2011年東北地方太平洋沖地震の際に 即時推定した液状化危険度分布の検証

石田 栄介¹・末冨 岩雄¹・塚本博之¹・ 猪股渉²・濱中亮²・乗藤雄基²・安田 進³

 ¹株式会社エイト日本技術開発東京支社保全・耐震・防災部 (〒164-8601東京都中野区本町5-33-11)

E-mail: ishida-e@ej-hds.co.jp, suetomi-i@ej-hds.co.jp, tsukamoto-hi@ej-hds.co.jp ²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: inomataw@tokyo-gas.co.jp, ryo-hamanaka@tokyo-gas.co.jp, norito@tokyo-gas.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

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、震源域から離れた東京湾岸域でも大規模な液状 化が発生した.液状化は、各種地下埋設管や道路・港湾施設等に大きな影響を及ぼすので、事前・事後に おいて液状化の有無や程度を適切に推定することは、防災上極めて有用である.東京ガスでは、都市ガス 供給の安全性を確保するため、地震防災システム「SUPREME」を構築し運用してきた.大震災発生直後に おいても、約4000点の地震計から観測情報を収集し、SI値分布推定、液状化推定、被害推定を行い、災害 対応における判断に活用した.本論では、液状化推定の精度向上のため、千葉市湾岸エリアを対象とし て、液状化推定結果が実際の液状化域とよく対応していることを示し、継続時間の長さが液状化に影響し たこと、千葉市美浜区と中央区での液状化程度の差は地盤条件が強く影響したこと等を示した.

Key Words : liquefaction, P_L value, real-time damage estimation, gas supply system, GIS

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.この中で,東京湾岸エリ アには埋立地等の軟弱地盤が広がっていることもあ り、液状化推定の精度は特に重要となる. そのよう な背景から,石田ら²⁾では,ボーリングデータを活 用して50mメッシュの液状化テーブルを事前整備し、 かつ継続時間の影響をも考慮する方法を提案し、東 京ガスでは「SUPREME」システムへの導入を進めて いた³⁾.

2011年3月11日14時46分頃に発生した東北地方太平洋沖地震では、東京湾岸エリアで大規模な液状化

が発生した. 震源域から遠く,最大加速度は 200cm/s²程度であったにもかかわらず液状化が顕著 であった要因として,継続時間が極めて長かったこ とによると考えられる.この点はまさに,石田ら²⁾ で検討していた点である.

そこで本論では、約4,000点の観測SI値から推定 された地震動分布と提案手法による液状化推定結果 を、実際の液状化分布を比較し検証を行う.対象エ リアは、東京ガスの供給エリアで最も液状化が顕著 であった千葉市美浜区を中心に、中央区を含めた範 囲とする.

2. 液状化危険度評価法の概略

下式で算出される液状化指数(P_L値)⁴⁾を用いる.

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

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。 F_L は下式によって深さ毎 に算出される⁵.

$$F_L = \frac{R}{L} \cdots \begin{cases} F_L \le 1.0: 液状化すると判定 \\ F_L > 1.0: 液状化しないと判定 \end{cases}$$
 (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.

$$R = c_w R_L \tag{3}$$

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⁵⁾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.

$$\langle タイプ I (プレート境界型) の地震動の場合 \rangle $c_w = 1.0$ (4)$$

$$\langle \mathcal{P} \mathcal{T} \mathcal{I} \mathbf{I} (内陸直下型) \mathcal{O} 地震動の場合 \rangle \\ c_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \le 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \le 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$
(5)

これに対し、「SUPREME」における液状化危険度 算出法²⁾は、1)Lの評価、2) *c*wの評価、3)東京東部低 地の特性を考慮、の3点で道路橋示方書の方法⁵⁾に改 良を加えている.以下に、その概略を示す.

1)地震時せん断応力比Lの評価

式(2)の地震時せん断応力比 *L* を評価するための 地震動指標として,最大加速度でなく *SI* 値を採用 し,次式を用いている^の.

$$L = 0.01 \frac{SI}{(\sigma_{v})^{0.1}}$$
(6)

ここで, σ_i '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,実際の地震で観測さ れる最大加速度をそのまま設計震度の式に用いると 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 力や液状化強度には,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ている.

