

兵庫県南部地震における鉛直アレー強震記録に基づく 地震動非線形増幅特性と地盤震動解析法の検討

NKK 関口宏二* , 岐阜大学 杉戸真太** , 岐阜大学 岡二三生**
岐阜大学 八嶋 厚** , 大成建設 田口洋輔*** , 関西電力 加藤要一****

兵庫県南部地震の際に得られた4地点の鉛直アレー観測記録に基づき、①地震計の設置誤差、②地震動の地盤内増幅・減衰特性、③周波数依存型等価線形化手法、および有効応力に基づく3次元液状化解析手法の適用性、について検討した結果について議論する。なお、今回用いたアレー観測記録は、a)神戸市内の人工島、b)尼崎市内の自然堆積地盤、c)高砂市内の埋立地盤および d)海南市の埋立地盤にて観測されたものである。

1. 緒言

兵庫県南部地震においていくつかの貴重な鉛直アレー記録が得られている。それらは、(a)表層部分が液化した地盤¹⁾、(b)湾岸部の埋立地盤、(c)比較的堅固な地盤というように、条件の異なる地盤での記録であり、地震動の非線形性を含む増幅特性を検討する上できわめて重要な記録である。本研究では、まず、通常のアレー観測記録に含まれていることの多い地中地震計の観測方向の設置誤差^{2), 3), 4)}について検討した結果を示す。つぎに、設置誤差を補正したアレー記録を用いて、地震動の非線形増幅特性を検討するとともに、著者らがこれまで独自に開発してきた(a)周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤応答解析法^{7), 8)}および(b)二相混合体理論を用いた有効応力解析法⁹⁾を適用し、手法の解析精度などを検討する。

2. 鉛直アレー観測記録の方向補正と増幅特性

(1) アレー観測地点

本研究では、下記の4地点 (Fig.1 (a),(b)参照) にて得られたボアホール型加速度計による鉛直アレー観測記録について検討する。なお、これらの地点の震央距離は、それぞれ、21 km(PI), 43 km(TRC), 53 km

(KPS), 26 km(TPS)であり、地盤の速度構造などは Table 1 に示す通りである。

PI : 神戸市開発局、ポートアイランド (神戸市)

TRC: 関西電力、総合技術研究所 (尼崎市)

KPS: 関西電力、海南港変電所 (海南市)

TPS: 関西電力、高砂発電所 (高砂市)

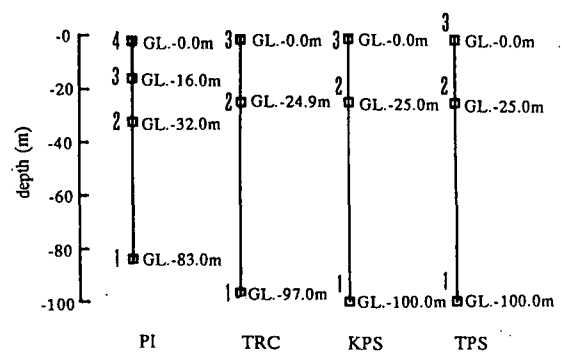
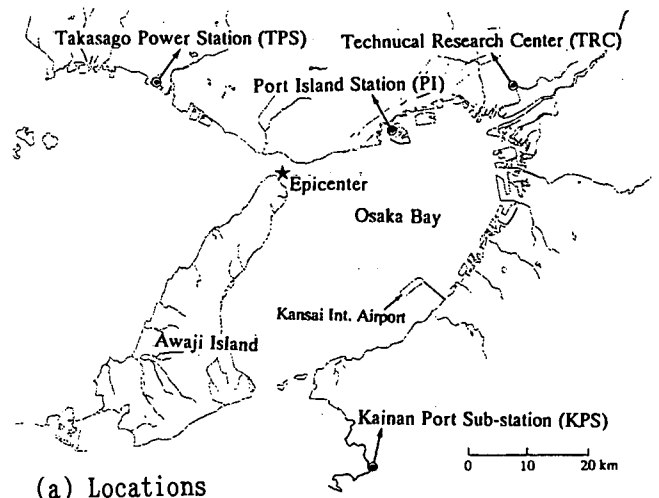


