

地震観測記録にもとづく表層地盤の 地震動増幅特性の検討

林 宏 親¹・西川 純 一¹・江川 拓 也¹・三輪 滋²・池田 隆 明²

¹正会員 北海道開発局 開発土木研究所 土質基礎研究室 (〒062-8602 北海道札幌市豊平区平岸一条三丁目)

²正会員 飛島建設株式会社 技術研究所 地盤耐震研究室 (〒270-0222 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

火山灰層が卓越する地盤(火山灰地盤)と砂層が卓越する地盤(砂地盤)の二つの地盤において液状化アレー観測が行われており、これまでに9つの地震による地震動と過剰間隙水圧の記録が得られている。ここでは、二つの観測地点で得られた記録を比較し、火山灰地盤と砂地盤の地震動増幅特性を比較した。その結果、二つの観測地点の工学的基盤での入力地震動は概ね等しいこと、二つの地盤の増幅特性は、比較的小さな地震動レベルから差異が見られること、また、比較的小さな地震動レベルから非線形性が見られ、地震動レベルの増加に伴う地盤の剛性低下と増幅特性の変化はよい相関あることなどがわかった。

Key Words : Strong Motion Records, Ground Motion, Amplification, Nonlinearity, Array Observation

1. はじめに

軟弱な表層地盤の地震動増幅特性を検討するために、鉛直アレー地震観測が各地で実施されている。また、特に液状化の可能性のある地盤を対象に、その挙動を調べるため、地震計とともに間隙水圧計を設置した、いわゆる液状化アレー観測が実施されている(例えば¹⁾²⁾³⁾等)。ここでは、北海道開発局開発土木研究所により、苫小牧市の2地点で日高自動車道の盛土基礎地盤における液状化対策の有効性を確認するために実施されている液状化アレー観測⁴⁾⁵⁾⁶⁾の記録をもとに表層地盤の地震動増幅特性について検討する。

2. 地震観測の概要

液状化アレー観測は、苫小牧市北東部のウトナイ湖の近傍で1990年から実施されている。図-1に観測地点付近の北西-東西方向の地質縦断図を示す。観測地点の西方には支笏火山灰による火山灰台地があり、観測地点近傍の西側半分には、この台地から浸食・運搬された火山灰の2次堆積物が多く堆積し、東側半分には海浜性の砂や後背地性の粘性土が分布している。また、GL-28m付近からはN値50以上の砂礫層が広く分布している。表層からGL-15~20m付近までの火山灰層や砂層はN値が10以下の緩い~中位の締めり方であり、液状化の可能性があることから、SCP工法による液状化対策がなされ、その有効性を確認するために、火山灰地盤(観測地点A)と砂地盤(観測地点B)の2地点で液状化アレー

