

鉛直アレー強震記録とその伝播特性 に関する解析的一考察

副田悦生¹・玉井秀喜²・仲津直之²・竹澤請一郎³・前川 太⁴・天野真輔⁵

¹正会員 工修 関西電力株式会社 総合技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺 3-11-20)

²正会員 関西電力株式会社 総合技術研究所 (〒661-0974 兵庫県尼崎市若王寺 3-11-20)

³正会員 株式会社ニュージェック 技術開発部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

⁴正会員 工修 株式会社ニュージェック 港湾・空港部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

⁵株式会社ニュージェック 港湾・空港部 (〒542-0082 大阪市中央区島之内 1-20-19)

1995年兵庫県南部地震の際に地震断層から西北に約35km離れた兵庫県高砂市の埋立地で、地表部で最大200Gal程度の鉛直アレー観測記録を得た。この記録について鉛直方向に伝播する地震特性を詳細に検討する目的で、動的な地盤調査を実施し、汎用的な1次元地震応答解析手法を適用した。

地震動の見かけの伝播速度や解析結果から、表層部の軟弱な土層が非線形性の強い挙動を示していたのに対し、その下部の硬質な土層が弾性的な挙動を示していることが明らかとなった。

Key Words : the Hyogo-ken Nambu earthquake, borehole array records, seismic response analysis, nonlinearity

1. まえがき

兵庫県南部地震の地震断層から西北に約35km離れた兵庫県高砂市埋立地の鉛直アレー観測点で、最大200Gal程度の観測記録を得た。

地震動の伝播特性は、地盤の動的な性質に影響を受ける。この性質を明らかにするため、地震後に鉛直アレー観測点の近傍で地盤調査を実施し、種々の1次元地震応答解析を適用した。また、観測記録より地震動の見かけの伝播速度を求め、地盤の非線形性について検討した。

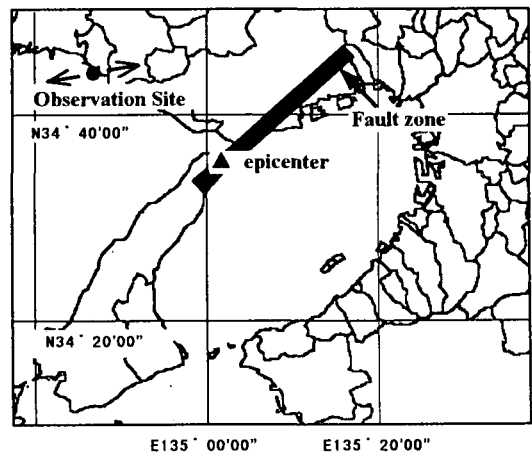


図-1 観測点位置図

2. 鉛直アレー観測記録

鉛直アレー観測は、図-1に示す兵庫県高砂市の埋立地に位置する関西電力高砂発電所構内に設置された地表面を含む3深度、3成分の加速度計により実施している。

地震計の設置深度は図-2に示すように、最深部

のGL-100mの地震計が洪積層の粘性土と砂質土の互層に、中間のGL-25mの地震計が洪積層最上部の砂礫層に設置されている。この砂礫層は、通常なら工学的基盤面となり得る層である。

図-3および図-4にEW成分の加速度時刻歴と

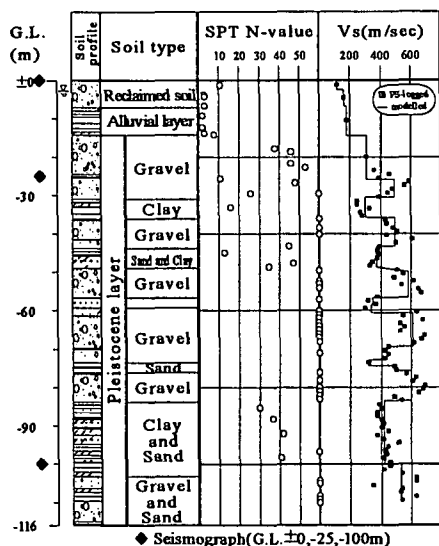


図-2 地震計設置深度

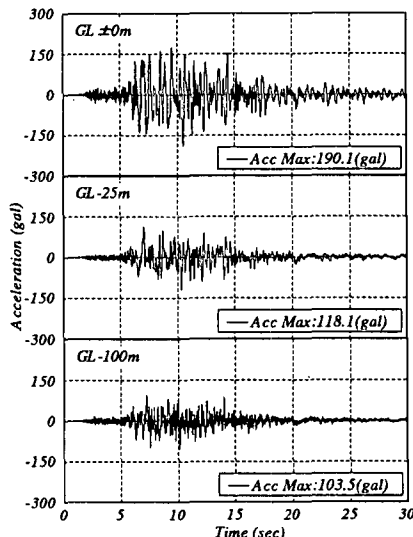


図-3 観測加速度波形(EW成分)

