

# 有効応力解析における入力地震動の多方向性の影響について

## Effects of multi-directional seismic input in effective stress analysis

濁川直寛<sup>1</sup>, 桐山貴俊<sup>1</sup>, 福武毅芳<sup>1</sup>

1 清水建設株式会社・技術研究所・n.nigorikawa@shimz.co.jp

### 概要

入力地震動の多方向性が解析結果に及ぼす影響を検討するために、千葉県浦安市南東部の埋立て地盤を三次元にモデル化し、一方向加震と二方向同時加震の有効応力解析を実施した。さらに、この解析結果を基に地震後に発生する沈下量を推定し、表層部の液状化と下部の粘土層で生じる沈下量の関係を検討した。その結果、水平加速度オービットに強軸方向の見られない地震動で液状化解析を実施する際は、入力地震動の多方向性が解析結果に大きな影響を及ぼすことを示した。地震後の沈下量については、表層部が液状化しなかった場合、下部の粘土層でひずみが卓越し、その結果として地震後に粘土層で生じる沈下が助長されることを解析的に示した。

キーワード：有効応力解析，二方向同時加震，地震後の沈下

## 1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震（以下、3.11地震と呼称）では関東地方においても液状化が発生し、住宅や公共インフラに多大な被害をもたらした。その中でも千葉県浦安市で発生した液状化被害は甚大であり、この被害のメカニズムを説明するために、本地域を対象として様々な地震応答解析が実施されてきた。しかしながら、その多くは地盤を近似的に二次元にモデル化した解析事例であった。3.11地震の特徴として地震動の継続時間の長さが注目されているが、入力地震動の多方向性の影響もあったと考えられる。既往の研究によれば、多方向せん断の場合、一方向せん断よりもダイレイタンスーが多く発生<sup>1)</sup>し、液状化強度が小さくなる<sup>2)3)</sup>ことが指摘されている。このようなことから、地震による地盤変状のより精緻な評価を行うには、一方向成分のみに着目した二次元解析だけではなく、入力地震動の多方向性を考慮した三次元解析が望ましい。

そこで、本研究では千葉県浦安市南東部の埋立て地盤を対象に三次元 FEM モデルを作成し、一方向加震と二方向同時加震の解析結果の比較から、入力地震動の多方向性の影響を検討した。さらに、二方向同時加震の解析結果を基に地震後に発生する沈下量を推定し、表層部の液状化と下部の粘土層で生じる沈下量の関係について考察した。

## 2. 解析条件

### 2.1 構成式のパラメータ設定

計算に用いた構成式は、応力～ひずみ関係として三次元に拡張した Ramberg-Osgood モデル（以下、R-O モデル）<sup>4)</sup>を使用し、ひずみ～ダイレイタンスー関係としておわんモデルを使用した<sup>5)6)</sup>。ここで、三次元条件下の変形において、せん断ひずみは各成分 ( $\gamma_{xy}$  や  $\varepsilon_x - \varepsilon_y$  など)に加えて、次式に示す合せん断ひずみ  $\Gamma$  と、累積せん断ひずみ  $G^*$  を

$$\Gamma = \sqrt{\gamma_{xz}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{xy}^2 + (\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + (\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + (\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (1)$$

$$G^* = \sum \Delta G^* \\ = \sqrt{\Delta\gamma_{xz}^2 + \Delta\gamma_{yz}^2 + \Delta\gamma_{xy}^2 + \Delta(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + \Delta(\varepsilon_y - \varepsilon_z)^2 + \Delta(\varepsilon_z - \varepsilon_x)^2} \quad (2)$$

用いる<sup>5)6)</sup>。

解析に用いたパラメータは、千葉県浦安市の南東部の埋立て地内で採取された乱れの少ない試料を対象とした要素試験結果<sup>7)</sup>を、上記の構成式で再現することで同定した。パラメータの一覧を表-1に示す。既往の地震被害調査<sup>8)</sup>によると、浦安市内の埋立て地盤であっても液状化を免れた箇所は散見されており、試料の採取地点の周辺において液状化被害は見られなかったと報告されている。そこで、この要素試験結果に基づいて決めたパラメータを、埋立て地内で液状化しなかった地盤の代表的なパラメータ：Para 1 とした。また、本解析では、Para 1 の埋土層（以下、F

