

異なるレベルの入力地震動を用いた 地盤の地震応答解析

西本 聡¹・池田隆明²

¹ 土木研究所 寒地土木研究所 寒地地盤チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1-3-1-34)

E-mail:nishimoto@ceri.go.jp

² 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

E-mail:takaaki_ikeda@tobishima.co.jp

地盤の地震時挙動を適切に把握するためには、地盤の非線形特性を適切に再現することが重要である。そこで、同一の地点を対象に異なるレベルの入力地震動を使用し、地盤の非線形特性の取り扱い方が異なる解析手法（線形解析、等価線形解析、非線形解析）による地震応答解析を実施した。その結果、地盤に生じる最大せん断ひずみが 10^{-4} レベルまでは線形解析でも地震時挙動を再現できること、非線形解析では本検討で生じた最大のせん断ひずみ（ 3×10^{-3} ）までは地震時挙動を再現できることが確認された。等価線形解析は地盤に生じる最大せん断ひずみが 10^{-3} を超えると最大加速度の再現性が低下する傾向が見られたが、振動数領域で評価すると再現性の低下は2.5Hz以上の帯域に限定され、それよりも低い振動数領域では再現性があることが確認された。

Key Words : earthquake response analysis, nonlinear, equivalent linear analysis, nonlinear analysis, shear strain

1. はじめに

耐震設計法の高度化や数値解析環境の飛躍的な発達、地盤震動問題に取り組む研究者の精力的な研究等により、地盤の地震応答解析が耐震設計に適用される機会が増加している。

2011年3月11日に発生した2011年東北地方太平洋沖地震は、岩手県沖から茨城県沖にかけての広い範囲を震源域とするマグニチュード9.0という極めて規模の大きい地震であり、東北地方のみならず広い地域で、震源の大きさに起因する長い継続時間を有し、震源破壊の不均一性に起因する特徴的な地震動が観測された^{1),2)}。今後発生が想定されている南海トラフ沿いの大地震は同程度の震源域を有すると考えられていることから、同様の特徴的な地震動が発生する可能性がある。そのため、震源近傍に建設される構造物には、2011年東北地方太平洋沖地震で観測されたような複雑な地震動に対しても耐震安全性の確保が必要とされるため、今後も地盤の地震応答解析が耐震設計に適用される機会はますます増加すると考えられる。

地盤の地震応答解析を精度よく行うためには、対象地点の地盤構造の広がりに応じた解析次元と解析範囲の設定、層構造や地盤物性の設定を含めた地盤のモデル化、入力地震動レベルに応じた地盤材料の

非線形特性の考慮が必要である。浅層部に飽和した緩い砂質地盤が含まれる場合には、過剰間隙水圧の上昇による有効応力の減少に伴う非線形特性、いわゆる液状化現象も考慮する必要がある。

地盤の地震応答解析方法は、地盤材料の非線形特性の取り扱い方により、非線形特性を考慮しない線形解析、非線形特性を近似的に取り入れる等価線形解析、そして時々刻々と非線形特性を考慮する非線形解析に分類される。さらに非線形解析は、有効応力の変化を考慮しない全応力非線形解析（以下、全応力解析）と考慮する有効応力非線形解析（以下、有効応力解析）の二つに区分される。

各解析方法の適用範囲の大まかな分類としては、地盤に生じるせん断ひずみが $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 程度までは非線形性を考慮しない線形解析で対応可能であるが、それよりもひずみが大きくなると非線形性を考慮する必要性があり、せん断ひずみが $10^{-3} \sim 10^{-2}$ 程度までは等価線形解析、それを超えると非線形解析が必要とされている³⁾。

地盤は比較的小さいひずみレベルから非線形特性を示すため、非線形特性を幅広く考慮できる非線形解析法が適切と考えられる。しかし、地盤種別や拘束圧に応じて異なる非線形特性を表わす構成則は複雑であり、それに見合った精度のパラメータを設定するためには、詳細な地盤調査や室内土質試験が要

求される．その他にも，数値積分の手法の選定やパラメータの設定等，地震応答解析を行う技術者が判断しなければならない事項が多いという課題があり，耐震設計実務においてはどの解析方法が最適であるかは一概に判断できない．

等価線形解析法は，時々刻々と変化する地盤の非線形特性を再現することはできないが，非線形特性を近似的に考慮することが可能であり，かつ非線形特性を含めた入力パラメータの設定がシンプルで，計算も安定していることから，実務レベルの地震応答解析で多く用いられてきた．しかし，前述のように，地盤に生じる非線形特性を近似的に評価しているため地盤に生じるひずみが大きくなるにつれて精度が低下する．さらに，2011年東北地方太平洋沖地震で見られたような継続時間が長い地震動に対する適用性も課題である．そのため，等価線形解析の適用性は実務者にとって重要な課題であった．

等価線形解析の適用範囲については，いくつかの研究成果がある．吉田⁴⁾は東京大学千葉実験所，東京電力新富士変電所，神戸ポートアイランドの鉛直アレー記録を用いたシミュレーション解析を行い，観測記録と解析結果の比較と，地盤に生じる最大ひずみを示している．紙面の関係上，解析条件等の詳細は原著に譲るが，東京電力新富士変電所を対象とした検討では，等価線形解析法の適用範囲と考えられている0.1%を超える約0.4%の最大ひずみが発生したが，観測結果をほぼ再現できることを示している．一方，約1%の最大ひずみが発生した神戸ポートアイランドの検討では，観測結果の再現性が低いことを示している．

地盤の地震応答解析結果は，対象とする地盤や入力地震動の特徴により影響を受けるため，解析方法の適用範囲を明らかにするためには，同一の地盤モデルに対して幅広い地震動レベルに対する検討を行う必要がある．（独）土木研究所寒地土木研究所では，軟弱地盤上に建設された道路盛土の耐震性能の検証，および地震対策技術の開発を目的に，北海道苫小牧市の軟弱地盤で地震時の地震動と地盤内に生じる過剰間隙水圧を同時に観測する鉛直アレー地震観測を実施している（以後，苫小牧液状化アレー観測）^{5),6)}．1991年の観測開始以降，地震動レベルが異なる複数の地震動記録とその際の過剰間隙水圧記録が得られている．震源破壊が南側に伝播したため振幅は小さいが，2011年東北地方太平洋沖地震での記録も観測されている．

この観測点のうち，砂質土が卓越するSite Bでは，標準貫入試験やPS検層等の地盤調査が行われ，さらに採取した試料を用いた動的変形特性試験や液状化試験等の詳細な室内土質試験が行われており，地震応答解析を精度よく行うための条件が整っている．

そこで，本論文ではSite Bで観測された地震動レベルが異なる複数の地震動に対して等価線形解析を行い，それぞれの解析結果を観測結果と比較することにより，等価線形解析法の適用性について考察を行う．また，あわせて全応力解析および有効応力解

