる前に振幅が $0.6\tau_{max}$ より大きくなった波の数²⁴⁾を液状化に対して有効な繰返し数の定義とし、2以下を衝撃型、3以上を振動型と分類している。前述のように、これが道路橋示方書の繰返し数に関する補正係数 C_2 が1/0.55～1/0.7となっている根拠となっている。本論文で

用いる繰返し数もこの定義によるものである。

図11に最大過剰間隙水圧の初期有効上載圧に対する比と繰返し数の関係を、液状化した層と液状化しなかった層に分けて示す。ここで、液状化層で繰返し数が0のものは、最大せん断応力が発生する前に $0.6\tau_{max}$ を超える振幅がなかったことを表している。なお、図の横軸は液状化発生の有無での比較をわかり易くするために、せん断応力比の図では液状化した層では繰返し回数から0.1を引き、液状化しなかった層では0.1を加えている。この処理は二つの海溝型地震では繰返し数の範囲が広い図の見かけにはほとんど影響しない。また、図の上には各繰返し数の頻度も合わせて示している。これによると、PI波では液状化した層の方が多く、東南海波では同程度、苫小牧波では液状化した層の方が少ないことが分かる。

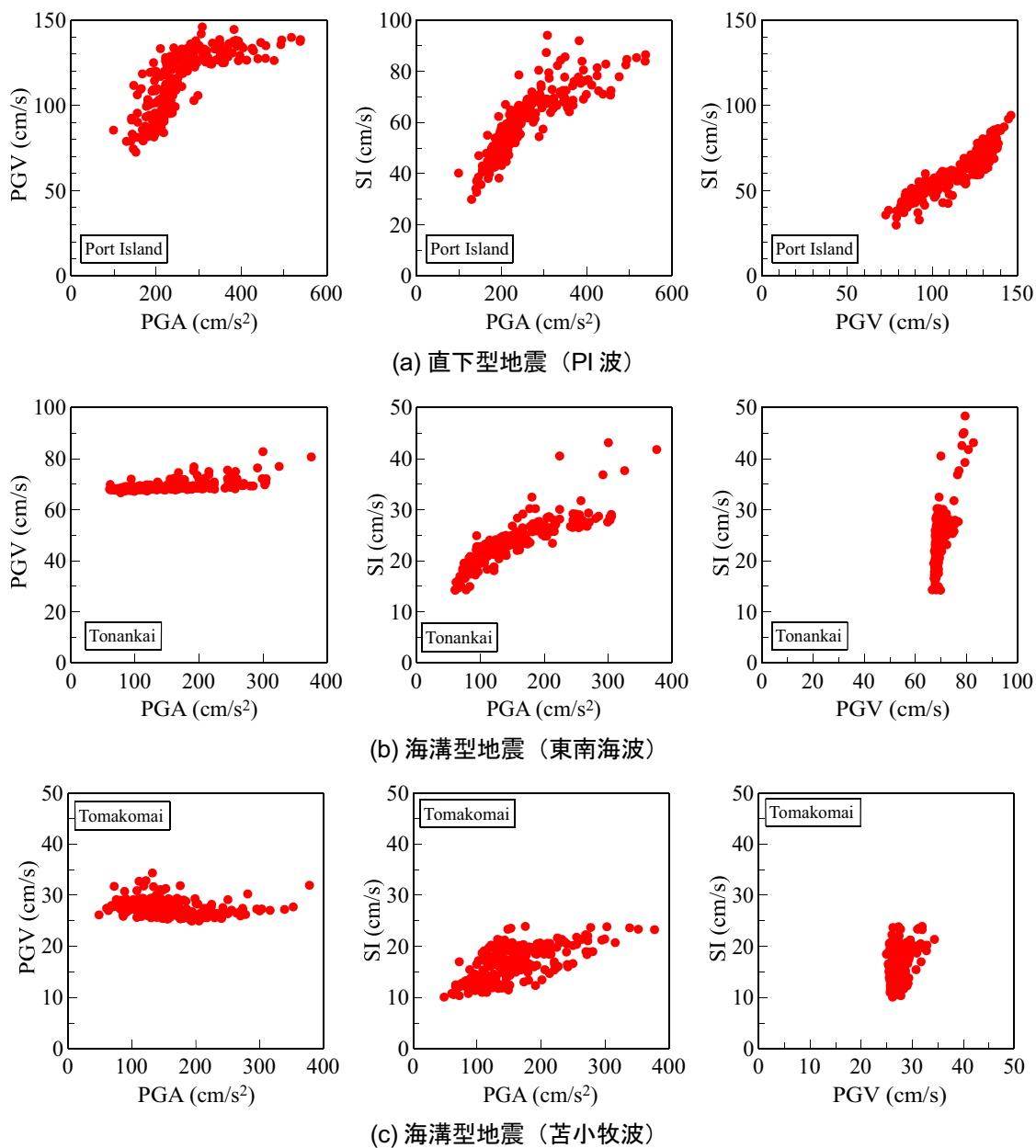


図7 最大応答値の関係

まず、着目されるのは繰返し数で、PI 波では0~6（液状化層）または1~6（非液状化層）、東南海波では0~39（液状化層）または2~61（非液状化層）、苫小牧波では0~40（液状化層）または1~37（非液状化層）であり、非常に広い範囲にばらついている。地震波が同じであることを考えると、繰返し数は地盤の応答の違いにより変化している事が分かる。

PI 波では液状化した層の繰返し回数は2以下が大部分を占め、3以上はわずかである。また、2以下では、せん断応力比は0.1~0.55程度と広い範囲に分布し、3以上では0.3前後の値が多い。一方、液状化しなかった層では、繰返し数が3以上の層もかなりある。これらの、液状化、非液状化のデータはかなり重なっており、せん断応力振幅とここで用いた繰返し数から液状化、非液状化を区別することは困難である。このことは、繰返し数の定義が適当なものではないということもいえよう。なお、石原らの方法では繰返し数は最大せん断応力が発生した方向だけでカウントされている。そこで、反対側

