

東北地方太平洋沖地震における東京湾岸の液状化に関する等価繰返し回数と有効継続時間

正会員 ○新井 洋*

液状化 等価繰返し回数 有効継続時間
東京湾岸 東北地方太平洋沖地震 マグニチュード

1. はじめに

実用的な液状化判定・対策において、地震動の等価繰返し回数 N_{eq} や有効継続時間 t_d は重要なパラメータであるが、これらは、マグニチュード M から経験的に仮定される場合が多い^{1), 2)}。しかし、 $M > 8$ の地震のデータは極めて少なく、東北地方太平洋沖地震 ($M = 9.0$) に対する既往の経験式の適用性は明確でない。そこで、本報では、室内液状化試験結果のある東京湾岸2地点(千葉港と夢の島)の鉛直アレイ本震記録を対象に、有効応力解析を行って N_{eq} と t_d を推定し、 M との関係を検討する。

2. 東京湾岸2地点の鉛直アレイ本震記録の有効応力解析

千葉港と夢の島の地盤調査結果^{3), 4)}に基づいて、各地点の地盤モデルを表1のように設定し、それぞれ GL-37.8m, GL-89.5m で観測された本震の加速度時刻歴波形^{5), 6)}を用いて、1次元有効応力解析^{7), 9)}を行った。この際、過剰間隙水圧の変化を規定する構成則のパラメータは、解析上の液状化強度曲線が各地点の室内試験結果^{3), 4)}に適合するよう設定した(図1)。

千葉港の解析で得られた地表加速度波形等を観測記録⁵⁾と比較して図2に示す。また、地盤の最大変位、最大せん断ひずみ、過剰間隙水圧比の深さ方向分布を図3に示す。図から、解析結果は観測記録と良く対応しており、この地点で液状化の痕跡が見られなかったこと¹⁰⁾とも整合している。夢の島においても、同程度の再現性を有する解析結果が得られた。

3. 液状化に関する地震動の等価繰返し回数と有効継続時間

地震動の等価繰返し回数 N_{eq} は、液状化強度曲線の両対数軸上の勾配を一定 (= C) とすると、(1)式で表される²⁾。

$$N_{eq} = \frac{1}{2} \tau_e^c \sum_i \tau_i^{-\frac{1}{c}} \quad (1)$$

ここに、 τ_i は、せん断応力の時刻歴において、 i 番目の半サイクルの最大振幅、 τ_e は等価せん断応力 (= $0.65 \times \tau_{max}$) である。

2章の有効応力解析結果から、(1)式により各地点の等価せん断応力比と等価繰返し回数の関係を求め、図1に重ねて示す。図

には比較のため、(b)千葉県東方沖地震における夢の島の記録⁴⁾および(c)兵庫県南部地震における神戸市ポートアイランドの記録^{11), 12)}に対して同様の検討を行った結果¹³⁾も示している。図から、東北地方太平洋沖地震における東京湾岸の N_{eq} は 20-60 程度で、千葉県東方沖地震におけるその2倍程度と推察される。ただし、いずれの場合も、等価せん断応力比が小さく、液状化強度曲線を下回ったため、液状化に至らなかったと考えられる。また、兵庫県南部地震における神戸市ポートアイランドの N_{eq} は 5-10 程度で、東北地方太平洋沖地震における東京湾岸のその1/4-1/6程度と推察される。

図4は、図1に基づき、地震のマグニチュード M と N_{eq} の関係について、文献1, 2等で用いられている既往の提案式¹⁴⁾との対応を示している。ここで、既往の提案式では、 $M < 8.5$ の範囲(灰色実線)が示されており、図中の $M > 8.5$ の範囲(灰色点線)は、その外挿である。図から、本報の解析で得られた $M-N_{eq}$ 関係は、既往の提案式およびその外挿による値と、大きな矛盾がないように見える。