析を行い，非線形解析法の有効性についても考察を加える．解析コードは，等価線形解析にはSHAKE⁷⁾を，非線形解析にはYUSAYUSA⁸⁾を使用する．

2. 苫小牧液状化アレー観測

図-1に苫小牧液状化アレー観測地点の位置を示す．この地域は，約3万年前以前に堆積した支笏火山噴出物により形成された火山灰台地が海進により浸食された後，砂堤列の発達により外海との閉塞が進み，後背湿地が徐々に堆積作用を受け軟弱な低地帯となっている^{9),10),11)}．地盤は軟弱で，1968年十勝沖地震と1982年浦河沖地震では，液状化の発生が確認されている¹²⁾．

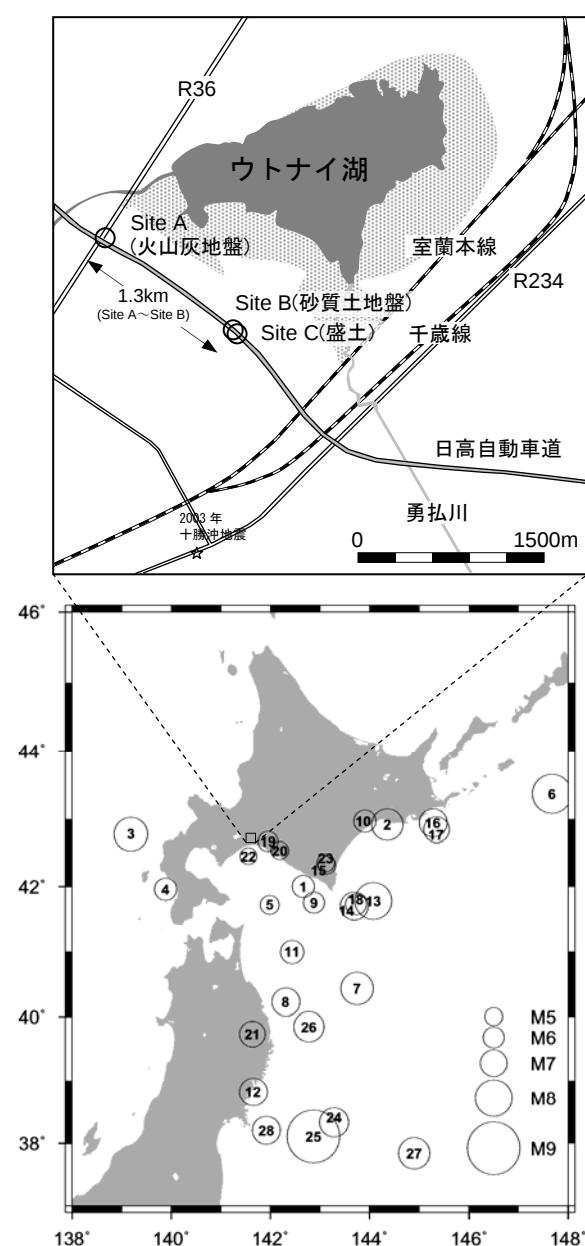
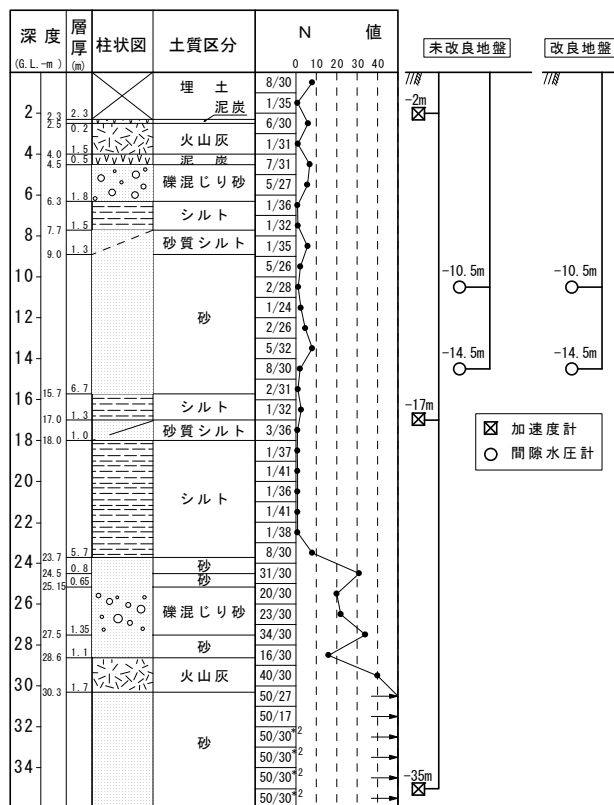


図-1 苫小牧液状化アレー観測地点の位置および観測地震の震央分布（番号は地震番号）

図-2に対象とするSite Bの地盤柱状図と加速度計と過剰間隙水圧水圧計の設置深度を示す。この地点の地盤は表層と基盤付近の一部に火山灰層が確認される程度で、N値が10以下の軟弱な砂質土とシルト質土を主体に構成されている。基盤はG.L.-30.3mから出現するN値が50を超える砂礫層と考えられる。

加速度計は地表（G.L.-2m）、中間（G.L.-17m）、基盤（G.L.-35m）の3深度に設置されている。中間のみ水平二方向で、それ以外は鉛直方向を加えた三方向の地震動を計測している。地震計は設置方位ずれがあるため補正¹³⁾して使用する。過剰間隙水圧計はG.L.-9m～-15.7mの緩い砂質土層の過剰間隙水圧を計測するため、当該土層の上部と下部に相当するG.L.-10.5mと-14.5mに設置されている。

苫小牧液状化アレー観測は、この地域に建設される盛土構造物（高規格幹線道路）に対するサンドコンパクション工法による液状化対策の効果検証も目的に行われているため、改良地盤にも同深度に過剰間隙水圧計が設置されているが、本検討では原地盤（未改良地盤）の観測記録だけを対象とする。表-1に加速度計と過剰間隙水圧計の設置位置を示す。



*1: N値は30cm貫入量に換算して表示

*2: G. L. -31.5m以深は同一の土質が続き、N値は50以上と設定

図-2 苫小牧液状化アレー観測地点の砂地盤（Site B）の地盤柱状図と地震計（加速度計）および間隙水圧計の設置位置

表-1 苫小牧液状化アレー観測における加速度計と過剰間隙水圧計の設置位置

加速度計		過剰間隙水圧計	
深度	設置方位	未改良地盤	改良地盤
G.L.-2m	N340E, N070E, UD	G.L.-10.5m	G.L.-10.5m
G.L.-17m	N334E, N064E	G.L.-14.5m	G.L.-14.5m
G.L.-35m	N296E, N026E, UD		

