

地盤と地下構造物の動的相互作用による 地表面沈下に関する研究 —その7 過剰間隙水圧消散に伴う地盤の 変形解析に関する基礎検討—

大矢 陽介¹・小濱 英司²

¹正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: ooya-y@p.mpat.go.jp (Corresponding Author)

²正会員 港湾空港技術研究所 地震防災研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

E-mail: kohama-e83ab@p.mpat.go.jp

2011年東北地方太平洋沖地震の際、空港誘導路において地下構造物周辺の直上地盤で局所的な沈下被害が発生した。筆者らは、地盤と地下構造物の動的相互作用に起因する地表面沈下メカニズムの検討を行っている。これまで、砂地盤内に地下構造物模型を設置した1g場模型振動実験を実施し、液状化地盤のひずみ履歴と地表面沈下量の関係性を評価した。また、地震応答解析により模型振動実験で得られた地下構造物周辺地盤のひずみ履歴を再現できることを確認した。本稿では、地震動作用後の過剰間隙水圧消散に伴う地盤の変形解析について検討した。

Key Words: *liquefaction, shake table test, seismic response analysis, underground structure*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震の際、空港誘導路において地下構造物周辺の直上地盤で局所的な沈下被害が発生した¹⁾。筆者らは、被災事例で見られた地盤と地下構造物の動的相互作用に起因する地表面沈下メカニズムの検討を行っている。これまで、砂地盤内に地下構造物模型を設置した1g場模型振動実験を実施し、液状化地盤のひずみ履歴を評価し²⁾、ひずみ履歴より推定した地表面沈下量について実験値と比較した³⁾。地盤と地下構造物の動的相互作用によって発生する地盤の累加せん断ひずみを評価することで、被災事例で見られた地下構造物近傍の局所的に地表面沈下量が大きくなる地震時挙動を表現できることを示した。

次に、地盤と地下構造物の動的相互作用によって発生する地表面沈下の予測を目的に数値解析を行い、模型振動実験で得られた液状化地盤のひずみ履歴と比較した。地盤および地下構造物のモデル化方法の検討⁴⁾、解析手法の比較を行い⁵⁾、ひずみ履歴を評価するためのフィルタ処理について数値解析⁶⁾および模型振動実験⁷⁾で検討

し、模型振動実験で得られた液状化地盤のひずみ履歴を有効応力解析で再現できることを確認した。

本稿では、有効応力解析で得られた液状化地盤のひずみ履歴を利用した過剰間隙水圧消散に伴う地盤の変形解析について報告する。

2. 検討対象

(1) 模型振動実験

検討対象は、高さ2m、幅4mの鋼製剛土槽を用いた縮尺比1/15の大型模型実験である。図-1に模型寸法と計測センサーの配置を示す。実験条件の詳細は、文献2)を参照されたい。実験では加振直後から過剰間隙水圧が上昇し、砂層の全域で液状化したことが確認された。また、地下構造物近傍では地盤のひずみ履歴が大きくなり、地表面沈下量が大きくなったことも確認された。

