

数値表層モデルから観測された 液状化地盤沈下量に及ぼす諸要因の検討

上村 健太¹・清田 隆²・小長井 一男³

¹学生会員 横浜国立大学 元学生 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: uemura.k.ag@m.titech.ac.jp

²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

³正会員 横浜国立大学 教授 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)
E-mail: konagai@ynu.ac.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、東京湾沿岸部では液状化に伴う地盤沈下が広範囲に発生した。筆者らは航空レーザ測量に基づく液状化沈下マップより千葉県浦安市で生じた地盤沈下量を得た。抽出データと近傍のボーリングデータに基づく液状化判定結果、沈下量抽出箇所の地表面条件と比較し、液状化に伴う地盤沈下に及ぼす諸要因を検討した。主な結果としてPL値の増加とともに地盤沈下量も大きくなる傾向が確認されたが、同等のPL値でも未舗装地盤や住宅地内の道路での沈下量は、一般道路と比べて大きくなる傾向が得られた。沈下量の推定は液状化対象層の特性だけでなく、地表面の環境も考慮する必要があることが示唆される。

Key Words : *liquefaction, soil subsidence, PL-value*

1. はじめに

2011年3月11日、東北地方太平洋沖地震が発生し、東京湾沿岸部に位置する埋立地では、液状化に伴う地盤沈下が広範囲に発生した。このような液状化被害の想定に一般的に用いられている指標の一つに液状化指数PL値がある。しかし、入力条件となる複雑な地質条件や、継続時間・周期特性など多様な性格を示す地震動の効果をこのPL値の評価にどのように反映させるのかなど、課題は山積している。特に今回の東京湾岸地域の液状化では、震源から500kmも離れた地域で、浦安市役所で観測された最大加速度が0.15G程度であったにもかかわらず、その継続時間が著しく長かったことが、この甚大な液状化被害につながった可能性を指摘する報告もある¹⁾。

このような液状化判定指標の定量的な評価を難しくしている要因の一つに、広域の液状化による地盤の変形状況を定量的に記録したデータベースの蓄積が未だ少ないことも挙げられる。一方、この地震を受けて、Konagai et al.²⁾は、航空レーザ計測による地震前後の地表面標高から、地殻変動による影響を取り除くことで、浦安市を含む千葉県東京湾岸の液状化沈下マップを作成した。本研究ではこの液状化沈下マップを用い、液状化による地盤

沈下量の抽出を行った。抽出して得られた地盤沈下量のデータと、ボーリング調査結果に基づく液状化判定結果、沈下量抽出箇所の地表面条件との比較を行うことによって、液状化に伴う地盤沈下に及ぼす諸要因について検討した。

2. 航空レーザ計測を用いた液状化沈下マップについて

本研究で使用した液状化沈下マップは航空レーザ計測を用いて計測したデジタル地表面モデル(DSM, Digital Surface Model)を用いて作成されている。地震前(2006年12月~2007年1月)と地震後(2011年4月)のそれぞれのDSMデータの差分を用いることで液状化による地盤沈下量を得ている。

Konagai et al.²⁾は、先端支持杭をもつ構造物は地震前後で液状化による標高変化が起こっていないと仮定し、これらの構造物を不動点とみなして水平方向、鉛直方向の系統誤差や地殻変動成分を除去し、液状化による沈下量のみを抽出した(図-1)。これは、GPS衛星の天空上の配置の変化の影響や成田空港や羽田空港付近を航行する

際の高度制限の影響などの、航空レーザ計測時の様々な系統誤差が抽出データに含まれることを避けるためである。

沈下マップの精度については、現地における計測と沈下マップから抽出される沈下量の差から沈下マップの誤差を検証することで求められている。浦安市内の13点において標準誤差が計算され、その値は4.206cmであった。これは本研究で沈下量を抽出するには十分有用なデータである。図-2に沈下量の実測値と沈下マップから抽出した沈下量の差を示す。

