

(70) 平成7年兵庫県南部地震でのポートアイランドの表層地盤の振動特性

運輸省港湾技術研究所 (正) 稲富隆昌、(正) 清宮理  
 神戸市 山田耕一郎  
 日本シールドエンジニアリング株式会社 ○(正) 宮島信雄、平野昌治

1. はじめに

神戸港のポートアイランドでは、表層地盤の鉛直方向4箇所、水平及び鉛直の3成分の地震応答観測を実施している。兵庫県南部地震では、-79mの洪積層で最大で約600galの水平加速度が観測された。観測記録の基本的な性状を整理するとともに、地盤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観測値をどの程度再現できるか検討を行った。

2. 地震計の配置と地盤状況

地震応答観測はポートアイランド北西部で平成3年度より実施されている。地震計は加速度計で鉛直方向に標高-79m、-28m、-12mおよび地表面(+4.5m)に埋設されている。加速度計の仕様を表-1に示す。

表-1 地中用検出器

	SD-112	SD-240G
使用条件	地中埋設	地中埋設
測定	加速度	加速度
固有周波数(Hz)	5	5
感度	10mV/g	10mV/g
外形寸法(cm)	8.0(直径)×78 8.0(直径)×150 (方位計付)	36×36×28±0"
設置深度	KP-79、-28、-12m	KP+4.5m (G.L.)

測定周波数範囲は、0.1~30Hzで測定可能範囲の加速度は0.1~1000galである。地震計設置の際ボーリングによる土質調査 (PS検層と標準貫入試験) が実施されている。ボーリング位置の表層地盤は、埋め立て地盤 (深度0.0-17.8m)、沖積層 (17.8-37.0m) および洪積層 (37.0-85.35m) から構成されている。埋め立て地盤は礫混じり砂とシルトのまさ土であり標準貫入試験でのN値が3-11(平均7)と比較的軟弱な地層である。沖積層の上部は、N値が3-4の均質な粘土で下部は粘土層と砂層が互層になっておりN値も6-38とばらついている。深度37mより深い場所は洪積層である。61mまでN値が8-31の砂層が主で粘土層が所々に混じっている。81mまではN値が10-24の固い粘土層である。この層より下部は砂礫となっている。これら地盤条件を表-2に示す。ポートアイランドでは地盤条件が水平方向にはほぼ一様である。

表-2 地盤条件

層名	層厚 (m)	平均	v	Vp (%)	Vs (%)
埋 土	2.0	1.9	0.127	260	170
	3.0	1.9	0.319	330	170
	7.0	1.9	0.461	780	210
	5.0	1.9	0.490	1480	210
沖積粘土	2.0	1.7	0.480	1480	210
	9.0	1.7	0.488	1180	180
礫混じり砂	5.0	1.8	0.482	1330	245
	3.0	1.8	0.479	1530	305
礫混じり砂	14.0	2.0	0.479	1530	305
	10.0	2.0	0.479	1530	305
粘土	19.0	1.7	0.479	1530	305
	3.0	1.7	0.475	1610	350
礫混じり砂	18.0	2.0	0.475	1610	350

3. 取得された記録波形

1995年1月17日5時46分の発震で取得された本震での20秒間の加速度波形を図-1に示す。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制限から取り除いてある。-79mの洪積層内の加速度計では南北成分 (NS) で559gal、東西成分 (EW) で285gal、上下成分 (UD) で126galの最大加速度を示すが、原波形では、それぞれ前者より679, 303, 187

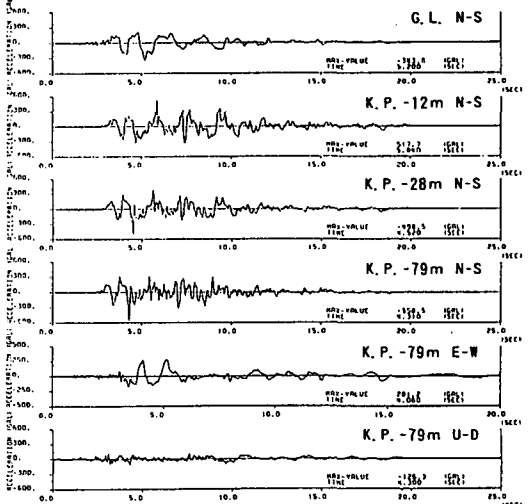


図-1 解析用波形 [Band pass: 0.1 ~ 10.0Hz]

