

リアルタイム地震防災システムにおける 液状化危険度分布の即時推定法の提案

石田 栄介¹・末富 岩雄²・安田 進³・細川 直行⁴

¹日本技術開発株式会社 リサーチエンジニアリング事業部 耐震・保全グループ
(〒460-0008 名古屋市中区栄3-10-22)

E-mail: isidae@jecc.co.jp

²日本技術開発株式会社 リサーチエンジニアリング事業部 耐震・保全グループ
(〒164- 8601 東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: suetomi-i@jecc.co.jp

³東京電機大学理工学部建設環境工学科教授 (〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂)

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

⁴東京ガス株式会社 防災・供給部 防災・供給グループ (〒105-8527 東京都港区海岸1-5-20)

E-mail: naoyuki@tokyo-gas.co.jp

本論では、地震観測情報から補間推定された面的な地震動分布を利用し、地震時、即座に液状化危険度分布を推定する手法を開発する。液状化危険度指標は、地震被害想定等に用いられる P_L 値とする。 P_L 値は、土質情報から深さ毎に液状化判定を行った結果(F_L 値)を深さ20mまで総合評価した地点指標である。本論では、地盤データベースを活用し、地盤調査地点毎の P_L 値を計算し、補間により面的な P_L 値分布を作成する。この時、 P_L 値計算及び空間補間は、計算時間を要する上、計算結果の妥当性確認が必要な処理である。そこで、地盤データベースに基づき事前に計算できる部分を液状化テーブルとして整備し、地震時には、地震動情報を用いて液状化テーブルから適切な数値を検索すれば良い仕組みとしている。

Key Words : *liquefaction, zoning, GIS, SUPREME, P_L value, city gas, real-time damage estimation*

1. はじめに

東京ガスの地震防災システム「SUPREME」¹⁾では、迅速な緊急対応を目的とし、供給エリア内約4,000箇所の新SIセンサーによる地震動モニタリングを行うとともに、地震時には即座に地震動分布、液状化分布を推定し、導管網の被害推定を行う。導管網の被害推定は、50m四方の計算ユニット毎に、地震動の大きさ(SI値)、管種、微地形、液状化といった要因情報から経験式を用いて被害率(件/km)を計算し、導管延長(km)を乗じることにより、被害箇所数(件)を算出している。ここで、液状化の要因情報については、地震観測情報から簡易推定式により観測地点毎の液状化層厚(m)を推定し、50mメッシュに補間した結果を被害率計算に用いている。

一方、設計における地盤の液状化検討では、一般的に、道路橋示方書²⁾に代表される「 F_L 法」が用いられることが多い。また、最近の国や地方自治体等における地震被害想定では、液状化危険度分布の指標として「 P_L 値」³⁾の採用が一般的になってきてい

る。 P_L 値は、深さ毎に F_L 法で液状化判定した結果(F_L 値)を深さ20mまで総合評価した地点指標であり、単に液状化層厚を指標とする場合と比べて、液状化の程度や液状化層の深さの影響が加味されている分、埋設管被害との相関が高いことが期待される。

本論では、地震防災検討手法における周辺動向との整合性に配慮しつつ、SUPREMEにおける導管網被害推定の精度向上を目指し、設計検討で一般的な F_L 法をベースとして、 P_L 値を指標とする液状化分布を推定する手法を開発する。地盤データベースを用いて地盤調査地点の P_L 値を算出し、補間により面的な液状化分布を作成する。ただし、東京ガスの保有する首都圏の地盤データは7万件を超えるため、 F_L 値、 P_L 値の計算及び空間補間を地震発生後に行っていたのでは、即時性が損なわれる。そこで、地盤データを用いて事前に計算できる部分と、地震観測情報を収集した後に計算する部分との分離を行う⁴⁾。事前計算できる部分については、「液状化テーブル」として地震前に整備しておき、地震発生時には、地震動分布推定直後、即座に各計算ユニットの P_L 値

を算出できる枠組みを開発する。文献4)では、地震動タイプ毎に液状化テーブルを作成しており、地震動タイプは別途判断を要するが、本論では、地震観測情報に基づき、地震動タイプの判定も自動化している。

2. F_L 法, P_L 法の概略

まず, F_L 値, P_L 値の算出方法について整理を行う。液状化指数(P_L 値)は下式で算出される³⁾。

$$P_L = \int_0^{20} (1 - F_L)(10 - 0.5x)dx \quad (1)$$

ここで, x は表層からの深さ(m), F_L は液状化に対する抵抗率(F_L 値)である。ただし, $F_L > 1$ の場合は, $(1 - F_L)$ は0とする。 P_L 値と液状化の発生程度の関係については, 表-1が目安とされている。

F_L は下式によって深さ毎に算出される²⁾。

$$F_L = \frac{R}{L} \dots \begin{cases} F_L \leq 1.0: \text{液状化すると判定} \\ F_L > 1.0: \text{液状化しないと判定} \end{cases} \quad (2)$$

ここで, R は地盤が有する動的せん断強度比, L は地震時せん断応力比である。 R は地盤の繰返し三軸強度比 R_L を用いて以下の補正式により得られる。

$$R = c_W R_L \quad (3)$$

ここで, c_W は地震動特性による補正係数である。道路橋示方書²⁾では, 以下のようにプレート境界型の大地震とその他で分けている。

$$\begin{aligned} &\langle \text{タイプ I (プレート境界型)の地震動の場合} \rangle \\ &c_W = 1.0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} &\langle \text{タイプ II (内陸直下型)の地震動の場合} \rangle \\ &c_W = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