Fig.1 Location and layout of borehole array observation stations

キーワード：アレー記録、等価線形解析、液状化解析

* NKK基盤技術研究所, 044-322-6220

** 岐阜大学工学部, 058-293-2420; 2416; 2419

*** 大成建設土木設計計画部, 03-5381-5289

**** 関西電力総合技術研究所, 06-494-9815

Table 1 Velocity structure model for borehole array stations

(a) Port Island (PI)				(b) Technical Research Center (TRC)				(c) Kainan Port Sub-station (KPS)				(d) Takasago Power Station (TPS)			
thickness (m)	density (g/cm ³)	Vs (m/sec)	soil type*	thickness (m)	density (g/cm ³)	Vs (m/sec)	soil type*	thickness (m)	density (g/cm ³)	Vs (m/sec)	soil type*	thickness (m)	density (g/cm ³)	Vs (m/sec)	soil type*
2.0	1.9	170.0	3	2.0	1.4	98.0	1	1.8	1.6	238.0	3	3.40	1.7	140.0	4
3.0	1.9	170.0	3	1.0	1.4	117.0	2	2.0	1.6	100.0	2	3.75	1.7	130.0	2
7.5	1.9	210.0	3	4.0	1.7	117.0	4	13.2	1.7	179.0	3	6.25	1.6	200.0	1
6.5	1.9	210.0	3	1.0	1.7	149.0	3	6.5	1.6	220.0	2	5.60	1.9	310.0	4
8.0	1.6	180.0	2	3.0	1.6	149.0	2	1.9	1.7	270.0	3	6.00	1.9	400.0	4
6.0	1.9	245.0	3	6.0	2.0	342.0	4	4.6	1.7	188.0	3	5.05	1.8	330.0	4
17.0	1.9	305.0	3	1.0	2.0	222.0	1	7.1	1.6	216.0	1	2.95	1.7	230.0	1
11.0	1.9	350.0	3	2.0	2.0	154.0	3	2.6	1.7	206.0	3	4.00	1.7	320.0	1
18.0	1.6	303.0	2	10.0	2.0	400.0	1	7.2	1.7	315.0	3	6.70	1.9	560.0	4
4.0	1.9	320.0	3	3.0	2.0	375.0	4	6.5	1.6	263.0	2	4.80	1.8	250.0	3
	1.9	320.0	3	6.0	1.7	375.0	1	2.4	1.8	370.0	4	11.80	1.9	405.0	4
				3.0	1.7	231.0	1	5.2	1.7	274.0	2	13.20	1.9	650.0	3
				3.0	2.0	286.0	4	5.5	1.8	325.0	3	9.80	1.9	500.0	4
				7.0	2.0	255.0	3	7.4	1.8	700.0	4	16.70	1.8	460.0	1
				2.0	2.0	222.0	3	9.6	1.7	338.0	4		1.8	460.0	1
				4.0	2.0	177.0	1	16.5	2.7	1630.0	5				
				2.0	2.0	222.0	1		2.7	1630.0	5				
				7.0	2.0	389.0	1								
				7.0	2.0	333.0	1								
				20.0	2.0	303.0	1								
				3.0	2.0	455.0	1								
				0	2.0	455.0	1								

*soil type : 1=clay, 2=silt, 3=sand, 4=gravel, 5=rock

(2) アレー観測記録の方向補正

ボアホール型加速度計による鉛直アレー観測記録を利用する際には、地震計埋設時の設置方向誤差を補正することはきわめて重要である。^{2), 3), 4)} 本研究では、NS-EW 平面上の変位軌跡を多くの時間帯で比較する方法^{2), 3)}により、4地点の設置誤差を Table 2 のように検出した。なお、参考のためにこの表には著者らが過去に検出した設置誤差も含めた。これらのうち、TRC3(GL.-0.0m)の NS 成分および KPS3(GL.-0.0m)の E W 成分は、設置誤差というよりも極性が異なるケースである。このような間違いは、NS-EW 平面、および NS-UD 平面上の変位軌跡を目視により比較するより他に適当な検出方法が無いと思われる。

方向補正前後の KPS および TPS 地点の変位軌跡を Fig.2 および Fig.3 に示す。なお、加速度記録から変位記録を計算するために FFT による積分を行った。また、本研究で扱った全記録の処理にあたって、有効な周波数範囲が 0.15 - 20 Hz で、0.1 Hz 以下および 25 Hz以上を不通過とする台形のデジタルフィルターを使用した。KPS 地点の記録のみ、このフィルターでは方向誤差を検出できなかったため、より狭い帯域(0.15~0.5 Hz)のフィルターを使用した。

Table 2 Summary of orientation error of buried seismometers

accelerograph ID	depth GL.(m)	error* (deg.)	Reference
A-6	- 17	10	Ohishi(1984)
A-5	- 50	36	"
FGA3	- 1	- 17	Kamata(1987)
YGA1	- 48	30	"
MGA1	- 48	- 14	"
PI1	- 83	22	present study
TRC3	- 0	180**	present study
TRC1	- 97	46	present study
TPS2	- 25	- 20	present study
TPS1	- 100	16	present study
KPS3	- 0	180***	present study
KPS2	- 25	67	present study
KPS1	- 100	46	present study

notations

PI : Port Island Borehole Array Station, Kobe City Development Bureau

TRC : Technical Research Center, Kansai Electric Power Company

TPS : Takasago Power Station, Kansai Electric Power Company

KPS : Kainan Port Sub-station, Kansai Electric Power Company

* : positive number in counterclockwise direction

** : orientation error in NS component only

*** : orientation error in EW component only

(3) 方向補正後の加速度記録

4 地点の方向補正後の加速度時刻歴を Fig.4~7 に示す。PI 地点(Fig.4)の水平動 (NS, EW 成分) では深度が浅くなるに従い、短周期成分波が減衰している。特に地表の記録ではそれが顕著であり、最大加速度は NS 成分が 341 gal, EW 成分が 283gal となっている。また、鉛直動(UD成分)に着目すると埋立地である PI, KPS, TPS 地点では埋立層内で大きな増幅がみとめられる。

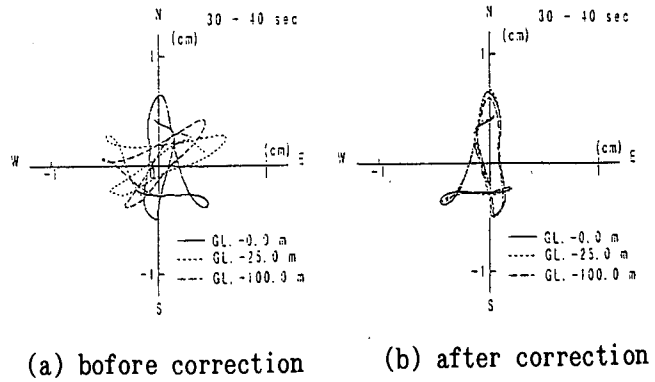


Fig.2 Displacement orbits (KPS station)