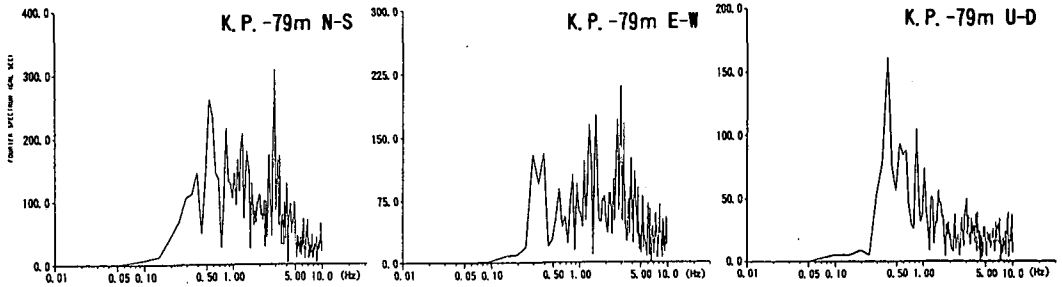


図-2 加速度フーリエスペクトル図

gal が記録された。図-2 にフーリエスペクトルを示すが、NS成分で 0.5Hz, 2.9Hz など、EW成分で 2.9Hz, 1.6Hz, 0.4Hz など、UD成分で 0.3Hz, 0.7Hzなどが卓越周波数であった。UD成分では、比較的低い周波数が卓越したのが特徴である。NS成分で -28m, -12m および +4.5m (地表) での最大加速度は各々 499 (543) gal, 518 (565) gal および 344 (341) gal であり地表面での加速度が小さくなっていった。なお、加速度表示の括弧内は濾過前の値を示す。EW成分は、NS成分より各地点での加速度値は小さいがNS成分と同様に地表面の加速度が小さく表層地盤での地表面に近づくにつれて加速度振幅の増加の傾向は見られなかった。また地表面の加速度波形は、NS成分で 0.5Hz、EW成分で 0.3Hz, 0.8Hz と比較的低い周波数が卓越していた。これは埋め立て地盤の液状化による影響と考えられる。一方UD成分は-79m で 126 (187) gal、地表面で 556 (556) gal の最大加速度が記録されたが、地表面で加速度振幅が水平成分のように小さくはならなかった。また-12mの加速度原記録ではスパイク現象(ノイズかもしれない)が顕著に見られ最大加速度値が 345 (790) gal と大きな値であった。図-3 にEW-NS成分とNS-UD成分の加速度記録の軌跡図を示す。EW-NS成分の主動部分ではNS軸より 20-23度ずれた方向に振動していた。またNS-UD成分の-79mではNS成分がUD成分より加速度値が大きかったが地表面ではUD成分がNS成分より逆に大きく、地表面での鉛直方向の振動が大きかったことを示している。

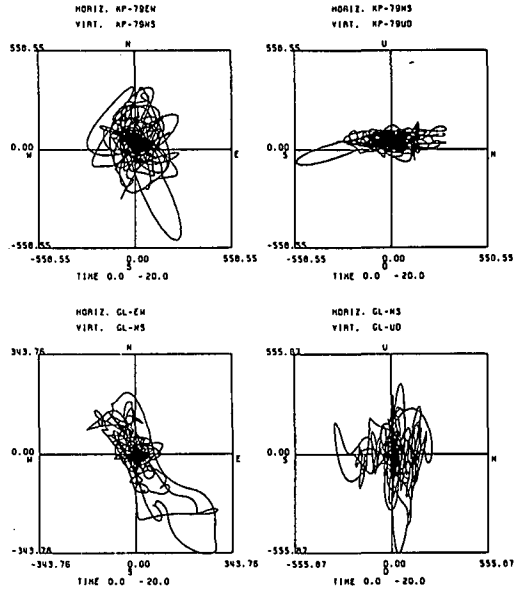


図-3 加速度軌跡 [単位; gal]

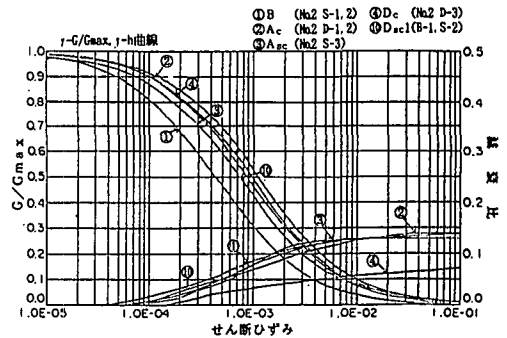


図-4 ひずみ依存曲線

#### 4. 地盤応答解析

地震計設置地点では水平方向にはほぼ一様な地層構成をしておりSHAKEによる地盤応答解析手法が適用可能と考えられる。今回の地震で見られたような表層地盤の大きなひずみ発生状況や液状化現象が見られる場合本手法の適用が有効かは議論のあるところであるが、今回本手法でどの程度観測記録を再現できるか試みた。表-2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-4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。今回有効ひずみと最大ひずみの比( $\alpha$ )を0.65~