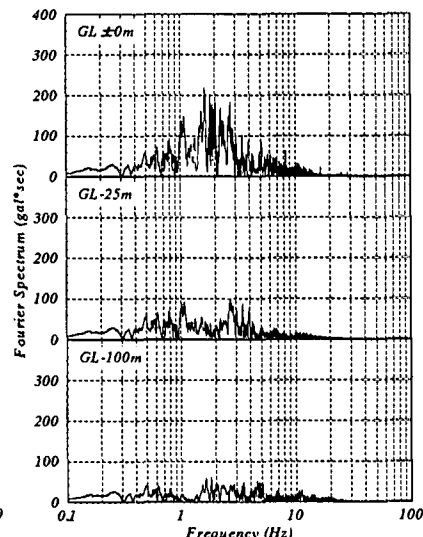


図-4 フーリエスペクトル(EW成分)

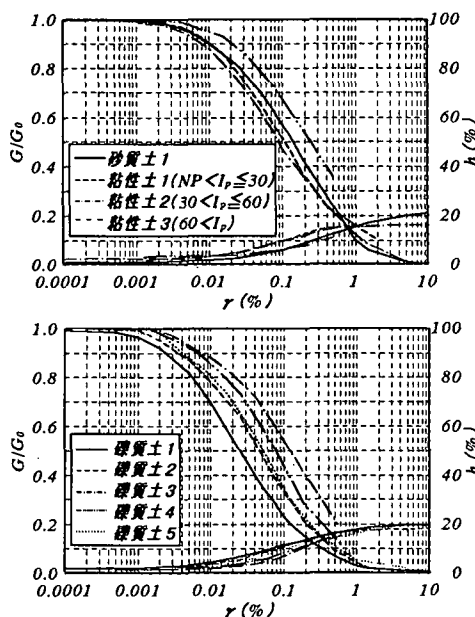


図-5 動的変形特性モデル

表-1 地盤モデル

	深度 GL (m)	層厚 (m)	密度 $\rho(t/m^3)$	せん断波速度 $V_s(m/s)$	タイプ
1	0~2.50	2.50	1.74	120	礫質土1
2	-2.50~-6.70	4.20	2.20	160	砂質土1
3	-6.70~-7.90	1.20	1.85	180	粘性土1
4	-7.90~-8.70	0.80	1.80		粘性土2
5	-8.70~-13.70	5.00	1.75		砂質土1
6	-13.70~-14.35	0.65	2.25	310	礫質土1
7	-14.35~-25.25	10.90	2.25		粘性土2
8	-25.25~-25.90	0.65	2.27		礫質土1
9	-25.90~-30.60	4.70	2.20	490	粘性土2
10	-30.60~-31.40	0.80	2.18	300	砂質土1
11	-31.40~-32.00	0.60	2.00		粘性土2
12	-32.00~-35.00	3.00	1.83~1.98		粘性土3
13	-35.00~-35.75	0.75	1.90	490	礫質土2
14	-35.75~-36.75	1.00	2.00~2.13		粘性土2
15	-36.75~-40.80	4.05	1.74		礫質土2
16	-40.80~-41.05	0.25	2.05~2.14	370	粘性土1
17	-41.05~-43.30	2.25	2.05		粘性土2
18	-43.30~-44.15	0.85	1.96		砂質土1
19	-44.15~-45.70	1.55	2.01	580	礫質土2
20	-45.70~-48.95	3.25	2.05~2.10		礫質土3
21	-48.95~-56.75	7.80	2.00	350	礫質土4
22	-56.75~-58.70	1.95	2.00	340	砂質土1
23	-58.70~-60.70	2.00	2.00~2.10	810	礫質土4
24	-60.70~-69.50	8.80	1.92	440	砂質土1
25	-69.50~-70.30	0.80	2.05	320	粘性土2
26	-70.30~-72.90	2.60	1.86		粘性土2
27	-72.90~-75.80	2.90	2.08	490	粘性土5
28	-75.80~-83.50	7.70	2.10	600	粘性土2
29	-83.50~-83.70	0.20	2.10	420	礫質土5
30	-83.70~-84.40	0.70	2.10		粘性土2
31	-84.40~-87.50	3.10	2.00		砂質土1
32	-87.50~-89.10	1.60	1.97	420	粘性土2
33	-89.10~-89.85	0.75	1.99		礫質土5
34	-89.85~-90.10	0.25	1.99		砂質土1
35	-90.10~-94.30	4.20	1.96	420	礫質土5
36	-94.30~-95.40	1.10	1.96		砂質土1
37	-95.40~-97.45	2.05	2.00		粘性土2
38	-97.45~-98.70	1.25	2.00	420	砂質土1
39	-98.70~-98.90	0.20	2.00		粘性土2
40	-98.90~-101.5	2.60	2.00		