3. 検討に用いる地震動

Site Bでは2011年5月までに28地震の記録が観測されている。図-1に震源分布を示す。

表-2に地震の諸元と観測記録の水平方向最大加速度および最大過剰間隙水圧を示す。水平方向の最大

表-2 苫小牧液状化アレー観測で観測された地震動の最大値と地震の諸元

地震 番号	地震の諸元				方向 ²⁾	最大加速度(cm/s ²)		
	地震名称 発震日時	Mj	震央	深さ (km)		G.L. -2m	G.L. -17m	G.L. -35m
Eq01	浦河沖の地震 1991.11.27 04:40:48.9	6.3	41°59.8' 142°39.9'	64	CH1	18.3	12.2	9.6
			CH2		14.8	10.4	7.9	
Eq02	釧路沖の地震 1993.01.15 20:06:07.2	7.5	42°55.0' 144°21.4'	101	CH1	124.1	75.7	67.1
			CH2		92.1	68.9	56.2	
Eq03	北海道南西沖地震 1993.07.12 22:17:11.7	7.8	42°46.8' 139°11.0'	35	CH1	17.0	12.5	9.9
			CH2		21.2	14.6	12.0	
Eq04	北海道南西沖地震(余) 1993.08.08 04:42:43.6	6.3	41°57.3' 139°53.1'	24	CH1	8.3	5.6	3.1
			CH2		12.1	6.5	4.9	
Eq05	苫小牧沖の地震 1993.12.04 18:30:14.2	5.4	41°43.4' 141°59.3'	80	CH1	- ¹⁾	8.2	9.9
			CH2		- ¹⁾	10.1	8.3	
Eq06	北海道東方沖地震 1994.10.04 22:22:56.9	8.2	43°22.3' 147°40.7'	28	CH1	86.8	37.7	16.1
			CH2		84.0	47.4	34.7	
Eq07	三陸はるか沖地震 1994.12.28 21:19:20.9	7.6	40°25.6' 143°44.9'	0	CH1	56.4	32.1	7.4
			CH2		73.2	36.4	27.9	
Eq08	岩手県沖の地震 1995.01.07 07:37:37.1	7.2	40°13.2' 142°18.5'	48	CH1	- ¹⁾	13.6	- ¹⁾
			CH2		- ¹⁾	11.2	- ¹⁾	
Eq09	浦河沖の地震 1997.02.20 16:55:00.3	5.9	41°45.4' 142°52.5'	49	CH1	5.5	3.7	3.1
			CH2		6.9	5.7	3.0	
Eq10	釧路支庁中南部の地震 1999.05.13 02:59:23.1	6.3	42°57.9' 143°54.5'	106	CH1	- ¹⁾	11.4	7.7
			CH2		- ¹⁾	12.4	7.4	
Eq11	青森県東方沖の地震 2001.08.14 05:11:24.9	6.4	40°59.5' 142°26.4'	38	CH1	19.7	10.3	10.1
			CH2		15.2	10.3	6.2	
Eq12	宮城県沖の地震 2003.05.26 18:24:33.4	7.1	38°49.0' 141°39.2'	72	CH1	15.6	9.8	5.7
			CH2		13.9	8.2	5.6	
Eq13	十勝沖地震 2003.09.26 04:50:07.6	8.0	41°46.7' 144°4.7'	42	CH1	129.0	72.1	69.0
			CH2		124.5	82.1	67.8	
Eq14	十勝沖地震(余震) 2003.09.26 06:08:01.8	7.1	41°42.4' 143°41.7'	21	CH1	50.1	38.1	27.8
			CH2		45.4	39.2	26.3	
Eq15	十勝支庁南部の地震 2004.06.11 03:12:10.1	5.2	42°19.1' 143°08.0'	48	CH1	14.4	9.1	7.3
			CH2		12.1	9.1	8.0	
Eq16	釧路沖の地震 2004.11.29 03:32:14.5	7.1	42°56.6' 145°16.7'	48	CH1	15.8	10.8	9.1
			CH2		21.3	11.2	12.8	
Eq17	釧路沖の地震 2004.12.06 23:15:11.8	6.9	42°50.7' 145°20.8'	46	CH1	19.5	15.0	10.4
			CH2		17.9	12.5	6.7	
Eq18	十勝沖の地震 2007.02.17 09:02:56.6	6.1	41°43.9' 143°43.3'	40	CH1	8.0	6.8	5.4
			CH2		8.2	6.5	5.3	
Eq19	胆振支庁中東部の地震 2007.04.19 00:07:31.0	5.6	42°40.2' 141°56.8'	126	CH1	9.7	7.6	6.4
			CH2		11.4	8.3	5.6	
Eq20	日高支庁西部の地震 2007.06.23 07:20:04.2	4.9	42°32.3' 142°11.0'	125	CH1	10.8	6.4	4.3
			CH2		10.7	8.6	4.1	
Eq21	岩手県沿岸北部の地震 2008.07.24 00:26:19.6	6.8	39°43.9' 141°38.1'	108	CH1	18.6	11.3	5.9
			CH2		14.4	11.9	9.2	
Eq22	苫小牧沖の地震 2009.10.05 09:35:12.7	4.7	42°27.2' 141°33.5'	20	CH1	12.4	7.4	- ¹⁾
			CH2		7.7	6.4	4.4	
Eq23	十勝地方南部の地震 2010.01.15 03:46:25.5	5.0	42°21.1' 143°07.0'	51	CH1	14.8	7.8	- ¹⁾
			CH2		13.7	12.0	5.7	
Eq24	三陸沖の地震 2011.03.09 11:45:12.9	7.3	38°19.7' 143°16.7'	8	CH1	6.5	5.0	- ¹⁾
			CH2		6.1	4.8	3.7	
Eq25	東北地方太平洋沖地震 2011.03.11 14:46:18.1	9.0	38°6.2' 142°51.6'	24	CH1	29.2	19.7	- ¹⁾
			CH2		25.2	17.0	15.8	
Eq26	岩手県沖の地震 2011.03.11 15:08:53.5	7.4	39°50.3' 142°46.8'	32	CH1	12.8	8.4	- ¹⁾
			CH2		16.7	15.4	9.4	
Eq27	三陸沖の地震 2011.03.11 15:25:44.4	7.5	37°50.2' 144°53.6'	34	CH1	13.5	9.3	- ¹⁾
			CH2		11.4	9.0	7.4	
Eq28	宮城県沖の地震 2011.04.07 23:32:43.4	7.1	38°12.2' 141°55.2'	66	CH1	11.8	6.3	- ¹⁾
			CH2		13.3	7.7	5.5	

1) なんらかの機械的原因で未計測

2) CH1: N296E CH2: N026E

加速度は、G.L.-35mの地震計の設置方向（N296E,N026E）の値である。最大加速度はEq13の2003年十勝沖地震（Mj8.0）で発生しており、G.L.-35mでは約70cm/s²、G.L.-2mでは約130cm/s²である。