これに対し, 以下は安田⁵⁾に基づく地震動特性の補正係数の整理である。液状化強度比 R_L の算定には, 岩崎・龍岡⁶⁾が2つの地盤モデル, 6種の入力波を用いて地震応答解析を行い求めた実験式が使われるが, 正弦波荷重のもとでの室内液状化試験より得られた値であるため, 実地盤の不規則な地震波荷重のもとでの液状化強度比 R_{max} を求めるためには, 本来は補正が必要である。それが, 式(6)であるが, 結局, $C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \div 1$ となり, $R_{max} \div R_L$ と見なせる(岩崎・龍岡⁶⁾)。これが, 道路橋示方書²⁾におけるタイプ I 地震動の $c_W=1.0$ に相当する。

表-1 液状化危険度判定基準

区分	液状化危険度と対応の概要
$P_L=0$	液状化危険度はかなり低い。液状化に関する詳細な調査は一般に不要。
$0 < P_L \leq 5$	液状化危険度は低い。特に重要な構造物の設計に際しては, より詳細な調査が必要。
$5 < P_L \leq 15$	液状化の危険度が高い。重要な構造物に対して, より詳細な調査が必要。液状化対策が一般に必要。
$15 < P_L$	液状化危険度が極めて高い。液状化に対する詳細な調査と液状化対策は不可避。

$$R_{max} = C_1 \times C_2 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times R_L \quad (6)$$

- C_1 : 繰返し三軸試験と原位置とでの拘束圧の相違に関する補正係数
- C_2 : 地震波荷重波形の不規則性に関する補正係数。1/0.55~1/0.7の平均値をとると1.62
- C_3 : サンプリングから試験までの過程中的擾乱に関する補正係数
- C_4 : 同過程中の密度化に関する補正係数
 C_3 は強度低下, C_4 は強度増加であるので, $C_3 \times C_4 \div 1$ と考える。
- C_5 : 地震動の水平面での二次元性に関する補正係数。Seedら⁷⁾の考えにしたがって0.9程度

なお, 式(2)の L を評価するための地震動指標として, 本論では, 最大加速度でなく SI 値を採用し, 次式を用いる⁸⁾。

$$L = 0.01 \frac{SI}{(\sigma_v')^{0.1}} \quad (7)$$

ここで, σ_v' は有効上載圧(kgf/cm²), SI は SI 値(kine)である。これは, F_L 法が提案され, 設計法に導入された頃に比べて, 近年は震源近傍での大加速度が多く得られるようになり, 観測される最大加速度をそのまま用いると液状化危険度を過大評価する傾向にあることを改善したものである。すなわち, 地盤に生じるせん断応力には, 周期と繰返し回数が大きく影響するので, 最大加速度で表すのは適切でないとの判断から上式を採用した。

3. 液状化に影響する継続時間

事前対策の検討では, 対象地震がプレート境界型か, 内陸直下型かに応じて, 地震動特性による補正係数 c_W を用いれば良い。しかし, 地震発生直後に地震動タイプの正しい判定を確実に行うことは簡単ではない。そもそも, 液状化に影響を及ぼすと考えられている直接的な要因は地震の規模や継続時間(繰返し回数)であり, プレート境界型地震の方が一般的に地震規模が大きく, かつ遠方で起きるので継続時間も長いという概念から, 大きく2区分する上での便宜上, 地震動タイプを用いているに過ぎないと

考えられる。

本論では、より直接的な要因を用いた補正係数として「液状化に影響する継続時間」をパラメータとした検討を行うこととする。本章では、「液状化に影響する継続時間」の考え方と算出方法について述べる。

近年は、地震観測データが蓄積され、模擬地震波の作成用に高度な経時特性を表す関数がモデル化されている。近年の経時特性の式として、大崎式⁹⁾、耐専式⁹⁾、佐藤らの式¹⁰⁾等があるが、いずれも、形状は Jennings et al.¹¹⁾に基づいており、図-1に包絡形を示すように、立上がり部、強震部、減衰部の3区間に分けてモデル化されている。元々は、久田・安藤¹²⁾の次式が全継続時間として採用されることが多く、これがベースとなっている。

$$T_d = 10^{0.31M_j - 0.774} \quad (8)$$

ここで、 M_j は気象庁マグニチュードである。

本論では、経時特性の式として式(9)～式(14)に示す耐専式⁹⁾を用い、液状化に影響する継続時間 T_D として、強震部開始点から減衰部の包絡振幅が1/2になるところまで(式(15))と考えることにする。液状化に影響する継続時間 T_D のイメージを図-1に赤線で示す。

<包絡関数>

立上がり部: $0 \leq t < t_B$

$$E(t) = \left(\frac{t}{t_B} \right)^2 \quad (9)$$

強震部: $t_B \leq t \leq t_C$

$$E(t) = 1 \quad (10)$$

減衰部: $t_C \leq t \leq t_D$

$$E(t) = e^{a(t-t_C)} \quad a = \frac{\ln 0.1}{(t_D - t_C)} \quad (11)$$

<各部の継続時間>

立上がり部: $0 \leq t < t_B$

$$t_B = 10^{0.5M_j - 2.93} \quad (12)$$

強震部: $t_B \leq t \leq t_C$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M_j - 1.0} \quad (13)$$

減衰部: $t_C \leq t \leq t_D$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M_j + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} \quad (14)$$

<液状化に影響する継続時間 T_D >

$$\begin{aligned} T_D &= (t_C - t_B) + (t_D - t_C)(\log_{10} 2) \\ &= 10^{0.3M_j - 1.0} + 10^{0.17M_j + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} (\log_{10} 2) \end{aligned} \quad (15)$$

