

レベル2地震を含む11地点の 鉛直アレー地震観測記録と液状化の有無の再現解析

中部電力(株) 上田 稔
 港湾空港技術研究所 山崎 浩之
 (株)シーテック ○ 恒川 和久

1. はじめに

地盤の地震応答解析法の信頼性は、実地震での地震観測記録や液状化状況等の良好な再現によって確認されなければならない。しかも、さまざまな地盤の数多くの地点に対して統一的な解析条件の設定のもと、良好な再現ができてこそ、信頼性のある地震応答解析法であるという評価がなされるべきである。本稿では、剛性と減衰のひずみ依存性を高精度に再現可能なMDMモデル¹⁾を用いた全応力逐次非線形解析(以下、MDM)により、液状化が確認されたレベル2地震を含む10地点の現地鉛直アレー地震観測、1ケースの土槽振動実験、合計11地点の鉛直アレー地震観測記録を対象に行った観測記録と液状化の有無の再現解析について述べる。

また、地盤の地震応答解析法として従来から広く用いられている等価線形化法(以下、SHAKE)は、強地震時のように地盤の非線形性が顕著になる場合には、使用に適さないことが指摘されており、SHAKEの適用限界については、逐次非線形解析と比較することで検討されている^{2),3)}。しかし、地震観測記録や液状化状況の再現に基づいて検討された例⁴⁾は少なく、必ずしも逐次非線形解析による結果の信頼性が確認されているとは言えない。そこで、MDMと同様の解析条件の設定のもとで、SHAKEによる地震観測記録と液状化の有無の再現解析を行い、SHAKEの適用限界についても述べる。

2. 再現解析の概要

2.1 現地鉛直アレー地震観測

図-1に対象地点の地盤構成の概要と地震計設置位置(●印)を示す^{5) 6) 7) 8) 9)}。表-1に対象地震の諸元と液状化の有無を示す。図-1に示す最下部に設置された地震計での観測加速度記録を入力し、地表面もしくは地表面付近に設置された地震計における地震観測記録および液状化の有無の再現解析を行った。

2.2 土槽振動実験

図-2に土槽振動実験装置の概要と加速度計設置位置を示す¹⁰⁾。地盤は、豊浦標準砂の飽和土である。表-1に入力地震波の諸元と液状化の有無を示す。最下部に設置された加速度計での観測加速度記録を入力し、深度8cmに設置された加速度計における地震観測記録および液状化の有無の再現解析を行った。

3. 解析条件

3.1 地盤の初期速度構造の設定

現地鉛直アレー地震観測地点については、地盤の伝達関数を再現するように、S波検層により得られたせん断波速度(以下、Vs)を補正して初期速度構造を設定した。伝達関数は、再現解析の対象とした地震観測記録とは別に観測された弱震記録、もしくは再現解析の対象とした地震観測記録の初動部を用いて求めた。

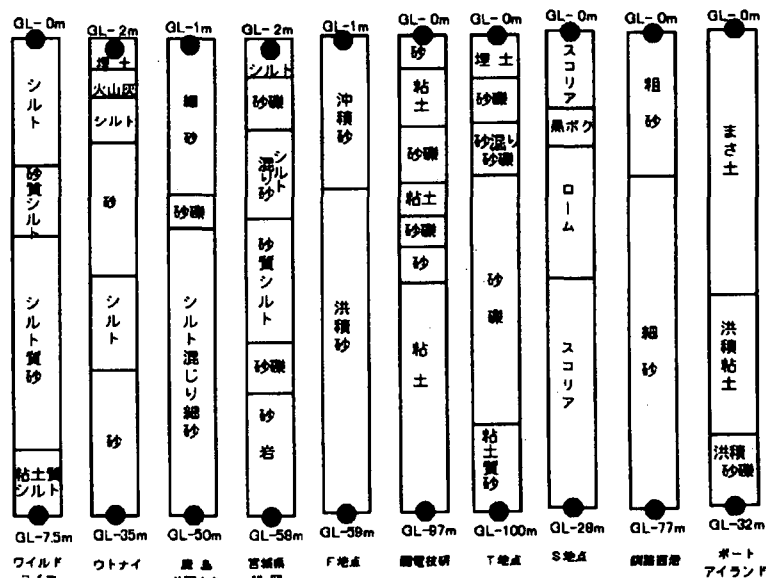


図-1 現地鉛直アレー地震観測地点の地盤構成の概要と地震計設置位置

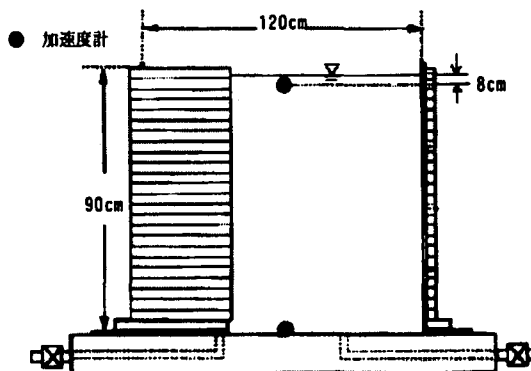


図-2 土槽振動実験装置の概要と加速度計設置位置

キーワード：レベル2地震、液状化、逐次非線形解析、等価線形解析、MDMモデル、再現解析
 455-0054 名古屋港区遠若町3-7-1 TEL:052-651-4069 FAX:052-651-2349 Chuden.Gikai19s@chuden.co.jp

