

兵庫県南部地震に於ける軟弱地盤中の地動特性に関する一考察

宮島信雄¹・平野昌治²

¹正会員 日本シビックコンサルタント (株) (〒116東京都荒川区西日暮里二丁目26-2)

² 日本シビックコンサルタント (株) 情報技術部 (〒116東京都荒川区西日暮里二丁目26-2)

土の動的特性はひずみの大小に依存していることは、周知の事実である。実務計算に於いて、慣用される電算プログラム(SHAKE)等で採用している有効ひずみと最大ひずみの比(α)として一般に0.65が推奨されて居る。しかし兵庫県南部地震に於ける断層近傍の強震波形によれば、その主要動の特徴として、その継続波数が極めて少ない。この現象に着目し、この α を変化させ、神戸港島地中の4点アレー観測並びに東神戸大橋に於ける地中2点観測波形を対象に、等価線形手法を用い、逆解析によりその整合を試みた。この結果最大加速度値で、各地点共誤差10%程度以内に無理なく納まった。また採用した α の定義、有効ひずみと最大ひずみの関係の検証もした。

Key Words : Numerical Simulation, Effective Strain Ratio, Strong Earthquake

1. はじめに

兵庫県南部地震の折、神戸港島、東神戸大橋におけるアレー観測で、貴重な記録が採取された。

神戸港島については観測記録の基本的な性状の整理と、地震応答解析プログラム(SHAKEおよびFLUSH)を使用して表層地盤の振動解析を実施した結果を第23回当研究発表¹⁾で報告した。

今回は観測地点kp-12m並びに地表(4.5m)の観測値との整合を従前と同様SHAKEによって追跡すると共に、近傍東神戸大橋での観測資料についても同手法で解析し、観測値をどの程度再現出来るか検討した。

の強震計は方位補正(20°)をしている。

(2) 東神戸大橋

表-2橋脚陸部の土質情報⁴⁾⁵⁾を採用した。なお下部洪積層以深(-55m)は、神戸港島と同様であることが照合確認されている。

また図-2に現地でのひずみ依存曲線を示したが、沖積粘土層については、神戸港島と同様とした。地中埋設地震計は、表層埋立土層G2(-1.5m)と、上部洪積層中G1(-33.5m)の2地点ある。

2. 地震計の配置と地盤状況

(1) 神戸港島

震前の地盤情報²⁾³⁾から表-1の地盤定数を設定し、震後の常時微動観測結果と照合してGL-195mをここでは一応設計基盤面として採用することとした。

用いたひずみ依存曲線は近傍で行われた試験結果で図-1に示した。地震計は、地表面、GL-16m(埋立土層最下部)、GL-32m(第一洪積層上部砂層)、GL-83m(第2洪積砂礫層最上部)の4深度に設置されている。(爾後GLからの深さ表示とする)尚、深さ83m

表-1 港島地震計室震前地盤定数

層厚(m)	深さ(m)	V _p (m/s)	V _s (m/s)	ρ
2.2	2.2	260	170	1.8
2.8	5.0	330	170	1.9
12.5	17.5	780	210	1.9
1.5	19.0	1480	210	1.9
7.8	26.8	1180	180	1.5
6.0	32.8	1330	245	1.85
17.2	50.0	1530	305	2.0
11.5	61.5	1610	350	2.0
17.5	79.0	1610	303	1.7
6.8	85.8	2000	320	2.1
109.2	195.0	1800	550	1.8
855.0	1150.0	2500	1000	2.1
		5400	3200	2.7

表-2 東神戸大橋深江浜側地盤（ボーリングNo. 51）

深度 OP	土質	層厚 (m)	せん断 強度 (kg/cm^2)	圧縮 係数 (kg/cm^2)	圧縮 係数 (kg/cm^2)	圧縮 係数 (kg/cm^2)	圧縮 係数 (kg/cm^2)
0.31	①	7.00	1.00	0.48	0.0	4702	180.0
-1.80	②	8.80	1.80	0.44	0.0	16447	280.0
-8.28	③	10.20	4	0.40	3.4	2076	135.0
-18.40	④	3.15	17	0.40	0.0	19853	320.0
-21.84	⑤	3.70	43.5	0.47	0.0	27540	370.0
-25.34	⑥	3.75	20	0.40	23.2	11481	240.0
-29.08	⑦	2.55	50	0.48	0.0	23602	340.0
-31.84	⑧	2.10	18	0.40	14.4	8775	210.0
-33.74	⑨	3.65	50	0.48	8.0	33448	410.0

