

信頼性理論による地盤の液状化判定に関する一考察

(株) 異設計コンサルタント 正会員 ○ 有清 睦
広島工業大学 工学部 フェロー会員 中山 隆弘

1. はじめに

液状化による被害を低減するには、事前に地盤の液状化発生の有無を精度よく予測することが重要である。

しかし、液状化の判定と液状化の発生状況とは一致しない場合もあることが指摘されている¹⁾。

そこで、これまでの研究^{2), 3), 4)}を参考にして、地盤の動的強度特性と繰返しせん断特性の避けることのできないばらつきを確率で表し、信頼性理論によって液状化の判定を評価する方法の提案を行なう。

2. 解析方法

2.1 液状化判定

液状化の判定は道路橋示方書(耐震設計編)⁵⁾を基本とした。

道路橋示方書では、液状化判定を液状化に対する抵抗率 F_L として以下のように定義している。

$$F_L = R/L \quad (1)$$

式中の R は動的せん断強度比として次に示す式(2)で与えられる。

$$R = C_w \cdot R_L \quad (2)$$

C_w は地震動特性による補正係数で、 R_L は繰返し三軸強度比で、 N 値や細粒分含有率 F_c によって与えられる。詳細については文献5)を参照していただきたい。

また、 L は地震時せん断応力比で次式によって計算される。

$$L = r_d k_{hg} \sigma_v / \sigma'_v \quad (3)$$

式中、 r_d 、 k_{hg} 、 σ_v 、 σ'_v はそれぞれ、深さ方向の低減係数、レベル2地震動の地盤面における設計水平震度、全上載圧(kN/m²)、有効上載圧(kN/m²)である。

2.2 地震応答解析

本研究では式(3)における k_{hg} を地震応答解析によって評価した。

地震応答解析には、等価線形解析と有効応力解析がある。有効応力解析では、液状化を考慮して解析を行うことができるが、本研究では液状化に至るまでの応答値を計算することが目的であり等価線形解析を用いている。

等価線形解析には、周波数依存型等価線形解析化法であるFDEL^{6), 7)}を用いている。FDELは重複反射理論

を基にした全応力解析である。なお、重複反射理論は水平の成層地盤モデルに、せん断波が鉛直方向に伝播する一次元モデルを理論的に解く方法であり、FDELでは、周波数ごとに等価剛性、等価減衰を与えている。

2.3 信頼性理論

信頼性理論では、確率変数として荷重効果(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 で表す。 R と S が互いに独立であるとする、それぞれの確率分布から $R \leq S$ となる確率が破壊確率 P_f で、 $R > S$ となる確率が非破壊確率 $(1 - P_f)$ である。

μ を平均値、 σ を標準偏差とする。 R が $N(\mu_R, \sigma_R)$ 、 S が $N(\mu_S, \sigma_S)$ で与えられる正規分布するとすれば、 $Z = R - S$ と定義される性能関数 Z も正規分布となる。

このときの破壊確 P_f と信頼性指標 β は、2次元モーメント法により次のように与えられる。

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (5)$$

式中、 $\Phi(\cdot)$ は標準正規確率分布関数である。

次に R と S が対数正規分布の場合、性能関数 Z は、 $Z = R/S$ で、 $\ln Z = \ln R - \ln S$ で与えられる $\ln Z$ は正規分布となる。

このときの破壊確率 P_f と信頼性指標 β は、

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (6)$$

$$\beta = \frac{\ln \mu_R - \ln \mu_S}{\sqrt{v_R^2 + v_S^2}} \quad (7)$$

である。

式中の v_R 、 v_S はそれぞれ R と S の変動係数である。

液状化確率を論じる場合は、荷重効果(外力)を地震時せん断応力比 L で与え、耐力(荷重効果に対する抵抗力)を動的せん断強度比 R で与えればよい。

3. 繰返しせん断特性と動的強度特性の確率論的評価

3.1 地盤の繰返しせん断特性の評価

文献8)によると、繰返しせん断特性の違いで応答結果が異なることが示されている。

繰返しせん断特性は、今津・福武⁹⁾の式を利用し、シミュレーション手法を用いて確率的な評価を行なった。

以下に今津・福武の式を示す。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1+a(\gamma)^b} \quad (8)$$

$$h = c(\gamma)^d \quad (9)$$

式中、 G/G_{\max} は繰返しせん断剛性比、 γ はせん断ひずみ(%)、 h は減衰定数(%)で、 $a \sim d$ の係数は表3-1に示した通りである¹⁰⁾。 μ 、 σ はそれぞれ平均値と標準偏差である。