十槽振動実験では、再現解析の対象とした地震観測記録とは別に微動加振した際の観測記録より求めた伝達関数を再現するように初期速度構造を設定した。

鹿島共同火力を例に、初期速度構造の設定方法について示す。鹿島共同火力では、ダウンホール法によるS波検層が実施されているので、このVsを初期値として、これを一律比例倍する方法で、地震観測記録から求まる伝達関数を再現するように初期速度構造を新たに設定した。伝達関数の再現状況を図-3に示す。伝達関数は解析対象の地震とは別に観測された弱震観測記録（最大加速度10Gal程度以下）から算定した。図中の細実線が弱震加速度記録から求めた伝達関数、その伝達関数のピークの平均が↓、S波検層のVsによる伝達関数が太実線、新たに設定したVsによる伝達関数が太実線である。新たに設定したVsによる伝達関数は、3次のピークの振動数まで再現できている。一方、S波検層のVsによる伝達関数は、ピークの振動数が10%程度低振動数側にずれている。伝達関数は、ワイルドライフ、ウトナイ、F地点、S地点では再現解析の対象地震の初期微動部から、釧路西港、ポートアイランドでは再現解析の対象とは別に観測された弱震観測記録（最大加速度10Gal程度以下）から、設定した。宮城県船岡、T地点、関電技研については、サスペンション方式によるS波検層が1m刻みで細かく実施されているので、S波検層によるVsをそのまま与えた。紙面の都合で割愛するが、ダウンホール法によるS波検層で得られたVsを与えた場合の地震観測記録の再現状況は良好ではなかった¹¹⁾。

3.2 地盤の非線形性の設定

繰返し三軸試験により得られる地盤の剛性と減衰のひずみ依存性試験データを再現するようにMDMモデルのパラメータを決定した。例として、MDMモデルによるポートアイランドのまさ土の非線形性の再現状況を、従来から広く用いられている修正R-0モデルによる再現状況と合わせて、図-4に示す。せん断剛性比（以下、G/Go）の試験データが○印、MDMモデルによる再現状況が太実線、修正R-0モデルによる再現状況が細実線である。同様に、減衰定数の試験データが□印、MDMモデルによる再現状況が太点線、修正R-0モデルによる再現状況が細点線である。MDMモデルでは、ひずみが小さな領域から大きな領域まで試験データを良好に再現できている。一方、修正R-0モデルでは、ひずみ領域全体における再現状況はMDMモデルほど

表-1 対象地震の諸元と液状化の有無

対象地点		対象地震		観測最大加速度 (Gal)	液状化の有無
現地鉛直アレー地震観測	ワイルドライフ(地震F)	1987年11月24日 Elmore Ranch地震	内陸型	126	無
	ウトナイ	1993年1月15日 北海道釧路沖地震	海洋型	104	無
	鹿島共同火力(地震A)	1989年2月19日	海洋型	100	無
	鹿島共同火力(地震B)	1995年7月30日	海洋型	173	無
	宮城県船岡	1987年4月7日	海洋型	131	無
	F地点	1992年2月24日	海洋型	180	無
	関電技研	1995年1月17日 兵庫県南部地震	内陸型	507	無
	T地点	1995年1月17日 兵庫県南部地震	内陸型	198	無
	S地点	1983年8月8日	内陸型	440	無
	釧路西港	1993年1月15日 北海道釧路沖地震	海洋型	468	有
	ワイルドライフ(地震S)	1987年11月24日 Superstition Hills地震	内陸型	180	有
	ポートアイランド	1995年1月17日 兵庫県南部地震	内陸型	423	有
土槽振動実験	土槽振動実験 (飽和砂)	1983年1月17日 日本海中部地震 (時間軸を1/4に縮尺)	海洋型	128	有

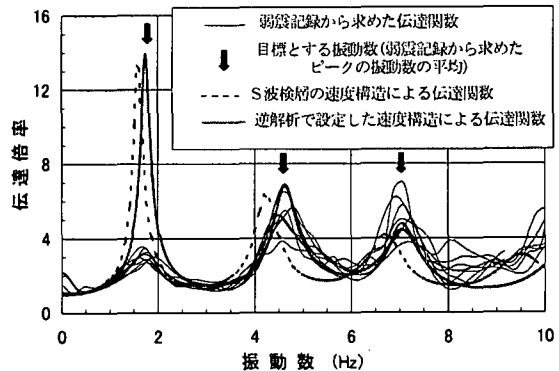


図-3 伝達関数の再現状況の例(鹿島共同火力)

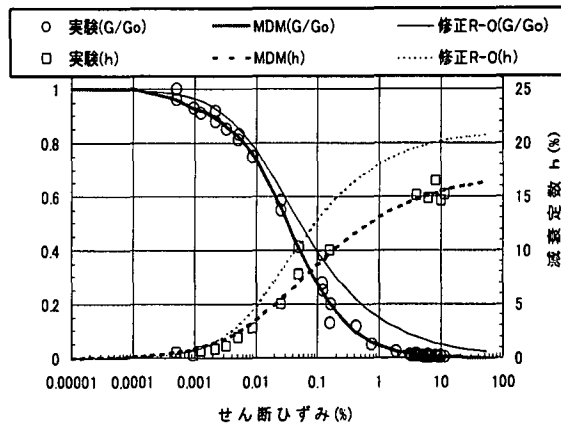


図-4 非線形性の再現状況の例
(ポートアイランド, まさ土)

良好でない。紙面の都合で割愛するが、この再現状況の差異が、地震応答解析の結果に大きく影響する。また、非線形性の拘束圧依存性を考慮して、参照ひずみ（以下、 γ_r ）¹⁾を(1)式により深度ごとに設定した。

$$\gamma_{r2}/\gamma_{r1} = (\sigma_{m2}'/\sigma_{m1}')^{0.5} \dots (1)$$

γ_{r2} : 任意の深度の γ_r γ_{r1} : 繰返し三軸試験の結果から設定した γ_r
 σ_{m2}' : 任意の深度の有効拘束圧 σ_{m1}' : 繰返し三軸試験の有効拘束圧