このうち、入力地震動のレベルと観測波形の状況を考慮しEq02, Eq06, Eq07, Eq11, Eq13～Eq16, Eq25の9地震を検討に使用する。Eq22以降の地震ではG.L.-35mのN296E方向の記録が観測機器の不具合の影響により記録が得られていないため、検討はN026E方向について実施する。使用する9地震の入力地震動の最大加速度は、0～10cm/s²が2地震、10～20cm/s²が2地震、20～30cm/s²が2地震、40～50cm/s²が1地震、50～60cm/s²が1地震、60～70cm/s²が1地震となる。

表-3および図-3に入力地震動を示す。G.L.-35mの入力レベルが小さい順に入力地震動番号（lw1～lw9）を付与する。

表-3 検討に用いる入力地震動の諸元

入力 地震動 番号	地震		震源 距離 (km)	最大加速度	
	番号	規模 (M)		G.L.-35m (cm/s ²)	G.L.-2m (cm/s ²)
lw1	Eq11	6.4	201.2	6.2	15.2
lw2	Eq15	5.2	133.2	8.0	12.1
lw3	Eq16	7.1	297.5	12.8	21.3
lw4	Eq25	9.0	518.5	15.8	25.2
lw5	Eq14	7.1	198.1	26.3	45.4
lw6	Eq07	7.6	303.1	27.9	73.2
lw7	Eq06	8.2	493.5	34.7	84.0
lw8	Eq02	7.5	240.7	56.2	92.1
lw9	Eq13	8.0	224.2	67.8	124.5

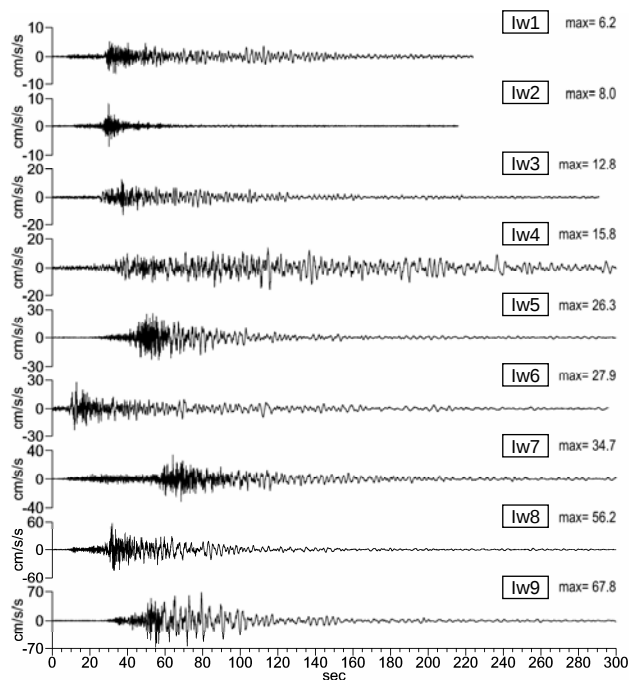


図-3 検討に用いる入力地震動の時刻歴波形

4. 地盤のモデル化と非線形特性の設定

表-4にSite Bの地盤モデルを示す。層構造および層厚は現地で実施されたボーリング調査および標準貫入試験結果に基づき設定した。G.L.-30.3m以深の砂礫層を工学的基盤とするが、地震計がG.L.-35mに設置されているため、G.L.-30.3m～-35.0mには基盤と同じ物性を有する土層を設定した。密度は密度検層、せん断波速度（以後、Vs）はPS検層の結果から設定した。

図-4に地震動レベルが小さく地盤はほぼ線形状態と推測されるlw1（Eq11）とlw2（Eq15）の観測記録から得られた地盤の伝達関数（G.L.-2m/G.L.-35m）を、表-3の地盤モデルを用いて重複反射理論を用いた線形解析から算出した伝達関数と比較して示す。伝達関数はバンド幅0.2HzのParzenウィンドウにより平滑化されている。伝達関数の1次、2次の卓越はほぼ一致しており、表-4に示す地盤モデルは妥当であると考えられる。

表-4 苫小牧液状化アレー観測地点(Site B)の地盤モデル

層 No.	土質名称	深度 (G.L.-m)		密度 ρ (t/m ³)	せん断 波速度 Vs (m/s)	せん断 剛性 G (kN/m ²)
1	埋土	0.0	2.3	1.65	180	53460
2	火山灰	2.3	4.0	1.50	110	18150
3	泥炭	4.0	4.5	1.35	110	16335
4	礫混砂	4.5	6.3	1.50	110	18150
5	シルト	6.3	7.7	1.40	105	15435
6	砂質シルト	7.7	9.0	1.48	105	16317
7	砂	9.0	13.3	1.48	160	37888
8	砂	13.3	15.7	1.55	160	39680
9	シルト	15.7	23.7	1.51	140	29596
10	砂	23.7	28.6	1.95	230	103155
11	火山灰	28.6	30.3	1.75	230	92575
12	砂	30.3	35.0	2.05	400	328000
13	基盤	35.0	-	2.05	400	328000

