

液状化による道路沈下量とPL値の関係に基づく 新たなハザードマップの構築

梶原 和博¹・R. M. Pokhrel²・清田 隆³・小長井 一男⁴

¹学生会員 横浜国立大学 都市イノベーション学府 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:kajihara-kazuhiro-hc@ynu.jp

²正会員 東京大学生産技術研究所 JSPS特別研究員 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:pokhrel@iis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学生産技術研究所 准教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:kiyota@iis.u-tokyo.ac.jp

⁴正会員 横浜国立大学 都市イノベーション研究院 教授 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

E-mail:konagai@ynu.ac.jp

将来の液状化被害に備えるために、液状化ハザードマップの整備は有効である。このハザードマップに被害に関する定量的な情報が含まれると、防災へのより有効な利活用が期待出来る。そこで本研究では、千葉県浦安市を対象として、東北地方太平洋沖地震前後に実施された航空レーザー測量から得られた千葉県浦安市の道路沈下量と、液状化指数(PL値)との関係に基づいて、液状化による道路の沈下量を定量的に示す新しいタイプの液状化危険度マップの構築を試みた。市内 251 地点で PL 値と道路沈下量を抽出した結果、同じ PL 値を示す場所であっても、道路規格が異なることで沈下量も異なる傾向が得られた。この関係を用いて作成した新たな液状化危険度マップは、実際の被害の傾向とおおむね整合する結果となった。

Key Words : liquefaction, hazard map, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. はじめに

2011年3月11日、三陸沖を震源として発生した東北地方太平洋沖地震(マグニチュード9.0)は、震源から約500km離れた関東地方沿岸部の若年埋立地や利根川下流域に深刻な液状化被害をもたらした。液状化現象は他の地盤災害と比べて直接的に人命を脅かすことは稀であると言われている¹⁾が、液状化による地盤の変形はそのまま残留し、ライフラインの寸断や道路・住宅の被害など長期に渡る問題を引き起こすことが知られている²⁾。

東京湾沿岸部に位置する千葉県浦安市は、1966年から1985年にかけて造成された若年埋立地であり、東北地方太平洋沖地震では市の85%にも及ぶ面積で深刻な液状化被害が生じた³⁾。浦安市は、埋め立て年代の違いから元町・新町・中町の3つの地域に分けられる。元町は戦前から陸地であった自然堆積地盤であり、液状化被害は軽微であった。一方で、埋立地盤である中町と新町ではその大部分が液状化被害を受けた。

この地震を受けて、Konagai et. al.⁴⁾は、航空レーザー計

測によって得られた地震前後のデジタル標高モデルの差分から地殻変動成分を除去し、浦安市を含む千葉県沿岸部に渡る広域な液状化沈下マップを作成した。

将来の液状化被害に備えるにあたっては、既に多くの自治体で液状化ハザードマップが整備されてきたものの、その防災への利活用を行うにあたっては様々な課題がある。そのひとつに、従来のハザードマップには、想定される具体的な被害や定量的な情報が含まれていないことが挙げられる。そこで本研究では、東北地方太平洋沖地震前後に実施された航空レーザー測量から得られた千葉県浦安市の道路沈下量と、PL値との相関性に及ぼす道路の舗装厚の影響を考慮して、液状化による道路沈下量を定量的に予測する新たな液状化危険度マップの構築を試みる。

2. 検討方法

本研究では千葉県浦安市を対象として、まず液状化判

定に必要な地盤情報を整備した。次に、整備した地盤情報を用いて市内109箇所のボーリングデータにおいて道路橋示方書(2012)⁹⁾に基づいた液状化判定を実施し、浦安市域のPL値分布を作成した。最後に、東北地方太平洋沖地震前後のデジタル標高モデルの差分から地殻変動成分を除去して得られた液状化沈下マップ⁴⁾(Konagai et al., 2013)(図1)から道路沈下量を抽出し、道路沈下量とPL値の関係を道路舗装厚毎に整理した。ここで得られた関係を用いて、液状化による道路沈下量を定量的に予測する新たな液状化危険度マップの構築を試みた。

