

地震リスクマネジメントを視野に入れた地盤液状化確率の算定手法に対する一提案

広島工業大学工学部 フェロー会員
(株) 巽設計コンサルタント 正会員
ケイ・エム調査設計 (株)
五洋建設 (株)

中山隆弘
有清 睦
○ 東 輝
巳造良裕

1. 緒言

近年、社会基盤施設に関わる公共事業の是非は、数値指標である B/C(費用対効果)に基づいて議論されることが多くなってきた。

例えば地盤液状化の可能性が予想される各施設の地震対策事業について言えば、地震による当該施設のリスク(=事象の発生確率×被害額)によって B/C を計算し、それによって事業の効果を検討することが一般的になってきた。

しかし、現状では、多くの地方自治体が公表しているように、各区域の地震時地盤液状化の危険性については、地盤の液状化指数(P_L)によって定性的に与えられているだけで、リスクにまで言及されることはまず無いようである。

そのような現状に鑑み、ここでは、液状化の問題に関する既往の研究成果^{1)、2)}を参考にして、地震時地盤液状化(以下では地盤液状化あるいは単に液状化と称する)の発生確率を評価する方法に対するひとつの提案を行う。

2. 解析手法

まず地盤液状化の判定手法としては、わが国の道路橋示方書(耐震設計編)³⁾で定義されている F_L 値法に基づき、岩崎ら⁴⁾により提案された液状化指数 P_L による P_L 値法を採用した。ただし、地震時せん断応力比 L については、道路橋示方書に示されている設計震度ではなく、安田ら⁵⁾によって提案されている SI 値を用いた。

2.1 液状化指数および液状化の可能性の判断

F_L 値法における地盤深さ z (m)における液状化抵抗率 F_L は式(1)で定義される。

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

式中の R は動的せん断強度比、 L は地震時せん断応力比であり、紙面の都合上、詳細³⁾は省略するが、 R は地盤の N 値や細粒分含有率 F_c によって与えられ、 L は設計震度あるいは SI 値や地盤の全応力度および有効応力度によって計算できる。

次に、液状化指数 P_L は、式(1)で計算した F_L によって決まる重み F を考慮して式(2)で計算する⁴⁾。

すなわち、 P_L は、 N 値や細粒分含有率等の深さ方向の地盤特性が分かっている地盤の液状化の可能性を、 F_L のように局的ではなく、地盤全体で評価するための指標であると言える。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot (10 - 0.5z) dz \quad (2)$$

ここで、

$$\begin{cases} F = 1 - F_L & (F_L \leq 1.0) \\ F = 0 & (1.0 < F_L) \end{cases}$$

である。

ただ、実際問題として F_L を z の連続関数で表すことはできないので、本研究では、式(2)の積分値を式(3)によって近似的に求めた。

$$P_L = \sum F_i \cdot (10 - 0.5z_i) \cdot \Delta z \quad (3)$$

ここに、 F_i は地表面より深さ z_i (m)の位置の F_L 値で、微小区間 Δz については、今回は 1m としている。

さて、 P_L 値による液状化の可能性の判断については、例えば、広島市の地震被害想定⁵⁾では、

- ・ $30.0 < P_L$: 液状化の可能性が極めて高い
- 1 ・ $5.0 < P_L \leq 30.0$: 液状化の可能性がかなり高い
- ・ $5.0 < P_L \leq 15.0$: 液状化の可能性が高い
- ・ $0.0 < P_L \leq 5.0$: 液状化の可能性は低い
- ・ $P_L = 0.0$: 液状化の可能性はかなり低い

としている。そして、これによって想定している五つ(五日市断層や己斐断層等に起因する地震)のシナリオ地震に対する広島市の液状化危険度を、500m×500mメッシュ毎で与え、HP 等で公表している。

2.2 構造信頼性解析法

構造信頼性理論は、構造物や構造部材に対する荷重効果(断面力や応力度など) S 、およびそれに対応する抵抗力(断面の抵抗モーメントや材料強度など) R には必ず種々の不確実性が伴うことを前提条件として、それらの破壊の可能性を信頼性指標や破壊確率で評価するための理論である⁶⁾。なお、式(1)の動的せん断強度比も R で表しているが、ここでは特に混乱は起きないように思われるので、構造信頼性理論における抵抗力についても同じ記号を使うことにする。

今では、 R や S が非正規確率変数で与えられる場合の破壊確率も良好な精度で計算できるようになったが、ここでは、 R と S が共に正規確率密度関数で与えられる最も簡単な場合の評価式のみを示しておく⁶⁾。

