

信頼性理論による液状化解析、液状化確率と過剰間隙水圧についての一考察

(株) 異設計コンサルタント

正会員 ○ 有清 睦

フェロー会員 中山 隆弘

西日本高速道路エンジニアリング中国 (株) 正会員 佐々川 学

1. はじめに

地盤の液状化現象は液状抵抗率で表され、液状化判定はそれによって行われる。しかし、この液状化判定と実際の液状化被害との関連は、まだ明確とは言い難い。この原因として、地盤定数の不確実性と地震力の不確実性を挙げることができる。これまでも、地盤定数のばらつきは示されてはいる^{1),2),3)}が、液状化解析に反映されてはいない。

筆者らはその状況に鑑み、実際のデータに基づいた上で不確実性を考慮して、信頼性理論による液状化解析をおこなう手法を提案^{4),5),6)}してきた。

ただ、これまでは液状化確率については、液状化抵抗率 FL が 1 を超えない確率で表し、過剰間隙水圧の経時変化については考慮してこなかった。

本研究では、液状化確率と液状化時の過剰間隙水圧の関係について検討を行った。

2. 信頼性理論による液状化解析

2.1 信頼性理論による液状化確率

信頼性理論では、荷重効果（外力）と耐力（荷重効果に対する抵抗力）をそれぞれ確率変数 R と S とすれば、 $R \leq S$ となる確率を破壊確率 p_f と定義している。

それに従えば、液状化確率は道路橋示方書の液状化抵抗率 FL ⁷⁾ を基本として式(1)のように表せる。

$$p_f = \int_0^{\infty} f_L(x) F_R(x) dx \quad (1)$$

式中、 p_f は液状化確率、 $f_L(x)$ は地震時せん断応力比 L の確率密度関数で、 $F_R(x)$ は動的せん断強度比 R の確率分布関数を表す。

また、 L 及び R は、それぞれ確率変数として、各々式(2)と式(3)のように表すことができる。

$$R = f_R(N, F_c, R_L, C_w) \quad (2)$$

$$L = f_L(r_d, \alpha, G/G_{max}, h, \sigma_v, \sigma'_v) \quad (3)$$

式中の N は N 値、 F_c は細粒分含有率(%)、 R_L は

繰返し三軸強度比、 C_w は、地震動特性による補正係数、 r_d は、地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数、 α は地表面加速度 (m/s^2)、 G/G_{max} は繰返しせん断剛性比、 h は減衰定数、 σ_v は全上載圧 (kN/m^2)、 σ'_v 有効上載圧 (kN/m^2) で、それぞれが確率変数である。

2.2 地震時せん断応力比 L の確率論的評価

地震時せん断応力比 L は式(3)に示すように 6 個の確率変数のパラメータから構成される。

(1) r_d の評価

r_d の係数については、文献 8) を参考にして、正規確率変数で $N(0.016, 0.011)$ と評価した。ただし、シミュレーションを行う場合には $r_d < 1$ としている。

図-1 は α_{max} から算出した r_d の深度分布と解析データと比較した結果⁹⁾ である。図より、深さ 10m 以浅の評価 r_d の範囲は、解析データとほぼ一致する。

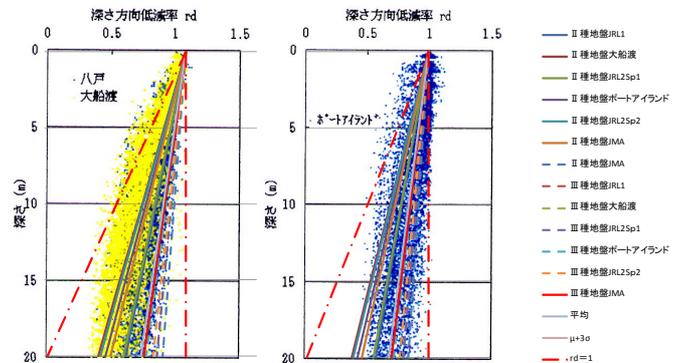


図-1 r_d の深度分布

(2) 繰返しせん断特性の評価

本研究では、今津・福武の式¹⁰⁾のパラメータ $a \sim d$ を対数正規分布として、文献 6) に示されている $G/G_{max} - \gamma$ 関係と $h - \gamma$ 関係を再評価した。

