

2011年東北地方太平洋沖地震における 最遠方液状化地点での3次元有効応力解析

秦 吉弥¹・一井 康二²・酒井 久和³・丸山 喜久⁴

¹正会員 日本工営株式会社 中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原2304)
E-mail: hata-ys@n-koei.jp

²正会員 広島大学大学院 工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山1-4-1)
E-mail: ichiikoji@hiroshima-u.ac.jp

³正会員 広島工業大学 工学部建築工学科 (〒731-5193 広島県広島市佐伯区三宅2-1-1)
E-mail: h-sakai@cc.it-hiroshima.ac.jp

⁴正会員 千葉大学大学院 工学研究科 (〒263-8522 千葉県千葉市稲毛区弥生町1-33)
E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

2011年東北地方太平洋沖地震($M_p9.0$)では、極めて広範囲にわたり液状化が発生した。本震の震央から最も遠い液状化地点は、千葉県南房総市池之内(震央距離約440km)である。本研究では、この最遠方液状化地点において地盤調査を行い、地盤解析モデルを評価した。そして、3次元有効応力解析(FLIP)を用いて、本震時における最遠方液状化地点での地盤の挙動を推定した。その際、入力地震動として、当該地点での余震観測記録に基づく推定地震動および周辺のSK-net三芳における観測地震動をそれぞれ採用し、入力地震動の特性が液状化解析結果に及ぼす影響について検討を行った。

Key Words : ground liquefaction, in-situ soil investigation, 3-D FLIP, ground motion duration, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震($M_p9.0$)では、-1に示すとおり、関東地方においても極めて広範囲にわたり液状化が発生した¹⁾。本震の震央から最も遠い液状化地点は、千葉県南房総市池之内(以後、対象地点と呼ぶ：-1および-2参照)であり、震央距離は約440kmである²⁾。この距離は、既往の最遠記録(1946年南海地震($M8.0$))での377kmを上回るものであるが、その地震規模や茨城県沖のアスペリティからの距離などを勘案すると、それほど特異な距離ではないことが報告されている^{2,3)}。

マグニチュードの大きい地震では遠方まで液状化が生じやすいことは従来から知られているが、これには強震継続時間など波形の特性が大きく関係していると考えられ、地震動のどのような特性が液状化をもたらしたのか正確に理解しておく必要がある。この点に関して、著者ら⁴⁾は、対象地点において余震観測や地盤調査などを実施し、その結果に基づき本震時の地震波形を推定している。本稿では、この推定地震波形などを用いた3次元有効応力解析(3D-FLIP)を実施し、本震時の対象地点における地盤の挙動について検討した結果について報告する。



図-1 関東地方における液状化発生地点の分布(文献1)に加筆

なお、本研究は、(社)土木学会地震工学委員会によるリスク評価に基づく道路構造物・ネットワークの耐震設計に関する合同委員会(委員長:澤田純男(京都大学防災研究所教授))が実施している委員会活動の一環として実施したものである。

2. 数値解析条件

(1) 地盤解析モデル

本研究では、図-3に示すとおり液状化に伴う墳砂やアスファルト道路舗装のクラックが発生したサイトの極近傍においてボーリングによる標準貫入試験およびPS検層を実施した。得られたボーリング柱状図、N値およびせん断波速度 V_s の深度分布を図-4に示す。図-4に示すとおり、砂およびシルトを主体とする地盤となっている。

図-5は、図-4で示した土層構成に基づき設定した水平成層地盤の3次元FEMモデルである。使用要素は6面体アイソパラメトリック要素(ソリッド要素)であり、境界条件は、基盤底面はE+F波を入力するので固定条件、その他の同一深度面は等変位条件とした。地下水水位面は、ボーリング結果に基づき表土層(L1層)とシルト質砂層(L2層)の境界に設定した。

(2) 解析手法および解析パラメーター

3次元有効応力解析には、2次元のマルチスプリングモデル⁵⁾と過剰間隙水圧モデル⁶⁾を3次元に拡張させたモデル(3D-FLIP)⁷⁾を採用し、3次元の地盤応答解析を行った。

