

液状化に伴う直接基礎建物の沈下・傾斜評価における地盤物性の空間的不均質性の影響

上田 恭平¹・芹川 由布子²・井上 和真³

¹正会員 京都大学准教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail: ueda.kyohei.2v@kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 福井工業高等専門学校助教 環境都市工学科 (〒916-8507 福井県鯖江市下司町)

E-mail: serikawa@fukui-nct.ac.jp

³正会員 群馬工業高等専門学校准教授 環境都市工学科 (〒371-8530 群馬県前橋市鳥羽町 580)

E-mail: inoue@cvt.gunma-ct.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震では埋立地等において地盤の液状化が発生し、多くの直接基礎建物が沈下や傾斜といった被害を受けた。本研究では、隣接建物の影響は考慮せずに検討対象を1棟の直接基礎建物に限定し、自然地盤が本質的に有する土質物性の空間的不均質性を考慮したうえで、液状化による建物被害の発生メカニズムについて数値解析的に検討した。その結果、液状化に伴う直接基礎建物の沈下・傾斜評価において地盤物性の空間的不均質性の影響が無視できず、基盤面や地表面に傾斜がなく、地震動が正負対称であっても、振動後の過剰間隙水圧の消散過程が地点により異なるために建物の傾斜被害が誘発されることが明らかとなった。

Key Words : *liquefaction, direct-foundation building, settlement, inclination, soil spatial variability, finite element method*

1. はじめに

2011年3月に発生した東北地方太平洋沖地震では、東京湾沿岸部の埋立地を含む広範囲において甚大な液状化被害が発生した。戸建住宅等の直接基礎建物においても液状化に伴う沈下・傾斜被害が多数報告されており、その数は約2万7千棟にのぼる。また、2016年4月の熊本地震でも熊本市の広い範囲で液状化が発生し、戸建住宅における不同沈下の問題がクローズアップされた。液状化した地盤では、建物が全体的に傾斜し建物自身に変形が生じない一体傾斜が主な形態であるとされる。芹川ら¹⁾は熊本市の河川流域に位置する東区・南区を対象に現地調査を行い、戸建住宅の傾斜方向には地形との関係があることを指摘している。さらに、2018年9月に発生した北海道胆振東部地震においても、札幌市の広い範囲で液状化が生じ、戸建住宅の不同沈下や傾斜といった被害が多数報告されている。前述の通り液状化による建物被害は一体傾斜が主な形態であり、建物そのものの変形や破壊は生じにくい、建物が傾斜することで居住者の健康障害を誘発し、住宅としての使用性や機能性の損失に

も繋がりがねない²⁾⁴⁾。

このような液状化による建物被害の発生メカニズムを解明し被害予測につなげるため、模型実験⁵⁾⁶⁾や数値解析⁷⁾⁹⁾による研究が進められている。このうち Chaloulos⁸⁾によると、建物の沈下被害には基礎形状や基礎に作用する荷重が支配的(上部工の慣性力の影響は二次的)であり、沈下量は Arias 強度や累積絶対速度と良い相関があることが示されている。また近年では、戸建住宅の液状化被害に及ぼす隣接建物の影響(特に海外では Structure-soil-structure interaction を略して SSSI と呼ばれる)を明らかにするため、建物間の距離等を変数とした模型実験¹⁰⁾¹¹⁾や数値解析¹²⁾¹³⁾が実施されている。

しかしながら、直接基礎建物の液状化被害に関する研究において、自然地盤が本質的に有する土質物性の空間的不均質性の影響を調べた例は著者の知る限り存在しない。水平地盤の液状化挙動¹⁴⁾¹⁵⁾やそれに伴う側方流動¹⁶⁾、自立式矢板護岸の地震時挙動¹⁷⁾に対するこれまでの研究から、地盤物性の空間的不均質性が無視できない影響を及ぼすことが明らかとなっている。Chaloulos⁸⁾によれば、10~15m間隔で実施したコーン貫入試験の結果より、

