

2011 年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

2011 年東北地方太平洋沖地震 液状化 等価繰返し回数

国土技術政策総合研究所 国際会員 ○新井 洋

1. はじめに

現行の建築基礎構造設計指針¹⁾の液状化判定では、地震動の等価繰返し回数 N_{eq} に関する補正係数はマグニチュード M から与えられる。しかし、同指針では、 $M > 8.5$ における適用性が示されておらず、2011 年東北地方太平洋沖地震の $M = 9.0$ を代入してよいか明確でない。そこで、本報では、この地震を含む 3 地震について、3 地点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 N_{eq} を推定し、マグニチュード M との関係について検討する。

2. 検討対象の地震と鉛直アレイ強震記録および 1 次元有効応力解析

本報で検討対象とする地震と鉛直アレイ強震記録の一覧を表 1 に示す。これらは、地震のマグニチュードや地震動の継続時間の大小、強震観測地点の液状化の発生状況、解析に必要な地盤情報の多寡などを勘案して選定した。千葉港、夢の島、神戸市ポートアイランドの地盤調査結果²⁾⁵⁾に基づいて、各地点の地盤モデルを表 2-4 のように設定し、それぞれ G.L.-37.8m, G.L.-89.5m, G.L.-32m で観測された各地震の加速度時刻歴波形^{3), 6)8)}を用いて、1 次元有効応力解析⁹⁾¹¹⁾を行った。解析は非排水条件とし、土のせん断応力-ひずみ関係は修正 R-O モデル¹²⁾、せん断に伴う過剰間隙水圧の変化を規定する関係式は社本・張モデル⁹⁾¹¹⁾を用いた。モデルのパラメータは、解析上の液状化強度曲線が各地点の室内試験結果^{2), 3), 5)}に適合するよう設定した(図 1)。

2011 年東北地方太平洋沖地震に対する千葉港および夢の島の解析で得られた地表加速度波形を観測記録^{6), 7)}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、いずれの解析結果も観測記録と良く対応している。なお、過剰間隙水圧比は両地点とも 0.1-0.2 程度までしか上昇せず、液状化の発生に至らない(図は省略するが、主要動の前半では、加速度振幅の増大とともに水圧が徐々に上昇するが、加速度振幅が減少に転じる時刻以降では、水圧の上昇が止まっている)。このことは、いずれの地点でも液状化の痕跡が見られなかったこと¹³⁾と整合している。1987 年千葉県東方沖地震に対する夢の島の解析でも、観測事実と良く対応する結果が得られた。

神戸市ポートアイランドの解析については、既報¹⁴⁾の結果を引用する。これも、図は省略するが、他の多くの再現解析と同様、解析結果が観測事実を概ね説明できることを確認している。

3. 液状化に関する地震動の等価繰返し回数とマグニチュードの関係

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、文献 15 より、(1)式で表される。

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

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)式により各地震・地点における等価せん断応力比と等価繰返し回数の関係を求め、これを図 1 に重ねて示す(●: NS 方向, ◆: EW 方向)。図から、2011 年東北地方太平洋沖地震における千葉港および夢の島の N_{eq} は 20-60 程度で、1987 年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、1995 年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、2011 年東北地方太平洋沖地震における千葉港および夢の島のその 1/4-1/6 程度と推察される。

図 4 は、図 1 および表 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、建築基礎構造設計指針等で用いられている既往の提案式^{15), 16)}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)

表 1 検討対象の地震と鉛直アレイ強震記録

地震	観測地点	地震計設置深度	液状化痕跡
2011年東北地方太平洋沖地震 ($M_w = 9.0$)	千葉港	G.L.-0m, -37.8m	無
	夢の島	G.L.-1.1m, 18.3m, 89.5m	無
1987年千葉県東方沖地震 ($M_j = 6.7$)	夢の島	G.L.-1.1m, 18.3m, 89.5m	無
1995年兵庫県南部地震 ($M_w = 6.9$)	神戸市ポートアイランド	G.L.-0m, -16m, -32m, -83m	有

表 2 千葉港の地盤モデル

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		

地下水位 3.4m

表 3 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
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 6.2m