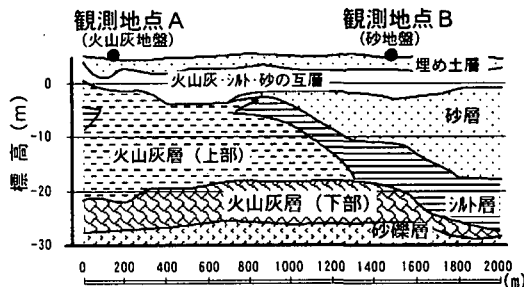


図-1 観測地点付近の地質縦断模式図

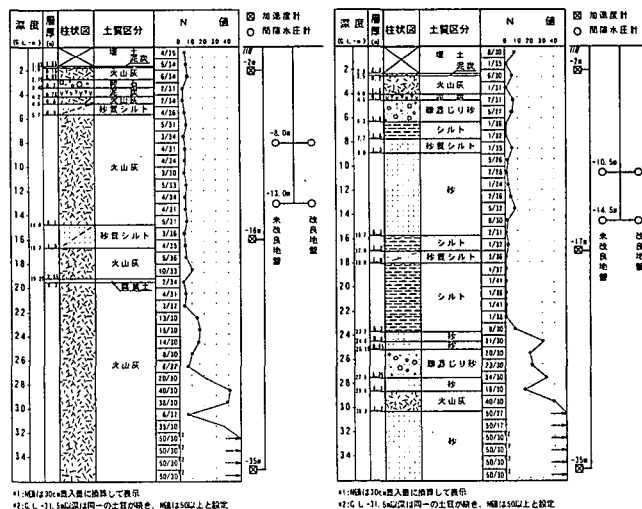


図-2 地盤柱状図と観測機器の配置

表-1 観測された地震の諸元と最大値

地震の諸元 ¹⁾					観測記録の諸元												
地震名称 発生日時	M	震源 位置	深さ	震度 上段: 苫小牧 下段: 最大	震源距離 震央距離 (km)	観測 地点	観測開始日時と 継続時間 (s)	最大加速度 (cm/sec ²)									
								G. L. -2m			G. L. -17m			G. L. -35m			
								NS	EW	UD	NS	EW	NS	EW	UD		
1 浦河沖地震 1991. 11. 27 04:40	6.4	42° 00' 142° 42'	67	III IV: 浦河, 広尾, 帯広	118.0 97.1	火山灰 砂	91. 11. 27 04:41:48.73 91. 11. 27 04:41:26.31	217 249	11.6 13.6	13.1 17.6	4.4 8.4	6.9 9.0	9.7 11.3	6.0 7.8	8.8 9.1	3.9 3.3	
2 釧路沖地震 1993. 01. 15 20:06	7.8	42° 51' 144° 23'	107	IV VI: 釧路	234.5 208.7	火山灰 砂	計測できず ²⁾ 93. 01. 15 20:06:47.87	309	100.3	103.9	46.6	68.0	66.7	63.2	53.2	25.0	
3 北海道南西沖地震 1993. 07. 12 22:17	7.8	42° 51' 139° 12'	34	IV V: 寿都, 江差, 小樽, 深浦	216.0 213.3	火山灰 砂	93. 07. 12 22:18:11.46 93. 07. 12 22:18:05.25	283 294	15.0 16.7	13.8 20.8	5.9 6.7	11.9 13.4	12.7 15.8	10.5 10.4	10.7 12.7	4.4 5.2	
4 北海道南西沖地震 1993. 08. 08 04:42	6.5	41° 57' 139° 53'	26	III V: 奥尻	220.0 218.5	火山灰 砂	93. 08. 08 04:43:49.01 93. 08. 08 04:43:41.52	193 203	8.7 7.7	8.9 12.3	2.5 2.7	5.1 4.4	5.7 7.7	3.8 3.7	4.4 3.5	2.3 2.2	
5 苫小牧沖地震 1993. 12. 04 18:30	5.5	41° 44' 141° 59'	79	IV IV: 苫小牧, むつ	160.2 139.4	火山灰 砂	93. 12. 04 18:30:52.76 93. 12. 04 18:30:49.47	195 204	14.4 76.1	9.9 - ⁴⁾	7.9 5.1	7.5 10.7	7.2 8.7	4.4 7.6	5.1 8.1	2.8 2.5	
6 北海道東方沖地震 1994. 10. 04 22:23	8.1	43° 22' 147° 40'	30	IV VI: 釧路, 厚岸	469.8 468.9	火山灰 砂	94. 10. 04 22:24:29.88 94. 10. 04 22:24:21.31	343 356	44.3 86.8	51.2 84.0	24.8 36.3	29.5 37.7	23.5 47.4	20.3 34.7	20.9 34.7	11.2 16.0	
7 三陸はるか沖地震 1994. 12. 28 21:19	7.5	40° 27' 143° 43'	0	IV VI: 八戸	305.4 305.4	火山灰 砂	94. 12. 28 21:21:11.90 94. 12. 28 21:21:10.74	305 296	61.4 56.2	61.2 73.3	10.0 15.5	32.5 32.3	30.8 36.6	27.9 28.0	21.6 -	7.8 7.7	
8 岩手県地震 1995. 01. 07 07:37	6.9	40° 18' 142° 24'	30	III V: 八戸, 盛岡, 葛巻	284.3 282.7	火山灰 砂	95. 01. 07 07:38:53.33 95. 01. 07 07:38:54.18	258 260	15.9 105.9	23.6 - ⁴⁾	4.9 6.0	10.9 11.8	13.2 13.8	8.2 10.1	11.1 10.1	3.8 3.5	
9 浦河沖地震 1997. 02. 20 16:55	5.6	41° 45' 142° 52'	45	III V: 浦河	149.1 142.1	火山灰 砂	計測できず ³⁾ 97. 02. 20 16:55:45.58	196	6.1	5.7	3.1	5.3	4.0	3.1	2.7	1.5	

1) 月刊『気象』より, 2) なんらかの機械的原因, 3) トリガーレベルに達しなかった, 4) 計測出来ず, 5) N026E 成分を表示

観測が実施されている. 2 地点はおよそ 1.3km の距離にあり, ほぼ同じ深度に広く分布した工学的基盤と見なし得る砂礫層上の近接した 2 地点での表層地盤の地震動増幅特性の比較検討が可能と考えられる.

