

2011年東北地方太平洋沖地震で液状化が発生した東京都江東区新木場の液状化強度の推定

池田 隆明¹・小長井 一男²・片桐 俊彦³・清田 隆⁴

¹正会員 飛鳥建設 技術研究所 室長 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail:takaaki_ikeda@tobishima.co.jp

²正会員 東京大学 生産技術研究所 教授 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:konagai@iis.u-tokyo.ac.jp

³正会員 東京大学 生産技術研究所 (〒153-8505 東京都目黒区駒場4-6-1)

E-mail:toshi@iis.u-tokyo.ac.jp

⁴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

2011年東北地方太平洋沖地震では、東京湾臨海部の埋立地の多くで液状化が発生した。東京都江東区新木場地区も液状化が生じた地域の一つであるが、液状化の発生・未発生範囲は明瞭に分かれており、埋立材料や埋立方法の違いによるものと考えられた。

新木場地区では、工学的基盤を含めた複数の深度で地震観測を行う鉛直アレー地震観測が行われている。この地点では液状化は確認されなかったが、ごく近傍地点で液状化が確認されており、二地点の工学的基盤の地震動はほぼ同じと想定されるため、液状化の発生の有無は埋立部分の液状化強度の違いが原因と考えられる。そこで、有効応力非線形解析から、液状化した地点の液状化強度を推定した。その結果、埋立地盤の液状化強度は $R_L20=0.15$ 程度であることが推定された。

Key Words : *Liquefaction resistance, Downhole array earthquake observation, Nonlinear, The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, Effective stress analysis*

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震(以後、東北地方太平洋沖地震と呼ぶ)では、東北から関東にかけての太平洋沖合の広い範囲が震源域と想定され、震源からやや距離のある関東地域でも震源の大きさに起因する継続時間の長い地震動が観測された。この地震により、東京湾沿岸部の埋立地の多くの地点で液状化が発生した。

東京都江東区新木場地域も液状化が発生した地点の一つであるが、液状化調査結果¹⁾によると、同じ地域でも液状化が発生した地域と、そうでない地域は明瞭に分かれている。

液状化が発生した地点のごく近傍で、工学的基盤を含めた複数の深度で地震観測を行う鉛直アレー地震観測がおこなわれている²⁾。鉛直アレー地震観測地点(以後、地震観測地点と呼ぶ)では噴砂・噴水などの液状化の発生を示す現象は確認されておらず、筆者らが行った地盤の地震応答解析に基づく検討²⁾からも液状化は発生していないと考えられる。

地震観測地点と液状化が確認された地点との最短距離は約120mである。この地点(以後、近傍液状化地点)の工学的基盤の地震動は、鉛直アレー地震観測地点の地震動と同じと考えられる。同様に、液状化地点の地盤構造も、液状化した表層部分を除いては、ほぼ同じと考えられるため、液状化の発生の有無は、表層部分の液状化特性を含む地盤特性の違いが原因と考えられる。

そこで本論文では、地震観測地点で行われた地盤調査結果を参考に近傍液状化地点の地盤モデルを構築し、有効応力解析から表層部分の液状化強度の推定を行った。

2. 江東区新木場地域の液状化

図-1に新木場地区の液状化調査結果¹⁾を示す。当該地域では液状化の発生範囲は明瞭に区分されている。新木場駅前および南側に鉄道と並行して位置する道路沿いの複数の地点では、噴砂・噴水が確認されている。写真-1に地震後の当該地点の状況を示す(場所を図-1中に示

す)。地表に大量の噴砂が確認され、地盤の液状化が確認される。第一貯木場の西側と南側の海路にかかる千石橋、東千石橋のアプローチ部では液状化は確認されておらず、橋梁基礎に対する液状化対策が行われていたと考えられる。

地震観測地点は、液状化が多く確認された新木場駅の西側に位置する。地震観測地点を含む都道306号線よりも西側の地域では液状化が確認されていない。近傍液状化地点との距離は約120m、写真-1の撮影地点との距離は約360mである。

