

地震観測記録を用いた『SS21/ShakePRO』の検証シリーズ

本資料は、地盤の一次元地震応答解析（全応力または有効応力解析）プログラム『SS21/ShakePRO』の妥当性を検証することを目的に、応答解析による結果と観測記録を比較し、その考察を示すものです。また観測地点の地盤モデル（入力データ）作成についての説明も合わせて行います。

PARI 小名浜：2011 年東北地方太平洋沖地震（2011/03/11）による検証

■ 概要

PARI 小名浜観測点¹⁾は 2011 年東北地方太平洋沖地震の震源から震央距離 214.6km に位置し、同地震で観測された加速度記録の最大値は表 1 のとおりです¹⁾。この観測記録を検討した文献²⁾によると、地震直後の津波などの影響で噴砂等の確認はありませんが、EW および NS 方向でスパイク状の加速度応答が記録されていることよりサイクリックモビリティが生じ、液状化が発生した層があるものと推察されています。

表 2 に PARI 小名浜の地盤定数²⁾を示します。表 2 の値は Web¹⁾での公開値¹⁾とは異なるようですが、液状化対象層浅部の N 値等が明記されている表 2 の地盤定数を本検討で用いる地盤モデルの基とします。

図 1 に EW および NS 方向の地表および地中での観測（加速度）記録を示します。また図 2 に振幅の大きい 80～110 秒間での地表加速度記録を示します。

表 1 最大加速度

観測深度	観測地点名	最大加速度		
		NS	EW	UD
地表 (GL-0m)	小名浜事-G	1082.6	1430.0	383.5
地中 (GL-11.05m)	小名浜事-GB	196.6	170.0	241.6

表 2 地盤定数²⁾

深度 (m)	N 値	細粒分含有率 Fc (%)	質量密度 ρ_t (t/m ³)	S 波速度 VS (m/s)	土質 ¹⁾
1.3	7	5.5	1.8	100	埋土・盛土 砂
2.0	7	5.5	2.0	100	
3.0	36	10.6	2.0	150	
4.0	50	7.5	2.0	150	
5.0	37	30.4	2.0	300	
6.0	42	15.3	2.0	300	
7.0	50		2.0	300	
8.0	50		2.0	700	シルト