表-1に設定した解析パラメーターの一覧を示す。地盤パラメーターは、全て対象地点でのサンプリングにより得られた不攪乱試料による土質試験結果に基づき設定した。また、土粒子骨格のポアソン比は0.333と設定した。図-6は、繰返し三軸試験による繰返しせん断強度比をプロットしたものであるが、対象地点での液状化強度比 RL_{20} は、基盤砂質土層(L6層)を除いて0.2~0.25程度の値を示している。表-1に示す液状化パラメーターについては、図-6に示すように、試験値を目標とした要素シミュレーションの結果に基づいて評価した。

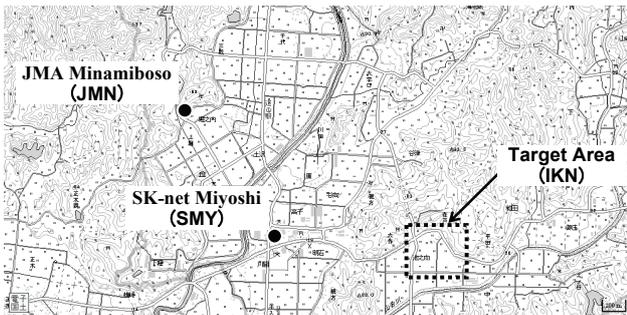


図-2 最遠方液状化地点周辺の既存強震観測点の分布

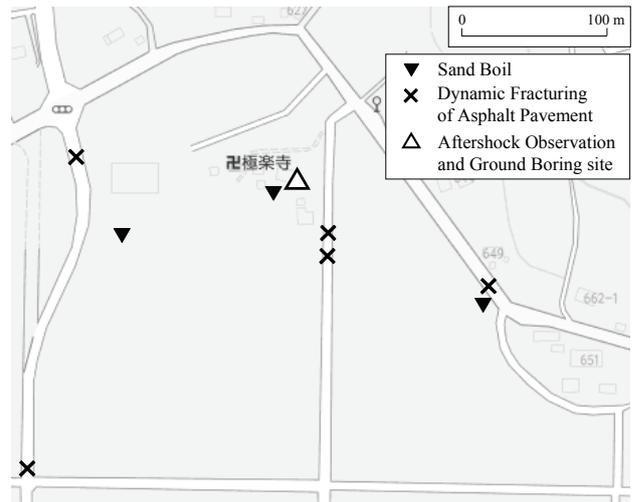


図-3 最遠方液状化地点での地震被災実績と余震観測およびボーリング調査地点

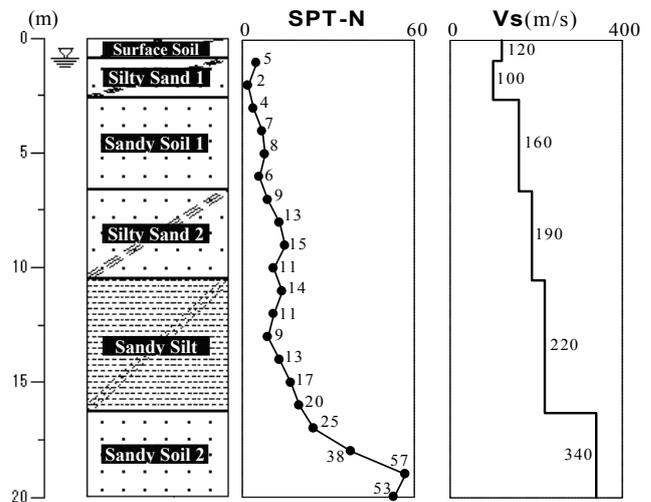


図-4 ボーリング調査結果に基づく最遠方液状化地点でのボーリング柱状図、N値およびせん断波速度の分布

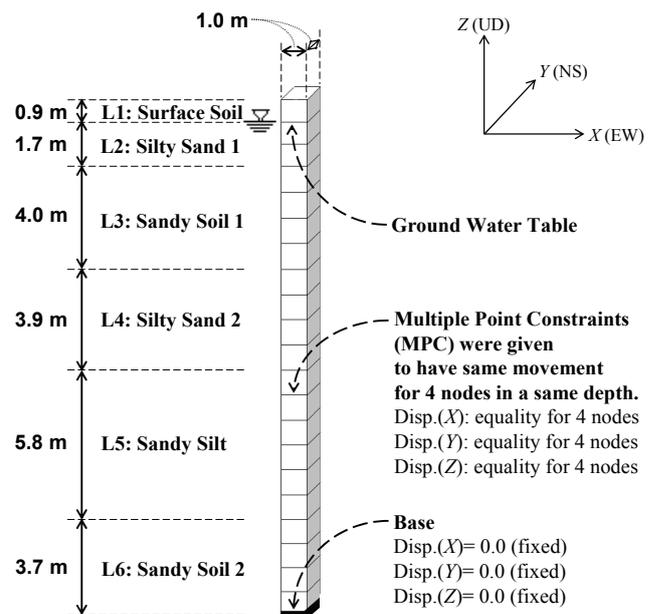


図-5 3次元FEM解析モデルとその境界条件

(3) 入力地震動