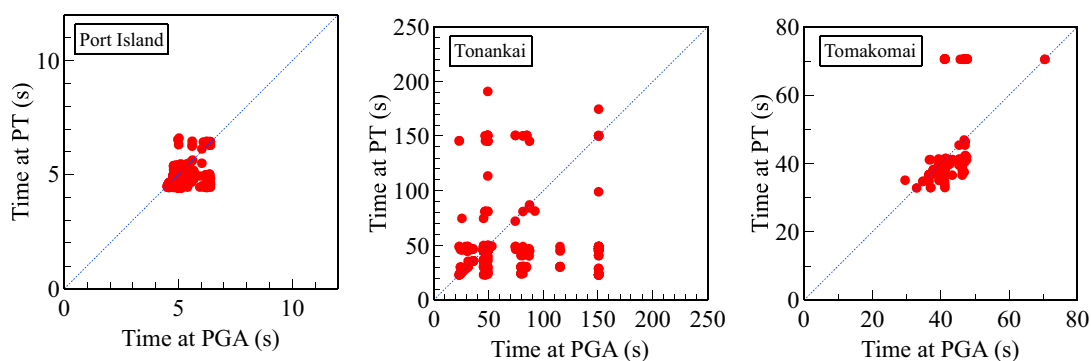


図8 地表加速度とせん断応力の最大値発生時刻の関係

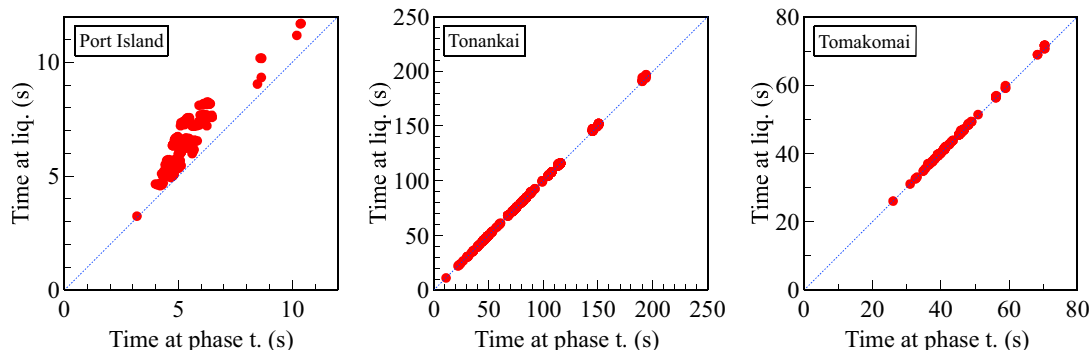


図9 変相と完全液状化時刻の関係

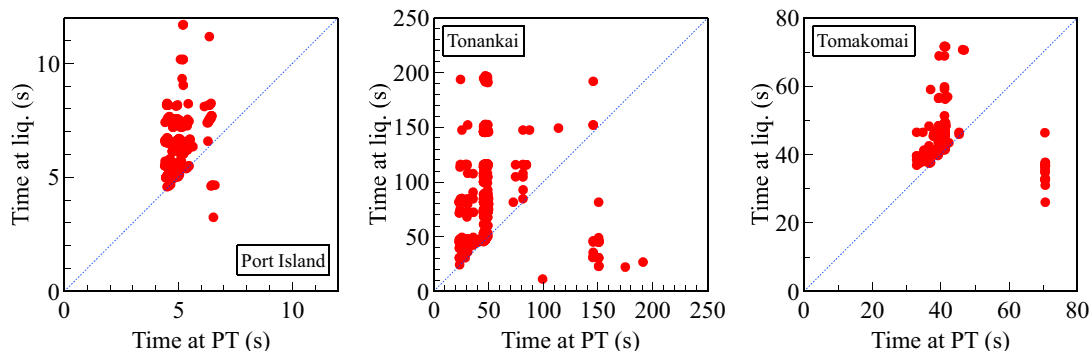


図10 最大せん断応力と完全液状化発生時刻の関係

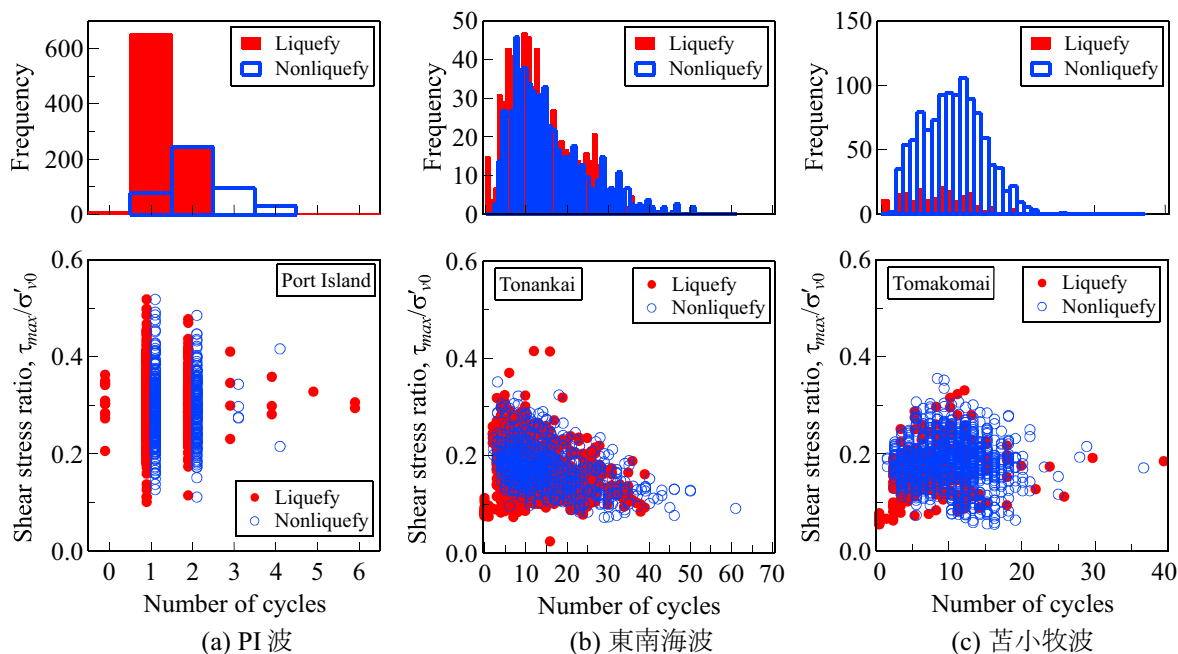


図11 最大せん断応力比—繰返し数関係

も含めた繰返し数で検討したが、繰返し数がほぼ倍になったが、全体的な傾向は変わらなかった。この傾向は他の地震についても同じである。

東南海波では、繰返し数は0～60の範囲にばらついており、10以上のデータも多くある。また、最大せん断応力比もかなりばらついているが、その範囲は直下型地震に比べると小さめである。しかし、液状化した層と液状化しなかった層のデータは重なっており、やはり最大せん断応力と繰返し数の関係から液状化、非液状化を区別することはできない。苫小牧波については繰返し数が0～40にばらついていることを除けば、東南海波と同じような傾向である。

すでに述べたように既往の方法²⁴⁾では繰返し数2以下と3以上で地震動のタイプを衝撃型、振動型と区別している。液状化した層では直下型地震では大部分の層で繰返し数が2以下であったが、海溝型地震に対しては繰返し数は最大40であり、10以上のデータも非常に多い。これを既往の方法の振動型の範疇である3以上でひとくくりにするのは無理があるといえよう。

