

鉛直アレー記録による非線形解析法 適用性についての一考察

副田 悦生¹・玉井 秀喜²・田中 昌廣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)

表層地盤の地震応答を精度良く評価することは耐震設計上重要な課題である。逐次積分型の非線形解析法は、時々刻々の地盤剛性の変化を表現できる点で等価線形解析法などに比べれば精度の高い解析法と考えられ、近年は多くの解析法が提案されている。非線形解析の場合、応力～ひずみ関係の骨格曲線や履歴減衰に関する解析パラメータは、動的変形試験結果から設定されることが多い。ここでは、3地点で観測された地震動レベルの異なる鉛直アレー観測記録に対して、動的変形試験結果から解析パラメータを設定した非線形解析を実施し、等価線形解析と比較する。

Key Words : non-linear model, equivalent linear model, vertical seismic array record

1. はじめに

兵庫県南部地震の際に図-1に示すように、地震断層に対して、様々な方向や距離で鉛直アレー観測記録を得た。震源断層からの距離は、SGK 地点、TKS 地点、KNK 地点でそれぞれ約 15km, 35km, 65km である。これらの記録は当然ながら距離が近いほど最大加速度が大きく、それぞれの記録が異なった地震動レベルとして取り扱って良いものと考えられる。

これらの記録に対し、統一した視点で地震応答解析を実施することは、地盤の非線形応答を種々のひずみレベルについて考える上で意義のあるものと考えられる。ここでは、等価線形解析と非線形解析 (Ramberg-Osgood モデル、以下 R-O モデルとする) を適用した結果を示す。

なお、地盤に関するパラメータは、対象地点の地盤調査結果を反映したものである。

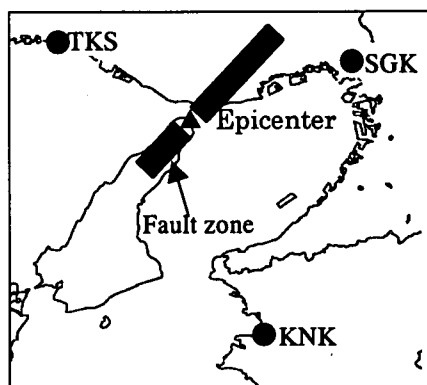


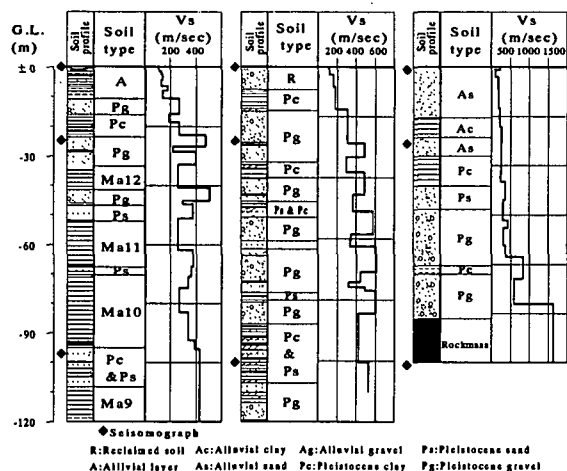
図-1 鉛直アレー観測点

地震計設置深度と合わせて示す。なお、せん断波速度については調査結果からモデル化したものである。図から明らかなように SGK 地点は粘土層が卓越する地盤であり、TKS 地点は砂礫層が卓越している。また、KNK 地点は基盤に $V_s=1600(\text{m/s})$ 程度の岩盤があり、土層構成も各地点で大きく異なっている。