入力地震動としては、2種類の波形を採用した。1つは、対象地点の既存強震観測点であるSK-net三芳(南房総市役所三芳支所：図-2参照)の地盤地表面で得られた本震観測記録に対して、等価線形解析⁸⁾および一般的な動的変形特性⁹⁾を用いて工学的基盤相当まで引戻した波形(E+F波)の3成分である。もう一方は、GL-20m(図-4参照)に埋設したボアホール型地震計で得られた余震観測記録に基づきサイト特性置換手法¹⁰⁾を用いて推定した対象地点における工学的基盤相当波(E+F波)⁴⁾の3成分である。図-7に入力地震動の加速度時刻歴を示す。図-7に示すとおり、対象地点での推定波に基づくケース(IKN)のほうが地震動の継続時間が長くなっていることが読み取れる。

3. 解析結果

図-8には、150s(図-7参照)における過剰間隙水圧比の分布を示す。図-8に示すとおり、SK-net三芳での観測波に基づくケース(SMY)では、過剰間隙水圧比が1.0に達していないのに対し、対象地点での推定波に基づくケー

ス(IKN)では、L1層およびL6層を除いて過剰間隙水圧比が1.0に近い値を示している。すなわち、どの程度の解析結果が得られれば対象地点の噴砂の実績を説明できるかについては、より詳細な検討が必要であるが、余震観測に基づくサイト特性を考慮した推定地震動⁴⁾のほうが、SK-net三芳での観測地震動に比べて、地震動の継続時間が長く、液状化の程度が大きくなり、噴砂の実績を容易に説明できる結果となった。よって、液状化の評価において重要となる地震動の継続時間の観点からも、余震観測による地震動推定が非常に効果的であると推察される。