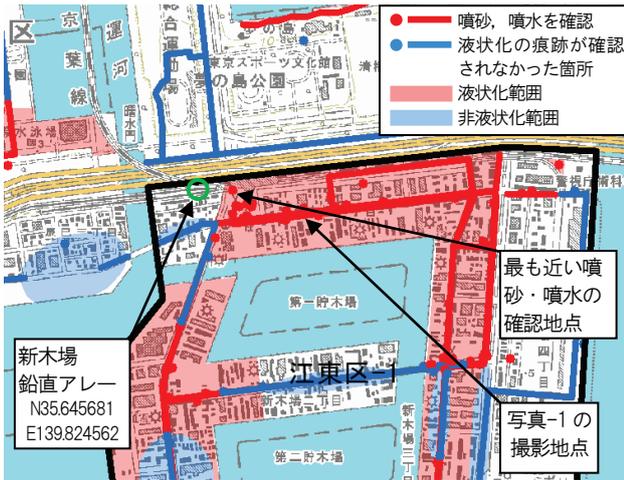


図-1 新木場地域の液状化調査結果
(文献1)に加筆・修正)



写真-1 新木場地域の液状化発生状況

3. 検討方法

図-1に示すように、地震観測地点と近傍液状化地点との距離は極めて近く、東北地方太平洋沖地震の際の二地点の入力地震動は同じと考えられる。また、地盤条件も表層部分を除いては同じと考えられる。そのため、以下の手順で近傍液状化地点での液状化層の液状化強度を推定する。

①地震観測地点の地震応答解析モデルの作成

地震観測地点で行われた地盤調査結果などに基づき、一次元の有効応力地震応答解析モデルを作成する。作成した解析モデルにより、東北地方太平洋沖地震および弱地震での観測記録が再現できることを確認する。

②近傍液状化地点の地震応答解析

地震観測地点と近傍液状化地点の地盤モデルの差異は表層のせん断剛性と液状化強度のみ仮定し、表層部が液状化するまで当該層の液状化強度を低下させる。

本検討では有効応力解析にはYUSAYUSA-2³⁾を使用する。

4. 鉛直アレー液状観測地点の有効応力解析

(1)地震観測地点の地盤調査結果

当該地点では、工学的基盤までのボーリング調査および標準貫入試験、PS検層が行われており、土質区分、N値、S波速度が得られている。図-2に地震観測地点での地盤柱状図、N値およびPS検層によるS波速度を示す。