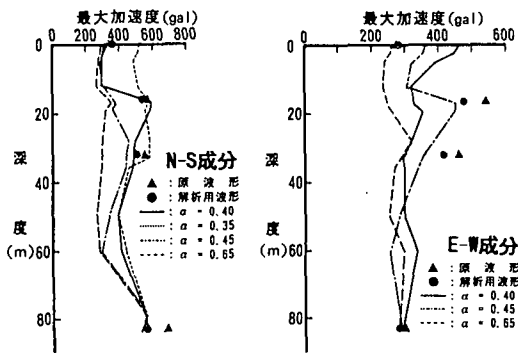


図-5 水平最大加速度の鉛直分布

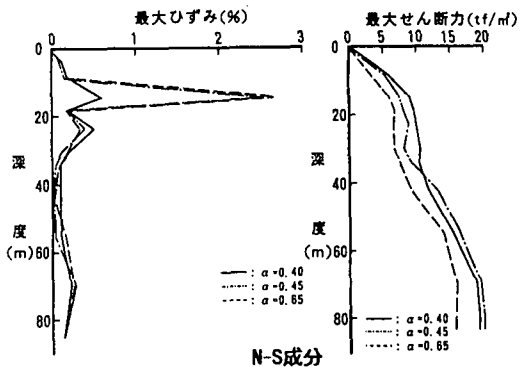


図-6 (a) 最大ひずみ, せん断力の鉛直分布

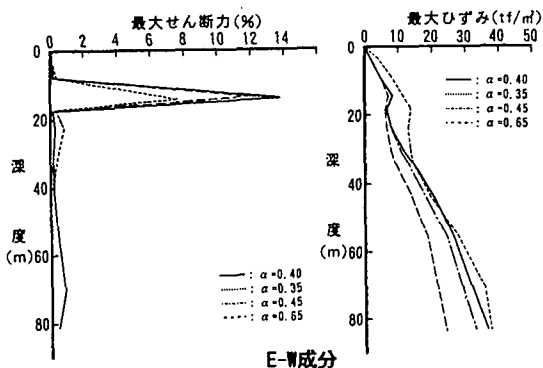


図-6 (b) 最大ひずみ, せん断力の鉛直分布

表-3 収束値 ( $\alpha=0.4$ )

層名	せん断剛性 (%)	ひずみ依存曲線 No.	SHAKE収束値	
			せん断剛性 (%)	減衰定数 (%)
B	5603	1	4993	0.6
	5603	1	3295	4.8
	8550	1	3102	8.0
A c	8550	1	54	13.7
	7650	2	4695	6.0
A s - c	5620	2	2373	8.4
	11025	3	4952	7.8
D s - c	17088	3	9458	5.6
	18985	10	9969	6.2
D c	18985	10	7651	8.0
	16137	4	4118	4.6
D s - c	21250	4	7780	4.1
D s - c	25000	—	—	—