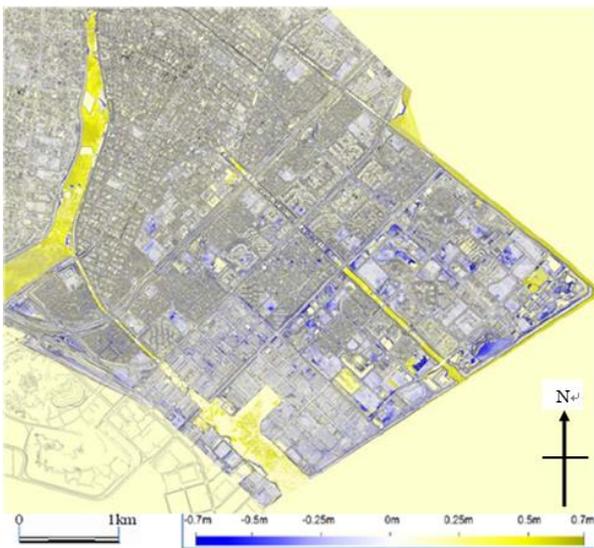


図-1 液状化沈下マップ (Konagai et al., 2013²⁾)

Mean value errors = -0.00467m
 Standard error of estimate = 0.04206m
 ■ measured ■ from subsidence map

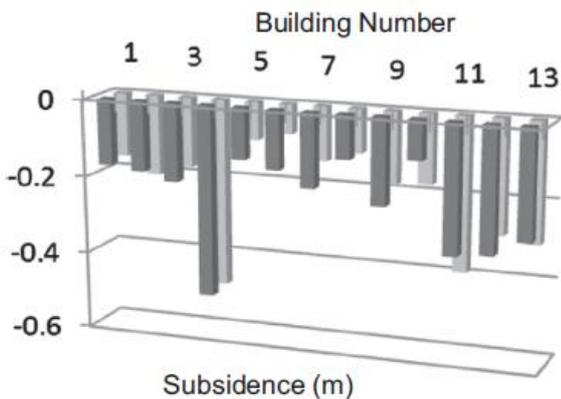


図-2 浦安市での沈下量の実測値と沈下マップから抽出した沈下量の差 (Konagai et al., 2013²⁾)

3. 検討手法

(1) ボーリング調査地点周辺における沈下量の抽出

本研究では千葉県浦安市を対象地域とした。図-3に、地震の発生後に、浦安市液状化対策技術検討委員会³⁾が市内の23箇所において行ったボーリング調査の位置を示す。

本研究ではこのボーリング調査地点を中心とする半径50mの円内において、地表面、道路、建物屋上などで地盤沈下量を抽出した。この例を図-4に示す。ボーリング調査箇所から半径50mの円内を沈下量抽出範囲としたのは、可能な限り、多様な条件での沈下量データを得るためである。なお、ボーリング柱状図、及び浦安市液状化対策技術検討委員会³⁾による工学的地盤標高コンター図、Fs層厚コンター図、As層厚コンター図、Fs層厚+As層厚コンター図より、概ね半径50m以内では地盤条件は大きく変化しないことを確認している。

各ボーリング調査地点における地表面の種別ごとの抽出した地盤沈下量の平均値と、ボーリング調査によって得られた供試体の室内試験結果を用いて、道路橋示方書⁴⁾の液状化判定に基づいて算出した液状化指数PL値⁵⁾、



図-3 ボーリング調査箇所 (google mapに加筆)