3. 周波数依存型等価線形化手法の適用性

(1) 解析手法の概要

地盤あるいは、地盤～構造物系を対象とした耐震工学の研究あるいは実務において、等価線形化手法は頻繁に利用され、きわめて大きな貢献をしてきた。この理由としては、同手法では a) 地盤の非線形特性を等価ひずみレベルに応じた等価剛性、等価減衰定数という簡単なパラメータで表現できること、 b) 基本的に線形解析であるために、地表で観測された地震記録から地中 (基盤) の記録が容易に計算できること、 c) 計算コードが公開され、マニュアルも完備していること、などが挙げられよう。

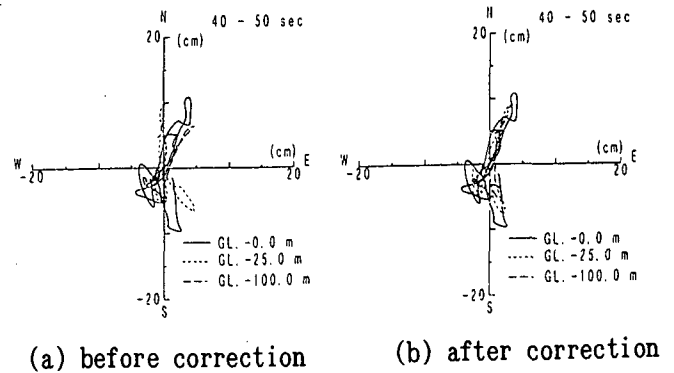


Fig.3 Displacement orbits (TPS station)

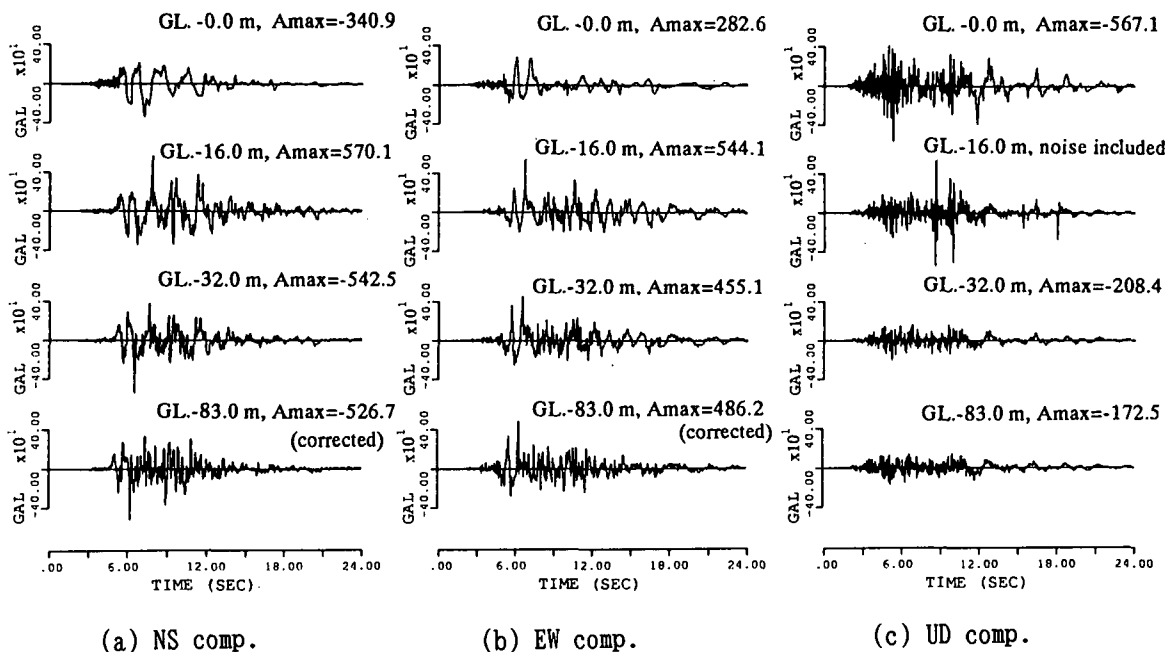


Fig.4 Acceleration time histories (PI station, Kobe City)