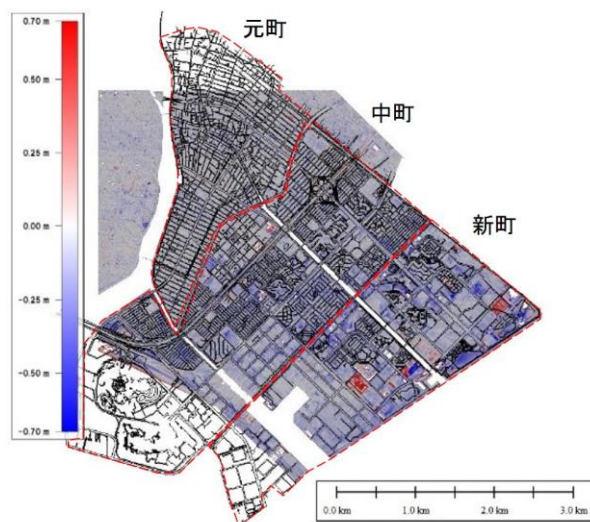


図-1 航空レーザー計測による浦安市の液状化沈下マップ⁴⁾

3. 地盤情報の整備

道路橋示方書(2012)⁹⁾に基づいた液状化判定を行うにあたり必要となる地盤の塑性指数、平均粒径、細粒分含有率、単位体積重量、地下水位を整理する。通常、これらのパラメータは、各ボーリング調査地点で実施された土質試験から求められる。しかし、土質試験が行われていないボーリングデータも多く存在し、これらのボーリング地点で液状化判定を行う場合は、液状化判定に必要なパラメータは、ボーリング柱状図に記載されている土質名から一意的に推定されるが、この方法は主観的で信頼性に欠けることが指摘されている⁹⁾。

そこで、本研究では、東北地方太平洋沖地震後に実施された市内23箇所のボーリング調査結果⁷⁾ならびに土質試験結果⁷⁾を用いてパラメータの推定法を構築した。その手順を以下に示す。

まず、N値、細粒分含有率および地層の連続性から、図2に示すように浦安市の地層をF(埋土層)、中間層(F層と沖積層に挟まれたシルト層)、As1(N値の高い上部沖積砂質土層)、As2(N値の低い下部沖積砂質土層)に区分

した。

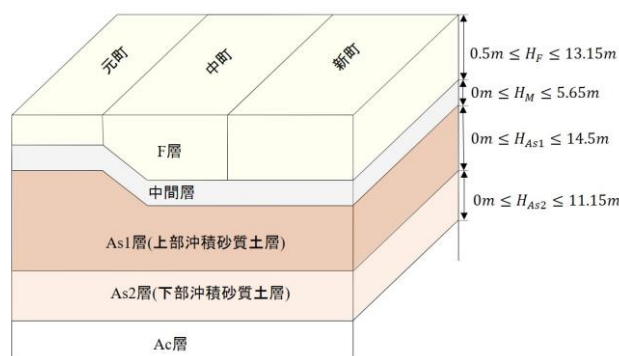


図-2 浦安市の地層モデル

次に、それぞれの地層で液状化判定に必要なパラメータの推定を行った。以下に示すデータは全て、浦安市液状化対策技術検討調査委員会が震災後に実施したボーリング調査⁷⁾・室内土質試験結果⁷⁾に基づく。

図3に細粒分含有率と N_1 値の関係を示す。 N_1 値とは、標準貫入試験で得られた N 値を、次式によって有効上載圧 $\sigma_{vb}=100\text{kN/m}^2$ 相当に換算した値である。

$$N_1 = \frac{170 \cdot N}{(\sigma_{vb'} + 70)} \quad (1)$$

ここに、 N は標準貫入試験から得られた 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/m^2)である。

ばらつきは見られるものの、土質区分に依らず N 値の増加とともに細粒分含有率が減少する傾向が見られた。そこで、本研究では既往の研究⁹⁾で用いられている関数形を基に最小二乗法によって回帰曲線を引き、次式によって N_1 値から細粒分含有率の推定を行った。

$$FC = \begin{cases} \frac{848}{1.4N_1 + 7.84} - 11.6 & (N_1 < 46.5) \\ 0 & (N_1 \geq 46.5) \end{cases} \quad (2)$$

