

東京湾沿岸部を対象とした液状化判定に含まれる 諸条件の不確実性の影響に関する研究

佐藤尚次* 岩崎俊**

A Study on the Influence of Uncertainty of Various Conditions in Liquefaction Determination for the Tokyo Bay Coastal Area

by

Naotsugu SATO* and Shun IWASAKI**

There is a concern that the liquefaction hazard assessment in the Specification for Highway Bridges is subject to fluctuations due to uncertainties that affect the presence or absence of liquefaction. In this study, we evaluated the uncertainty of various conditions included in liquefaction risk assessment in a 250m square area and its effect on the accuracy of the liquefaction risk assessment. As a result, it was shown that the liquefaction hazard level may differ depending on the location even within the area. The calculation of the probability of exceeding the level based on the reliability theory confirmed that the reliability of the risk assessment is ensured because the probability converges to some extent even when the information on the liquefaction resistance of the ground is uncertain. On the other hand, if the information on the stress resultant and resistance is not appropriate, the accuracy of the judgment will be reduced.

Key words: Liquefaction determination, Uncertainty, Monte carlo simulation, Reliability, Seismic acceleration

1 緒 言

日本に依然として液状化リスクの高い地域が存在していることが、2011年の東日本大震災により改めて浮き彫りとなった。液状化自体は直接的に人的被害を出すような災害ではないものの、道路や下水道のようなインフラへ広範囲にわたる被害を及ぼすことから、被災地域の住民は、復旧が完了するまで長期にわたり生活困難を強いられた。また、これを受け、各地で道路等の公共施設と宅地との一体的な液状化対策が検討された。一体施行とすることにより、スケールメリットが働き、効率的な対策となるはずであったが、液状化対策の民間負担額が割高なために合意形成が図れず、事業を縮小・断念せざるを得なかった地域も多くある¹⁾。

このような状況の中、現在日本では、南海トラフ地震や首都直下地震等の大規模な地震の発生が予測されており、付随して液状化の発生も懸念される。これに対し、液状化ハザードマップのような危険度予測情報を用いて、住民と事業者と行政とで液状化被害リスクを確認・共有し、事前の備えについて共に考えることは非常に有効である。ただ、液状化マップ作成時に用いられる液状化判定計算には物理的意味が踏まえられた経験式が用いられており、簡易かつ有用である一方で、簡易であるがゆえに次のようなことが原因となり、判定に揺らぎが

生じる懸念がある。

まず、判定計算に様々な不確実性要素が含まれていることである。その例として、ここでは、地盤内の土質定数や孔内水位の空間的ばらつき、地下水位の時間的変動性、及び計測誤差の三つを挙げる。

一つ目の地盤内の土質定数の空間的ばらつきについて、東京湾沿岸部に古くからある埋立地には、埋め立てに用いる材料の適用性について配慮がなされずに造成された所もあり、地層が複雑化している。そのため、液状化層を正確に捉えることが難しく、精度良く液状化判定を下すことは困難である。

二つ目の地下水位の時間的変動性について、地下水は、浅い帯水層中にある不圧地下水と、深い帯水層中にある被圧地下水とに分けられる。このうち、不圧地下水は自由地下水面を持ち、降雨や地下水の揚水等により地下水面が自由に変動している。液状化の発生の有無は地下水位の高さと密接に関係するため、判定計算においてそれ自体は考慮されている。一方で、ここで述べたような地下水位の時間的な変動の情報は考慮されていない。

三つ目の計測誤差について、これは地盤構造物設計時等に考慮すべき不確実性の一つとされている、地盤パラメータの計測に含まれる誤差である。液状化判定計算に用いられる土質定数のうち、特にN値は計測の際に人に

+ 原稿採択 2023年6月20日 Accepted

* 中央大学理工学部都市環境学科 〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 Dept. of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Science and Engineering, Chuo Univ., 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo

** 中央大学大学院理工学研究科都市人間環境学専攻(研究当時) 〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27

Civil, Human and Environmental Engineering, Graduate School of Faculty of Science and Engineering, Chuo Univ.(at study), 1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo

よる誤差が出やすいため、計算時に然るべきばらつきを与えて考慮する必要がある。

このような、判定計算に含まれる不確実な要素以外の課題として、液状化危険度が明確には分かりづらいという点もある。液状化判定の判定区分を Table II に示すが、岩崎ら²⁾の研究を参考にすると、閾値が安全側に寄ったざっくりとしたもののように受け取れる。取りこぼしの無いよう安全側に寄せて危険性を周知することは重要なことであるが、一方で、危険性を過度に高く見積もってしまうと、偽陽性率が上がることにより、信用が失われかねない。

Table I Liquefaction Classification.