紙面の都合で割愛するが、拘束圧依存性を考慮しなかった場合の地震観測記録の再現状況は良好ではなかった。また、SHAKEにおける最大ひずみと有効ひずみの換算係数は0.65とした。

3.3 解析メッシュサイズ、積分時刻み

解析メッシュサイズは、現地鉛直アレー地震観測の再現解析では1m程度、土槽振動実験の再現解析では2~3cmとした。積分時刻みは、現地鉛直アレー地震観測では0.001秒、土槽振動実験では0.00025秒とした。

4. 液状化判定の方法

液状化の有無は、(2)式により液状化安全率（以下、 F_L ）¹²⁾を求め、 $F_L \geq 1.0$ なら液状化なし、 $F_L < 1.0$ なら液状化あり、と判定した。地震波の不規則性に関する補正係数（以下、 C_K ）は、図-5に示すように、解析で得られるせん断応力の波形パターンから設定した。最大せん断応力が起こる側の波形のみを考えた場合、最大せん断応力の60%以上の振幅をもつ波頭が最大せん断応力の起こる前に2つ以下の場合には衝撃型、3つ以上なら振動型と判別する。また、正弦波により20波で液状化が発生するときの繰返しせん断応力比（以下、 $(\tau_1/\sigma_c')_{n1=20}$ ）は、表-2に示す方法で設定した。

$$F_L = \frac{R_{max}}{L_{max}} \dots (2)$$

$$R_{max} = \left(\frac{0.9}{C_K} \right) \frac{(1+2K_0)}{3} \left(\frac{\tau_1}{\sigma_c'} \right)_{n1=20} \quad L_{max} = \frac{\tau_{dmax}}{\sigma_v'}$$

F_L : 液状化安全率

R_{max} : 液状化強度比

L_{max} : 最大せん断応力比

K_0 : 静止土圧係数 (0.5)

σ_v' : 鉛直有効応力

C_K : 地震波の不規則性に関する補正係数

(衝撃型 : 0.55, 振動型 : 0.7)

$(\tau_1/\sigma_c')_{n1=20}$: 正弦波により20波で液状化が発生するときの繰返しせん断応力比

τ_{dmax} : 地震応答解析で得られるせん断応力の最大値

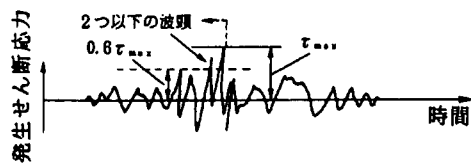
なお、関電技研、S地点についてはその土質の主体がそれぞれ粘土、火山灰であるので、 F_L は算出してない

5. 解析結果

各地点の観測加速度記録とそのフーリエスペクトルの再現状況を、表-1の地点順に図-6に示す。上段がSHAKE、下段がMDMの結果である。各地点におけるG/Goの最小値、最大せん断ひずみ、 F_L の最小値、MDMとSHAKEにおける最大加速度の比を図-7に示す。G/Goの最小値が大きい順に、各地点を左から右に向かって並べており、図中の点線の左側が液状化しなかった地点、右側が液状化した地点である。最大せん断ひずみは、せん断ひずみが最大となる要素について示す。G/Goは、最大せん断ひずみが発生する地盤要素を対象に、SHAKEでは計算の結果直接得られる収束剛性と初期剛性の比で、MDMでは最大せん断ひずみに相当するG/Goで示す。最大加速度の比は、再現解析で対象とした地表面もしくは地表面付近の地震計の設置位置における最大加速度を、MDMに対するSHAKEの比で示す。

地震レベルが比較的小さいワイルドライフ(地震E)、ウトナイ、鹿島共同火力(地震A)の場合には、MDM、SHAKEともに観測加速度記録の再現状況は良好であり、G/Goは0.6程度、最大せん断ひずみは0.1%以下で、 F_L はMDMとSHAKE

(a) 衝撃型



(b) 振動型

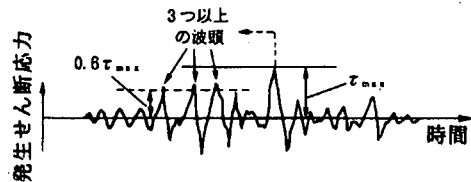


図-5 地震波の不規則性に関する補正係数 C_K を設定するための波形パターンの分類¹²⁾

表-2 正弦波により20波で液状化が発生するときの繰返しせん断応力比 $(\tau_1/\sigma_c')_{n1=20}$ の設定

設定方法	対象地点
凍結試料による液状化強度試験から得られた $(\tau_1/\sigma_c')_{n1=20}$	鹿島共同火力(砂礫) 釧路西港 ポートアイランド
非凍結試料による液状化強度試験から得られた $(\tau_1/\sigma_c')_{n1=20}$	鹿島共同火力(砂質土) ウトナイ 土槽振動実験
道路橋示方書の方法でN値から換算した $(\tau_1/\sigma_c')_{n1=20}$ (細粒分 $F_c=0\%$ とした)	宮城県船岡 F地点 T地点
道路橋示方書の方法でN値から換算した $(\tau_1/\sigma_c')_{n1=20}$ (細粒分 $F_c=50\%$ とした)	ワイルドライフ

ではほぼ同じ値であり、最大加速度の比も 0.9~1.2 程度の範囲内に収まっている。宮城県船岡、F 地点、関電技研、T 地点、S 地点の場合には、MDM では観測加速度記録の再現状況は良好であり、SHAKE でも比較的的良好である。しかし、 G/Go が 0.6 を下回るにつれて、最大せん断ひずみも大きくなり、SHAKE は MDM に比べて、 F_L で 0.5 程度小さめとなっており、液状化が確認されていない T 地点、F 地点では液状化する結果となっている。また、MDM に対する SHAKE の最大加速度の比は、関電技研を除けば、1.5~1.8 程度で、SHAKE の応答が大きくなっている。一方、液状化が確認されている釧路西港、ワイルドライフ(地震 S)、ポートアイランド、土槽振動実験では、MDM による観測加速度記録の再現状況は良好であるが、SHAKE による再現状況は良好でない。