地下水位：GL-1.3m

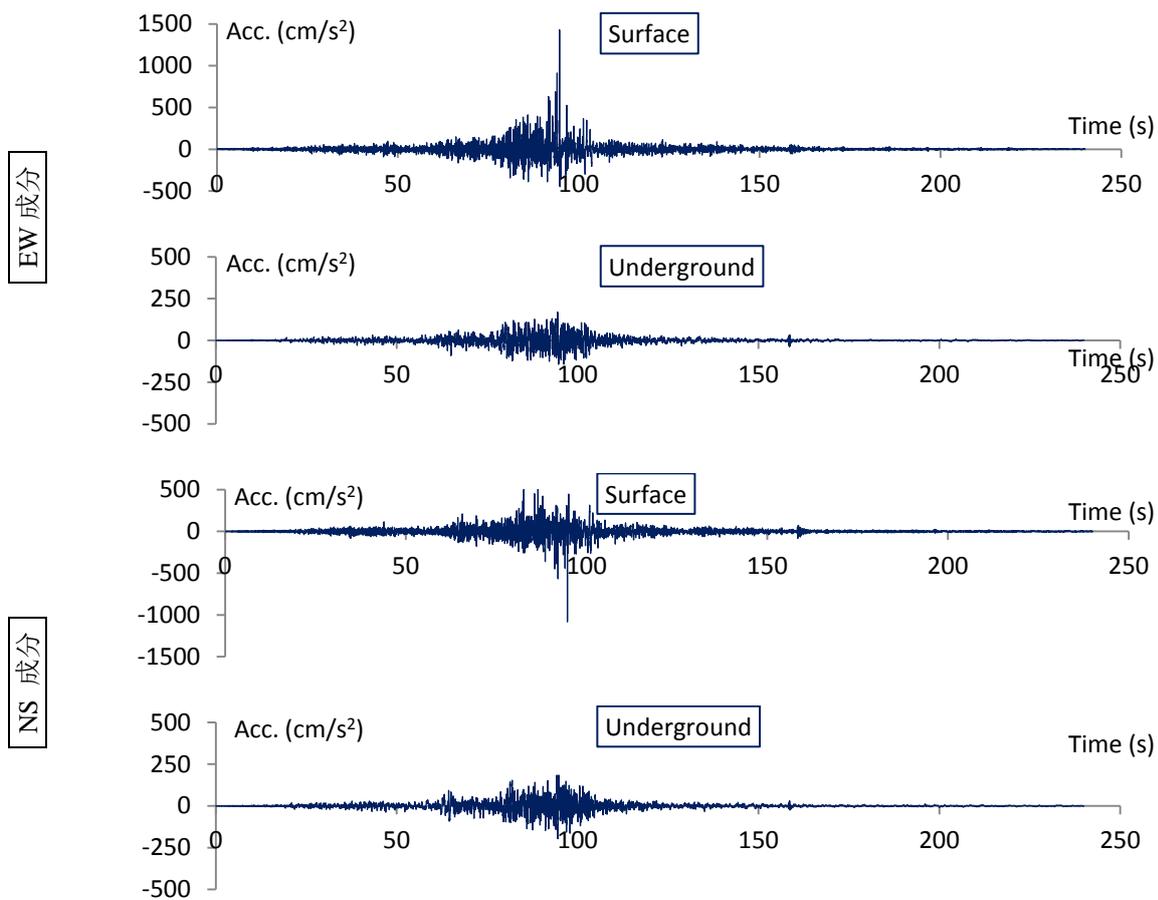


図1 加速度記録（地表および地中 GL-11.05m）

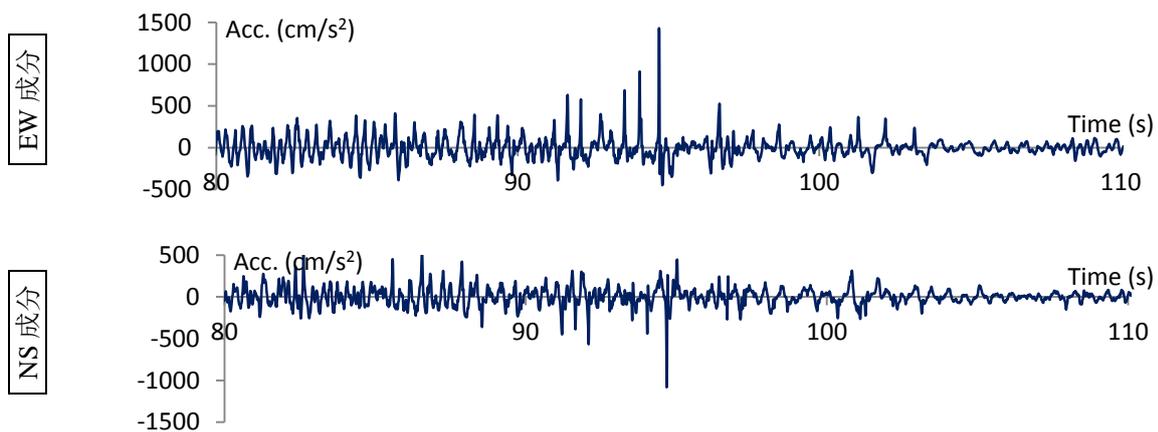


図2 80～110秒間での地表加速度記録

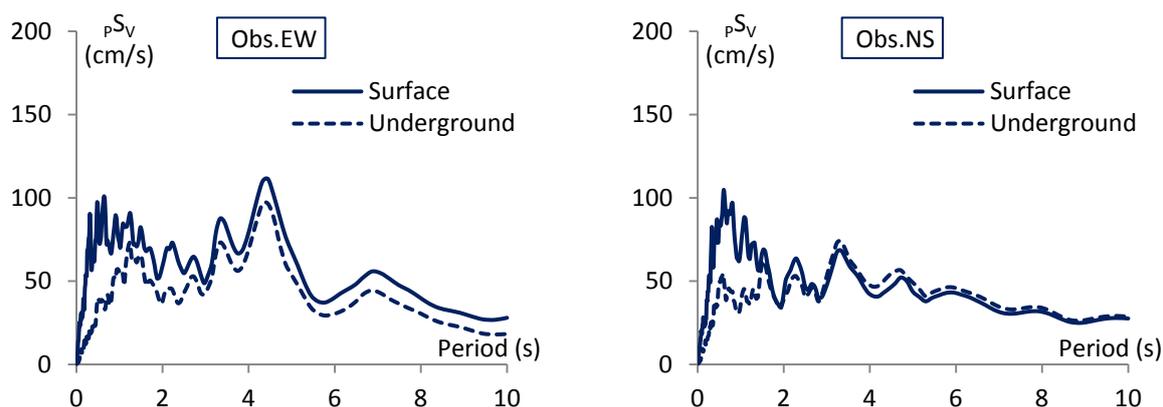


図3 観測記録の応答スペクトル (h=5%)

■地盤モデルと入力データ

地中 (GL-11.05m) での観測 (加速度) 記録を入射波として解析を行い、得られた地表の加速度波形を観測記録と比較します。また応答スペクトルの比較も行います。

解析に用いた地盤モデルを表3に示します。公開値¹⁾を参考に、表1のGL-7~8mの物性を観測深度のGL-11mまで同じとし、層No.8とNo.9の層厚を2mとしました。質量密度 ρ は表1の値を、最大せん断剛性 G_{max} は質量密度と表1のS波速度 V_s から求まる値 ($G_{max}=\rho V_s^2$) としました。

GL-7m以浅の砂層について、基準歪には拘束圧の影響が簡便に評価できる、せん断耐力 τ_{max} を規定した $\gamma_{0.5}$ ³⁾ ($=\tau_{max}/G_{max}$) を、最大減衰定数 h_{max} には全国平均値⁴⁾を与えました。