$G/G_{max} - \gamma$ 関係と $h - \gamma$ 関係の評価は文献と同様の手法で行い、シミュレーションの試行回数は 1000 回とした。ただ、 α を求めるための地震応答解析については、1000 ケースの中から等間隔 (50 ケース毎) に 20 ケースを選び、周波数依存型等価線形解析化法である $FDEL$ ^{11), 12)} を用いて行なった。

式(4)と式(5)に今津・福武の式を示す。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1+a(\gamma)^b} \quad (4)$$

$$h = c(\gamma)^d \quad (5)$$

式中の γ はせん断ひずみ(%)を表している。

図-2は、再評価した砂、砂礫、粘性土の G/G_{\max} - γ 関係と h - γ 関係を、一般的な範囲を示した図¹⁰⁾、¹³⁾にプロットしたものである。再評価したこれらの関係は、一般的な範囲内にあるといえる。

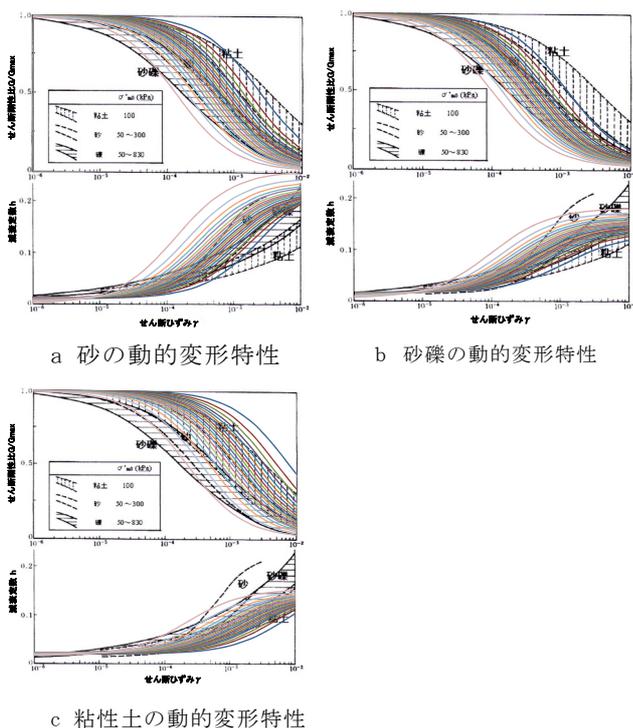


図-2 再評価した G/G_{\max} - γ 関係と h - γ 関係

2.3 動的せん断強度比の確率論的評価

(1) RLの評価

式(6)は、砂質土の換算 N 値 N_L と繰返し三軸強度比の関係¹⁴⁾から繰返し三軸強度比の不確実性を評価⁵⁾したものである。なお、評価データは文献¹⁴⁾に示された図を読み取り、求めたものである。

$$R_{L1} = 0.7944R_L + 0.0637 + \varepsilon \quad (6)$$

式中 ε は正規確率変数 $N(-0.012, 0.108)$ で与える。

(2) F_c による液状化強度の影響評価

図-3は、細粒分含有率と¹⁴⁾液状化強度との関係を示したものである。図からは F_c が高くなっても液状化強度が大きくなるとは言えず、ばらつきも大きい。よって、補正 N 値 N_a については $N_a + \Delta N_a$ とし、 ΔN_a は正規確率変数として、 $N(0.474, 6.720)$ で評価⁵⁾した。