Range of P_L	Liquefaction hazard level
$P_L = 0$	Fairly low
$0 < P_L \leq 5$	Low
$5 < P_L \leq 15$	High
$15 < P_L$	Extremely high

以上のことを踏まえ、本研究では、250m 四方の地盤を対象に、液状化判定に含まれる様々な条件のばらつきを評価し、それらが判定精度にどの程度の影響を与えるのかを明らかにする。また、液状化の発生リスクについて、レベル超過確率や、地震加速度を用いて考察する。

2 液状化地盤の概要

地盤の液状化とは、飽和化した砂質系地盤が、間隙水圧の上昇・有効応力の減少によってせん断強さを失う現象である。よって、液状化しやすい条件として、砂質土・飽和地盤・非排水条件・負のダイラタンシー・過剰間隙水圧の上昇が挙げられる。このような条件を満たす地盤を持つ微地形としては、埋立地や旧河道、旧池沼等がある。

上記の微地形のうち、国内において特筆すべきなのは、江戸時代から埋め立ての歴史がある東京湾沿岸部である。埋め立て造成の概要は、遠藤³⁾によりまとめられている。これによると、埋め立てには浚渫事業の発生土だけでなく、市民生活に伴う排出ごみや火災・震災時の廃材のような、埋め立て造成に適さない材料を用いられた地域があるとされる。さらに、実際は単一材料による埋立地は少なく、多くは複数材料で埋め立てられた場所であり、地層構造は複雑である。原型地盤がどのようであ

るかに加えて、このような地盤造成の背景もあり、東京湾沿岸部において液状化層を正確に捉えることは非常に難しい。

以上を踏まえ、本研究では、地盤条件が複雑で様々な条件のばらつきが大きいと推察される、東京湾沿岸部を対象地域とする。Fig. 1 は、文献 3) において示された東京湾全域における埋立地の分布と造成期を色分けし、そこに対象とする 250m×250m の区域の位置を記したものである。Table III に示すように、神奈川、千葉及び東京について、埋め立て年代一つにつき対象区域一つの、計 17 ケースを設定した。都県ごと公表されている液状化ハザードマップにおいて、Table I の High に分類されている区域を選定対象とした。

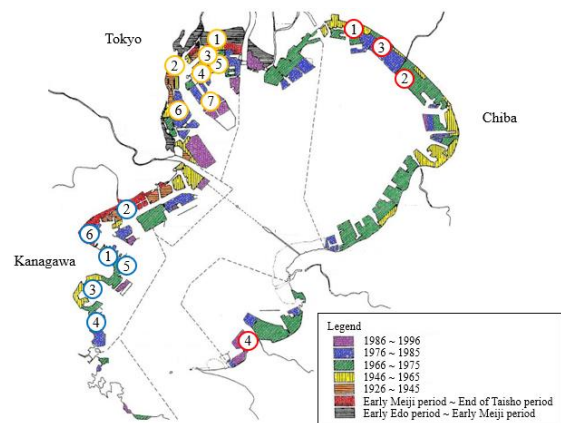


Fig. 1 Location of the subject area.

3 諸条件の不確実性

250m×250m という広範囲で液状化の危険性を議論する場合、N 値や細粒分含有率などの土質定数や地下水位の高さが地点ごとに異なり、それにより区域内でも危険度に違いが生じることが推察される。また、この他にも、地下水位の時間的変動性や測定誤差による不確実性も見込まれる。そこで、本研究では、判定計算に含まれる区域内の様々な条件の不確実性を確率分布により表現し、モンテカルロシミュレーション(以降、MCS と呼称)を行うことで、諸条件のばらつきが判定結果にどのような影響を与えるのかを明確化する。

各不確実性要素の設定を Table III に示す。空間的ばらつきについて、N 値と細粒分含有率の確率分布は中山

Table II Analysis cases.

		Prefecture		
		Kanagawa	Chiba	Tokyo
Landfill period	1986 ~ 1996	CaseK6	CaseC4	CaseT7
	1976 ~ 1985	CaseK5	CaseC3	CaseT6
	1966 ~ 1975	CaseK4	CaseC2	CaseT5
	1946 ~ 1965	CaseK3	CaseC1	CaseT4
	1926 ~ 1945	CaseK2	-	CaseT3
	Early Meiji period ~ End of Taisho period	CaseK1	-	CaseT2
	Early Edo period ~ Early Meiji period	-	-	CaseT1

Table III Settings for each uncertainty factor.