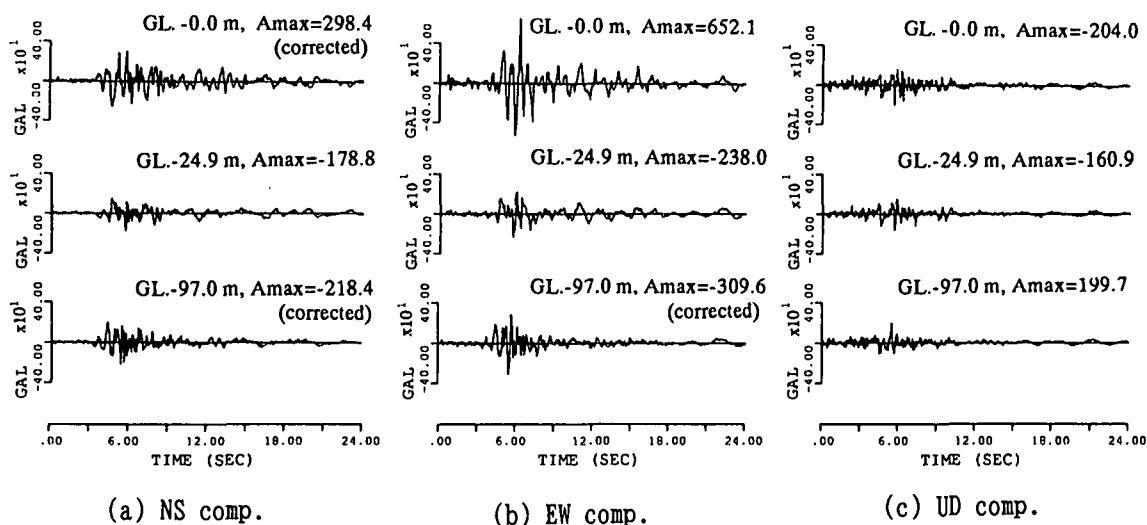


Fig.5 Acceleration time histories (TRC station, Amagasaki City)

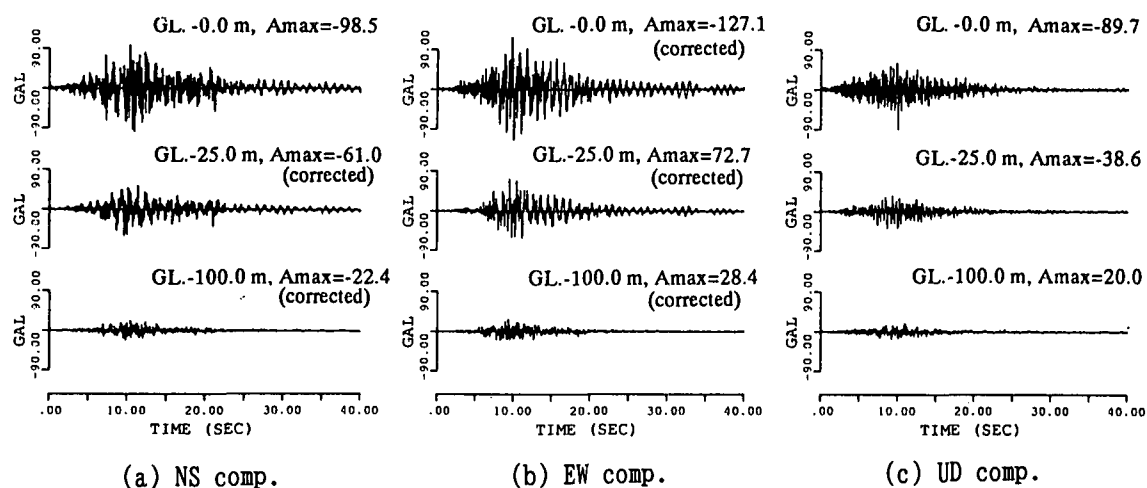


Fig.6 Acceleration time histories (KPS station, Kainan City)

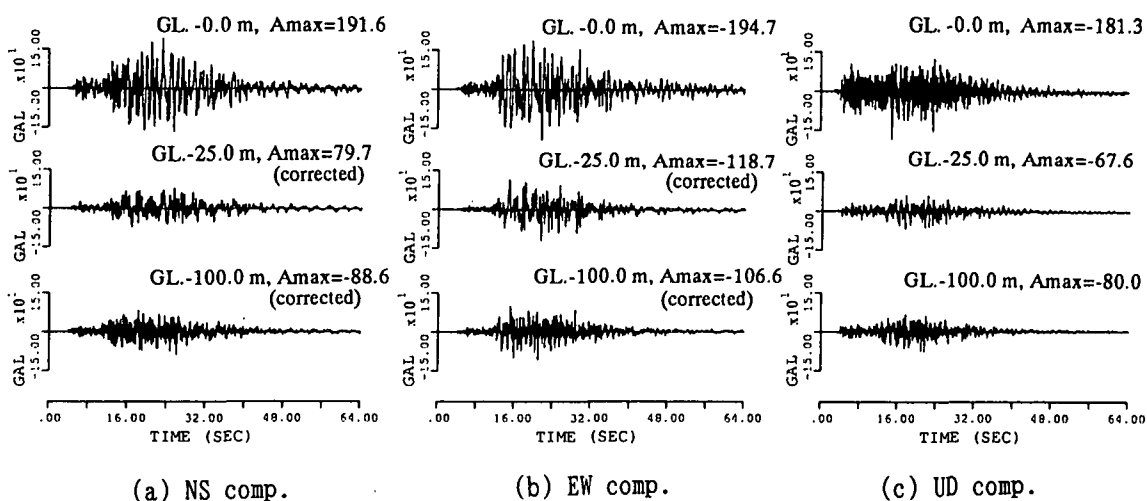


Fig.7 Acceleration time histories (TPS station, Takasago City)

しかし、最近、地盤が軟弱で入力動が大きい場合には、等価線形化手法による解析結果と地震観測結果ではよく一致しないことが指摘されている。著者の一人は、その原因の一つとして、従来の等価線形化手法ではあらゆる周波数帯域に渡って一律に等価ひずみレベルが設定されているためではないか、と考えた。そして、この点を改良するために、次式のように周波数依存型等価ひずみを導入し、離散化された各周波数毎にこれに応じた等価せん断剛性と等価減衰定数を与えることを提案した。^{7), 8)}

$$\gamma_r(\omega) = C \cdot \gamma_{\max} \cdot F_r(\omega) / F_{r\max} \quad \dots\dots[1]$$