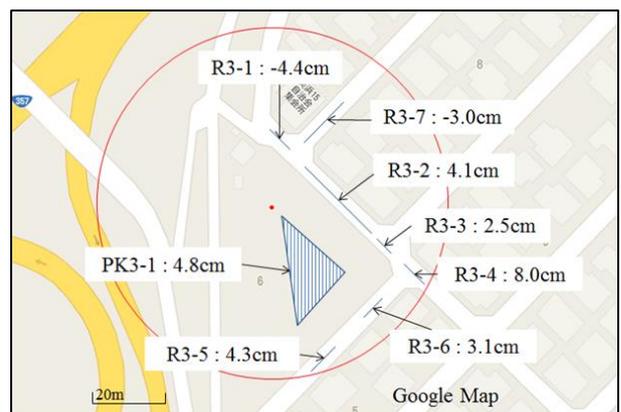


図-4 沈下量抽出箇所 (例) (google mapに加筆)

地下水位、液状化層厚、さらに建築基礎構造設計指針⁶⁾に基づいて算出した地表面変位 D_g との関係の比較を行った。

沈下量の抽出では、円内に存在する空地を対象面として設定した。道路幅員が狭い上に、街路樹などの被覆が大きく沈下データが欠損している箇所では抽出面を設定することができないため、線で抽出した。そして各抽出面や線のそれぞれで平均沈下量、標準誤差を算出した。

なお、液状化判定等に使用した入力地震動は 215.6gal とした。これは、液状化の程度が顕著であった高洲地区の代表地点において実施された応答解析による想定値³⁾である。

4. ボーリング調査地点周辺における液状化による地盤沈下量抽出結果と考察

図-5に、抽出した地盤沈下量の平均値と液状化指数 PL 値の関係を地表条件ごとに示す。本研究で言う地表条件とは、「舗装なし」、幅員が2~3m程度の「生活道路」、幅員が3~5m程度の「車用道路」を指し、この順番で表層部の高い剛性を呈する層厚が大きくなると考えられる。なお、「舗装なし」には、比較的薄い舗装を有すると考えられる駐車場の値も含んでいる。

PL 値と抽出した地盤沈下量の関係は大きくばらつく結果が得られたが、各地表条件における沈下量と PL 値の関係の上限に注目すると、局所的な値を除いて、PL 値の増加とともに沈下量も増加する傾向となっている。一方で、PL 値20以上の、比較的大きい PL 値をとる箇所でも沈下量が0~10cmの範囲に入っている箇所も見受けられる。データが大きくばらつく原因として、前述のように、今回用いた液状化判定手法の限界が挙げられるが、液状化の程度が大きかった地区では路面に大きな起伏が

生じていたことから、ばらつきも大きくなった可能性も考えられる。

地表条件別にみると、「舗装なし」の場合、PL 値の増加とともに沈下量も大きくなるものと、PL 値に依らず10cm以下の沈下量を示す2つのグループに分かれる結果となった。「生活道路」と「車用道路」では、同じ PL 値でも「舗装なし」と比較して全体的に沈下量は小さくなる傾向が得られた。これは、道路の規格が高くなることにより、表層部にある高剛性で、液状化し難い部分の層厚が増し、結果として深い部分の液状化の影響が軽減されたことによると考えられる。

図-6に、地表条件ごとに整理した地下水位と液状化層厚の関係を示す。なお、ここで示す地下水位とは、沈下量抽出箇所の水位ではなく、その地点を代表するボーリング調査における観測地下水位である。同図には、Ishihara⁷⁾が1983年に発生した日本海中部地震による液状化被害事例調査に基づいて設定した、液状化被害の有無を分ける地下水位と液状化層厚の関係も示した。

図-6の結果より、地表の被害発生を基準として沈下量10cmと仮定すると、「舗装なし」では地下水位が4m以深に存在すると液状化被害が生じなかったことを示している。同様に、「生活道路」と「車用道路」における液状化被害の有無を示す地下水位の閾値は、それぞれ2m以深、1.5m以深であった。

以上の結果より、液状化による沈下量と、液状化層厚 H_2 、地下水位 H_1 の関係には、地表条件の影響が明確に現れていることが推察される。沈下量と被害の大きさを一概に比較することは困難であるが、例えば地表に有意な被害が生じる沈下量を10cmと仮定した場合、簡易判定に基づく地下水位 H_1 を基準とした被害の有無の境界は表-1のように表されよう。

