

## (207) 神戸ポートアイランドの鉛直アレーデータを用いた 兵庫県南部地震における地盤の応力-ひずみ関係の推定

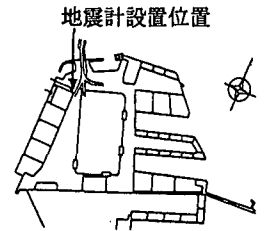
東北大学工学部土木工学科 ○風間基樹  
東北大学工学部土木工学科 柳澤崇司

### 1. 研究の目的

1995年兵庫県南部地震において、神戸ポートアイランドでは大規模な液状化によって人工島全体が数十cm沈下するとともに、島内の港湾施設は多大の被害を被った。このような人工島の地震被害の検討を行う上では、地盤がどのように揺れたのか、また地震動を伝えた地盤がどのように挙動したのかを知ることが最も基本的な検討項目である。本研究の目的は今回の地震で取得されたポートアイランドでの鉛直アレーデータと地盤の質量分布のデータだけを用いて、大まかに地盤に発生した地震時の応力と歪みの関係を把握することにある。なお、本研究では簡便な解析と言う観点から、地震動は鉛直真下から伝播したと仮定して検討を進めた。

### 2. 検討に利用したアレー観測データの概要

ここで検討に用いた鉛直アレーデータは、神戸市開発局によって取得された地表4mから深さ-79mまで深さ方向に4点で観測された合計12成分の強震記録である。図-1に、強震計設置地点位置図および想定した地層構成、単位体積重量を示す。また、表-1はポートアイランドのケーソン式重力式岸壁の等価線形有限要素解析を実施したときに求められた自由地盤で発生した最大せん断ひずみと収束したせん断波速度を示したものである<sup>1)</sup>。-79mで取得されたNS成分の地震動を用いて行った等価線形解析で計算された最大せん断ひずみのオーダーは、-12m以深の地盤で0.1~0.2%、それより上部で0.06~2%となっている。



### 3. 推定された地盤のせん断応力

地盤に発生したと考えられるせん断応力は、水平2成分について別々に求めた。すなわち、図-1で示した単位体積重量の分布を基にして、地表0mからある深さzでのせん断応力は、次式によって

$$\tau(z) = \int_0^z \rho(z) \alpha(z) dz \dots\dots\dots(1)$$

表1 等価線形計算で求めた最大せん断ひずみと収束せん断波速度

層区分 (m-m)	最大せん断ひずみ(%)	各区間の平均せん断ひずみ(%)	収束したせん断波速度(m/s)	各区間の収束したせん断波速度の平均値(m/s)	ひずみを推定する場合の最高振動数(Hz)
4~2	0.011	0.608	144	86	1.3Hz
2~0	0.062		104		
0~-3	0.065		129		
-3~-6	0.236		84		
-6~-9	0.945	0.192	47	139	2.0Hz
-9~-12	1.95		35		
-12~-15	0.184		135		
-15~-18	0.203		132		
-18~-21	0.205	0.131	132	222	1.1Hz
-21~-24	0.235		129		
-24~-26	0.129		177		
-26~-28	0.168		141		
-28~-29	0.179	0.131	139	222	1.1Hz
-29~-34	0.08		242		
-34~-38	0.11		200		
-38~-42	0.135		191		
-42~-46	0.15	0.131	186	222	1.1Hz
-46~-51	0.092		243		
-51~-57	0.111		235		
-57~-63	0.151		235		
-63~-69	0.155	0.131	234	222	1.1Hz
-69~-75	0.156		234		
-75~-79	0.159	206	206	222	1.1Hz