4 簡易判定法の精度の分析

F_L 値はせん断応力比 L と液状化強度 R から求められる。ここで、液状化強度そのものは力学的な量であり、 N 値に基づく評価法の妥当性を議論することは可能かもしれないが、それは、本論文では扱わない。また、最大せん断応力の評価および地震動による繰返しせん断を受けたときに L に対するせん断強度を求めるための補正係数の内、 C_1 および $C_3 \sim C_5$ も扱わない。すると、簡易法の精度として議論すべきなのは、 L に対応するせん断応力の予測および繰返しに関する補正係数のみである。このうち、後者を判定法の精度として論じることとする。

4.1 最大せん断応力

まず簡易判定法による最大せん断応力の予測法の精度を検証する。最大せん断応力の評価は道路橋示方書に加え、2.5節で示した改良された三つの方法によっても計算した。図12に各地盤の簡易法によ

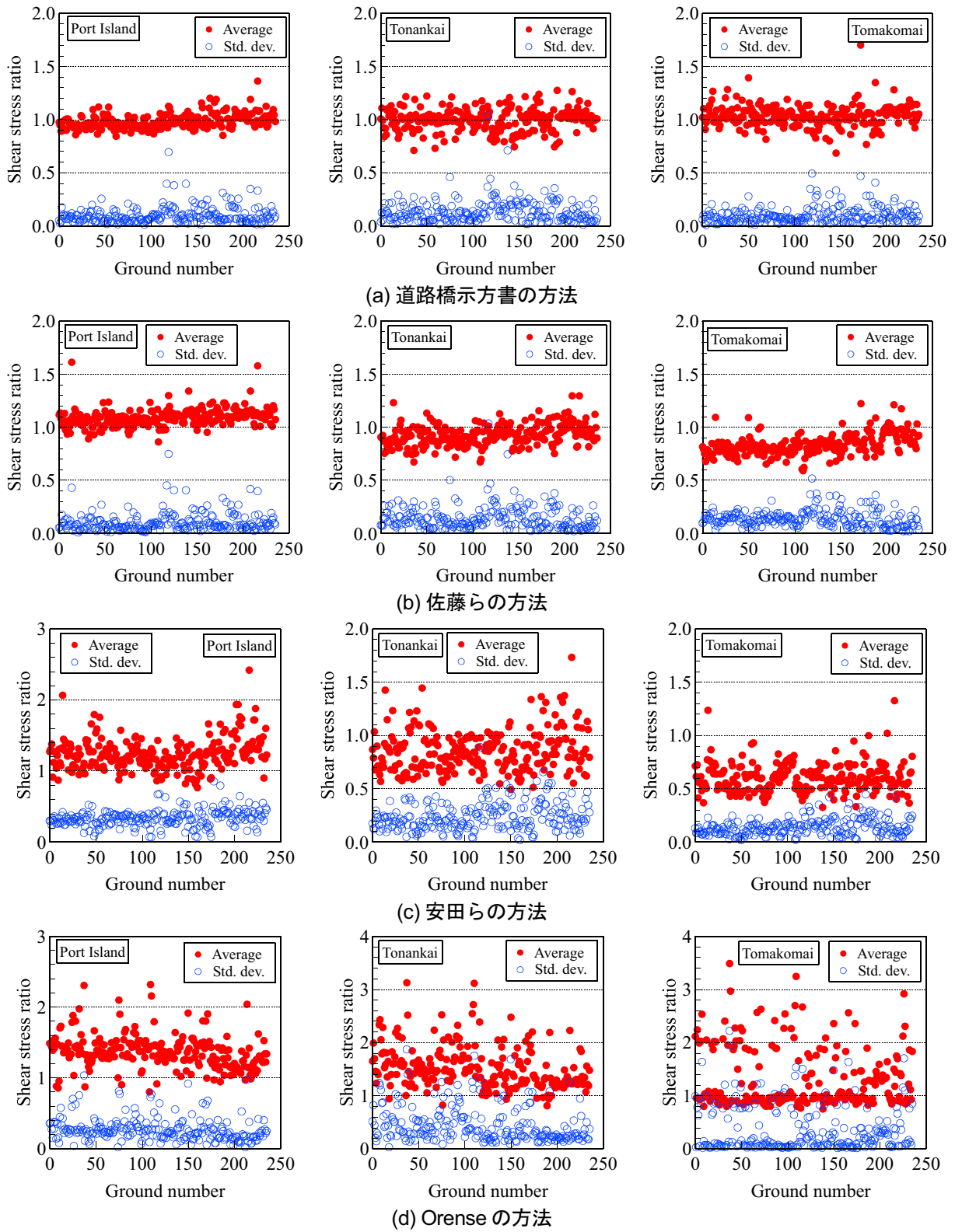


図12 せん断応力比の予測精度

表1 最大せん断応力予測のまとめ

	道路橋			佐藤ら			安田ら			Orense		
	PI	TNK	TM	PI	TNK	TM	PI	TNK	TM	PI	TNK	TM
平均	0.986	0.997	1.039	1.095	0.928	0.840	1.242	0.860	0.607	1.364	1.522	1.316
標準偏差	0.071	0.105	0.104	0.086	0.102	0.100	0.232	0.195	0.134	0.238	0.393	0.551