図4に塑性指数と細粒分含有率の関係を示す。図4から、中間層では細粒分含有率が70%を超えるあたりから塑性指数が15を大きく超え、その他の地層では細粒分含有率が80%を超えるあたりから塑性指数が15を大きく超える傾向が得られた。そこで、これらの細粒分含有率の値を超える土層については、塑性指数の観点から液状化判定対象外とした。

以上をまとめると、本研究ではボーリング柱状図から得られた N 値から N_1 値を算出し、 N_1 値から図3の関係をj用いて細粒分含有率を推定した。さらに、推定された細粒分含有率から図4の関係をj用いて塑性指数を推定した。

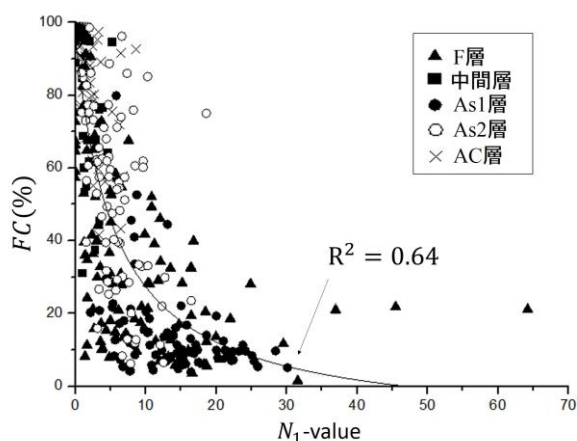


図-3 細粒含有率値と N_1 値の関係

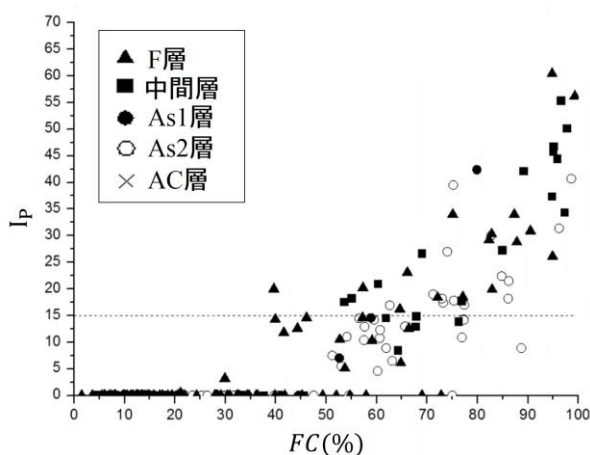


図-4 塑性指数と細粒含有率の関係

図5に平均粒径の頻度分布を示す。道路橋示方書³⁾において、砂質土の液状化判定を行う場合は、平均粒径10mmが液状化判定土層の上限値として与えられている。しかし、今回得られた平均粒径の最大値は1.92mmであり液状化判定結果に影響を与えない。また、図5から平均粒径が液状化判定土層の平均粒径の上限値10mmを超える土層はないと考え、室内土質試験結果⁷⁾から得られた値の平均値 $D_{50}=0.12\text{mm}$ を液状化判定に使用した。

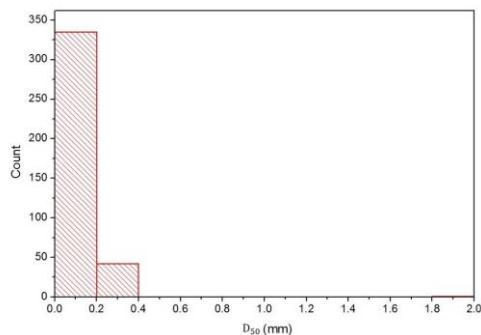


図-5 全ての地層を対象とした平均粒径のヒストグラム

図6に各地層で採取されたサンプルの単位体積重量の分布を示す。図2に示した地層区分でデータを分類した

場合、サンプル数が少なくなるため、本項目では便宜的に埋立地盤(F層)と自然堆積地盤(中間層、As1層、As2層)に分類してデータ整理を行っている。サンプル数は決して多くないが、最もばらつきの大きい新町の自然堆積地盤における標準偏差は $\sigma=1.51\text{kN/m}^3$ であり、さらに液状化の被害の程度に最も影響を与えると考えられる表層付近のF層における標準偏差の最大値は、新町のF層における $\sigma=0.70\text{kN/m}^3$ と小さいことから、各土層における単位体積重量のばらつきが液状化判定結果に与える影響は小さいと考えられる。