Item	Uncertainty description	Probability distribution
N-value	Spatial variation	Log-normal distribution
	Measurement error	Normal distribution
Unit volume weight of soil	Spatial variation	Normal distribution
Fine fraction content	Spatial variation	Log-normal distribution
Groundwater level	Spatial variation	Normal distribution
	Temporal variability	Normal distribution

ら⁴⁾による研究を、土の単位体積重量の確率分布は信頼性設計法に基づく土木構造物の性能照査ガイドライン⁵⁾を参考にしている。また、土質定数の空間的ばらつきの確率分布パラメータは、深度1mごとに推定する。ただし、西村ら⁶⁾により土質定数間の相関性は無視できないとされている。そのため、MCSの際には、特に相関があるとされるN値と土の単位体積重量との間に、相関係数0.69の相関性を持たせている⁶⁾。なお、対象区域のボーリングデータには層厚、土質区分、N値の情報しか記載されていない。そこで、土の単位体積重量と細粒分含有率については、道路橋示方書⁷⁾に示される土質区分ごとの数値を参考に設定する。地下水位については、確率分布の当てはまりを調べるに足る量の孔内水位データが得られなかったため、今回は正規分布と仮定する。

土質定数の確率分布推定について、区域内のボーリングデータの所在地には偏りがあるため、それらを単純に用いてしまうと、MCSの際に誤った乱数を与えてしまうことになる。そこで本研究では、Fig. 2に例示するように（この例はK6）、1つの区域を9分割し、各ブロックの中心にあたる点におけるデータをクリギングにより推定し、それら計9個から確率分布のパラメータを推定する。なお、クリギングにはPythonのライブラリであるpyKrigingを用いる。

時間的変動性について、地下水位の時系列データの公開情報は限られているため、今回は国土交通省水文水質データベース⁸⁾における、東京の小名木川の地下水位・

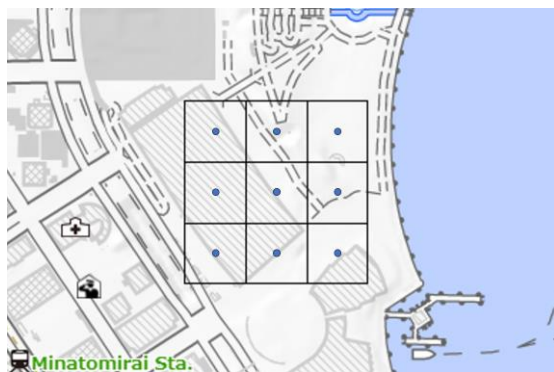


Fig. 2 Method of dividing zones (from GSI Maps).

水質観測所における地下水位の時系列データ（1日ごと、1年分）を用いて、Q-Qプロットにより適合度を調べた。Fig. 3に正規分布の結果を示す。

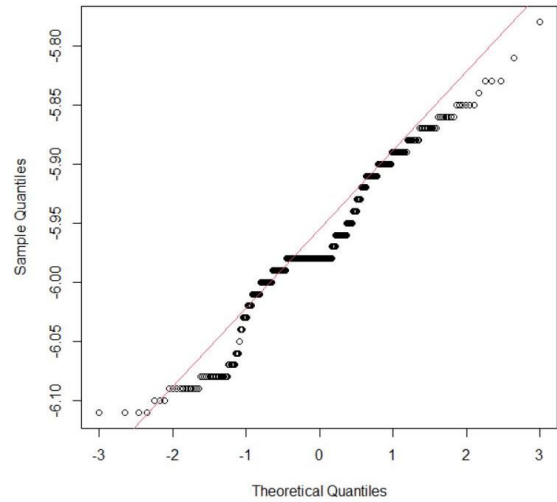


Fig. 3 Normal Q-Q plot (at Onagi River).

この結果から、正規分布への適合性が高いことが示された。また、対象区域とは距離が離れているが、世田谷区の数か所の地下水位データについても、同様に正規分布への適合性が認められた。これらの結果を踏まえ、東京では小名木川のデータから変動係数を算出し、ばらつきの乱数を正規分布で与える。なお、東京以外の地域における地下水位の時間的変動性について、神奈川は横浜市環境創造局⁹⁾により公開されているみなとみらい21地区のものから、千葉は文献8)における今井のものから変動係数を算出し、ばらつきを与えている。

計測誤差について、それがもし独立であると考え、多数の計測結果がありデータ数が多ければ影響が小さくなるとされるが、本研究ではそれほどのデータ数を用いないため、影響は縮小しきれない。そのため、特に大きな計測誤差が見込まれるN値に関しては、文献5)に記載される標準貫入試験の計測誤差の「範囲」のうち、最小の変動係数15として正規分布で乱数を与える。