注) PI : PI波, TNK : 東南海波, TM : 苫小牧波

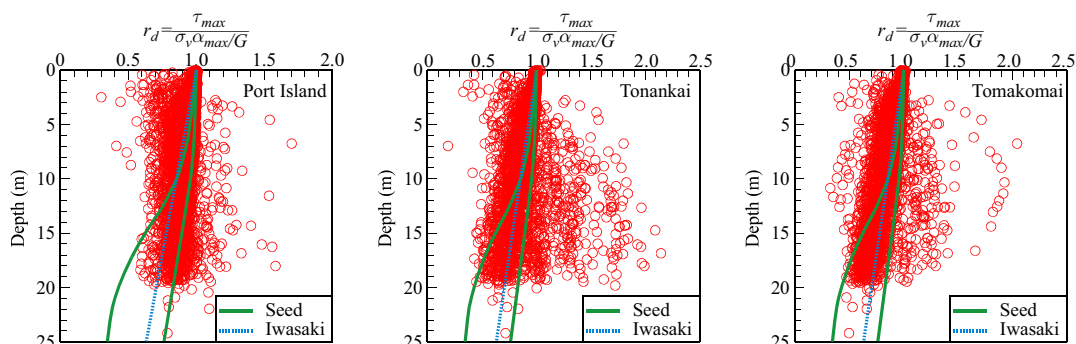


図13 せん断応力比分布 (3176データ)

るせん断応力の YUSAYUSA による最大せん断応力に対する比の平均値と標準偏差を示す。また、この地盤ごとの平均せん断応力比を全地盤について平均したものを表1に標準偏差と併せて示す。

4つのせん断応力の評価法の内、もっとも平均的な精度が高かったのは、図12(a)に示した道路橋示方書で、PI波、二つの海溝型地震波に対してもほぼ1の周辺にあり、平均値は0.986~1.039、標準偏差は0.071~0.105となり、三つの地震動ともに精度が高い。これに対して、佐藤らの方法、安田らの方法ではPI波に対しては平均値が大きめ、海溝型地震に対しては小さめの評価で、ばらつきも大きい。また、Orenseの方法は、いずれの地震波に対しても値は大きい。

なお、この結果の解釈には注意が必要かもしれない。先に述べたように、設計指針では、地表加速度が条件として与えられ、その値は安全側を見越して大きめの値が設定されることも多いと考えられる。しかし、たとえば、地表の地震記録から液状化の発生を論じようとする際には、地盤の多次元的な性質から、液状化地盤でも周辺地盤で液状化していないところがあるとその影響で加速度が大きくなったりする²⁵⁾。予測の精度を上げるには、なるべく局所的な影響を受けない指標の方が好ましいといえる²⁶⁾が、本論文ではそこまでの検討は行わない。

簡易法の精度は、地盤中のせん断応力の予測精度にも依存する。そこで、図13にはせん断応力の分布を、道路橋示方書の r_d に換算して示す。図には、Seed and Idriss²⁷⁾による r_d の範囲の両境界と岩崎ら¹⁷⁾による提案式が示されているが、計算の結果はこれより大きく離れているデータも数多くある。この原因として次のようなことが考えられる。

まず、比較した二つの論文では SHAKE²⁸⁾による全応力地震応答解析を用いており、入力した地震動も本論文で用いたものと比べると大きさは小さいので、著しい非線形挙動が生じにくく、地震動が表層で増幅するという性質が表れやすかったといえる。これに対して、本論文で入力した地震動は大きく、地盤で著しい非線形挙動が起こったり、液状化が発生したりしている。ところで、液状化が発生しないとすれば、非線形が著しくなると、弱層のせん断強度に対応して地表の加速度には上限が現れ²²⁾、最大加速度はその層より上では一定値となり、 $r_d=1$ となる。一方、液状化が発生すれば、せん断応力はサイクリックモビリティの程度により大きく影響され、ばらつきも発生することが予測される。また、次に述べる理由により液状化層より下では r_d が大きくなる。解析結果にはこれらの結果が入り交じっており、単純に一つのメカニズムで説明することができず、そのため、ばらつきも大きい

と考えられる。

詳細に見るために、図14に典型的な事例の最大せん断応力と過剰間隙水圧の分布を示す。最大せん断応力の欄には地震応答解析の結果と簡易法による結果の両方を示しており、図の下または横にサイトの番号がつけられている。図で、サイト1とサイト77は予測精度のよかった事例、サイト43とサイト162は非常に悪かった事例である。精度のよかった、サイト77では液状化が発生していない。一方、精度が悪かったサイト43とサイト162は液状化が発生している。これらのケースでは液状化層以浅では簡易法と地震応答解析の一致はよいが、液状化層以深では地震応答解析の方が大きくなっている。これが、図13に示した r_d が非常に大きかったケースの原因である。液状化層以浅がよく一致するのは、やはり上限加速度で説明できる。すなわち、液状化が発生することによりその層より上に伝わるせん断応力はその層のせん断強度で支配される値により制限されるため、地表の加速度から地下の分布を推定している簡易法では、液状化層より上では液状化していないケースと同様の効果が起こる。一方、液状化層以深では入力が大きくなるとせん断応力も大きくなるが、この効果は地表から応答を推定し