2) 地震動特性の補正係数Cwの評価

地震動特性の補正係数Cwを次式で与える²⁾.

$$C_w = \frac{0.6}{B_T \times B_R} \tag{7}$$

$$B_T = 0.134 + 0.340 \times \log_{10} T_D \tag{8}$$

$$\log_{10} B_R = \frac{R_L - 0.20}{0.45 - 0.20} \times \log_{10} 0.673$$
(9)

$$T_D = 10^{0.3M_j - 1.0} + 10^{0.17M_j + 0.54 \log X_{eq} - 0.6} (\log_{10} 2)$$
(10)

ここで、 B_T : 砂の締まり具合を考慮した振幅換算係数 B_R : 継続時間を考慮した振幅換算係数 T_D : 地震動の継続時間(秒) M_j : 気象庁マグニチュード X_{eq} : 等価震源距離(km).

式(10)の継続時間は,経時特性の式としてNoda et al.⁷⁾を用い,強震部の始まりから減衰部の包絡振幅 が1/2になるところまでを,液状化に影響するとし て考慮したものである(図-1).本来は,距離は断 層の拡がりを考慮した等価震源距離を用いる式であ るが,即時に算定することは困難であるので,即時 推定システムでは震源距離で代用する.



3)東京東部低地の沖積砂質土の特性

東京低地における沖積砂質土の特性を考慮した判 定式⁸⁾を用いている.東京低地の沖積砂層は細粒分 をかなり含んだ細砂,シルト質細砂で構成されるこ とが多い.細粒分が多いと,N値が小さいわりに液 状化強度は小さくなく,この性質をN値と細粒分含 有率の関係等で考慮したものとなっている.

2011年東北地方太平洋沖地震の際の液状化 推定

14時46分頃に本震が発生した後,10分以内に 「SUPREME」では、約4,000の観測点からSI値を収集 している.そして、20分程度で、被害推定までのシ ミュレーションを完了している⁹. 震災時の 「SUPREME」における液状化推定手法は、2章で述 べた手法とは少し異なるが、本論文では提案手法が 導入されていたものとして比較検討を行う.

気象庁から発表された地震規模マグニチュードM は、表-1のように段階的に修正されている¹⁰⁾.

表-1 気象庁によるマグニチュード(M)修正

		/ ()/>
М	発表時刻	備考
7.9	3/11 14:50頃	速報
8.4	3/11 16:00	第1報(報道発表)
8.8	3/11 17:30	第3報(報道発表)
9.0	3/13 12:55	第15報(報道発表)

本論文では、即時推定を前提としているので、 M=7.9を基本とし、各種検討へ利用することも念頭 にM=9.0のケースについても検討する.なお、式 (10)は気象庁マグニチュードに対する式であること も含め、M=9.0の条件は外挿となる.本論文では、 Mの大きさの差異を把握するにとどめ、気象庁の動 向も踏まえた改良は今後の課題とする.

表-2は、地震動特性の補正係数*C*_wを各種手法・ 条件で比較したものである. 道路橋示方書⁵⁾では、 1.0としているが、吉田ら¹¹⁾は南海トラフの巨大地 震に対しては、0.5程度が適切であるとしており、 時松・吉見の式¹²⁾でも1.0より小さくなる. 式(7)で は、M=7.9でも0.80、M=9.0では0.72と小さい.

表-2	地震動特性の補止係数Cwの比較

手法	条件	Cw
道路橋示方書 ⁵⁾	プレート境界型地震	1.0
吉田ら 11)	巨大地震	0.5
時松・吉見 ¹²⁾	M=7.9	0.94
	M=9.0	0.81
石田ら ²⁾	M=7.9	0.80
$(X_{eq} = 350 \text{km})$	M=9.0	0.72

図-2は約4,000点の観測SI値から50mメッシュで補 間推定したSI値分布である¹³⁾.推定エリアは,東京 ガスの供給エリア内のみである.茨城県南部では40 カインを越える箇所が少なくなく,千葉市では概ね 30カイン以上,東京~横浜の多くは30カイン以下と なっている.