表-3 MDM による再現解析結果から得られた波形パターンの判別結果と C_R

対象地点	最大せん断応力の 60% の振幅を超過するせん断応力の波数	地震波特性、 C_R
釧路西港	4 波	振動型、 $C_R=0.7$
ワイルドライフ(S)	3 波	振動型、 $C_R=0.7$
ポートアイランド	0 波	衝撃型、 $C_R=0.55$
土槽振動実験	5 波	振動型、 $C_R=0.7$

液状化が確認されている地点を対象に、MDM による再現解析結果から得られた波形パターンの判別結果と液状化判定に用いた C_R を表-3 に示す。ポートアイランド以外の 3 地点では、最大せん断応力の 60% の振幅を超過するせん断応力の波数は 3 つ以上で振動型であり、MDM による F_L は 1.0 を若干下回る程度である。一方、ポートアイランドでは最大せん断応力の 60% の振幅を超過するせん断応力の波数は 0 で衝撃型であり、MDM による F_L は 0.6 で 1.0 をかなり下回っている。これは、(2) 式の液状化強度比 R_{max} を小さめに設定したためと考えられる。ポートアイランドの再現解析における地表面に最も近い要素のせん断応力の時刻歴波形を図-8 に示す。この図からポートアイランドでは、とりわけ衝撃型の特性が顕著であったことが分かる。よって、この場合 C_R は 0.55 よりも小さな値であったと推察され、地震応答解析から求める地盤のせん断応力比と液状化強度比がより適切に評価されているなら、ポートアイランドの場合も F_L は 1.0 を若干下回る程度であったと考えられる。

6. まとめ

- MDM モデルを用いた全応力逐次非線形解析によれば、地盤が液状化しなかった地点、液状化した地点の合計 11 地点の地震観測記録を概ね良好に再現することができた。このように地震観測記録は良好な再現ができており、この解析から得られるせん断応力も適切であると考えられる。このせん断応力を用いて液状化判定を行ったところ、実際の液状化の有無も良好に再現することができた。
- SHAKE により、適切な地盤の地震応答、液状化状況を把握できるのは、せん断剛性比 G/Go が 0.6 程度、最大せん断ひずみが 0.1% 程度までであり、SHAKE の適用範囲がかなり限定されることが判明した。また、SHAKE では、この適用限界を超えると、加速度を 50% 程度以上大きめに、実際には液状化していない地点で液状化する、という判定結果となり、液状化を過大に評価することが確認された。

謝辞

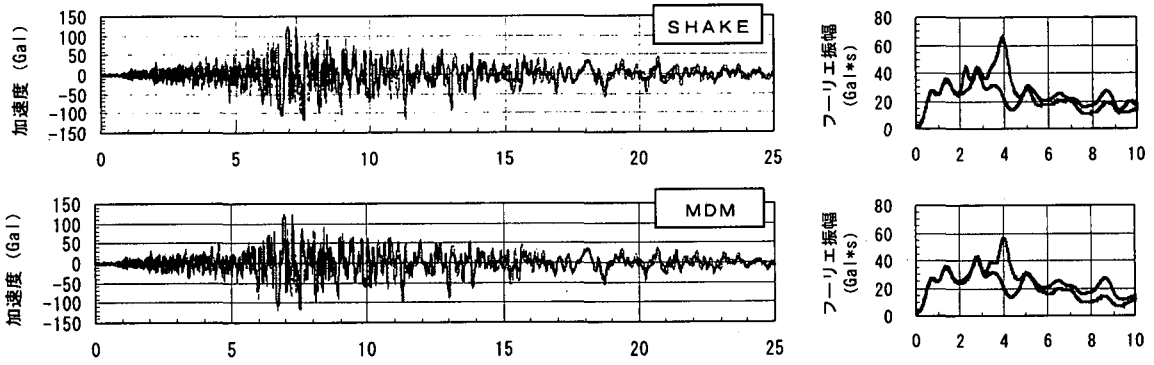
本解析を実施するに当たり、地震観測記録等の情報を提供していただいた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