SGK 地点と TKS 地点で実施した土質調査では、不攪乱試料を採取して動的変形特性試験を行った。従来よく言われているように、粘土層は塑性指数、砂

2. 対象地点の土層構成と地盤解析モデル

図-2に各地点の土層構成、せん断波速度分布を



(a)SGK 地点 (b)TKS 地点 (c)KNK 地点

図-2 鉛直アレー観測点の地盤構成

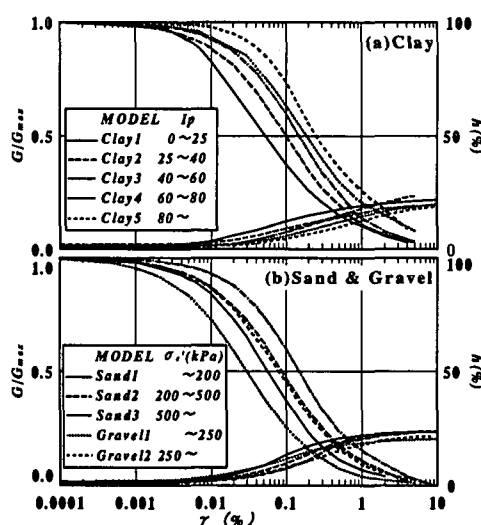


図-3 動的変形特性

層や砂礫層は拘束圧もしくは深度で分類すると、動的変形特性の差異が小さくなることが確認できたので、図-3に示すように合計10種類(粘土5種類、砂3種類、砂礫2種類)に分け、実験結果の平均的な動的変形モデルを作成した。等価線形解析(解析プログラムは、「SHAKE」)に用いる動的変形特性は、図-3に示すものである。

R-Oモデルの骨格曲線は、式(1)で示される。

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \alpha \left| \tau / \tau_f \right|^\beta} \quad (1)$$

ここに、 $G_{\max}$ は初期せん断剛性、 τ_f はせん断強度、 γ_f は基準ひずみ、 α および β はモデルパラメータであり、 $\tau_f = G_{\max} \cdot \gamma_f$ で与えられる。

また Masing 則により、履歴減衰は次式となる。

$$h = \frac{2}{\pi} \frac{\beta}{\beta + 2} \left(1 - \frac{G}{G_{\max}} \right) \quad (2)$$

等価な最大減衰定数 $h_{\max}$ は次式で示され、モデルパ

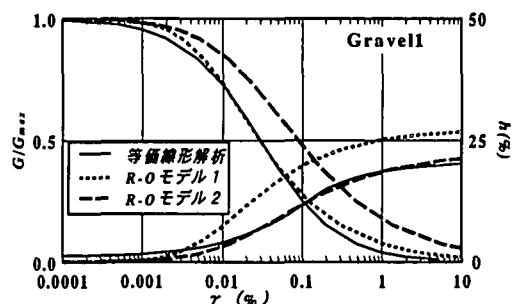


図-4 R-Oモデルフィッティング例

表-1 R-Oモデルパラメータ

Model	R-Oモデル1 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係にフィッティング			R-Oモデル2 $h \sim \gamma$ 関係にフィッティング		
	γ_r	α	β	γ_r	α	β
Clay1	0.00055	2.64	1.3	0.00055	1.7	1.1
Clay2	0.00100	2.50	1.4	0.00100	1.0	1.3
Clay3	0.00150	2.67	1.4	0.00150	1.3	1.1
Clay4	0.00185	2.78	1.4	0.00185	1.0	1.1
Clay5	0.00250	2.60	1.6	0.00250	1.0	1.05
Sand1	0.00060	2.83	1.4	0.00060	1.5	1.4
Sand2	0.00090	2.89	1.4	0.00090	1.2	1.4
Sand3	0.00150	2.67	1.4	0.00150	1.3	1.4
Gravel1	0.00030	3.00	1.5	0.00030	0.7	1.1
Gravel2	0.00080	2.38	1.4	0.00080	0.8	1.25

ラメータ β に左右される。

$$h_{\max} = \frac{2}{\pi} \frac{\beta}{\beta + 2} \quad (3)$$

R-Oモデルのモデル化については、図-3に示した $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係にフィッティングを行ったが、図-4に示す典型例のように $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係に合わせると h を大きく評価し、 $h \sim \gamma$ 関係に合わせると剛性が低下しにくい評価となったため、2種類のモデルを設定した。なお、他の動的変形特性についても全く同じ傾向であった。表-1に設定した2種類のR-Oモデルのパラメータを示す。

