

鉛直アレー地震動観測記録に基づく表層地盤の非線形特性の評価

北海道開発局開発土木研究所 正会員 林 宏親 正会員 西川純一
北海道開発局開発土木研究所 江川拓也
飛島建設技術研究所 正会員 三輪 滋 正会員 池田隆明

1. はじめに

苫小牧市北東部のウトナイ湖近傍の液状化の可能性がある軟弱な表層地盤の地震動増幅特性を検討するために、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¹⁾²⁾。得られた9つの地震の記録に関して、最大値の増幅の関係などについてはすでに報告されている³⁾。ここでは、地震動記録から求めた地盤内のせん断応力 - せん断ひずみ（以下応力 - ひずみと呼ぶ）関係について検討する。

2. 観測記録の概要

図-1に地盤柱状図と観測機器の配置を示す。表層からG.L.-15m～G.L.-20m付近まではN値が10以下の緩い砂層が主体であり、液状化の可能性がある。観測システムについては、文献2)に詳しい。表-1に1999年3月までに観測された地震の記録を示す。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9つの地震が記録されている。このうち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。

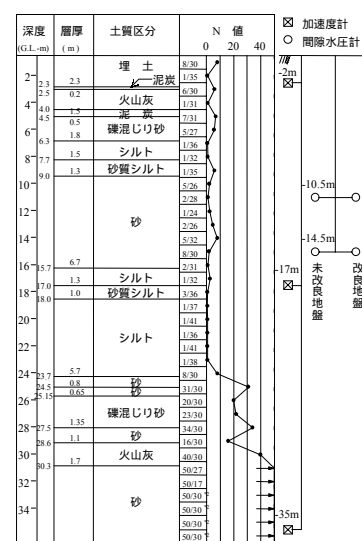
3. 地震動記録から求めた地盤の応力 - ひずみ関係

3 深度の加速度計の記録を基にG.L.-2m～G.L.-17m, G.L.-17m～G.L.-35mの応力 - ひずみ関係を求める。各2深度の加速度記録を深さ方向に線形補間し、その間にある各層ごとの平均的な加速度にその層の密度を乗じて、上層から足しあわせることでせん断応力を求める。このとき、G.L.-2mから上は加速度一定と考えた。また、加速度を2回積分した変位の差から2深度間の相対変位を求め、層厚で除して2深度間の平均的なせん断ひずみを求める。この両者の関係から応力 - ひずみ関係を、また得られた応力 - ひずみ曲線の1ループの応力、ひずみの最大値と最小値の傾きからせん断剛性を求める⁴⁾。以上の情報から、せん断ひずみと剛性の低下、入力レベルと剛性低下の関係などを検討する。得られた応力 - ひずみ関係の一例を図-2に示す。応力 - ひずみ関係は振動数の高い成分がみられるものの比較的にきれいなループを描き、また地震動レベルによって、その傾きが変化していることが分かる。図-3にせん断ひずみとせん断剛性の関係をG.L.-2m～G.L.-17m, G.L.-17m～G.L.-35mそれぞれについて示す。せん断ひずみは最大で 5×10^{-4} 程度にまで達しており、地盤の非線形性が生じる範囲と考えられる。データにばらつきはあるものの、せん断剛性はせん断ひずみの増加に伴い低下する傾向が現れている。

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	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		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		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		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	10.4 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		220.0 218.5	火山灰 砂	93.08.08 04:43:49.01 93.08.08 04:43:41.53	193 205	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 2.5	
5 苫小牧沖地震 1993.12.04 18:30	5.5	41° 44' 141° 59'	79		160.2 139.4	火山灰 砂	93.12.04 18:30:52.76 93.12.04 18:30:49.77	195 304	14.4 23.3	9.9 10.7	7.9 5.1	7.5 10.7	7.2 8.7	4.4 7.6	5.1 8.1	2.8 3.5	
6 北海道東方沖地震 1994.10.04 22:23	8.1	43° 22' 147° 40'	30		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 79.8	24.8 36.3	29.5 43.8	23.5 39.7	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		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 61.6	61.2 51.3	10.0 15.5	32.5 39.1	30.8 36.4	27.9 28.0	21.6 28.0	7.8 7.7	
8 岩手県地震 1995.01.07 07:37	6.9	40° 18' 142° 24'	30		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 16.8	23.6 24.9	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		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、6) N340E成分を表示



*1.N値は30cm貫入量に換算して表示

*2.G.L.-31.5m以下は同一の土質が連続、N値は50以上と設定

図-1 地盤柱状図と観測機器の配置

鉛直アレー強震観測記録、応力-ひずみ関係、非線形性、動的変形特性

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 TEL 011-841-1111, FAX 011-824-1226)