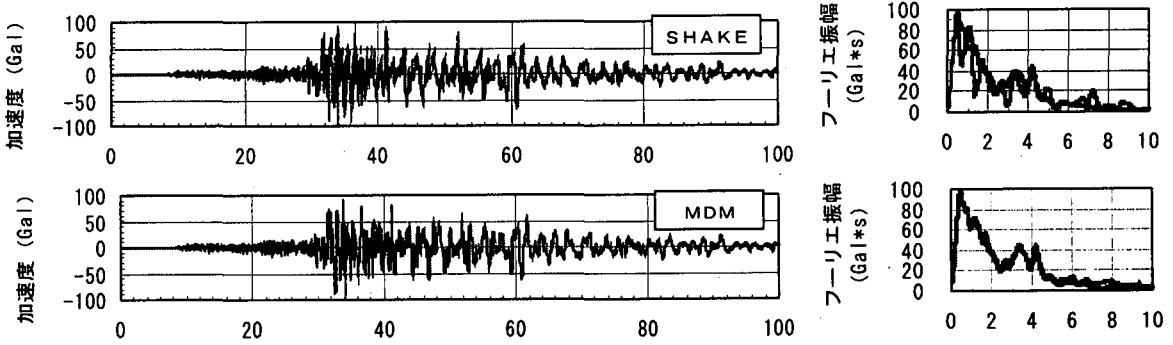
- 熊崎幾太郎, 上田稔: 瞬間変形係数のひずみ依存性を考慮した履歴モデルの定式化, 第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-B111, 1999. 9, pp. 220-221
- 吉田望: 実用プログラム SHAKE の適用性, 軟弱地盤における地震動増幅シンポジウム発表論文集, 1994, pp. 14-30
- 船原秀樹, チュブリノフスキー, シュコ, 藤井俊二: 軟弱粘性土地盤の地震応答解析(等価線形化法と非線形逐次積分法の適用性の検討), 第 32 地盤工学研究発表会, 1997. 7, pp. 875-876
- 善功企, 山崎浩之, 館下徹, 佐渡篤史: 凍結サンプリングを用いた液状化予測のケーススタディ, 第 30 回土質工学研究発表会, 1995. 7, pp. 985-986
- 金谷守, 当麻純一, 矢島浩: 地震記録に基づく地盤の非線形解析手法(NAFSS)の適用性の検討, 電力中央研究所報告, U95027, 1996. 3
- コンクリートライブラリー 98 LNG 地下タンク躯体の構造性能照査指針, 土木学会, 1999, pp. 85-91
- 副田悦生, 玉井秀喜, 仲津直之, 竹澤請一郎, 前川太, 天野真輔: 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, 第 25 回地盤工学研究発表会講演論文集, 1999. 7, pp. 273-276
- 強震動アレー観測 No. 3, (財) 震災予防協会, 1998. 3
- Susumu IAI, Toshikazu MORITA, Tomohiro KAMEOKA, Yasuo MATSUNAGA, Kazuyuki ABIKO: Response of a Dense Sand Deposit During 1993 KUSHIRO-OKI Earthquake, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol. 35, 1995. 3, pp. 115-131
- 藤川智, 佐藤正義, 福武毅芳, 大槻明: 二方向同時加振による液状化実験, 第 28 回土質工学研究発表会, 1993. 7, pp. 1201-1204
- 遠藤大輔, 上田稔, 熊崎幾太郎, 永坂英明, 葛巻亜弥子: 地盤の地震応答解析結果に与える初期速度構造の精度の影響, 第 26 回地盤工学研究発表会, 2001. 8, pp. 457-460
- 埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版), (財) 沿岸開発技術研究センター, 1997, pp. 114-135

観測記録 ———— 解析

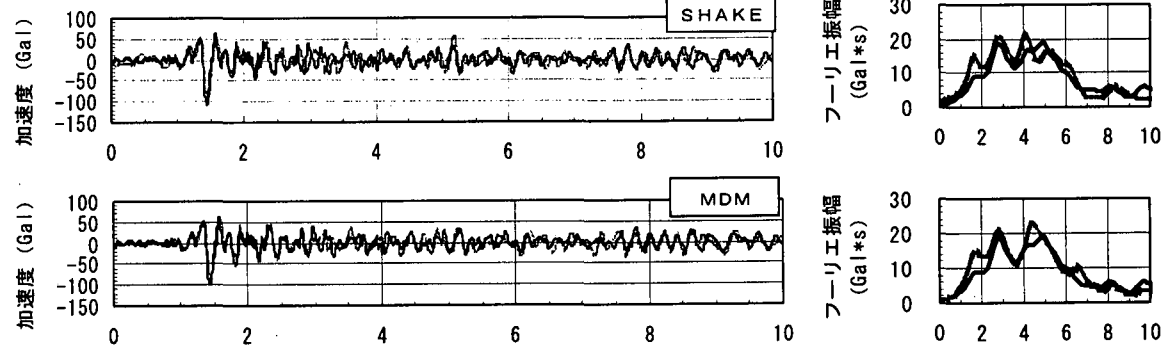
ワイルドライフ (1987年 Elmore Ranch 地震)



ウトナイ (1993年 北海道釧路沖地震)



鹿島共同火力 (地震A)