そこで、単位体積重量は室内土質試験結果⁷⁾から得られた各土層における平均値を液状化判定に使用した。なお、元町のF層における土質試験の結果が得られなかったため、元町のF層における単位体積重量の値は、隣接する中町のF層における単位体積重量の平均値を採用した。

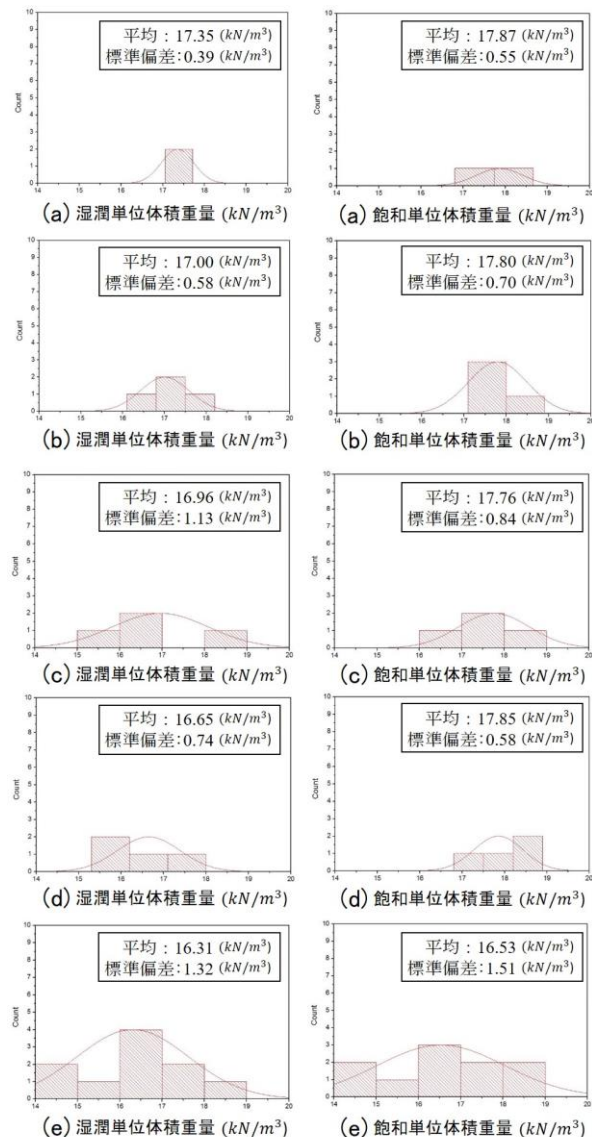


図-6 単位体積重量のヒストグラム

(a)中町 F 層 (b)新町 F 層 (c)元町自然堆積地盤 (d) 中町自然堆積地盤 (e)新町自然堆積地盤

図7にボーリング孔内水位の分布を示す。地下水位は埋立て年代や埋立て地域によらず、GL-0.9m~GL-4.05mの範囲にばらついていた。一方、ボーリング孔内の水位は、季節変動も生じるため地震時の地下水位と異なることも考えられる。そこで、東北地方太平洋沖地震時には浦安市の埋立地域の大部分のエリアの地下水位は、GL-1.0m~GL-2.0mであったという既往の研究の報告⁸⁾を参考とし、地下水位は一律にGL-1.5mとした。