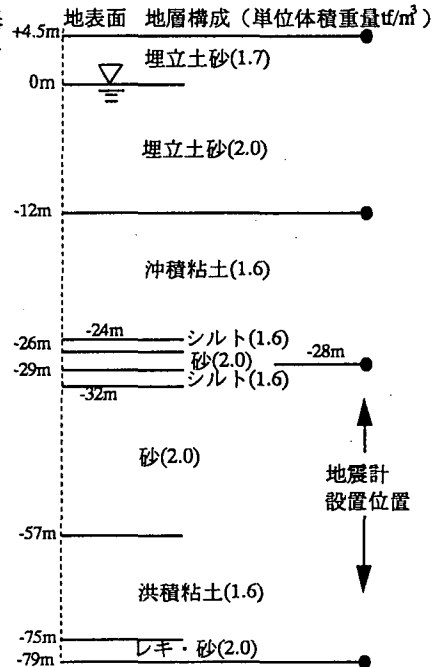


図-1 神戸ポートアイランドにおけるアレー観測地点位置図、および想定した地層構成

ここに、 $\tau(z)$ : 深さ  $z$  におけるせん断応力、 $\rho(z)$ : 地盤の密度の分布、 $a(z)$ : 地盤の加速度の分布である。また、ある時刻における加速度の分布  $a(z,t)$  は、アレー観測で得られた時刻歴を深さ方向に線形補間した<sup>2)</sup>。

図-2は、こうして2mピッチで求めた深さ方向のせん断応力の時刻歴のうち、+2m~-28mまでのNS成分を示したものである。液状化の判定法<sup>3)</sup>で示されているせん断応力波形の“衝撃型”、“振動型”の区別を考えると、概ね“衝撃型”の範疇に入る波形と言ってよいと思われる。また、図-3は最大せん断応力とそれを有効上載圧で除した応力比の分布を示したものである。地盤に作用したせん断応力は、深さ方向に次第に大きくなるが、埋立地盤に相当する深さの応力比に着目すれば、概ね0.3-0.5程度の大きさの応力が作用したことがわかる。また、分布図には水平面内の二方向のせん断応力を時刻歴上で合成したときの最大値も示した。-12mで浅の合成値は、一方向のみの最大応力より2割ほど大きくなるが、-12mで深では両者に大きな差が見られないことがわかる。なお、これらの結果はオリジナルの加速度データをそのまま用いて求めたものであり、フィルターなどは使用していない。