図5は、 N_{eq} の累積回数と時間 t の関係 $\beta(t)$ ^{2), 15)} について、東北地方太平洋沖地震における千葉港と夢の島の解析で得られた結果を、文献2の図-7.7と比較して示している。 $\beta(t)$ が 0 から 1 まで変化するのに要する時間を液状化に関する地震動の有効

表1 (左)千葉港と(右)夢の島の地盤モデル

層厚 (m)	単位体積重量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	土質	平均 N値	細粒分含有率
1.50	1.80	120	埋土(砂礫)		
1.90	1.80	120	細砂		
1.13	1.80	220	細砂	13	0.065
1.13	1.80	220	細砂	23	0.043
1.13	1.80	220	細砂	21	0.070
1.13	1.80	220	細砂	21	0.104
0.95	1.80	200	細砂	7	0.106
0.95	1.80	200	細砂	8	0.093
0.95	1.80	200	細砂	5	0.116
0.95	1.80	200	細砂	3	0.210
1.20	1.60	120	シルト質細砂	1	0.441
1.60	1.60	120	シルト		
3.00	1.60	120	粘土		
8.10	1.80	290	細砂		
4.30	1.60	210	粘土		
7.92	1.90	420	細砂		

層厚 (m)	単位体積重量 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	土質	平均 N値	細粒分含有率
5.40	1.80	230	砂質シルト		
0.80	1.91	130	細砂		
2.80	1.91	130	細砂	19	0.170
2.30	1.82	170	細砂	20	0.070
2.40	1.82	170	細砂	21	0.100
1.70	1.82	220	シルト質細砂	10	0.330
4.60	1.82	220	シルト質細砂	11	0.330
6.00	1.70	150	シルト質粘土		
14.00	1.50	150	シルト質粘土		
4.20	1.50	170	シルト質粘土		
1.30	1.87	250	シルト質細砂		
4.70	1.69	250	シルト		
9.30	2.10	560	砂礫		
14.30	1.87	330	砂礫		
9.80	1.79	330	砂質シルト		
5.90	2.10	560	砂礫		