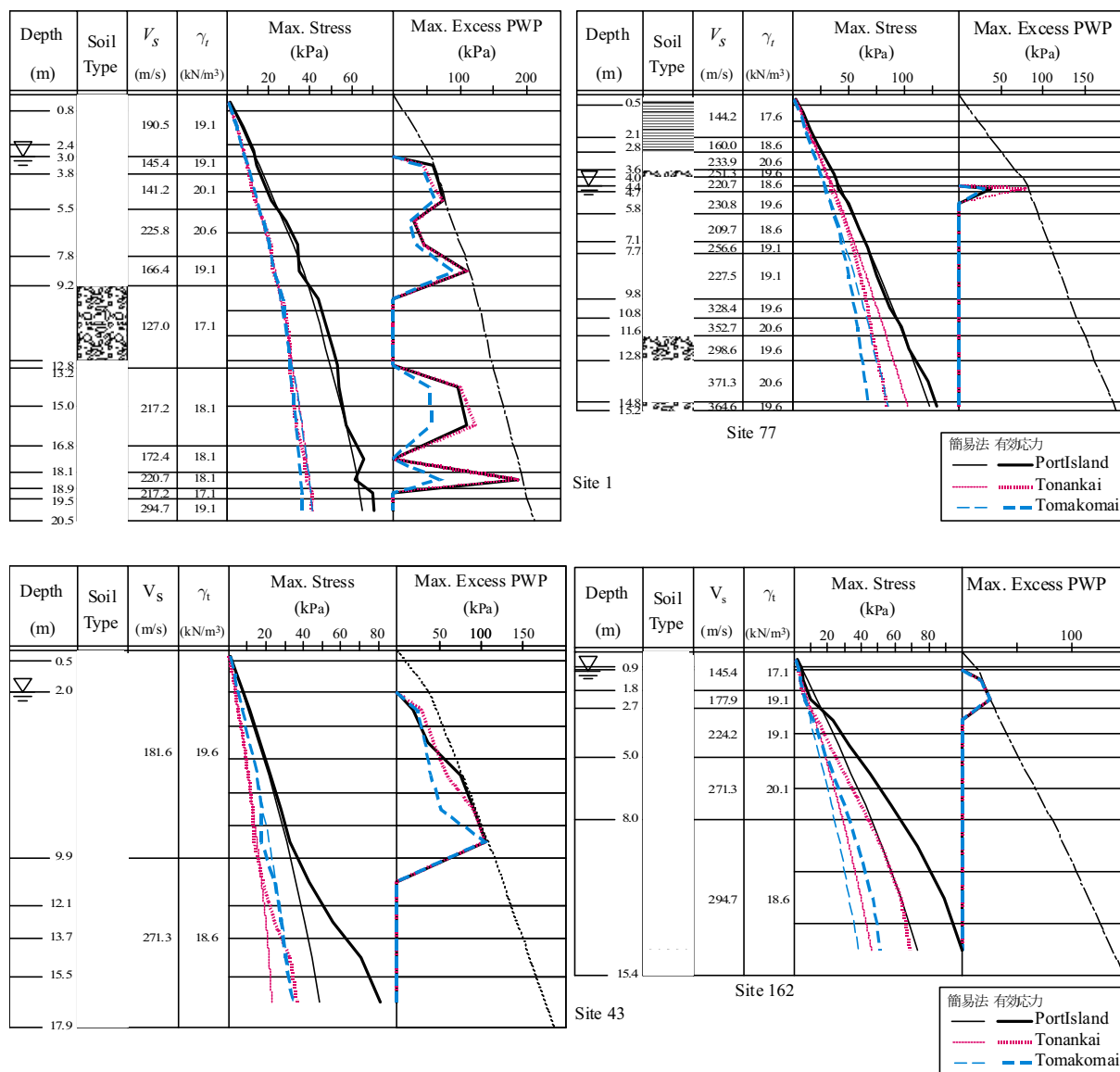


図14 せん断応力の予測事例

ている簡易法では考慮できていない。図14のサイト1では二つの海溝型地震に対しては液状化が発生していないので、サイト77と同じ理由で、また、PI波に対してはGL-19m付近の層で液状化しており、これより上ではこの層による入力抑制があるので、簡易法の予測精度がよかったと考えられる。なお、液状化の場合には、サイクリックモビリティによりせん断応力が大きくなる事もあるので、このような議論が単純には成立しないケースもあると考えられる。

これらの考察から、液状化層より上の層で地表の応答から液状化対象層のせん断応力を予測する場合には、図13に見られるほどの誤差はなく、より精度が高いものと考えられる。

また、図13ではデータはばらついているとはいえ、中央部はかなり密集している。そこで、最小自乗法により式(7)の0.015に対応する数値を求めると、PI波、東南海波、苫小牧波のそれぞれに対して、0.0099, 0.0158, 0.0091となった。次に、この小さめの値0.01を用い、道路橋示方書に基づき表1と同じ様に応力比の平均値と標準偏差を求めると、三つの地震波に対してそれぞれ、(1.031, 0.068), (1.043, 0.113), (1.090, 0.112)の組み合わせとなった。この結果は表1と比較してよくなっているわけではない。これは、表1では一旦地盤ごとに平均値を求め、それを地盤全体で平均したのに対し、図13より計算する際には全てのデータから最小自乗法で計算したので、この計算法の差が影響していると考えられる。表1の様な整理方法では、両者はそれほど大きな違いではないことから、0.015はある程度は妥当な値といえよう。

なお、これらの三つの改良法は、地表の最大加速度のみに基づく道路橋示方書の予測手法が大きなせん断応力を与え、液状化しない地盤を液状化すると判定してしまう可能性を排除するために提案されているものであることから、本検討の結果精度が悪かったということが判定法として誤差が多いという結論を完全に導くことはできないことを指摘しておく。

4.2 液状化判定の予測精度

図15に4つの簡易判定法の結果を有効応力解析の結果と比較して示す。ここで、横軸は簡易法による F_L で1以下が液状化である。一方、縦軸は有効応力解析による過剰間隙水圧比でこれが0.97であれば液状化である。なお、過剰間隙水圧比は液状化に相当する0.97の下に少しデータがない部分があるが、これは、YUSAYUSAでは前に述べたように急激に過剰間隙水圧が発生し、完全液状化に至るため、この付近の応答で止まることがあまり無いためである。