同じ建物の下でも土質条件が異なることが示唆されている。そこで本研究では、検討対象を1棟の直接基礎建物に限定したうえで、地盤物性の空間的不均質性を考慮した有効応力解析を実施し、液状化による建物被害の発生メカニズムについて数値解析的に検討する。

2. 数値シミュレーションの手順

(1) 有限要素メッシュ

飽和した液状化地盤上に構築された直接基礎建物を対象に、土・水二相系の有効応力解析法による地震応答解析を実施した。解析に用いた有限要素メッシュは図-1に示すとおりであり、液状化地盤の層厚は12m、構造物の寸法は二階建ての戸建住宅を想定し高さ7m、幅10m（接地圧20kPa）に設定した。固相の境界条件として地盤底面では水平・鉛直方向の自由度を固定し、左右の側方境界条件は循環境界（自重解析時は鉛直ローラー）とした。また、地下水位面は地表面と一致させており、液相の境界条件として地表面は水圧ゼロ境界、底面および側方は不透水境界に設定した。なお、本研究では簡便のため構造物と地盤間の剥離は無視し、構造物下面と地表面間の二重節点はx,y方向ともにMPC拘束（同一自由度）とした。

解析は二段階で実施しており、まず重力の影響（構造物含む）を考慮した自重解析（静的解析）を行った後、図-2に示す加速度波形を入力とした地震応答解析（動的解析）を行った。なお、建物傾斜に与える地盤物性の空間的不均質性の影響をわかりやすくするために、本研究ではあえて正負対称の（テーパー付き）正弦波を用いることとした。

(2) 地盤の構成モデル

本研究では、液状化を考慮できる地盤の構成モデルとして、ひずみ空間多重せん断モデル（カクテルグラスモデル）¹⁹⁾を採用した。解析に用いた地盤の変形・強度定数（せん断剛性や内部摩擦角等）やダイレイタンス特性に関するモデルパラメータは、 N 値、細粒分含有率 F_c （本研究ではきれいな砂を対象とするため、 $F_c=0\%$ に設定）、および有効上載圧 σ'_v に基づき簡易パラメータ設定法（暫定版）¹⁹⁾により設定した。この簡易パラメータ設定法は、対象が直接基礎建物ではないものの、液状化地盤上に構築された盛土の地震時挙動を対象にその適用性が検証されている²⁰⁾。なお、後述のように、本研究では液状化地盤の代表的な物性値として相対密度 D_r の空間的な変動を考慮している。簡易パラメータ設定法の適用にあたっては、三上ら²¹⁾を参考に、Cubrinovski & Ishihara²²⁾による以下の経験式を用いて D_r を N 値に変換した。

$$D_r = \left\{ \frac{N(e_{\max} - e_{\min})^{1.7} \left(\frac{98}{\sigma'_v} \right)^{1/2}}{9} \right\}^{1/2} \quad (1)$$

これにより、 D_r の空間変動を与えることで、 N 値（および F_c と σ'_v ）を介して液状化強度に関しても空間的な不均質性を考慮することができる。

(3) 地盤物性の空間的不均質性のモデリング

空間的な不均質性を有する地盤物性として、本研究では相対密度 D_r を取り上げる。なお、先に述べたように D_r を N 値に変換したうえで簡易パラメータ設定法を適用するため、地盤の変形・強度定数やダイレイタンス特性に関しても、 D_r に応じて空間的な変動を有する結果となる。空間的な不均質性のモデリング方法は、水平地盤¹⁵⁾ や自立式矢板護岸¹⁷⁾ を対象にしたこれまでの研究と同様のため、詳細についてはこれらの文献を参照されたい。

図-1の液状化層において実現された相対密度の不均質な空間分布を図-3に示す。全18ケースのいずれにおいても D_r の平均値は60%であり、青色が濃いほど60%より緩い領域、赤色が濃いほど60%より密な領域であることを示している。