表-1 解析に用いたパラメータ

		埋土 (F)		砂 (As)		粘土		
		Para-1	Para-2	Para-1	Para-2	(Ac1)	(Ac2)	(Ac3)
R-O パラメータ	$G_0$	kPa	37883		55736	37263	35547	40941
	$\gamma_{0.5}$	-	0.001470		0.000636	0.003500		
	$h_{max}$	-	0.21		0.21	0.20		
おわん パラメータ	$A$	-	-1.0		-1.0	-0.6		
	$C$	-	5.0		8.0	12.0		
	$D$	-	60		50	40		
	$C_s/(1+e_0)$	-	0.0330	0.0070	0.0201	0.0070	0.0302	
	$C_v/(1+e_0)$	-	0.0300	0.0060	0.0200	0.0060	0.0300	
	$X_f$	-	0.22	0.11	0.24	0.15	0.22	

層), 砂層 (以下, As 層) の液状化強度を便宜的に小さくすることで, 液状化被害が見られた地点のパラメータ: Para 2 とした. なお, 粘土層 (以下, Ac 層) のパラメータは, Para 1, Para 2 共に同じ値である.

図-1 に, 繰返し非排水三軸試験より得られた液状化強度曲線 ( $\gamma_{DA}$  が 5% に至るときのせん断応力比と繰返し回数) の関係と構成式による計算結果を示す. ここで,  $X_f$  は繰返しせん断を多数回与えても液状化には至らない, せん断応力比 (液状化強度) の下限値<sup>5)</sup>である. 図-1 から読み取れる液状化強度の下限値  $X_f$  を, 既往の液状化試験結果<sup>9)</sup>と比較すると, 採取試料は, 「やや密, または密な地盤」に相当する. 前述したように, Para 1 は実験結果にフィッティングさせることで, 浦安地区で液状化しなかった地点でのパラメータを再現している. また, Para 2 は既往の浦安地区を対象とした液状化解析事例<sup>9)</sup>に倣ってパラメータを設定した. 具体的には, Para 2 の  $C_s/(1+e_0)$  と  $X_f$  の値が Para 1 の値と比べて小さくなっている. それに伴い, 液状

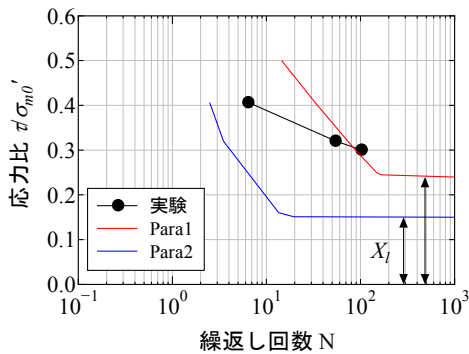


図-1 液状化強度曲線 (As 層)

化強度曲線は Para 1 のものより下方に位置している.

## 2.2 地盤モデル

解析に用いた地盤モデルは三次元モデルであり, 要素試験シミュレーションを実施した試料の採取地点のボーリングデータ<sup>7)</sup>に基づいて作成した. 解析に用いた地盤 FEM モデルを図-2 に, 地盤定数を表-2 に示す. 基盤は剛基盤とし, 境界条件は底面を固定, 側方を鉛直固定, 水平自由とした. 地層構成の特徴は, 比較的 N 値が大きい表層の下に 45m もの軟弱な粘土層が堆積している点である. なお, 粘土層は深度方向に N 値のばらつきが認められたため, 物性を Ac1, Ac2, および Ac3 の 3 つに分けて設定し

表-2 地層構成と地盤定数

深さ GL- [m]	層厚 [m]	土質区分	$\gamma_t$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$V_s$ [m/s <sup>2</sup> ]	N 値
9.0	9.0	埋土 (F)	16.5	150	18.5
19.0	10.0	砂 (As)	18.9	170	24.7
36.0	17.0	粘土 (Ac1)	15.2	155	2.5
51.0	15.0	粘土 (Ac2)	14.5		0.5
64.0	13.0	粘土 (Ac3)	16.7		2.8
74.0	10.0	基盤 (Ds)	19.6		400

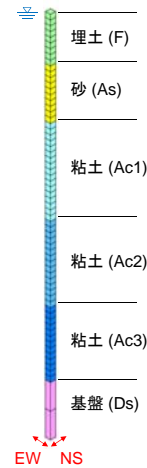


図-2 地盤 FEM モデル

た.