4 液状化判定計算

4.1 液状化抵抗率 F_L

道路橋示方書¹⁰⁾に記載される液状化判定手法では、地盤深さ $z(m)$ における液状化に対する抵抗率 F_L を算出し、対象の土層が液状化するかどうかを判断する。 F_L は次式のように、液状化の作用に対する抵抗の割合で与えられる。

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

ここで、 L は地震時せん断応力比、 R は動的せん断強度比である。この F_L 値が1.0以下の土層については、液状化するものとみなす。

地震時せん断応力比 L を算出する式は以下である。

$$L = r_d \cdot K_{hgl} \cdot \sigma_v / \sigma'_v \quad (2)$$

ここで、 r_d は地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数で、地盤深さ $z(m)$ に対し、

$$r_d = 1 - 0.015z \quad (3)$$

で算出される。 K_{hgl} は液状化の判定に用いる地盤面の設計水平震度、 σ_v は地表面からの深さ z における全上載圧[kN/m²]、 σ'_v は地表面からの深さ z における有効上載圧[kN/m²]である。なお、設計水平震度 K_{hgl} は、文献5)に記載されるII種地盤・レベル1地震動の設計水平震度の標準値に、地域別補正係数1.0を掛けた、0.15とする。レベル2地震動としなかったのは、レベル2地震動による判定計算では、判定結果が危険度「極めて危険」に含まれる割合が高くなってしまい、判定のばらつきを見るという本研究の目的にそぐわないためである。

動的せん断強度比 R を算出する式は以下である。

$$R = c_w \cdot R_L \quad (4)$$

ここで、 c_w は地震動特性による補正係数であり、レベル1地震動での値は1.0である、 R_L は繰返し三軸強度比であり、

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{(0.85N_a + 2.1)/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (N_a - 14)^{4.5} & (N_a \geq 14) \end{cases} \quad (5)$$

で与えられる。 N_a は粒度の影響を考慮した補正N値である。今回扱うのは、砂質土・粘性土主体の地盤がほとんどであるため、 N_a は次式により算出する。

$$N_a = c_{FC}(N_1 + 2.47) - 2.47 \quad (6)$$

c_{FC} は細粒分含有率によるN値の補正係数、 N_1 は有効上載圧100kN/m²相当に換算したN値であり、これらは次のように算出される。

$$N_1 = 170 \cdot N / (\sigma'_{vb} + 70) \quad (7)$$

$$c_{FC} = \begin{cases} 1 & (0\% \leq FC < 10\%) \\ (FC + 20)/30 & (10\% \leq FC < 40\%) \\ (FC - 16)/12 & (40\% \leq FC) \end{cases} \quad (8)$$

FC は細粒分含有率[%]、 N は標準貫入試験から得られるN値、 σ'_{vb} は標準貫入試験を行ったときの地表面からの深さにおける有効上載圧[kN/m²]である。

4.2 液状化指数 P_L

液状化指数 P_L は、層全体の液状化の激しさを示す指標

であり、式(1)で算出した各深度の F_L 値を深さ方向に重みづけして足し合わせることで算出する。

$$P_L = \int_0^{10} F \cdot (10 - 0.5z) dz \quad (9)$$

ただし、

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

である。なお、式(9)の本来の積分範囲は0~20mであるが、得られた地盤データの関係上、0~10mとしている。また、 F_L を z の連続関数で表すことは事実上不可能なため、式(9)の計算を次の式により近似的に行う。

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

ここで、 F_i は地表面からの深さ $z_i[m]$ における F_L 値で、微小区間 Δz は1mとしている。

4.3 モンテカルロシミュレーション (MCS)

前節までの液状化判定計算に基づいてMCSを10000回行い、 P_L 値を算出した。全対象区域における、算出された P_L の平均値をTable IVに示す。算出結果のヒストグラムについて、ここではCaseK3のものをFig. 4に示す。その結果をTable Iに示した液状化の判定区分ごとに分類すると、Fig. 5に示す結果となった。

これらより、CaseK3では、2章で述べたハザードマップ上でのhigh判定との合致度が約34%と低いことが示された。これはレベルI地震動を想定して P_L の計算を

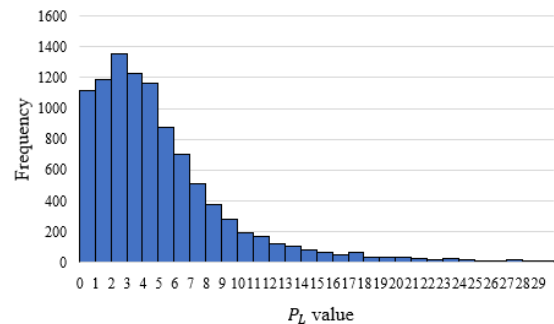


Fig. 4 Histogram of calculated P_L value (CaseK3).

