液状化に関する強震記録分析結果

国土技術政策総合研究所
危機管理技術研究センター

（１）最大加速度分布の推計

（２）地震動特性を考慮する係数の検証

（３）余震の影響の検討

（４）地盤の地震応答解析

本資料は、液状化対策技術検討会議の検討に資することを目的に、国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センターが実施した検討の成果をとりまとめたものである。
http://www.mlit.go.jp/report/press/kanbo08_hh_000154.html

（１）最大加速度分布の推計

○検討の背景

東北地方太平洋沖地震の地震動に対して現行の液状化判定法（FL法）の検証を行うには、液状化が発生した地点、発生しなかった地点それぞれの液状化に対する抵抗率FLを計算する必要がある。

ここで、FLは、液状化に対する抵抗を表す「動的せん断強度比R」と地震外力を表す「地震時せん断応力比L」の比（すなわち安全率）として与えられる（FL=R/L）。FLが1.0以下の土層は液状化するとみなす。

地震時せん断応力比Lは地表面における地震動の最大加速度から計算されるため、東北地方太平洋沖地震の地震動の最大加速度分布を推計した。また、継続時間の影響を比較するため、1987年千葉県東方沖地震についてもFL法による液状化判定を実施することから、同様に千葉県東方沖地震の地震動の最大加速度分布を推計した。

○最大加速度分布の推計方法

・東北地方太平洋沖地震は国土交通省、気象庁、（独）防災科学技術研究所K-NETの公開データ、千葉県東方沖地震は日本建築学会(1992)の強震記録を用いた。
・補間は単純型Kriging法を用い、共分散はExponential型、相関距離は20kmと仮定する。
・期待値は、片岡ほか（2006）の距離減衰式による推定値を用いる。

$$\log_{10}PGA=0.539Mw+0.00668D-0.00551X+0.51-\log_{10}(X+0.0065\times10^{0.5}Mw)+\log_{10}(0.79)$$

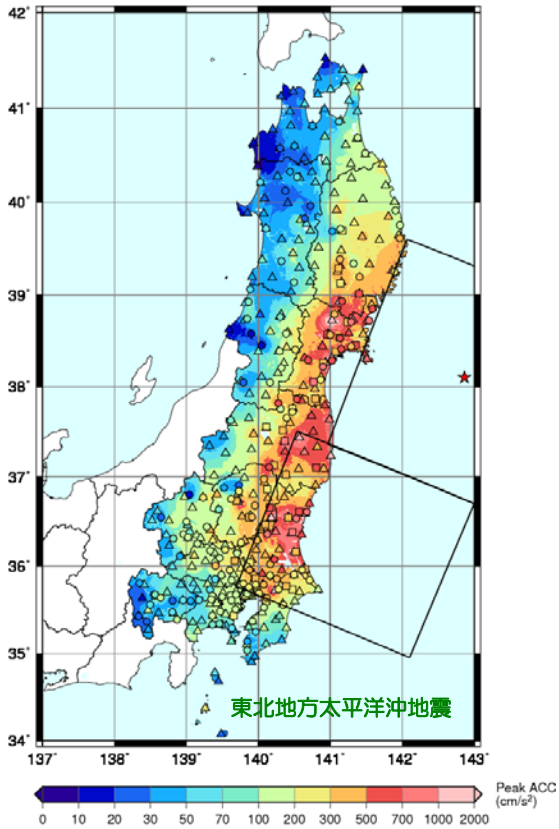
PGA：最大加速度(gal)、Mw：モーメントマグニチュード、D：震源深さ(km)、X：断層最短距離(km)

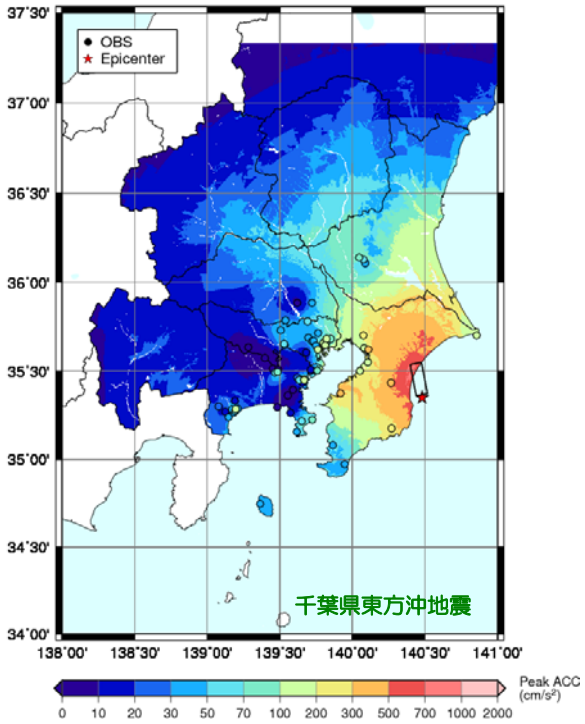
・表層地盤による最大加速度の増幅率ARAはMidorikawa et al.(1994)の次式を用いる。

$$\log_{10}ARA = 1.35-0.47\log_{10}AVS30$$

AVS30：深さ30mまでの平均S波速度は、J-SHISで公開されている250mメッシュごとの値を用いた。

○推計した最大加速度分布





（2）地震動特性を考慮する係数の検証

○検討の背景

（1）でも述べたとおり、液状化に対する抵抗率FLは、液状化に対する抵抗を表す「動的せん断強度比R」と地震外力を表す「地震時せん断応力比L」の比（すなわち安全率）として与えられる。