## 2.3 入力地震動

図-3 に入力地震動の加速度波形とそのフーリエ振幅スペクトルを示す. 入力地震動は, 東京都港湾局品川地震観測所 (GL-34m) で得られた本震と余震の加速度記録<sup>10)</sup>である. 3.11 地震では, 本震発生から 29 分後に最大余震 (M=7.7) が観測された. 本解析では, 本震から最大余震の間に過剰間隙水圧の消散はほとんど生じなかった仮定し, 本震と余震を繋げて E+F 波として入力した.

図-4 は, 入力地震動の水平加速度波形のオービットである. 最大振幅は, 本震で NS 成分 55Gal, EW 成分 66Gal, 余震で NS 成分 24Gal, EW 成分 24Gal であり, 本震, 余震共に振幅卓越方向 (強軸方向) は見られない. このよう

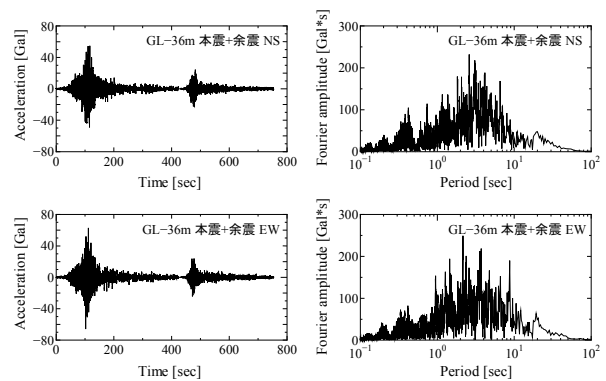


図-3 入力地震動の波形とフーリエ振幅スペクトル

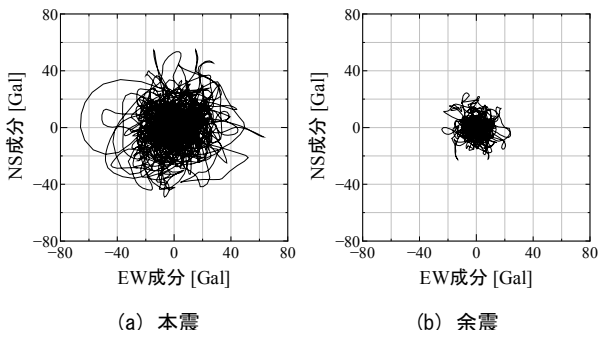


図-4 入力地震動の水平加速度波形のオービット

な地震動を解析で取り扱う場合、一方向のみの入力では過剰間隙水圧や変形を過小評価する可能性がある。そこで本解析では、入力波のNS成分とEW成分を同時入力した場合と、EW成分のみを入力した場合について検討した。

### 3. 解析結果

#### 3.1 入力地震動の多方向性の影響

本節では、液状化地点の地盤物性を想定した Para 2 を用いて、入力地震動の多方向性が地盤応答に及ぼす影響を検討した。図-5 に、一方向加震と二方向同時加震の解析における水平変位、応答加速度、合せん断ひずみ、過剰間隙水圧の最大値の深度方向分布を示す。二方向同時加震の結果を見ると、As層に加えてF層でも液状化が生じており、それに伴って地表面付近で大きな合せん断ひずみと応答加速度が確認された。一方向加震では、液状化はAs層の上