フーリエスペクトルを示す。これらのデータは、AD変換により 0.005sec の時間ピッチでデジタル化して求めたものである。地震動の主要動部は図-3でみる限り、6~14sec の8秒程度の継続時間であり、その波数は 10 波以上と判断される。また図-4から、地表面では 1~3Hz 程度の周波数成分が大きい、深部では異なった特徴を示している。

3. 地盤調査

地震計の近傍で実施した地盤調査では、図-2に示した N 値分布や S 波速度 V_s 分布を得ている。GL-15m より深部の洪積層はかなり硬質で、 V_s で 300m/s 以上となっている。表層部の埋立層および沖積層は深部になるにつれて V_s が 100m/s から

200m/s 程度まで漸増している。

また各層ではチューブサンプリングによる不攪乱試料を用いて動的変形試験を実施した。図-5は各土質材料に対し、試験データを分類して動的変形特性をモデル化した結果である。なお動的変形特性は、粘性土が塑性指数 I_p から3種類、砂質土が1種類および砂礫が深度により5種類に分類した。

4. 1次元地震応答解析

1次元地震応答解析は、適用事例の最も多い等価

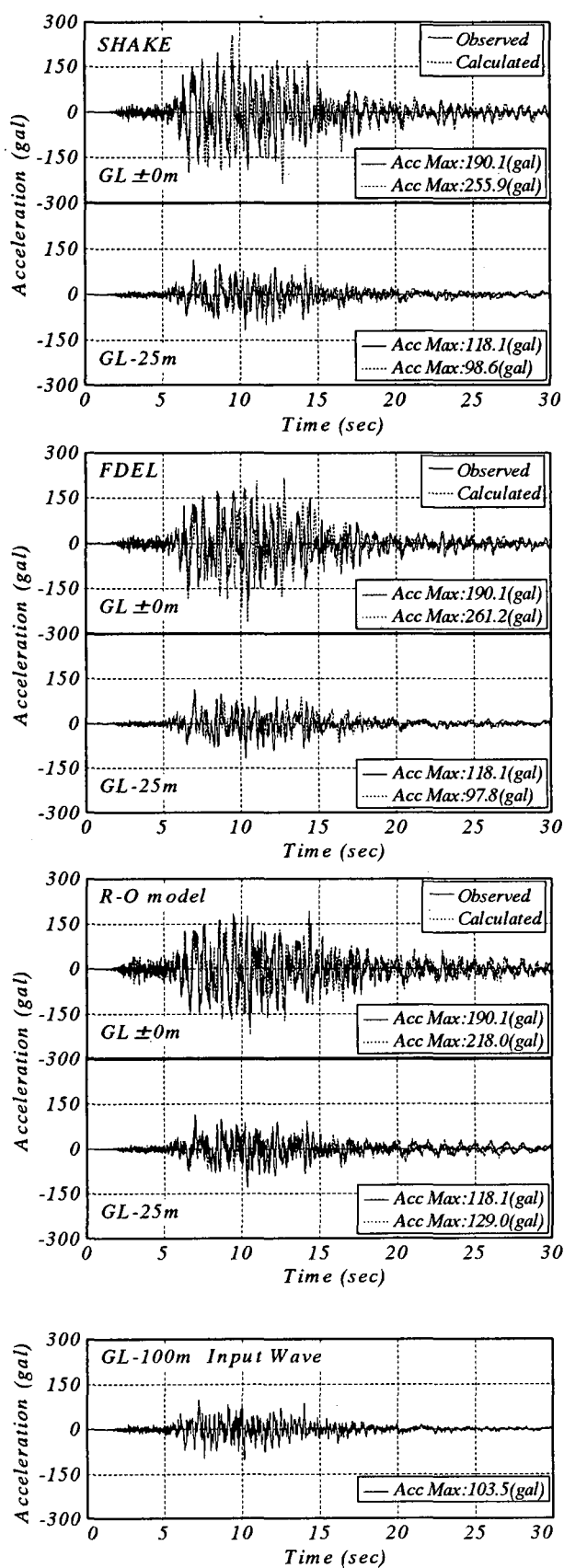


図-6 解析結果の加速度時刻歴

線形解析(SHAKE)¹⁾, 杉戸らが提案した周波数依存性を考慮した等価線形解析(FDEL)²⁾および非線形解析を実施した。

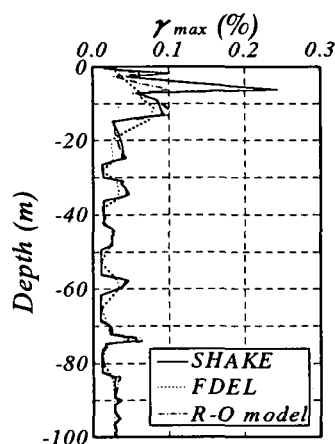


図-7 最大せん断ひずみの深度分布

地盤モデルは表-1に示すように40層に分割し、動的変形特性は図-5に示したデータに合わせるように設定した。