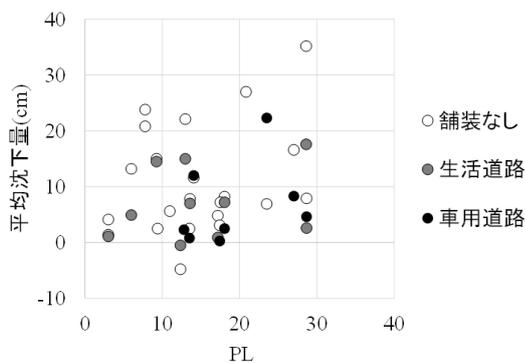


図-5 平均沈下量とPL値の関係

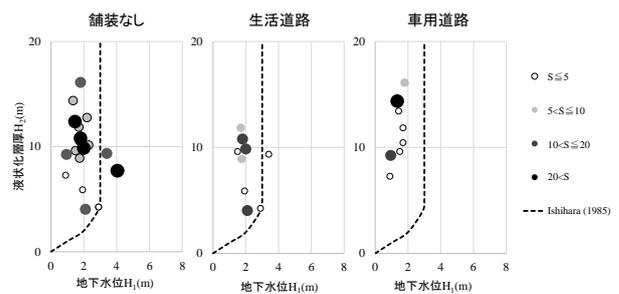


図-6 地下水位と液状化層厚の関係

表-1 地表の液状化被害の有無の境界を沈下量10cmと仮定した場合の H_1 の最小値

地表条件	H_1
舗装なし	約4m
駐車場	約4m
生活道路①	約2m
生活道路②	約1.5m

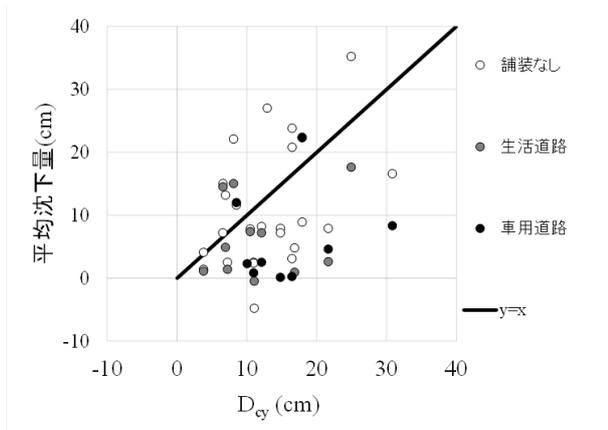


図-7 平均沈下量と D_{ey} の関係

なお、前述のようにIshihara, 1985⁷⁾によって提案された地震動発生時の液状化被害境界曲線が本研究によって抽出された沈下量と整合しない理由として、対象とする地震の規模が異なること、および舗装厚などの地表の条件を考慮していない点が考えられる。

図-7に、抽出した地盤沈下量と、建築基礎構造設計指針⁶⁾により、各抽出地点を代表するボーリングデータを用いて求めた想定沈下量（地盤変位量） D_{ey} の関係を示す。図中の直線は抽出沈下量と想定沈下量の1:1の直線であるが、沈下マップから抽出した地盤沈下量は、その両側に広くばらついている。また、全体の約7割の箇所において、 D_{ey} の値は抽出した沈下量よりも大きな値となった。その差は地表条件により異なる傾向が見られた。特に「生活道路」と「車用道路」に着目すると、 D_{ey} の値は過大であることが判る。一方、「舗装なし」と「駐車場」の回帰直線は D_{ey} と比較的よい関係があるが、その相関係数は約0.3であり、相関性はかなり弱いと言えよう。

以上の結果より、液状化による地盤沈下量は、同一地盤であっても地表の条件により大きく変わることが示され、必然的にPL値や D_{ey} との相関にもその影響が明確に現れた。