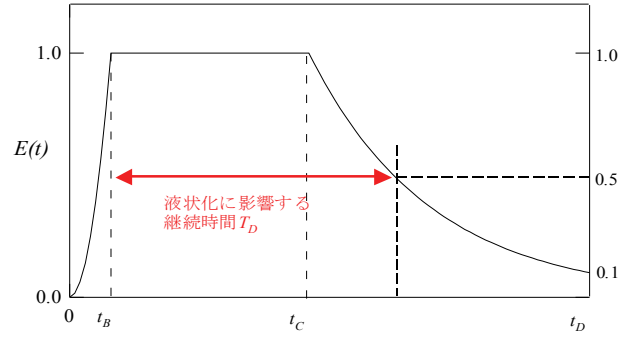


図-1 液状化に影響する継続時間 T_D

4. 地震波の不規則性と砂の締まり具合の配慮

式(6)に示した補正係数 $C_1 \sim C_5$ のうち、地震波の不規則性を配慮した補正係数は C_2 である。式(6)における C_2 の記述には、 $1/0.55 \sim 1/0.7$ の平均値をとるとあるが、これは、石原ら¹³⁾において、ゆるい砂について繰返し回数 $N_L = 20$ 回の規則波に対する不規則波の振幅換算係数を衝撃型の場合0.55、振動型の場合0.70と求めていることに由来する。

ここで、「振幅換算係数」は、繰返し回数の違いにより地盤の液状化強度が異なることから、液状化強度の比率の逆数を外力振幅に与える発想であり、これを不規則波に対しても適用している。例えば、振幅 A_{max} の衝撃型不規則波で液状化する地盤は、振幅 $0.55 \times A_{max}$ の繰返し回数 $N_L = 20$ 回の規則波で液状化する地盤と同じ強度であることを表している。

一方、密な砂については國生ら¹⁴⁾の研究があり、不規則波に関する実験結果から上記と同様の振幅換算係数を計算した結果、集中型波形で0.37、分散型波形で0.48となっている。

各々用いている波形が異なるため厳密には一致しないが、ここでは、國生ら¹⁴⁾の集中型波形を石原ら¹³⁾の衝撃型と同等と見なし、國生ら¹⁴⁾の分散型波形を石原ら¹³⁾の振動型と同等と見なし、図-2のように考えることとした。縦軸は振幅換算係数の対数として示す。

さらに、集中型波形(衝撃型)としてマグニチュード $M_j = 7.0$ 、震源距離 $X_{eq} = 10\text{Km}$ を想定し、分散型波

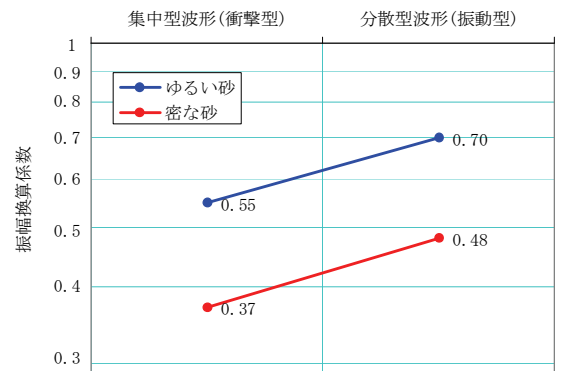


図-2 不規則波から繰返し回数 $N_L = 20$ 回の規則波への振幅換算係数

形(振動型)としてマグニチュード $M_j=8.0$ 、震源距離 $X_{eq}=100\text{Km}$ を想定して、振幅換算係数の補間式を作成することとした。各想定 M_j 、 X_{eq} について、式(15)により「液状化に影響する継続時間」 T_D を計算し、振幅換算係数との対応関係をまとめると表-2になる。

表-2 継続時間 T_D と振幅換算係数の対応

	振幅換算係数		地震諸元の想定		T_D (秒)
	ゆるい砂 ⁽¹³⁾	密な砂 ⁽¹⁴⁾	M_j	X_{eq} (km)	
集中型波形 (衝撃型)	0.55	0.37	7.0	10	16.65
分散型波形 (振動型)	0.70	0.48	8.0	100	45.95

まず、ゆるい砂に関する振幅換算係数を B_T とおき、衝撃型($T_D=16.65$)の時 $B_T=0.55$ 、振動型($T_D=45.95$)の時 $B_T=0.70$ であることから下式を得た。

$$B_T = 0.134 + 0.340 \times \log_{10} T_D \quad (16)$$

次に、各々の地震波タイプについて、ゆるい砂と密な砂の振幅換算係数の比を見てみると、衝撃型では $0.673(=0.37/0.55)$ 、振動型では $0.686(=0.48/0.70)$ であり、どちらもほぼ同じ比率になっている。そこで、地震波タイプに関わらず、密な砂はゆるい砂の 0.673 倍になると考え、地盤の締めまり具合を反映した係数:振幅換算係数倍率 B_R を導入する。國生ら¹⁴⁾において、相対密度 D_r と R_L の関係が図-3のように示されている。図は論文からの転載であり、図内の紫色数値は、論文の画像から読み取った数値である。同論文内で、ゆるい砂は相対密度 $D_r=40\sim69\%$ (平均 55%)、締めまった砂は相対密度 $D_r=90\sim110\%$ (平均

100%)の試料を用いていることから、対応する R_L は、ゆるい砂で $R_L \approx 0.2$ 、締めまった砂で $R_L \approx 0.45$ となる。そこで、 B_R を R_L の関数として組み立て、ゆるい砂($R_L=0.2$)の時 $B_R=1.0$ 倍、締めまった砂($R_L=0.45$)の時 $B_R=0.673$ 倍となる下式を採用することとした。

$$\log_{10} B_R = \frac{R_L - 0.20}{0.45 - 0.20} \times \log_{10} 0.673 \quad (17)$$

以上より、式(16)の B_T に式(17)の B_R を乗じるにより、地震の規模 M_j と震源距離 X_{eq} を反映した継続時間 T_D 、及び、砂の締めまり具合 R_L を考慮した振幅換算係数を算出することが可能となった。振幅換算係数は補正係数 C_2 の逆数に当たり、下記の関係式となる。

$$\frac{1}{C_2} = B_T \times B_R \quad (18)$$

5. 即時推定のための事前整備と地震時計算

(1) 事前計算(液状化テーブル整備)