まず、 R と S による性能関数 Z を式(4)のように定義する。

$$Z = R - S \quad (4)$$

ここで、 R と S がそれぞれ $N(\mu_R, \sigma_R)$ 、 $N(\mu_S, \sigma_S)$ に従う正規確率変数であると仮定すれば、 Z も正規確率変数となり、さらに R と S が互いに独立な確率変数であれば、 Z の平均値 μ_Z と標準偏差 σ_Z は、それぞれ $\mu_R - \mu_S$ と $(\sigma_R^2 + \sigma_S^2)^{1/2}$ で与えられる。

このとき、信頼性理論における2次モーメント法によって、信頼性指標 β と破壊確率 P_f が、それぞれ式(5)と式(6)で与えられる⁶⁾。

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

$$P_f = 1 - \Phi \left(\frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right) \quad (6)$$

ここに、式中のΦは正規確率分布関数である。

この理論を地盤液状化確率の算定に活用する場合は、式(3)によって計算されるP_Lを荷重効果S(本研究では、「液状化作用力P_L」と称している)と見なし、液状化の可能性を定性的に示している前述の表現をP_Lによって確率的に表現して抵抗力Rとすればいい。この抵抗力を、本研究ではP_Lで表す「液状化抵抗力R_{req}」と称している。次節では、このことについて、より詳細に述べる。

2.3 液状化確率の算定法

いま、地震におけるある区域の液状化の可能性を議論する場合、区域が例え500m×500mの小区域であっても、その区域内の地盤のN値や細粒分含有率等を確定量で与えることはほぼ不可能である⁷⁾。そのため、F_L値による液状化判定結果にかなり大きなばらつきがあることは、昨年の本発表会で発表した通りである⁹⁾。

したがって、本研究では着目地点のN値や細粒分含有率F_cを確率量とし、モンテカルロシミュレーション手法によって式(1)の動的せん断強度比Rをシミュレートした。一方、今回は地震動および地盤の全応力度と有効応力度の不確実性については考慮外とし、動的せん断応力比Lは確定量とした。したがって、F_LやP_Lの不確実性は、今回は主としてN値と細粒分含有率F_cの不確実性のみに起因するものとなる。

さて、前述のように、P_L値による液状化判定、すなわち、液状化抵抗力については、現状では前述の通り定性的な表現に止まっている。

そこで本研究では、次に述べるように、地盤の液状化に対する抵抗力、すなわち液状化抵抗力R_{req}を確率量で表すことを試みた。

具体的には、文献5)を参考にして、

- ・液状化の可能性が極めて高い ⇒
地盤のP_Lが30.0を超えれば、99%の確率で液状化する。
- ・液状化の可能性が低い ⇒
地盤のP_Lが5.0以下であれば液状化する確率は1%である。
- ・地盤が液状化する可能性は五分五分である ⇒
地盤のP_Lが15.0程度である。

と仮定し、この確率モデルを、「液状化抵抗確率密度関数」と名付けた。

さらに、その確率分布が正規分布に従うものと仮定し、R_{req}を、

$$f_{R_{req}}(r) = 1/(\sqrt{2\pi}) / 6.45 \exp \{ -(r-15.0)^2 / 2 \cdot 6.45^2 \} \quad (7)$$

とした。すなわち、R_{req}の確率密度関数をN(15.0, 6.45)とした。

このとき、ある想定地震に対するある地盤のP_L値の確率密度関数f_{PL}(s)を、N値とF_cの不確実性を考慮したシミュレーションによって求めれば、地盤の液状

化確率P_{req}は式(8)によって評価できる。

$$P_{req} = \int F_{R_{req}}(s) f_{PL}(s) ds = \Phi(-\beta_{req}) \quad (8)$$

3. ケーススタディ

3.1 着目区域と地盤条件

今回は広島市消防局より提供していただいた広島市の地盤モデルを使用し、四区域(500m×500m)の地盤液状化確率を計算した。ここでは、研究途上であることに鑑み、それらを便宜上A～D区域としておく。

各着目区域の地盤特性を表-1に示す。表中のZは層厚、γは地下水位面より浅い位置での土の単位体積重量、γ'は地下水位より深い位置での有効単位体積重量、Nは標準貫入試験によって得られたN値、F_cは細粒分含有率である。ただし、F_cについては、今回は道路橋示方書で地質毎に与えられている概略値を使用した。