動的せん断強度比Rは、R = Cw X RL で表される。ここで、RLは繰返し三軸強度比であり、繰返し三軸試験において繰返し回数20回で軸ひずみが5%生じるのに必要な繰返しせん断応力比（繰返しせん断応力／有効拘束圧）と定義される。また、Cwは地震動特性を考慮する係数であり、繰返し回数20回相当の地震動ではCw=1、それよりも繰返し回数が少ない地震動ではCw>1、繰返し回数が多い地震動ではCw<1となる。

ここでは、東北地方太平洋沖地震の際に得られた地動加速度32波形からCwを算出し、道路橋示方書（日本道路協会, 2002）に規定されるCwと比較・検証した。

○地震動特性を考慮する係数Cwの計算方法

・累積損傷度理論に基づき、東・田村(1997)と同様の手順でCwを算出した。

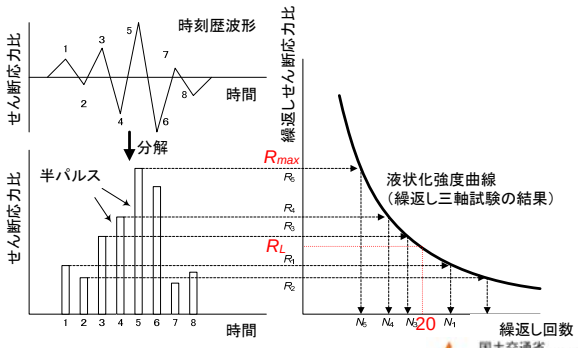
①時刻歴波形を半パルス列1,2,3,・・・に分解し、対応する繰返し回数N_1, N_2, N_3, ・・・を算定