ボーリング地点毎に F_L 値計算を行う際、式(6)の係数 $C_1 \sim C_5$ に立ち戻り、係数 C_2 に式(18)を採用した下式の $R_{\max}$ を用いる。

$$R_{\max} = \frac{C_1 \times C_3 \times C_4 \times C_5 \times R_L}{B_T \times B_R} \quad (19)$$

上式について、式(6)で示している各係数値 $C_1=2/3$ 、 $C_3 \times C_4=1.0$ 、 $C_5=0.9$ を与えた上で、式(2)の R に上式の $R_{\max}$ を代入し、 L に式(7)を代入すると、式(2)は下式となる。

$$F_L = \frac{R_{\max}}{L} = \frac{0.6 \times R_L}{B_T \times B_R} \times \frac{(\sigma_v')^{0.1}}{0.01 \times SI} \quad (20)$$

ここで、液状化テーブル整備用の地震規模 $M_{j,tbl}$ と震源距離 $X_{eq,tbl}$ を導入し、下記のように定める。

$$M_{j,tbl} = 7.0 \quad (21)$$

$$X_{eq,tbl} = 50(\text{km}) \quad (22)$$

これに対応する継続時間 $T_{D,tbl}$ を式(15)により求めると $T_{D,tbl}=22.27$ 秒となる。さらに、式(16)に代入すると、液状化テーブル整備用の継続時間による振幅変換係数 $B_{T,tbl}$ は、 $B_{T,tbl}=0.593$ となる。

$B_{T,tbl}$ を用いて、式(20)を事前整備のための式(23)と地震時計算用の式(24)に分離する。

$$F_L = \frac{0.6 \times R_L}{B_{T,tbl} \times B_R} \times \frac{(\sigma_v')^{0.1}}{0.01 \times SI'} \quad (23)$$

$$SI' = \frac{B_T}{B_{T,tbl}} SI \quad (24)$$

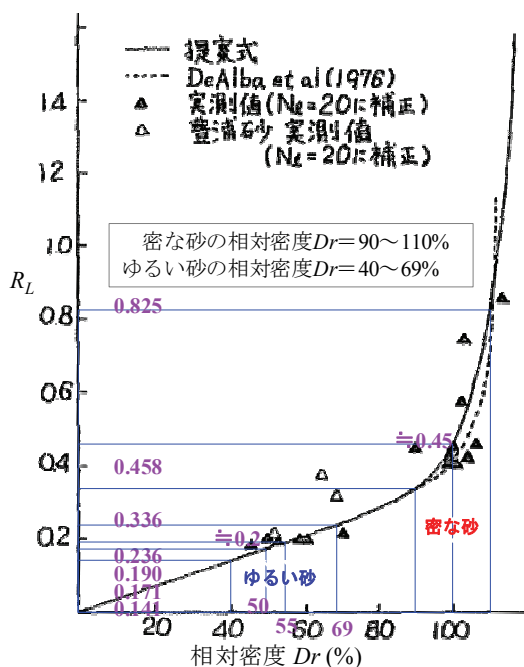


図-3 文献14)における相対密度 D_r と R_L の関係

ここで、 SI' は、液状化テーブル整備用の地震動と実際の地震動の振幅変換係数比を用いて SI 値の振幅を調整した値と意味付けられる。地盤データ存在地点では、 R_L 、 B_R 、 σ_v' を計算でき、 $B_{T,tbl}$ は定数であるため、式(23)において SI' 以外の値は地震前に算出可能である。そこで、 SI' を徐々に変化させて各々の SI' の時の F_L を計算し、さらに式(1)により地盤データ存在地点の P_L を計算し、これを補間することにより、任意の SI' の時の P_L 値分布を作成する。これが「 P_L 値テーブル」となる。図-4は、 P_L 値テーブルから数地点を抽出し、地点毎の SI' に対する P_L 値の変化をプロットした例である。図-4の凡例は、東京ガスの50mメッシュコードである。 P_L を計算する代わりに、単に $F_L \leq 1.0$ となる層の厚さを合計すれば液状化層厚(m)となるので、「液状化層厚テーブル」の作成も可能である。図-5には、液状化層厚テーブルの例を示している。

SI' を一定値とした場合の P_L 値テーブルの表示例を図-6に示す。同様に、液状化層厚テーブルの表示例を図-7に示す。なお、本論では、 F_L 値判定として、東京低地における沖積砂質土の特性を考慮した判定式¹⁵⁾を用いている。

(2) 地震時の計算

地震時に震源情報として、マグニチュード M_j 及び震源位置(緯度、経度、深さ)の情報を取得し、震源位置と計算対象地点から震源距離 X_{eq} を計算する。 X_{eq} と M_j から式(15)により液状化に影響する継続時間 T_D を計算する。さらに、式(16)から継続時間による振幅変換係数 B_T を計算する。計算対象地点の B_T と SI 値から、式(24)を用いて SI' を算出し、 P_L 値テーブルから各地点 SI' に対応する P_L 値を算定する。 P_L 値テーブルを用いて SI' から P_L 値を算定するイメージを図-4に赤線矢印で示す。 P_L 値テーブルの代わりに液状化層厚テーブルを用いれば、図-5の赤線矢印に示すように、液状化層厚を算定できる。

6. パラメータスタディと計算事例

マグニチュード M_j (6.0~8.5, 0.5刻み)、震源距離 X_{eq} (5~500km, 6ケース)、砂の締まり具合 R_L (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45の5ケース)を変動パラメータとして変化させて、パラメータスタディを行った。

図-8に液状化に影響する継続時間 T_D 及び砂の締まり具合 R_L をパラメータとした振幅変換係数のプロットを示す。 $R_L=0.2$ の線(紺色)がゆるい砂で、 $R_L=0.45$ の線(赤色)が密な砂の振幅変換係数である。赤丸は、今回の補間推定式の作成に用いたコントロールポイントを示しており、桃色の楕円は液状化テーブル作成用の地震パラメータ($M_{j,tbl}=7$, $X_{eq,tbl}=50$ km)の点を囲んでいる。また、マグニチュード M_j と震源距離 X_{eq} のパラメータセット毎にどのような継続時間 T_D となるかを把握するため、グラフ上部に補助線として示している。