(2) 地震応答解析

変形解析に用いた解析モデルは、地震応答解析で構造

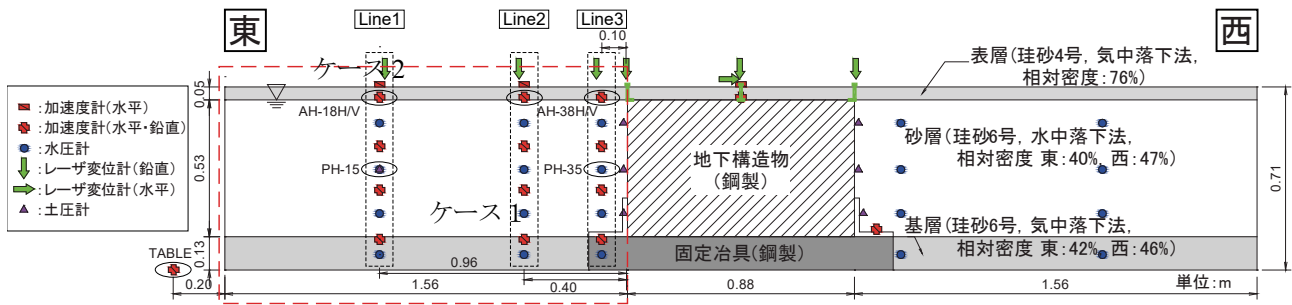


図-1 大型模型実験の断面図とセンサー配置

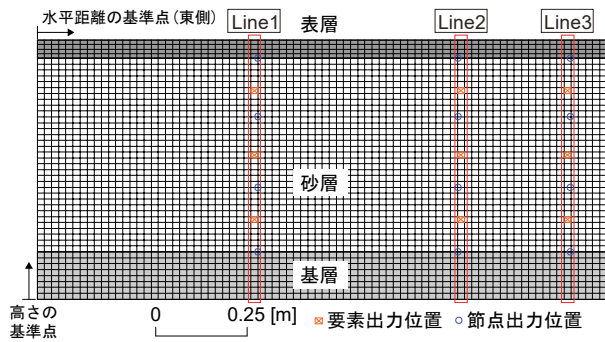


図-2 メッシュ図⁸⁾

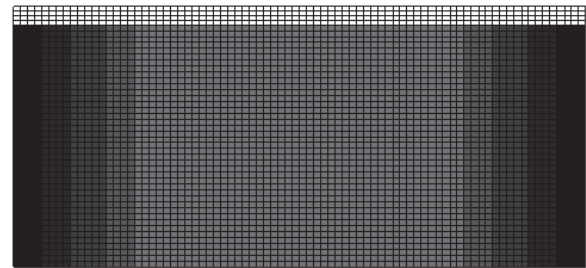


図-3 累加せん断ひずみ分布 (地震時発生分)
(中央: 50%, 端部: 100%)

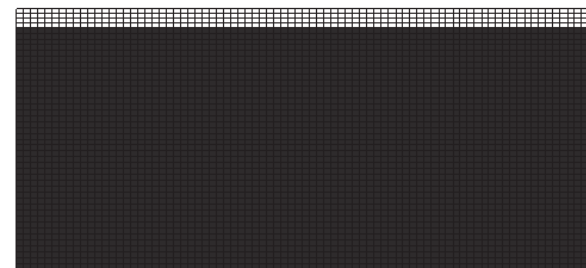


図-4 過剰間隙水圧比分布 (地震後)
(Case2 水圧比 0.995 の場合)

物近傍について、ひずみ履歴が模型振動実験と整合した結果が得られたモデル⁸⁾を用いた。図-2 にメッシュ図を示す。解析では地盤と地下構造物との摩擦は無視し、地下構造物と周面部はモデル化せず、図-1 の枠内に示す東側の地盤のみをモデル化した。

3. 変形解析手法

(1) 解析手法

本研究では、地震応答解析で得られた地盤のひずみ履歴、過剰間隙水圧を利用し、地震動作用後の過剰間隙水圧消散に伴う地盤の変形を評価するための解析プログラムを開発した。土と水の二相系を扱う Biot の式の有限要素法の定式化として $u-p$ 形式を採用した。

(2) 入力条件

プログラムは地震後から過剰間隙水圧が消散する過程を評価するために、地震前後の応力状態に加えて地震中のひずみ履歴を必要とする。空港舗装施設の耐震設計に用いられている地震後の変形解析手法においては、過剰間隙水圧を含む応力状態を入力条件とする場合が一般的であるが、本プログラムではひずみ履歴が必要となる点が特徴的である。