表 4 神戸市ポートアイランドの地盤モデル

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
3.00	1.80	170	埋土(砂礫)		
2.00	1.80	170	埋土(砂礫)	7.5	0.079
7.60	1.80	210	埋土(砂礫)	7.5	0.079
3.40	1.80	210	埋土(砂)	12	0.041
3.00	1.80	210	埋土(砂)	16	0.054
8.00	1.50	180	粘土		
5.00	1.85	245	砂		

地下水位 3.0m

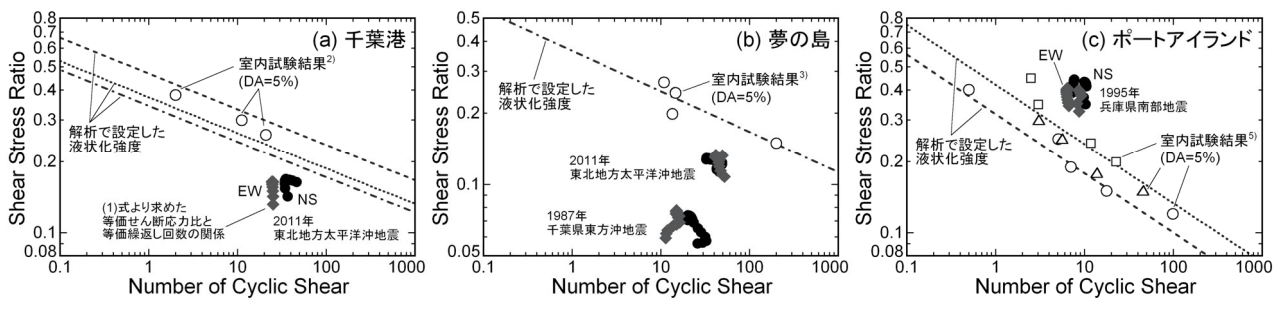


図1 液状化強度曲線のフィッティングおよび有効応力解析から推定した等価せん断応力比と等価繰返し回数の関係
 (a) 千葉港：2011年東北地方太平洋沖地震、(b) 夢の島：2011年同地震および1987年千葉県東方沖地震、
 (c) 神戸市ポートアイランド：1995年兵庫県南部地震)

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。

ただし、 $M-N_{eq}$ 関係は、地盤の拘束圧や震源からの距離などにも依存するため¹⁵⁾、今後、さらに多面的な検討が必要と考えられる。また、図1(a)において、千葉港の解析で用いた液状化強度曲線は、当該地震動の等価繰返し回数（20-50程度）の範囲では、室内試験データがなく、これらを外挿して仮定したものであることに注意を要する。

4. まとめ

2011年東北地方太平洋沖地震を含む3地震について、3地点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地震動の等価繰返し回数 N_{eq} を推定し、以下の知見を得た。i) 2011年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、1995年兵庫県南部地震における神戸の値の4-6倍程度に相当する。ii) 推定された N_{eq} とマグニチュード M の関係は、既往の提案式の概ね外挿線上に位置し、現行の建築基礎構造設計指針の液状化判定で $M = 9.0$ を代入してよい可能性が示唆される。ただし、今後、さらに多面的な検討が必要である。

謝辞 千葉港鉛直アレイ強震観測地点の地盤調査結果²⁾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) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，61-72，2001。 2) 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。 3) Ishihara et al.: Soils and Foundations, 29(4), 75-90, 1989。 4) 神戸市開発局，シマダ技術コンサルタント：ポートアイランド土質調査及び地震計設置業務報告書，1991。 5) Hatanaka et al.: Soils and Foundations, 37(3), 107-115, 1997。 6) (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/>。 7) 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[速報]，<http://www.kouwan.metro.tokyo.jp/business/kisojoho/jishindou.html>。 8) 神戸市開発局，1995。 9) 社本ほか：日本建築学会構造系論文報告集，433，113-119，1992。 10) Zhang et al.: Soils and Foundations, 37(2), 51-59, 1997。 11) Shamoto et al.: Soils and Foundations, 37(2), 71-80, 1997。 12) Jennings: ASCE, 90, EM2, 131-166, 1946。 13) 例えば，国交省関東地方整備局，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。 14) 新井ほか：日本建築学会近畿支部耐震構造研究会シンポジウム 内陸直下型地震と海溝型地震のどちらに備えればよいか？「増大する地震動レベルに対する設計」，19-26，2009。 15) 吉見：砂地盤の液状化(第2版)，技報堂出版，1991。 16) Seed et al.: J. Geotechnical Engineering, ASCE, 109(3), 458-482, 1983。