宮城県船岡

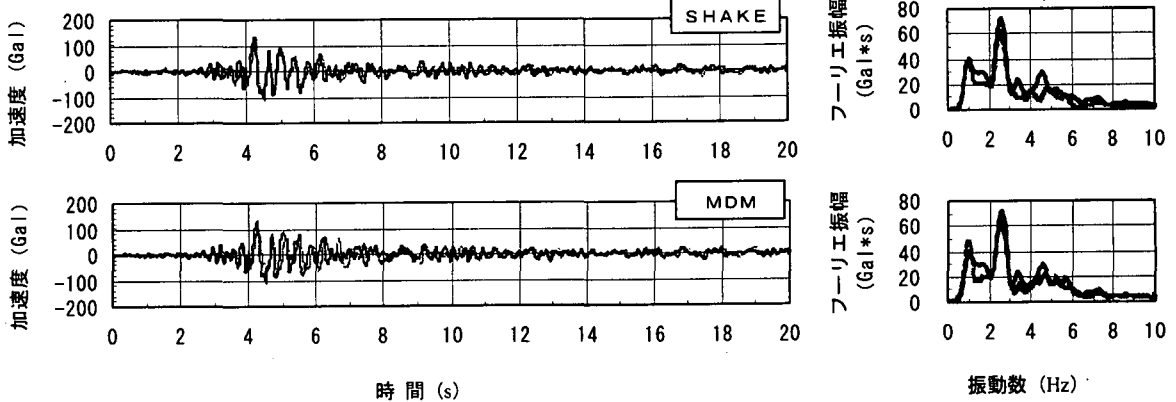
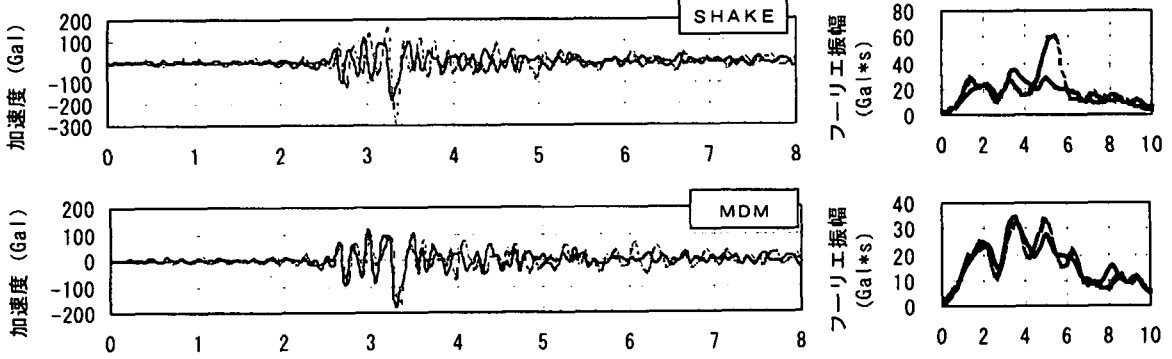
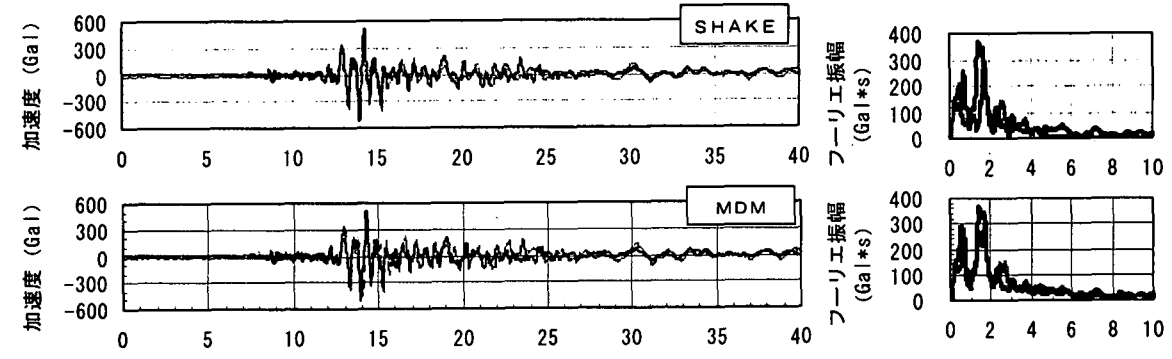


図-6 (1) 地震観測加速度記録とそのフーリエスペクトルの再現解析結果

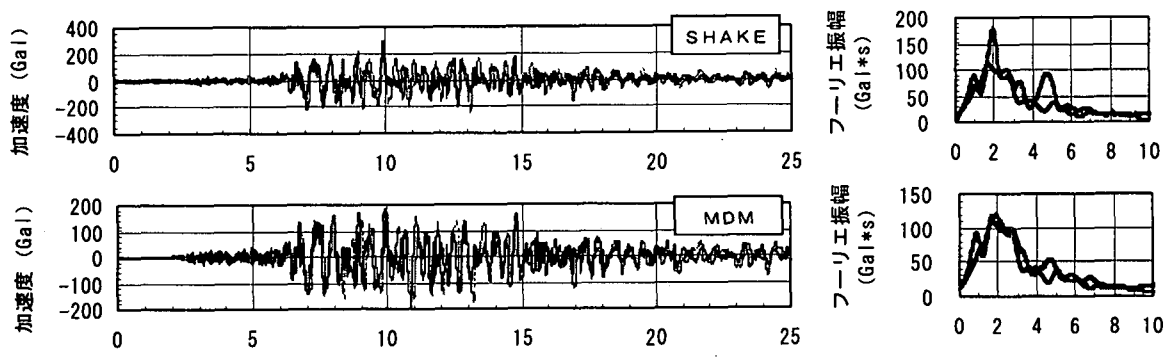
F地点



関電技研 (1995年 兵庫県南部地震)



丁地点 (1995年 兵庫県南部地震)



