

地盤の液状化判定に対する信頼性工学的一考察

(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

わが国の道路橋示方書¹⁾では、地震時における地盤の液状化（以下では単に液状化と称する）判定には、液状化抵抗率 F_L （＝動的せん断強度比 R /地震時せん断応力比 L ）が用いられている。 F_L が1.0以下であれば液状化するものと判定される。

しかし、地盤の強度や地震力には、ばらつきや不確実性が含まれ、それらを確定的に決めることに無理がある。そのため、これまでの地震時の液状化の状況から、 F_L が1.0以下であっても液状化していない箇所や1.0より大きくても液状化した箇所があり、 $F_L=1.0$ を境に明確に分けることができないことが報告されている^{2),3)}。

本研究では、信頼性理論の手法を用いて、地盤の耐液状化強度のばらつきによる不確実性を統計的に処理することで、液状化判定を確率的に評価することを試みている。

本来ならば、地震力の不確実性も考慮すべきであるが、その点については今後の課題としている。

2. 信頼性評価法

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である。

ここで、 R が $N(\mu_R, \sigma_R)$ 、 S が $N(\mu_S, \sigma_S)$ で与えられる正規分布とすれば、 $Z=R-S$ と定義でき性能関数 Z も正規分布となる。

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

$$\text{式中、} P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (1)$$

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

$$\Phi(\cdot) : \text{標準正規確率分布関数} \quad (3)$$

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、

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

で、

$$\beta = \frac{\ln \mu_R - \ln \mu_S}{\sqrt{\nu_R^2 + \nu_S^2}} \quad (4)$$

である。

式中の ν_R 、 ν_S はそれぞれ R と S の変動係数である。

3. 地盤液状化の確率論的評価

3.1 動的せん断強度比 R の評価

まず、 R は、

$$R = C_w \cdot R_L \quad (5)$$

で与えられる。式中の 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である。

3.1.1 繰返し三軸強度比 R_L の評価

図3-1の実線は、道路橋示方書に示されている換算 N 値 N_1 と繰返し三軸強度比の関係式⁴⁾を表している。

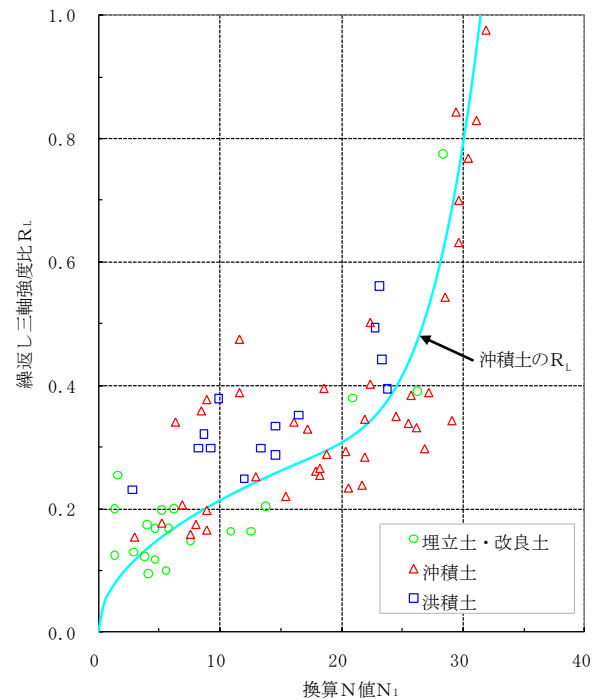


図3-1 砂質土の換算 N 値 N_1 と繰返し三軸強度比 R_L との関係⁴⁾

この図より、この中に示されている非排水繰返し三軸試験で得られた繰返し三軸強度比 R_{20} は、土質によりかなりのばらつきがあることが分かる。ここで、非排水繰返し三軸試験で得られた繰返し三軸強度比 R_{20} は、繰返し回数20回で、ひずみ両振幅5%である。

図3-2は、そのことを考慮するために、図3-1の実線で与えられた沖積土の繰返し三軸強度比 R_L を横軸にとり、縦軸に埋立土・改良土、沖積土の室内試験より得られた非排水繰返し三軸試験の結果を示したものである。