3. 数値シミュレーション結果

本研究では建物が全体的に傾斜し建物自身に変形が生じない一様傾斜を対象としており、構造物は剛であると仮定しその変形は許容していない。したがって、不同沈下や傾斜を定量的に評価するためには、構造物の左右上

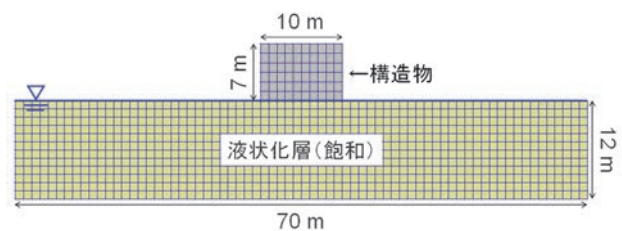


図-1 有限要素メッシュ

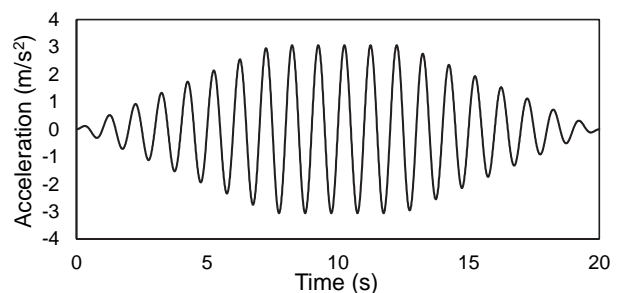


図-2 入力地震動

端における変位量を求めれば十分である。図-4と図-5に、左右上端における水平変位量（右方向を正）および沈下

量（下方向を正）の比較をそれぞれ示す。それぞれの図において、縦軸は左上端での変位量，横軸は右上端で

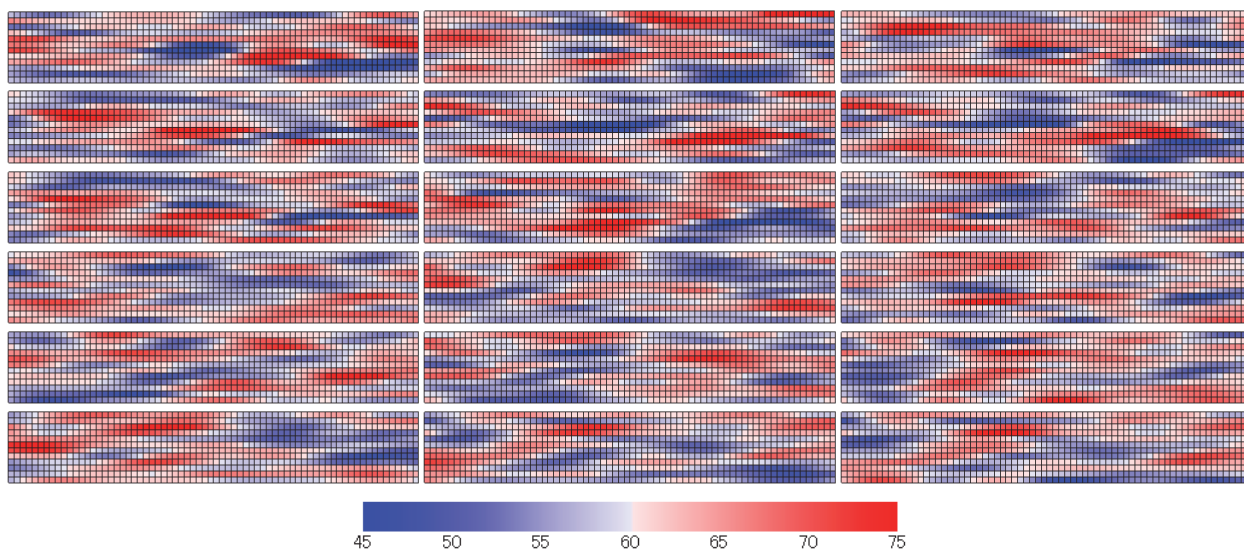
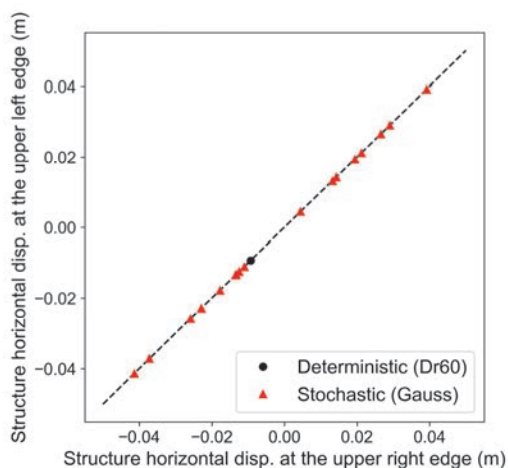
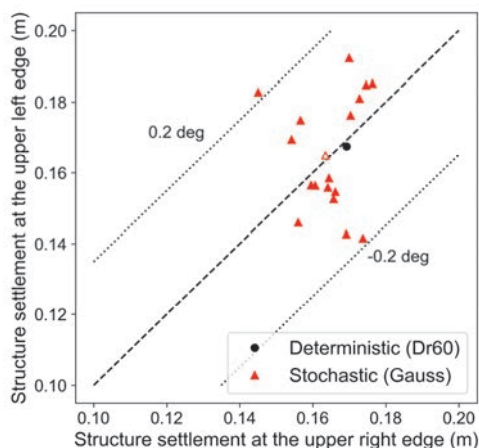