②累積損傷度Dを計算し、D=1となるよう全ての半パルス列を振幅調整

$$D = \frac{1}{2}\sum_i \frac{1}{N_i}$$

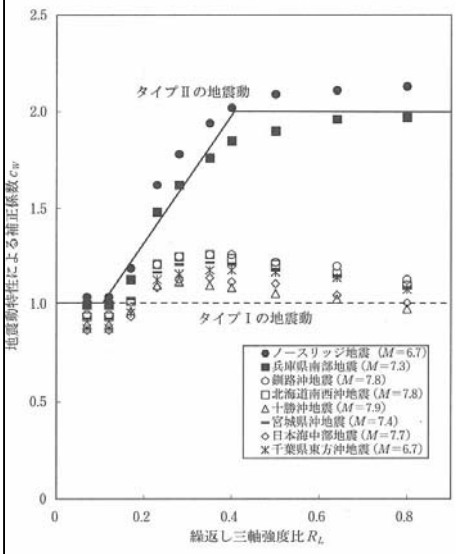
③20回の繰返しに対する比率として算出

$$c_W = \frac{2R_{max}}{3R_L}$$

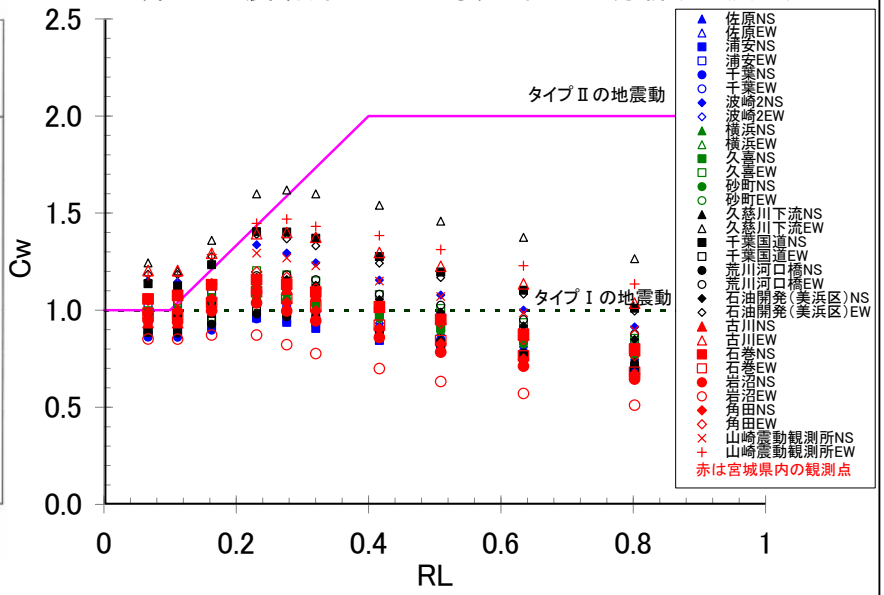


○地震動特性を考慮する係数Cwの算出結果

道路橋示方書Ⅴ耐震設計編



今回の地震観測データに対する同一の分析（32波形）



○地震動波形の繰返し特性（継続時間の影響）について既往地震との比較

・2つのピークを有する波形（東北地方）の方が1つのピークを有する波形（関東地方）よりも全体としては低めの値

・R_Lが0.4程度より小さい液状化強度が低い土に対しては、Cw=1 程度となり、従来の知見と概ね整合

○地震動特性を考慮する係数Cwの算出に用いた波形の一覧

波形の名称	観測網（観測点コード）	データ入手方法
佐原	（独）防災科学技術研究所K-NET (CHB004)	http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/ より、「ダウンロード」のプルダウンメニューから「地震選択＆ダウンロード」を選択し、2011年3月の地震から2011/03/11-14:46の地震を選択する。ここで「強震データ一括ダウンロード」、または「強震記録一覧」より観測点を選択し「全チャンネルダウンロード」のボタンをクリック
浦安	（独）防災科学技術研究所K-NET (CHB008)	
千葉	（独）防災科学技術研究所K-NET (CHB009)	
波崎2	（独）防災科学技術研究所KiK-net (IBRH20)	
横浜	（独）防災科学技術研究所K-NET (KNG002)	
久喜	（独）防災科学技術研究所K-NET (SIT003)	
砂町	（独）防災科学技術研究所K-NET (TKY013)	
古川	（独）防災科学技術研究所K-NET (MYG006)	
石巻	（独）防災科学技術研究所K-NET (MYG010)	
岩沼	（独）防災科学技術研究所K-NET (MYG015)	
角田	（独）防災科学技術研究所K-NET (MYG017)	
久慈川下流	国土交通省地震計ネットワーク (8372301)	http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/index.htm より「東日本大震災関連情報」のボタンをクリックし、「地震動分布図」からダウンロード
千葉国道	国土交通省地震計ネットワーク (8379401)	
荒川河口橋	国土交通省地震計ネットワーク (8370105)	
石油開発（美浜区）	国土技術政策総合研究所高密度強震観測	今後公開予定
山崎震動観測所	国土技術政策総合研究所一般強震観測	今後公開予定

（3）余震の影響の検討

○検討の背景

東北地方太平洋沖地震の際、千葉習志野地区において、埋め立て地4地点、それ以外3地点の高密度の加速度記録が得られた。これら7地点のうち4地点の周辺では液状化による噴砂が見られた。本震の約30分後に発生した余震でも加速度記録が得られたことから、余震が液状化の発生、液状化状態の継続に及ぼす影響を分析した。