①沖積粘土層
②沖積砂層
③沖積粘土層
④沖積砂層
⑤沖積粘土層
⑥沖積砂層
⑦沖積粘土層
⑧沖積砂層
⑨沖積粘土層

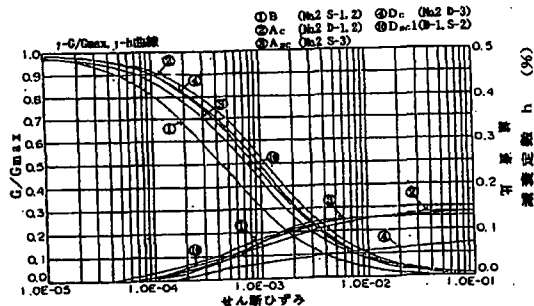


図-1 ひずみ依存曲線

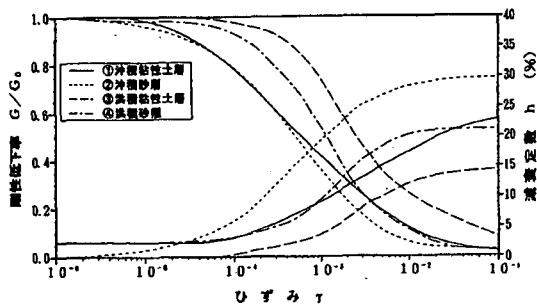


図-2 ひずみ依存曲線

3. 取得された記録波形

両地点共、最大加速度が観測されたNS成分について取扱うこととする。尚、加速度波形は、0.1Hzより低い周波数と10Hzより高い周波数を計算プログラムの取扱い制限から取除いてある。

図-3(a~b)に神戸港島並びに東神戸大橋の解析用加速度波形を示した。又、図-4(a~b)に例として各々の地点の地表面フーリエスペクトルを示した。

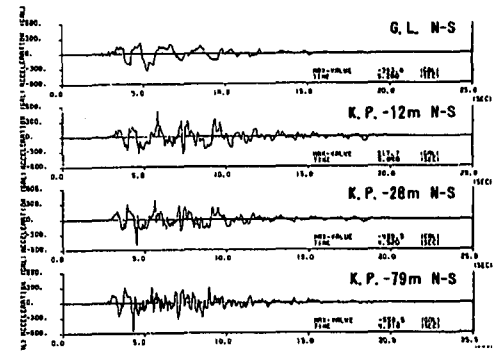


図-3(a) 解析用加速度波（神戸港島）

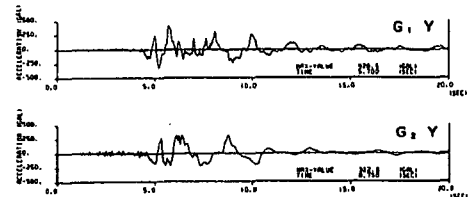


図-3(b) 解析用加速度波（東神戸大橋）

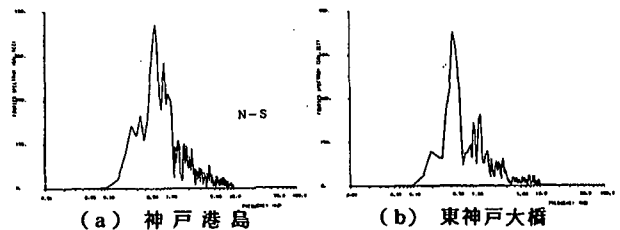


図-4 フーリエ加速度スペクトル

4. 地盤応答解析

(1) 神戸港島

表-1の地盤条件での各層のひずみ量と初期せん断剛性の低下率、および減衰率との関係を図-1に示す。この関係は、当地盤の振動三軸試験より求めたものである。

前回当発表会で、GL-32mの記録について有効ひずみと最大ひずみの比（ α ）を0.3~0.65までの範囲で計算を行い $\alpha=0.4$ で比較的良一致を見たことを報告した。

ここに、有効ひずみとは、不規則波での最大ひずみを等価な正弦波に置き換えたときの振幅比である。

この計算法で地盤の浅層まで無理なく地盤定数を見直すことによってどの程度の精度で実測値と整合できるか再度検討を加えた。

$\alpha=0.4$ の条件での各層のせん断剛性と減衰率の平均の収束値を表-3に示した。

図-5(a)に応答計算結果のうち例として地表での計算値と観測値の加速度波形の比較を示す。

これによれば、最大加速度について計算値と観測

値の比をとると計算値の方が-32mで1.01、-16mで1.05、地表で1.08と地表に近づく程差が大きくなった。

尚、図-6(a)には応答スペクトルの計算値と観測値の比較図を示した。

表-3 収束値 ($\alpha=0.4$)