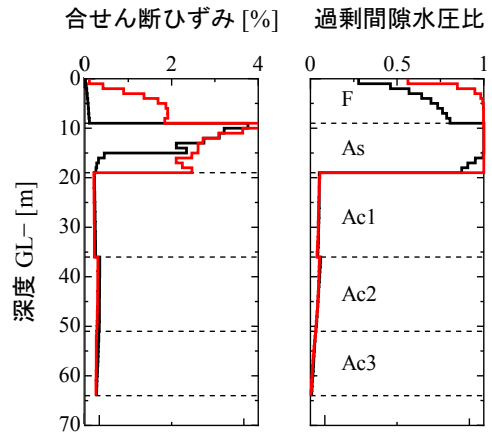
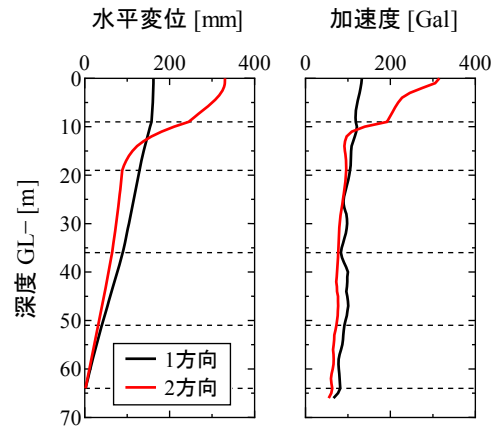


図-5 最大応答値の深度方向分布

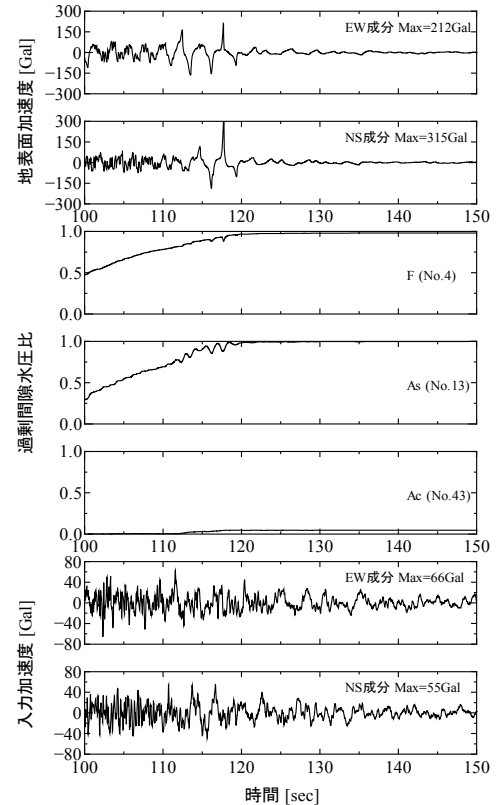
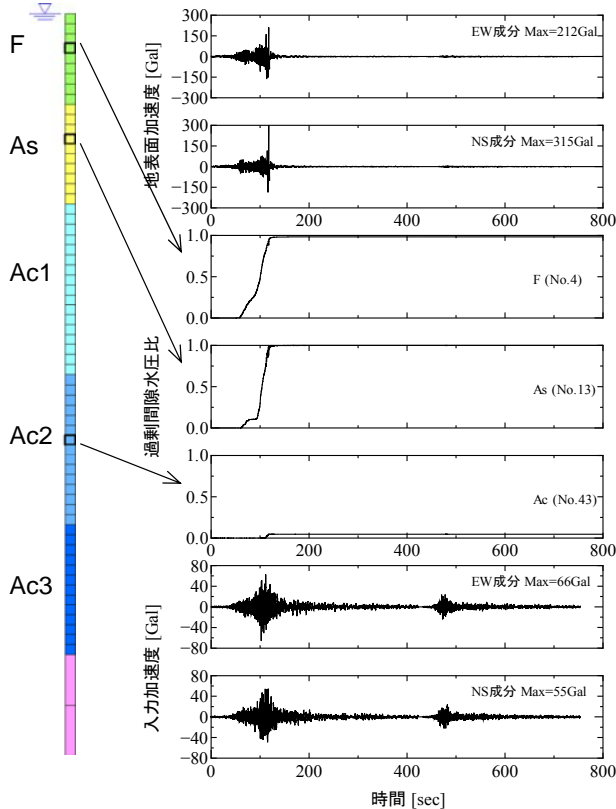