Table IV Average P_L value.

Landfill period		Prefecture		
		Kanagawa	Chiba	Tokyo
	1986 ~ 1996	1.23	5.86	1.25
	1976 ~ 1985	2.47	2.81	1.65
	1966 ~ 1975	1.90	5.38	0.247
	1946 ~ 1965	5.40	0.323	0.993
	1926 ~ 1945	1.99	-	2.85
	Early Meiji period ~ End of Taisho period	1.54	-	7.31
	Early Edo period ~ Early Meiji period	-	-	4.39

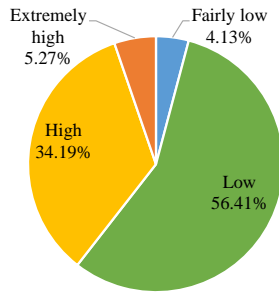


Fig. 5 Percentage of liquefaction hazard (CaseK3).

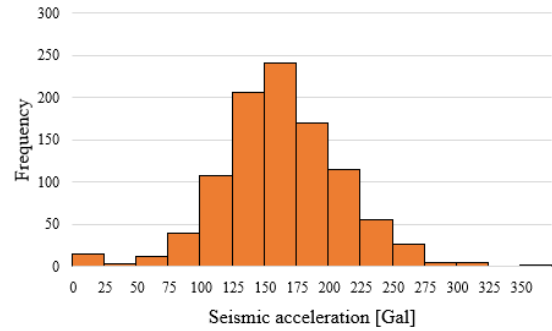


Fig. 6 Histogram of seismic acceleration at the limit of liquefaction (CaseK3).

行っていることを踏まえれば、奇異な結果とはいえないのだが、全区域の結果を総合すると、TableIVで平均値が概ね 5.0 を上回る地区で、Fig.4 と同様にヒストグラムの形が右側に裾が伸びたものになり、レベル I 地震動でも High 以上の結果となる割合が増えてくることがわかった。逆にこの平均値が 2.0 以下では分布は左寄りに集中し、High 以上の判定となることはほとんどなかった。紙幅の関係でこれらの結果の全体をお示しすることが出来ないが、JCROSSAR2023 当日に結果をお示ししたい。

今回の結果からは、埋め立て年代によるばらつきの特徴や傾向は、特に確認されなかった。しかし、都県内で結果を比較してみると、液状化ハザードマップにおいて概ね同じような液状化危険度の区域を選択したにもかかわらず、表に示したように P_L の平均値に大きな差が生じた。このことから、250m 四方の区域ごとに液状化危険度を出す場合、単一の危険度判定結果のみを当てにすることの危うさが示唆される。

5 液状化が発生する限界の地震加速度

前章で Fig.5 に示した液状化の判定結果は、あくまでも Table I の判定区分に従って分類したものである。しかし、この判定区分は、緒言にも述べた通り、閾値をやや安全側に寄せたざっくりとした基準のように受け取れる。また、TableIVに示した平均値は、レベル I 地震動を想定して算出したものなので、このハザードマップとの一致性が悪いとしても、直ちにそれを問題視することも出来ない。本研究では、様々なばらつきの影響をみていくことを目的としており、次章では実際に液状化が起きる限界の地盤加速度の不確実性を考慮に入れた考察を行うが、まずは一般的に液状化が起こり始める限界とされる $P_L = 5$ を基準として、地盤定数のばらつきに対してこれを僅かに上回るような地震加速度がどの程度の値になるかを、1000 回の MCS により求めてみた。

Fig.6 に示すのは、そのうちの CaseK3 の結果である。

グラフから、CaseK3 について、液状化の危険性が生じる地震加速度が 75~250Gal 程度であることが示された。この区域は、 P_L 値による液状化判定では液状化危険度が「低い」の割合が高かったものの、やや強めの地震が起ると液状化が生じる危険性があることが示唆された。

他の区域の結果について、CaseK3 と比べて液状化危険度が低い地域であっても 150Gal 程度で液状化の危険性が急激に高まることが示されている。

6 Cornell の信頼性指標と等価なレベル超過確率

それでは、 $P_L=5$ は、液状化の発生限界としてどのように位置づけたらよいであろうか。決定論的に安全と危険を二分するものでないことは明らかである。この議論を深めるためには、多くの実験データの蓄積が必要であり、今後の研究の発展を待つしかない。