○加速度記録による液状化発生の推定方法

・ 加速度記録のランニングスペクトルから、卓越周期の長周期化や短周期成分が顕著に減少したか否かによって推定した。

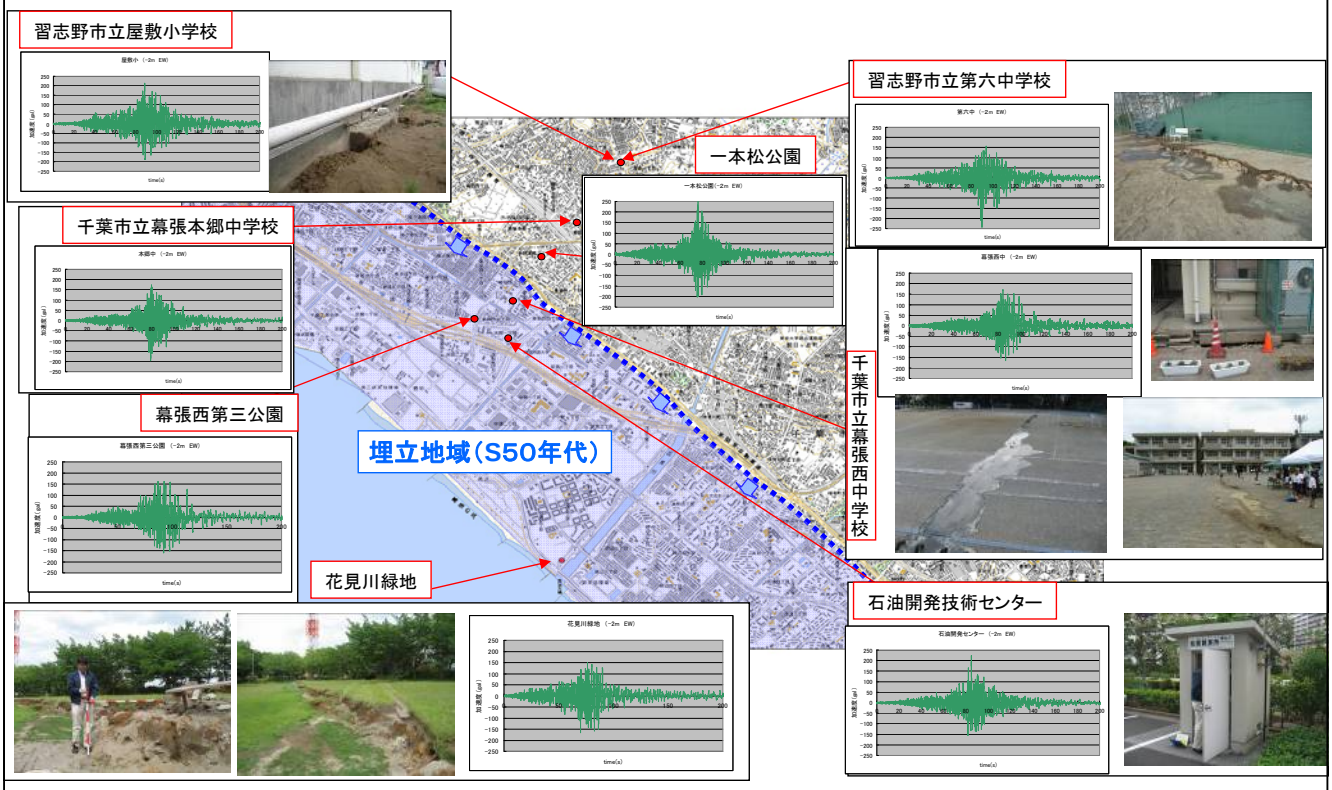
○観測地点の状況

・埋め立て地では噴砂や沈下、段差など、著しい液状化を広い範囲で確認。
・内陸の関東ローム層上の地区では液状化は確認されず。
・内陸の谷地形のところで一部、噴砂、段差などを確認。ただし埋め立て地よりも軽微。

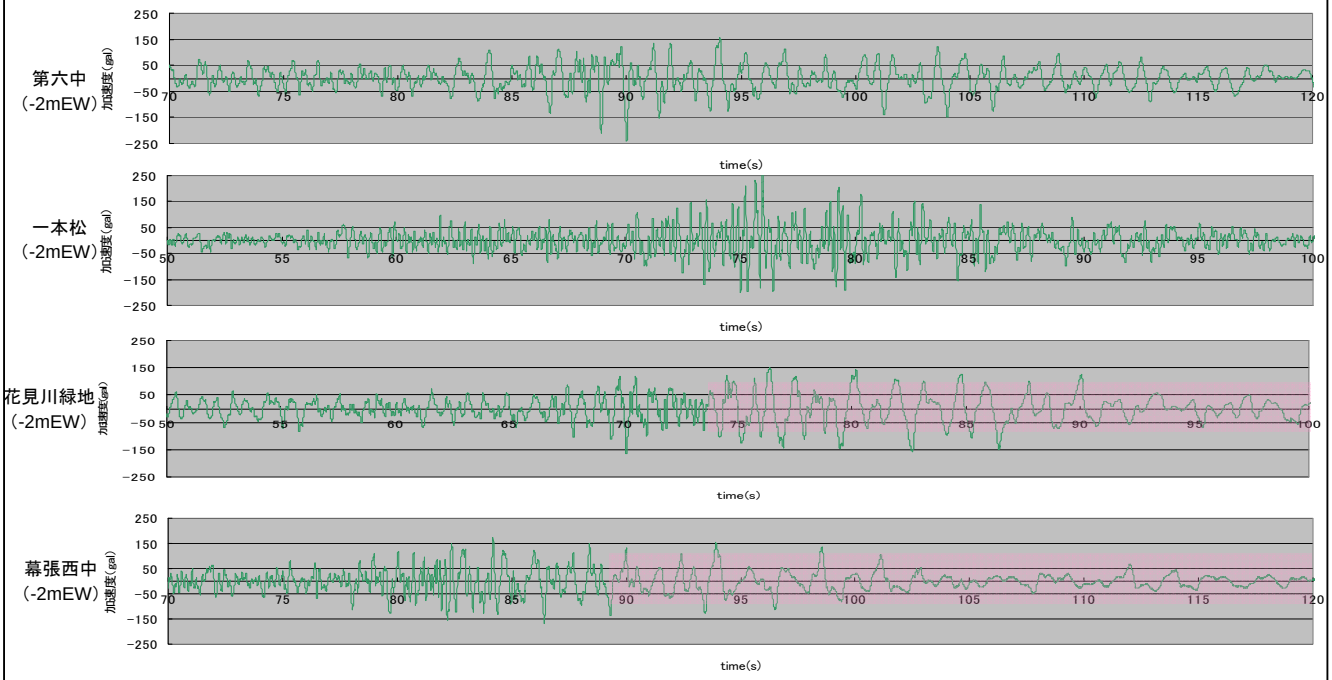
○本震の地表面（GL-2m）の波形特性

・埋め立て地と内陸部のいずれの地点もほぼ同様の振動波形性状（最大加速度：200～250gal）。
・観測点近傍で噴砂や段差が確認された埋め立て地での観測記録には、約80秒から液状化の発生と思われる振動周期の変化。波形後半には表面波と思われるさらに周期の長い波形あり。
・内陸側の地区では、時間途中での大きな波形特性の変化は見られない。