図-2 に地盤柱状図と観測機器の配置を示す. 加速度計は未改良地盤の GL-2m と砂礫層内の GL-35m, およびその中間付近の深度に設置されている. また, 間隙水圧計は地点 A では火山灰層内に, 地点 B では砂層内に, 改良地盤と未改良地盤にそれぞれ 2 深度づつ設置されている. 観測システムについては, 文献⁴⁾に詳しい. 表-1 に, 1999 年 3 月までに観測された地震記録を示す. 1991 年 11 月 27 日の浦河沖地震から 1997 年 2 月 20 日の浦河沖地震まで九つの地震が記録されている. 1993 年の釧路沖地震では地表面で 100cm/s² を越える地震動が記録され, 間隙水圧記録にも明瞭な上昇が見られた. 二つの観測地点の地震計の設置方位については, すでに検討がなされ, 表-2 に示すような方位を確認している.

以下では, 地震計の方位を考慮して, 同じ方位に補正した波形に基づいて表層地盤の地震動増幅特性の検討を実施した. 地震動のレベルは地表の最大値で加速度 104cm/s², 速度 19cm/s であり, レベル 1 相当よりもやや小さめまでの地震動と考えられる.

表-2 地震計水平 2 成分の設置方位

火山灰 地盤		砂 地盤	
地震計	方位	地震計	方位
G. L. - 2m X	N 3 4 0 E	G. L. - 2m X	N 3 4 0 E
Y	N 0 7 0 E	Y	N 0 7 0 E
G. L. - 16m X	N 3 5 0 E	G. L. - 16m X	N 3 3 4 E
Y	N 0 8 0 E	Y	N 0 6 4 E
G. L. - 35m X	N 0 0 9 E	G. L. - 35m X	N 2 9 6 E
Y	N 0 9 9 E	Y	N 0 2 6 E

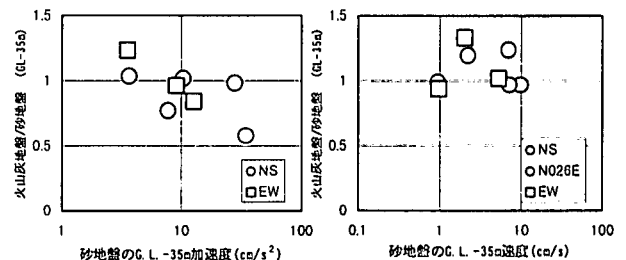


図-3 地中地震動記録の最大値の比較

3. 地中の地震動記録の比較

二つの観測地点では, 比較的堅固な砂礫層が同深度に広く分布しており, その中に地中の地震計が設置されている. 観測波には表層からの反射波が含まれているが, インピーダンスの違いが明瞭な層境界の下では, 表層の固有周期付近を除けば, その影響は小さいと考えられ, 観測波を比較することで, 入力地震動が同程度であるかを比較することが可能と考えられる. 図-3 に最大加速度, 最大速度について, 砂地盤に対する火山灰地盤の比を示す. また図-4 に北海道南西沖地震と三陸はるか沖地震の GL-

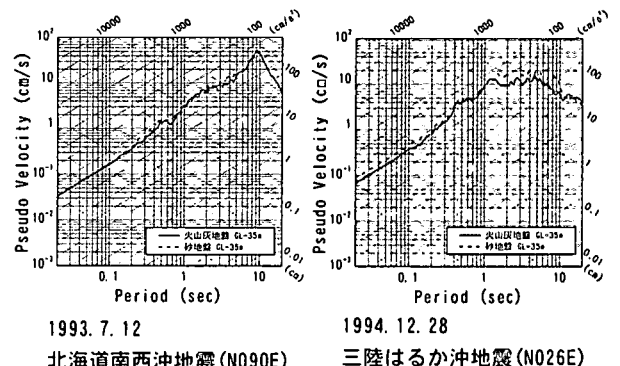


図-4 地中地震動記録の応答スペクトルの比較(h=0.5%)