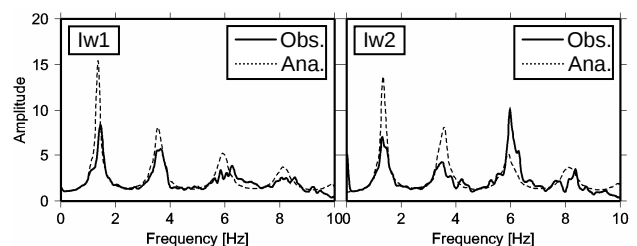


図-4 小さいレベルの地震動を用いた場合の伝達関数の比較

動的変形特性と液状化特性は、当該地点からサンプリングした試料に対して実施した室内土質試験から設定した。図-5に動的変形特性を、図-6に液状化特性を示す。

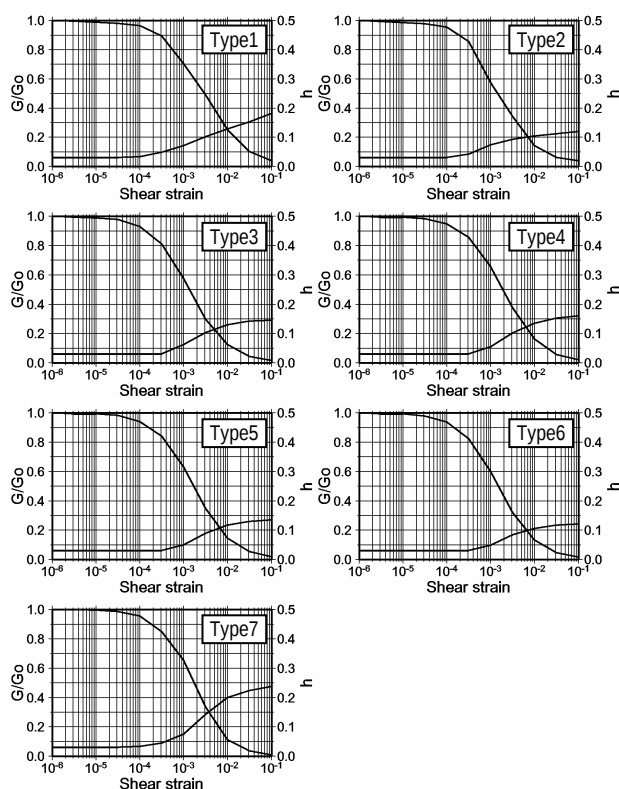


図-5 検討に用いた地盤の非線形特性（動的変形特性）

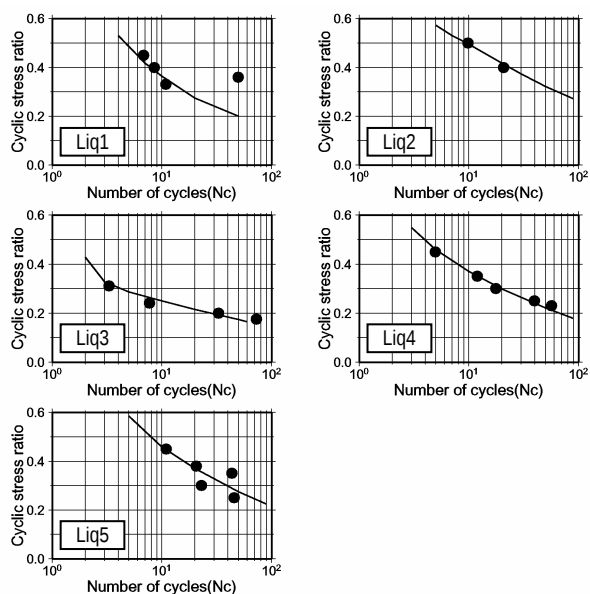


図-6 検討に用いた地盤の液状化特性

YUSAYUSAでは、せん断応力～せん断ひずみの非線形関係には双曲線モデルを適用した。双曲線モデルではせん断応力（ τ ）とせん断ひずみ（ γ ）の関係を初期せん断剛性（ G_0 ）を用いて(1)式のように規定している。

$$\tau = \frac{G_0}{1 + \frac{G_0}{\tau_{\max}} \times \gamma} \times \gamma \quad (1)$$

ここで、 τ はせん断強度、 $\tau_{\max}$ は最大せん断強度、 G_0 は初期せん断剛性、 γ はせん断ひずみである。このように、 $\tau_{\max}$ は最大せん断強度を意味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（ $G/G_0 \sim \gamma$ ）を表現するパラメータと捉え、双曲線モデルの $G/G_0 \sim \gamma$ 関係が、対象とする地盤の $G/G_0 \sim \gamma$ 関係を再現できるように設定する。なお、有効応力解析における液状化発生層では、内部摩擦角 ϕ_f を大きくすると液状化の適切な評価が困難になることから、 ϕ_f は室内土質試験から得られた 37° を適用する。

有効応力解析に必要な過剰間隙水圧の上昇特性を支配するパラメータは、要素試験のシミュレーション解析を行い、シミュレーション結果が室内試験から得られた液状化強度特性と一致するように設定した。表-5に非線形パラメータを、図-6に液状化強度と液状化シミュレーション結果を比較して示す。

表-5 苫小牧液状化アレー観測地点(Site B)の非線形パラメータ

層 No.	動的 変形 特性	液状化 特性	YUSAYUSAのパラメータ					
			全応力解析		有効応力解析			
			$\tau_{\max}$ (kN/m ²)	ϕ_f (deg.)	$\tau_{\max}$ (kN/m ²)	ϕ_f (deg.)	Bp	Bu
1	Type1		132.3	82	132.3	82	-	-
2	Type2	Liq1	31.2	35	29.0	37	0.3	0.5
3	Type2	Liq1	34.9	30	26.8	37	0.3	0.5
4	Type2	Liq2	38.9	28	27.5	37	0.5	0.1
5	Type3	Liq3	44.3	20	21.4	37	5.0	0.3
6	Type3	Liq3	48.7	18	21.0	37	5.0	0.3
7	Type4	Liq4	58.6	40	65.3	37	1.0	0.3
8	Type4	Liq5	71.1	40	79.2	37	0.2	0.2
9	Type5		91.0	22	48.8	37	-	-
10	Type6		137.3	40	137.3	40	-	-
11	Type6		134.9	35	134.9	35	-	-
12	Type7		613.0	70	613.0	70	-	-

5. 解析結果

地震応答解析は線形解析、等価線形解析、全応力解析、有効応力解析の4方法、入力地震動は地震動レベルが異なる9地震動である。

(1) 最大加速度の比較

図-7に最大加速度の深度分布を観測最大値とあわせて示す。入力地震動のレベルが小さい場合、地盤の非線形性を考慮しなくとも解析結果は観測記録を再現することができている。一方、入力地震動のレベルが大きくなり、 20cm/s^2 を超えると（Iw5以降）地盤の非線形性を考慮しない場合（線形解析）の一致度は低下し、 50cm/s^2 を超えると（Iw8以降）解析結果は観測結果を過大に評価する。

等価線形解析の場合、入力地震動レベルが 40cm/s^2 以下では（Iw7迄）観測結果をほぼ再現できているが、 50cm/s^2 を超えるIw8、Iw9では観測記録を大きめに評価し、一致度が低下している。