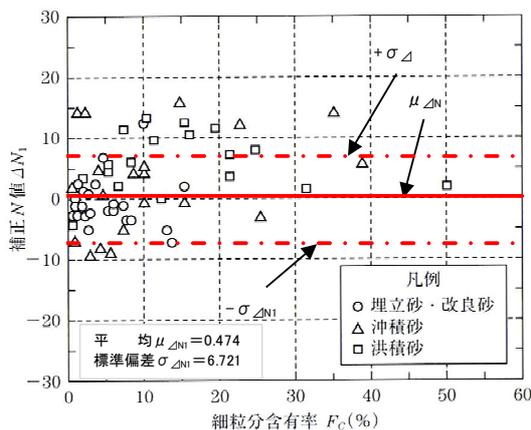


図-3 細粒分の影響評価

3. 過剰間隙水圧の解析

過剰間隙水圧の上昇モデルは八木¹⁵⁾によって提案された式を用いることで、1サイクルごとの平均せん断応力に応じた過剰間隙水圧の増分を求めた。

八木の提案式を式(7)に示す。

$$\frac{\Delta u_{dR'}}{\sigma'^2} = k \left(\frac{\tau_{ap}}{\sigma'} \right)^3 \quad (7)$$

式中、 $\Delta u_{dR'}$ は繰返しせん断応力の任意の1サイクル中での過剰間隙水圧の増分、 σ' は有効応力、 k は定数で $k = m_2/C_s$ であり、相対密度 D_r の関数で非排水の繰返しせん断試験から求められる。 τ_{ap} はせん断応力波形の片振幅の値で、不規則波の場合は平均値として与える。

今回の解析では、 k 値は文献¹⁵⁾の値を使用した。

地表面の応答加速度の時刻歴と地中せん断応力の時刻歴は相似形としてせん断応力波形を求めた。この時刻歴は、シミュレーション試行回数20000回で平均値を中心に10ケースを等間隔に抽出した。

4. ケーススタディ

4.1 解析条件

図-4は解析対象とした広島市の地盤モデル¹⁶⁾である。解析対象層はGL-5.0mの砂層とした。

図-5は N 値の頻度分布を示したもので、 N 値のばらつきデータの、広島市の11箇所のKuniJiban¹⁷⁾のボーリングデータを用いて、解析対象層と同じ地層より求めたものである。

この図から N 値の不確実性は、対数正規確率変数で $N(1.473, 0.671)$ とした。

地下水位GL-2.0m

| 深度 (m) | 層厚 (m) | 単位体積重量 (gf/cm ³) | N値 | せん断波速度 Vs(m/s) | 土質 | 初期せん断剛性 Go(gf/cm ²) |
|--------|--------|------------------------------|----|----------------|-----|---------------------------------|
| 1 | 1.0 | 1.60 | 5 | 133.5 | 砂盛土 | 290859 |
| 3 | 2.0 | 1.60 | 5 | 123.4 | 砂 | 248514 |
| 13 | 10.0 | 1.70 | 10 | 173.6 | 砂 | 522575 |
| 28 | 15.0 | 1.55 | 3 | 151.1 | シルト | 360961 |
| 33 | 5.0 | 1.75 | 10 | 216.9 | 砂 | 839764 |
| 43 | 10.0 | 2.00 | 50 | 431.4 | 砂礫 | 3796562 |
| 46 | 3.0 | 1.80 | 30 | 312.8 | 砂 | 1796413 |
| 47 | 1.0 | 2.50 | - | 700.0 | 基盤 | 12495000 |

図-4 広島市の地盤モデル

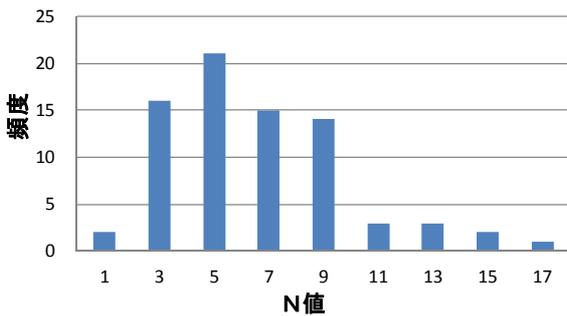
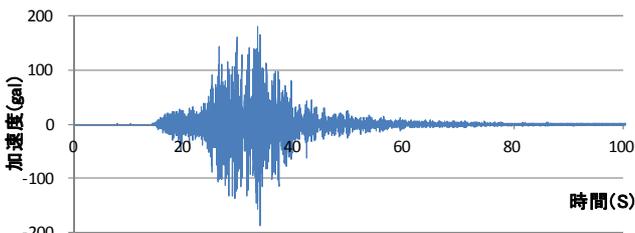