地震応答解析の結果として、有効応力解析コード FLIP⁹⁾等のアウトプットを利用することを想定しているが、本稿では検証のため簡易な応力状態、ひずみ履歴を

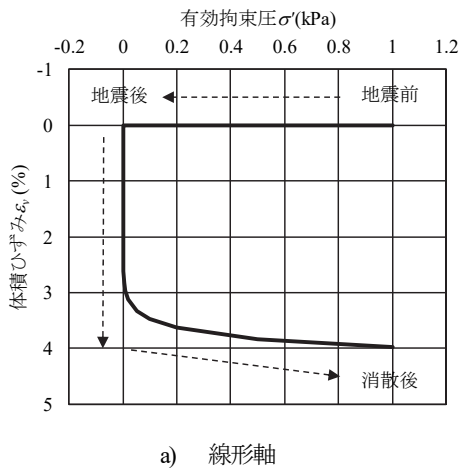
用いた。模型振動実験結果を参考に、累加せん断ひずみは構造物近傍で他より大きくなるよう、モデル中央に対してモデル端部で 2 倍の値を設定した (図-3)。過剰間隙水圧比は、砂層および基層全体で液状化したため均一な過剰間隙水圧比の分布を設定した (図-4)。なお、ここで過剰間隙水圧比は、地震前の有効拘束圧に対する現在までの有効拘束圧の変化の比を示している。図は地震後の状態で、変形解析の初期の応力状態である。

(3) 体積変化特性モデル

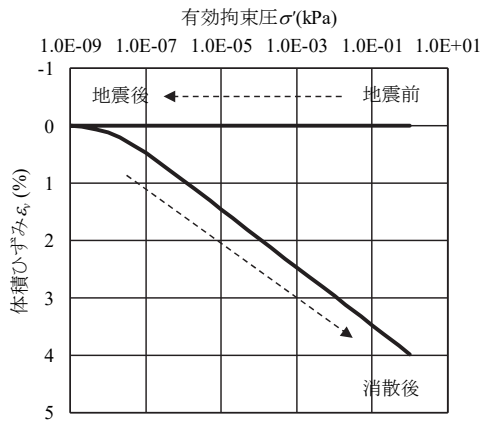
体積変化特性は、液状化から過剰間隙水圧の消散に至る過程を考慮できるモデル¹⁰⁾を用いた。図-5 に有効拘束圧と体積ひずみの関係を示すように、過剰間隙水圧の消

表-1 検討ケース一覧

パラメータ		Case1	Case2	Case3	Case4
変形特性	間隙率 n	0.421			
	基準拘束圧 σ'_{ma} (kN/m ²)	2.4			
	せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	体積弾性係数とポアソン比より			
	ポアソン比 ν	0.33			
体積変化特性	パラメータ c_0	地震前の拘束圧と体積弾性係数より			
	パラメータ c_1	0.053		0.530	
	パラメータ ε_{vd0}	累加せん断ひずみより			
圧密条件	透水係数 k (cm/s)	0.0075			
	過剰間隙水圧比 R_{int}	0.950	0.995	0.99999	0.995



a) 線形軸



b) 対数軸

図-5 体積変化特性

散過程では、拘束圧が小さいところで体積ひずみが大きく発生し、拘束圧が大きいところでは、 $e\text{-}\log\sigma'$ 平面で直線で表される圧密解析で用いられるモデルと整合する。また、液状化後の過剰間隙水圧の消散に伴う体積ひずみ量は、非排水条件下のダイレイタンスーによる体積ひずみ量より評価する。本検討では、既往の検討結果³⁾をふまえて地震中の累加せん断ひずみから、過剰間隙水圧の消散に伴う体積ひずみを設定した(図-6)。モデル中央(累加せん断ひずみ50%)では体積ひずみ3.3%、モデル