本研究では、 R_L の不確実性を評価した繰返し三軸強度比 R_{L1} を、 $N(-0.012, 0.108)$ の正規分布に従う ε により

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

とした。

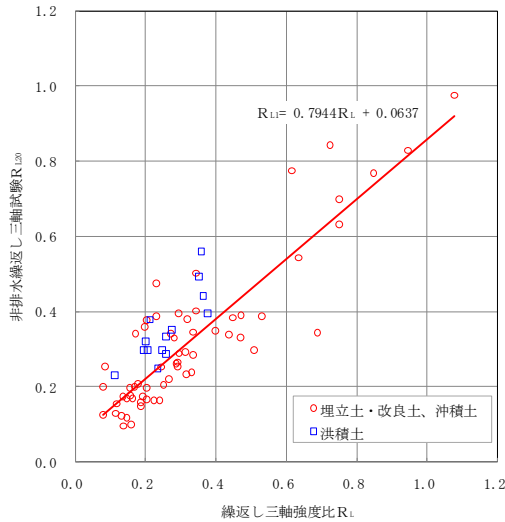


図3-2 室内試験から得られた非排水繰返し三軸強度比 R_{20} (埋立土・改良土、沖積土)と繰返し三軸強度比 R_L との関係

3.1.2 粒度の影響を考慮した補正N値 N_a

図3-3は砂質土の細粒分含有率と補正項 $\angle N_1$ との関係⁵⁾であるが、やはりかなりのばらつきがあり、そのことを考慮するため、本研究では、 $\angle N_1$ も確率量とし、次のように評価している。

補正項 $\angle N_1$ の平均値 : $\mu_{\angle N_1} = 0.474$

補正項 $\angle N_1$ の標準偏差 : $\sigma_{\angle N_1} = 6.720$

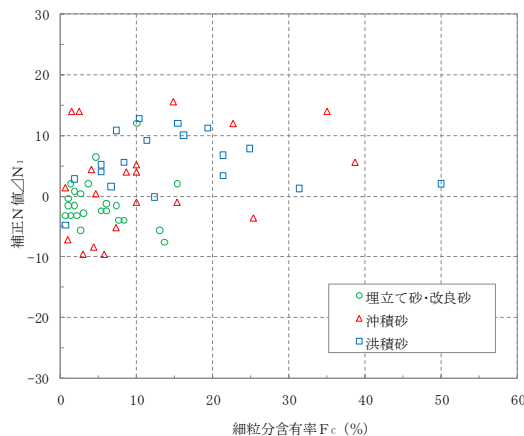


図3-3 砂質土の細粒分含有率 F_c と補正項 $\angle N_1$ との関係⁵⁾

3.1.3 地震動特性による補正係数 C_w

図3-4は、地震動特性による補正係数 C_w と前述の R_L との関係を示したものである⁶⁾。 C_w は地震波の不規則性を考慮するための係数で、本研究では、 C_w のばらつきを、タイプIの地震については図3-5(a)、タイプIIの地震については、図3-5(b)のように整理し、それぞれ式(7)～(10)で表すことにした。

タイプI

$$C_w = 0.954C_{wI} + 0.052 + \varepsilon \quad (7)$$

式中、

$$C_{wI} = \frac{5.536}{6.56\sqrt{2\pi}} e^{\frac{1}{2} \left\{ \frac{\ln(10R_{L1}) - 1.334}{0.656} \right\}^2} + 0.85 \quad (8)$$