式(10)により算出した継続時間の分布を図-3に示 す.図(a)はM=7.9,図(b)はM=9.0を、入力した結果 である.茨城県と神奈川県でも数秒の差であり、距 離による差異は小さいのに対し、M=9.0のT_Dは M=7.9の場合の2倍に近く、地震規模の影響が大き いことがわかる.実際の継続時間との対応は、 M=9.0と最終的な値の方がよい.

図-4は推定SI値分布と2章で示した方法で事前に 整備してある液状化テーブルから推定した液状化指 数(P₁値)分布である.継続時間の影響を考慮する ことによってCwが少し異なるので、M=9.0の方が 少しP_L値が10を越えるエリアが広くなっている.た だし、災害対応の判断に影響するほどの差ではない. 全体的に実際の液状化域との対応はよい.2点で若 干の差異が見られる.1つは大黒埠頭付近であり, ここでは明瞭な液状化は見られなかったので、過大 評価であったこととなる.液状化対策の有無などの 情報も精度向上には必要になってくると考えられる. もう1つは、横浜市の港北区小机付近や金沢区柴町 付近である.実際には液状化が発生しているにもか かわらず,推定した液状化危険度は高くなかった. 防災地盤データベースとして、約6万点のボーリン グデータを収集・整備して用いているものの、両エ リアのデータは無く、かついずれも自然地盤での液 状化では無いため,捉えられなかったものである. 今後とも、更なる地盤情報の充実が精度向上に有効

と考えられる.

図(c)は2章では述べなかったが、埋立地において埋立層と沖積砂層の区分を適切に行う、埋立完了前と思われるデータを除く、等の地盤データ修正を、提案手法導入と合わせて実施した効果を確認するために、以前のデータで算出したものである.この場合、M=7.9でも、実際の液状化域に比べて過大になっており、埋立地データの見直しも、推定精度向上に大きく寄与したことがわかる.

4. 千葉市湾岸部を対象とした検証

「SUPREME」の被害推定対象域であり、かつ顕著 な液状化が発生した千葉市湾岸部を対象として、液 状化推定手法を検証する.図-5は50mメッシュで補 間推定したSI値分布である.概ね30kine前後であり、 補間に用いていない防災科研K-NETの値とも整合し ている.

安田・原田¹⁴は、東京湾岸地域について、現地調 査(3月12日~23日)と航空写真情報から、液状化 が発生したと推定される地区を示している.図-6は、 これとSUPREMEによる液状化推定を比較したもの である.美浜区、中でも磯辺や稲毛海岸で激しい液 状化被害が見られたのに対し、中央区(千葉港)で 噴砂が見られた箇所は限定的であった.この傾向は、 被害推定結果でも、概ね同様の傾向が得られており、 初動判断等の参考にする上で十分な精度である.

美浜区と中央区,それぞれの代表的ボーリング柱 状図を図-7に示す.これを見ると,No.1地点はNo.2 地点に比べ,1)地下水位が浅い,2)深さ3~4mまで の埋土のN値が小さい,3)その下の沖積砂層のN値 も10前後にとどまる,と明らかに液状化しやすい地 盤条件であることが分かる.他のボーリングデータ でも,概ね同様の傾向にあり,美浜区と中央区の差 異は,地盤条件の差異によるものと考えられる. 図-5のSI値分布において,美浜区の方が少しSI値が 大きい傾向にあり,このことも影響していると考え られるが,それもまた地盤条件が軟らかいことによ るものである.