ここに砂質土のせん断耐力は $\tau_{max}=\sigma'_z \tan\phi_d$ で、 σ'_z は有効上載圧、 ϕ_d は拘束圧を考慮した内部摩擦角⁵⁾です。GL-7m以深のシルト層はN値=50、 $V_s=700\text{m/s}$ であることより線形としました。

土の応力-歪モデルには $\gamma_{0.5}$ と h_{max} で規定されるH-Dモデルを用いました。

表4に液状化対象層に対する有効応力解析パラメータを示します。初期有効応力 σ'_0 および液状化抵抗比 τ/σ'_0 には建築基礎構造設計指針⁶⁾の液状化判定の手順で求まる有効上載圧 σ'_z および液状化強度比 $\tau/\sigma'_z (=R_{15})$ をそのまま用いました。液状化強度曲線 (液状化抵抗比-等価繰返し回数) の両対数軸勾配には-0.25を与えました⁷⁾。せん断応力-有効応力平面における破壊線の勾配 M_f は $\sin\phi_d$ 、また変相線の勾配 M_c は $0.9\times M_f$ としました⁷⁾。

また2011年東北地方太平洋沖地震のように繰返し回数の多い場合に提案されている液状化抵抗比の下限値⁸⁾を R_{15} に対する比 ($=0.838=R_{100}/R_{15}$, $R_{100}/R_{20}=0.9$ より⁸⁾換算) で与えました。すなわち液状化抵抗比が $0.838\times R_{15}$ 以上において液状化強度曲線から等価繰返し回数が計算され、液状化に関する累積損傷度⁷⁾が加算されることとなります。