なお、最近の研究では、このような $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係のどちらにも良く一致する非線形解析モデルを検討されているものが多い^{1),2)}。

3. 解析結果

解析は、最深度位置での観測加速度を入力加速度として、地中および地表面の応答加速度を算出する。表-2に各地点の解析地盤モデルを示す。

図-5に解析で得られた加速度時刻歴を観測と比較して示す。SGK 地点およびTKS 地点の地震後半部に観測に比べて解析が遅れているところがある。これは、表面波等の影響が考えられるが明らかでない。表-3に加速度時刻歴に対して解析値と観測値の差の2乗和平均平方根値(RMS)を観測最大加速度で正規化した値で一致度を評価した結果を示す。なお、

表-2 解析地盤モデル

(a)SGK 地点

No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	動的変形 モデル
1	0.0 ~ 1.40	1.4	2.00	110	Gravel1
2	1.4 ~ 2.60	1.2		130	Clay1
3	2.6 ~ 4.35	1.75	1.95	140	Sand1
4	4.4 ~ 6.55	2.2	2.00	130	
5	6.6 ~ 8.10	1.55	2.05	180	Gravel1
6	8.1 ~ 10.60	2.5	1.80	140	Clay2
7	10.6 ~ 15.90	1.8	2.10	270	Gravel1
8	15.9 ~ 18.80	1.45	1.65	190	Clay4
9	18.8 ~ 23.10	1.3	2.00	270	Clay1
10	23.1 ~ 28.90	1.9		480	Gravel2
11	28.9 ~ 28.70	1.8	1.75	220	Clay3
12	28.7 ~ 33.05	1.35	2.20	400	Sand2
13	33.1 ~ 35.80	1.35	1.80		Clay3
14	35.8 ~ 40.95	1.75		260	Clay2
15	41.0 ~ 45.40	1.45	2.15	510	Gravel2
16	45.4 ~ 48.55	1.15	1.70	300	Clay3
17	48.6 ~ 51.30	1.55	2.05	380	Sand2
18	51.3 ~ 62.00	1.6	1.50	260	Clay5
19	62.0 ~ 67.60	1.9	1.85	380	Clay2
20	67.6 ~ 70.95	1.7	1.95	380	Clay2
21	71.0 ~ 74.80	1.9	1.70	340	Clay2
22	74.8 ~ 83.00	2.1		270	Clay4
23	83.0 ~ 92.60	2.4	1.55	340	Clay5
24	92.6 ~ 95.50	1.45	1.95	390	Clay2
25	95.5 ~ 97.00	1.5	2.00	430	Sand3