すべての結果が $F_L \leq 1$ と過剰間隙水圧比 ≤ 0.97 (図の○), または $F_L > 1$ と過剰間隙水圧比 < 0.97 (図の□)であれば簡易判定法と有効応力解析の結果は完全に一致したとすることができる。しかし、有効応力解析のみ液状化と判定した事例 (図の■), 簡易判定法のみが液状化と判定した事例 (図の●) も存在し、簡易判定法が完全ではないことがわかる。

そこで、簡易法の精度を評価するために、次の三つの量を定義する。

- ・正解率：有効応力解析と簡易法の判定が一致する (○と□) 割合
- ・危険率：簡易法で液状化しないが、有効応力解析で液状化する (■) 割合
- ・過剰率：簡易法で液状化するが、有効応力解析で液状化しない (●) 割合

危険率が低いのがよい判定法ということになるが、過剰率が高いと液状化しないのにすると判定したことになり不経済である。これらを計算して表2に示す。

PI波に対しては道路橋示方書が一番精度がよく、正解率 (両方の判定が同じ) 83.6%, 危険率1.4%, 過剰率15.0%である。地震応答解析の際、下層が先に液状化すると上方へのせん断応力の伝播が小さくなるため、地表の加速度から仮想のせん断応力を推定すると過小評価となるという、簡易判定法では予測が困難と考えられる事例があること、また、設計指針などでは安全側の配慮も必要であること等を考えれば、妥当な結果と見ることもできる。一方、海溝型地震に対しては精度が悪くなり、危険率が東南海波に対しては46.8%, 苫小牧波に対しては11.6%となる。

その他の方法でもこの様な傾向は同じで、直下型地震 (PI波) に対する予測精度に比べ、海溝型の

予測精度は悪い。すなわち、全体として既往の簡易判定法は直下型地震に対してはある程度適用性があるといえるが、海溝型地震に対しては適用性が低い。

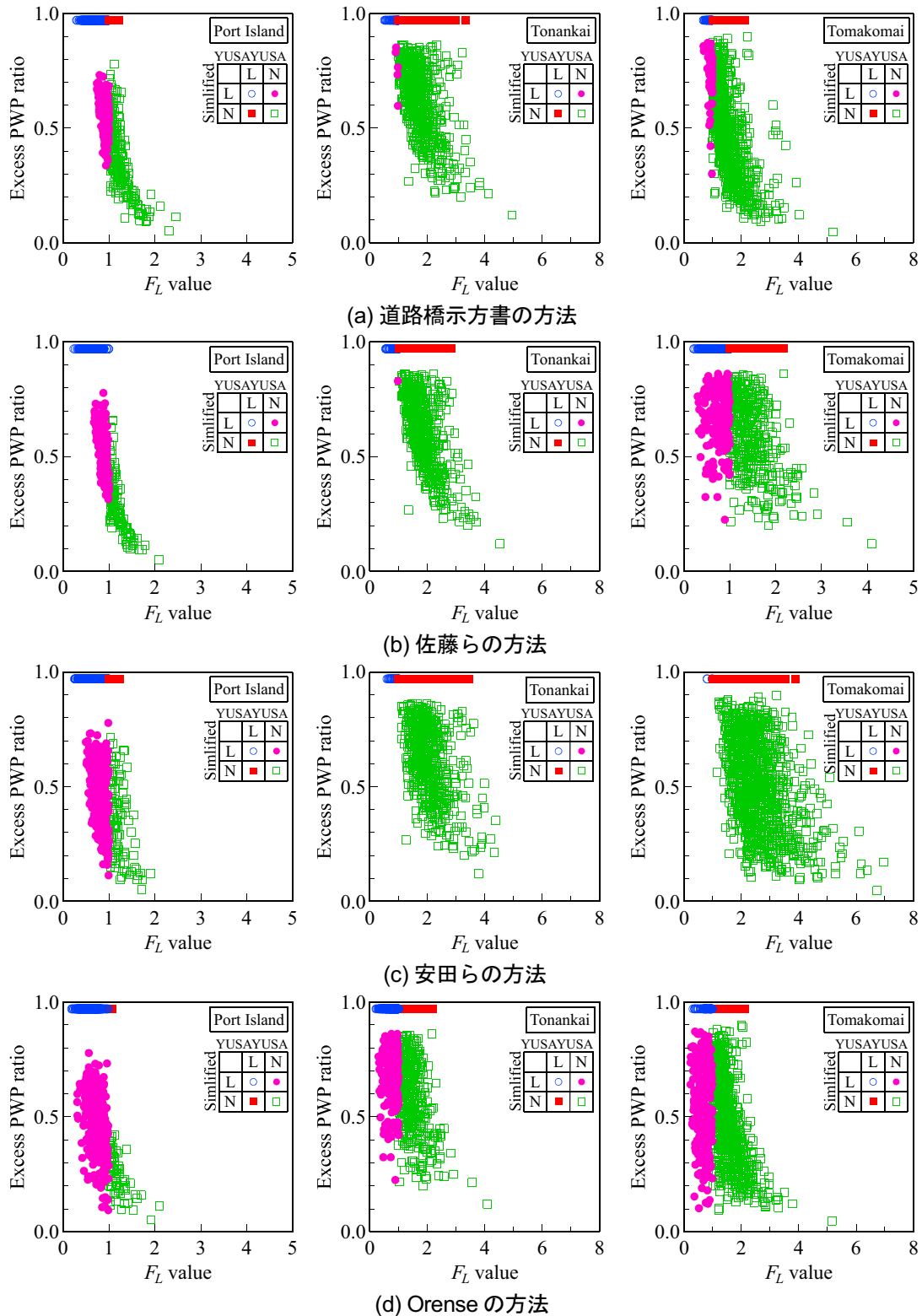


図15 F_L 値—過剰間隙水圧比関係

表2 簡易法のまとめ

	道路橋			佐藤ら			安田ら			Orense		
	PI波	東南海波	苫小牧波	PI波	東南海波	苫小牧波	PI波	東南海波	苫小牧波	PI波	東南海波	苫小牧波
両方液状化	64.7	6.9	4.2	66.1	3.8	2.0	65.3	2.6	0.3	65.9	30.9	7.2
過剰率	15.0	0.4	4.9	22.6	0.1	0.3	25.4	0	0	28.4	15.2	19.6
危険率	1.4	46.8	11.6	0	50.0	13.8	0.8	51.2	15.5	0.1	22.8	8.6
両方非液状化	18.9	45.9	79.3	11.2	46.2	83.9	8.6	46.2	84.2	5.5	31.0	64.5
正解率	83.6	52.8	83.5	77.3	50.0	85.9	73.9	48.8	84.5	71.4	61.9	71.7