図-4は、求めた水平二成分の応力を水平面内の軌跡として表したものである。当然ながらせん断応力の水平面内の卓越方向は、加速度や変位の卓越方向に一致している。

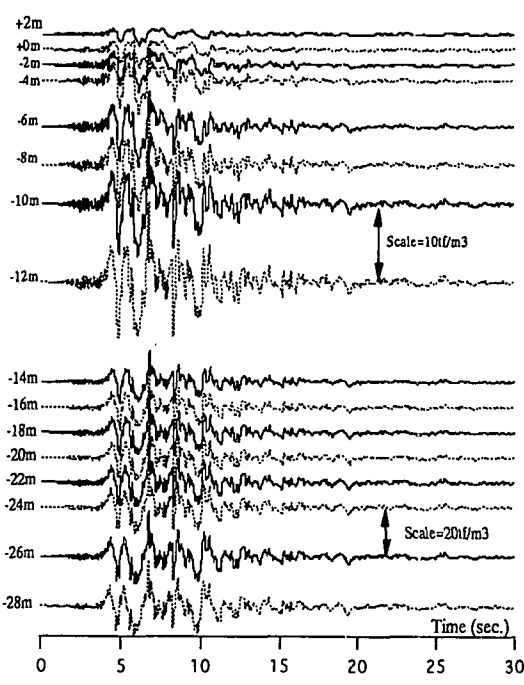


図-2 せん断応力の時刻歴(NS成分):+2m~-28m

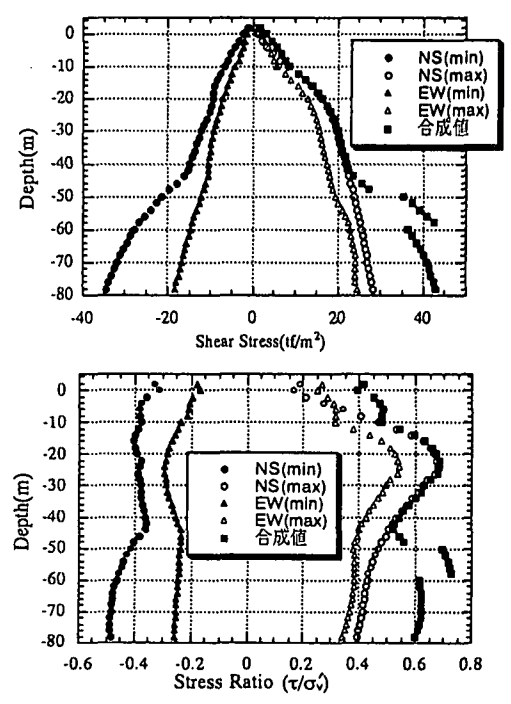


図-3 最大せん断応力・最大せん断応力比の分布

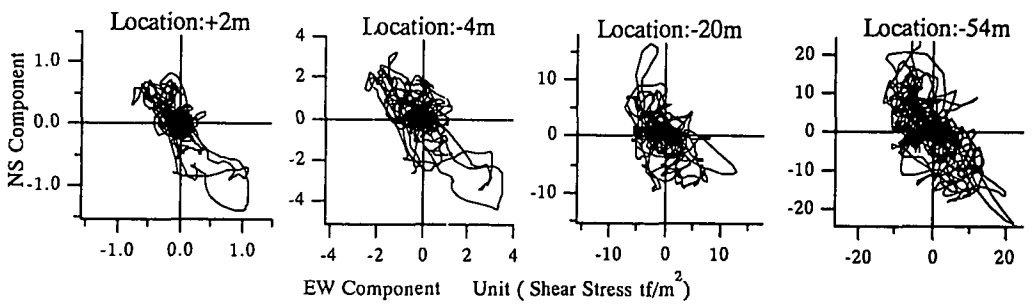


図-4 各深さにおけるせん断応力の水平面内の軌跡

#### 4. 推定された地盤の平均的なせん断ひずみ

地盤に生じたせん断ひずみは、隣接するアレーデータ間の相対変位を地点間の長さで除すことによって求めた。すなわち、今回のアレー観測の条件から、深さ-79mまでの地盤を観測地点で区切られた3区間に分割し、各区間での平均的なせん断ひずみとして推定した。ただし、このとき観測地点間でのせん断変形が一様であると仮定していることから、この仮定が大きく崩れるような波長の短い波（振動数が高い波）による変形は抽出できないことになる。したがって、ここでは表1で示した各区間の収束した平均的なせん断波速度を参考にして、ひずみを求める際の信頼できる最高振動数を表1右端のように決定した。この振動数は、ある波長を持った正弦波がある波速で進むとき、ひずみを直線近似した場合と真値との誤差が1割以下になる条件から求めたものである。したがって、以下に示すひずみは、加速度波形を積分する際の最低振動数からここで言う最高振動数までの

バンドパスフィルターを通ったものである。なお、1.2Hzのローパスフィルターを用いて各深さの最大加速度・速度・変位を算定すると表-2のようになる。加速度の最大値は、フィルターによる低下が大きい、速度と変位の最大値は変化が少ないことから、本解析で用いた振動数区間に今回の地震の主な振動数成分が含まれていると考えてもよいものと思われる。なお、応力は加速度の影響が大きいと考えられるので、ひずみとの関係を議論する場合には応力にも上記のフィルターをかけて処理している。

図-5は、各区間で求められた平均的なせん断ひずみの時刻歴を示したものである。最大ひずみの値は、-12m以深の地盤で0.1~0.3%、それより上部で1~2%となっている。この値を表1に示した等価線形解析で求められた最大せん断ひずみと比較すると、第1層目は2~3倍程度大きい、第2第3層はほぼ一致している。私見ながら、等価線形解析ではひずみが1%を越える付近から収束性の判定が甘くなるのが原因の一つと考えている。しかし、総じておおよそのひずみレベルは解析と整合するものである。また、同図には第1層目の水平面内のひずみの軌跡も示すが、卓越方向は応力のそれと一致している。