ここに、C= 定数、 $\gamma_{\max}$ =最大せん断ひずみ、 $F_r(\omega)$ =せん断ひずみ時刻歴のフーリエスペクトル、 $F_{r\max} = F_r(\omega)$ の最大値。定数 C は等価ひずみのレベルを制御するためのパラメータであり、 $C=0.65$ 、 $F_r(\omega) / F_{r\max} \equiv 1.0$ とすれば、SHAKE と同じ条件となる。なお、周波数軸上における $F_r(\omega)$ を平滑化するために、バンド幅 1.0 Hz の三角形ウィンドウを用いた。

(2) 解析結果

4 地点の水平動（基盤の最大加速度の大きい方の成分を使用）を対象として、解析値と観測値の比較を行い、Fig.8～11に示した。図中、(a),(b),(c)は、加速度、速度、変位の最大値の比較であり、(d) は地表と基盤（最深観測点）との間の伝達関数の比較である。

Fig.8 は PI 地点記録に関するものである。Fig.8 (a)では、地表における最大加速度の推定値は観測値の2倍程度となっており、かなり過大評価している。

また、速度(Fig.8(b))についても、計算値は過大評価気味である。伝達関数の実測値を Fig.8(d) に示すが、1 Hz 以上の周波数では大きな減衰がみられる。このように、液状化の発生が顕著に認められた地点では、等価線形化手法の適用には問題があると言える。

Fig.9 は TRC 地点の観測記録について比較したものであり、地表における最大速度を除けば、解析値と観測値は非常によく一致している。Table 2(b) に示すように、本地点では表層部にせん断波速度が小さい層が存在するために増幅が大きくなっていると考えられる。なお、本地点は、沖積地盤上に位置し、近辺において液状化の発生は報告されていない。

KPS 地点に関する比較を Fig.10 に示すが、最大加速度および速度の計算値は観測値よりもやや小さい。また、Fig.10(d) に示す伝達関数でも、卓越周波数である1次モードでは計算値と解析値で差異がみられる。なお、本ケースでは GL.-100.0 m における入力 が 28.4 gal と他の3地点の記録と比べるとかなり小さいことに注意を要する。

TPS 地点は埋立地であり、観測地点の周りでは多くの地割れが観察され、また近くでは液状化現象も観察されている。Fig.11 より、計算された最大加速度および速度は観測値よりもかなり大きいことがわかる。また伝達関数における卓越周波数である一次モードの周期も計算値と解析値とで大きく異なる。これらの差の原因として、①Table 2 に示した地盤の速度構造のモデルの誤差、②噴砂に至らないまでも地中部が不完全液状化状態となり、地盤が軟化したこと、などが考えられる。