図-6 地盤応答の時刻歴

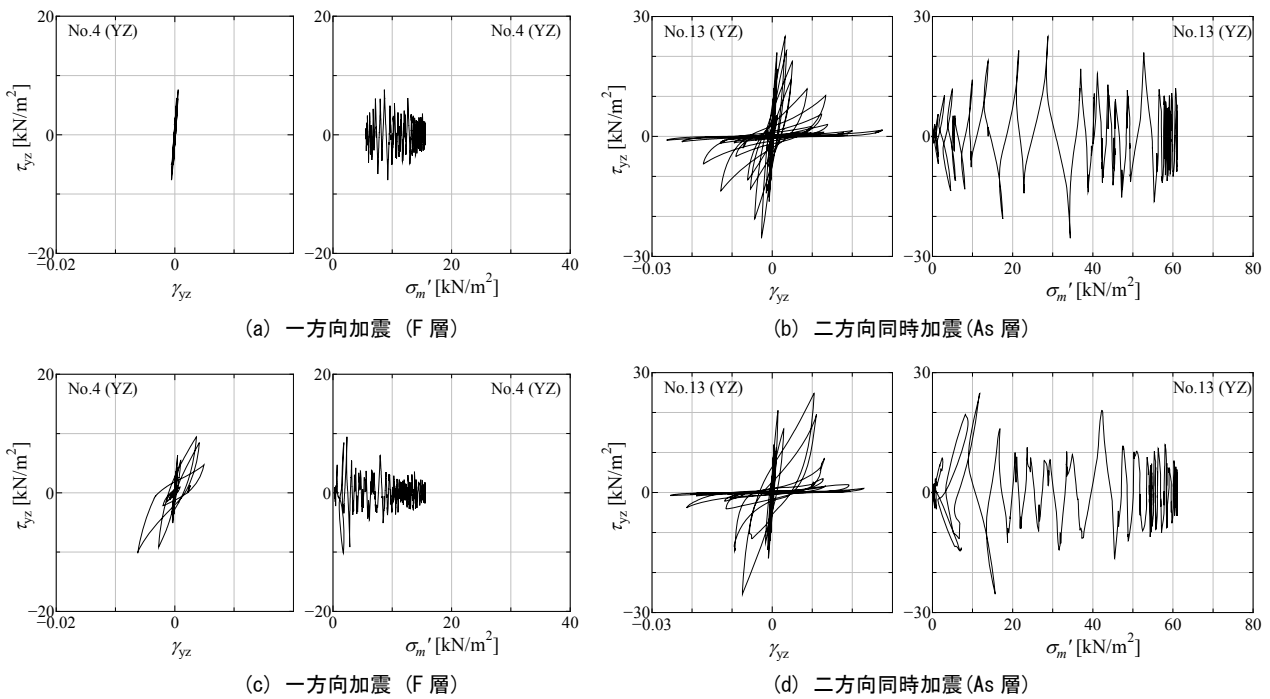


図-7 F層とAs層の要素挙動(EW方向)

部に留まり、F層の液状化は見られなかったのに対し、二方向同時加震では表層部（F層、As層）のほぼ全域が液状化する結果が示された。

二方向同時加震の解析における入力加速度、地表面加速度、および各層の中間深度における過剰間隙水圧比の時刻歴を図-6に示す。なお、同図の右側は、最大加速度が確認された前後の時刻（100～150秒）の応答を拡大したものである。地表面加速度の時刻歴を見ると、振幅は加震から120秒以降で急激に小さくなり、波は長周期化している。これは、地盤が液状化した際に見られる挙動のひとつである。また、110～120秒の間には、応答加速度に鋭いピークとスパイク状の波形が現れており、F層とAs層の過剰間隙水圧比の波形からは、有効応力が周期的に回復するサイクリックモビリティ挙動が見てとれる。