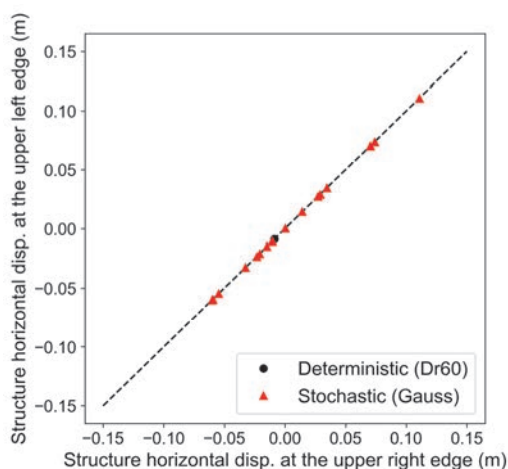
図-3 相対密度の空間的不均質性



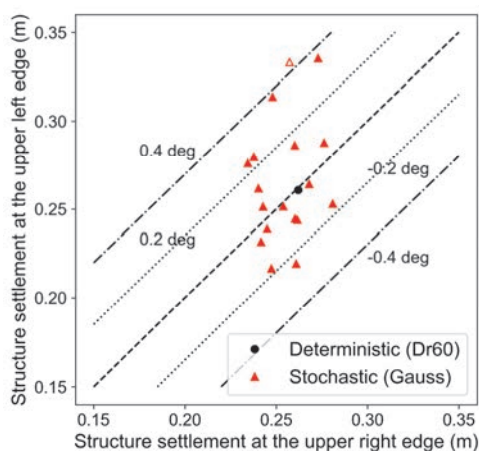
(a) 加振直後



(a) 加振直後



(b) 過剰間隙水圧消散後



(b) 過剰間隙水圧消散後

図-4 構造物の左右上端における水平変位量の比較

図-5 構造物の左右上端における沈下量の比較

の変位量である。また、図中の黒丸は均質地盤の（すなわち、液状化層の全てのメッシュで $D_r = 60\%$ に設定した）ケースに、赤三角は図-3 に示すように D_r の空間的な不均質性を考慮したケースに対応している。