図-8はK-NET稲毛,図-9はK-NET浦安での観測記 録の非定常スペクトルである.浦安市の広域で液状 化が生じているが,K-NET浦安は市役所の近くで液 状化は生じていないエリアにある.K-NET稲毛では, 赤い矢印で示すように,時刻110秒付近から120秒付 近にかけて急激に卓越周期が0.6秒付近から1秒強に 変化しているのに対し,K-NET浦安では主要動以降 も周期1秒前後が卓越し,卓越周期の経時変化は小 さいことが分かる.K-NET稲毛の地震計が設置され ている敷地では,明瞭な噴砂が見られており,時刻 120秒付近で,サイクリックモビリティにより急激 に大きな加速度が現れた後,液状化に至ったと推察 される.逆に言えば,主要動が始まってしばらくは 液状化しておらず,地震動の継続時間が強く影響し たことを示唆していると考えられる.





5. まとめ

東京ガスの地震防災システム「SUPREME」では, 2011年東北地方太平洋沖地震の発生から20分程度で, 約4,000点の地震計からの観測点情報を用いて,SI 値分布,液状化分布,被害分布を推定し,約30分後 に開催された第1回本部会議に情報提供を行った. 本論では,液状化の推定手法について,顕著な液状 化が見られた千葉市湾岸域を対象に検証し,推定結 果が実際の液状化域とよく対応していることを示し た.

本研究では,防災科学技術研究所強震観測網のデ ータを使用させて頂きました.関係各位に感謝の意 を表します.

参考文献

- 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.
- 2) 石田 栄介,末冨 岩雄,安田 進,細川 直行: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,土木学会地震工学論文集,2009.
- 清水善久,坂上貴史,山内亜希子,石田栄介,安田 進:液状化危険度分布の即時推定によるガス被害推定 の高精度化,第65回土木学会年次学術講演会,I-581,2010.
- 4) 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.

- 5) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説, V. 耐震設計 編, 1996.
- 6) 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.
- 7) Shizuo Noda, Kazuhiko Yashiro, Katsuya Takahashi, Masayuki Takemura, Susumu Ohno, Masanobu Tohdo, Takahide Watanabe : Response Spectra For Design Purpose Of Stiff Structures On Rock Sites, OECD-NEA Workshop on the Relations Between Seismological DATA and Seismic Engineering, Oct.16-18 Istanbul, 2002.
- 8) 亀井 祐聡, 森本 巌, 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.
- 9) 猪股渉, 乗藤雄基:東日本大震災における東京ガスの 初動措置について, 日本地震工学会年次大会, 2011 (投稿中).
- 10) 気象庁:報道発表資料, http://www.jma.go.jp/jma//menu/houdou.html,2011.
- 11)吉田 望,大矢陽介,澤田純男,中村 晋:海溝型長継続 時間地震動に対する簡易液状化判定法の適用性,日本 地震工学会論文集,第9巻,第3号,pp.28-47,2009.
- 12) 時松孝次, 吉見吉昭: Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, 土 質工学会論文報告集, Vol.23, No.4, pp.56-74, 1983.
- 13) ティージー情報ネットワークwebサイト: Jishin.net, http://www.jishin.net/
- 14) 安田進, 原田健二:東京湾岸における液状化被害, 土 と基礎, Vol.59, No.7, pp.38-41, 2011.

PRECISION OF REAL-TIME ESTIMATION OF LIQUEFACTION POTENCIALS DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Eisuke ISHIDA, Iwao SUETOMI, Hiroyuki TSUKAMOTO, Wataru INOMATA, Ryo HAMANAKA, Yuuki NORITO and Susumu YASUDA

The coast area in Tokyo-wan which is far from the earthquake fault, were heavily liquefied during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. It is very important to predict the occurence and degree of liquafaction, because the liquafaction affects the safety of underground pipilines and facilities of roads and ports. The real-time disaster prevention system "SUPREME" is established and used by Tokyo Gas supply system in order to secure the safety. The system collected the SI value from 4,000 sensor, calculated the distribution of SI value, liquafaction potencial, damages of pipelines for about 20 minutes after the earthquake. In this paper, it is shown that estimated liquafaction area corresponds actual liquafaction area very well, and the reason is that "SUPREME" uses very dense SPT data and SI sensors and the estimate method of liquafaction considers the effect of duration time of earthquake groun motion.