35m での地震動の応答スペクトル ($\eta=5\%$) を比較して示す。最大加速度では、一倍前後の値が多いものの、地震動が大きいほど火山灰地盤の方が相対的に小さくなる傾向が見られる。一方速度に関しては、地震動レベルによらず火山灰地盤の方が大きく、1~1.3 倍程度である。ただし、地震動が大きくなるにつれて倍率は 1.0 に近づく傾向を示す。応答スペクトルは、概ね同程度であるが、表層固有周期付近での微妙な凹凸は表層の影響と考えられる。また、長周期成分の違いは表面波の影響と考えられ、地震の到来方向と深い地盤構造の影響などにより生じる場合があると考えられる。いずれの地震においてもスペクトル形状はほぼ同じであり、最大速度の差も小さいことから、これら 2 地点では地中での地震動特性は概ね同程度と考えられる。今後は、表層の影響を除いた検討が課題である。

4. 最大値による地震動増幅特性の検討

2 地点の表層地盤の地震動増幅特性を検討するために、まず地表と地中の加速度記録を積分して速度、変位を求めた。ここから求まる P.G.A, P.G.V., P.G.D.

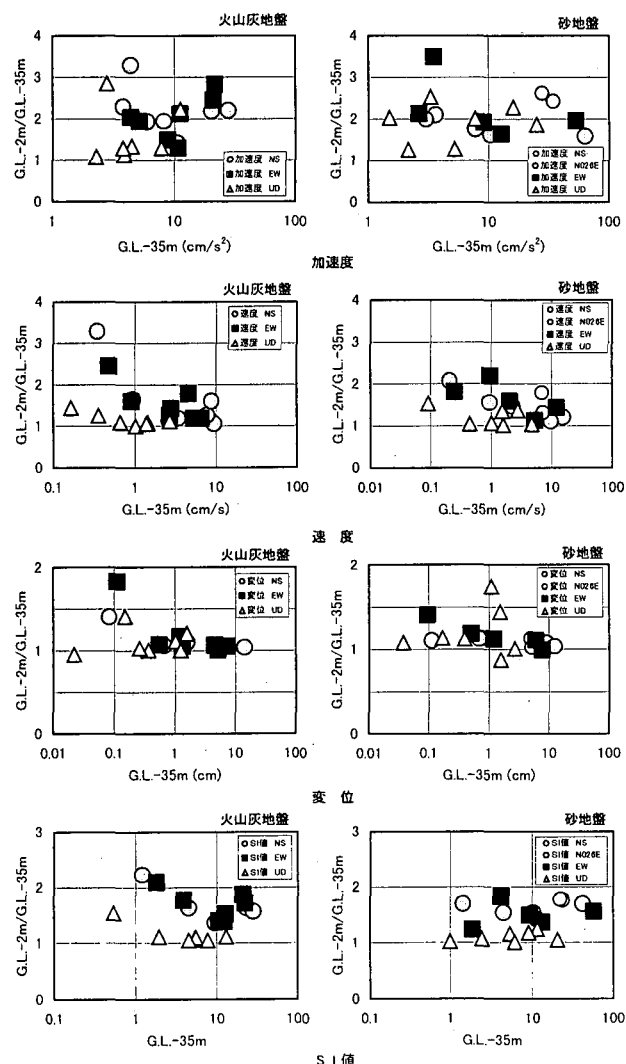


図-5 地中の地震動レベルに対する最大値の増幅

といった最大値やスペクトル強度 (以後 S.I. と呼ぶ) に基づいた増幅の比較検討を行った。図-5 に地中 (GL-35m) の最大値に対する、地表の最大値の倍率との関係を増幅度と考えて示す。入力地震動そのものの周期特性などにより増幅の違いがあるため、必ずしも一様な傾向としては現れないが、水平動については、地震動レベルに応じて表層地盤の非線形性が現れているのがわかる。

加速度では、火山灰地盤においては、ばらつきがあり明瞭な傾向が伺えないが、砂地盤では加速度レベルが大きくなるにしたがい、地表の増幅倍率が小さくなる傾向が見られる。速度では両地点とも、明瞭に増幅が小さくなる傾向が見られる。地中の速度が 1cm/s を越えると増幅倍率は 2 倍以下となり、徐々に低減していく。変位応答では、小さな地震動を除いては、地中変位が 1cm 程度からは増幅倍率は 1 倍よりやや大きい程度で 1 倍に漸近する。変位に関しては、4 秒以上の長周期成分が支配的であり、これらの成分は震源特性や深い地盤構造を反映したものであり、表層地盤ではほとんど増幅していないためと考えられる。S.I. についても同様の表示で検討したが、速度と同様の傾向が見られるものの、あまり明瞭ではない。