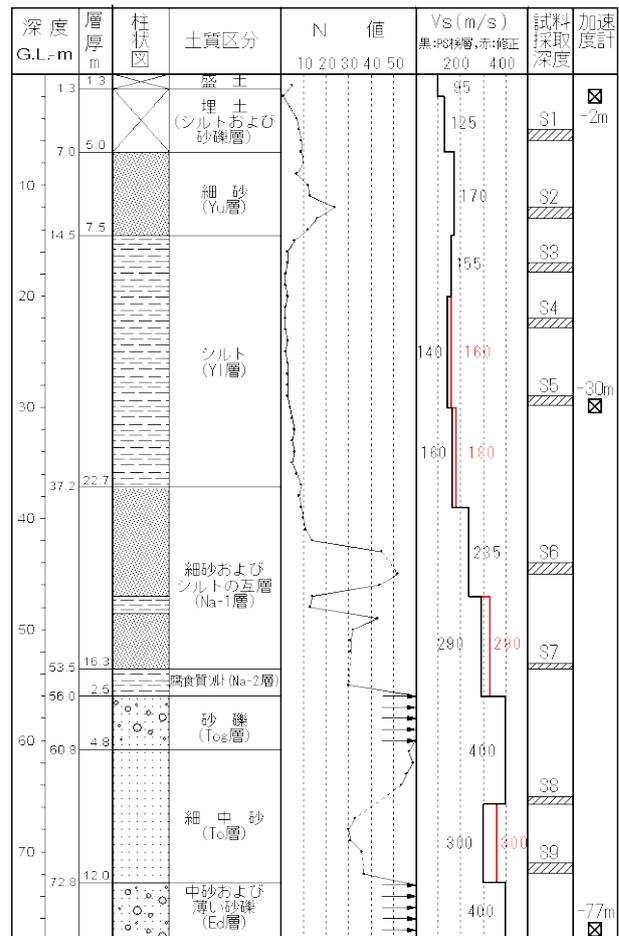


図-2 新木場鉛直アレー地震観測地点の地盤柱状図
および地震計の設置位置

当該地点は、昭和36年から昭和45年にかけて浚渫土砂により埋め立てられている。GL-7mまでが浚渫の埋立土のため、旧海底面はGL-7mと考えられる。GL-7m～GL-14.5mは有楽町層上部層（Yu層）、GL-14.5m～GL-37.2mは有楽町層下部層（Yl層）が堆積している。GL-37.2m以深は更新統の七号地層（Na-1層）、七号地層基底層（Na-2層）、東京礫層（Tog層）、東京層（To層）、江戸川層（Ed層）となっている。最下層のEd層はTog層と同様に硬く締まった砂礫層であり当該地点の基盤層（工学的基盤）と考えられている。地震計は、GL-2m（表層）、GL-30m（中間層）、GL-77m（工学的基盤）の3深度に設置されている。

GL-5.0m～6.0m, GL-12.0m～13.0m, GL-17.0m～17.8m, GL-22.0m～22.8m, GL-29.0m～29.8m, GL-44.0m～45.0m, GL-53.0m～53.5m, GL-65.0m～65.7m, GL-71.0m～71.9mの9深度から不攪乱試料を採取し、全試料に対して動的変形特性試験が行われている。図-3に動的変形特性を示す。

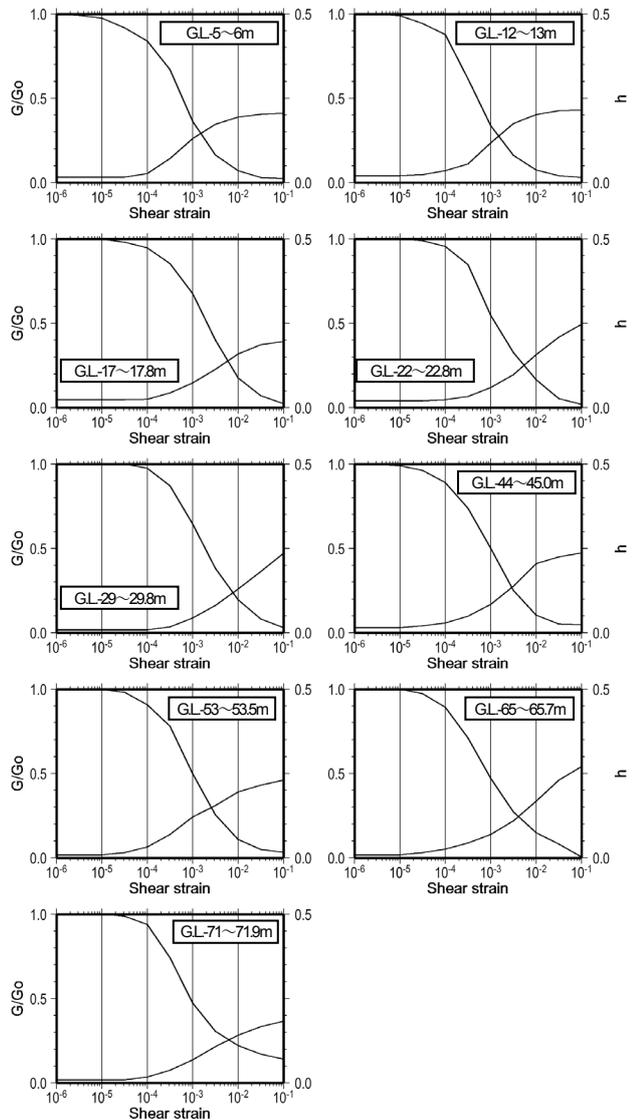
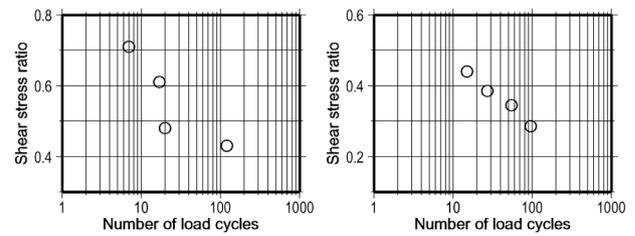