表-2 最大加速度・速度・変位

項目		KP-79m	KP-28m	KP-12m	KP+4.5m
上段：filter前					
下段：1.2Hzfilter後					
NS成分	加速度 (Gal)	679	544	564	341
		189	187	189	218
	速度(m/s)	67.2	64.7	74.8	87.9
		54.1	57.8	74.1	84.6
	変位(cm)	26.8	28.4	28.8	37.2
		26.9	29.5	32.2	40.9
EW成分	加速度 (Gal)	303	462	543	284
		77	187	189	218
	速度(m/s)	29.7	59.2	53.1	55.3
		24.1	47.1	48.0	51.2
	変位(cm)	11.5	25.1	24.2	29.2
		12.0	22.0	24.5	30.6

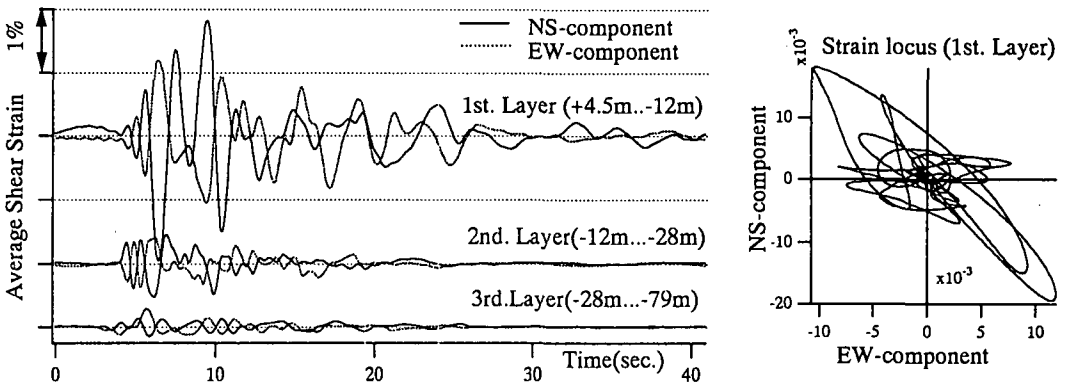


図-5 各層の平均的なせん断ひずみの時刻歴および第1層目の軌跡

#### 5. 地盤の応力-ひずみ関係の考察

以上、3.および4.で推定された応力とひずみの関係を用いて、各区間の履歴変形特性を描いたのが図-6である。なお、応力は各区間の中間点(-4m,-20m,-54m)で評価した。また、応力-ひずみ関係の非定常性をみ