ここでは、信頼性設計法に用いられている、 $R-S$ モデルの準用を考えることとする。すなわちある地震加速度のもとで地盤に発生する P_L を作用効果 S とし、液状化が発生する限界の P_L を耐力 R と考えるのである。式 (1) の定義にもあるように、 F_L には動的せん断強度比が含まれ、 R の要素があるのであるが、地盤加速度の影響を反映する量として、割り切って S と位置付ける。こう考えれば Fig.4 は S の (条件付き) 確率分布となる。他方、この P_L がどの値になったら液状化するか、を R と考える。述べてきたように、 R の確率分布については、現状利用可能なモデルはないが、しかしそれでも、目安とされる $P_L=5$ という条件を、「決定論的な二分値」ではなく「安全確保のために余裕をもって (小さめに) 設定された設計値と理解する役には立つだろう。

確率分布に対して十分なデータが得られない場合には、最も基本的な 2 次モーメント法信頼性理論に立ち戻って考えることが有益である。Cornell の信頼性指標 β は、 R, S を独立な正規分布と仮定して、限界状態超過確率 P_f を次式により与える。

$$P_f = \text{Prob.} [R \leq S] = \Phi(-\beta) \quad (11)$$

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (12)$$

ここで、 $\mu_R, \mu_S, \sigma_R, \sigma_S$ はそれぞれ R, S の平均値、標準偏差であり、式中の $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ は標準正規分布の累積分布関数、 β は信頼性指標である。

独立な正規分布仮定を維持したまま、Fig.7 のように

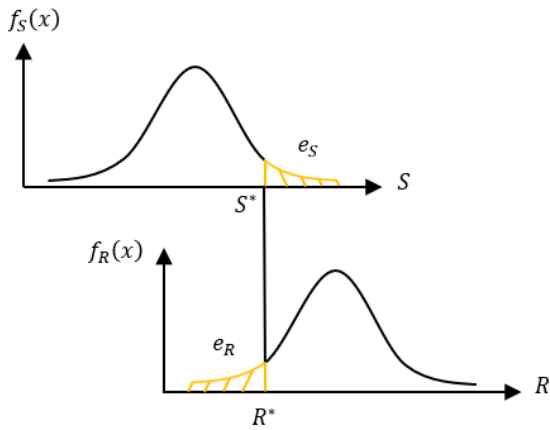


Fig. 7 Conceptual diagram of reliability theory.

R, S の設計値 R^*, S^* が、それぞれ小さい非超過・超過確率 e_R, e_S に対してとられていて、設計条件 (安全性判定条件) が $S^* \leq R^*$ ととられているならば、 $S^* = R^*$ に対する限界状態超過確率 P_f は、

$$P_f = \Phi \left[\frac{\Phi^{-1}(e_R)\sigma_R + \Phi^{-1}(e_S)\sigma_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \right] \quad (13)$$

と表わされることが容易に導かれる¹¹⁾。

本研究でいう $P_L=5$ が、この $S^* = R^*$ に対応すると考える。式中のパラメータのうち、 σ_S, e_S は推定可能となったわけである。4.3 節で得られた e_S の値を Table V にまとめた。しかしながら、 σ_R, e_R には現在のところ情報がほとんどない。

それでも、今後こうした情報の獲得が進んでいく状況に向けて、式(13)が示唆する限界状態超過確率の傾向をまとめてみることにしたい。

設計値 $R^* = 5$ よりも低い値で液状化してしまう可能性を示す e_R については、文献2)に示される P_L 値の大きさと実際に液状化した事例との関係を参考に、 $e_R = 0.05, 0.1, 0.15$ の3つの値を仮定して考えることとする。

σ_R については、式(13)を (14) に変形し、 σ_R/σ_S という形でパラメトリックに変化させて考える。このようにして限界状態超過確率 P_f を算出することで、各 e_R について、 S および R のばらつき的大小と P_f との対応関係を見ることができる。

$$P_f = \Phi \left[\frac{\Phi^{-1}(e_R)\sigma_R/\sigma_S + \Phi^{-1}(e_S)}{\sqrt{(\sigma_R/\sigma_S)^2 + 1}} \right] \quad (14)$$

以上の理論により算出された P_f の挙動は、 e_S と e_R との大小関係で3つのタイプに分類できる。

(1) e_S が e_R に比べて小さい場合

e_S が e_R に比べて小さい場合の一例として、Case T5 の結果を Fig. 8 に示す。 σ_R/σ_S が 0 の場合の P_f は e_S に一致し、 σ_R/σ_S の増加に伴い、 P_f は単調に増加している。この挙動から、耐力 R のばらつきを過度に小さく見積もってしまった場合には、本来算出されるべき P_f を過小評価してしまうこととなる。

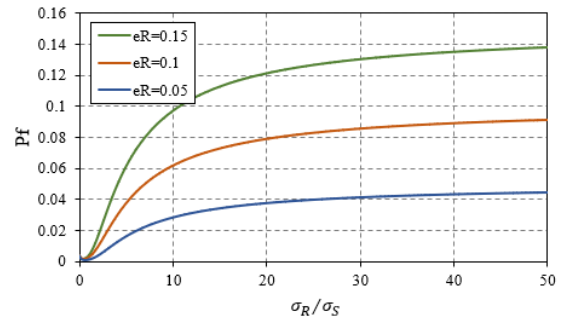


Fig. 8 Level exceedance probability (Case T5).