(b)TKS 地点

No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	動的変形 モデル
1	0.0 ~ 1.250	1.25	1.74	120	Gravel1
2	1.3 ~ 2.5	1.25			
3	2.5 ~ 6.7	4.20	2.20	180	
4	6.7 ~ 7.9	1.20	1.85		
5	7.9 ~ 13.7	5.80	1.75~1.80	180	Clay2
6	13.7 ~ 14.35	0.65	2.25		Sand1
7	14.4 ~ 25.2	10.89	2.20	310	Gravel1
8	25.2 ~ 25.9	0.65			Clay2
9	25.9 ~ 30.6	4.70	2.18	490	Gravel1
10	30.6 ~ 31.4	0.80	2.00	300	Clay3
11	31.4 ~ 32.0	0.60			Sand2
12	32.0 ~ 35.0	3.00	1.83~1.99		Clay2
13	35.0 ~ 35.7	0.75	1.90		Clay4
14	35.7 ~ 43.3	7.55	2.00~2.13	490	Gravel2
15	43.3 ~ 44.1	0.85	2.05	370	Clay1
16	44.1 ~ 44.9	0.77	1.96		Clay2
17	44.9 ~ 48.9	4.01	2.01	580	Sand2
18	48.9 ~ 56.7	7.78	2.05~2.10		Gravel2
19	56.7 ~ 58.7	1.95	2.00	350	
20	58.7 ~ 60.7	2.00		340	
21	60.7 ~ 69.5	8.89	2.00~2.10	610	
22	69.5 ~ 70.3	0.80	1.92	440	Sand2
23	70.3 ~ 71.6	1.30	2.05		Gravel2
24	71.6 ~ 72.9	1.30			
25	72.9 ~ 74.5	1.60	320	Clay3	
26	74.5 ~ 75.8	1.30		2.08	490
27	75.8 ~ 83.5	7.68	2.10	600	Gravel2
28	83.5 ~ 84.4	0.90	2.10		
29	84.4 ~ 87.5	3.10	2.00	420	Clay2
30	87.5 ~ 89.1	1.60	1.97		Sand3
31	89.1 ~ 89.9	0.75	1.99		Clay2
32	89.9 ~ 90.1	0.25			Gravel2
33	90.1 ~ 94.3	4.20	1.96	420	Sand3
34	94.3 ~ 95.4	1.10			Gravel2
35	95.4 ~ 97.5	2.05	2.00		Sand3
36	97.5 ~ 98.7	1.25			Clay2
37	98.7 ~ 98.9	0.20		Sand3	
38	98.9 ~ 100.0	1.10		Clay2	

誤差を求めた区間は、SGK、TKS 地点については、主要動部および解析開始から前述の解析が観測に遅れ始める時間までの2区間で求めている。KNK 地点については地震動レベルが小さく主要動が明確でなかったため全解析時間で誤差を求めている。KNK 地点は、どの解析手法でも大差ない結果となっている。これは、地震動レベルが小さかったため解析手法の差異が生じなかったためと考えられる。TKS 地点については、まず誤差が他の2地点に比べて大きいことがわかる。また、R-O モデル1が、最も誤差が小さく、等価線形解析と R-O モデル2の誤差は大差がない。地震動レベルが最も大きい SGK 地点は、R-