S地点

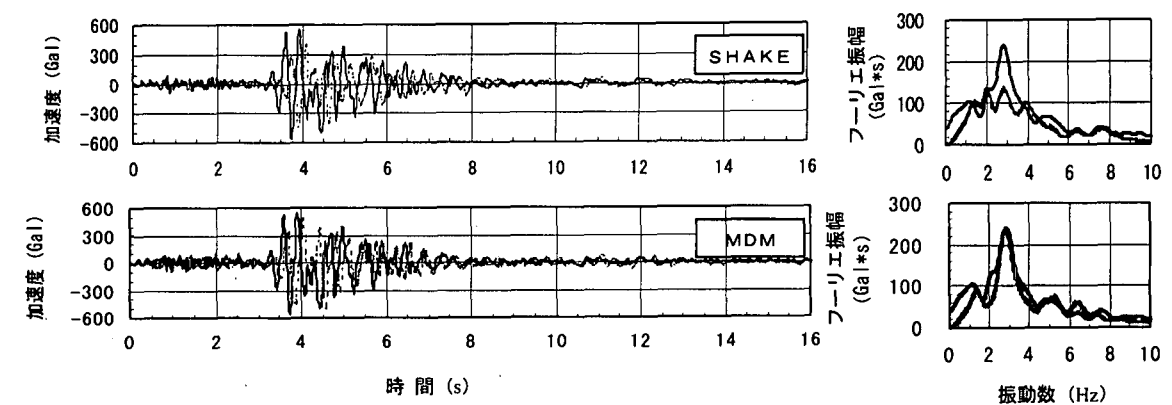
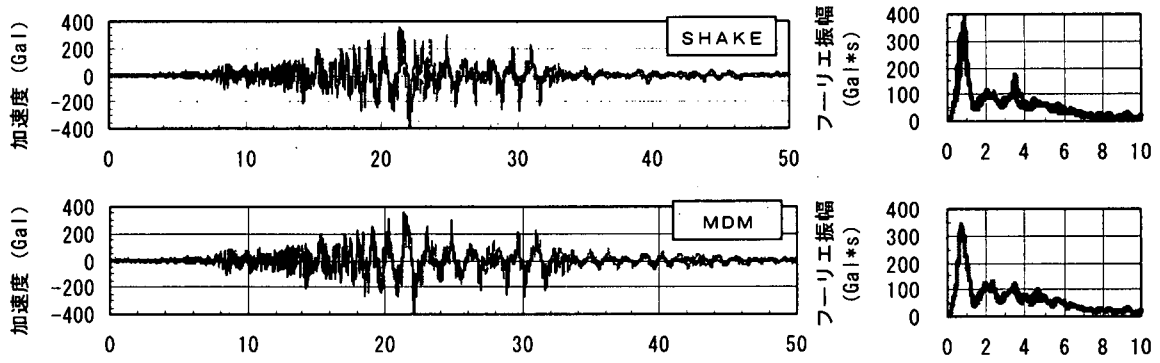
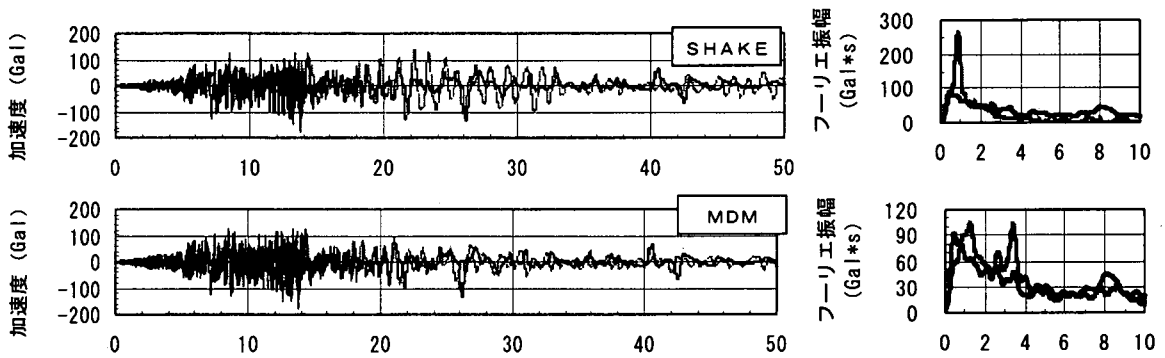


図-6(2) 地震観測加速度記録とそのフーリエスペクトルの再現解析結果

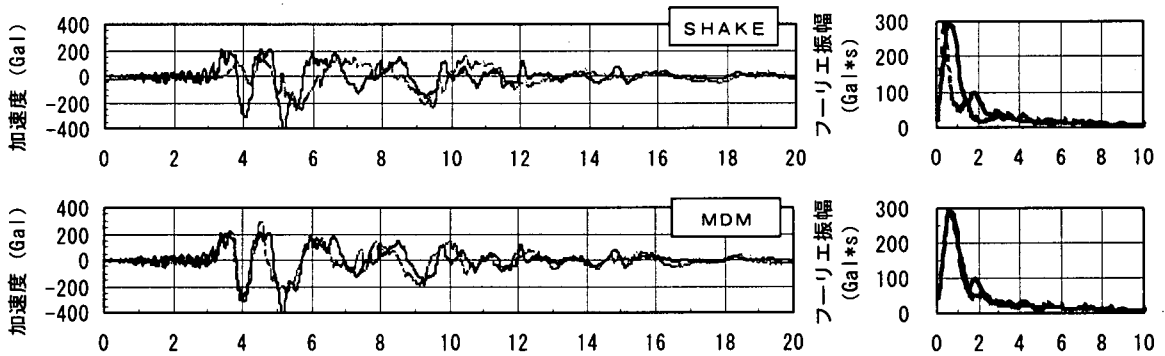
釧路西港 (1993年 北海道釧路沖地震)



ワイルドライフ (1987年 Superstition Hills 地震)



ポートアイランド (1995年 兵庫県南部地震)