図-3 新木場鉛直アレー地震観測地点の動的変形特性

埋立土および有楽町層上部層の細砂層（GL-7m～14.5m）は液状化の可能性があるため、GL-5.0m～6.0m, GL-12.0m～13.0mから採取された試料に対しては液状化試験が行われている。図-4に液状化試験から得られた液状化強度特性を示す。埋立土の液状化強度（ R_{L20} ）は0.6程度であり、当該土層の液状化抵抗はかなり高いと考えられる。有楽町層上部層の液状化強度は埋立土より低いが R_{L20} は0.35以上と高く、当該地点に液状化が見られなかった状況と整合する。



(a)GL-5m～6m (b)GL-12m～13m

図-4 新木場鉛直アレー地震観測地点の液状化強度

(3) 地震観測地点の地震応答解析モデルの作成

表-1に地震観測地点の地震応答解析モデルを示す。標準貫入試験結果やPS検層結果に基づき初期モデルを作成し、弱地震記録における地震計間のS波の伝播時間や当該地点で計測された微動のH/Vスペクトルに基づき、S波速度を修正した。図-2に修正したS波速度をVs欄に赤線で示す。GL-20.0m～39.0m, GL-47.0m～56.0m, GL-65.7m～72.8mの層のS波速度を上方修正している。

図-5に作成した地盤モデルから算出した理論H/Vスペクトル比（Rayleigh波の基本モードの水平方向振幅と鉛直方向振幅との比）と地震観測地点で観測した微動H/Vスペクトル比を重ねて示す。微動H/Vスペクトル比は0.2HzのParzenウィンドウで平滑化している。微動H/Vスペクトルには明瞭な卓越が見られないため、理論H/Vスペクトルとの一致度が高いとはいえないが、微動H/Vスペクトル比の形状は理論H/Vスペクトル比で表現できている。

地盤モデルの精度を評価するため、振幅が小さい地震動を入力地震動に用いた地震応答解析を等価線形解析法で実施し、GL-2mの観測記録と比較した。入力地震動には、2008年9月17日に東京湾を震源としたM4.8の地震による観測記録を使用した。図-6にGL-2mの加速度時刻歴波形、図-7に擬似速度応答スペクトルを観測記録と解析結果を比較して示す。地震応答解析による観測結果をほぼ再現できており、地盤モデルの精度は高いと考えられる。

本震記録の地震応答解析は有効応力解析（YUSAYUSA-2）で行うため、YUSAYUSA-2に必要な非線形パラメータを設定する。地盤のせん断ひずみ～せん

断応力の非線形関係には双曲線モデルを使用する。表-2に非線形パラメータを示す。

τ_f は最大せん断強度を支配するパラメータであるが、本検討では強度特性とは考えずに、せん断応力～せん断ひずみの非線形関係 ($G/Go \sim \gamma$) を表現するパラメータと捉え、双曲線モデルの $G/Go \sim \gamma$ 関係が、図-3に示す各層の $G/Go \sim \gamma$ 関係と一致するように設定した。

埋立土および有楽町層上部層の細砂層は液状化の対象層として、過剰間隙水圧の発生に関するパラメータ Bp , Bu を設定する。 Bp , Bu の値は液状化の要素シミュレーションを行い、液状化強度が図-4に示す液状化強度と整合するように試行錯誤を行い設定した。

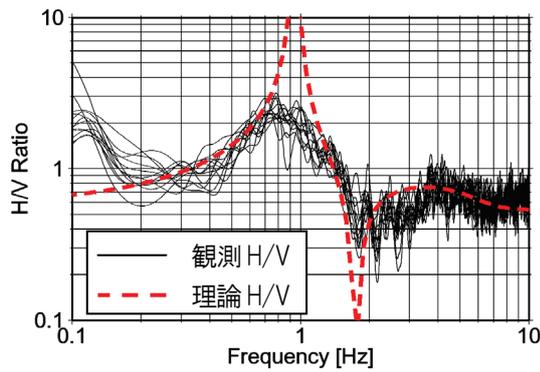
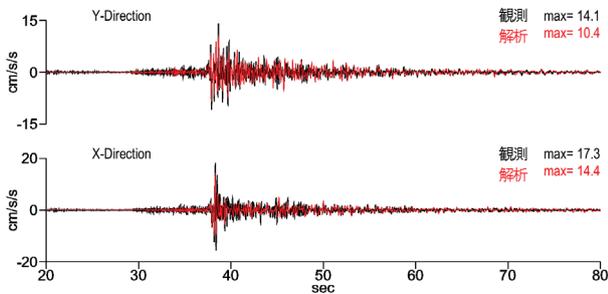
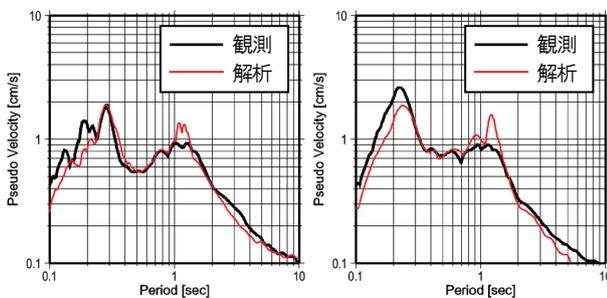