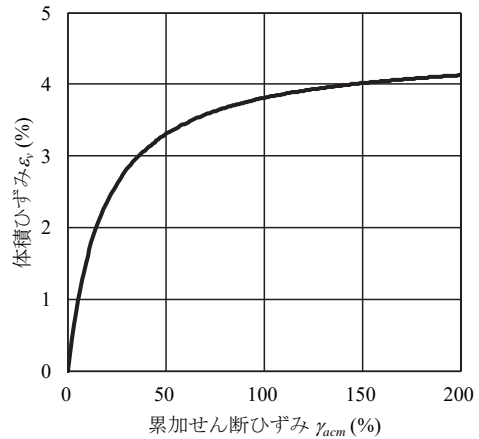


図-6 累加せん断ひずみと体積ひずみの関係

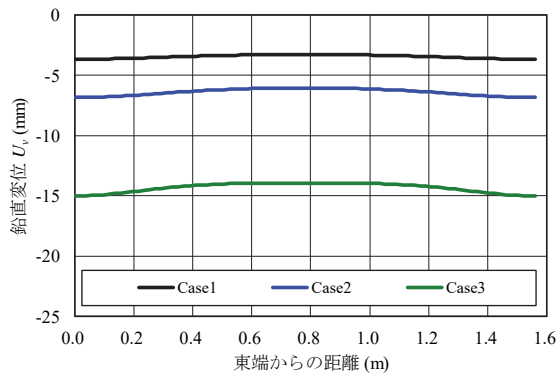
端部(累加せん断ひずみ100%)では体積ひずみ3.8%の設定となる。体積ひずみは要素毎に累加せん断ひずみから設定し、せん断剛性は体積弾性係数に対して線形比例の関係とした。

なお、非線形の体積変化特性モデルは砂層および基層に対して設定し、表層については線形弾性体とした。

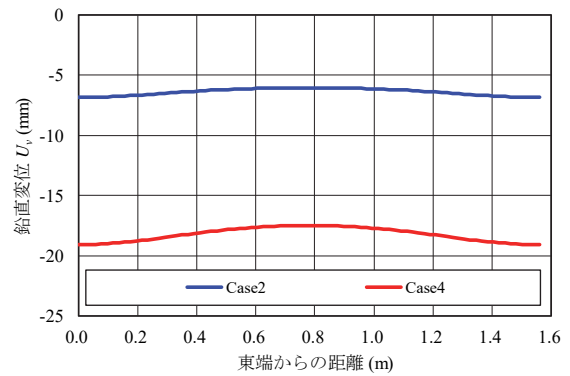
(4) 検討ケース

検討したケース一覧を表-1に示す。体積変化特性のパラメータ c_0 は地震応答解析で用いた値、 c_1 は試験結果とのフィットで設定した値¹⁾、 ε_{vd0} は地震応答解析の累加せん断ひずみと図-6から設定した値である。

Case1, Case2 および Case3 は、解析初期状態(地震後)の過剰間隙水圧比が異なるケースであり、それぞれ室内試験で液状化の判断基準となる過剰間隙水圧比、FLIPで有効拘束圧の下限に相当する過剰間隙水圧比、本条件で計算できた最大の過剰間隙水圧比である。各ケースの計算結果は後述するが、初期状態の過剰間隙水圧比の違いが沈下量に影響したため、過剰間隙水圧比を変えた3ケースを設定した。また、3ケースに加えて、沈下量が大きくなるよう応力-ひずみ関係の勾配を変えたCase4を設定した。