非線形解析の場合、本検討で用いた地震動レベル

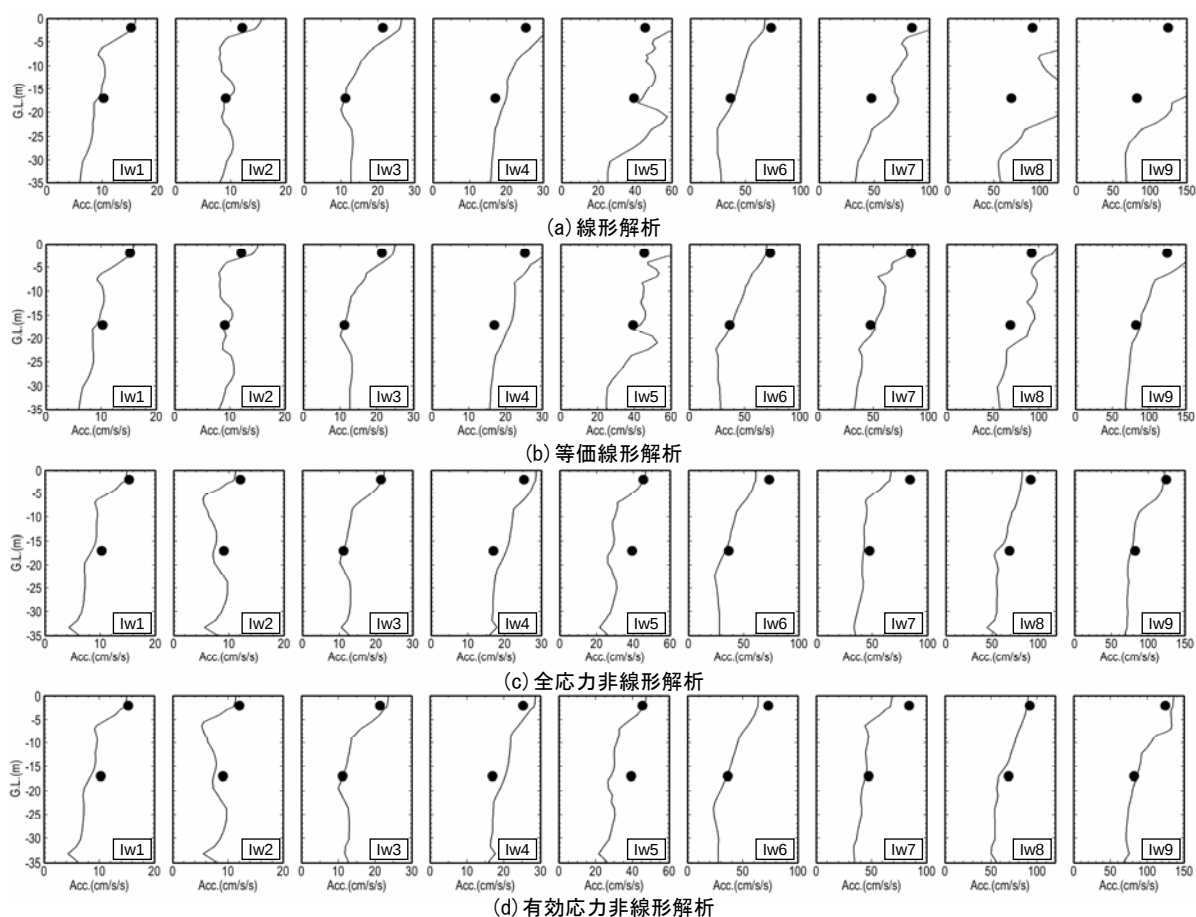


図-7 地震応答解析による最大加速度の深度分布と観測記録との比較 (●観測記録)

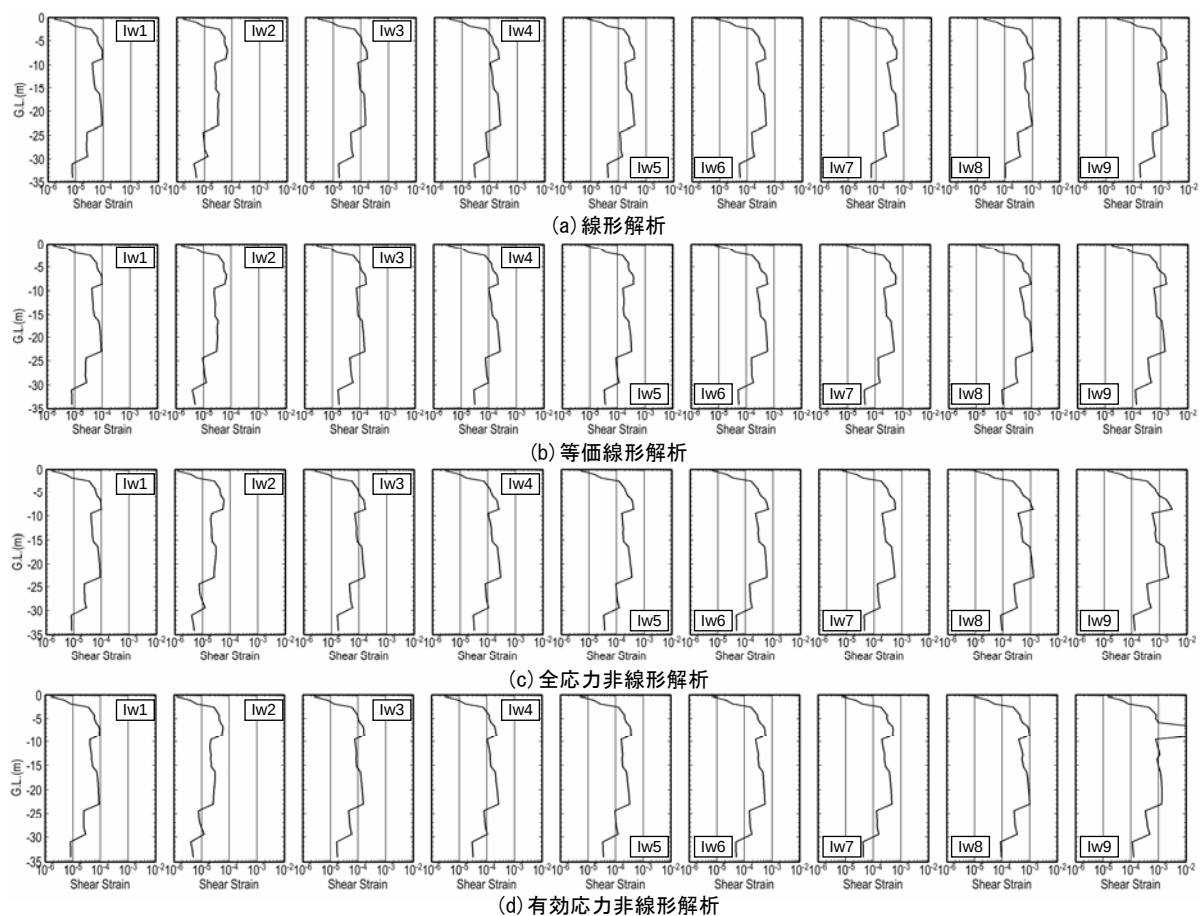


図-8 地震応答解析による最大せん断ひずみの深度分布

の範囲では、観測記録をほぼ再現できている。そのため、等価線形解析のIw8, Iw9で見られた、観測結果と解析結果との差は、地盤の非線形性の取り扱いによるものと考えられる。なお、本検討では地震動レベルが極端に大きくなかったことから、液状化の程度が小さかったと推定され、全応力解析と有効応力解析との差は明瞭ではなかった。

(2) 最大せん断ひずみの影響

図-8に地盤の地震応答解析から得られた最大せん断ひずみの深度分布を示す。相対的には、G.L.-2.3m～-23.7mの範囲で大きなせん断ひずみが発生しており、特にG.L.-2.3m～G.L.-9.0m, G.L.-15.7m～-23.7mの範囲がその中でも大きい。

線形解析で地盤の地震時挙動が評価できた範囲(Iw1～Iw4)での地盤に発生した最大せん断ひずみは 2×10^{-4} である。そのため、この範囲までの最大せん断ひずみであれば、線形解析で地盤の地震時挙動を再現可能と考えられる。

等価線形解析で地盤の地震時挙動を再現できたIw7と再現精度が低下したIw8において地盤に発生した最大せん断ひずみはそれぞれ 6×10^{-4} と 1×10^{-3} である。この結果は、既往の研究で指摘されている等価線形解析の適用限界(最大せん断ひずみが 1×10^{-3} 迄)と整合する。