図-5 新木場鉛直アレー地震観測地点における微動H/Vスペクトル比と理論H/Vスペクトル比との比較



(a) 加速度時刻歴



(b) 加速度応答スペクトル ($h=0.05$)

図-6 2008年東京湾を震源とする地震 (Mj4.8) の地震動記録を用いた新木場鉛直アレー地震観測地点の地震応答解析結果と観測記録との比較 (黒線: 観測, 赤線: 解析)

表-1 鉛直アレー地震観測地点の地盤モデル

層 No.	土質名称	深度 (G.L.-m)		密度 (t/m^3)	せん断波速度 (m/s)	せん断剛性 (kNm^2)
		上端	下端			
1	盛土	0	2.0	1.80	95	16245
2	埋土	2.0	7.0	1.85	125	28906
3	細砂	7.0	14.5	1.85	170	53465
4	シルト	14.5	20.0	1.70	155	40843
5	シルト	20.0	30.0	1.55	160	39680
6	シルト	30.0	39.0	1.60	180	51840
7	細砂	39.0	43.2	1.85	235	102166
8	細砂	43.2	47.0	1.90	235	104928
9	シルト	47.0	48.5	1.70	330	185130
10	細砂	48.5	56.0	1.90	330	206910
11	砂礫	56.0	65.7	1.95	400	312000
12	中砂	65.7	72.8	1.75	360	226800
13	砂礫	72.8	77.0	2.00	400	320000
14	工学的基盤	77.0	-	2.00	400	320000

表-2 鉛直アレー地震観測地点の非線形パラメータ

層 No.	動的変形特性	液状化特性	τ_f (kNm^2)	ϕ_f (deg.)	Bp	Bu
1	S1	-	8.7	26.3	-	-
2	S1	Liq1	29.9	28.0	0.007	0.015
3	S2	Liq2	50.5	25.0	0.030	0.080
4	S3	-	80.1	26.8	-	-
5	S4	-	58.8	16.1	-	-
6	S4	-	78.5	16.9	-	-
7	S5	-	176.2	30.3	-	-
8	S5	-	182.6	28.5	-	-
9	S8	-	176.5	26.2	-	-
10	S6	-	176.5	24.0	-	-
11	S7	-	330.4	34.8	-	-
12	S8	-	196.1	19.8	-	-
13	S7	-	330.7	29.2	-	-

(4) 本震記録を用いた有効応力解析結果

図-7に本震記録を用いて有効応力解析から得られたY方向のG.L.-2m, G.L.-30mの加速度時刻歴と, G.L.-3.5m, G.L.-8.4mの過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。加速度時刻歴は観測波形と比較して示す。G.L.-3.5mはNo.2層の上層部, G.L.-8.4mはNo.3層の上層部に位置する。また, 図-8にY方向のG.L.-2mとG.L.-30mの擬似速度応答スペクトル ($h=0.05$) を示す。

最大加速度はやや差があるものの, 解析加速度波形は観測加速度波形をほぼ再現できている。擬似速度応答スペクトルも解析結果は観測結果をほぼ再現できている。そのため, 有効応力解析で本震時の地震観測地点の地震時挙動が再現できると考えられる。

過剰間隙水圧比の最大値はG.L.-3.5mが0.03, G.L.-8.4mが0.078であり, 過剰間隙水圧の上昇量は低い。No.2, No.3層内の最大過剰間隙水圧比も0.06と0.08と低く, 当該地点で液状化が確認されていないこと, 等価線形解析法でもG.L.-2mの観測記録が再現できること²⁾等の知見と整合する。