地盤モデルの内部粘性減衰条件として初期物性値による1次および2次周期での減衰定数が $h=0.01$ となるレーリー型減衰を与えました。また応答解析 (積分) 時間間隔は1/1000秒としました。

表3 地盤モデル

No.	深度(m)	質量密度 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	最大せん断剛性 G_{max} (kN/m ²)	基準歪 $\gamma_{0.5}$	最大減衰定数 h_{max}	土質
1	1.3	1.8	100	18,000	0.001000	0.21	埋土・盛土
2	2.0	2.0	100	20,000	0.001080	0.21	砂
3	3.0	2.0	150	45,000	0.000738	0.21	
4	4.0	2.0	150	45,000	0.000920	0.21	
5	5.0	2.0	300	180,000	0.000276	0.21	
6	6.0	2.0	300	180,000	0.000322	0.21	
7	7.0	2.0	300	180,000	0.000367	0.21	
8	9.0	2.0	700	980,000	線形		シルト
9	11.0	2.0	700	980,000			

地下水位：GL-1.3m
塗り潰し部が液状化対象層

表4 有効応力解析パラメータ

No.	深度(m)	初期有効応力 σ'_0 (kN/m ²)	液状化抵抗比 τ_l/σ'_0 (kN/m ²)	液状化強度曲線 の対数軸勾配	液状化強度の 下限値比率	破壊線の勾配 M_f	土質
1	1.3						埋土・盛土
2	2.0	29.8	0.152	-0.25	0.838	0.587	砂
3	3.0	39.6	0.600	-0.25	0.838	0.641	
4	4.0	49.4	0.600	-0.25	0.838	0.642	
5	5.0	59.2	0.600	-0.25	0.838	0.642	
6	6.0	69.0	0.600	-0.25	0.838	0.642	
7	7.0	78.8	0.600	-0.25	0.838	0.642	
8	9.0						シルト
9	11.0						

地下水位：GL-1.3m
塗り潰し部が液状化対象層

■ 解析結果の検証と考察

解析で求めた地表の加速度波形の観測記録との比較を図4,5に示します(図5は80~110秒間)。観測記録に見られる片側(EWでは正側, NSでは負側)に大きく生じるパルス的な加速度は、解析では現れませんでした。波形全体の加速度振幅や位相の経時特性やサイクリックモビリティ現象によるスパイク状の波形など良好に再現できています。また応答スペクトルの比較を図6に示します。両方向とも局部的にやや差異が見られる周期がありますが、広帯域にみると振幅およびその周期特性とも良好です。

層No.2の過剰間隙水圧比の時刻歴を図7に示します。80秒付近において過剰間隙水圧は急激に上昇し、その直後の数10秒間は激しく上昇下降の変動を示し、加速度波形に見られるサイクリックモビリティ現象(スパイク状の波形)の発生を説明しています。