表-1 着目区域の地盤特性

| (a) A 区域 | | | | | |
|----------|------|-----------------------|------------------------|----|--------------------|
| | Z(m) | γ(kN/m ³) | γ'(kN/m ³) | N | F _c (%) |
| 1 | 2 | 16.0 | 6.0 | 4 | 10 |
| 2 | 5 | 20.0 | 10.0 | 50 | 0 |
| 3 | 3 | 18.0 | 8.0 | 30 | 0 |
| (b) B 区域 | | | | | |
| | Z(m) | γ(kN/m ³) | γ'(kN/m ³) | N | F _c (%) |
| 1 | 3 | 16.0 | 6.0 | 5 | 10 |
| 2 | 10 | 17.0 | 7.0 | 10 | 10 |
| 3 | 7 | 15.5 | 5.5 | 3 | 75 |
| (c) C 区域 | | | | | |
| | Z(m) | γ(kN/m ³) | γ'(kN/m ³) | N | F _c (%) |
| 1 | 3 | 16.0 | 6.0 | 5 | 10 |
| 2 | 10 | 17.0 | 7.0 | 10 | 10 |
| 3 | 7 | 15.8 | 5.8 | 5 | 75 |
| (d) D 区域 | | | | | |
| | Z(m) | γ(kN/m ³) | γ'(kN/m ³) | N | F _c (%) |
| 1 | 3 | 16.0 | 6.0 | 5 | 10 |
| 2 | 5 | 17.0 | 7.0 | 10 | 10 |
| 3 | 5 | 20.0 | 10.0 | 20 | 0 |
| 4 | 7 | 17.0 | 7.0 | 10 | 10 |

3.2 想定地震および着目区域の計測震度

想定した地震は次の5つの地震である。

- (1) 東南海・南海地震
- (2) 己斐断層地震
- (3) 岩国断層地震
- (4) 安芸灘～伊予灘地震
- (5) 五日市断層地震

広島市地震被害想定調査報告書⁵⁾によれば、これらの各地震による各区域の計測震度は、表-2の通りである。

また、地震動タイプについては、東南海・南海地震のみを海溝型であるタイプIとし、それ以外の想定地震については内陸型であるタイプIIとした。

表-2 各想定地震による着目区域の計測震度

| | | 着目区域 | | | |
|------|-----|------|-----|-----|-----|
| | | A | B | C | D |
| 想定地震 | (1) | 4.6 | 5.0 | 4.6 | 4.7 |
| | (2) | 5.3 | 6.0 | 6.0 | 5.8 |
| | (3) | 5.6 | 5.8 | 5.7 | 6.0 |
| | (4) | 5.4 | 5.4 | 5.4 | 5.5 |
| | (5) | 6.4 | 5.9 | 5.9 | 6.3 |

3.3 地盤定数に関する条件

一方、着目区域の N 値の確率分布関数については参考となるデータがないため、対数正規分布に従うものと仮定した。

具体的には、N 値の最頻値については表-1 の値を採用し、 $\log_{10}N$ の標準偏差については、広島市のデータを統計的に処理し、0.407 とした。

細粒分含有率 F_c については、N 値よりもさらにデータ不足であるため、表-1 に示す値を最頻値と仮定し、標準偏差については文献 1) に従い、 $\log_{10}F_c$ の標準偏差を 0.345 とした。

なお、 γ と γ' については、N 値に比べればかなり変動が小さいと考え、今回は確定値として取り扱った。

3.4 解析ケース

解析ケースは、表-3 に示すように着目区域が 4 区域、3.2 の通り想定地震動が 5 つで、表-3 に示すように計 20 ケースである。

表-3 解析ケース

| | | 着目区域 | | | |
|------|-----|-------|--------|--------|--------|
| | | A | B | C | D |
| 想定地震 | (1) | CASE1 | CASE6 | CASE11 | CASE16 |
| | (2) | CASE2 | CASE7 | CASE12 | CASE17 |
| | (3) | CASE3 | CASE8 | CASE13 | CASE18 |
| | (4) | CASE4 | CASE9 | CASE14 | CASE19 |
| | (5) | CASE5 | CASE10 | CASE15 | CASE20 |

4. 解析結果

図-1 は、1000 回のシミュレーションによって得られた各区域の FL の平均値を深さ 1m 単位で示したものである。

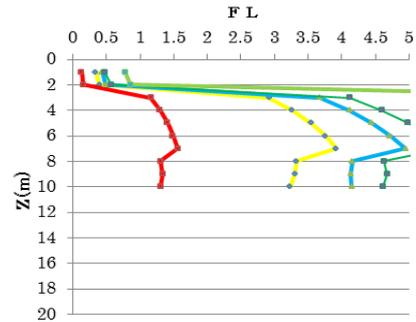
当然ながら、図より、各区域における FL の深さ方向の平均値が、想定地震によって大きく異なっていることが理解できる。