まず、図-4(a)に示す加振直後（20秒）における水平変位量のグラフを見ると、いずれのプロットも1対1の直線上に位置しており、これは構造物の左・右上端間での相対水平変位がほぼゼロであることを示している。そのため、図-5に示す沈下量の差（相対沈下量）を不同沈下や傾斜の指標とみなすことができる。図-4(b)に示す過剰間隙水圧消散後（1,500秒）のプロットについても、加振直後と同様に左・右上端間での相対水平変位はほぼゼロである。

次に、図-5に示す沈下量の比較より、加振直後（同図(a)）および間隙水圧消散後（同図(b)）のいずれにおいても、均質地盤のケース（黒丸）では相対沈下量がほぼゼロであることがわかる。これは構造物に傾斜が生じていないことを意味しており、地盤（基盤面や地表面等）が水平で、構造物そのものに偏心がなく、入力地震動が正負対称である場合には、 D_r が空間的に均質な地盤では傾斜被害が生じないと言える。他方、 D_r の空間的な不均質性を考慮したケース（赤三角）では、加振直後において最大で ± 0.2 度程度（反時計回りを正）、間隙水圧消散後においては最大で ± 0.4 度程度の構造物の傾斜が生じている。傾斜角 0.4 度は一見すると小さく思われるものの、既往の研究^{3),4)}によると、めまい等の健康障害を誘発する場合もあり無視できない傾斜被害である。図-5では D_r の空間変動を考慮してもほとんど傾斜が生じないケースも存在するが、地盤が水平で、構造物そのものに偏心がなく、入力地震動が正負対称であったとしても、地盤物性の空間的な不均質性により建物の不同沈下や傾斜といった液状化被害が生じることが示唆される。

ここで、図-5において白抜き赤三角で示すケースでは、加振直後にはほぼ傾斜が生じていないにもかかわらず、過剰間隙水圧消散後には約 0.4 度の傾斜が誘発されている。このことは、建物の不同沈下や傾斜被害を考える際に、振動中の（動的な）変位と振動後の過剰間隙水圧の消散に伴う（静的な）変位を切り分けて考える必要性を示している。図-6および図-7は、均質地盤と不均質地盤

（図-5における白抜き赤三角のケース）における過剰間隙水圧比分布のスナップショットの比較である。構造物そのものに偏心がなく、入力地震動が正負対称なため、均質地盤においては過剰間隙水圧比の分布が常に左右対称で推移していることがわかる。一方、不均質地盤では、加振直後（図-7(a)）における過剰間隙水圧比分布は概ね左右対称となっている。しかしながら、同図(b)～(e)に示すように、振動後は構造物の右下の領域において過剰間隙水圧の消散が早く、右下と比べて左下の領域では水