図-7は、F層とAs層の中間深度における要素挙動である。F層の応力～ひずみ関係を見ると、一方向加震では剛性低下はほとんど見られず線形性を保っているのに対し、二方向同時加震では繰返しせん断に伴って剛性は低下し、非線形応答を示している。また、有効応力の減少の程度も後者の方が大きい。As層の応力～ひずみ関係を見ると、一方向加震では徐々に剛性が低下しているのに対して、二方向同時加震ではある回数の繰返しせん断を境に急激な剛性低下が見られた。

以上の結果より、今回のような強軸方向の見られない地震動で液状化の検討を実施する際は、二方向加震が解析結果に大きな影響を及ぼすことを念頭に置く必要がある。

### 3.2 液状化強度の違いによる地盤応答の差異

本節では、液状化強度の違いによる応答の差異を示し、表層部の液状化が地震応答に与える影響を検討した。なお、入力は一方向同時加震とした。図-8にそれぞれの最大応

答値の深度方向分布を示す。注目すべきは、非液状化地点を想定した解析結果においてAc層内での水平変位、せん断ひずみ、および過剰間隙水圧比が、液状化地点のもの

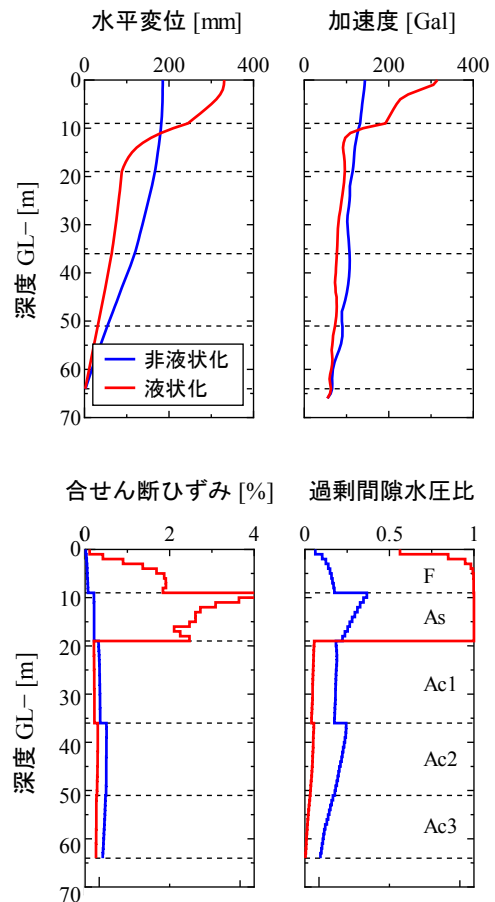


図-8 最大応答値の深度方向分布

比べて明らかに大きくなっている点である。これは表層部が液状化しなかったことで、相対的に弱いAc層で軟化が進行し、過剰間隙水圧が上昇したと解釈できる。

### 3.3 液状化が地震後の沈下に及ぼす影響

既往の研究<sup>11) 12) 13)</sup>では、繰返しせん断後の排水による体積ひずみは、せん断過程で経験した最大せん断と有意な関係にあることが要素試験結果に基づいて示されている。また、この関係性は、地震後の地盤沈下の推定にもしばしば利用されている。しかしながら、今回の浦安市の事例は、比較的小さい地震加速度が長時間続き、小さなせん断応力が多数回作用したことによって液状化が発生したものと推測される。このような場合、最大せん断ひずみを用いて沈下量を算定することは、沈下量を過小評価する恐れがある。そこで本解析では、最大せん断ひずみではなく、せん断ひずみの累積値（累積せん断ひずみ  $G^*$ ）を用いて沈下

量の推定を試みた。なお、累積せん断ひずみを用いて算定した圧縮量と、繰返し非排水せん断後の圧密沈下量が対応することは、要素試験の再現計算<sup>7)</sup>において検証済みである。