また、地点 A では地点 B に比べ、非常に小さな地震動レベルで速度や S.I. の増幅倍率の減少が大きい傾向にある。地震動レベルがある程度以上では明瞭な差は見られない。一方、鉛直動に関しては、地中記録のレベルも小さく、増幅倍率のばらつきも大きく傾向は見だしにくい。加速度では 1~2 倍、速度や S.I. ではほぼ 1 倍であり、増幅の程度は小さいと考えられる。

5. 卓越振動数による地震動増幅特性の検討

表層地盤の非線形性はその卓越振動数に現れると考えられる。図-6 に地中の地震動レベルに対する、地中の記録と地表の記録の伝達関数から読みとった卓越振動数の関係を示す。1 次、2 次ともに卓越振動数は地中の加速度や速度が大きくなるにしたがい、徐々に低下する傾向を見いだすことができる。最大値で見られる低下傾向よりもばらつきがなく明瞭である。特に加速度では 50cm/s² を越えて、速度では 5cm/s を越えてその低下がより明瞭になってくる。既往の地震観測や地震応答解析⁷⁾、振動台実験⁸⁾の結果で、入力加速度が概ね 50 cm/s² 程度から非線形性の発現が明瞭となることとよく対応していると考

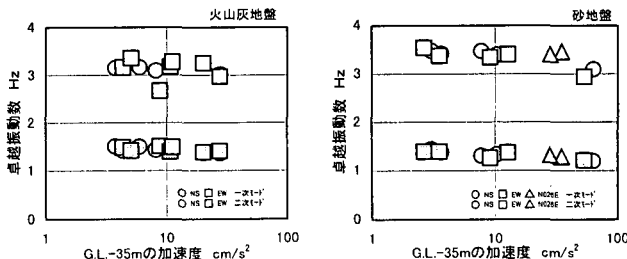


図-6 地中の地震動レベルに対する卓越振動数

えられる。

表層地盤の卓越振動数は1次については地点Aの方が小さく、2次については地点Aの方が小さい。最大値での増幅の減少の程度の差や、卓越振動数の違いから、表層地盤の構造の違いが増幅特性に反映されていることがわかる。

6. ひずみに関する検討

表層地盤を卓越振動数の変化を $r_i = f_i/f_{i0}$ (f_i は i 次の卓越振動数, f_{i0} は入力レベルの小さな地震動の卓越振動数) で表すと、表層地盤を1層系としたときの見かけの剛性低下は r_i^2 で表される。また、表層地盤の平均的なひずみは地表と地中の相対変位を層厚で除して求まる。図-7に有効ひずみが最大ひずみの65%として、卓越振動数の変化から求まる剛性低下とGL-2mとGL-35mの相対変位から求まる有効ひずみの関係を示す。有効ひずみが 5×10^{-5} 程度から、明瞭な剛性低下が見られ、 1×10^{-4} からより顕著となる。これは既往の室内動的変形特性試験や地震動記録から求まる同様の関係とよく対応している。

図-8に有効ひずみと加速度および速度の増幅倍率の関係を示す。砂地盤では剛性低下が見られる有効ひずみが 5×10^{-5} のオーダーが、応答倍率が加速度で2倍以上から以下に、速度で1.5倍以上から以下