○本震の加速度記録（EW成分、GL-2m）



○本震の加速度記録（主要動部分拡大）

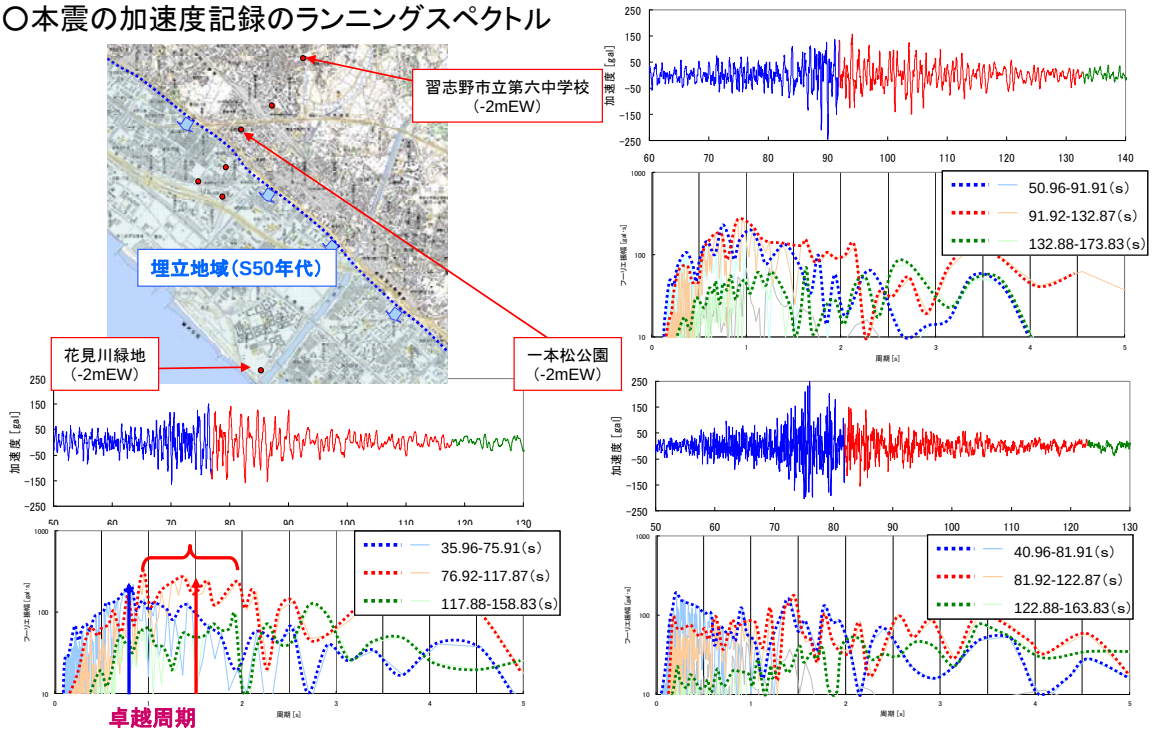


○周期特性の変化

・液状化が確認された埋め立て地側の花見川緑地、千葉幕張西中学校の記録には振動途中で周期の変化が見られる

・液状化が軽微あるいは確認されていない第六中学校、一本松公園では、顕著な波形特性の変化は確認されない

○本震の加速度記録のランニングスペクトル



○液状化発生地点のスペクトル分析

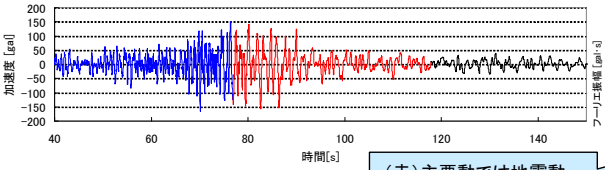
・液状化が確認された花見川緑地、第六中学校（軽微）と、液状化が発生していない一本松公園の計3波形のスペクトル分析

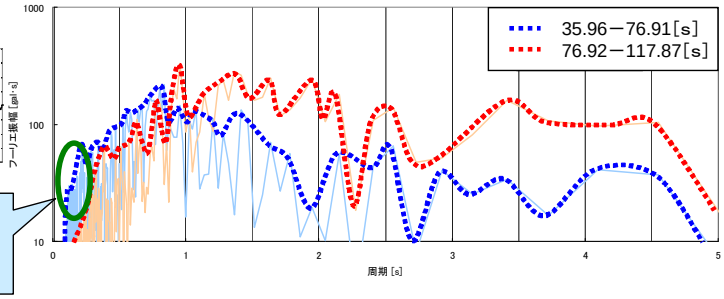
・時刻約80秒で周期の変化が確認される花見川緑地を見ると、その前後で、卓越周期は約0.8秒から約1.5秒と約2倍に伸長。第六中学校と一本松公園については卓越周期の大きな変化は見られない

○液状化発生地点で得られた本震・余震の加速度記録のランニングスペクトル

本　震(3月11日14:46)

千葉市美浜区花見川緑地(-2mEW)