表3-1 繰返しせん断特性を決めるためのパラメータ¹⁰⁾

		a		b	c		d
		$\mu + \sigma$	μ		$\mu + \sigma$	μ	
砂	$\mu + \sigma$	1419		0.89	$\mu + \sigma$	456.7	0.47
	μ	729.7			μ	338.0	
	$\mu - \sigma$	375.4			$\mu - \sigma$	250.1	
粘性土	$\mu + \sigma$	381.3		0.79	$\mu + \sigma$	56.97	0.27
	μ	179.1			μ	46.84	
	$\mu - \sigma$	84.02			$\mu - \sigma$	38.49	
砂礫	$\mu + \sigma$	2657		0.75	$\mu + \sigma$	90.97	0.3
	μ	392.8			μ	75.36	
	$\mu - \sigma$	241.3			$\mu - \sigma$	62.38	

表3-1 からそれぞれの土質ごとに砂 a (729.7、354.3)、c (338.0、87.9)、粘性土 a (179.1、95.08) c (46.84、8.35)、砂礫 a (392.8、151.5)、c (75.36、12.98) とする正規確率変数を設定した。これをひずみごとに、シミュレーションを行い G/G_0 - γ 関係と h - γ 関係について、Hardin-Drnevich モデル(以下H-Dモデルと称す)で整理した。試行回数は100回である。

H-Dモデルを式(10)、(11)に示す。減衰定数は最小値を設定するため式(11)を用いた。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1+\gamma/\gamma_y} \quad (10)$$

$$h = (h_{\max} - h_{\min}) \left(1 - \frac{G}{G_0} \right) + h_{\min} \quad (11)$$

式中、 G/G_0 は繰返しせん断剛性比、 γ はせん断ひずみ、 γ_y は基準ひずみ、 h_{\max} は最大減衰定数、 h_{\min} はひずみが小さいときの減衰定数である。

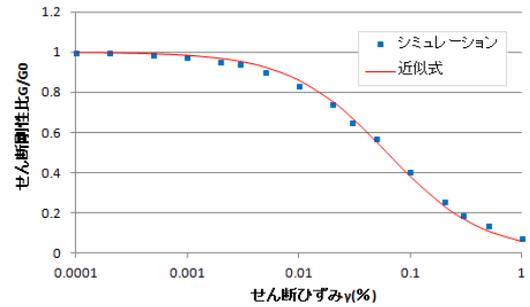
図3-1 (a)、(b)にシミュレーションにより作成した G/G_0 - γ と h - γ の関係をH-Dモデルでフィッティングさせた例を示す。

仮定した図中の近似式はシミュレーションとの差の二乗和が最小となるように適合させたものである。

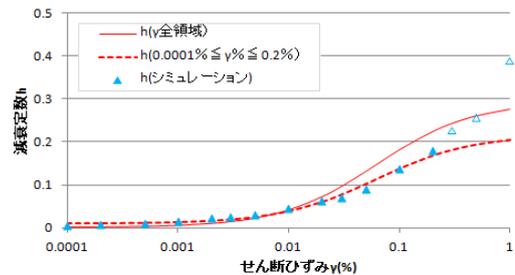
図3-1 (b)の実線と点線は減衰定数をひずみの全領域でフィッティングさせた場合と、 $\gamma = 10^{-6} \sim 2 \times 10^{-3}$ の範囲でフィッティングさせた場合を表している。