土槽振動実験

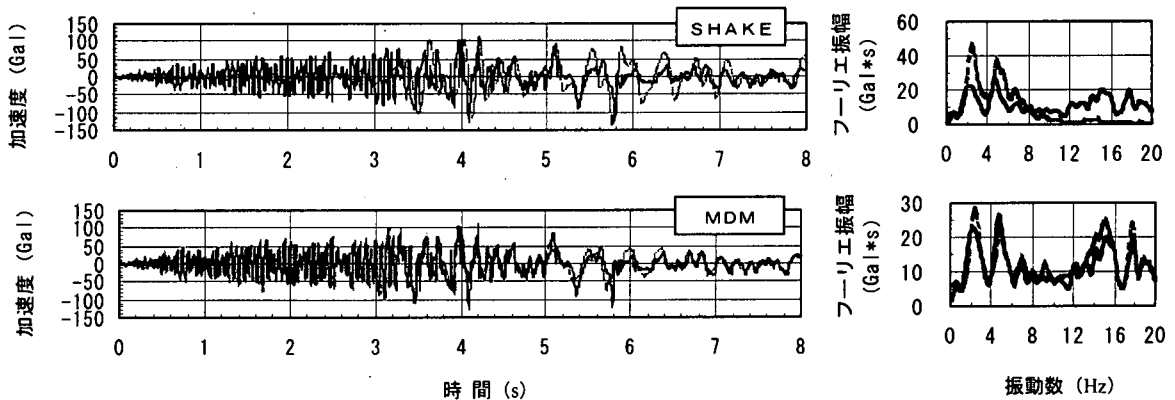


図-6(3) 地震観測加速度記録とそのフーリエスペクトルの再現解析結果

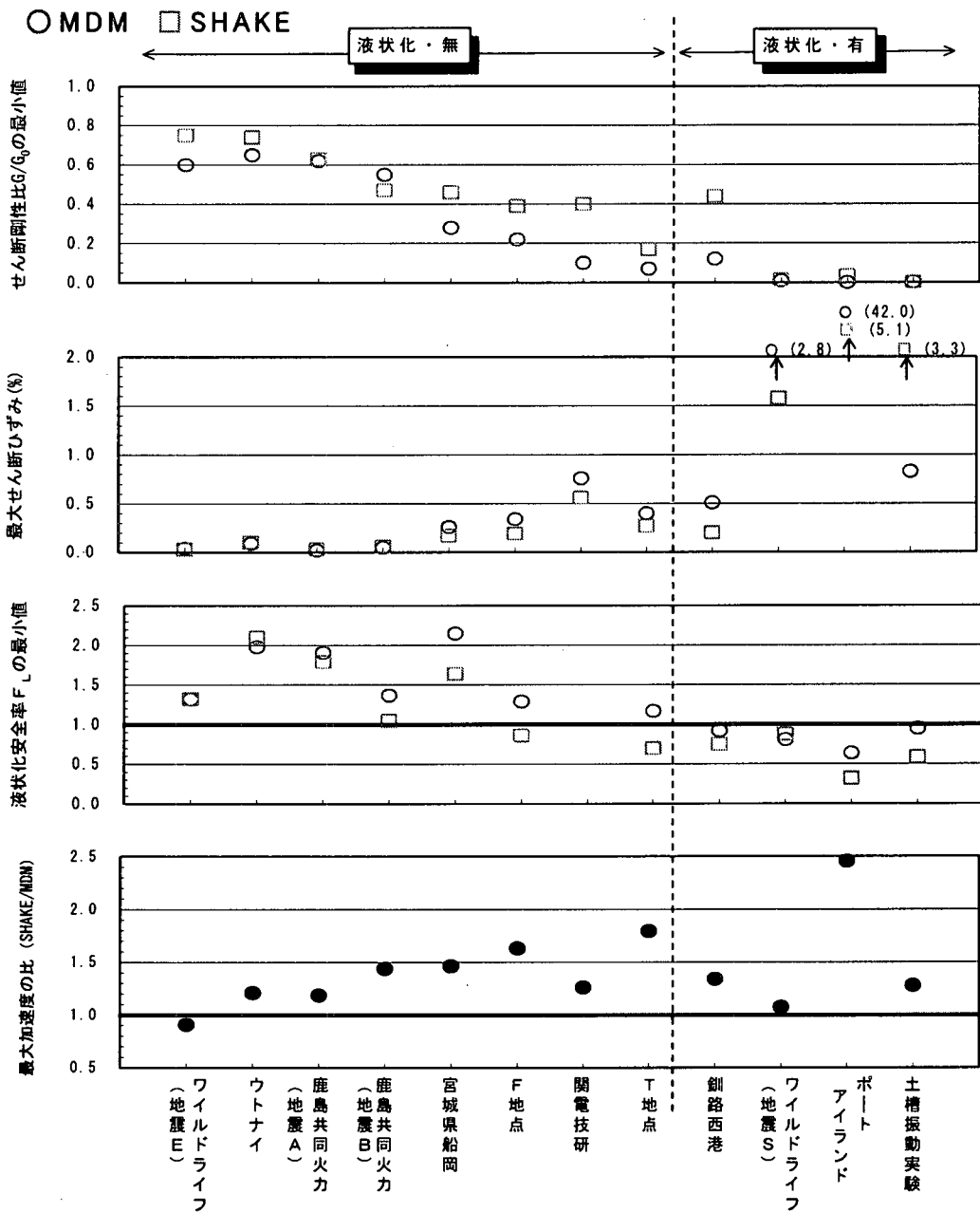


図-7 各地点における G/G_0 の最小値、最大せん断ひずみ、 F_L の最小値、MDMとSHAKEの最大加速度の比

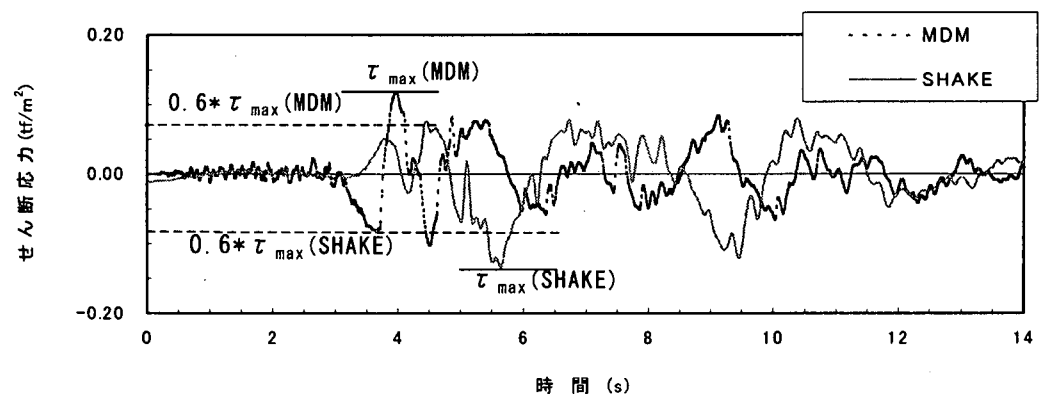


図-8 ポートアイランドの再現解析における地表面に最も近い要素のせん断応力波形