図-9にG.L.-2mの観測最大加速度と解析最大加速度との関係を示す。等価線形解析は応答最大加速度が 100 cm/s^2 を超えるあたりから、一致度が低下するのに対して、非線形解析では検討した応答加速度の範囲では、一致度は継続して維持される。

図-10に地盤に生じる最大せん断ひずみとG.L.-2mでの最大加速度の比(解析/観測)との関係を示す。検討したせん断ひずみの範囲では、非線形解析はG.L.-2mの最大加速度を精度よく再現できていることが分かる。

(3) 時刻歴波形の比較

図-11に等価線形解析で観測記録が再現できたIw7と再現が難しかったIw9の2地震について、G.L.-2mの加速度時刻歴波形を解析結果と重ねて示す。

Iw7では線形解析を除き、ほぼ観測波形を解析で表現することができている。一方、Iw9では等価線形解析でも位相特性を含め波形の全体的な形状は再現できているが、波形のピーク部分を大きめに評価しており、全応力解析との差が生じている。なお、有効応力解析は、最も振幅が大きかった時間帯以降の波形の一致度が低下しており、液状化パラメータの設定に課題があると考えられる。

(4) 擬似速度応答スペクトルの比較

図-12に等価線形解析で観測記録が再現できたIw6と再現が難しかったIw8の2地震について、G.L.-2mの擬似速度応答スペクトル($h=0.05$)を解析結果と観測結果をあわせて示す。

観測記録が再現できたIw6では、擬似速度応答スペクトルは広帯域の周期帯で一致している。一方、Iw8では、0.4秒よりも長い周期帯では、解析結果は観測結果を再現できているが、それよりも短い周期帯では大きめに評価している。この短周期領域における大きめの評価が、最大加速度の一致度の低下につながっていると考えられる。

(5) 長い継続時間の入力地震動に対する等価線形解析結果

図-13に地震動の継続時間が長かったIw4を入力地震動とした場合の等価線形解析から得られたG.L.-2mでの加速度時刻歴を観測結果と比較して示す。上段が0秒～300秒、下段が30秒～150秒間を拡大したものである。図-8によると当該地震で地盤に発生する最大せん断ひずみは 10^{-4} レベルであり、地盤に生じる最大せん断ひずみから判断すると、等価線形解析が適用可能な地震動である。地震動の全体的な形状は、等価線形解析で再現できている、振幅が大きい部分も同様に再現できている。

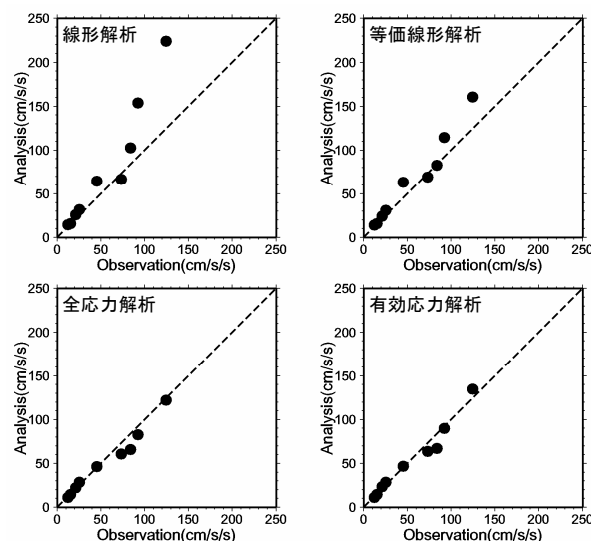


図-9 地震応答解析結果と観測結果との関係
(G.L.-2mの最大加速度)

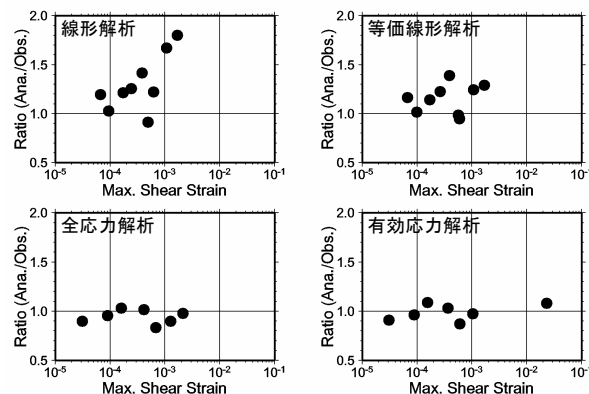


図-10 地盤に生じる最大せん断ひずみとG.L.-2mの最大加速度の比(解析/観測)との関係

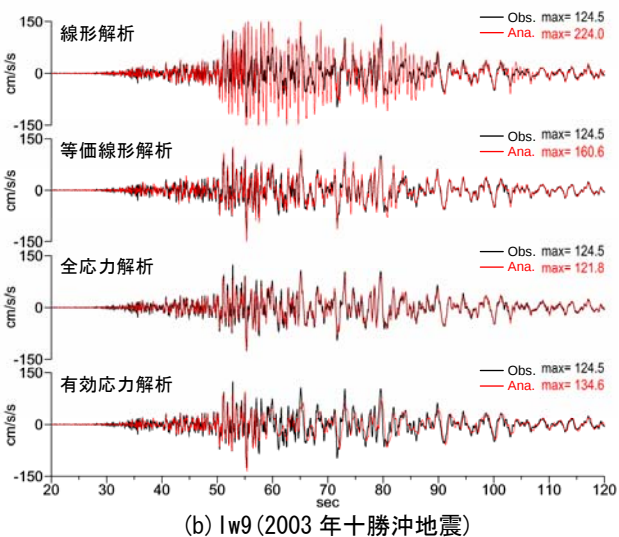
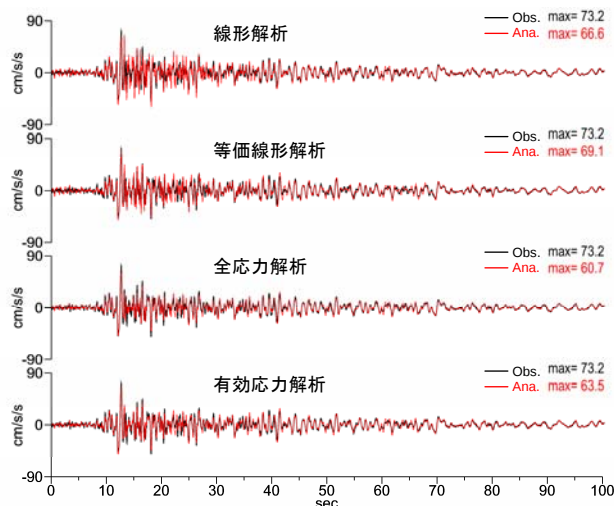