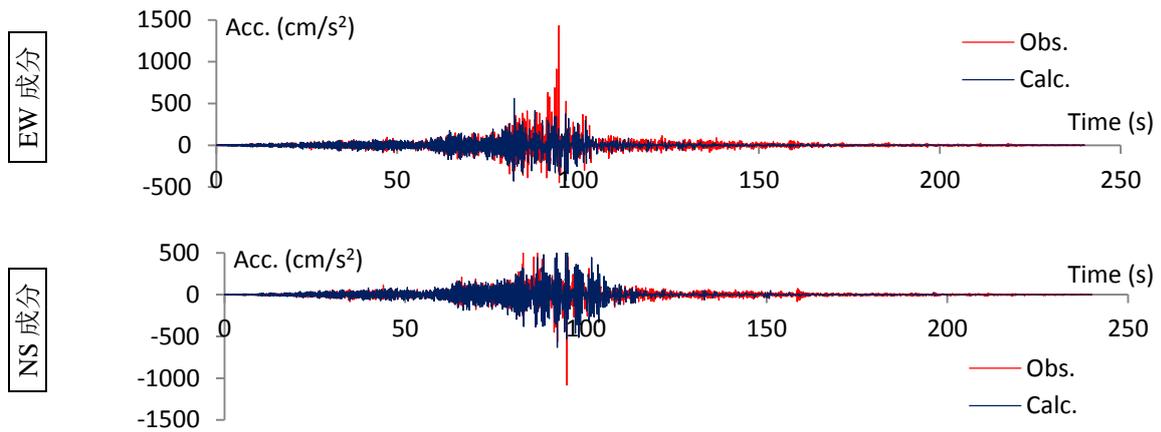


図4 地表面加速度の比較

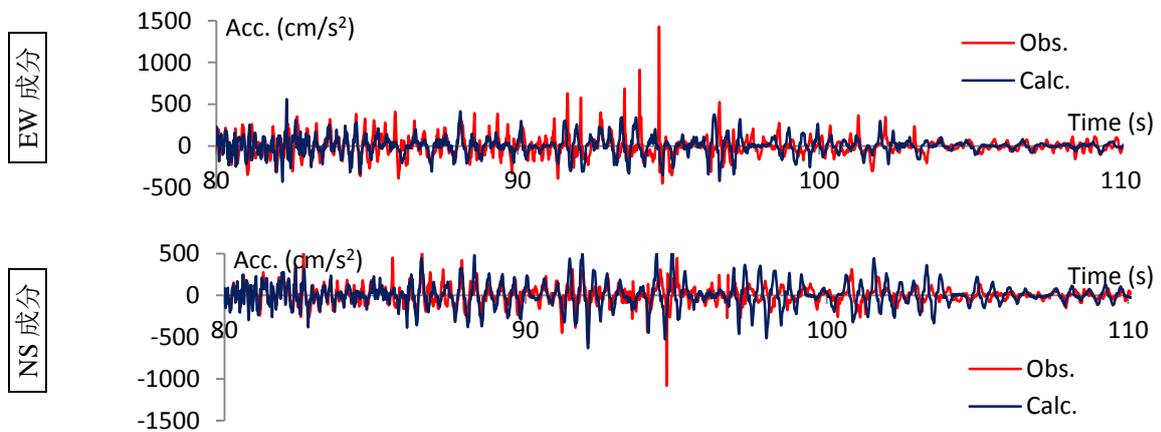


図5 80~110秒間での地表面加速度の比較

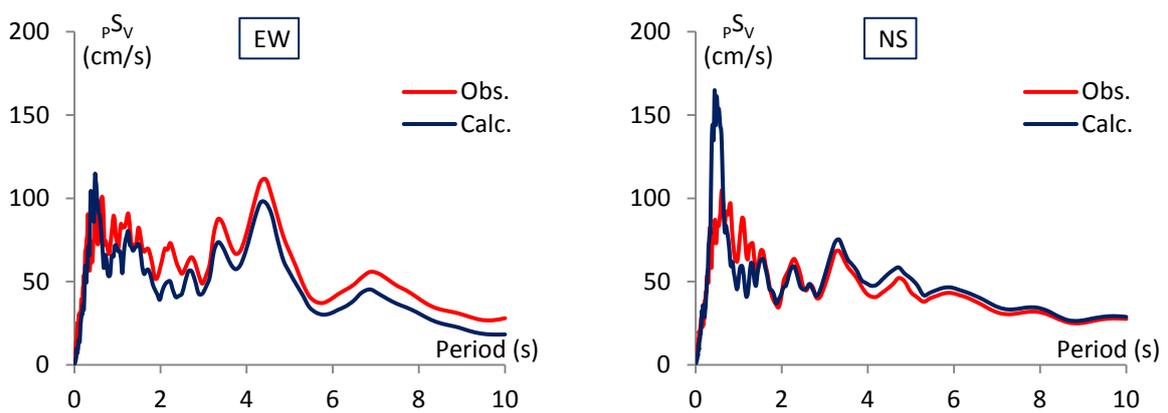


図6 地表面応答スペクトルの比較 (h=5%)