図-9に、3.1節で示した解析結果から算定した沈下量の深度方向分布を示す。まず、非液状化地点の沈下量を見ると、累積沈下量160mmのうち、表層(F層とAs層)50mm、Ac層110mmと示された。一方、液状化地点の沈下量は、累積沈下量300mmのうち、表層280mm、Ac層20mmであり、液状化した表層の沈下量が全体の9割以上を占めるに至った。Ac層の沈下量を比較すると、非液状化地点における沈下量は液状化地点と比べて大きな値を示している。すなわち、今回のような地層構成の地盤では、表層が液状化するか否かによって地震後に生じる粘土層の圧密沈下量が大きく異なることが示された。

### 3.4 沈下量の解析値と実測値の比較

3.3節で算定した地震後の沈下量の妥当性を検討するために、解析値と実測値の比較を行った。実測値とは、JR京葉線新浦安駅から浦安市シンボルロードに沿って測線を設定し、地震発生後から2年間に渡り継続的に地表面沈下量を計測した成果<sup>9) 12)</sup>である。測線に沿った沈下量の実測値を図-10に示す。同図の上側は、地震発生から1~2週間経過時点での測線に沿った沈下の分布である<sup>9)</sup>。なお、この時点ではAc層の圧密沈下はほとんど進行していないと仮定し、この実測値を表層(F層とAs層)で生じた液状化による即時沈下量として取り扱う。また、同図の下側は、即時的な沈下を除いた地震後の地表面沈下量であり<sup>12)</sup>、この実測値は粘土層で生じた圧密沈下量に相当する。図中の液状化範囲は、地震被害調査結果<sup>8)</sup>を参考としている。液状化範囲における沈下量の実測値は、表層50~450mm、Ac層5~20mm(2013年4月時点)であった。また、非液状化地点での実測値は、表層0~100mm、Ac層20~70mmであり、いずれの実測値も解析値と概ね一致する結果とな