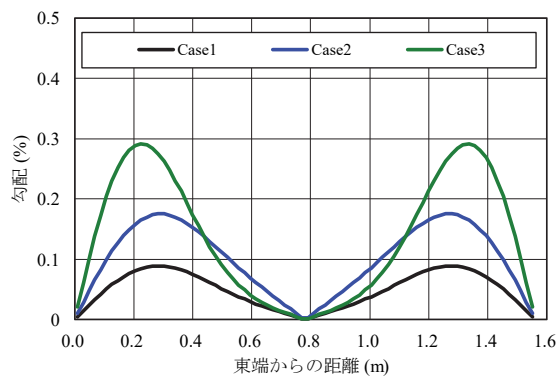


a) 過剰間隙水圧比の違い

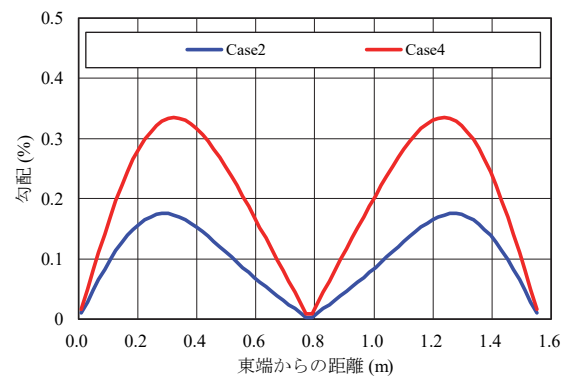


b) パラメータ c_1 の違い

図-7 地表面の鉛直変位



a) 過剰間隙水圧比の違い



b) パラメータ c_1 の違い

図-8 地表面の勾配

4. 解析結果

解析は模型スケールで実施し、以降の解析結果についても模型スケールで示す。

(1) 地表面の沈下

過剰間隙水圧消散後の地表面の鉛直変位を図-7 a)、地表面の勾配を図-8 a)に示す。全てのケースに共通して、モデル中央よりもモデル端部で鉛直変位が大きく、中央と端部の変位の差は、変位量が大きいほど大きくなった。過剰間隙水圧は全ての要素で均一としたため、過剰間隙水圧だけを評価しただけでは、地表は表層は一様に沈下するため、モデル端部（構造物近傍）で沈下量が大きくなった要因は、地盤のひずみ履歴を体積ひずみの評価に用いたことにある。

地表面の勾配は鉛直変位が大きくなるほど大きくなり、勾配が大きくなるピークはモデル端部側へ移動した。勾配は端部では小さくなり、地表が平らなままとなっていることが分かる。理由として、本検討では表層を線形弾性体としたため、勾配が大きくなるような変形に対して抵抗したと考えられる。

全てのケースの過剰間隙水圧比は液状化状態と言える

ほど大きな値ではあるが、過剰間隙水圧消散に伴う沈下量は累加せん断ひずみから推定可能な沈下量と比べて小さい結果となった。液状化層厚および累加せん断から設定した体積ひずみから、モデル中央で 22mm、モデル端部で 25mm の沈下量が期待でき、沈下量が一番大きかった Case3 の端部の沈下量 15mm でも過小評価になっていることは明らかである。

(2) 過剰間隙水圧比の影響

初期状態の過剰間隙水圧比の少しの違いで、沈下量が大きく違った点について、有効拘束圧 1kPa の要素を対象に応力-ひずみ関係を別途計算した。過剰間隙水圧消散時の体積ひずみと有効拘束圧の関係を線形軸と対数軸に分けて図-9 a)および図-10 a)に示す。

本検討パラメータでは、図-5 a)に示すような低い拘束圧で応力-ひずみ関係の勾配が大きくなる過剰間隙水圧消散時の応力-ひずみ関係が決まる。次に、初期状態の有効拘束圧は任意に設定されることから、例えば、Case3（初期拘束圧 0.00001）の地震後～消散後の応力-ひずみ関係の位置は、図-5 b)より体積ひずみが約 1.5% の位置となり、ここをスタートして体積ひずみが増えるので、過剰間隙水圧消散までに発生する体積ひずみは

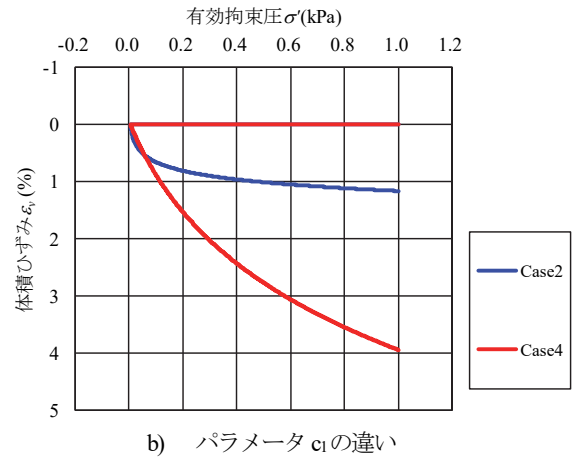
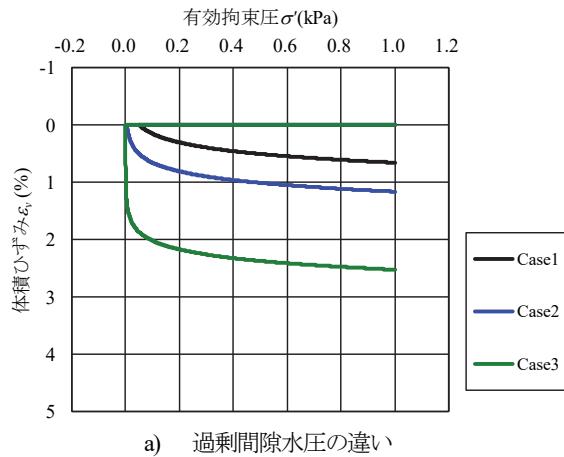