図-5 N値の頻度分布

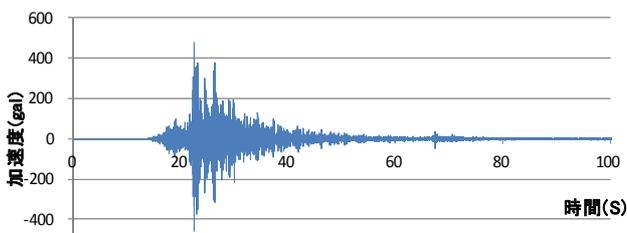
4.2 基盤層への入力地震動

図-6 は、広島県で観測されたK-NET¹⁸⁾の加速度波形である。aは振動型(タイプI)地震動で、bは衝撃型(タイプII)地震動を想定した加速度波形である。この波形を逆増幅解析により基盤層へ引き戻し、最大加速度を50gal、75galに調整して広島市の地盤モデルの基盤層に入力した。



HRS004 E-W 加速度波形

a 振動型(タイプI)地震動を想定した加速度波形



HRS002 N-S 加速度波形

b 衝撃型(タイプII)地震動を想定した加速度波形

図-6 K-NETの加速度波形

4.3 シミュレーション

液状化解析は、シミュレーション手法を用いた。シミュレーションの試行回数は20000回である。Rの計算では、極端値が発生するため乱数の最大値を0.99とした。また、マイナス値が出る場合、再度その値だけ、プラスの値になるまでシミュレーションを繰り返した。

5. 解析結果

5.1 解析結果

図-7は、最大加速度75galの振動型地震動と衝撃型地震動を基盤層に入力したときの最大応答加速度の深度分布である。

図-8は、最大加速度75galで基盤層に入力したときの過剰間隙水圧比の時刻歴で、rdが平均値の場合を示したものである。紙面の都合上、その他のケースについては示していない。

繰返しせん断特性の不確実性により、加速度及び過剰間隙水圧に大きなばらつきがあることが分かる。

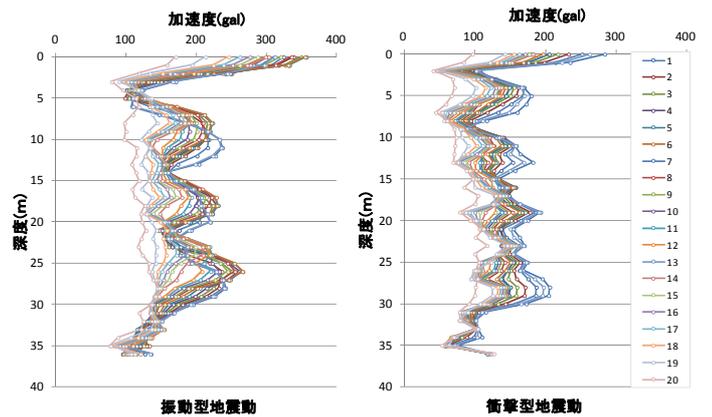
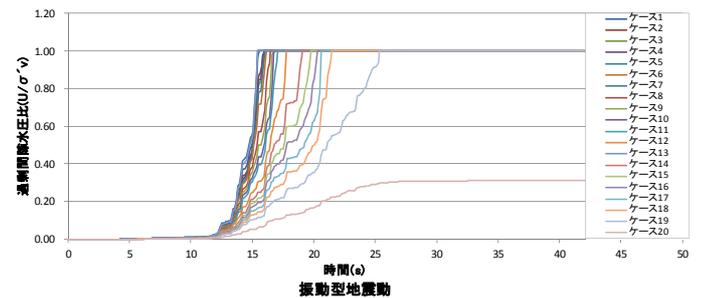
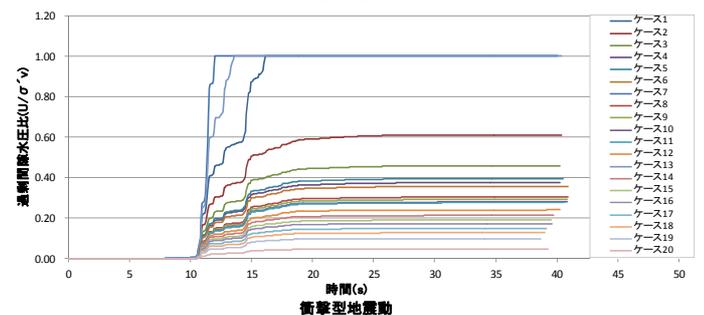