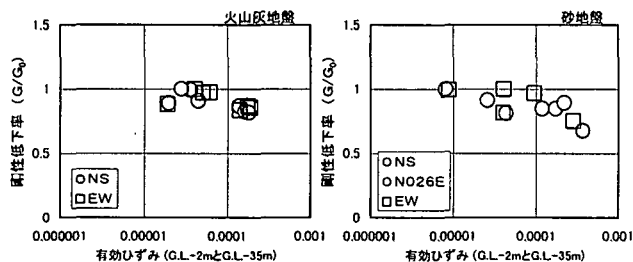


図-7 有効ひずみに対する剛性低下

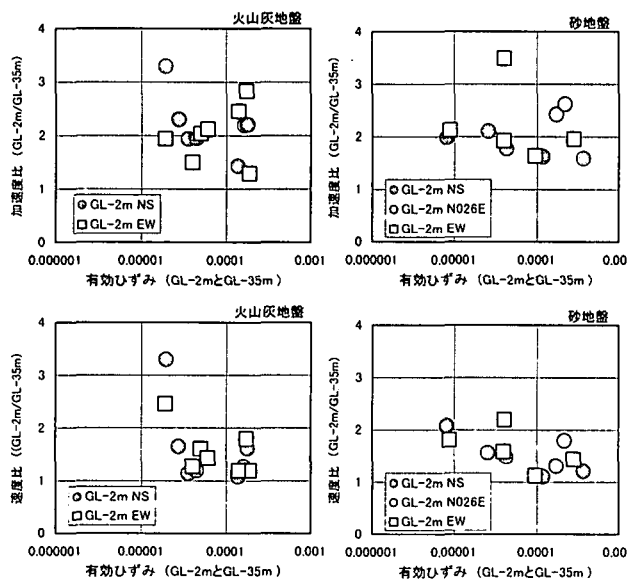


図-8 有効ひずみに対する最大値の増幅

となる境界とよく対応している。さらに大きなひずみに対しての剛性低下と増幅倍率の低減もよく対応している。火山灰地盤では砂地盤に比べばらつきも大きく応答倍率の値にも違いはあるが、剛性低下と増幅率の低下に同様の傾向が見られる。増幅倍率はそれぞれの地盤の卓越振動数やQ値などに依存するため今後その検討が必要である。

また、これらは、有効ひずみのレベルで 10^{-4} のオーダーまでの記録の検討であるが、今後さらに大きな地震動に対して、あるいは同時に観測している間隙水圧の影響に関して検討を進める予定である。

7. まとめ

比較的近接した2地点の鉛直アレー地震動記録を基に表層地盤の増幅特性の検討を行い、以下のことがわかった。

- ①近接した2地点の工学的基盤と見なされる地中の地震動は概ね同程度である。
- ②地震動レベルと最大値の増幅や卓越振動数の変化の比較から、比較的小さな地震動から表層地盤の非線形性が現れること、地震動レベルが大きくなるにしたがい、非線形性は増大することがわかった。
- ③2地点の増幅特性はその地盤構造を反映して、小さな地震動レベルから違いが見られる。
- ④剛性低下とひずみの関係は既往の室内試験や地震観測記録と同様な関係を示す。有効ひずみが 5×10^{-5} 程度から明瞭な剛性低下が見られる。
- ⑤ひずみと加速度および速度の増幅倍率の関係は、剛性低下の発現とともに低下していく。

参考文献

- 1) Ishihara, K., Shimizu, K. and Yamada, Y.: Pore Water Pressure Measured in Sand Deposits during an Earthquake, Soils and Foundations, Vol.21, No.4, pp.85-110, 1981.12
- 2) 柳澤栄司, 清水昭男, 大宮宏之: 地震波動による表面砂地盤の間隙水圧の応答, 第7回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.589-594, 1986.12
- 3) 井合進, 倉田栄一: 緩い砂地盤における地震時の間隙水圧の観測と解析, 港湾技研資料, No.718, pp.3-18, 1991.12
- 4) 西川 純一, 小田島 大, 森 伸一郎, 三輪 滋: 1993年釧路沖地震における液状化アレー観測, 土と基礎, Vol.42, Ser.No.434, No.3, pp.57-62, 1994.3
- 5) 林 宏親, 西川 純一, 谷口 啓二郎, 池田 隆明, 三輪 滋, 森 伸一郎: 液状化アレー観測記録を用いた地盤の地震時挙動の検討, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1217-1222, 1998.12
- 6) 池田隆明, 三輪滋, 西川純一, 林宏親, 江川拓也: 液状化非線形解析による過剰間隙水圧が上昇した地盤の地震時挙動の検討, 第25回地震工学研究発表会, 1999.7(投稿中)
- 7) 三輪滋, 森伸一郎: 地盤の地震動増幅特性に及ぼす過剰間隙水圧の影響, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.211-216, 1994.12
- 8) 森伸一郎, 三輪滋, 沼田淳紀: 1995年兵庫県南部地震におけるまさ土埋地盤の液状化挙動に関する振動台実験, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.231-248, 1996