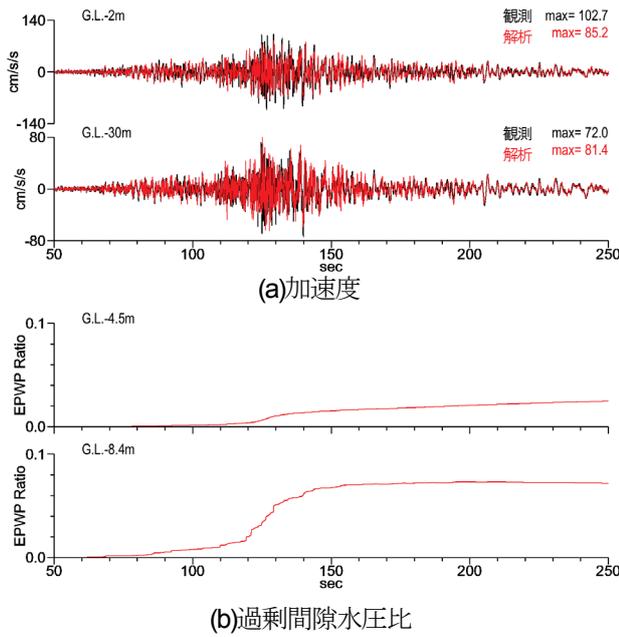


図-7 有効応力解析結果と観測結果との時刻歴波形の比較 (黒線：観測，赤線：解析)

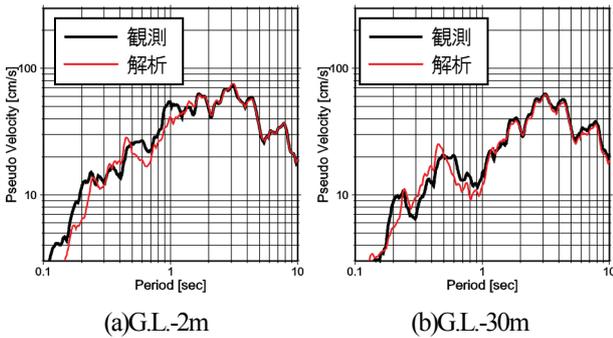


図-8 有効応力解析結果と観測結果との擬似速度応答スペクトル($h=0.05$)の比較(黒線：観測，赤線：解析)

5. 液状化地点の液状化強度の推定

液状化地点と地震観測地点との地盤は、No.2層の液状化強度のみが異なると仮定し、地震観測地点の地盤モデルのNo.2層の液状化強度を低下させ、No.2層が液状化する際の液状化強度を推定する。液状化強度は、図-4に示す液状化強度を0.05倍刻みで低下させる。図-9にNo.2層に設定した液状化強度を示す。

図-10に液状化強度を1/2に低下させた場合のG.L.-2mとG.L.-30mの加速度時刻歴とG.L.-4.5mとG.L.-8.4mの過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。液状化強度は $R_{L20}=0.30$ 、 $R_{L5}=0.38$ である。

G.L.-4.5mの過剰間隙水圧は、地震動の主要動部分で急激上昇しているが、上昇量は有効拘束圧の上載圧の10%を超える程度である。G.L.-8.4mはG.L.-4.5mに見られるような急激な上昇は見られないが、G.L.-4.5mと同様の有効拘束圧の10%程度まで上昇している。