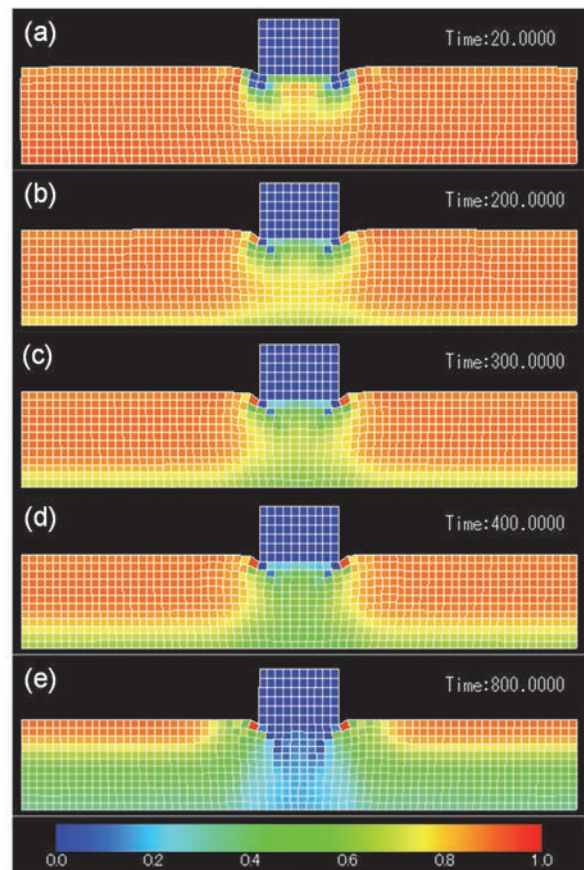


図-6 均質地盤における過剰間隙水圧比の分布

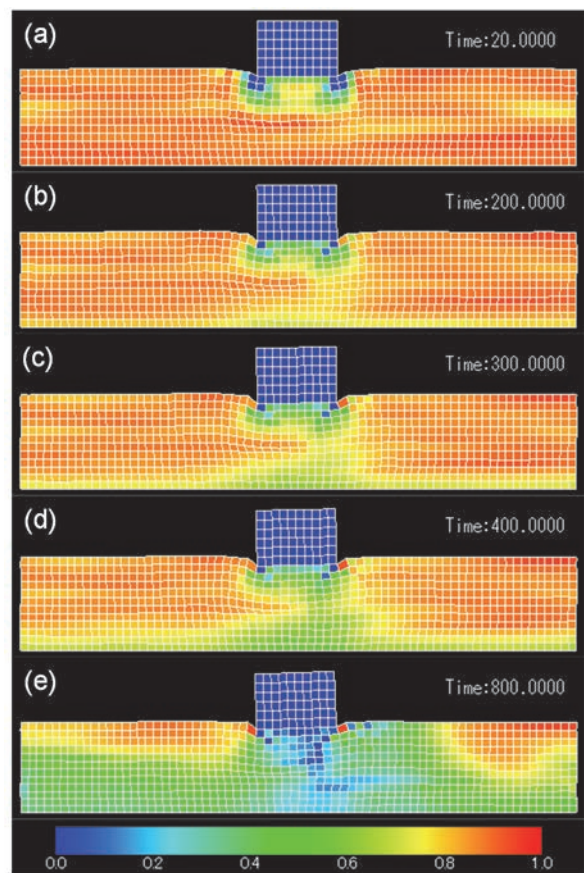


図-7 不均質地盤における過剰間隙水圧比の分布

圧が残留していることが確認できる。このため、過剰間隙水圧比が高い、すなわち地盤の剛性や抵抗が小さい左下の領域に向かって構造物が静的に傾斜していくものと考えられる。

4. 結論

本研究では、沈下や傾斜といった直接基礎建物の液状化被害に及ぼす地盤物性の空間的不均質性の影響を明らかにするため、液状化地盤上に構築された1棟の直接基礎建物を対象に、地盤の相対密度の空間変動を考慮した有効応力解析を実施した。その結果、液状化に伴う直接基礎建物の沈下・傾斜評価において、地盤物性の空間的不均質性の影響が無視できないことが示された。基盤面や地表面に傾斜がなく、地震動が正負対称であったとしても、振動後の過剰間隙水圧の消散過程が地点により異なるため、建物の不同沈下や傾斜といった被害が誘発されることが明らかとなった。