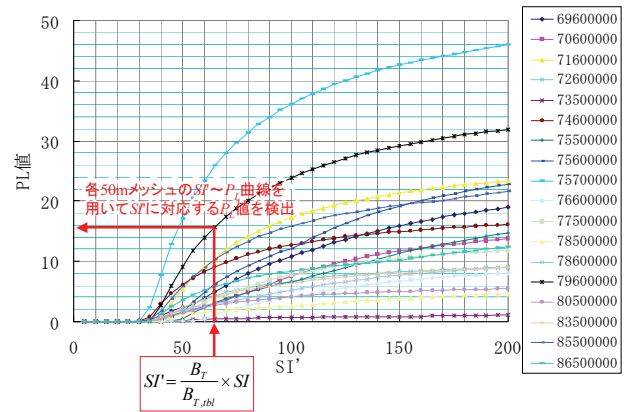


図-4 液状化テーブル(P_L 値テーブル)の整備と地震時の利用イメージ

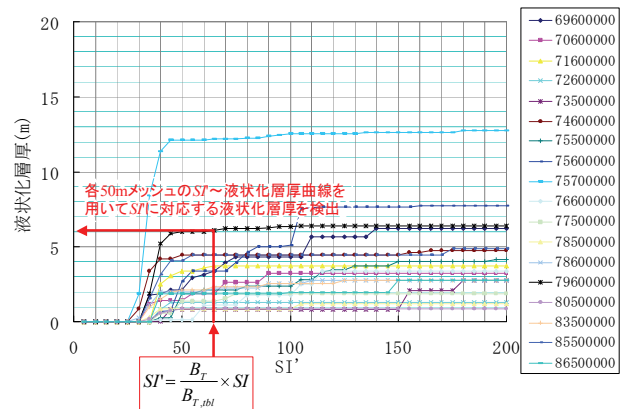
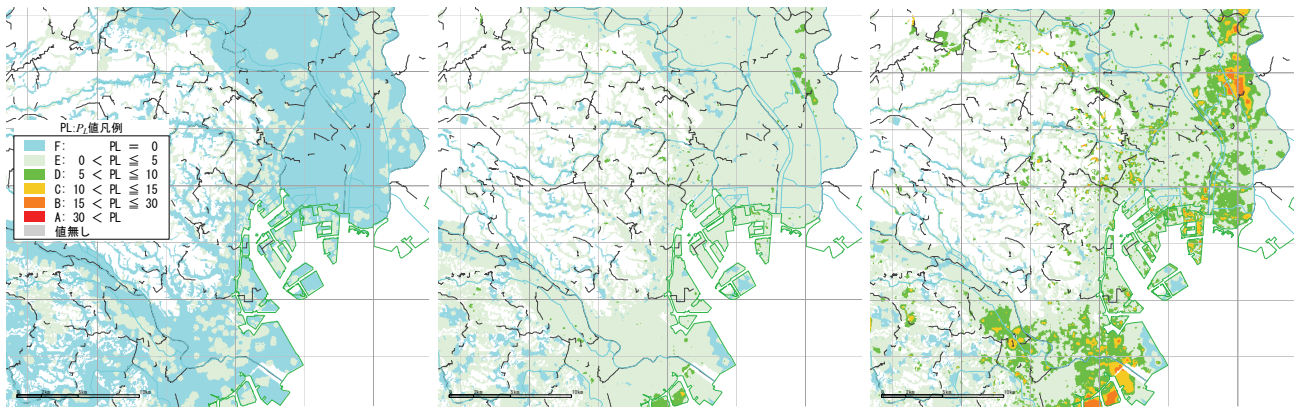


図-5 液状化テーブル(液状化層厚テーブル)の整備と地震時の利用イメージ

太線は、比較のため道路橋示方書における c_W を振幅換算係数に変換して示している。ただし、継続時間が不明であるため、左寄りにタイプII地震動(内陸直下型)、右寄りにタイプI地震動(プレート境界型)の c_W を水平の直線として示している。道路橋示方書における c_W は、タイプI地震動の場合常に $c_W=1.0$ であり、振幅換算係数に変換すると0.6である。一方、タイプII地震動の場合、 R_L に応じて $c_W=1.0 \sim 2.0$ の数値をとるが、振幅換算係数に変換すると、締まった砂($R_L \geq 0.4$)で0.3、ゆるい砂($R_L=0.2$)で0.45程度の値をとることが確認できる。ゆるい砂の下限值としては $R_L=0.1$ の時の0.6となる。

図-9に液状化に影響する継続時間 T_D 及び砂の締まり具合 R_L をパラメータとした補正係数 c_W のプロットを示す。縦軸が補正係数 c_W になったことを除けば、図の凡例及び見方については図-8と同じ要領である。