図-7 最大応答加速度の深度分布



振動型地震動



衝撃型地震動

図-8 過剰間隙水圧比の時刻歴

5.2 考察

図-9 はシミュレーションによる動的せん断強度比と地震時せん断応力比の頻度分布である。表-1 はシミュレーションによる液状化確率を示したものである。

次に、図-10 は、過剰間隙水圧比の超過確率を示したものである。なお、図には、過剰間隙水圧比が 1.0 のときの超過確率と表-1 の液状化確率とを比較するために○及び□の印を併せて記入している。これを見ると、タイプ I 地震に対する液状化確率は 50gal、75gal で、それぞれ 0.615、0.857 であり、過剰間隙水圧比が 1.0 を超える確率は 0.620、0.920 である。一方、タイプ II 地震の場合は、液状化確率が 0.2~0.5 程度であるのに対し、過剰間隙水圧比が 1.0 を超える確率は 0.0~0.15 程度であり、タイプ I の場合と異なる傾向が得られている。

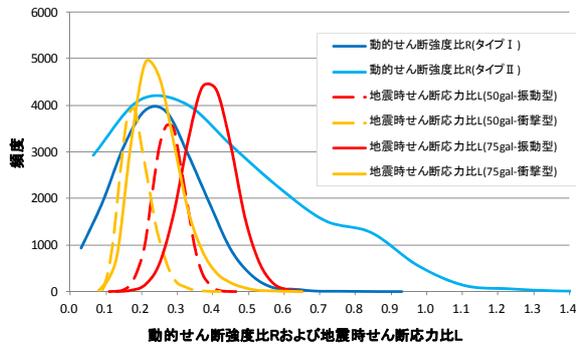


図-9 シミュレーションによる動的せん断強度比と地震時せん断応力比の頻度分布

表-1 シミュレーションによる液状化確率

| 入力地震動 | 解析タイプ | 液状化 | 非液状化 | 液状化確率 |
|--------------|--------|-------|-------|-------|
| 50gal-振動型地震動 | タイプ I | 12292 | 7708 | 0.615 |
| | タイプ II | 7603 | 12397 | 0.380 |
| 50gal-衝撃型地震動 | タイプ I | 6520 | 13480 | 0.326 |
| | タイプ II | 4692 | 15308 | 0.235 |
| 75gal-振動型地震動 | タイプ I | 17136 | 2864 | 0.857 |
| | タイプ II | 10934 | 9066 | 0.547 |
| 75gal-衝撃型地震動 | タイプ I | 10215 | 9785 | 0.511 |
| | タイプ II | 6676 | 13324 | 0.334 |