表-2 解析地盤モデル

(c)KNK 地点

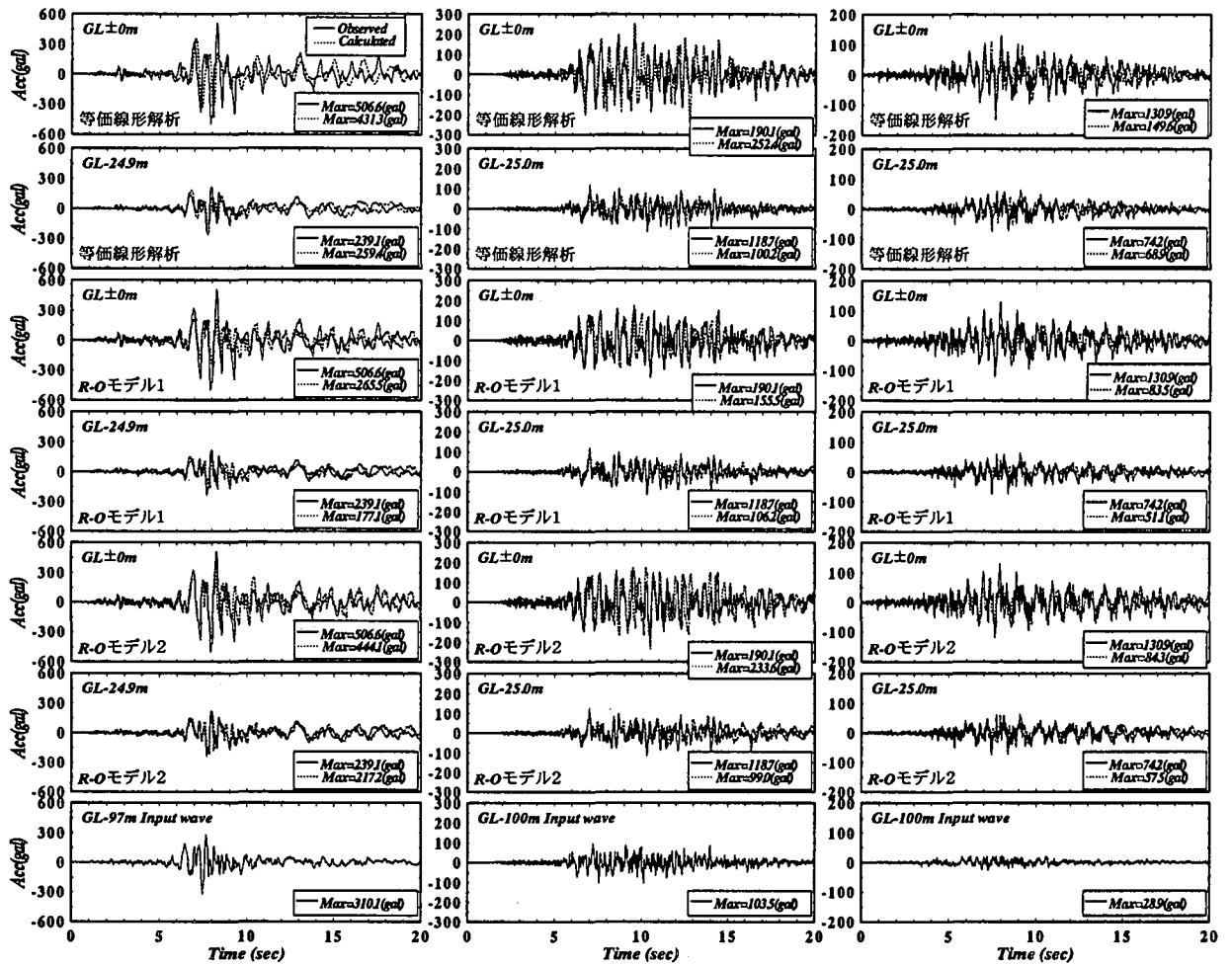
No.	深度 (m)	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	Vs (m/s)	動的変形 モデル
1	0.0 ~ 1.8	1.8	1.80	238	Sand1
2	1.8 ~ 2.2	0.4			
3	2.2 ~ 2.9	0.7	2.00	100	Clay3
4	2.9 ~ 3.8	0.9	1.70		
5	3.8 ~ 11.0	7.2	2.00	177	Sand1
6	11.0 ~ 17.0	6.0		180	
7	17.0 ~ 23.6	6.6	1.70	220	Clay2
8	23.6 ~ 27.0	3.4	2.00	270	Sand1
9	27.0 ~ 27.0	0.0			
10	27.0 ~ 30.0	3.0			
11	30.0 ~ 35.9	5.9	1.70	256	Clay3
12	35.9 ~ 37.1	1.2	2.00		Gravel2
13	37.1 ~ 38.3	1.2	1.70	244	Clay2
14	38.3 ~ 39.7	1.4	2.00		Gravel2
15	39.7 ~ 41.7	2.0		S2	
16	41.7 ~ 43.4	1.7	1.70	374	Clay2
17	43.4 ~ 46.9	3.5	2.00		Gravel2
18	46.9 ~ 50.7	3.8	1.70	312	Clay2
19	50.7 ~ 53.4	2.7	2.00		439
20	53.4 ~ 55.8	2.4			
21	55.8 ~ 57.5	1.7			
22	57.5 ~ 59.9	2.4	1.70	325	Sand2
23	59.9 ~ 61.0	1.1			Clay1
24	61.0 ~ 62.1	1.1	2.00	385	Clay4
25	62.1 ~ 66.5	4.4			Gravel2
26	66.5 ~ 69.5	3.0	1.70	830	Clay2
27	69.5 ~ 73.9	4.4	2.00		Gravel2
28	73.9 ~ 77.0	3.1	1.70	593	Clay2
29	77.0 ~ 83.5	6.5	2.00		Gravel2
30	83.5 ~ 100.0	16.5	2.20	1830	Linear