ε は地震動特性による補正係数 C_w の平均値

$$\mu_{C_w} = -0.014$$

および標準偏差

$$\sigma_{C_w} = 0.053$$

で与えられる正規確率変数である。

タイプII

$$C_w = 1.019C_{wII} - 0.019 + \varepsilon \quad (9)$$

$$\text{式中、 } C_{wII} = 1 + e^{-0.00367R_{L1}^{-3.568}} \quad (10)$$

ε は地震動特性による補正係数 C_w の平均値

$$\mu_{C_w} = -0.009$$

および標準偏差

$$\sigma_{C_w} = 0.090$$

で与えられる正規確率変数である。

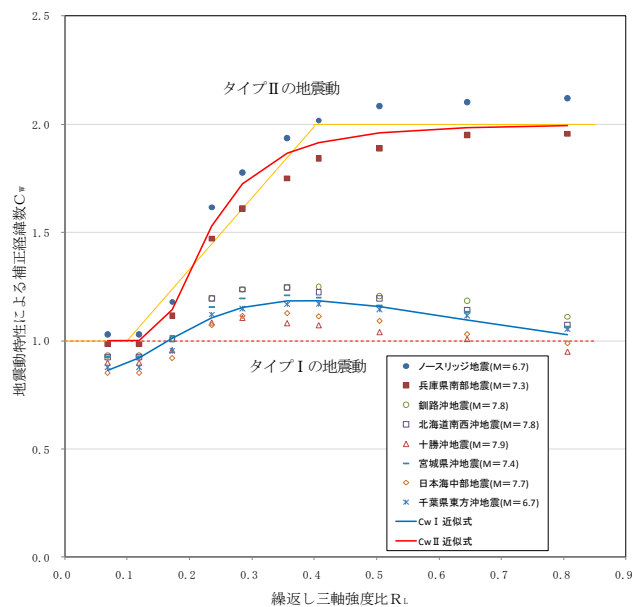


図3-4 地震動特性による補正係数⁶⁾(赤と青の実線は加筆)

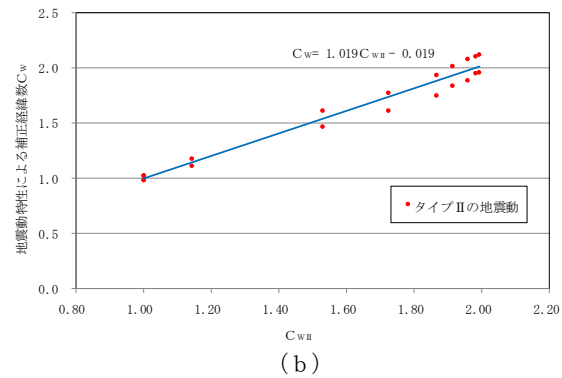
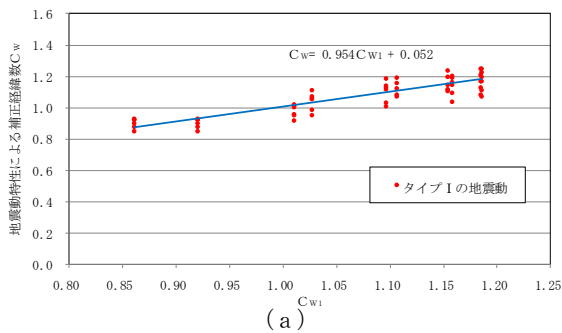


図3-5 C_wとC_{wI}およびC_{wII}の関係

3.2 地震時せん断応力比L

一方、地震時せん断応力比Lは

$$L = r_d k_{hg} \sigma_v / \sigma'_v \quad (11)$$

で与えられている。

式中の r_d 、 k_{hg} 、 σ_v 、 σ'_v はそれぞれ地震時せん断応力比の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) と、有効上載圧 (kN/m²) である。

4. ケーススタディ

解析対象としたモデル地盤を図3-7に示す。

地盤種別はⅢ種、地域別補正係数C_zは広島県の 0.85 とし、地震動はタイプⅡとした。着目位置は、深度G L=5.0mとした。そして、その位置におけるN値については、最頻値を5、18、30 と仮定し、分布型は対数正規分布とした。標準偏差については、最頻値の大きさによらず、 $\xi = 0.407$ としている。