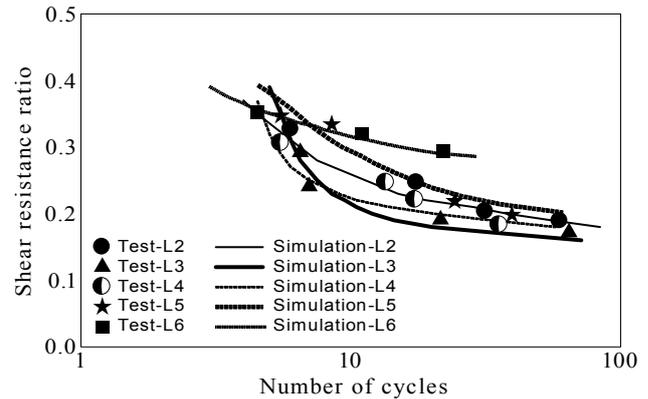


図-6 各土層での繰返しせん断強度比の要素シミュレーション

表-1 土質試験結果に基づく解析パラメーターの一覧

Geological classification		L1	L2	L3	L4	L5	L6
		Surface Soil	Silty Sand 1	Sandy Soil 1	Silty Sand 2	Sandy Silt	Sandy Soil 2
Unit weight	γ_t (kN/m ³)	18.1	18.2	19.5	19.2	17.7	19.6
Poisson's ratio	ν	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
Shear wave velocity	V_s (m/s)	120	100	160	190	220	340
Cohesion	c (kPa)	9.4	12.2	5.2	10.8	28.8	3.6
Internal friction angle	ϕ (deg.)	34.5	37.4	39.2	36.2	31.6	41.8
Phase angle	ϕ_m (deg.)	28.1	27.2	29.4	27.6	25.8	30.5
Upper limit for hysteretic damping	H_{max}	-	0.198	0.242	0.216	0.208	0.248
	S1	-	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	W1	-	8.0	8.5	6.0	9.5	13.0
Model parameters for liquefaction	P1	-	0.5	0.7	0.5	0.6	0.7
	P2	-	1.0	1.3	1.2	1.0	1.2
	C1	-	1.5	1.0	2.5	2.3	3.0

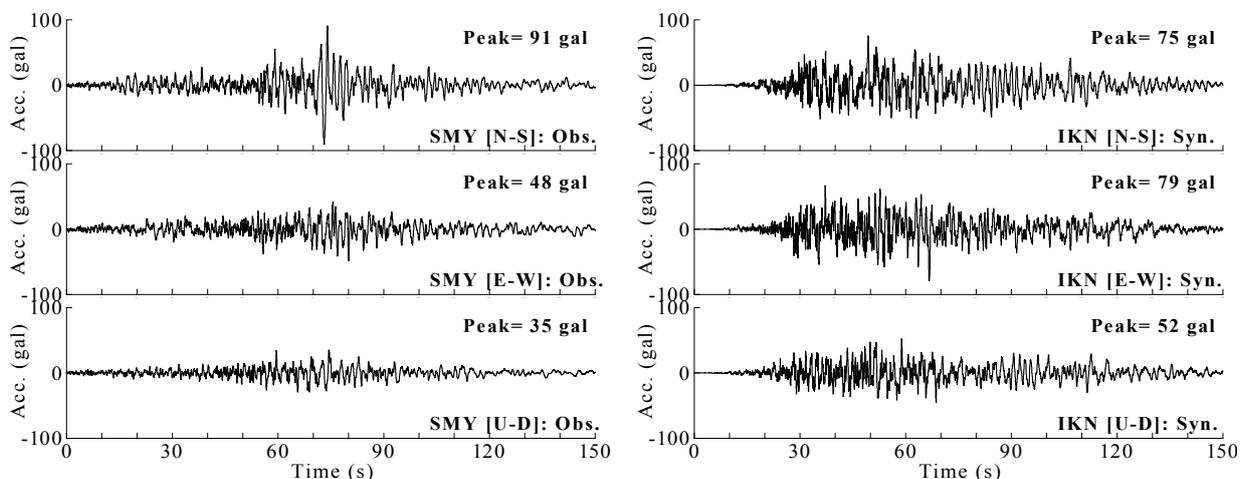


図-7 入力地震動の加速度時刻歴 (左：SK-net三芳での観測記録の基盤相当波・右：対象地点での余震観測に基づく推定波)