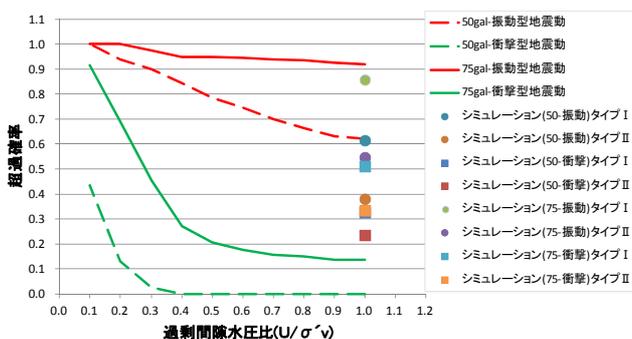


図-10 過剰間隙水圧比の超過確率

6. おわりに

本研究では液状化判定を信頼性理論による液状化確率で行い、過剰間隙水圧比が 1.0 を超過する確率との比較を試みた。その結果、振動型の地震については両者の値がかなり一致したものの、衝撃型の地震については、両確率の値がかなり異なる結果となった。この原因に対する考察は、振動中の地盤のせん断ひずみと間隙水圧の時間的変動特性の関係を詳細に検討しなければならないが、現時点ではそれまでには至っていない。

また、今回は、液状化確率と過剰間隙水圧の関係を比較しただけであり、杭等に作用する外力としての評価はできていない。

今後も信頼性評価法による液状化の判定方法を検証していきたい。

謝辞

本研究では、(株)中電技術コンサルタントの古川智氏と広島市消防局の方々へ広島市の地盤データに関して貴重な資料を提供していただいた。また、防災科学技術研究所が運営している K-NE T の情報を利用した。ここに併せて謝意を表する。

参考文献

- 藤田圭一：標準貫入試験のメカニズム，N 値の解釈と評価、基礎工 Vol. 25、No. 12、pp. 2-13、1997
- 森本巖・鈴木成：一次元応答解析結果に及ぼす動的パラメータの影響 pp. 635-636、1983. 6
- 畑明仁・志波由紀夫：モンテカルロシミュレーションによる地盤物性値のばらつきが地震応答に与える影響に関するケーススタディ、第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集 pp. 1-4、2009. 5
- 中山隆弘・岩屋篤・有清睦：既発表データに基づく砂地盤の耐液状化信頼性評価法に関する一考察、平成 22 年度土木学会中国支部研究発表会概要集、III-21、2010. 5
- 有清睦・中山隆弘：地盤の液状化判定に対する信頼性工学の一考察、平成 23 年度土木学会中国支部研究発表会概要集、III-49、2011. 5
- 有清睦・中山隆弘：信頼性理論による地盤の液状化判定に関する一考察、平成 24 年度土木学会中国支部研究発表会概要集、III-45、2012. 6
- 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編) 平成 14 年、(社)日本道路協会、pp. 121-123、2002
- 小林寛・田村敬一：地震時せん断応力比の簡易評価手法の提案、土木学会第 56 回年次学術講演会、I-A110、pp. 220-221、2001. 10
- 小林寛・田村敬一：地震動レベルを考慮した地震時せん断応力比の検討、土木学会第 55 回年次学術講演会、I-B417、2000. 9
- 今津雅紀・福武毅芳：砂礫材料の動的変形特性、第 21 回土質工学研究発表会、pp. 509-512、1986. 6
- 杉戸真太・合田尚義・増田民夫：周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察、土木学会論文集、No. 493/II-27、pp. 49-58、1994
- 古本吉倫：等価ひずみの周波数依存性を考慮した地盤振動解析プログラム FDEL、岐阜大学工学部社会基盤工学科 地震工学研究室、2002. 4
- 時松孝次：わかりやすい土質力学言論 (改定版)、土の動的性質、土質工学会、pp. 299-352、1992
- 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編) 平成 14 年、(社)日本道路協会、pp. 349-362、2002
- 八木則男：繰返しせん断による砂の体積変化と過剰間隙水圧、土木学会論文報告集、第 275 号、pp. 79-90、1978. 7
- 平成 19 年度広島市地震被害想定調査報告書、広島市、2000
- 国土情報検索サイト KuniJiban
- 防災科学研究所 K-NE T