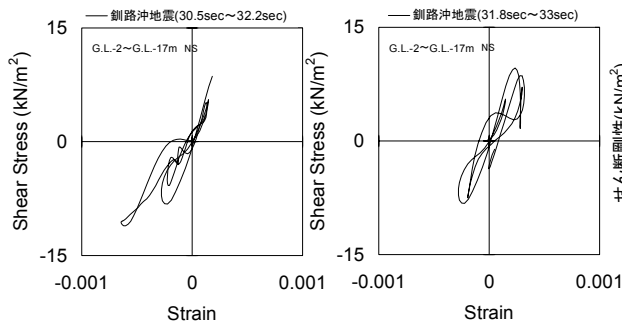


図-2 地震動記録から求めたせん断ひずみとせん断応力の関係

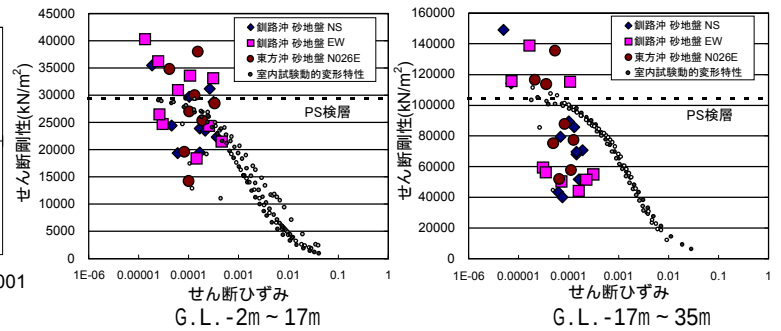


図-3 せん断ひずみとせん断剛性の関係

PS 検層から得られたせん断波速度をもとに求めた G.L.-2m~G.L.-17m および G.L.-17m~G.L.-35m の間の平均的な微小ひずみ時のせん断剛性と、それを初期値として基準化した室内試験から得られた動的変形特性をあわせて示す。地震動記録から得られたものの方がひずみに対する変化がやや大きくばらつきがあるものの、せん断剛性が G.L.-2m~G.L.-17m では小さく、G.L.-17m~G.L.-35m では大きく、それぞれの値も調査結果とほぼ対応している。また、ひずみの増加により調査結果と同様な剛性低下の傾向などが現れている。小さなひずみで剛性が低下している点があるのは、最大振幅後も地震動継続中は低下した剛性が回復していないためと考えられる。それぞれの層での、最大ひずみレベルは 5×10^{-4} 程度で、別途実施した有効応力非線形解析⁵⁾で推定される地盤のひずみレベルの平均的な値ともほぼ対応する。

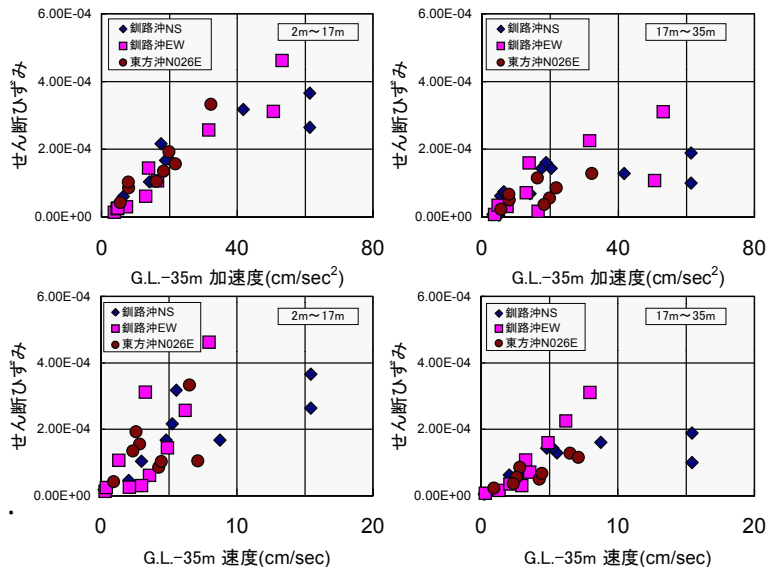


図-4 入力レベルとせん断ひずみの関係

図-4 に入力加速度レベル、入力速度レベルとせん断ひずみの関係を示す。ばらつきは見られるが、入力地震動レベルが大きくなるにしたがい、せん断ひずみは増加しており、入力地震動レベルが大きくなるにしたがって地盤の非線形性が現れていることが分かる。釧路沖地震の記録で間隙水圧上昇後にせん断ひずみが大きくなるような傾向は明瞭には見られず、このデータからだけでは間隙水圧の上昇が地盤の非線形性に及ぼす影響を判断するのは難しい。これは釧路沖地震の場合でも間隙水圧上昇が地盤全体の中ではそれほど大きくなかったためと考えられる。

4. まとめ

地震動記録に基づいたせん断応力 - せん断ひずみ関係から得られるせん断剛性の初期値やひずみによる剛性低下は、PS 検層から得られる初期せん断剛性や室内試験から得られた動的変形特性と調和的な関係にある。

入力地震動レベルの増加に伴いせん断ひずみは増加する。せん断剛性はせん断ひずみにしたがって減少することから、地震動レベルによって地盤の非線形性が現れていることがわかる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 林宏親, 西川純一, 江川拓也, 三輪滋: 池田隆明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, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 277- 280, 1999. 7.
- 4) 嶋本栄治, 沼田淳紀, 森伸一郎, 田口勝夫, 染谷昇: 振動台を用いた応力-ひずみ履歴に基づく動的変形特性の測定, 第33回地盤工学研究発表会発表講演集, pp. 887- 888, 1998. 7.
- 5) 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講演論文集, pp. 329- 332, 1999. 7.