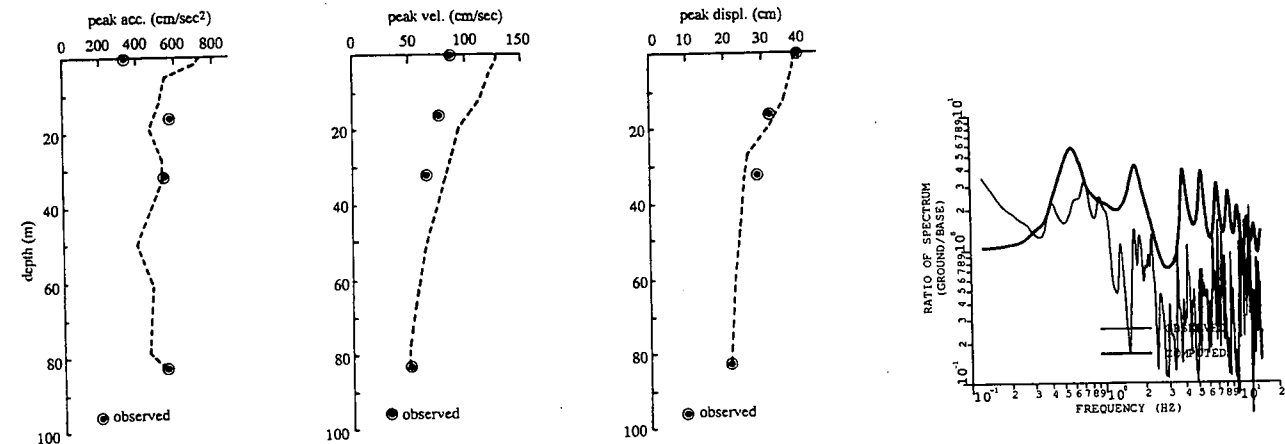
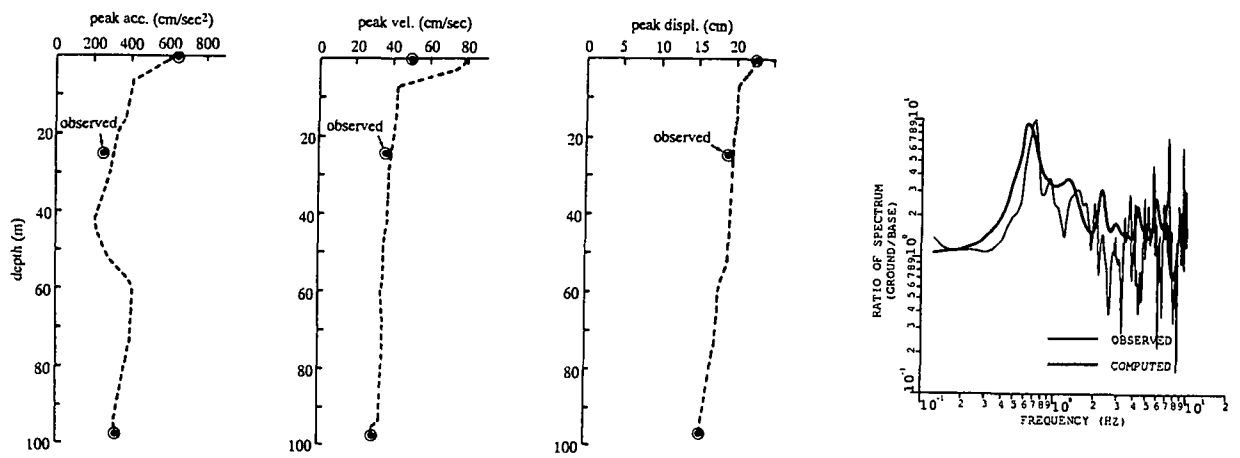
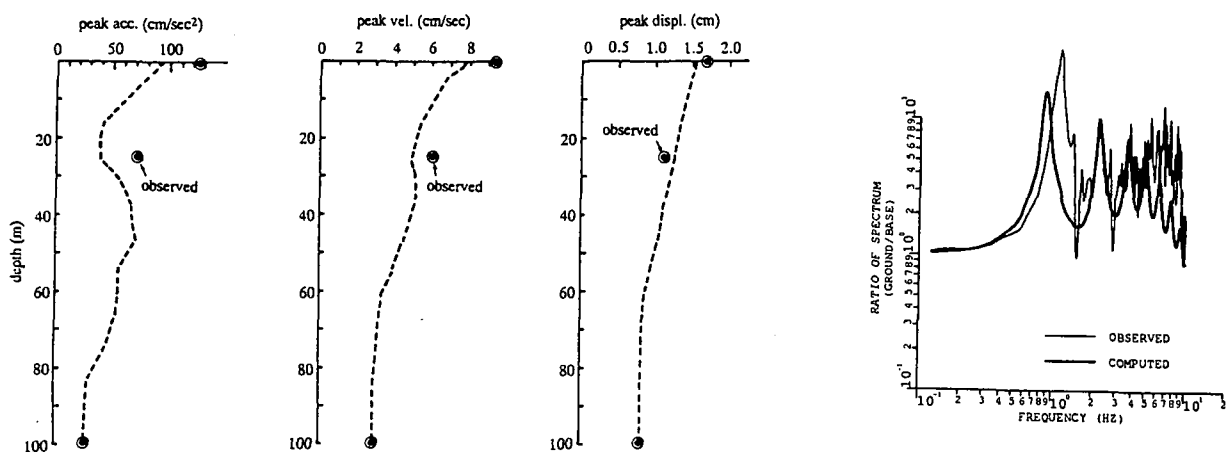


Fig.8 Comparisons of observed and calculated results using the frequency dependent equi-linearized technique (PI station, Kobe City)



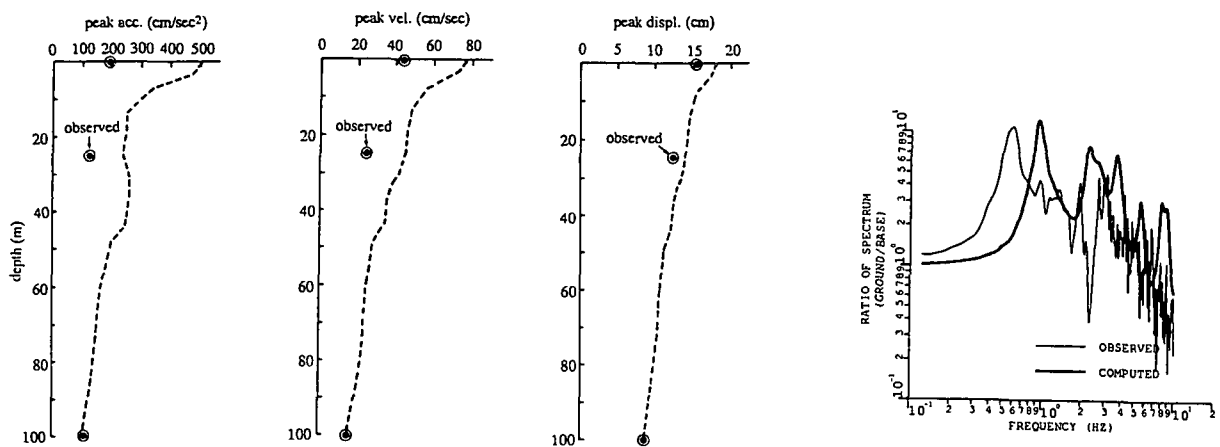
(a) peak acceleration (b) peak velocity (c) peak displacement (d) spectral amplification ratio

Fig.9 Comparisons of observed and calculated results using the frequency dependent equi-linearized technique (TRC station, Amagasaki City)