(2) e_S が e_R と同程度の場合

e_S が e_R と同程度である場合の一例として、Case K4 の結果を Fig. 9 に示す。 σ_R/σ_S が 0 の場合に P_f が e_S に一致するのは Case T5 と同様だが、Case K4 では、 σ_R/σ_S の増加に伴い、 P_f が一度減少してから増加するという挙動が見られる。実際に算出される P_f は、 e_R/e_S が極めて小さいある

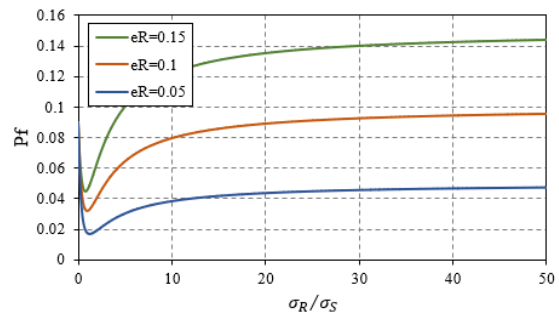


Fig. 9 Level exceedance probability (Case K4).

Table V Calculation results of e_S .

		Prefecture		
		Kanagawa	Chiba	Tokyo
Landfill period	1986 ~ 1996	0.0644	0.428	0.0135
	1976 ~ 1985	0.132	0.179	0.0899
	1966 ~ 1975	0.0899	0.398	0.00370
	1946 ~ 1965	0.395	0.00730	0.0331
	1926 ~ 1945	0.119	-	0.161
	Early Meiji period ~ End of Taisho period	0.0894	-	0.496
	Early Edo period ~ Early Meiji period	-	-	0.329

いは極めて大きいという極端な場合におけるものではなく、それ以外の中間におけるものであると推察される。そのため、 e_S と e_R の値が近い場合には、このような P_f の挙動に起因する、 P_f の過小評価の危険性に留意する必要がある。

(3) e_S が e_R に比べて大きい場合

e_S が e_R に比べて大きい場合の一例として、CaseT2の結果をFig. 10に示す。このケースにおいても、他の2ケースと同様、 σ_R/σ_S が0の場合には P_f が e_S に一致するが、 σ_R/σ_S の増加に伴い、 P_f は単調に減少している。この挙動はCaseT5と全く逆であり、耐力 R のばらつきを過度に大きく見積もってしまった場合、本来算出されるべき P_f を過小評価してしまうこととなる。

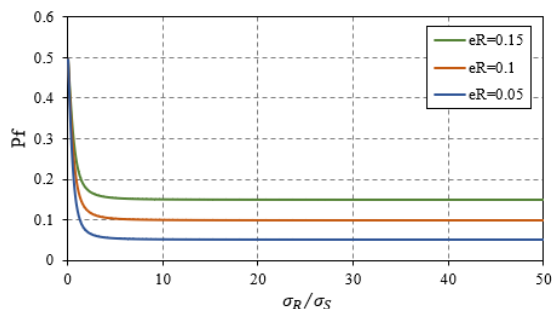


Fig. 10 Level exceedance probability (CaseT2).

これらの図において、 σ_R/σ_S が小さい場合においては、 P_f が e_S に大きな影響を受け、大きい場合には e_R に大きな影響を受けることは式のうえからも明らかである。4.3節で述べたように、TableIVの S の平均値が大きい場合には、 σ_S も e_S も大きくなるわけであり、この評価をしておくことが重要となる。今回はレベルI地震動を想定して S の分布をシミュレーションしたわけであるが、さらに大きい地震動を前提にすると、これらの影響がさらに強まることが予想される。逆に S がほとんどばらつきを見せないケースもあるのであるが、 R のばらつき(小さい P_L で液状化が起きる可能性)の影響は消えることはないので、 R の分布についての研究が進展することが期待される。

一方で、 P_f を過大評価してしまうと、偽陽性率が上がり、過剰な危険周知となり液状化判定の信用低下に繋がる恐れもある。よって、いかにして液状化の作用効果 S 、耐力 R の情報を正確に把握するかが重要である。