O モデル1と R-O モデル2の誤差は大差ないが等価線形解析に比べて非線形解析の誤差は小さく、その傾向は主要動部で顕著である。

図-6に、最大加速度および最大せん断ひずみの深度分布図を示す。図より、R-O モデル1の結果は、いずれの地点においても最大加速度を小さく予測していることが分かる。このことは、履歴減衰を大きく評価すると、加速度を小さく予測してしまうことを示しており、最大加速度に着目すると履歴減衰が大きくなるモデル化には、問題があると考えられる。また、図より履歴減衰の評価が実験結果に近い等価線形解析と R-O モデル2が最大加速度、最大ひずみのいずれも同じような分布傾向を示していることがわかる。

4. おわりに

今回の結果においては、等価線形解析に比べて非線形解析が飛躍的に高い精度の結果を与えているようには見受けられない。これは、実験から設定された $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係を同時に満足するパラメータ設定が困難であったためと考えられる。ただし、SGK 地点に対しては、そのようなパラメータ設定ができて、最大加速度を予測することは困難であることが予測される。しかしながら、 $G/G_{max} \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係を同時に満たす応力ひずみ関係を規定できれば、解析精度が向上すると考えられ、そのような手法の確立が望まれる。



(a)SGK 地点(EW)

(b)TKS 地点(EW)

(c)KNK 地点(EW)

図-5 解析結果 加速度時刻歴

表-3 解析誤差

地点		全体				主要動部			
		等価線形解析	R-Oモデル1	R-Oモデル2	区間	等価線形解析	R-Oモデル1	R-Oモデル2	区間
SGK	GL	0.215	0.180	0.190	0~16sec	0.393	0.278	0.288	6~9sec
	GL-24.9m	0.194	0.161	0.141		0.294	0.231	0.203	
TKS	GL	0.314	0.266	0.331	0~18sec	0.412	0.349	0.435	6~15sec
	GL-25m	0.230	0.208	0.237		0.307	0.269	0.295	
KNK	GL	0.225	0.211	0.225	0~20sec				
	GL-25m	0.215	0.192	0.198					

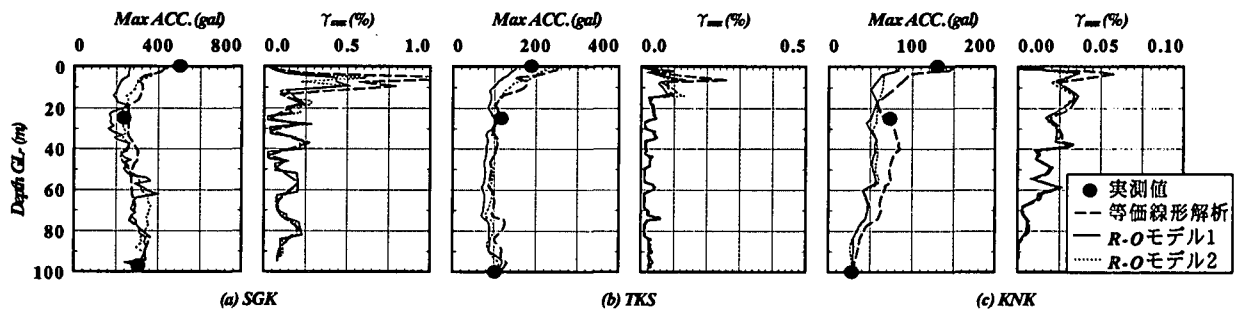


図-6 解析結果 深度分布図

参考文献

- 西村昭彦, 室野剛隆: GHE モデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.309-312, 土木学会, 1999.7.
- 上田稔他: 兵庫県南部地震のポートアイランドにおける地盤地震応答の全応力解析によるシミュレーション, 第 25 回地震工学研究発表会講演論文集, pp.325-328, 土木学会, 1999.7.