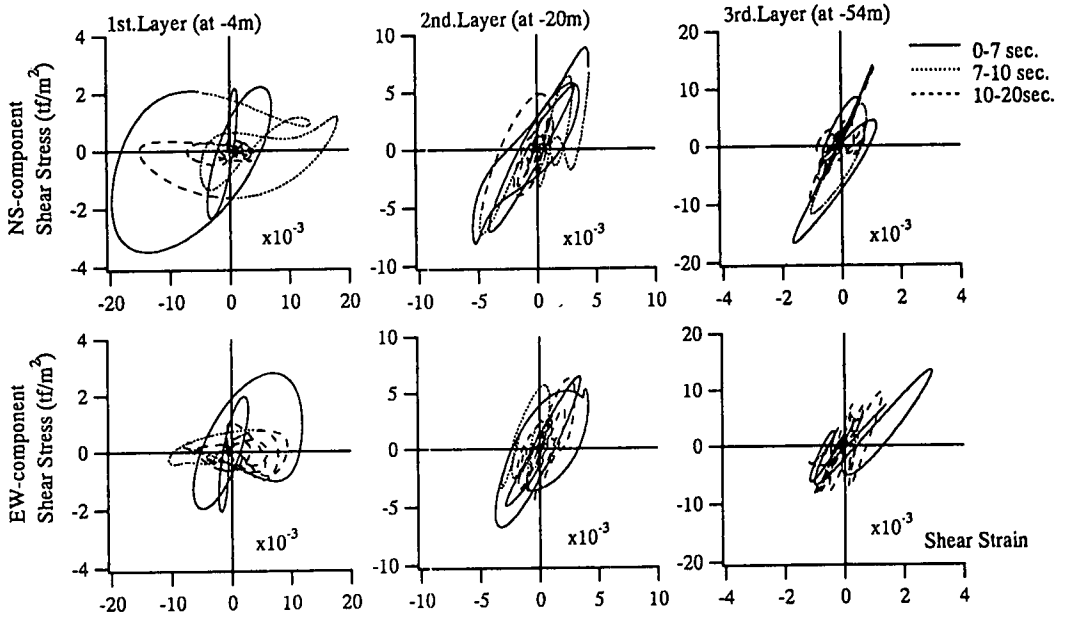


図-6 各層の応力ひずみ関係

表3 推定されたせん断剛性の比較

単位(tf/m <sup>2</sup> ) ( )内は初期剛性に対する割合を示す。	等価線形計算に用いた初期剛性	等価線形計算で収束した剛性	応力ひずみ関係から求めた割線剛性 :NS成分	応力ひずみ関係から求めた割線剛性 :EW成分
第1層(+4.5m~-12m)	約9000	250-3500(3-40%)	200-800(2-9%)	400-800(4-9%)
第2層(-12m~-28m)	約5300	3000-4000(57-75%)	2000(38%)	2000(38%)
第3層(-28m~-79m)	約20000	9000(45%)	7000-10000(35-50%)	7000-10000(35-50%)

ため、履歴を描く区間を3つに分割して示した。図から、履歴変形特性に非正常性が見られる。さらに、大きな割線合成を同図から読みとり、等価線形計算の結果も合わせて表3に示した。求められた剛性と等価線形解析で求められた収束剛性を比較すると、下層ほど計算値と良い一致が見られる。また、ひずみの増大に伴って低下した剛性の初期剛性に対する割合を示せば、第1層で2-9%、第2層で約40%、第3層で約35-50%程度となり表層の液状化層でかなりの非線形化が生じたと言える。

## 6. 結論

本研究では、兵庫県南部地震において神戸ポートアイランドで観測された鉛直アレー観測データを用いて、地盤に発生したと考えられるせん断応力とせん断ひずみを推定した。推定された最大せん断応力のオーダーは、液状化したと考えられる埋立砂質土層で概ね0.3~0.5、最大ひずみのオーダーは-12m以深の地盤で0.1~0.3%、それより上部で1~2%となった。また、ひずみのオーダーや履歴ループの傾きから得られる地盤剛性を、等価線形解析から得られるそれと比較した結果、-12m以深では良い一致が見られたが、-12m以浅では等価線形解析よりも大きな最大ひずみを推定した。これは、同地震において埋土層で大規模な液状化が生じた傍証と整合するものである。

なお、解析は地震動が鉛直下から伝播したと仮定して行ったが、概ねこの仮定に肯定的な結果がえられたと考える。今後も鉛直アレーデータを使って地盤に発生した応力・ひずみ関係を求めることが可能と考えるが、本来この目的でアレー観測をする場合には解析振動数を高くするため、より細かな間隔で観測する必要があることおよび、残留変形も観測の対象とするならば長周期側の計測精度をあげる努力の必要性が指摘できる。

参考文献 1) 田中祐人、稲富隆昌、飯塚栄寿：兵庫県南部地震による埋立地盤、コンテナ岸壁の地震応答解析、土木学会第50回年次学術講演会、投稿中、1995。 2) 風間基樹：遠心振動実験から求めた地盤の動的変形特性と増幅特性、土質工学会・軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集、pp.45-58、1994。 3) 埋立地の液状化対策ハンドブック、(財)沿岸開発技術研究センター、p.108、1993。