図-9 過剰間隙水圧消散時の体積ひずみと有効拘束圧の関係 (線形軸)

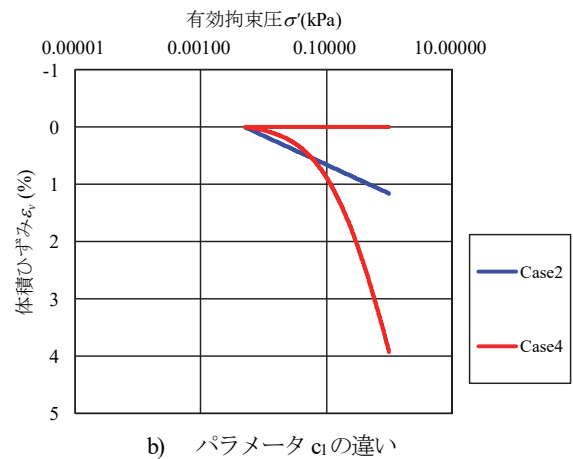
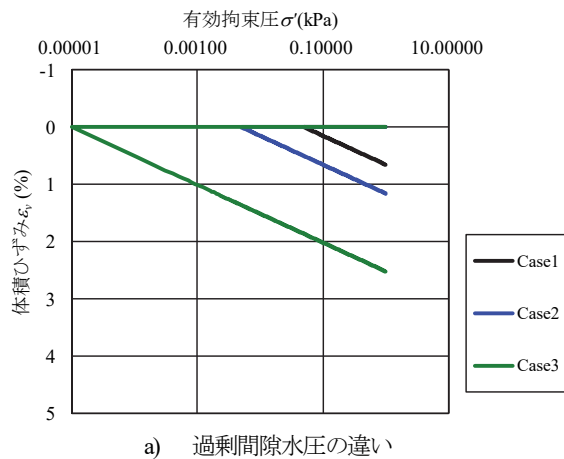


図-10 過剰間隙水圧消散時の体積ひずみと有効拘束圧の関係 (対数軸)

1.5%程度少なくなる。Case3 よりも過剰間隙水圧比が小さく、初期状態の有効拘束圧が大きな Case1 や Case2 では更に体積ひずみは小さくなることから、図-9 a)より明らかである。

(3) パラメータの影響

パラメータ c_1 を変えた検討を Case4 として行った。パラメータは図-9 b)の関係より、過剰間隙水圧消散による体積ひずみが3.8%近く発生するよう設定した。図-7および図-8 に過剰間隙水圧比が同じ Case2 の結果と比較した。パラメータ c_1 の調整により、沈下量は大幅改善された。低拘束圧での勾配が緩やかとなり、初期状態での体積ひずみが小さく評価され、過剰間隙水圧消散による体積ひずみが大きくなったことが原因と考えられる。

5. おわりに

地震動作用後の過剰間隙水圧消散に伴う地盤の変形解

析手法を開発し、地盤のひずみ履歴を評価することで、構造物近傍の局所的に沈下量が大きく評価できることを確認した。

沈下量に対する影響が大きかった低拘束圧で応力-ひずみ関係の勾配が大きい点は、採用した体積変化特性モデルの特徴であるが、室内試験で確認できる砂の応力-ひずみ関係の特徴でもある¹²⁾。また、有効応力解析においては、残留ひずみやサイクリックモビリティの影響により、解析終了時の過剰間隙水圧比が必ずしも1とならず、場所によってばらつく結果は容易に起こりうる。