図3-2に、これにより作成した砂、粘性土、砂礫の土質ごとに21ケースの繰返しせん断特性を示す。

次の図3-3は、既往の実験値¹¹⁾との整合を確認した結果である。これより、今回の結果はほぼ実験値の範囲内であるとえられる。

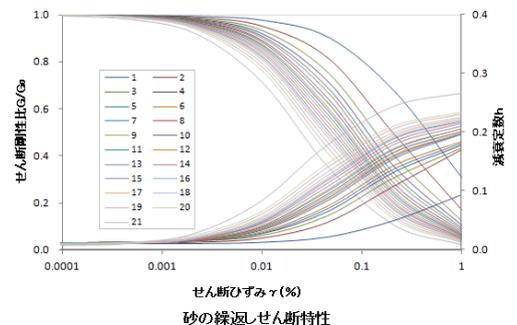


(a) G/G_0 - γ 関係のフィッティング例

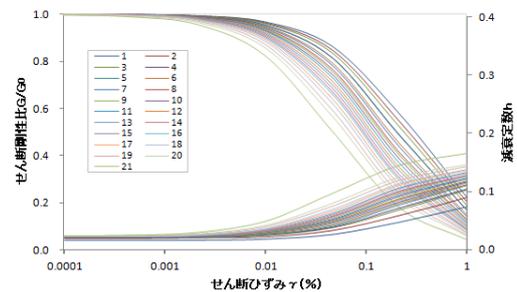


(b) h - γ 関係のフィッティング例

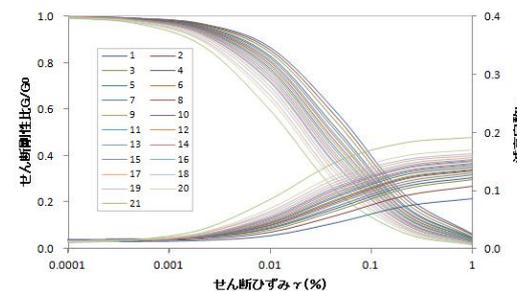
図3-1 フィッティング例



砂の繰返しせん断特性



粘性土の繰返しせん断特性



砂礫の繰返しせん断特性

図3-2 繰返しせん断特性

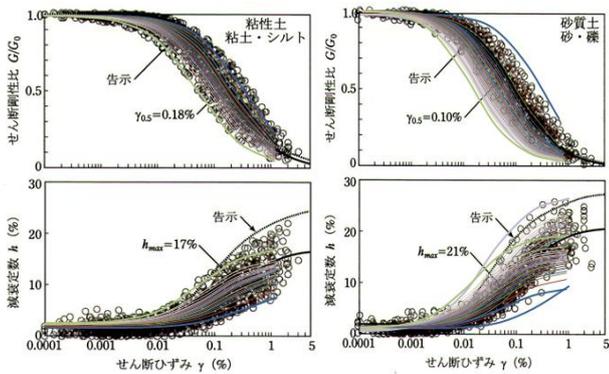


図3-3 既往の実験値との整合

3.2 動的せん断強度比の確率的評価

図3-4は道路橋示方書に示されている沖積土の R_L と換算N値 N_1 の関係¹²⁾を示したものである。

この図からも分かるように繰返し三軸強度比 R_L と換算N値 N_1 との関係にはかなりのばらつきがある。そこで、文献¹³⁾では、埋立土・改良土・沖積土について図3-5の関係を示し、繰返し三軸強度比 R_L の不確実性を繰返し三軸強度比 R_{L1} として次のような式を提案している。