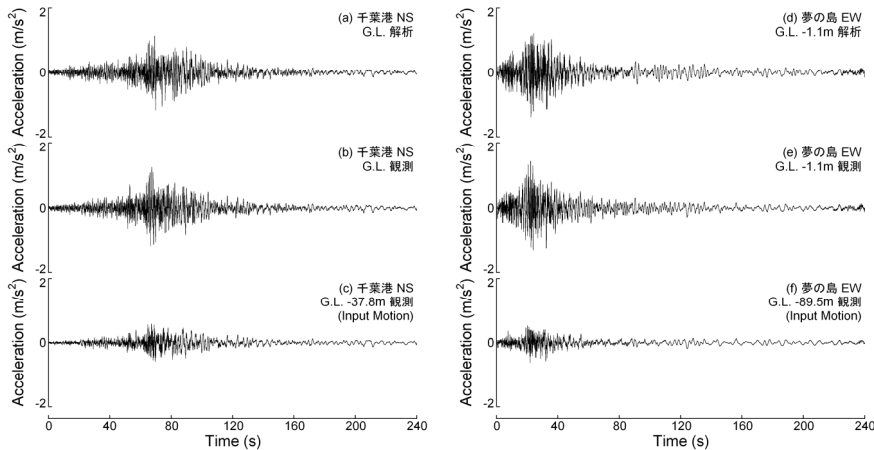


図2 有効応力解析結果と観測記録の比較 ((左) 千葉港, (右) 夢の島)
 (2011年東北地方太平洋沖地震)

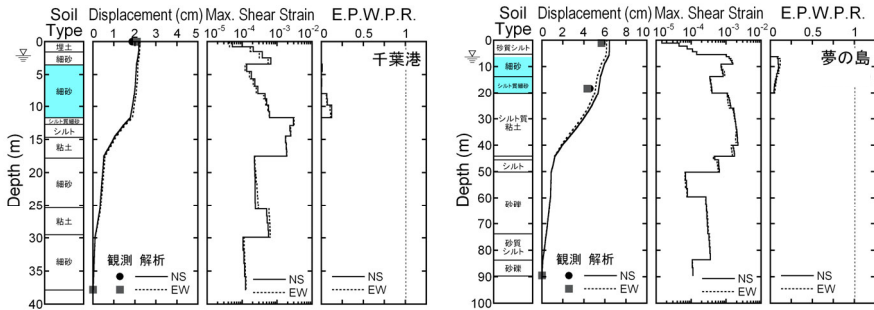


図3 有効応力解析による最大地盤応答 ((左) 千葉港, (右) 夢の島)
 (2011年東北地方太平洋沖地震)

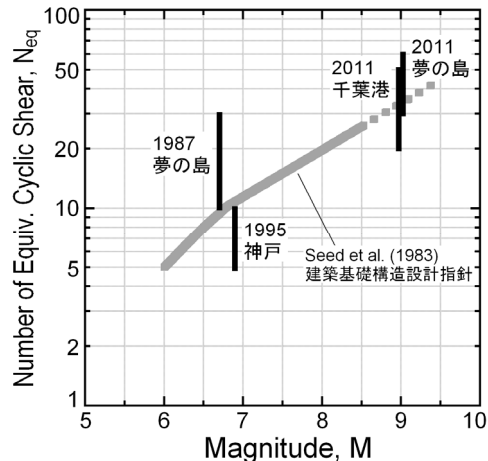


図4 地震のマグニチュードと液状化に関する地震動の等価繰返し回数の関係