謝辞：本研究は、東京大学地震研究所・京都大学防災研究所、拠点間連携共同研究プログラムの援助をうけました。

REFERENCES

- 1) 芹川由布子, Setiawan Hendra, 中村満, 宮島昌克, 吉田雅穂：2016年熊本地震による住宅の液状化被害に関する調査的研究, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), 73巻, 4号, pp. I_601-I_607, 2017. [Serikawa, Y., Setiawan, H., Nakamura, M., Miyajima, M. and Yoshida, M.: Damage to Houses and Buildings Induced by Liquefaction in the 2016 Kumamoto Earthquakes in Japan, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 73, Issue 4, pp. I_601-I_607, 2017.]
- 2) Yasuda, S. and Ariyama, Y.: Study on the mechanism of the liquefaction-induced differential settlement of timber houses occurred during the 2000 Tottoriken-seibu earthquake, *Proc. of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, Paper No. S26-0212, 2008.
- 3) 小檜山雅之, 系野智奈美, 園部隆夫：千葉市美浜区における液状化被害を受けた住民への健康障害に関するヒアリング調査, 地域安全学会論文集, 17巻, pp. 145-151, 2012. [Kohiyama, M., Keino, C. and Sonobe, T.: Questionnaire Survey on Health Disturbance of Residents in Mihama Ward, Chiba City who Suffered Housing Damage Due to Liquefaction, *Journal of Social Safety Science*, Vol. 17, pp. 145-151, 2012.]
- 4) 芹川由布子, Setiawan Hendra, 中村満, 宮島昌克, 吉田雅穂：液状化による住宅の傾斜が住民の健康障害に及ぼす影響—2016年熊本地震の事例—, 地域安全学会論文集, 31巻, pp. 11-17, 2007. [Serikawa, Y., Setiawan, H., Nakamura, M., Miyajima, M. and Yoshida, M.: Effects of Inclination of Houses induced by Liquefaction on Health Problem of Residents - Case Study in the 2016 Kumamoto Earthquake -, *Journal of Social Safety Science*, Vol. 31, pp. 11-17, 2007.]
- 5) 安田進, 深谷成司：隣接した直接基礎構造物の液状化による不同沈下について, 地震工学研究発表会報告集, 28巻, 2005. [Yasuda, S. and Fukaya, S.: Differential Settlement of Adjacent Two Spread Foundations due to Soil Liquefaction, *Proc. 28th JSCE Earthquake Engineering Symposium*, 2005.]
- 6) Kassas, K., Adamidis, O. and Anastasopoulos, I.: Shallow strip foundations subjected to earthquake-induced soil liquefaction: Validation, modelling uncertainties, and boundary effects, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 147, 106719, 2021.
- 7) 金田一広, 内田明彦：直接基礎建物の液状化による沈下評価に関する一考察, 日本地震工学会論文集, 19巻, 6号, pp. 116-128, 2019. [Kaneda, K. and Uchida, A.: A Study on Prediction of Settlement for Spread Foundation Building by Liquefaction, *Journal of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol. 19, Issue 6, pp. 116-128, 2019.]
- 8) Chaloulos, Y. K., Giannakou, A., Drosos, V., Tasiopoulou, P., Chacko, J. and de Wit, S.: Liquefaction-induced settlements of residential buildings subjected to induced earthquakes, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 129, 105880, 2020.
- 9) Alzabeebee, S. and Forcellini, D.: Numerical Simulations of the Seismic Response of a RC Structure Resting on Liquefiable Soil, *Buildings*, Vol. 11, Issue 9, 379, 2021.
- 10) Barrios, G., Uemura, K., Kikkawa, N., Itoh, K., Larkin, T., Orense, R. and Chouw, N.: Dynamic response of stand-alone and adjacent footing on saturated sand, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 143, 106584, 2021.
- 11) Barrios, G., Larkin, T. and Chouw, N.: Influence of Excess Pore-pressure on the Seismic Response of Single and Closely Adjacent Structures on Saturated Sand, *Journal of Earthquake Engineering*, DOI: 10.1080/13632469.2021.1991524, 2022.
- 12) 中井健太郎, 野田利弘, 大庭拓也：戸建て住宅の液状化被害に及ぼす隣家の影響, 土木学会論文集A2(応用力学), 75巻, 2号, pp. I_401-I_410, 2019. [Nakai, K., Noda, T. and Ohba, T.: Influence of Neighboring Houses on Liquefaction Damage of Detached Houses, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A2 (Applied Mechanics)*, Vol. 75, Issue 2, pp. I_401-I_410, 2019.]
- 13) Kassas, K., Adamidis, O. and Anastasopoulos, I.: Structure-soil-structure interaction (SSSI) of adjacent buildings with shallow foundations on liquefiable soil, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 51, Issue 10, pp. 2315-2334, 2022.
- 14) Popescu, R., Prevost, J. H. and Deodatis, G.: Effects of spatial variability on soil liquefaction: some design recommendations, *Géotechnique*, Vol. 47, Issue 5, pp. 1019-1036, 1997.
- 15) Vargas, R. R., Ueda, K. and Iai, S.: Effects of Soil Spatial Variability on Liquefaction Behavior of Horizontally