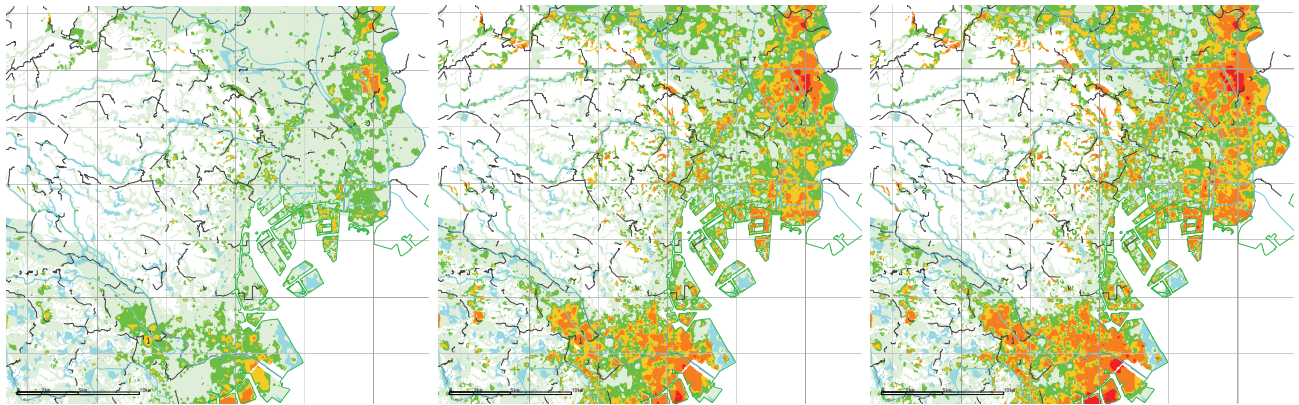
計算事例として、安政江戸地震の再来を想定した場合の P_L 値分布を図-10、液状化層厚分布を図-11に示す。震源情報は表-3の通りとした。 SI 値の距離減衰¹⁰⁾により、各新SIセンサー地点の SI 値を擬似的に与え、これに基づいてSUPREMEで算出した SI 値分布(図-12)を用いて P_L 値分布及び液状化層厚分布を計算している。Dell Precision 470 (64bit インテル(R) Xeonプロセッサ 3.40GHz) Linux (Vine 2.6)において、1分27秒で計算を終えている。



(a) P_L 値分布 ($S_I=30$ kine)

(b) P_L 値分布 ($S_I=40$ kine)

(c) P_L 値分布 ($S_I=50$ kine)

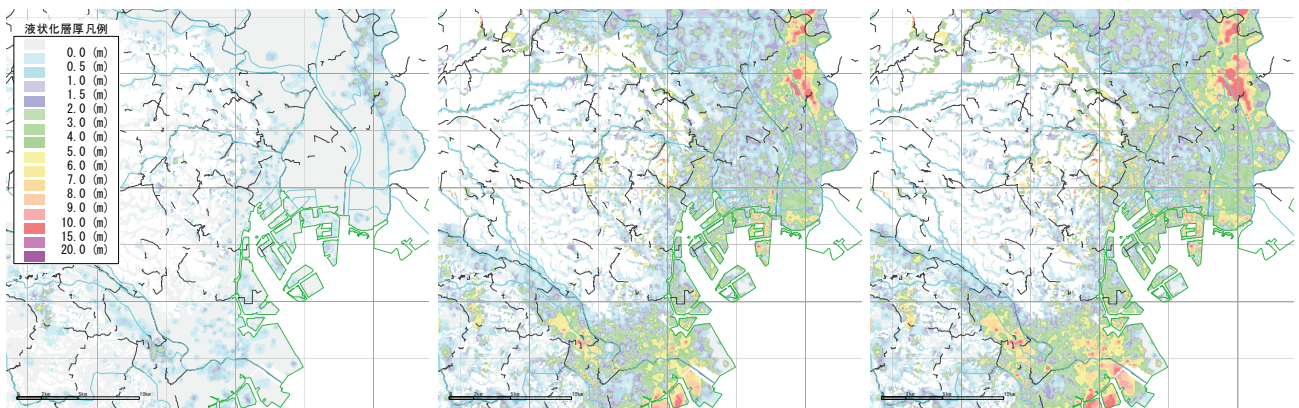


(d) P_L 値分布 ($S_I=60$ kine)

(e) P_L 値分布 ($S_I=70$ kine)

(f) P_L 値分布 ($S_I=80$ kine)

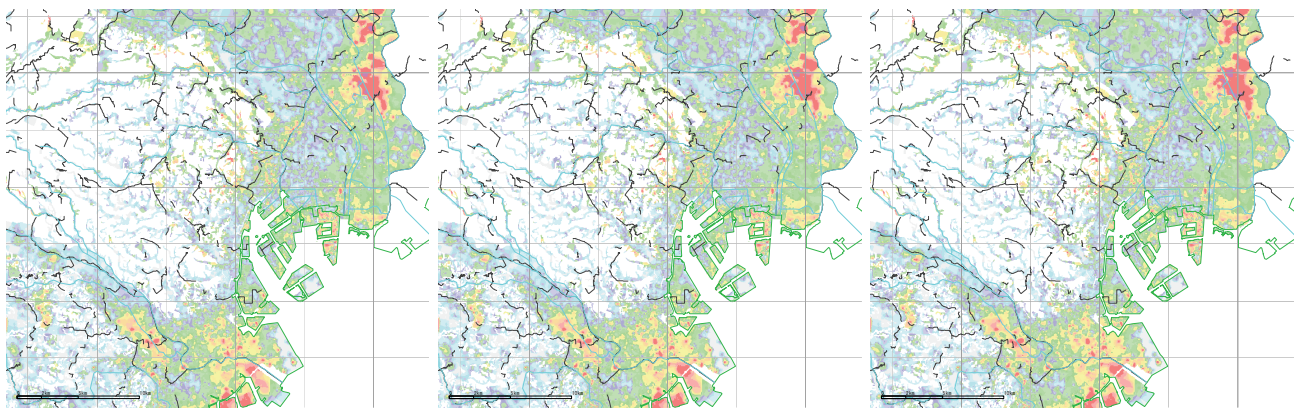
図-6 P_L 値テーブル表示例



(a) 液状化層厚分布 ($S_I=30$ kine)

(b) 液状化層厚分布 ($S_I=40$ kine)

(c) 液状化層厚分布 ($S_I=50$ kine)



(d) 液状化層厚分布 ($S_I=60$ kine)

(e) 液状化層厚分布 ($S_I=70$ kine)

(f) 液状化層厚分布 ($S_I=80$ kine)