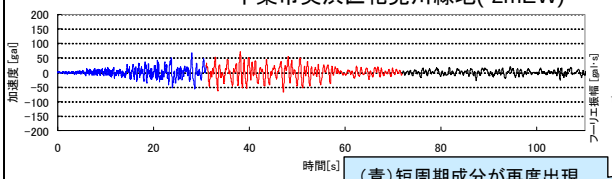


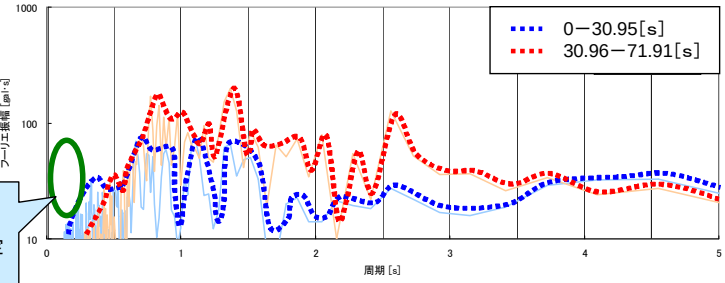


（赤）主要動では地震動
の短周期成分が減少
→地盤の剛性が低下
→間隙水圧上昇、液状化

余　震(3月11日15:15)

千葉市美浜区花見川緑地(-2mEW)





（青）短周期成分が再度出現
→地盤の剛性が回復
→間隙水圧が多少消散と推定
（赤）短周期成分が再度低下
→再液状化と推定

○本震29分後の15時15分に発生した茨城県沖の余震（M7.7）

・液状化が観測された千葉市美浜区の余震による地表面の最大加速度は約70gal

・余震観測波形のスペクトル分析によれば、振動初期には短周期の振動が確認され、時刻約31秒でほぼ消滅。したがって、本震で液状化し、液状化によって低下した地盤の剛性が一旦回復したが、直後の余震により再度液状化したと推定

（4）地盤の地震応答解析

○検討の背景

東北地方太平洋沖地震の際、鳴瀬川河口付近の河川堤防において、基盤層と天端の加速度波形と砂層の過剰間隙水圧を観測した。加速度振幅の大きさに応じた過剰間隙水圧の上昇あるいは消散がみられる貴重な観測事例である。

地震時の地盤の応答ならびに過剰間隙水圧を同時に解析する手法として、有効応力解析が知られているが、地震時に実地盤で観測された過剰間隙水圧記録を用いて有効応力解析の適用性を検討したような事例は少ない。