注) いずれも全1345データに対する比率 (%)

5 繰返し回数補正係数の提案

236サイト、1345地層に対して有効応力に基づく地震応答解析と簡易液状化判定法を行いその適用性を検討したところ、既往の方法は直下型地震に対してはかなり適用性があるが、継続時間の長い海溝型地震に対しては適用性が落ちることがわかった。この原因は海溝型地震では有効な繰返し数が非常に多いことが考えられる。道路橋示方書の元となった考え方では有効な繰返し数（最大せん断応力が発生した側での最大せん断応力の60%の振幅より多い波の数）を2以下、3以上に分けて議論しているが、計算で得られた有効な繰返し数は直下型地震では最大6であるが、海溝型地震では最大は60にもなっており、この二つを同じ範疇で評価することに無理があるといえる。

これまでに行った検討から簡易法の問題点は抽出できた。しかし、現在、実務でよく用いられているということを考えれば、同じ手法で海溝型地震にも適用できるように現在の手法を改良することは意味がある。簡易法を改良するのであれば、繰返し数に関する補正係数をもうけるのが実用的である。ただし、図11に示したように、液状化の有無と有効な繰返し数の間には明瞭な関係がないし、同じ地震動でも繰返し数は大きくばらつく。したがって、例えば、入力地震動の繰返し数を適当な評価できたとしても、地盤ごとに異なる繰返し数の予測方法は、本研究の範囲では作れなかった。

道路橋示方書以外の三つのせん断応力の予測法は、 L の評価をより合理的に行おうと意図したものであろうが、本研究の結果を見る限り成功しているとはいえない。ただし、この結論には注意が必要である。それは、ここでの検討は地表の地震動指標を用いて、これらの値が分かっているという前提で地中のせん断応力を求めているからである。図4～図6に示したように、同じ入力に対して地震動指標のばらつきは大きく、この様なばらついた指標を個々のサイトに入力しているのが、本研究の方法である。本来は、基盤に入力する地震動やサイトごとに大きく変化しない指標で検討が行える方法が好ましい。ただし、設計で安全側の評価という地震動の設定をするのであれば、計算で得られた最大加速度はほぼ道路橋示方書より小さかったので、設計としての妥当性はある。この様に、設計と、ある地震に対する液状化発生判定という異なる視点で見れば、評価が変わる可能性もある。

この様に、現状の簡易法は検討すべき事項も多い。しかし、先にも述べたように、実務でよく用いられている手法の改良という観点で考えると、最大せん断応力は検討した手法の中で一番精度の良かった道路橋示方書を用い、繰返し数の影響を R に対する補正係数として考慮するのが実用的であると考える。ここでは、道路橋示方書の直下型地震（タイプ II 地震動）に対する補正係数の様な係数を設定することにし、図15を参考にし、その値を次の様に設定する。

$$c_w = 0.5 \quad \text{海溝型長周期地震動} \quad (12)$$

図16にこの補正係数を用いた F_L 値—過剰間隙水圧比関係を、また、結果をまとめて表3に示す。いずれのケースでも過剰率は大きくなっているが、危険率は既往の方法に比べて大幅に改良されている。特に東南海波に対しては c_w を考慮した効果は著しいが、苫小牧波に対しては、やや安全側の設定にな

っており、その分、過剰率が大きくなっている。これは、図3に見られるように、地震動の継続時間が東南海波と苫小牧波では大きく違い、また、これに対応して図11に示したように、繰返し数も苫小牧波の方が少ないことが原因である。しかし、先に述べたように、同じ地震でも地盤によって異なる繰返し数の評価は困難であり、ここでは式(12)を提案法としたい。

6 まとめ

ここでは、海溝型長継続時間地震動に対する、簡易法による液状化判定について検討した。既往

の方法は液状化層の最大せん断応力を求めるという観点では精度があり、また、直下型地震に対しては繰返し数に関する補正係数もほぼ妥当であることから、直下型地震動に対する液状化判定は、危険側の判定をする可能性は否定できないものも、実用的には妥当である。特に、道路橋示方書の適用性は高いということがわかった。なお、これらの結論は、液状化した、あるいは液状化しなかった地盤の地表で発生するであろう最大加速度が分かったという前提があることに注意が必要であることは前に述べたとおりである。実際の道路橋指針はこれより大きい最大加速度をせっていしているので、より安全側の評価となっている。一方、本論文で対象とした海溝型長周期地震動に対しては繰返し数は既往の方法で想定している回数の10倍程度の値となり、その影響が考慮されていないため、危険側の評価をすることがわかった。

そこで、海溝型長継続時間地震動に対する新しい低減係数を、既往の方法の1/2とする方法を提案した。この方法では、従来法の直下型地震に比べ危険率は大幅に減少する。

参考文献

- 1) 液状化対策工法，地盤工学・実務シリーズ18，地盤工学会，2004，513pp.
- 2) 日本道路協会(2002): 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，(社)日本道路協会
- 3) 日本建築学会(2001)：建築基礎構造設計指針，2001改訂
- 4) 運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編(1999)：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善
- 5) 港湾の施設の技術上の基準・同解説(1999)，日本港湾協会
- 6) 澤田純男，川辺秀憲，釜江克宏，飛田潤，吉田望，岩田知孝(2005)：長大構造物は大丈夫か，第5回比較防災学ワークショップ，神戸，pp.41-49
- 7) 吉田望，東畑郁生(2003)：YUSAYUSA-2・SIMMDL-2理論と使用法，V.2.10，