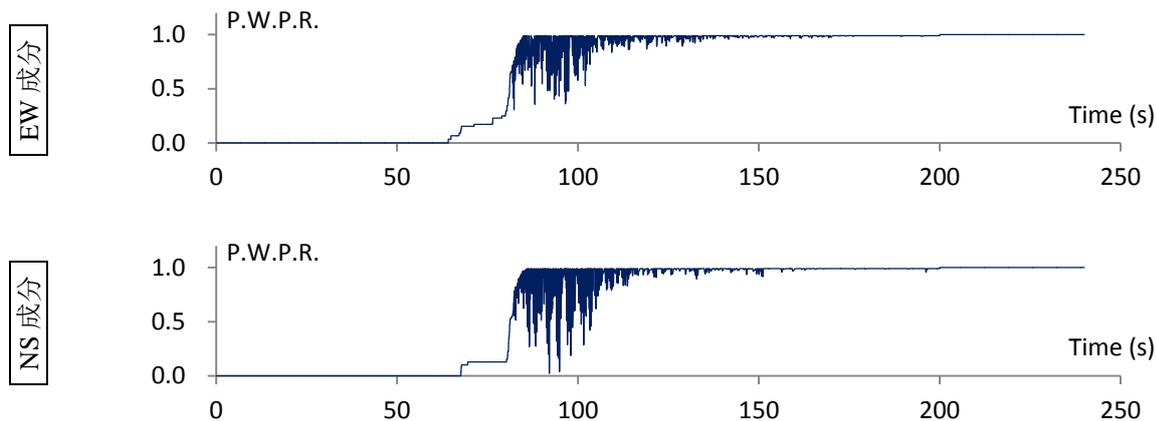


図7 第2層の過剰間隙水圧比

■まとめ

地盤の一次元地震応答解析プログラム『SS21/ShakePRO』の検証のため、PARI 小名浜で観測された2011年東北地方太平洋沖地震での観測記録を用いて比較検討を行いました。観測記録（地表加速度）にはサイクリックモビリティによるスパイク状の加速度波形が見られることより、液状化が発生した層があったことが推察されています。

地盤モデルを文献²⁾より作成し、有効応力解析パラメータを液状化判定⁶⁾結果から設定しました。またせん断耐力 τ_{max} や基準歪 $\gamma_{0.5}$ および破壊線の勾配 M_f などの設定方法も前述のとおりです。地表面加速度波形や応答スペクトルについて解析結果は観測記録に良好に対応できています。また液状化が生じた層 No.2 の過剰間隙水圧の時刻歴を確認すると、水圧が上昇した直後に激しく上昇下降を繰り返す結果が得られ、加速度波形に現れたサイクリックモビリティ現象（スパイク状の波形）の発生を裏付けています。

『SS21/ShakePRO』による PARI 小名浜の再現解析は、ここで示した簡易な入力条件でも妥当な結果が得られることを示しました。

参考文献

- 1) 港湾空港技術研究所：港湾地域強震観測，<http://www.pari.go.jp/>
- 2) 山崎浩之，後藤佑介：2011年東北地方太平洋沖地震の地震動に対しての地盤の液状化挙動に関する考察，港湾空港技術研究所資料 NO.1242，2011.12
- 3) 山崎久雄，中川佳久，宮本裕司：H-D パラメータによる応力-歪モデルを用いた1次元有効応力解析 その1～2，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿）2014.9
- 4) 古山田耕司，宮本裕司，三浦賢治：多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性，第38回地盤工学会研究発表会，2003.7
- 5) 畑中宗憲，内田明彦，加倉井正昭，青木雅路：砂質地盤の内部摩擦角 ϕ_d と標準貫入試験のN値の関係についての一考察，日本建築学会構造系論文集 第506号，1998.4
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，丸善，2001
- 7) 社本康広，時松孝次，有泉浩蔵：一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性，日本建築学会構造系論文報告集 第433号，1992.3
- 8) 福武毅芳，眞野英之，堀田洋之，田地陽一，石川明，坂本 忠：東北地方太平洋沖地震における東京湾北部埋立地の有効応力解析による検討，清水建設研究報告 第89号，2012.1