地下水位 3.4m 地下水位 6.2m

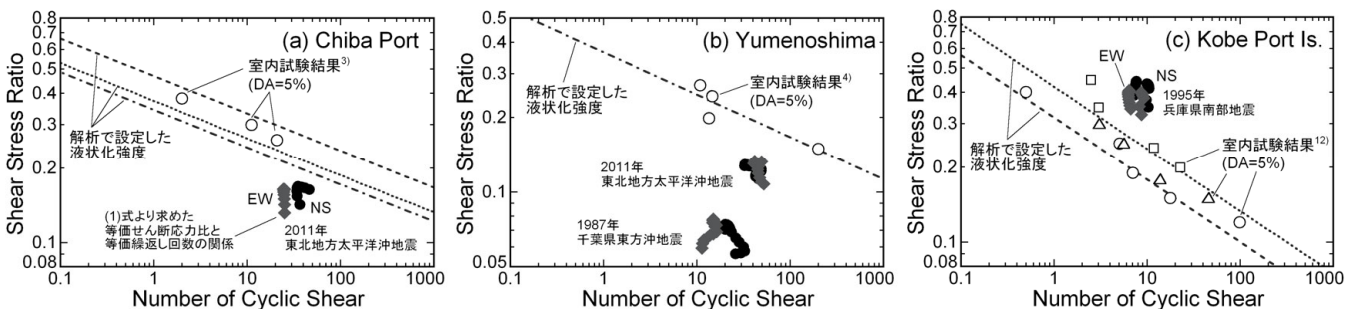


図1 液状化強度曲線のフィッティングおよび有効応力解析から推定した等価せん断応力比と等価繰返し回数の関係

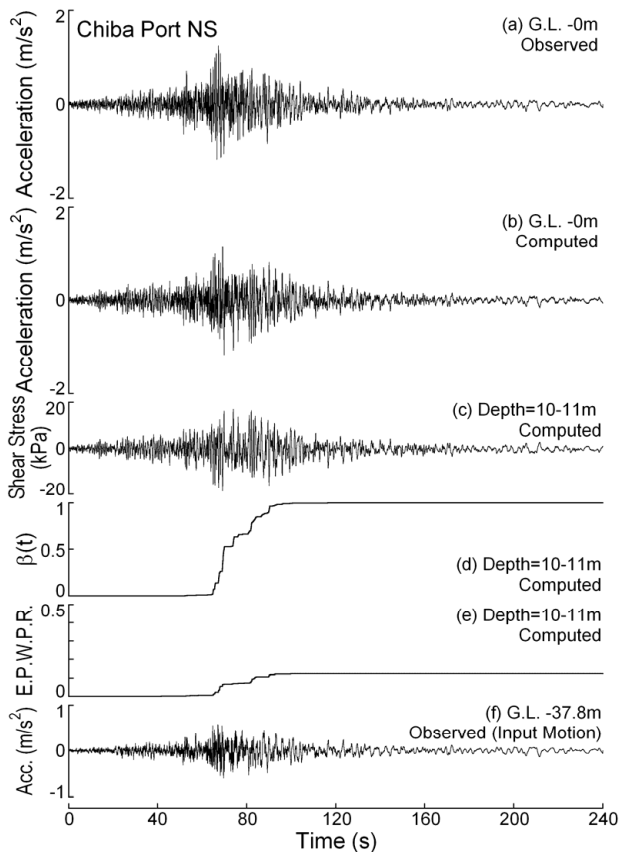


図2 有効応力解析結果と観測記録の比較（千葉港 NS 成分：東北地方太平洋沖地震）

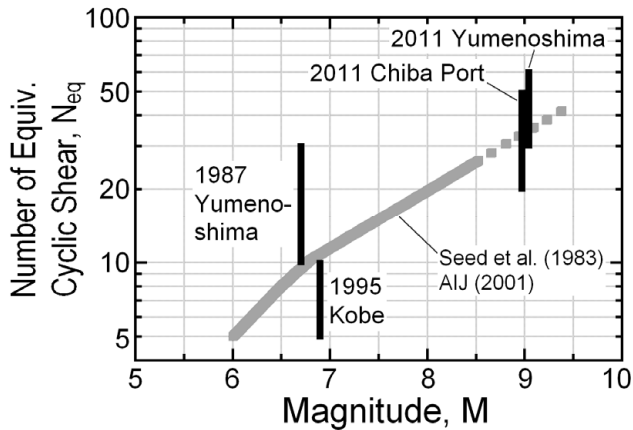


図4 地震のマグニチュード M と液状化に関する地震動の等価繰返し回数 N_{eq} の関係

継続時間 t_d と定義する^{2), 15)}。図5から、東北地方太平洋沖地震における東京湾岸の t_d は 25 秒程度で、過去の地震に対する推定値（数秒-15 秒程度）に比べて大きな値となっている。なお、文献2, 15では、 $M = 6, 7, 8$ に対して、平均的に $t_d = 2, 6, 12$ 秒程度となる傾向が示唆されており、この関係の概ね外挿線上に本報の推定値（ $M = 9$ で $t_d = 25$ 秒程度）は位置している。

ただし、 $M-N_{eq}$ 関係および $M-t_d$ 関係は、震源からの距離・方位や地盤の拘束圧などにも依存するため²⁾、今後、さらに多面的な検討が必要と考えられる。