液状化地盤の変形評価においては、低拘束圧の体積変化特性および応力状態が重要となり、地表面沈下量に影響を及ぼすことを明らかにした。

REFERENCES

- 1) 坪川将丈, 水上純一, 畑伊織, 前川亮太: 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による仙台空港の舗装に関する被害報告, 国土技術政策総合研究所資料, No. 680, 20pp., 2012.
- 2) 大矢陽介, 小濱英司, 佐伯嘉隆, 佐藤成: 地盤と地

- 下構造物の動的相互作用による地表面沈下に関する研究－地盤のひずみ履歴に関する模型振動実験－，第 51 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.1759-1760，2016.
- 3) 大矢陽介，小濱英司：地盤と地下構造物の動的相互作用による地表面沈下に関する研究－その 2 模型振動実験における液状化地盤内の体積ひずみの推定－，第 71 回年次学術講演会講演概要集，第 I 部門，pp.269-270，2016.
 - 4) 大矢陽介，小濱英司，佐伯嘉隆，佐藤成：地盤と地下構造物の動的相互作用による地表面沈下に関する研究－その 3 模型振動実験を対象とした数値解析の基礎検討－，第 52 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.1597-1598，2017.
 - 5) 大矢陽介，小濱英司：地盤と地下構造物の動的相互作用による地表面沈下に関する研究－その 4 地盤のひずみ履歴に関する数値解析の基礎検討－，第 15 回日本地震工学シンポジウム，pp.306-313，2018.
 - 6) 大矢陽介，小濱英司：地盤と地下構造物の動的相互作用による地表面沈下に関する研究－その 5 数値解析における地盤のひずみ履歴算出方法－，第 54 回地盤工学研究発表会講演概要集，pp.1707-1708，2019.
 - 7) 大矢陽介，小濱英司：地盤と地下構造物の動的相互作用による地表面沈下に関する研究－その 6 地盤のひずみ評価におけるフィルタ処理の検討－，第 55 回地盤工学研究発表会講演概要集，論文番号 23-11-2-03，2020.
 - 8) 大矢陽介，小濱英司：地下構造物周辺の液状化地盤を対象とした模型振動実験の再現解析とひずみ履歴の評価，土木学会論文集 B3 (海洋開発)，Vol.76，No.2，pp.I_498-I_503，2020.
 - 9) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
 - 10) 大矢陽介，吉田望，菅野高弘：載荷履歴の影響を考慮した砂の体積変化特性モデル，構造工学論文集，Vol.55A，pp.405-414，2009.
 - 11) Yoshida, N., Yasuda, S., Kiku, M., Masuda, T. and Finn, W.D.L.: Behavior of Sand After Liquefaction, Proc., 5th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction, Salt Lake City, pp.181-198, 1994.
 - 12) 吉田望，辻野修一，稲童丸征巳：液状化に伴う地盤沈下予測に関する基礎的研究，第 29 回土質工学研究発表会講演集，pp.859-860，1994.

SUBSIDENCE OF GROUND SURFACE DUE TO DYNAMIC SOIL-
UNDERGROUND STRUCTURE INTERACTION
- PART 7: BASIC EXAMINATION OF GROUND DEFORMATION ANALYSIS
ASSOCIATED WITH EXCESS PORE WATER PRESSURE DISSIPATION -

Yousuke OHYA and Eiji KOHAMA

Local subsidence damage on the airport taxiway right over the ground nearby the underground structure occurred during the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The authors have been investigating the mechanism of subsidence of ground surface due to dynamic soil - underground structure interaction. Shake table test of a large model in 1g gravitational field was conducted to evaluate the relationship between the strain history and subsidence of ground surface in the liquefied ground. Effective stress analysis and total stress truly nonlinear analyses were carried out for reproducing the strain history of the ground around the underground structure obtained from the shake table test. This paper discusses the analysis of ground deformation associated with dissipation of excess pore water pressure after earthquake motion.