図-6にGL-100mの観測波形を入力波形とした解析結果の加速度時刻歴を観測結果と比較して示す。なお、非線形解析は修正 Ramberg-Osgood モデル (以下 R-O モデルと呼ぶ)³⁾を用いた。地表面での主要動部の応答は、SHAKE および FDEL の結果が大きく推定し、最大加速度の再現性は非線形解析が最も良く、最大加速度の出現時間もほぼ再現できている。一方 GL-25m の加速度時刻歴では、解析手法による再現性に大きな差がない。図-7に示す最大せん断ひずみの深度分布によると、GL-15m 程度より深部のせん断ひずみが 10~20%程度で解析の差異が小さく、比較的弾性的な応答と考えられ、GL-15m より上部ではせん断ひずみが大きくなり、非線形的な応答となっているのが原因と考えられる。

図-8に各解析結果のフーリエスペクトルを比較して示す。スペクトルによる比較でも、GL-25m では、解析手法による差は小さいが、地表面では手法により異なった特徴を示すようである。したがって、GL-15m より上部の地盤では、地震時に非線形的な挙動を示していたと推察される。

5. 考 察

観測波形からも地盤の非線形性の評価が可能である。ここでは、田村らが行った方法⁴⁾に従い、各測点間の相互相関係数が最大となる時間ずれを推定することで、地震動の見かけの伝播速度を求めた。

図-9は時間ずれを求める区間長を1秒間として見かけの伝播速度を推定した結果を加速度時刻歴と比較して示している。図中には PS 検層結果から推定される各測点間の平均的な S 波速度も示している。見かけの伝播速度は少しばらつきはあるが、ある傾