付録 1 液状化抵抗比下限値の設定有無の影響

2011 年東北地方太平洋沖地震のように繰り返し回数の多い場合に液状化抵抗比の下限値を設定することの適用性が示されています^{A1)}。前述までの解析では下限値を R15 に対する比として 0.838 を設定しました。これは液状化抵抗比の下限値を R100 とすると $R100=0.9 \cdot R20$ 程度になる^{A1)}ことを参考に R100/R15 を求めたものです。図 A1 に第 2 層の液状化強度曲線を示します。図中の破線は下限値を設定しなかった場合です。

ここでは参考として、液状化抵抗比の下限値を設定しなかった場合の解析結果を示し、設定した場合と比較します。図 A2, A3 に EW 方向の加速度波形の比較を示します（図 A3 は 80～110 秒間）。

下限値を設定しなかった場合は、80～100 秒付近でやや加速度振幅が小さく求まり、また 80～90 秒付近でやや長周期化された結果となりました。観測記録との対応は下限値を設定した結果の方が良好であることがわかります。

図 A4 は過剰間隙水圧比の時刻歴の比較です。下限値を設定しなかった場合は、設定した場合より過剰間隙水圧の上昇が早く進み、すなわち液状化に早く達していることがわかります。これが 80～100 秒付近の加速度振幅や周期特性に違いを与えたと判断できます。