図に示した各数値を用いて、式(3)を利用すれば、各ケース(CASE1~CASE20)の P_L の平均値を計算でき、FL のシミュレーション結果を用いて P_L のヒストグラムも得ることができる。

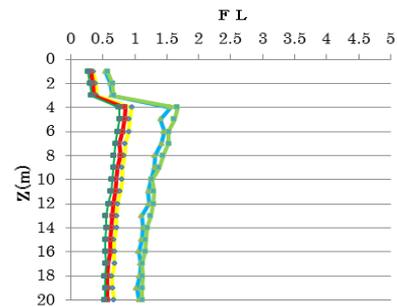
ここでは紙面の都合上、Case6 (想定地震：東南海・南海地震、着目区域：B) と Case7 (想定地震：己斐断層地震、区域：B) の結果のみを図-2 に示す。

図の横軸が P_L 値であるが、当然ながら、想定する地震によって、その値が大きく異なっていることが分かる。

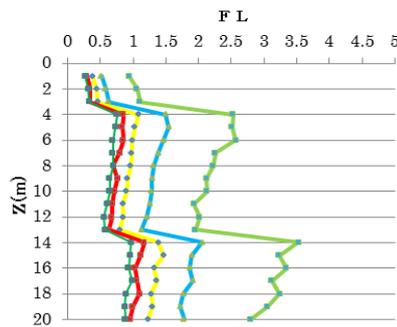
具体的には、着目区域 B は広島市の中心部であり、東南海・南海地震による液状化の可能性よりも、己斐断層地震に対する液状化の可能性の方が相当大きいことが、容易に推察できる。



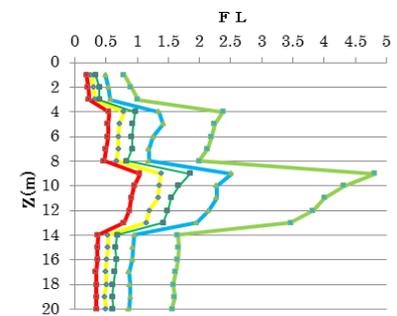
着目区域 A



着目区域 B



着目区域 C



着目区域 D

図-1 FL の深さ方向の分布

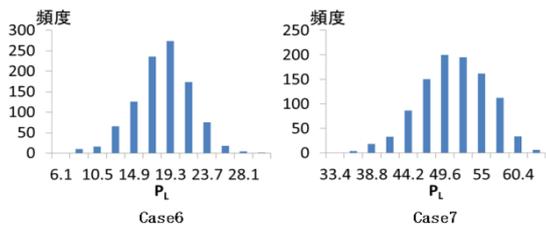


図-2 PLのヒストグラム

次に、両ケースのシミュレーション結果を正規確率紙と対数正規確率紙にプロットしたものが図-3である。決定係数の比較により、両ケースとも着目区域BのPLは正規分布への適合度が大きいことが理解できる。

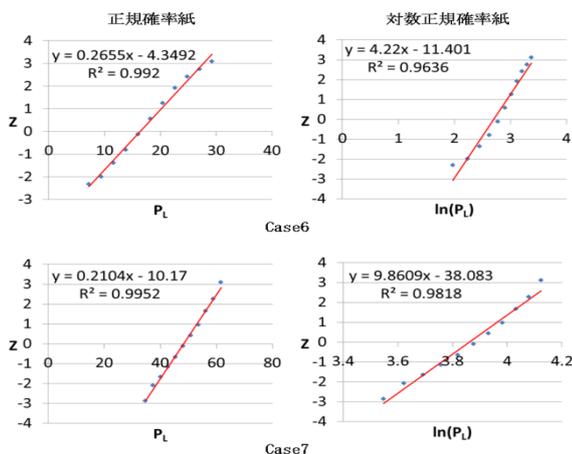


図-3 PLのばらつきの確率紙への当てはめ

最後に、図-3より求めたPLの平均値 μ_{PL} 、標準偏差 σ_{PL} 、変動係数 δ_{PL} と、式(3)によって計算した液状化に対する信頼性指標 β_{req} および式(5)によって計算した液状化確率 P_{req} をまとめて表-4に示す。