細粒分含有率F_cについては、5%とし、標準偏差については、文献⁷⁾を参考に、 $\sigma_{\log_{10} F_c} = 0.345$ の対数

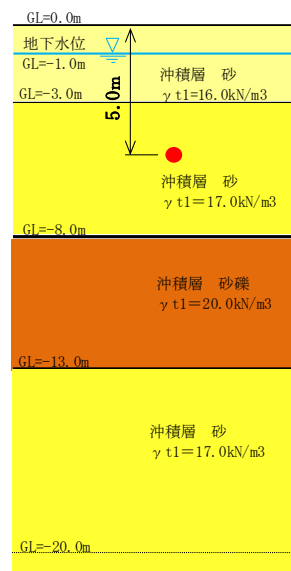


図3-7 モデル地盤

正規分布としている。

Rについてはシミュレーション手法で評価した。試行回数は20000回である。

ただし、シミュレーションでは、N値、F_c、C_w、R_Lに極端に大きな数値が発生することがあり、その値は棄却しているため、解析結果の数は20000回よりも少ない個数となっている。

5. シミュレーション結果および解析結果

まず、図5-1は動的せん断強度比Rの頻度分布を示したものである。

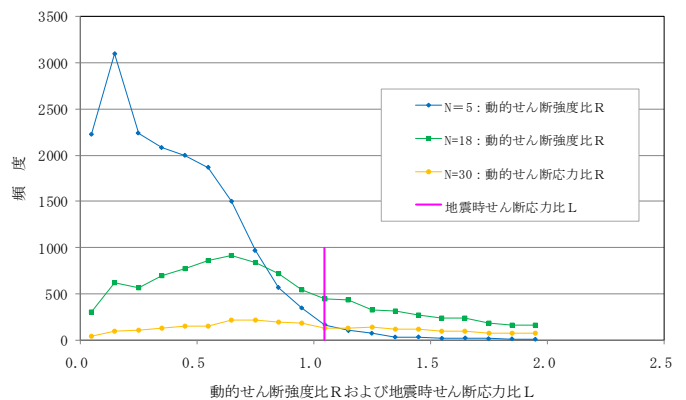


図5-1 動的せん断強度比Rの頻度分布

この頻度分布を基に、確率紙によってRの平均値と標準偏差を計算し、その確率分布については、正規分布あるいは対数正規分布とした。

表5-1は、最終的に得られた液状化確率P_fと信頼性指標βを示したものである。表には参考のために、道路橋示方書に従って計算したF_Lも併せて示している。

表より、シミュレーション結果 (R≤Lの個数) と信頼性理論による液状化確率が良く一致していることが理解できる。

しかし、N値が30であれば、通常、液状化の可能性は極めて小さいと考えられるが、ここでの結果では60～70%もの液状化確率となっている。これについては、仮定したパラメータの分布形や分布形の重ね合わせ等を含めて、これから原因を追究していく必要がある。

表5-1 液状化確率と信頼性指標

N 値	評 価	R≤Lの個数	正規分布	対数正規分布	頻度分布から求めたLの非超過確率	F L
N=5	液状化確率	0.978	0.962	0.984	0.982	0.223
	信頼性指標 β	—	-1.780	-2.140	—	
N=18	液状化確率	0.733	0.743	0.834	0.758	0.917
	信頼性指標 β	—	-0.651	-0.969	—	
N=30	液状化確率	0.620	0.635	0.745	0.640	14.359
	信頼性指標 β	—	-0.345	-0.660	—	

6. おわりに

信頼性設計では、多くのデータを処理する必要がある。今回の研究では、道路橋示方書のデータを利用することで、種々の不確実性を考慮して液状化の発生を確率的に示すことができた。

これにより、これまで F_L では定量的に示すことができなかった液状化の発生の可能性を、信頼性理論により信頼性指標 β や液状化確率によって数値的に表すことができた。

しかし、確率量と仮定しているパラメータの確率分布形には、依然課題が残っている。

さらに、地震力の不確実性に対する検討や、液状化指数 P_L と信頼性指標 β との関係についての評価も必要であり、これからの課題である。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説(V耐震設計編)、(社)日本道路協会、2002.
- 2) 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.
- 3) 安田進:大地震による液状化とN値、基礎工、Vol. 31、No. 2、pp. 50-51、2003.
- 4) 道路橋示方書・同解説(V耐震設計編)、(社)日本道路協会 p. 354、2002.
- 5) 道路橋示方書・同解説V(耐震設計編)、(社)日本道路協会、p. 355、2002.
- 6) 道路橋示方書・同解説V(耐震設計編)、(社)日本道路協会、p. 358、2002.
- 7) 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.