(a) peak acceleration (b) peak velocity (c) peak displacement (d) spectral amplification ratio

Fig.10 Comparisons of observed and calculated results using the frequency dependent equi-linearized technique (KPS station, Kainan City)



(a) peak acceleration (b) peak velocity (c) peak displacement (d) spectral amplification ratio

Fig.11 Comparisons of observed and calculated results using the frequency dependent equi-linearized technique (TPS station, Takasago City)

4. 有効応力に基づく液状化解析手法の適用性

(1) 解析手法の概要

3.(2) で述べたように、液状化の発生が顕著に認められた地点の地盤振動特性を等価線形化手法により再現するには限界があると思われる。ここでは、液状化時の地盤内の有効応力経路を現実に即して再現できる3次元液状化解析手法(LIQCA/3D)の適用性を検討した。本解析手法は、Biot の二相混合体理論に基づいて、固相の変位 u 、液相の間隙水圧 p を未知数とした u - p formulation を用いている。釣り合い式は FEM を用いて、連続の式は FDM を用いてそれぞれ空間に対して離散化し、時間離散化には Newmark の β 法を用いている。⁹⁾ また、土の応力～ひずみ関係式としては、加圧密境界面、非線形移動硬化則^{10), 11)}、流れ則の一般化^{12), 13), 14)}などの概念を取入れた繰返し弾塑性構成モデルを組込んでいる。

(2) 解析結果

PI 地点を対象として、立体要素を鉛直方向に一次

元的に配して解析モデルを作成し(39要素、160節点)、基盤(GL.-83 m)に3成分波を入力した。なお、埋立層における鉛直動の増幅現象の原因の一つとして同層が完全には海水で飽和していないことが挙げられ、本解析では飽和度を 99.95% と仮定した。

地盤内の過剰間隙水圧比(水圧/初期有効上載圧)を示す Fig.12 によれば、埋土内である GL.-16.6 m では完全液状化状態に達しているが、GL.-32 m(沖積砂)、GL.-56.5 m(洪積砂礫)では不完全液状化状態にあったと推定される。最大加速度の解析値と実測値の比較を Fig.13 に示すが、本解析は液状化に起因する水平動の減衰特性、および鉛直動の増幅特性を比較的良く再現していると言える。

5. 結 語

本論文では、1995年1月17日兵庫県南部地震の際に、4地点で得られた鉛直アレー観測記録に基づき、地中地震計の設置誤差の補正、地盤内地震動の増幅特性、地震応答解析手法の適用性などについて検討した結果

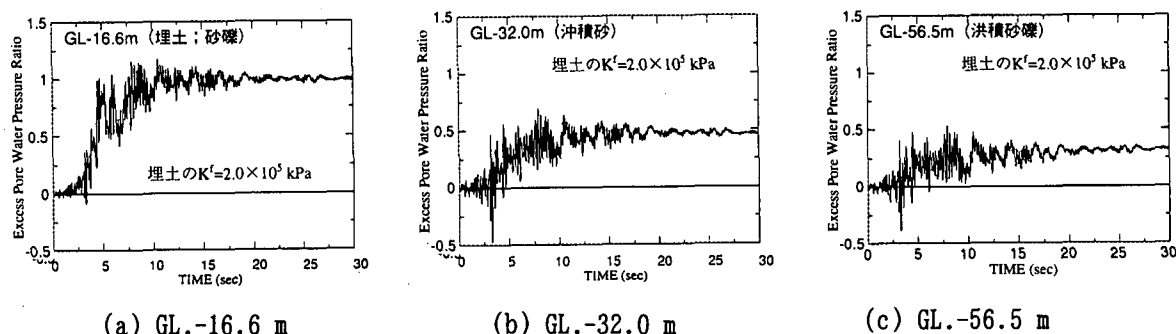


Fig.12 Calculated time histories of excess pore water pressure ratio

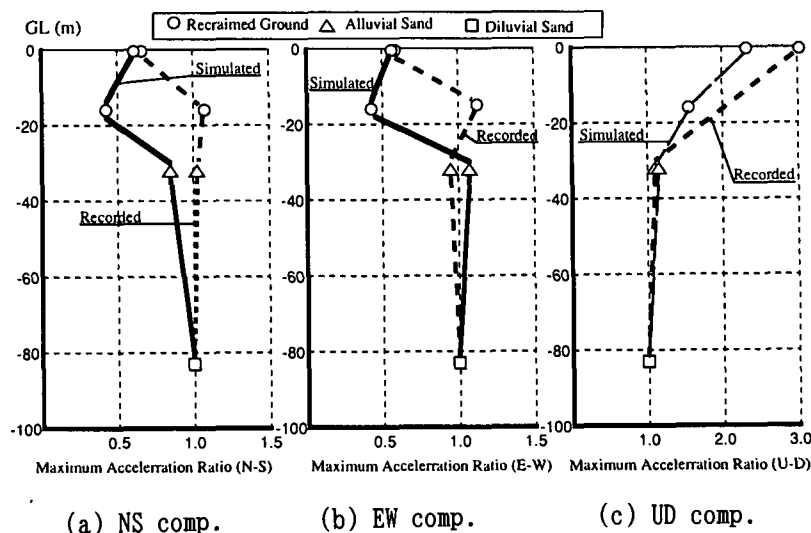


Fig.13 Comparisons of observed and calculated peak accelerations using the effective stress-based liquefaction analysis method (PI station, Kobe City)