ここでは、1次元有効応力解析により河川堤防で観測された地盤の応答と過剰間隙水圧の再現を試みた。

○地盤の地震応答解析方法

・ 1次元有効応力解析にはYUSAYUSA-2（吉田・東畑, 2005）を用いた。

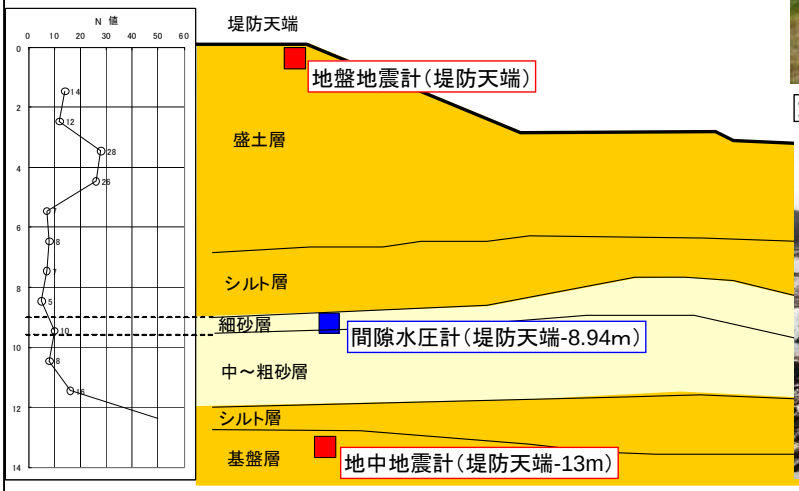
○観測地点の状況

・標高-5m～-2mにN値5～10程度の砂層、その上にシルト層と盛土層

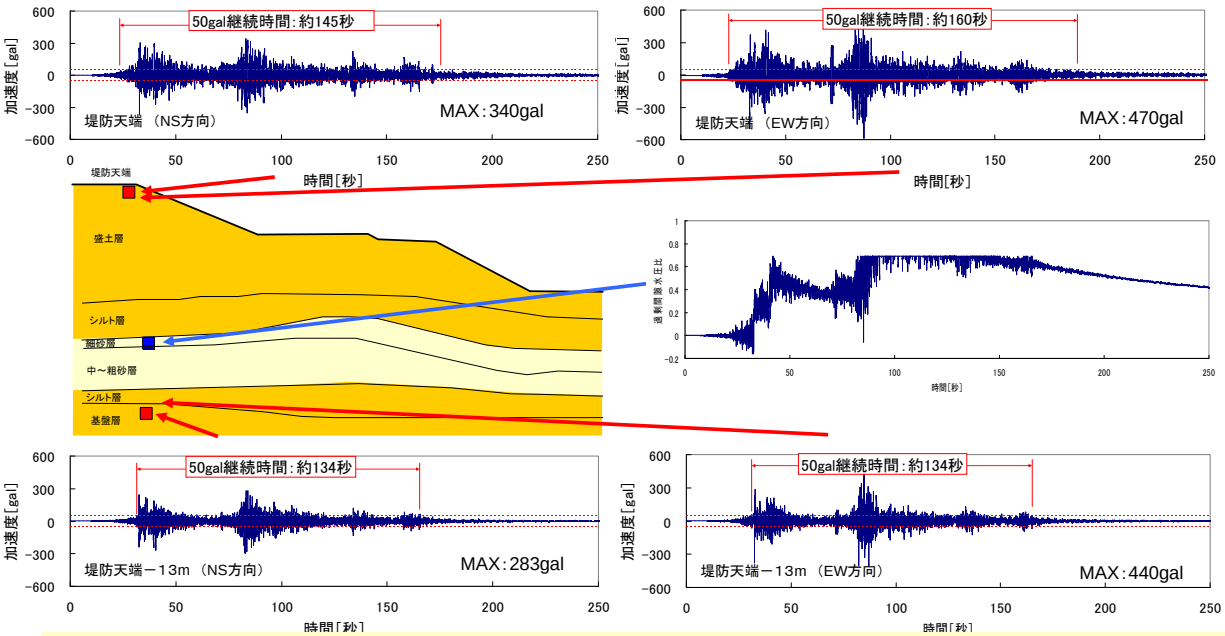
・周辺では噴砂や堤防のクラック等の被害は確認されていない（津波により観測局舎は約1m浸水）。

・間隙水圧計は1気圧(=101.3kPa)測定のセンサーでそれ以上は計測できていない。

○観測地点の状況



○観測記録



1. 加速度
- 2段階のピークを有する波形形状（基盤での最大加速度：440gal）
- 主要動部分（例えば、50galを超える範囲）の継続時間は130秒以上と非常に長い

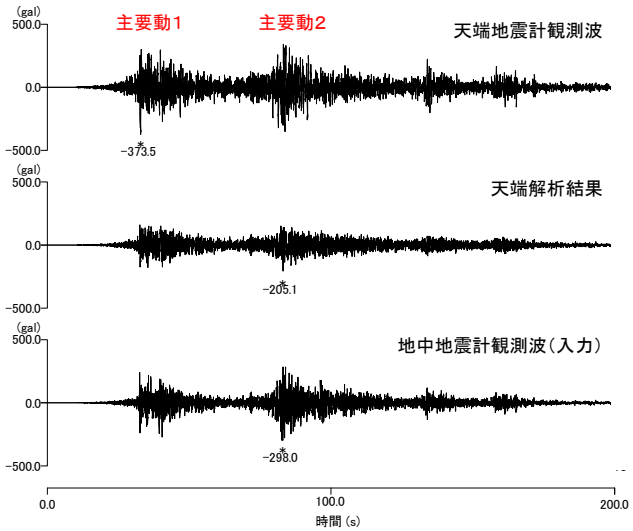
2. 間隙水圧
- 地震の揺れの大きさに応じて間隙水圧が上昇・下降
- 最初のピークで過剰間隙水圧比約0.6まで上昇した後、一旦低下。その後2番目のピークで再度上昇し、過剰間隙水圧比で約0.6を超える状態（液状化の程度がより高い：1.0で完全に液状化）が継続。