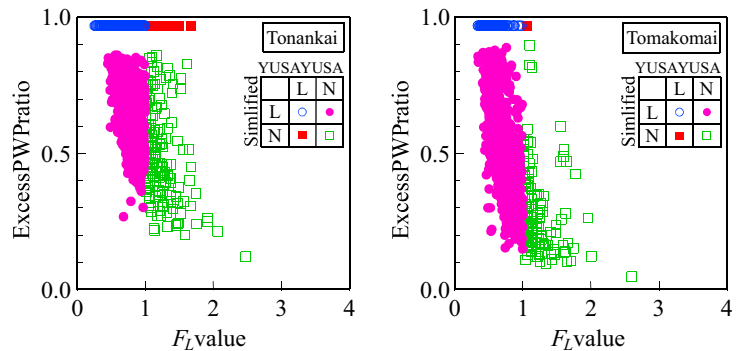


図16 道路橋の方法を修正した新しい方法による F_L 値—過剰間隙水圧比関係

表3 簡易法の精度 (%)

	東南海波		苫小牧波	
	既往	提案	既往	提案
両方液状化	6.9	51.7	4.2	15.8
過剰率	0.4	34.1	4.9	73.8
危険率	46.8	2.1	11.6	0.1
両方非液状化	45.9	12.2	79.3	10.3
正解率	52.8	63.9	83.5	26.1

<http://boh0709.ld.infoseek.co.jp/>

- 8) 土木研究所, 国土開発研究センター (1996) : 兵庫県南部地震における液状化・非液状化事例に基づいた液状化判定法の妥当性に関する調査報告書
- 9) <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/quake/>
- 10) 液状化メカニズム・予測法と設計法に関するシンポジウム発表論文集, 地盤工学会, 1999, pp. 23-24
- 11) 地盤工学会 (2000) : 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, 902pp.
- 12) 地盤の動的解析—基礎理論から応用まで—, 地盤工学・基礎理論シリーズ2, 地盤工学会, 2007, 152pp.
- 13) Hatanaka, M. and Uchida, A. (1996): Empirical correlation between penetration resistance and internal friction angle of sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol. 36, No. 4, pp. 1-9
- 14) 土質工学会 : N 値および $c \cdot \phi$ —考え方と利用法—, 土質工学会, 1992, 211pp.
- 15) Ishihara, K. and Takatsu, H. Effects of overconsolidation and K_0 conditions on liquefaction characteristics of sands, *Soils and Foundations*, Vol. 19, No. 4, pp. 597-682, 1979.
- 16) Seed, H. B., Idriss, I. M. and Arango, I (1981): Evaluation of liquefaction potential using field performance data, *J. of GT*, Vol. 109, No. 3, pp. 458-482
- 17) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進 (1978) : 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定法と適用例, 第5回日本地震工学シンポジウム論文集, pp. 461-468
- 18) 地盤工学会 (1999) : 液状化と対策, 地盤工学ハンドブック第5編 (自然災害・環境問題と対策)
- 19) 安田進, 吉川洋一, 牛島和子, 石川利明 (1993) : 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, pp. 1325-1328
- 20) 佐藤正行, 安田進, 吉田望, 増田民夫 (1998) : 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. 610/III-45, pp. 83-96
- 21) Orense, R. P. (2005): Assessment of liquefaction potential based on peak ground motion parameters, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 25, pp. 225-240
- 22) 末富岩雄, 沢田純男, 吉田望, 土岐憲三 (2000) : 地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係, 土木学会論文集, No. 654/I-52, pp. 195-206
- 23) 吉田望 (2008) : 地盤の地震時非線形挙動の特徴と予測, 地震工学研究レポート, No. 105, 東京工業大学, pp. 35-47
- 24) 石原研而, 安田進 (1975) : 液状化に及ぼす地震波の不規則性と初期拘束圧の影響, 土と基礎, Vol. 23, No. 6, pp. 29-35
- 25) 三浦均也, 吉田望, 鷺尾朝昭, 西村右敏 (1994) : 1993年釧路沖地震による造成地被害に関する解析的検討, 第9回日本地震工学シンポジウム, pp. 763-768
- 26) 横田治彦 (1993) : 新潟地震 (1964年) によって提供された宿題は解決できたか?, 振動部門パネルディスカッション, 建築雑誌, Vol. 108, No. 1338, p.72
- 27) Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971): Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273
- 28) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972): SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley

(受理 : 2008年8月27日)

(掲載決定 : 2009年4月9日)

Simplified procedure for evaluating liquefaction potential under ocean trench type long period earthquake

YOSHIDA Nozomu¹⁾, OHYA Yousuke²⁾, SAWADA Sumio³⁾, NAKAMURA Susumu⁴⁾

- 1) Member, Professor, Tohoku Gakuin University, Dr. Eng.
- 2) Member, Post graduate student, Tohoku Gakuin University
- 3) Member, Professor, Kyoto University, Dr. Eng.
- 4) Member, Professor, Nihon University, Dr. Eng.

ABSTRACT

A simplified method for evaluating liquefaction potential under ocean trench type long period earthquakes. Since there is no experience on damage or liquefaction under this type of earthquake, effective stress analyses are made on more than 200 sites that are used in the past investigation on liquefaction damage. Accuracy or effectiveness of existing simplified methods is investigated, and is found that they are applicable to near field earthquake, but they result in dangerous evaluation under ocean trench type earthquakes such as artificial earthquake for coming Tonankai earthquake and recorded accelerogram during the Tokachi-oki earthquake of 2003. The reason is found to be effective number of loading cycles; it is about 10 times larger than that considered in the existing simplified procedure. Then a correction factor for liquefaction strength is proposed in order to evaluate liquefaction potential under this type of earthquakes. The factor is a half of the factor in the existing method; liquefaction strength is to be half of the conventional value when comparing maximum shear stress to evaluate F_L value. This method works so that dangerous ratio (ratio of number of layers where onset of liquefaction is identified under effective stress analysis but is not identified under existing simplified procedure to the total number of layers) becomes small to be the same order under near field earthquake.

Key Words: Liquefaction, Simplified procedure, effective cycles, ocean trench type earthquake, near field earthquake