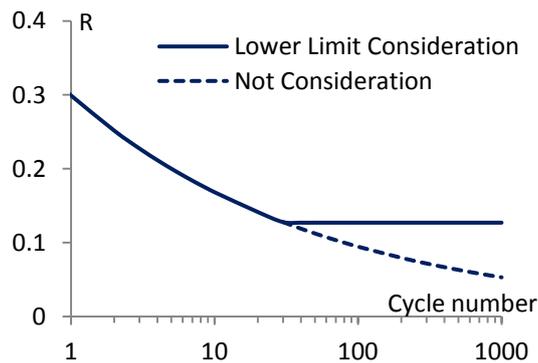


図 A1 第 2 層の液状化強度曲線

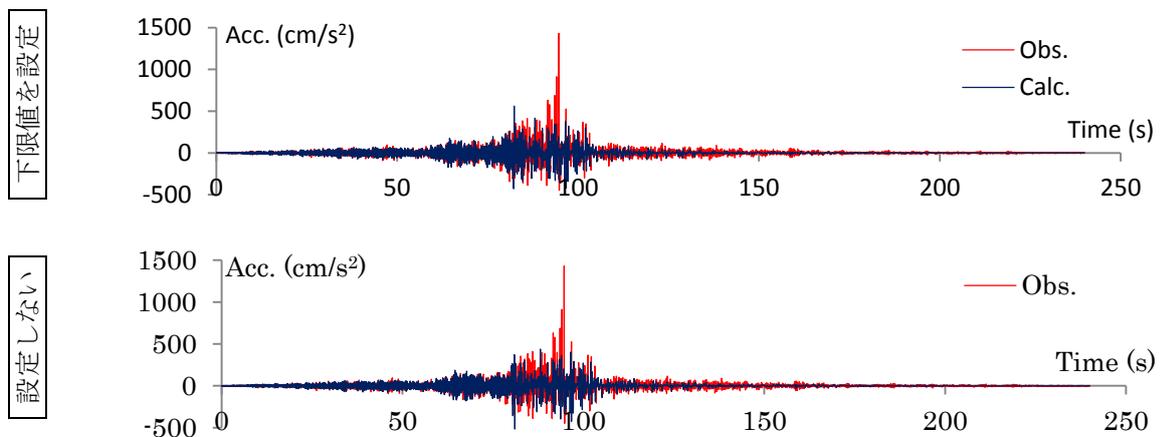
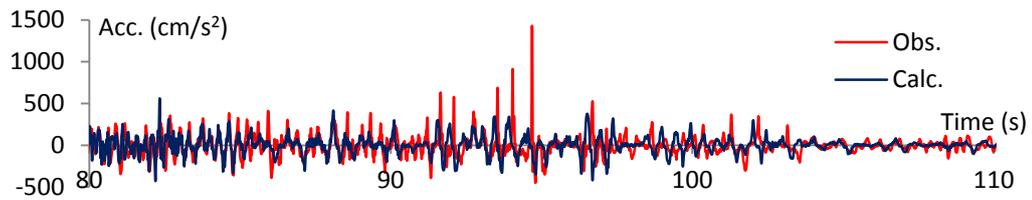


図 A2 液状化抵抗比の下限値設定有無の比較【EW 方向地表面加速度】

下限値を設定



設定しない

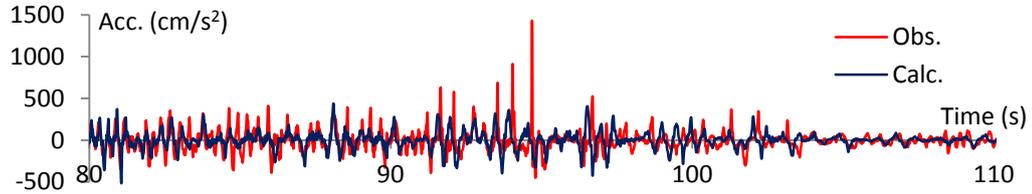
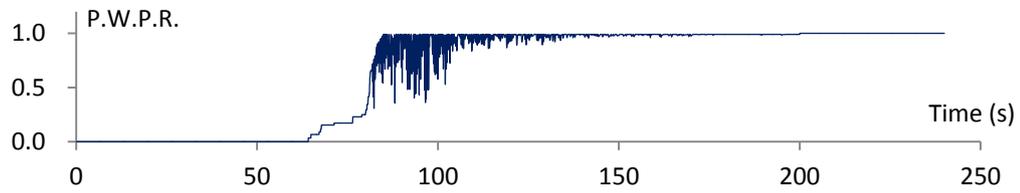


図 A3 液状化抵抗比の下限値設定有無の比較【80～110 秒間での EW 方向地表面加速度】

下限値を設定



設定しない

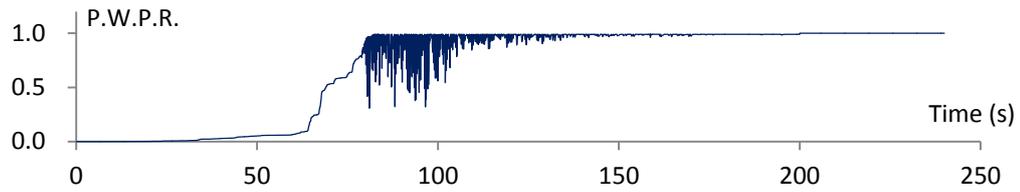


図 A4 液状化抵抗比の下限値設定有無の比較【EW 方向第 2 層の過剰間隙水圧比】

参考文献

- A1) 福武毅芳, 眞野英之, 堀田洋之, 田地陽一, 石川明, 坂本 忠: 東北地方太平洋沖地震における東京湾北部埋立地の有効応力解析による検討, 清水建設研究報告 第 89 号, 2012. 1