7 結 言

以下に、本研究で得られた主な成果を示す。

- (1) 250m四方を対象とした値による液状化判定では、危険度が一つに定まるとはいえず、ある程度の誤差を念頭に置くべきであることが示された。また、概して、 P_L の平均値が大きい区域ほどばらつきが大きく、判定の確信度合いが低いことが示された。
- (2) 液状化の危険性が生じる限界の地震加速度の算出結果から、東京湾沿岸部の埋立地では、液状化危険度が低い地盤であっても、強めの地震により

区域内で液状化が生じる危険性があることが示された。

- (3) Cornellの信頼性指標と等価性のあるレベル超過確率の計算では、液状化の作用効果 S の平均値やばらつきの影響が大きい。耐力 R については十分な情報がないが、設計値としてある程度小さい非超過確率のものとしておけば、ばらつきの影響は吸収した形で限界状態超過確率をコントロールできる可能性はある。

今後は、まず研究の詳細部分の改良に努める。今回は、液状化抵抗率 F_L を算出する際の補正 N 値を、地盤が砂質土・粘性土であるという仮定に基づいて算出しているが、厳密に言えば部分的に礫質土も存在する。さらに、この算出において、平均粒径のばらつきを考慮していない。他の不確実性要素についても、データ量が少ないことや、推定値を用いていること、空間的ばらつきと時間的変動性や計測誤差とを分離して仮定していること等、シミュレーションの不確かさを増大する要因を抱えている。各条件が当てはまる確率分布についてもさらなる検討が必要である。以上のような細かい部分の修正・改良を重ねたうえで、実際の液状化事例と照らし合わせて妥当性を検証する必要がある。

次に、地震力の与え方を工夫する。本研究では地震動をレベル1地震動に固定してMCSを行ったが、地震動の発生状況を確率分布によりモデル化して乱数を与えることで、より確率論的な議論を行うことが出来る。また、地震動の継続時間を考慮することも重要である。これは、東北地方太平洋沖地震において、さほどの震度ではなかったにもかかわらず、地震動継続時間が長かったがために液状化した地点があるとされるからである。地震動を単に設計水平震度として与えるのではなく、継続時間等の特性を加味することで、より実情に近づけたい。

液状化確率の議論にあたっては、耐力 R の確率分布を定める必要がある。今回はデータ不足から R を仮定して与えざるを得なかったが、 P_L 値と実際の被害の有無との対応関係を調べることで、その解消を図りたい。

謝辞

本研究では、千葉県環境生活部水質保全課より貴重なデータを使用させていただきました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 毎日新聞：液状化対策 千葉・茨城の10市進まず断念・縮小に、毎日新聞Webサイト、
<<https://mainichi.jp/articles/20160308/k00/00m/040/136000c>>,
(2023-03-12閲覧)。
- 2) 岩崎敏男, 龍岡文夫, 常田賢一, 安田進: 地震時地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, 28, 4, pp.23-29, 1980.
- 3) 遠藤毅: 東京湾臨海域における埋立地造成の歴史,

- 地学雑誌133(6), pp.785-801, 2004.
- 4) 中山隆弘, 有清睦, 東輝, 巳造良裕: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, 土木学会中国支部研究発表会, 2011.
 - 5) 土木学会:信頼性設計法に基づく土木構造物の性能照査ガイドライン, 2018.
 - 6) 西村伸一, 藤井弘章, 島田清, 清水英良, 西川克彦:土質定数の変動性および地震の統計的性質を考慮した干拓堤防の液状化確率, 土木学会第50回年次学術講演会, pp.590-591, 1995.
 - 7) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 1990.
 - 8) 国土交通省:水文水質データベース, 国土交通省Webサイト, <<http://www1.river.go.jp/>>, (2023-02-25閲覧) .
 - 9) 横浜市環境創造局:地下水位・地盤収縮量の観測結果, 横浜市Webサイト, <<https://www.city.yokohama.lg.jp/kurashi/machizukuri-kankyo/kankyohozen/kansoku/science/data/chikasui-jiban.html>>, (2023-02-25閲覧) .
 - 10) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp.161-169, 2017.
 - 11) 佐藤尚次:超過確率に基づく信頼性設計の基礎理論と鋼構造物の限界状態設計への適用に関する研究, 東京大学学位論文, 1984.

補遺

本研究のデータ収集元を補足して示します.

- 横浜市行政地図情報提供システム 地盤 View (ボーリングデータ)
- ちば情報マップ 地質柱状図 (ボーリングデータ)
- 東京都建設局 東京の地盤 (GIS 版) (ボーリングデータ)
- 横浜市環境創造局政策調整部 環境科学研究所(地下水位時系列データ)
- 国土交通省 水文水質データベース(地下水位時系列データ; 千葉, 今井/東京, 小名木川)