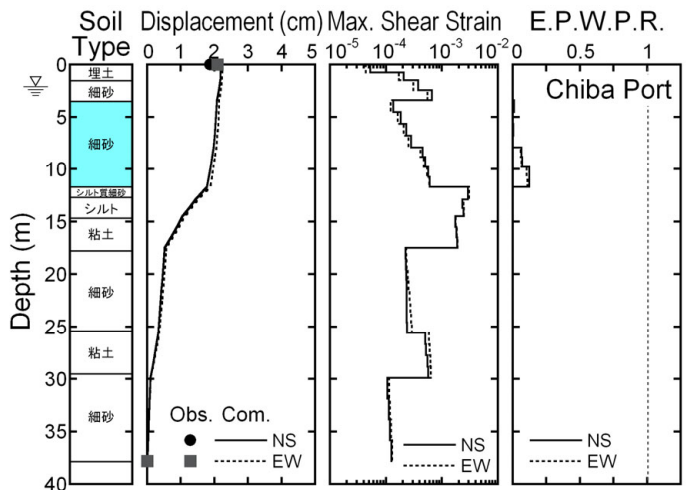


図3 有効応力解析による最大地盤応答（千葉港：東北地方太平洋沖地震）

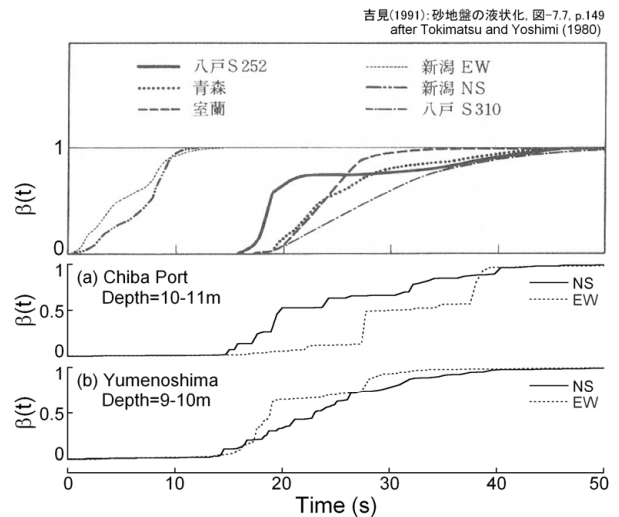


図5 液状化に関する地震動の有効継続時間 (N_{eq} の累積回数と時間 t の関係 ($\beta(t)$: 文献2に加筆)

4. まとめ

東北地方太平洋沖地震における東京湾岸の鉛直アレイ強震記録を対象に、1次元有効応力解析を行って、液状化に関する地震動の等価繰返し回数と有効継続時間を試算した。

謝辞 千葉港鉛直アレイ強震観測地点の地盤調査結果³⁾は、(独)港湾空港技術研究所よりご提供いただいた。記して謝意を示す。

【参考文献】1) AIJ：建築基礎構造設計指針，61-72，2001。2) 吉見：砂地盤の液状化(第2版)，技報堂出版，1991。3) 運輸省第二港湾建設局千葉港湾工事事務所：千葉港土質調査報告書，1997。4) Ishihara et al.: Soils and Foundations, 29(4), 75-90, 1989。5) (独)港湾空港技術研究所：港湾地域強震観測，<http://www.eq.pari.go.jp/kyosin/> 6) 東京都港湾局：港湾局地震観測所，<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisojoho/fishindou.html> 7) 社本ほか：AIJ 構造系論文報告集，433, 113-119, 1992。8) Zhang et al.: Soils and Foundations, 37(2), 51-59, 1997。9) Shamoto et al.: Soils and Foundations, 37(2), 71-80, 1997。10) 例えば，国交省関東地方整備局，JGS：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。11) 神戸市開発局，1995。12) Hatanaka et al.: Soils and Foundations, 37(3), 107-115, 1997。13) 新井：JGS 大会，2012(投稿中)。14) Seed et al.: J. Geotechnical Engineering, ASCE, 109(3), 458-482, 1983。15) Tokimatsu and Yoshimi: Proc., Int'l Conf. on Engineering for Protection from Natural Disasters, 643-655, 1980。

* 国土技術政策総合研究所 建築研究部 主任研究官・博士(工学)

* Senior Researcher, Building Dept., National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.