表-4 各着目区域の液状化確率

| | μ_{PL} | σ_{PL} | $\delta_{PL}(\%)$ | β_{req} | $P_{req}(\%)$ |
|--------|------------|---------------|-------------------|---------------|---------------|
| CASE1 | 4.12 | 1.90 | 46.1 | 1.62 | 5.2 |
| CASE2 | 8.36 | 2.29 | 27.4 | 0.97 | 16.6 |
| CASE3 | 10.4 | 2.50 | 24.0 | 0.66 | 25.3 |
| CASE4 | 8.98 | 2.43 | 27.1 | 0.87 | 19.1 |
| CASE5 | 17.5 | 3.32 | 19.0 | -0.34 | 63.3 |
| CASE6 | 16.4 | 3.76 | 22.9 | -0.18 | 57.3 |
| CASE7 | 48.3 | 4.75 | 9.83 | -4.16 | 99.9 |
| CASE8 | 39.6 | 4.98 | 12.6 | -3.01 | 99.8 |
| CASE9 | 20.0 | 4.62 | 23.1 | -0.63 | 73.5 |
| CASE10 | 43.7 | 5.12 | 11.7 | -3.49 | 99.9 |
| CASE11 | 3.97 | 2.17 | 54.7 | 1.62 | 5.2 |
| CASE12 | 46.4 | 5.03 | 10.8 | -3.84 | 99.9 |
| CASE13 | 32.9 | 5.03 | 15.3 | -2.186 | 98.5 |
| CASE14 | 19.3 | 4.43 | 23.0 | -0.547 | 70.7 |
| CASE15 | 41.1 | 5.58 | 13.6 | -3.062 | 99.8 |
| CASE16 | 5.93 | 2.54 | 42.8 | 1.309 | 9.5 |
| CASE17 | 33.9 | 5.35 | 15.8 | -2.252 | 98.7 |
| CASE18 | 42.2 | 5.02 | 11.9 | -3.331 | 99.9 |
| CASE19 | 21.3 | 4.40 | 20.7 | -0.812 | 79.1 |
| CASE20 | 51.9 | 5.63 | 10.8 | -4.312 | 99.9 |

表より、今回の液状化抵抗確率密度関数モデルによる限り、液状化確率がほぼ100%に近いケースは9ケースで、具体的には、区域B、C、Dでは南海・東南海地震と安芸灘・伊予灘地震以外の地震に対しては100%近い確率で液状化する可能性が高いことが分かる。

逆に液状化確率が10%以下のケースは3ケースである。具体的には、東南海・南海地震に対しては、区域Bを除き、液状化の確率は5~10%であると言える。

5. 結言

地震リスクマネジメントへの活用を考えて、本研究では、地震による地盤の液状化確率の算定法を提案した。得られた成果を要約すれば、次のようである。

1. 地盤のN値と細粒含有率が対数正規分布に従う場合、今回、注目した広島市の4つの区域におけるPLの確率分布は、地震動によらず、ほとんどの場合、正規分布に従う。
2. 1.の成果に加え、PLにより液状化抵抗力を表す場合、その確率密度関数を与えることにより、構造信頼性理論によって、ある区域の液状化確率を算定できる可能性を見出した。

もちろん、液状化抵抗力の確率密度関数については、過去の液状化被害データを統計学的に評価して、その信頼度を上げることが極めて重要であることは言うまでもない。また、液状化したときの構造物の被害の程度、さらに言えば、破壊確率の研究も必要になるだろう¹⁰⁾。

さらに、今回は、シナリオ地震に対する液状化確率、すなわち条件付き確率のみを検討したが、今後は地震の発生確率の問題についても考慮しなければならない。

謝辞

本研究に対し、広島市消防局からは広島市地盤モデルに対する有益な資料をご提供いただいた。また、それに関し、(株)中電技術コンサルタントの古川 智氏には多大なご支援を賜った。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 西村・清水・藤井・島田：液状化対策地盤改良に関するNo.603/III-44、pp.101-111、1998.9.
- 2) 諫山・善・陳・笠間：液状化に関するリスク分析の試み、土と基礎、51-10、pp.21-23、2003.10.
- 3) 道路橋示方書・同解説（耐震設計編）平成14年、日本道路協会、pp.121-123、2002.
- 4) 岩崎：地震時地盤液状化の程度と予測について、土と基礎、28-4、pp.23-29、2003.4.
- 5) 平成19年度広島市地震被害想定調査報告書、広島市、2000.
- 6) 例えば、P.T.クリステン、M.J.バーカー/室津義定（監訳）：構造信頼性—理論と応用—、シュプリンガー・フェアラーク東京、1986.
- 7) 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、pp.2-13、1997.12.
- 8) 桑原文夫：建築基礎構造におけるN値の活用と留意点—N値の信頼性を考慮した基礎設計—、基礎工、pp.19-21、2003.2.
- 9) 中山・岩屋・有清：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.
- 10) 安田 進：地盤の液状化危険度マップとその活用、基礎工、pp.26-30、2010.8.