について述べた。なお、文献 15), 16), 17) ではそれぞれ、①地震記録の方向補正、②断層近傍における強震動特性および周波数依存型等価線形化手法の適用性、③液状化解析手法の適用性について詳しく論じており、本報告はその概要を紹介したものであることを付記する。また、今回きわめて貴重な地震記録が得られたのは事実であるが、杭基礎や共同溝など地中構造物の設計上重要な情報である過剰間隙水圧に関しては、データ不足と思われる。間隙水圧計を含む地震観測に関しても組織的な取り組みが必要な時期にきているのではないだろうか。

最後に、ポートアイランドにおける貴重なアレー記録をご提供いただいた神戸市開発局の関係各位に深く謝意を表する。

【参考文献】

- 1) Aguirre, J. and Irikura, K.: Preliminary analysis of non-linear site effects at Port Island vertical array station during the 1995 hyogoken-Nanbu Earthquake, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.16, No.2, pp.49-58, 1995.
- 2) Oishi, H. and Sekiguchi, K.: Earthquake observation of an underground pipeline and seismic response analysis, *Proc. of 8th WCEE*, Vol.5, pp.295-302, 1984.
- 3) 鎌田晟雄・大石 博・関口宏二: 埋設管路の3次元的地震時挙動観測(Ⅲ) -三次元アレー観測記録による表面波の位相速度と下町配水幹線の耐震性の検討-, 水道協会雑誌、第56巻、第5号、pp.39-53, 1987.
- 4) 山崎文雄・鹿 林・片山恒雄: アレー観測における地震計設置誤差の評価、土木学会論文集、No.432/I-16, pp.231-240, 1991.
- 5) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, *EERC*, No.72-12, 1972.
- 6) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C., and Seed, H.B.: FLUSH - A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, *EERC*, No.75-30, 1975.
- 7) 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手法に関する一考察、土木学会論文集、No.493/III-27, pp.49-58, 1994.
- 8) Sugito, M.: Frequency-dependent equivalent strain for earthquake response analysis of soft ground, *Proc. of Third R.O.C. and Japan Joint Seminar on Natural Hazards Mitigation*, Tainan, Taiwan, pp.409-422, 1993.
- 9) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M. and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, *Applied Science Research*, 52, pp.209-245, 1994.
- 10) Chaboche, J.L. and Rousselier, G.: On the plastic and viscoplastic constitutive equations Part I and Part II, *Journal of Pressure Vessel Technology*, Transactions of the ASME, Vol. 105, pp.153-164, 1983.
- 11) Oka, F., Yashima, A., Kato, M. and Sekiguchi, K.: A constitutive model for sand based on the non-linear kinematic hardening rule and its application, *Proc. of 10th WCEE*, pp.2529-2534, 1992.
- 12) Tateishi, A., Taguchi, Y., Oka, F. and Yashima, A.: A cyclic elasto-plastic model for sand and its application under various stress conditions, *First Int. Conf. on Earthquake Geotechnical Eng., IS-TOKYO'95*, (to be published)
- 13) 田口洋輔・立石 章・樋口雄一・岡二三生・八嶋 厚: 一般化した流れ則を用いた砂の繰返しモデルと過心載荷試験による検証、第23回地震工学研究発表会、土木学会耐震工学委員会、pp.329-332, 1995.
- 14) Taguchi, Y., Tateishi, A., Oka, F. and Yashima, A.: A Cyclic elasto-plastic model for sand based on the generalized flow rule and its application, *International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, pp.57-62, 1995.
- 15) Sugito, M., Sekiguchi, K., Yashima, A., Oka, F., Taguchi, Y. and Kato, Y.: Correction of orientation error of borehole strong motion array records obtained during the South Hyogo Earthquake of Jan.17, 1995, *土木学会論文集、第I部門*, 1996. (掲載予定)
- 16) Oka, F., Sugito, M., Yashima, A., Taguchi, Y. and Sekiguchi, K.: Analysis of strong motion records from the South Hyogo Earthquake of Jan.17, 1995, *Engineering Geology*, Elsevier Science, (投稿中)
- 17) 八嶋 厚・岡二三生・田口洋輔・立石 章: 水の圧縮性を考慮した3次元液状化解析、第40回地盤工学シンポジウム、地盤工学会 pp.257-264, 1995.11.

NON-LINEAR AMPLIFICATION CHARACTERISTICS OF GROUND MOTIONS AND EXAMINATIONS OF ANALYSES METHODS BASED ON THE BOREHOLE STRONG MOTION ARRAY RECORDS OBTAINED DURING THE SOUTH HYOGO EARTHQUAKE

Koji Sekiguchi, Masata Sugito, Fusao Oka, Atsushi Yashima, Yousuke Taguchi, Youichi Kato

Based on the borehole array records at 4 stations obtained during the South Hyogo Earthquake of Jan.17,1995, the followings are discussed: 1) orientation error of seismometers; 2) ground motion amplification; 3) applicability of the frequency dependent equi-linearized technique for the frequency domain analysis, and the effective stress-based liquefaction analysis methods. Data sets used in the analyses were obtained at the following stations: a)Port Island in Kobe City; b)Technical Research Center of Kansai Electric Power Company, in Amagasaki City; c)Kainan Port sub-station of Kansai Electric Power Company, in Kainan City; and d)Takasago Power station of Kansai Electric Power Company, in Takasago City.