$$R_{L1} = 0.7944R_L + 0.0637 + \varepsilon \quad (12)$$

式中 ε は $N(-0.012, 0.108)$ で与える正規確率変数として与えられる。

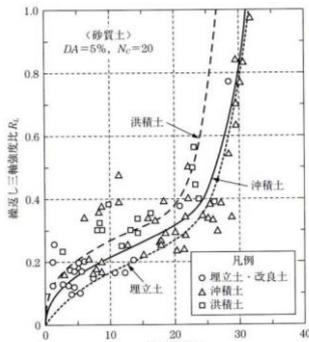


図3-4 砂質土の換算N値 N_1 と繰返し三軸強度比 R_L との関係¹²⁾

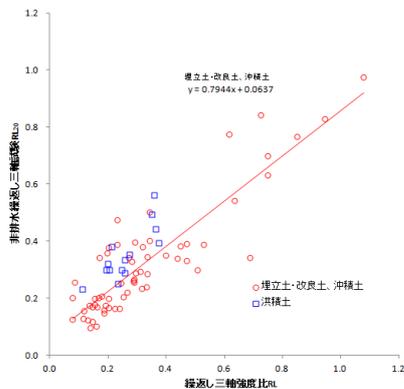


図3-5 非排水繰返し三軸試験 RL_{20} (埋立土・改良土・沖積土)と繰返し三軸強度比 R_L との関係¹³⁾

4. ケーススタディ

4.1 解析条件

解析を行う地盤モデルは広島市消防局の広島市の地盤モデル¹⁴⁾を使用した(図4-1)。

液状化の検討はGL-2.0mとGL-7.0mで行なった。当然、土質が同じであっても繰返しせん断特性は異なるはずであるが、今回は土質が同じであれば同一の関係式($G/G_0-\gamma$ 及び $h-\gamma$ 関係)を用いた。

深さ(m)	土質区分	層厚	単位体積重量 (gf/cm ³)	平均粒径 (mm)	せん断波速度 (V _s /m/s)	初期せん断弾性係数 (G ₀ /t/cm ²)
▽Q1+0.0m	砂	3	1.80	4	142.1	0.329
▽Q1-0.0m					146.0	0.348
▽Q1-3.0m					150.0	0.367
▽Q1-7.0m	シルト	4	1.50	3	134.8	0.278
▽Q1-10.0m					139.5	0.298
▽Q1-15.0m	砂	5	2.00	25	283.2	1.754
▽Q1-18.0m					216.1	0.810
▽Q1-20.0m	砂	2	1.75	20	235.1	0.986
▽Q1-20.0m					230.0	0.966
▽Q1-30.0m	砂	10	2.00	50	334.3	2.279
▽Q1-30.0m					330.0	2.279
▽Q1-33.0m	砂	3	1.80	30	297.7	1.827
▽Q1-33.0m					290.0	1.827
	基礎		2.30		700.0	

図4-1 広島市の地盤モデル

4.2 等価線形解析の結果

地震の加速度波形は2001年の芸予地震の時にK-NE T¹⁵⁾のHR S012の地点で観測された加速度の波形データ(E-W)を使用した。K-NE Tの強震計は自由地盤に設置されているため、この波形を基礎層に引戻す逆増幅解析で得られた波形を入力波形とすべきではあるが、ここではK-NE Tで得られた波形を2Eとして基礎層に振幅を半分にした上昇波Eとして入力している。入力される加速度波形の最大値は129.139galである。

図4-2は最大応答値の深度分布を表したものであり、繰返しせん断特性のばらつきが応答値に影響していることが分かる。

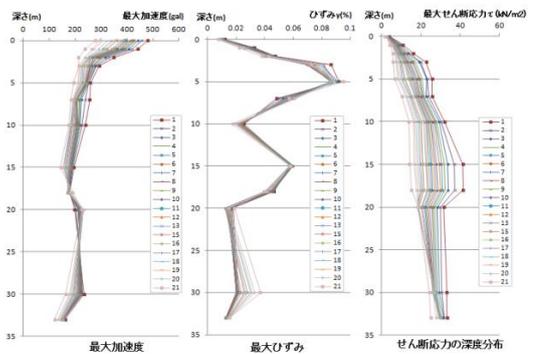


図4-2 最大応答値の深度分布

4.3 シミュレーションによる液状化解析

図4-3にはGL-2.0mとGL-7.0mの深さで等価線形解析から求めた地震時せん断応力比Lの頻度分布を示す。これより地震時せん断応力比は対数正規分布に

従うとして $GL-2.0m : N(-0.924, 0.310)$ 、 $GL-7.0m : N(-1.101, 0.273)$ で与える対数正規確率変数として評価をした。