5. まとめ

本研究では、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震に伴い広範囲に発生した液状化の被害の実態を解明するべく、Konagai et al., 2013²⁾が整備してきた東京湾沿岸地域における航空レーザ計測による液状化沈下マップを用いて、千葉県浦安市で生じた地盤沈下量を得た。

ボーリング調査に基づく地盤の液状化特性と地盤沈下の関係について、沈下マップから得られたデータと、抽出箇所近傍のボーリングデータをもとに算出した建築基礎設計指針⁶⁾に基づく地表変位 D_{ey} および、道路橋示方書⁴⁾に基づく液状化判定の結果との比較を行った。その結果、以下の結論を得た。

- ・道路橋示方書に基づくPL値と抽出した地盤沈下量の相関は高くはない。しかし、PL値に対する各地表条件の最大沈下量に着目すると、PL値が大きくなるほど沈下量も大きくなり、その程度は「舗装なし」、「駐車場」が最も大きく、次いで「生活道路」、「車用道路」となる。これは、同じPL値であっても、地表条件によって被害の程度は異なることを示唆しており、実際の現象と整合する。

- ・地下水位と液状化層厚、および地盤沈下量の関係をまとめた。一般的に、表層に非液状化層厚 H_1 が3mあれば地表面の液状化被害は軽減されると言われているが、その傾向は地表条件の影響を受けることが分かった。具体的には、被害発生の閾値を沈下量10cmと仮定すると、その境界は「舗装なし」と「駐車場」では地下水位 $H_1=4m$ 程度、「生活道路」では地下水位 $H_1=2m$ 程度、「車用道路」では地下水位 $H_1=1.5m$ 程度となる。

- ・地表変位 D_{ey} は、抽出された地盤沈下量と比較して過大になる傾向がある。その傾向は地表条件の影響を大きく受け、特に地表が道路舗装で覆われている生活道路や車用道路では、 D_{ey} との差が大きくなる。

以上より、液状化に伴う地盤沈下量の推定においては、液状化対象層の特性だけでなく、当該箇所のち表面の環境も考慮する必要があることが示された。

参考文献

- 1) 安田進, 原田健二, 石川敬祐: 東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害, 地盤工学ジャーナル, Vol. 7, No. 1, pp.103-115, 2012.
- 2) Konagai, K., Kiyota, T., Suyama, S., Asakura, T., Shibuya, K. and Eto, C.: Maps of soil subsidence for Tokyo bay shore areas liquefied in the March 11th off the Pacific coast of Tohoku earthquake, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 53, pp.240-253, 2013.

- 3) 浦安市：浦安市液状化対策技術検討調査 報告書，2012.
- 4) (社)日本道路協会(2012)：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 5) 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，Vol.28, No.4, pp.23-29, 1980.
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.
- 7) Ishihara, K. : Stability of Natural Deposits During Earthquakes, Proceedings of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, Vol.1, pp.321-376, 1985.

EFFECTS OF GROUND SURFACE CONDITIONS ON LIQUEFACTION-INDUCED GROUND SUBSIDENCE OBSERVED THROUGH DIGITAL SURFACE MODELS

Kenta UEMURA, Takashi KIYOTA, and Kazuo KONAGAI

In the 2011 Off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, liquefaction-induced ground subsidence occurred widely in the Tokyo Bay shore area. The authors extracted values of ground subsidence at various locations of Urayasu from the soil-subsidence map which was obtained from Airborne LiDAR surveys before and after the earthquake. From the extracted values of soil subsidence and liquefaction potential indices calculated using borehole data, the authors examined influential factors for liquefaction-induced soil subsidence. As a result, the extent of soil subsidence correlate roughly with PL-values, liquefaction potential indices. However, it turned out that the larger the thickness of pavement, the smaller is the ground settlement. This finding suggests that ground surface conditions can affect significantly the extent of soil subsidence, which fact is to be taken into account for rational estimation of soil subsidence caused by a scenario earthquake.