図-7 液状化層厚テーブル表示例

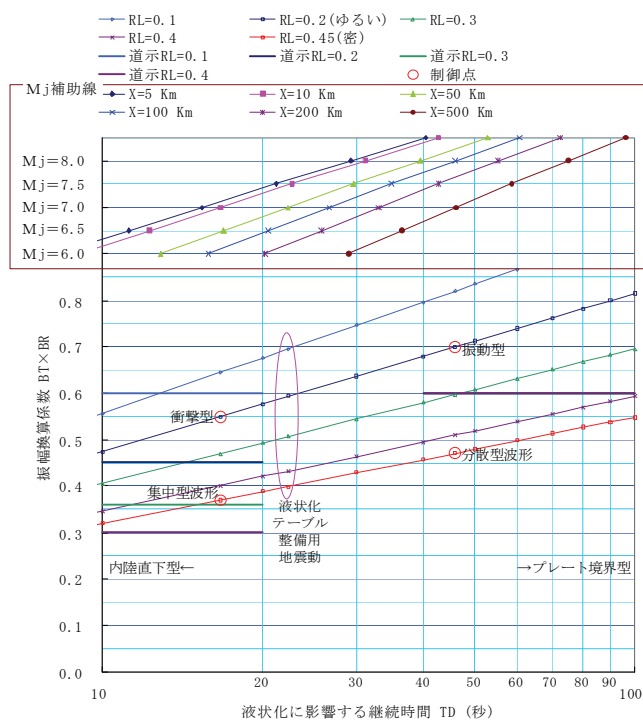


図-8 継続時間及び砂の締めり具合と振幅変換係数の関係

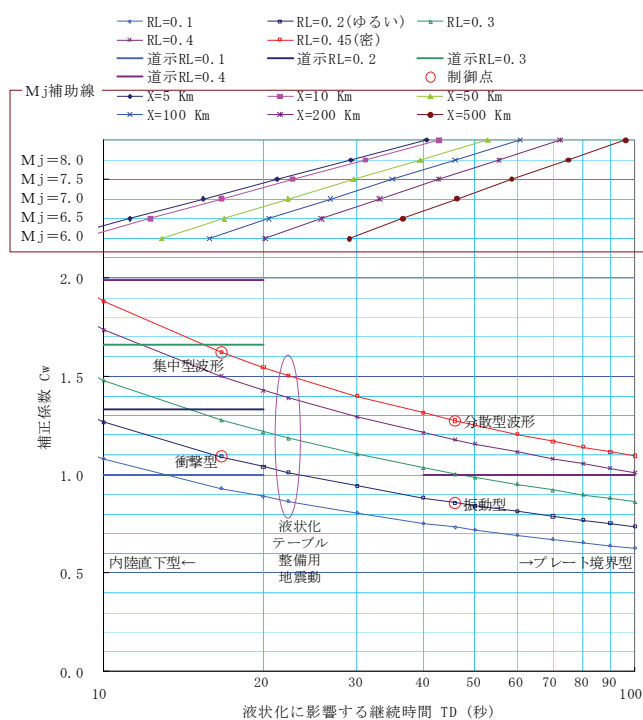


図-9 継続時間及び砂の締めり具合と補正係数 C_w の関係

表-3 安政江戸地震の震源情報

項目	値
マグニチュード	7.2
緯度，経度	35.6364，139.8361
深さ(km)	20

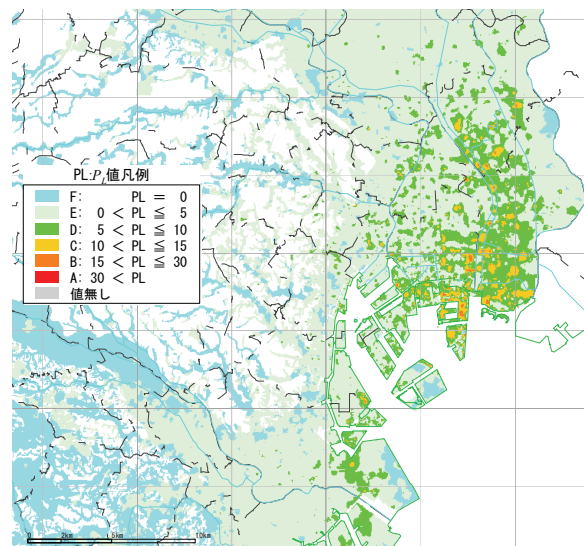


図-10 P_L 値分布シミュレーション事例(安政江戸地震)

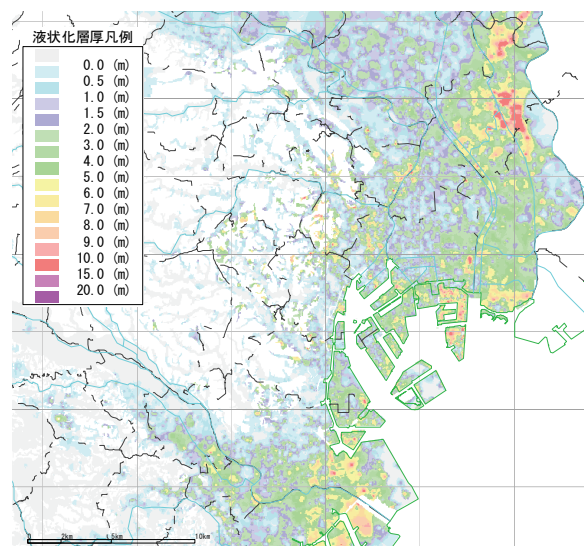


図-11 液状化層厚分布シミュレーション事例(安政江戸地震)