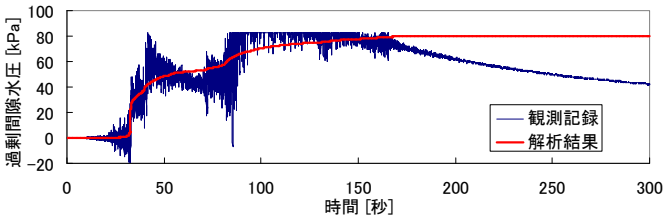
○有効応力解析による地盤の応答と過剰間隙水圧の試算

地盤モデル

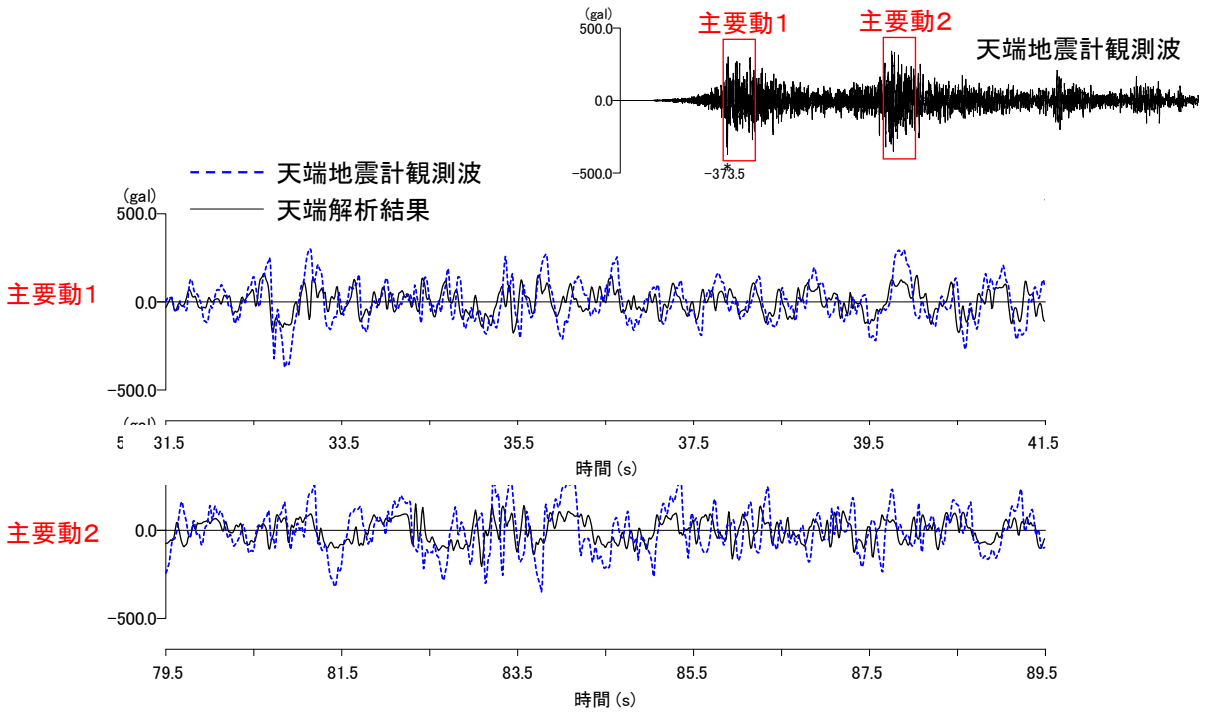
	土質名	上面深度(m)	層厚(m)	単位体積重量 γ(kN/m^3)	粘着力 c(kN/m^2)	終局せん断強度 τ_f(kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ(°)	剛性率 G_0(kN/m^2)	間隙率 n	透水係数 k(m/s)	細粒分含有率 FC(%)	体積圧縮係数 m_v(m^2/kN)	変相角 θ(°)	R_{L5}	R_{L20}
1	BK(上)	0.00	1.00	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	4.344E−05					
2	BK(上)	1.00	1.10	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	4.344E−05					
3	BK(上)	2.10	1.10	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	1.006E−05					
4	BK(上)	3.20	1.00	17	0.0	30.00	—	5.132E+04	0.44	2.111E−05					
5	BK(下)	4.20	1.00	14	83.4	—	0	6.604E+04	0.69	3.370E−06					
6	BK(下)	5.20	1.10	14	83.4	—	0	6.604E+04	0.69	3.751E−10					
7	Ac1	6.30	0.50	14	54.0	—	0	4.732E+04	0.69	3.751E−10	76.2	—	—	—	—
8	Ac1	6.80	1.00	14	54.0	—	0	4.732E+04	0.69	3.751E−10	76.2	—	—	—	—
9	Ac1	7.80	0.90	14	54.0	—	0	4.732E+04	0.69	9.635E−10	86.8	—	—	—	—
10	Acs	8.87	0.30	17	0.0	19.08	—	3.256E+04	0.44	2.916E−04	3.6	3.250E−05	22.2	0.136	0.095
11	As1	9.00	1.00	17	0.0	33.01	—	5.496E+04	0.44	2.916E−04	3.6	3.289E−05	26.6	0.200	0.140
12	As1	10.00	1.45	17	0.0	34.87	—	5.496E+04	0.44	3.778E−04	4.5	3.379E−05	26.6	0.195	0.137
13	Ac2	11.45	0.75	14	127.5	—	0	9.072E+04	0.69	4.000E−10	88.6	—	—	—	—
14	To	12.20	—	20	—	—	—	2.764E+05	—	—	—	—	—	—	—

○有効応力解析による地盤の応答と過剰間隙水圧の試算(NS成分:ほぼ堤体軸方向)





○有効応力解析による地盤の応答と過剰間隙水圧の試算（NS成分：ほぼ堤体軸方向）



○有効応力解析による推定結果

・位相等の振動特性と過剰間隙水圧の全体的な傾向は概ね推定できているが、短周期の応答と水圧の消散特性等についてさらに分析必要

参考文献

東・田村(1997): 地震動波形の繰返し特性を考慮した液状化強度評価法、土木技術資料，Vol. 39, No. 9, 50-55.

片岡ほか(2006): 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式，土木学会論文集A，Vol. 62, No. 4, 740-757.

地震ハザードステーション：J-SHIS, http://www.j-shis.bosai.go.jp/

日本道路協会(2002): 道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編.

防災科学技術研究所ウェブサイト：強震観測網（K-NET, KiK-net）, http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/

吉田・東畑(2005): YUSAYUSA-2 SIMMDL-2 理論と使用法（改訂版Version 2.10）.

Architectural Institute of Japan (1992): *Digitized strong-motion earthquake records in Japan, Vol. 1: The off east coast of Chiba prefecture earthquake, December 17, 1987*.

Midorikawa et al. (1994): Site effects on strong-motion records observed during the 1987 Chiba-ken-toho-oki, Japan earthquake, *Proc. of the. 9th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Vol.3, pp.85-90.

本検討では、（独）防災科学技術研究所、気象庁および国土交通省による観測結果を用いた。記して謝意を表する。