層 名	せん断剛性 初期値 (TF/N:2)	ひずみ 依存曲線 No.	SHAKE収束値	
			せん断剛性 (TF/N+2)	減衰定数 (%)
B	6281.63	1	4074.990	.040
A c	6281.63	1	1641.173	.096
B	6281.63	1	74.627	.136
A c	6550.00	103	5762.076	.071
	7650.00	2	4197.340	.068
	8620.41	2	1994.688	.093
A c - c	11025.00	3	4383.806	.087
	17086.22	3	9181.101	.059
D a	18984.69	5	9717.861	.065
	18984.69	5	7388.079	.083
D c	16136.99	4	4480.665	.046
	21250.00	4	7532.037	.041
D c	25000.00	4	10536.830	.038
	61734.00	4	61734.690	.050
基礎	234693.90	—	—	—

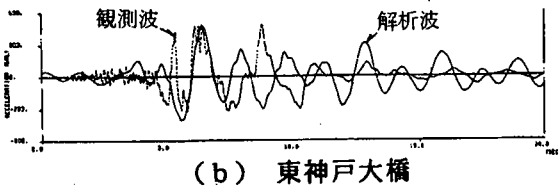
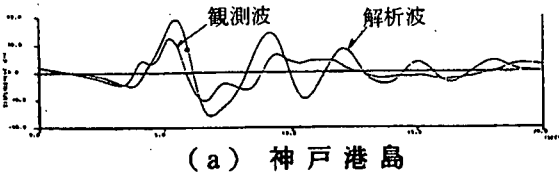


図-5 N-S成分変位観測波と解析波の比較

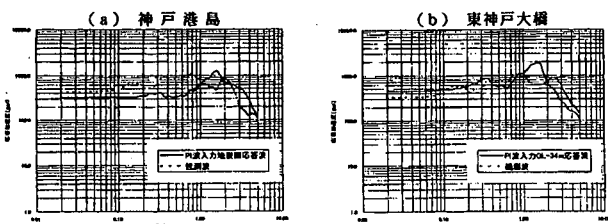


図-6 観測値と計算値の応答変位スペクトル

(2) 東神戸大橋

神戸港島で扱った全く同条件である $\alpha=0.4$ の場合で、地盤モデルを表-4に示す各層のせん断剛性と減衰率の平均の収束値を用いた。

まずG1とG2間の応答性を計算して地盤定数の整合を確認し、-195mモデル基盤に神戸港島で得た入射波を距離減衰を加味して最大300galで応答計算した。この結果、波形については図-5(b)に解析波と観

測波を重ねて示し、応答スペクトルの例を図-6(b)に示した。このうち最大加速度は、計算値と観測値の比をとると観測値の方がG1で1.01、G2で0.96となった。

表-4 収束値 ($\alpha=0.4$)

層 名	せん断剛性 初期値 (TF/N:2)	ひずみ 依存曲線 No.	SHAKE収束値	
			せん断剛性 (TF/N+2)	減衰定数 (%)
B	4702.04	2	3613.632	.066
	4702.04	2	3208.667	.166
	16446.94	2	10779.890	.087
	16446.94	2	9430.667	.113
A c	2661.02	1	261.261	.179
	2661.02	1	186.789	.193
	2661.02	1	186.286	.199
	2661.02	1	163.840	.200
A c	10883.04	2	11061.060	.134
D a	27240.31	4	23464.600	.041
D a	11461.22	3	9921.664	.023
D a	22002.04	4	18312.600	.049
D c	6776.00	3	6733.430	.034
D a	30448.47	4	28378.660	.043
D c	6780.61	3	3004.387	.065
D a	30264.80	4	23940.270	.060
D c	6446.94	3	3331.777	.068
D a	24376.00	4	17632.280	.036
D c	9404.00	3	6567.664	.042
D c	9404.00	3	6426.961	.044
D c	9404.00	3	6290.969	.046
D a	31040.83	4	21392.170	.068
	61734.69	4	61734.690	.030
基礎	234693.90	—	—	—