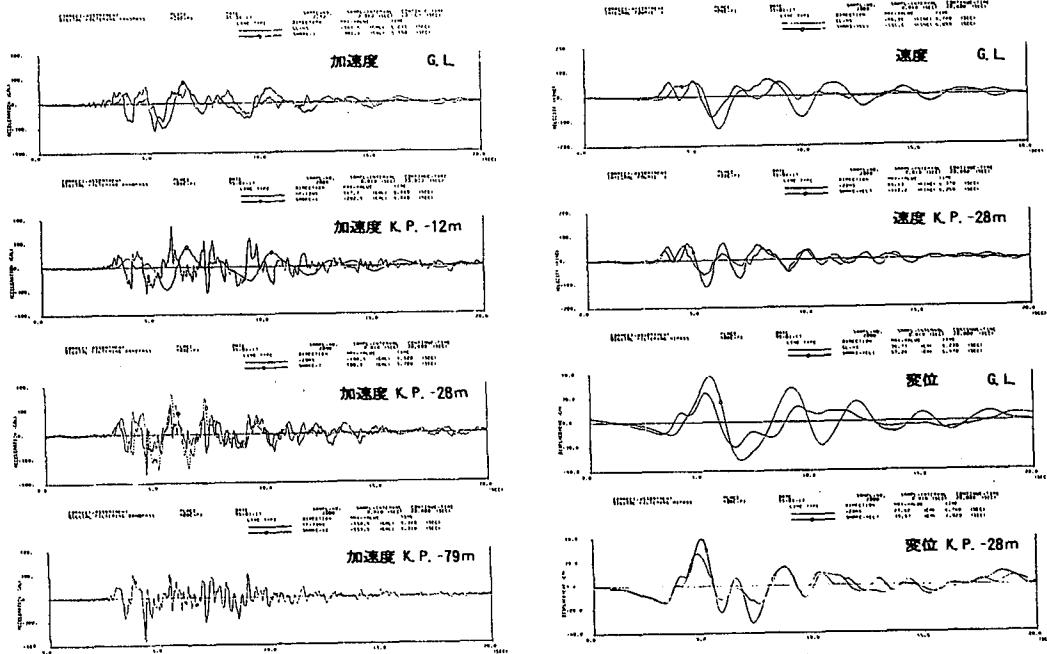


図-7 N-S成分観測波と解析波の比較

0.3 までの範囲で設定して計算を行った。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。図-5に水平成分での地震計の設置位置での最大加速度の観測値と計算値との比較を図で示す。従来の計算値で良く使用する  $\alpha = 0.65$  ではいずれの地点でも最大加速度の計算値は観測値と良い一致を見なかった。NS成分で  $\alpha = 0.4$  で比較的良好一致を見た。こ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-5に示す。深さ方向のせん断応力とせん断ひずみの分布を図-6に示す。表層の埋め立て地盤で非常に大きなせん断ひずみが計算された。図-7に各地点での計算値と観測値の加速度波形ならびに-28mと地表の速度と変位波形の比較を示す。-12m地点を除いていずれの波種も位相のずれは認められるが、傾向は両者で比較的類似していた。鉛直方向の解析はFLUSHにより行った。この際表層地盤の弾性係数と減衰率のひずみ依存性を考慮する場合としない場合、およびUD成分とNS成分を同時に考慮する場合としない場合とで計算を行った。図-8に観測値と計算値の最大加速度値の比較とひずみ分布を、また図-9に各位置での上下方向の加速度波形の比較を示す。ひずみ依存性を考慮しない方が良好一致を示した。

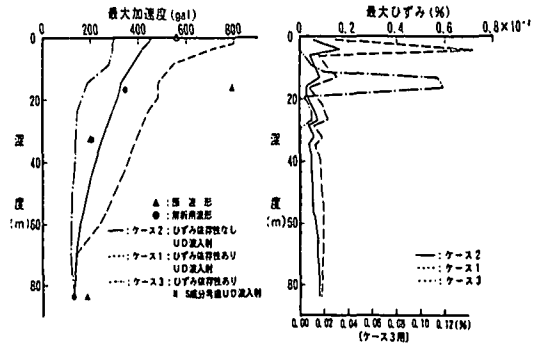


図-8 上下動最大加速度とひずみの鉛直分布

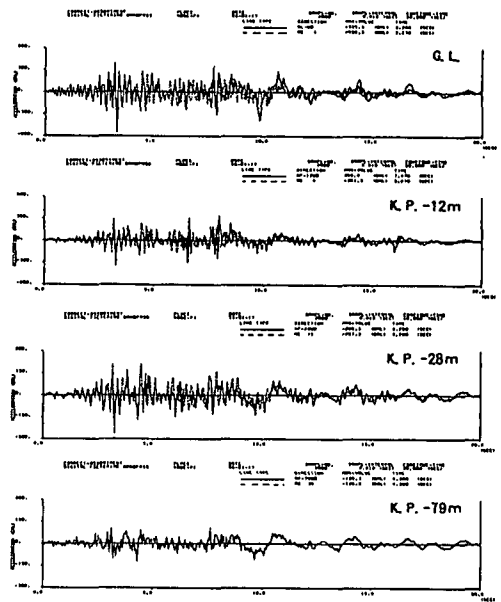


図-9 上下方向観測波とケース2解析加速度波の比較

## 5. まとめ

(1) ポートアイランドの鉛直方向のアレー観測で得られた加速度記録では、-79mの洪積層で水平方向で678gal、鉛直方向で186galの最大値が取得された。水平方向に関して地表面に近づくにつれ加速度振幅が大きくならなかったが、鉛直方向は加速度振幅が増加した。

(2) 水平動については、地盤応答計算SHAKEを用いて、表層地盤のせん断振動の応答計算を実施して観測値との比較を行った。加速度の分布との比較では両者は必ずしも良好一致を見なかったが、有効ひずみと最大ひずみの比を0.40-0.45程度とした場合両者の対応が良かった。

(3) 上下動については、地盤応答計算FLUSHを用いて表層地盤の疎密波による応答計算を実施し観測値と計算値との比較をしたところ地盤のひずみ依存性を考慮しなくとも、加速度波形に関して比較的良く両者の一致を見た。

(4) 今回の検討では、加速度記録の処理、地震計の配置位置や方向、有効ひずみの考え方、疎密波に関する弾性係数のひずみ依存性など十分な吟味をしないまま計算を行った。-79mの地震計設置法位がずれている可能性が軌跡図より認められ、このずれによる修正を行えば両者は更に良好一致を見た。この計算結果については、当日報告したい。今後さらに検討を進めて地盤応答解析(SHAKEおよびFLUSH)の適応性について議論していきたい。

## 【参考文献】

岩崎敏男・嶋津晃臣 共訳：土と基礎の振動、鹿島出版会、pp.140-144、1991.5.