図-11 観測結果と地震応答解析結果との比較
(G. L. -2mの加速度時刻歴)

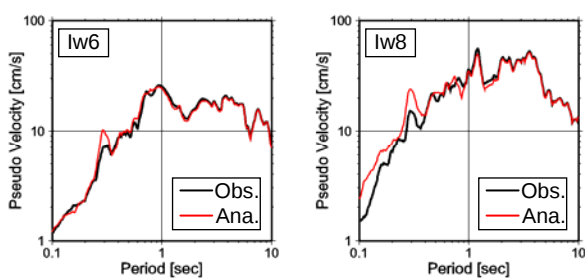


図-12 等価線形解析結果と観測結果との関係
(G. L. -2mの擬似速度応答スペクトル(h=0.05))

6. 結論

苫小牧液状化アレー観測地点のSite Bで観測された地震動レベルの異なる9つの地震動を用いて、地盤の非線形特性の取り扱い方が異なる手法で地盤の地震応答解析を実施した。その結果、以下の事項が明らかになった。

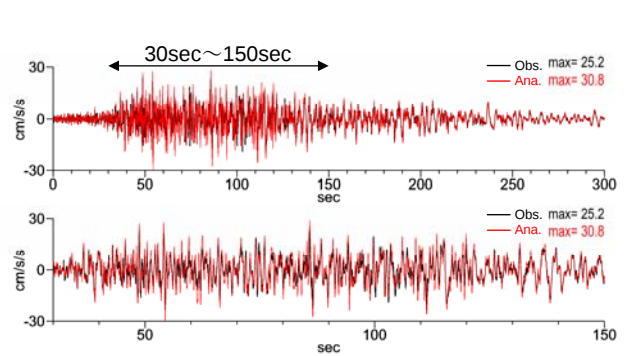


図-13 継続時間が長い入力地震動を用いた場合の
等価線形解析結果と観測結果との関係
(Iw4, G. L. -2mの加速度時刻歴)

- 1) 地盤に生じる最大せん断ひずみが 10^{-4} までであれば、線形解析で地盤の最大加速度を評価することができる。
- 2) 地盤の生じる最大せん断ひずみが 10^{-3} までであれば、等価線形解析で地盤の最大加速度を評価することができる。この知見は、既往の研究成果と整合する。
- 3) 等価線形解析では、地盤の生じる最大せん断ひずみが 10^{-3} より大きくなると、最大加速度の再現精度は低下するが、周波数特性で評価すると、広周波数帯域にわたって一致度が低下するのではなく、2.5Hz以上の周波数領域での一致度が低下しており、それよりも低い周波数領域での一致度は高かった。そのため、耐震設計の対象とする構造物の固有周期によっては、もう少し大きい最大せん断ひずみ領域まで適用できると考えられる（本検討の場合は 3×10^{-3} まで）。
- 4) 非線形解析では、本検討で生じた最大のせん断ひずみ（ 3×10^{-3} ）の範囲までは地震時挙動を再現できることが確認された。

本検討で用いた入力地震動で地盤に生じた最大せん断ひずみは 3×10^{-3} であった。今後も地震観測を継続して行い、より大きな最大せん断ひずみが生じた場合についても検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 野口科子・古村孝志：地震動分布から直接見る震源断層の破壊過程,
http://outreach.eri.u-tokyo.ac.jp/eqvolc/201103_tohoku/#gmsource (2011.9.19 参照)
- 2) 釜江克宏, 川辺秀憲：2011 年東北地方太平洋沖地震 (Mw9.0) の震源のモデル化 (強震動生成域),
<http://www.rri.kyoto-u.ac.jp/jishin/eq/tohoku1/Tohoku-ver1-rev20110601.pdf> (2011.9.19 参照)
- 3) 吉田望：地盤の地震応答解析入門,
<http://www.civil.tohoku-gakuin.ac.jp/yoshida/inform/document/eqresp.pdf> (2011.9.1 参照)
- 4) 吉田望：地盤の地震応答解析, 鹿島出版会
- 5) 西川純一, 林宏親, 江川拓也, 三輪滋, 池田隆明, 森伸一郎：異なる 2 つの地盤における液状化アレー

- 観測と記録の分析, 土木学会論文集, No.703, I-59, pp.327-343, 2002.
- 6) 西本聡, 橋本聖, 池田隆明, 三輪滋, 上明戸昇: 地震観測記録を用いた軟弱地盤上の道路盛土の地震時挙動分析, 土木学会論文集 C, Vol. 64, No.4, pp.802-812, 2008.
 - 7) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No. EERC75-30, University of California, Berkeley, 1975.
 - 8) Ishihara, K. and Towhata, I.: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective Stress Method, Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo(B), Vol.XXXV, No.4, pp.655-700, 1980.
 - 9) 池田国昭, 羽坂俊一, 村瀬正: 北海道勇払平野の完新統分布と地形発達, 地質調査所月報, 第 46 巻, 第 6 号, pp.283-300, 1995.
 - 10) 近藤務, 五十嵐八枝子, 吉田充夫, 井上俊和, 平信行, 山崎正道, 岡村聡, 前田寿嗣, 嵯峨山積, 菅原誠, 国分公貴, 安井賢: 石狩低地帯最南部地下の第四系:特に最終間氷期の相対的海水準変化の検討, 地質学雑誌, Vol.102, No.4, pp.312-329, 1996.
 - 11) 若松幹男, 近藤努: 2.北海道の土質 3.北海道の火山灰質土, 土と基礎, Vol.37, No.9, pp.24-29, 1989.
 - 12) 若松加寿江: 日本之地盤液状化履歴図, 東海大学出版会, p.314, 1991.
 - 13) 西本聡, 江川拓也, 池田隆明, 三輪滋, 上明戸昇: 苫小牧液状化アレー観測における地震計の設置誤差の再検討, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.667-672, 2007.

EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF THE TOMAKOMAI LIQUEFACTION ARRAY OBSERVATION SITE USING THE VARIOUS INPUT MOTION LEVELS

Satoshi NISHIMOTO and Takaaki IKEDA

To clarify the behavior of ground in earthquake conditions, it is important to appropriately reproduce its nonlinear characteristics. From this perspective, earthquake response analysis was performed on a single site using different levels of earthquake motion and techniques varying in terms of treatment for the nonlinear characteristics of ground (i.e., linear analysis, equivalent linear analysis and nonlinear analysis). The results confirmed that ground behavior in response to earthquake motion was reproducible when the maximum ground shear strain was up to the 10^{-4} level in linear analysis, while the corresponding value was up to 3×10^{-3} (the highest value observed in the study) in nonlinear analysis. In equivalent linear analysis, a maximum shear strain value exceeding 10^{-3} resulted in a trend toward reduced reproducibility of maximum acceleration. However, frequency domain evaluation confirmed that this reduction was limited to bandwidths of 2.5 Hz or greater, and reproducibility was observed in the frequency domain below this level.