過剰間隙水圧の上昇量が大きくなかったことから、G.L.-2mの加速度時刻歴に及ぼす影響は小さく、液状化強度を100%考慮した図-7の結果に近い。

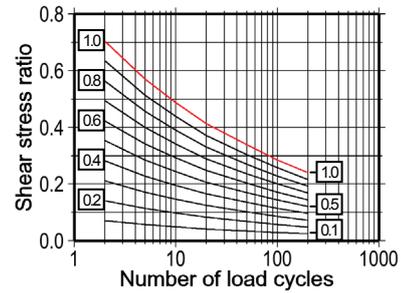


図-9 No.2層の液状化強度

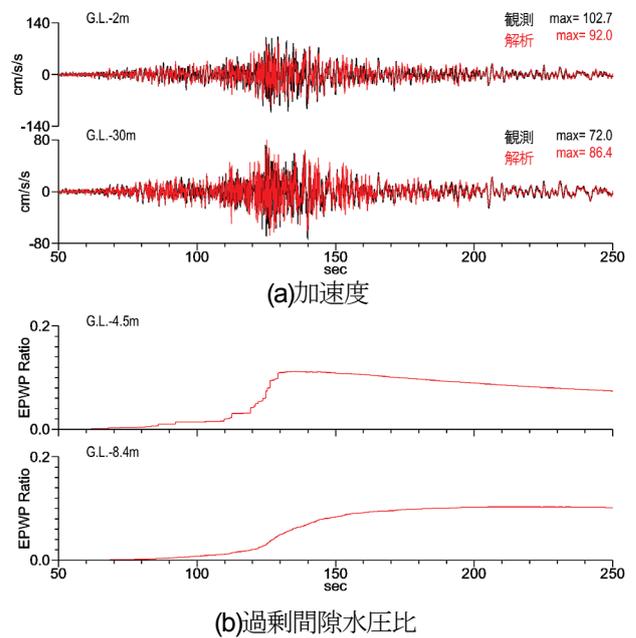


図-10 有効応力解析結果と観測結果との時刻歴波形の比較 (No.2層の液状化強度は初期値の1/4) (黒線：観測，赤線：解析)

液状化強度をさらに低下させ、初期値の1/4に低下させた場合のG.L.-2mとG.L.-30mの加速度時刻歴とG.L.-4.5mとG.L.-8.4mの過剰間隙水圧比の時刻歴を図-11に示す。また、G.L.-4.5mの有効応力経路を図-12に示す。当該モデルの液状化強度は $R_{L20}=0.15$ 、 $R_{L5}=0.19$ である。

図-11からわかるように、G.L.-8.4mの過剰間隙水圧の上昇量は有効拘束圧の20%程度であるが、G.L.-4.5mでは主要動部分において過剰間隙水圧が上限まで上昇しており、液状化に至っている。

一方、G.L.-2mの加速度波形には、液状化した地盤に見られるような液状化後の急激な振幅の低下は見られない。その原因として、本解析では地盤の応力状態が破壊線を超えた場合にも、有効応力はゼロとならず、初期有効拘束圧の3%は有効応力が残るようにしていることが

考えられる。

また、G.L.-2mの最大加速度は、地盤が完全液状化していない液状化強度が1/2の場合（図-10）よりも大きくなっている。その理由としては、図-12に示すように、有効応力経路が変相線を超え破壊線に達した際に有効応力の回復が見られるためと考えられる。