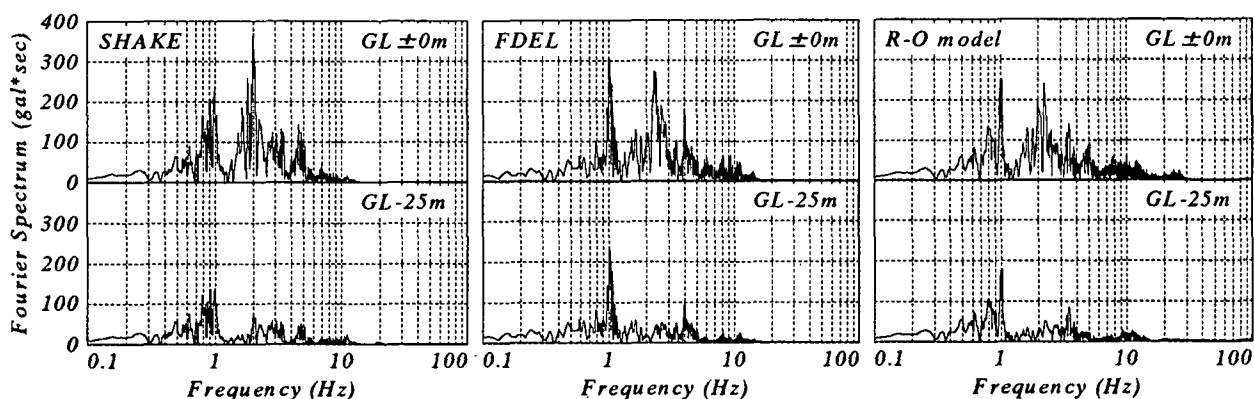


図-8 解析結果のフーリエスペクトル

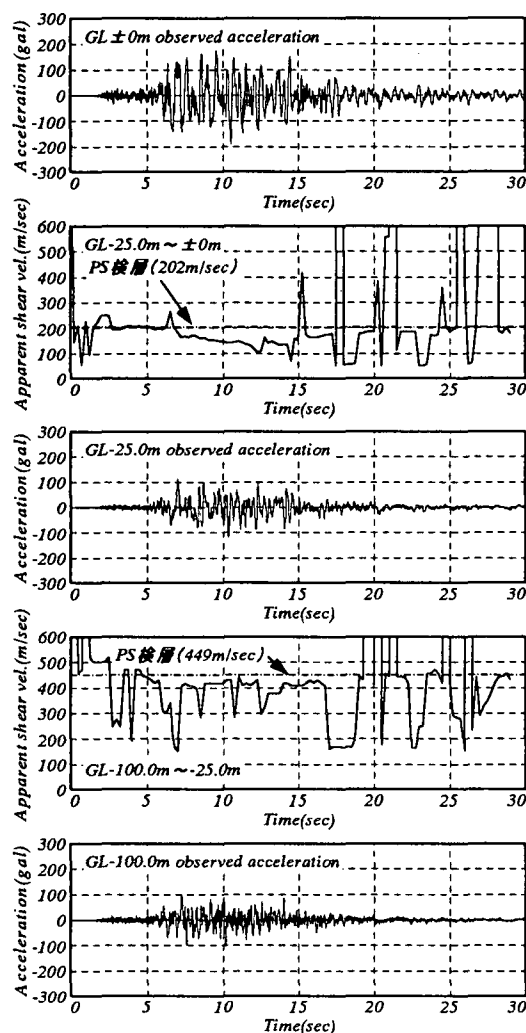


図-9 見かけの伝播速度の推定結果

向が認められる。すなわち、主要動が始まる 6sec より前の見かけの伝播速度は、GL-100~GL-25m 間および GL-25m~地表面間ともに、PS 検層で得られた平均 S 波速度とほぼ同じ値を示す。6~14sec の主要動部に入ると、下部の測点間で速度が 90%程度の低下を示しているに対し、上部の測点間では速度が時間とともに徐々に低下し、最大 50%程度の低下を示している。せん断弾性係数 G と S 波速度 V_s

が以下の理論式 (ρ は質量密度)

$$G = \rho \cdot V_s^2$$

に従うとすると、下部の測点間のせん断弾性係数は平均的に 80%程度、上部の測点間のせん断弾性係数は平均的に 20~30%程度まで、初期接線せん断弾性係数 G_0 より低下していることになる。このことから下部層では弾性的な応答であり、上部層では非線形的な応答を示しているものと推定できる。なお、主要動後の見かけの伝播速度挙動については現在検討中である。

6. まとめ

兵庫県南部地震の鉛直アレー観測記録から地盤の非線形性について検討した結果、表層部の比較的軟弱な層では非線形的な応答が卓越し、下部の硬質な層では弾性的な応答を示していることが明らかとなった。

参考文献

- 1) Schnabel, P.B., J. Lysmer and H.B. Seed: SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Site Report No. EERC 72-12 University of California, 1972.
- 2) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集 No. 493/III-27, pp. 49-58, 1994.6.
- 3) 例えば, 龍岡文夫: 新体系土木工学 18 土の力学(III) 3.4 土の動的変形特性の履歴モデル化, pp. 244~250, 技報堂出版, 1981.
- 4) 田村重四郎, 鄭志誠: 兵庫県南部地震におけるポートアイランドでの鉛直アレー記録による地震波の伝播性状に関する研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会概要集 I-B, pp. 606-607, 1997.