以上の手順により、土質試験結果が整備されていない市内86箇所のボーリング調査地点の地盤情報を補間した。

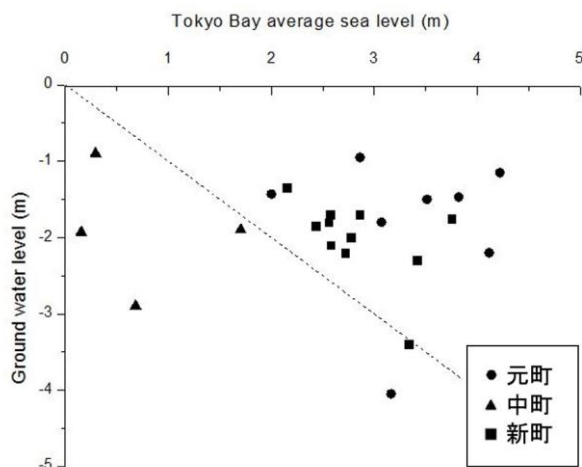


図-7 標高と地下水位の関係

4. 浦安市の液状化判定

推定された地盤情報を用いて、東日本大震災で生じたと考えられる地震外力を想定し道路橋示方書(2012)⁹⁾による液状化判定を行った。液状化判定対象土層は図2に示したF層・中間層・As1層・As2層とした。入力加速度は、浦安市の地盤堆積構造を考慮し、埋立て地盤と非埋立て地盤で異なる入力加速度を設定した。自然堆積地盤である元町では、K-NET浦安(N35.6537°, E139.9023°)で観測された最大合成成分加速度174.3gal⁹⁾を用いた。一方で、埋め立て地盤である中町、新町においては、石川ら(2014)¹⁰⁾が1次元地震応答解析ならびに観測値から推定した地表最大加速度200galを用いた。

市内109箇所のボーリング調査地点で算出されたPL値を、通常クリギングによって空間補間を行い作成した浦安市のPL分布を図8に示す。クリギングの基本的な手順は参考文献¹¹⁾に詳しい。

図8のPL値分布は、図1に見られるように自然堆積地盤の元町の液状化被害が、埋立地盤の中町・新町と比較して小さかった事実を反映している。一方で、液状化による住宅被害の激しかった舞浜地区のPL値は5~10程度と

小さい。このような地域は他の地域と比べて液状化判定に利用できるボーリングデータ数が少なく、ボーリング地点の密度が結果に影響を及ぼしていると考えられる。なお、今回の液状化判定では、地震動特性による補正係数は1.0としており、地震動継続時間や余震の影響は考慮していない。

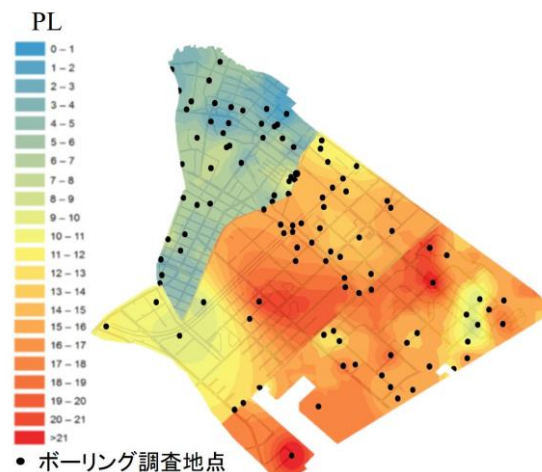


図-8 浦安市のPL値分布

5. 液状化指数と道路沈下量の関係

須山ら¹²⁾は液状化に伴う道路沈下量は、同じPL値を示す場所であっても道路規格によって大きく異なることを指摘している。そこで、本研究では市内の埋立年代の異なる3つの地域において、道路標準断面図が既知である251地点(図9)において道路沈下量とPL値を抽出した。

道路沈下量は、図10に示すように対象とする道路の横断方向に側線を取り、道路脇を除く道路幅員の約8割の部分を検討幅員と定め沈下量を抽出した。これは、道路脇の植生などの影響を避けるためである。そして、側線上で計測された沈下量の平均値を、道路沈下量と定めた。

図11にPL値と道路沈下量の関係を示す。図11は、PL値が大きくなると沈下量も大きくなるが、同じPL値を示す場所であっても、道路舗装・路盤厚が厚くなるほど沈下量は小さくなる傾向を示している。PL値と沈下量の関係はばらついているものの、道路舗装・舗装厚毎に関係を整理すると、PL値と沈下量の関係はより明確となる。ばらつきが大きい理由として、道路は一樣に沈下することではなく噴砂の発生などにより局所的に大きな変状を生じることが考えられる。また、液状化の程度が激しかった地域の道路では、一樣な沈下ではなく起伏が激しくなったという報告⁷⁾もあることから、本研究ではばらついている沈下量に対して平均を取るように回帰直線を引き、道路の沈下量の全体像を表現した。