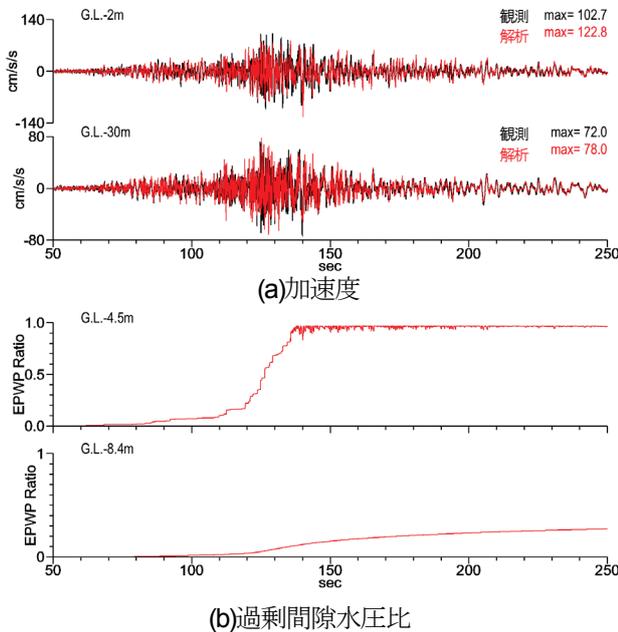


図-11 有効応力解析結果と観測結果との時刻歴波形の比較（No.2層の液状化強度は初期値の1/4）

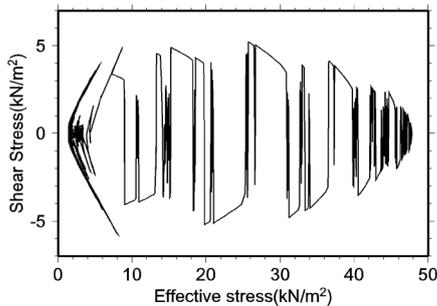


図-12 G.L.-4.5mにおける有効応力経路（No.2層の液状化強度は初期値の1/4）

図-13にNo.2層とNo.3層の過剰間隙水圧比の深度分布を示す。図からわかるように、過剰間隙水圧が上限まで上昇した地盤は限定的であり、加速度時刻歴の振幅が小さくならなかった理由は液状化層厚にも関係する可能性がある。また、No.2層の液状化強度を $R_{120}=0.15$ 、 $R_{15}=0.19$ まで低下させると地盤は液状化することが有効応力解析から明らかにされたが、地盤調査結果による新木場周辺の噴砂を含む液状化の状況によると、液状化層厚はもう少し厚かった可能性があり、当該層の液状化強度はよりさらに小さかった可能性がある。

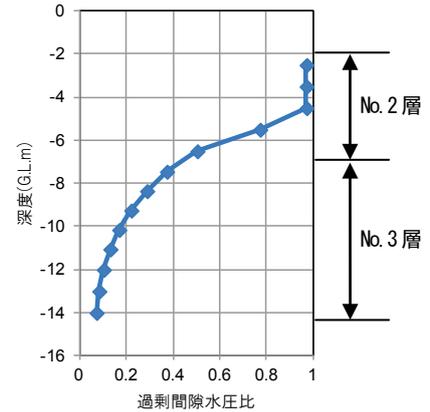


図-13 液状化対象層の過剰間隙水圧比の深度分布

6. 結論

2011年東北地方太平洋沖地震で液状化した東京湾臨海部の埋め立て地である新木場地区の液状化強度を有効応力解析により推定した。得られた結果を下記に示す。

① 新木場地区に隣接する鉛直アレー地震観測地点の地盤モデルに基づき、液状化地点の地盤モデルを作成して有効応力解析を行った結果、埋立土の液状化強度を $R_{120}=0.15$ 、 $R_{15}=0.19$ まで低下させると液状化対象層の上部地盤の過剰間隙水圧が上限まで上昇し完全液状化に至った。

② 当該液状化強度では、液状化層厚が限定されたため、液状化強度はより低い可能性が考えられる。

本検討では、No.2層のみ液状化強度を低下させたが、No.3層の影響も無視できないことから、今後の複数の層を考慮し、液状化強度の推定精度の向上をはかりたい。

謝辞：本検討で使用した鉛直アレー地震観測記録は、東京大学生産技術研究所小長井研究室が東京地下鉄株式会社から委託を受けて実施してきた地震観測で得られたものであり、1976年から継続して観測を支えていただいた関係各位に謝意を表します。地盤の有効応力解析にはYUSAYUSA-2を使用させていただきました。微動観測では東京地下鉄株式会社、同社三留國禎氏、東京大学生産技術研究所小長井研究室M2の須山翔太氏の協力を得ました。また、本研究の一部は科研費基盤研究(C)21560513（研究代表者：池田隆明）および科研費基盤研究(C)24560595（研究代表者：池田隆明）の助成を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 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化現象の実態解明報告書, 2011.
- 2) 池田隆明, 小長井一男, 片桐俊彦: 鉛直アレー地震観測記録を用いた2011年東北地方太平洋沖地震における東京湾臨海部の地震時挙動の検討, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol. 68, No. 4 (地震工学論文集第31-b巻), I_138-I_151, 2012.
- 3) 吉田望: YUSAYUSA: 有効応力に基づく一次元地震応答解析, <http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/computercodes/index.html>

ESTIMATE OF THE LIQUEFACTION STRENGTH OF SHINKIBA, TOKYO, JAPAN, THAT LIQUEFIED BY THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Takaaki IKEDA, Kazuo KONAGAI, Toshihiko KATAGIRI and Takashi KIYOTA

Intense liquefaction occurred during the 2011 off the pacific coast of Tohoku earthquake at Shinkiba area in Tokyo bay area. We estimated liquefaction strength by effective stress analysis. As a result, the liquefaction strength was estimated to be around $R_{L20}=0.15$. In addition, as for the liquefaction strength, a little lower possibility was suggested.