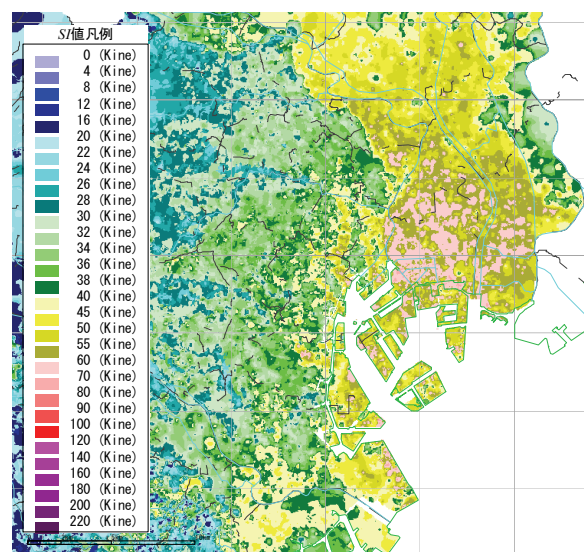


図-12 安政江戸地震シミュレーションで使用した $S1$ 値分布

7. まとめ

本論では、地盤の液状化対策検討で用いられる「 F_L 法」をベースとした液状化指数 P_L 値の面的な分布を、地震発生後、迅速に算出する手法を開発した。道路橋示方書でプレート境界型と内陸直下型に大別していた地震動タイプの代わりに、マグニチュード M_j と震源距離 X_{eq} から計算される「液状化に影響する継続時間 T_D 」をパラメータとして用いることにより、振幅換算係数を連続量として扱うとともに、震源情報取得後、自動的に算出できる手法とした。また、どんな地震動特性の場合にも、砂の締め具合を考慮するように推定式を組み立て直した。本手法は、リアルタイム以外の事前検討においても、地震動タイプの判断が難しい場合や、タイプⅠ地震動でも砂の締め具合の効果を振幅換算係数に反映したい場合に利用できる。

厳密には、國生ら¹⁴⁾による集中型・分散型の分類が石原ら¹³⁾による衝撃型・振動型の分類と完全に対応している訳ではなく、現在の内陸直下型・プレート境界型の分類とも完全に対応している訳ではないので、今後、近年の震源近傍で観測された波形を使った液状化試験等によって、精度を高めていく必要があると考えられる。

また、今後は、本手法を地震被災地域に適用し、 P_L 値分布と埋設管被害分布の相関分析等を進めることにより、液状化要因として P_L 値を用いた被害推定式に移行していくことを検討している。

参考文献

- 1) 清水 善久, 石田 栄介, 磯山 龍二, 山崎 文雄, 小金丸 健一, 中山 渉: 都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システム構築及び広域地盤情報の整備と分析・活用, 土木学会論文集, NO.738/I-64, pp.283-296, 2003.7
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計編, 1996.
- 3) 岩崎 敏男, 龍岡 文夫, 常田 賢一, 安田 進: 地震時の地盤液状化の程度の予測について, 土と基礎, Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980.
- 4) 磯山 龍二, 石田 栄介, 塚本 博之: 即時簡易液状化推定手法の開発, 文部科学省「大都市大震災軽減化特別プロジェクト」平成15年度 成果報告書, 3.3.2 コアシミュレータの開発, http://www.kedm.bosai.go.jp/japanese/seikahoukoku/h15/III-1_3-3-2.pdf
- 5) 安田 進: 液状化の調査から対策工まで, 鹿島出版会, 1988.
- 6) 岩崎 敏男, 龍岡 文夫, 常田 賢一, 安田 進: 砂質地盤の地震時流動化の簡易判定方法と適用例, 第5回地震工学シンポジウム講演集, pp.641-648, 1978.
- 7) Seed, H. B. and Idriss, I. M. : Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential, J. SMFD, ASCE, No. SM 9, pp.1249-1273, 1971.
- 8) 安田 進, 吉川 洋一, 牛島 和子, 石川 利明: SI値を用いた液状化予測手法, 第28回土質工学研究発表会(神戸), pp.1325-1326, 1993.
- 9) 日本原子力学会: 日本原子力学会標準, 原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準, 2007.
- 10) 佐藤 智美, 川瀬 博, 佐藤 俊明: ボアホール観測記録を用いた表層地盤同定手法による工学的基盤波の推定及びその経験的経時特性, 日本建築学会構造系論文集, 第461号, pp.19-28, 1994年
- 11) Jennings, P.C., G.W.Housner and N.C.Tsai : Simulated earthquake motions for design purposes, Proc. 4th World Conference on Earthquake Engineering, pp.145-160, 1968.
- 12) Hisada, T. and H.Ando : Relation between duration of earthquake ground motion and the magnitude, Kajima Inst. Const. Tech., 1976.
- 13) 石原 研而, 安田 進: 液状化に及ぼす地震波の不規則性と初期拘束圧の影響, 土と基礎, Vol.23, No.6, pp.29-35, 1975年
- 14) 國生 剛治, 嶋田 光明, 加藤 進: 密な砂の非排水くり返しせん断特性, 第16回土質工学研究発表会
- 15) 亀井 祐聡, 森本 巖, 安田 進, 清水 善久, 小金丸 健一, 石田 栄介: 東京低地における沖積砂質土の粒度特性と細粒分が液状化強度に及ぼす影響, 地盤工学会論文報告集, Vol.42 No.4, pp.101-110, 2002.8
- 16) Khosrow T.SHABESTARI and Fumio YAMAZAKI : Attenuation Relation of Strong Ground Motion Indices Using K-Net Records, 第25回地震工学研究発表会, 第1分冊, pp.137-140, 1999.7.

A PROMPT ESTIMATION METHOD OF LIQUEFIED ZONES IN REAL-TIME EARTHQUAKE DISASTER PREVENTION SYSTEM

Eisuke ISHIDA, Iwao SUETOMI, Susumu YASUDA and Naoyuki HOSOKAWA

In this paper, prompt estimation method of liquefied zones based on seismic intensity distribution which is estimated by seismometry information at the time of an earthquake outbreak is developed. For a liquefaction potential index, P_L is used. P_L is calculated by soil information in each data point in the soil database, and spatial distribution of P_L is calculated by interpolation method. The part that it can be calculated beforehand is prepared as "liquefaction table". At the time of the earthquake outbreak, appropriate P_L of each spot is searched based on earthquake vibration information from liquefaction table.