図-9 道路沈下量・PL 値の抽出箇所

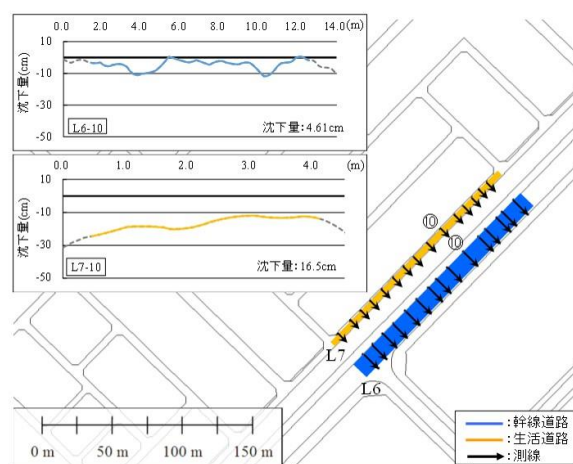


図-10 道路沈下量の抽出方法⁸⁾

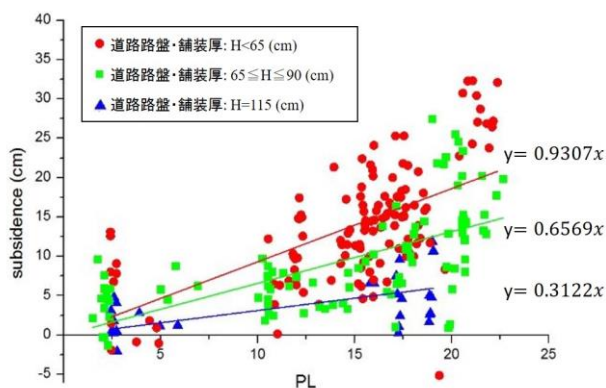


図-11 道路の平均沈下量と PL 値の関係

6. 新たな液状化危険度マップの構築

図11の関係をj用いて、GISソフトウェアによって作成した新たな液状化危険度マップを図12に示す。市内全ての道路の舗装・路盤厚を得ることは困難であるため、表1に示すように道路種別により一意的に道路舗装・路盤厚を推定し、道路沈下量を予測した。

液状化判定や沈下量の推定方法について検討すべき点

は多いが、図12の新たなマップは、道路の種別で液状化による沈下の程度が異なるという、被害調査結果⁷⁾と整合する傾向がよく表れている。このような液状化危険度マップは、液状化被害予測だけでなく、緊急輸送道路や避難ルートの検討など、防災戦略への有効な利活用にも適用できると考えられる。

表-1 道路種別毎の舗装・路盤厚

道路種別	道路路盤・舗装厚 H (cm)
生活道路	$H < 65$
市道の幹線道路	$65 \leq H \leq 90$
県道・国道	$H = 115$

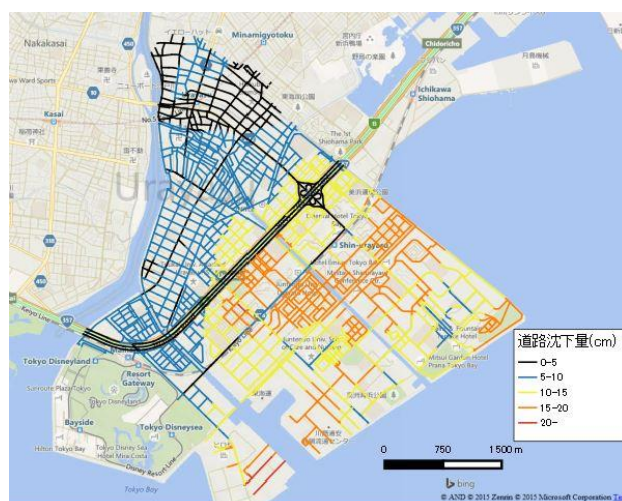


図-12 液状化による道路沈下量を予測する新たな液状化危険度マップ

7. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震により発生した千葉県浦安市の液状化を対象として、液状化ハザードマップの作成によく用いられる道路橋示方書の簡易判定により算出したPL 値と道路の沈下量の関係を251箇所抽出した。その結果、PL値が大きいほど道路沈下量も大きくなるが、同じPL値を示す場所であっても道路の舗装・路盤厚が厚いほど、沈下量は小さくなる傾向が得られた。液状化判定法や沈下量の推定方法など検討すべき点はあるが、この関係を用いて、液状化による道路の沈下量を定量的に表す新たな液状化危険度マップの作成手法を示した。