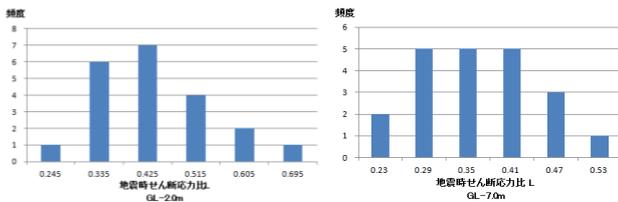


図4—3 地震時せん断応力比Lの頻度分布

N値のばらつきは対数正規分布とした。与えるN値は最頻値とし、標準偏差を、N値の値によらず $\sigma = 0.203$ として設定した。

なお、細粒含有率は $F_c = 5\%$ 、地震動特性 C_w による補正係数についてはタイプII地震動として、ばらつきは考慮していない。

液状化判定に必要な地震時せん断応力比Lと動的せん断強度比Rの確率的評価には、シミュレーション手法を用いている。試行回数は20000回である。

シミュレーションの計算結果で計算値が極端値を示すことがある。そこで、乱数の値が0.001~0.999を外れる値には再度乱数を発生させ極端値の発生を制限した。

5. 解析結果

図5—1は、シミュレーションによって得られた動的せん断強度比Rと地震時せん断応力比Lの頻度分布を表したものである。これを見ると動的せん断強度比Rは2つの不確実性の要素があること、さらに R_{L1} の標準偏差が大きいいためか広い領域で分布する結果となった。一方、地震時せん断応力比Lは、地震波を確定量としたため、Lよりは相対的に狭い領域で分布する結果となっている。

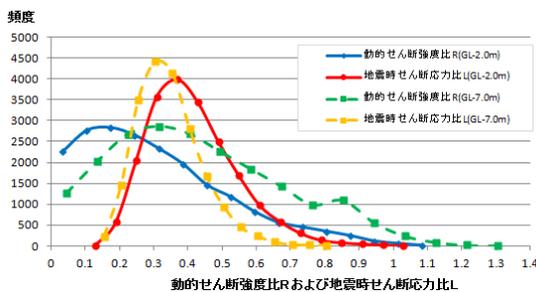


図5—1 シミュレーションによる動的せん断強度比Rと地震時せん断応力比Lの頻度分布

次に表5—1に、式(4)~(7)を用いて求めた液状化確率 P_f と信頼性指標 β を示す。

なおこの表には $R/L \leq 1$ となる個数の確率も示している。

これによると液状化確率はN値が4、深度GLが-2.

0mで約70%、N値が10、深度GLが-7.0においては、約40%の液状化確率となる結果を得た。

表5—1 液状化確率

GL-2.0: N値=4		
分布型	信頼性指標 β	液状化確率 P_f
R: 正規分布-L正規分布	-0.566	0.714
R: 対数正規分布-L対数正規分布	-0.488	0.687
R/L ≤ 1 となる個数	—	0.701
GL-7.0: N値=10		
分布型	信頼性指標 β	液状化確率 P_f
R: 正規分布-L正規分布	0.197	0.422
R: 対数正規分布-L対数正規分布	0.206	0.418
R/L ≤ 1 となる個数	—	0.419

6. おわりに

本研究では、液状化判定を信頼性理論を用いて液状化確率として確率的に評価する方法を提案した。その結果は、例えば、液状化対策を行うか否か、あるいは、その優先順位付けに有効に活用できると考えている。

今回は地震力が1ケースのみの検討であり、地震波型の影響を考慮できていない。このことを踏まえて、今後複数のケースを検討し、これまでの液状化の発生状況を確認し、本信頼性評価法の妥当性を検証していきたい。

謝辞

本研究では、地盤データに関し、(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に貴重な資料を提供していただいた。記して謝意を表す。また、防災科学技術研究所が運営しているK-NETの情報を利用している。ここに併せて謝意を表す。

参考文献

- 井上素行・安田進:液状化判定法の選択および適用性に関する研究,第7回日本地震工学シンポジウム,1986.
- 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.
- 西村伸一・清水英良・藤井弘章・島田清:液状化対策地盤改良に関する信頼性設計,土木学会論文集, No. 603/III-44, pp. 101-111, 1998.9.
- 如明仁・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.
- 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.
- 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の地震応答解析プログラム,岐阜大学工学部土木工学科,2000.5.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.
- 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.
- 今津雅紀・福武毅芳:動的変形特性のデータ処理に関する一考察,第21回土質工学研究発表会, pp. 533-536, 1986.6.
- 吉田望:地盤の地震応答解析 鹿島出版会, p. 111, 2010.10.
- 古山田耕司・宮本裕司・三浦賢治:他地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性,第38回地盤工学研究発表会, pp. 2077-2078, 2003.7.
- 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, p. 354, 2002.
- 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.
- 平成19年度広島市地震被害想定調査報告書,広島市,2000.
- 防災科学研究所 K-NET.