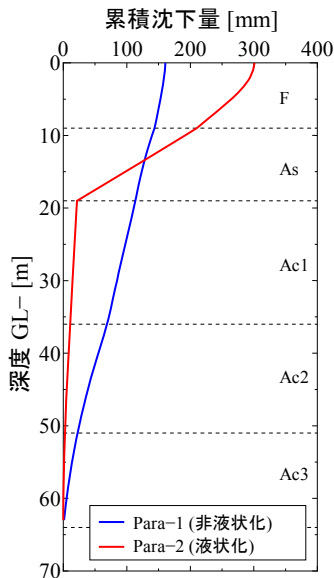


図-9 解析による沈下量の深度方向分布

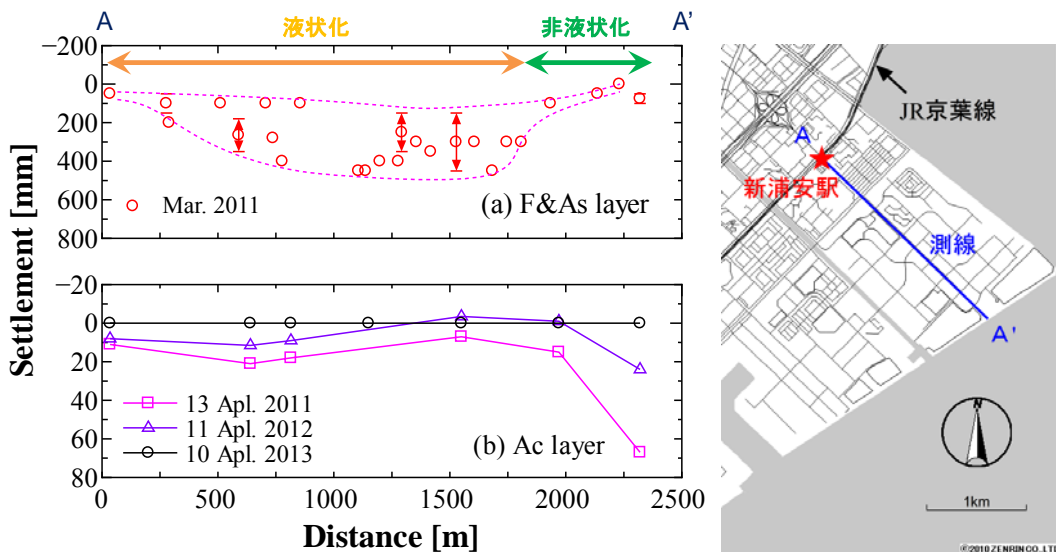


図-10 測線に沿った地震後の沈下量の実測値

った。

#### 4. まとめ

千葉県浦安市の南東部の埋立て地内における液状化地点、非液状化地点を対象とし、2011年東北地方太平洋沖地震の本震と余震を連続入力した三次元有効応力解析を行った。本解析では、入力地震動の多方向性が解析結果に及ぼす影響を検討するため、一方向加震と二方向同時加震の解析を実施した。さらに、解析結果に基づいて地震後の沈下量を推定し、実測値との比較を行った。その結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 今回のような強軸方向の見られない地震波で解析を実施する場合、二方向同時加震が解析結果に及ぼす影響は大きいことを示した。
- 2) 今回のような地層構成の地盤において表層部が液状化しなかった場合、下部の粘土層でひずみが卓越し、地震後の粘土層の沈下が助長されることを解析的に示した。
- 3) 地震後の沈下量の解析値と実測値は、概ね良い整合性を示した。

本報は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会（委員長：浅岡顕）」における研究成果に基づくものである。

#### 参 考 文 献

- 1) 福武毅芳, 松岡元: 任意方向単純せん断におけるダイレイタンシーの統一的解釈, 土木学会論文集, No. 412/III-12, pp. 240-248, 1978.
- 2) Ishinara, K. and Yamazaki, F. : Cyclic simple shear tests on saturated sand in multi-directional loading, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 1, pp. 45-59, 1980.
- 3) 福武毅芳, 松岡元, 伊藤学, 三田村裕和: 任意方向繰返しせん断時の砂の非排水応力・ひずみ関係と液状化強度の解析, 第40回土木学会年次講演会III, pp. 419-420, 1985.
- 4) Nishimura, S. and Towhata, I. : A three-dimensional stress-strain model of sand undergoing cyclic rotation of principal stress axes, Soils and Foundations, Vol. 44, No. 2, pp. 103-116, 2004.
- 5) 福武毅芳: 土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析, 名古屋工業大学博士論文, 1997.
- 6) 福武毅芳, 馬淵倉一, 吉田望, 社本康広: 砂や薬注改良体の初期サイクリックモビリティ後のシミュレーション, 第43回地盤工学研究発表会, pp. 437-438, 2008.
- 7) 地盤工学会: 地盤材料の構成式ワークショップ (第3回) 当日配布資料, 2014.
- 8) 国土交通省関東地方整備局, 地盤工学会: 東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明 (報告書), 2011.
- 9) Fukutake, K. and Jang, J. : STUDIES ON SOIL LIQUEFACTION AND SETTLEMENT IN THE URAYASU

DISTRICT USING EFFECTIVE STRESS ANALYSES FOR THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE, Journal of JSCE, Special Topic - 2011 Great East Japan Earthquake, Division A (Invited paper), pp.307-321, 2013.

- 10) 東京都港湾局: 港湾局地震観測所で観測した地震動について, <http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/keiyaku/kisojoho/jishindou.html>, 2014.
- 11) Shamoto, Y. and Zhang, J.-M. : Evaluation of Seismic Settlement Potential of Saturated Sandy Ground Based on Concept of Relative Compression, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake, Vol. 2, pp. 57-68, 1998.
- 12) Ishihara, K. and Yoshimine, M. : Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 173-188, 1992.
- 13) Shamoto, Y., Sato, M and Zhang, J.-M. : Simplified estimation of earthquake-induced settlements in saturated sand deposits, Soils and Foundations, Vol. 36, No. 1, pp. 39-50, 1996.
- 14) Nigorikawa, N. and Asaka, Y. : LONG-TERM SETTLEMENT OF HOLOCENE CLAY GROUND AFTER THE 2011 GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE, 10CUEE Conference Proceedings, pp. 371-378, 2013.