- Layered Ground, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 74, Issue 4, pp. I_16-I_24, 2018.
- 16) Montgomery, J. and Boulanger, R. W.: Effects of spatial variability on liquefaction-induced settlement and lateral spreading, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 143, Issue 1, 04016086, 2017.
 - 17) Hong, H. K., Tanaka, Y., Sahare, A. and Ueda, K.: Effects of Soil Spatial Variability on Dynamic Behavior of Sheet-pile Supported Ground, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering)*, Vol. 78, Issue 4, 2022.
 - 18) Iai, S., Tobita, T., Ozutsumi, O. and Ueda, K.: Dilatancy of granular materials in a strain space multiple mechanism model, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.*, Vol. 35, Issue 3, pp. 360-392, 2011.
 - 19) 植村一瑛, 一井康二, 井合進: 液状化解析プログラム FLIP のカクテルグラスモデル簡易パラメータ設定法 (暫定版), 第 57 回地盤工学研究発表会, 講演番号 20-11-4-05, 2022. [Uemura, K., Ichii, K. and Iai, S.: Simplified Parameter Setting on Cocktail Glass Model for FLIP, *The 57th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 20-11-4-05, 2022.]
 - 20) 遠藤秀祐, 佐藤恭平, 長谷川悠, 兵頭順一, 植村一瑛, 上田恭平: 液状化解析プログラム FLIP のカクテルグラスモデル簡易パラメータ設定法 (暫定版) を用いた事例解析—盛土遠心模型実験—, 第 57 回地盤工学研究発表会, 講演番号 20-11-4-06, 2022. [Endo, S., Sato, K., Hasegawa, Y., Hyodo, J., Uemura, K. and Ueda, K.: Application of Simplified Parameter Setting on Cocktail Glass Model for FLIP - Centrifuge Model Test on Embankment -, *The 57th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, 20-11-4-06, 2022.]
 - 21) 三上武子, 小堤治, 中原知洋, 井合進, 一井康二, 川崎栄久: 液状化解析プログラム FLIP のパラメータの簡易設定法 (再訂版) の構築, 第 46 回地盤工学研究発表会, pp. 1627-1628, 2011. [Mikami, T., Ozutsumi, O., Nakahara, T., Iai, S., Ichii, K. and Kawasaki, T.: Easy method for setting parameters of liquefaction analysis program FLIP, *The 46th Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 1627-1628, 2011.]
 - 22) Cubrinovski, M. and Ishihara, K.: Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol. 39, Issue 5, pp. 61-71, 1999.

EFFECT OF SOIL SPATIAL VARIABILITY ON THE EVALUATION OF SETTLEMENT AND INCLINATION OF DIRECT-FOUNDATION BUILDINGS ASSOCIATED WITH LIQUEFACTION

Kyohei UEDA, Yuko SERIKAWA and Kazuma INOUE

The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake and the 2016 Kumamoto Earthquake caused liquefaction in reclaimed land, which led to damage such as settlement and inclination of many direct-foundation buildings. In this study, the mechanism of building damage due to liquefaction was numerically investigated by considering the spatial variability of soil properties inherent to the natural ground and limiting the study to one direct-foundation building without considering the influence of adjacent buildings. The analytical results have demonstrated that the influence of spatial variability of soil properties cannot be ignored in evaluating the settlement and inclination of a direct-foundation building due to liquefaction. The dissipation process of excess pore water pressure after shaking differs from point to point in the heterogeneous ground, which induces inclination damage to the building even when there is no tilt in the base or ground surface and the earthquake motion is positively and negatively symmetrical.