5. 有効ひずみと最大ひずみの比 $\alpha=0.4$ の検証

等価線型法による動的地盤応答計算においては $\alpha=0.65$ が経験上適合すると推奨されている。

しかし、今回の地震については α を0.4で計算すると良く観測値を説明することができた。

この $\alpha=0.4$ の値についての意味合いに考察を加えることとする。手法としては $\alpha=0.4$ とした時の応答ひずみ履歴面積が等値になるためには加速度比も0.4であることに着目し、その整合を確認してみた。

計算条件を示すと次の通りである。

- 入力波形：現地観測-83mのNS成分 (図-7(a))
- 継続時間：計算継続時間は、観測波の主要動部に限定した。ここに主要動とは一般に慣用されている加速度が最大加速度の2分の1を最初と最後に越える間の継続時間で定義した。すなわち、記録開始後2.8secより6.7sec間とする。ちなみに、ひずみ振幅でも同様な範囲に納まっている。
- 最大加速度：最深度(-83m)で観測された最大加速度N-S成分678.8galを採用。
- 対象位置：-83mの位置を設計基盤とする。この時-32m位置での地震計設置深度での地盤挙動を対象とする。
- 地盤モデル：4.1 地盤応答の項で取り扱った同一の地盤を対象とした。

- f) 等価正弦波形振動数：観測加速度のフーリエ解析によって求めた一次の卓越振動数 0.54Hz とする（図-7(b)）。
- g) 計算結果：入力加速波形 558.5gal と等加速度 223gal, すなわちその比 0.4 の場合の重ね入力加速度波形と、-32m におけるそれぞれの応答ひずみを重ね併せて示すと図-7(c)である。この時のひずみ履歴面積を両者間で比較するとその比が 5%に納まった。

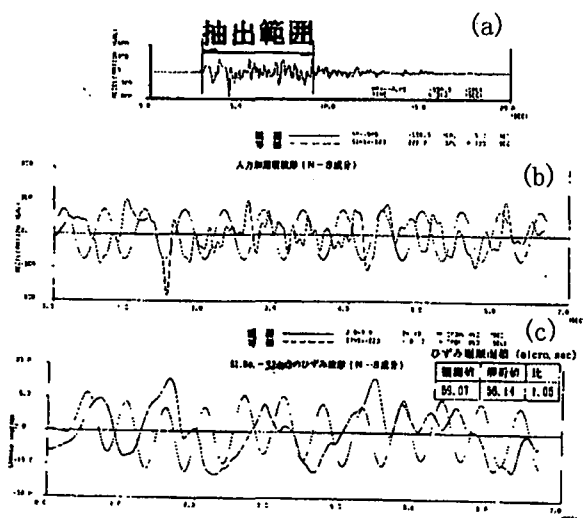


図-7 有効ひずみと最大ひずみの比 α の検証

7. まとめ

慣用プログラムSHAKEでどの程度まで断層地震震源近傍における軟弱地盤で採取された加速度波形と整合させ得るか震央距離約21kmと約9km遠のいた2地点を対象に検討の結果、次の点が把握出来た。

- a) SHAKEによる計算で有効ひずみと最大ひずみの比 α が、断層地震では0.4付近でよく適合できた。
- b) 加速度波についての観測値と解析値との比は最大10%以内に納まった。
- c) 港島観測波をもとに東神戸大橋に本手法を適用し同一設計基盤195mと仮定して入力波を作成、応答計算の結果、観測波との整合が略採れた。

謝辞：貴重な観測資料の他地盤情報等の提供と、御指導を賜った神戸市 山田耕一郎氏並びに阪神高速道路公団 小林寛氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 稲富隆昌, 清宮理, 山田耕一郎, 宮島信雄, 平野昌治: 平成7年兵庫県南部地震でのポ-トアイラ-ントの表層地盤の振動特性, 第23回地震工学研究発表会講演概要PP269~272 1995年7月
- 2) 神戸市開発局: 兵庫県南部地震による埋立地盤変状調査報告書1995年8月
- 3) 林聡・宮島信雄: 神戸港第7突堤の設計地震について, 運輸技術研究所報告第11巻, 第11, 12号 PP33P 1955年12月
- 4) 河井章好, 塚原悌二, 北沢正彦, 吉田聡: 東神戸水路橋の大型ケーソンの耐震設計(上, 下) 橋梁と基礎85~11, 12 PP6~10, 27~33 1985年11, 12月
- 5) 宮島信雄, 加藤教吉, 平野昌治, 小林寛: 地震観測にもとづく地盤と基礎構造物間の地動の伝達性に関する一考察, 第24回地震工学研究発表会講演概要1997年7月