謝辞：本研究で用いたボーリング情報は、地盤工学会関東支部 浦安市における液状化対策技術検討調査委員会（委員長：東畑郁生教授）より提供していただきました。

また、液状化危険度マップの作成にあたっては、丸山昌則氏（基礎地盤コンサルタンツ株式会社）に多大なご協力をいただきました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 佐藤富男, 若松和寿江: 過去の地震における液状化による人的被害, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, pp. 1-4, 2003.
- 2) 風間基樹: 2011 年東北地方太平洋沖地震による地盤災害と復興への地盤工学的課題, 東日本大震災に関する技術講演会論文集—巨大地震・巨大津波がもたらした被害と教訓—, 宮城県沖地震対策研究協議会・東北地質調査業協会, pp.41-65, 2012.
- 3) Yasuda, S., Harada, K., Ishikawa, K., Kanemaru, Y.: Characteristics of liquefaction in Tokyo Bay area by the 2011 Great East Japan Earthquake. Soils and Foundations, Vol. 52(5): 793-810, 2012.
- 4) Konagai, K., Kiyota, T., Suyama, S., Asakura, T., Shibuya, K., Eto, C.: Maps of soil subsidence for Tokyo bay shore areas liquefied in the March 11th, 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol.53, pp 240-253, 2013. (downloaded from <http://shake.iis.u-tokyo.ac.jp/flyovers/jpn/index-DEM.html>)
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012.
- 6) 安田進, 石田栄介, 細川直行: 液状化ハザードマップにおける作成方法の現状と今後のあり方, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.65, No.1(地震工学論文集第 30 巻), pp.188-194, 2009.
- 7) 浦安市: 平成 23 年度浦安市液状化対策技術検討調査報告書, 2012.
- 8) 石川敬祐, 安田進, 萩谷俊吾: 千葉県浦安市の液状化現象の発生状況調査, 日本地震工学会論文集, 第 12 巻, 第 4 号(特集号), No.4, pp.56-64, 2012.
- 9) 防災科学技術研究所: 強震観測網 K-NET ホームページ, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>
- 10) 石川敬祐, 安田進, 五十嵐翔太: 電子地盤モデルを用いた浦安市域の東日本大震災時の液状化判定, 第 14 回日本地震工学シンポジウム, pp.2347-2356, 2014.
- 11) R. M. Pokhrel, T. Kiyota, K. Kajihara: Contribution of geotechnique to investigate the spatial variation of liquefaction potential in Urayasu City, Japan, 6th international conference on Earthquake Geotechnical Engineering, New Zealand, 2015 (to appear).
- 12) 須山翔太, 清田隆, 小長井一男: 液状化による道路構造の被害に影響する要因分析, 生産研究, Vol.64, No.6, pp.859-864, 2012.

(2015.9.11 受付)

CREATION OF A NEW LIQUEFACTION HAZARD MAP REFLECTING RELATIONSHIP BETWEEN LIQUEFACTION POTENTIAL AND LIQUEFACTION-INDUCED ROAD SUBSIDENCE OBSERVED THROUGH LIDAR SURVEY

Kazuhiro KAJIHARA, Rama Mohan POKHREL, Takashi KIYOTA and Kazuo
KONAGAI

The aim of this study is first to investigate the relationship between liquefaction potential and liquefaction-induced road subsidence that occurred in Urayasu City in the 2011 the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, and then to develop a new hazard map reflecting this relationship, which provides expected liquefaction-induced road subsidence. The liquefaction potential distribution in Urayasu City during the particular seismic event of this 2011 earthquake was evaluated with an available geotechnical data set and the values of liquefaction-induced road subsidence at 251 locations were obtained from a set of the Digital Surface Models (DSMs) from airborne LiDAR surveys before (2006) and after (2011) the 2011 earthquake. Estimated liquefaction potential values and corresponding values of liquefaction-induced road subsidence show that the subsidence values are larger in general for residential roads than those for the main roads given the same value of liquefaction potential. The obtained relationship between values of liquefaction potential and road subsidence are reflected upon a newly developed liquefaction hazard map for Urayasu City.