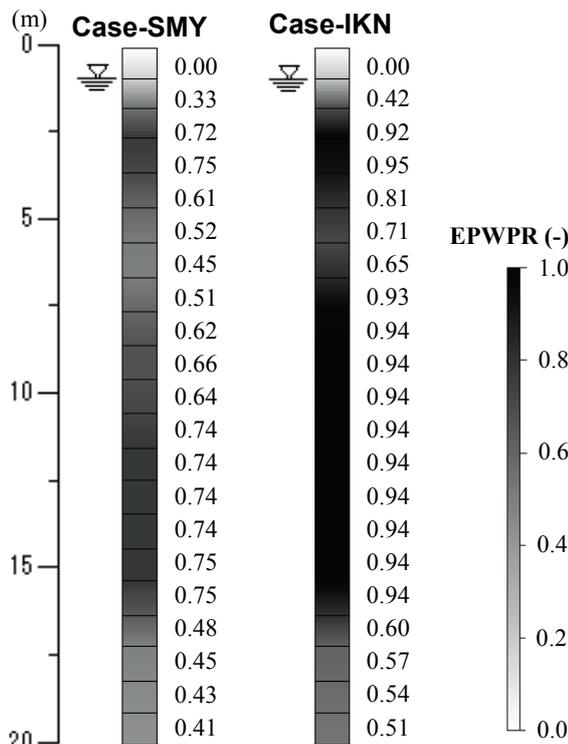


図-8 時間断面150sにおける過剰間隙水圧比の深度分布

価においても非常に効果的である可能性が高い。

謝辞：野津厚チームリーダー((独)港湾空港技術研究所)に貴重なご意見をいただきました。現地での地盤調査および余震観測の実施にあたっては、南房総市池之内の住民の皆様にお世話になりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省関東地方整備局, (社)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, 調査票 No.56(南房総市-1), 2011.
- 2) 若松加寿江: 液状化・造成地の被害の特徴と課題, 日本地震工学会誌, No.15, pp.33-36, 2011.
- 3) 沼田淳紀, 三輪滋, 池田隆明, 釜江克宏, 小長井一男: 2011年東北地方太平洋沖地震における関東地域の地震動と液状化に影響を及ぼした強震動生成域を対象とした地震規模の推定, 日本地震工学会大会-2011 梗概集, Vol.8, pp.94-95, 2011.
- 4) 秦吉弥, 一井康二, 野津厚, 丸山喜久, 酒井久和: 地盤構造物の性能評価のための余震観測の重要性—2011年東北地方太平洋沖地震における最遠方液状化地点での地震動の推定—, 防災・減災のための地盤構造物の設計・施工法に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会, 2012.(印刷中)
- 5) 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.
- 6) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modeling soil behavior under principal stress axes rotation, *Proc. of 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Vol.1, pp.523-530, Nagoya, Japan, 1985.
- 7) Iai, S.: Three dimensional formulation and objectivity of a strain space multiple mechanism model for sand, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.1, pp.192-199, 1993.
- 8) 吉田望, 末富岩雄: DYNEQ: 等価線形法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業(株)技術研究所報, pp.61-70, 1996.
- 9) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会講演集, pp.539-542, 1985.
- 10) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake, based on site amplification and phase characteristics, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.

(2012. 4. 13 受付)

4. まとめ

本研究では、2011年東北地方太平洋沖地震における最遠方液状化地点での3次元有効応力解析を実施し、本震時の地盤の挙動を評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) ボーリング調査の結果によれば、最遠方液状化地点は砂およびシルト主体の土層構成となっている。
- (2) 3次元有効応力解析の結果によれば、余震観測に基づくサイト特性を考慮した推定地震動を入力したケースのほうが、周辺のSK-net三芳での観測地震動を入力したケース比べて、液状化の程度が大きくなり、噴砂の実績を容易に説明できる結果が得られた。
- (3) 現地における余震観測(中小地震観測)で得られた記録などに基づいた入力地震動の設定は、液状化の評

3-D EFFECTIVE STRESS ANALYSIS AT THE FARTHEST LIQUEFACTION SITE DURING THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Yoshiya HATA, Koji ICHII, Hisakazu SAKAI and Yoshihisa MARUYAMA

During the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (M_w 9.0), ground liquefaction occurred at the Ikenouchi, Minamiboso City where the farthest liquefaction site. The evaluation of ground liquefaction using the numerical calculation is very important to clarify the liquefaction mechanism. Based on the 3-dimensional effective stress analysis results using the FLIP, effect on input ground motion was examined in this study. Thus, the examination results enable the rational seismic performance assessment of an earth structure in the future practice.