

MDMモデル依存非線形全応力解析による いくつかの实地盤地震応答アレー観測記録の再現

上田稔¹・熊崎幾太郎¹・今枝靖博²・恒川和久³・永坂英明⁴

¹正会員 工博 中部電力(株) 技術開発本部 (〒459-8522 愛知県名古屋市長区大高町字北関山20-1)

²正会員 (株)シーテック 技術コンサルタント部 (〒455-0054 愛知県名古屋市長区遠若町3-7-1)

³正会員 工修 (株)シーテック 技術コンサルタント部 (〒455-0054 愛知県名古屋市長区遠若町3-7-1)

⁴正会員 (株)シー・ティー・アイ 科学技術事業部 (〒450-0003 愛知県名古屋市中村区名駅南1-27-2)

地盤の地震時応答が解析により十分な信頼度をもって把握できるかは、実地震に対する応答シミュレーション解析を行って確認する必要がある。しかも、いくつかの地震に対して、同一の解析条件のもとでの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、著者らが提案するMDMモデル依存非線形全応力解析により、5地点の現地アレー地震観測、1つの土槽震動実験の合計6つの实地盤地震応答アレー観測記録を対象に行った再現シミュレーション解析の結果について述べる。MDMモデル依存非線形全応力解析によれば、地盤が液状化しなかった場合から地盤が液状化した場合まで、加速度波形、フーリエスペクトルを良好に再現することができた。

Key Words : MDM model , liquefaction , nonlinear total stress seismic analysis , observed array records , analysis condition , reproducing analysis

1. はじめに

地盤の地震応答解析法が十分な信頼性を有するかは、実地震での観測記録の解析による良好な再現が可能かどうかによって確認されなければならない。しかも、いくつかの地点に対する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。また、信頼性のある地震応答解析を行うには、地盤の速度構造、非線形性などの解析条件を適正に設定することも不可欠であり、その設定方法は地点や地震に関わらず同一でなければならない。このような観点から、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), 2), 3)}を用いたMDMモデル依存非線形全応力解析(以下、MDM)により、5地点の現地アレー地震観測、1つの土槽震動実験の合計6つの实地盤地震応答アレー観測記録を対象に行った再現シミュレーション解析、およびその解析条件の設定について述べる。

2. 再現シミュレーション解析の概要

(1) 現地アレー観測

図-1に解析対象地点の地盤構成、地震計設置位置(●印)を示す。表-1に解析対象地震の諸元、液状化状況を示す^{4), 5), 6), 7), 8)}。解析では、図-1に示す最下部での観測加速度時刻歴を入力し、地表面付近および中間位置における観測地震波の再現シミュレーションを行った。

(2) 土槽震動実験

図-2に土槽震動実験装置の概要、加速度計設置位置(●印)を示す⁹⁾。模型地盤は、乾燥状態の豊浦標準砂を空中落下法(相対密度70%程度)で投入した後に、水で飽和して作成されている。表-2に入力地震波、および液状化状況を示す。加振入力波は、1983年日本海中部地震時に秋田港で観測された地震記録のNS成分を時間縮尺1/4(時間刻み0.0025秒)して、図-2中のX方向に加振して与えた。解析では、地震計G10での観測加速度時刻歴を入力し、それ以浅部の観測地震波の再現シミュレーションを行った。

3. 解析条件

(1) 地盤の速度構造の設定

a) 現地アレー地震観測

ダウンホール法によるS波検層では、せん断波速度(以下、 V_s)が深度方向に細かく刻んで計測されていないため、観測地震波から求めた伝達関数を再現できない場合がある¹⁰⁾。そこで、鹿島共同火力を例に、速度構造の設定方法について示す。ダウンホール法によるS波検層で得られている V_s を初期値として、観測地震波の伝達関数を再現する速度構造をモンテカルロシミュレーションにより逆解析で新たに設定した。伝達関数の再現状況を図-3に示す。伝達関数は再現シミュレーション対象地震とは別に観測された別の弱震観測記録(最大加速度 10cm/s^2 程度以下)から算定した。図中の細実線が弱震記録から求めた伝達関数、その伝達関数のピークの平均

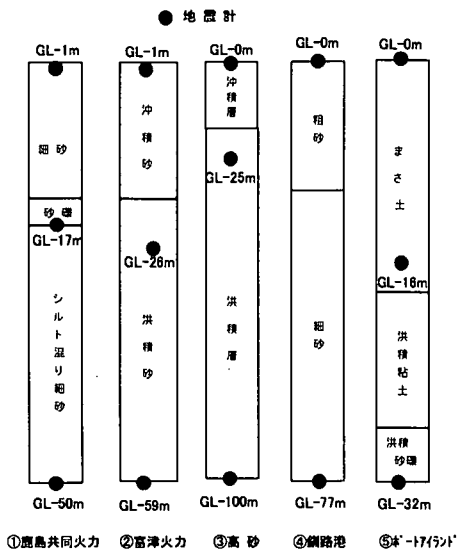


図-1 現地アレー観測地点の地盤構成および地震計設置位置

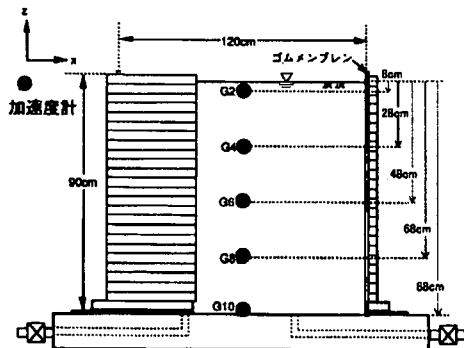


図-2 土槽震動実験装置の概要

が↓, S波検層の V_s による伝達関数が太点線, 逆解析で設定した V_s による伝達関数が太実線である. 逆解析で設定した V_s 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 V_s 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おり再現状況が良好ではない. ②富津火力, ④釧路西港, ⑤ポートアイランドでも同様の手法で速度構造を逆解析で新たに設定した. 伝達関数は, ②富津火力では再現シミュレーション対象地震の初期微動部, ④釧路西港, ⑤ポートアイランドでは再現シミュレーション対象地震とは別に観測された弱震観測記録 (最大加速度 10cm/s^2 程度以下) から, 算定した. なお, ③高砂については, 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 V_s 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 V_s を与えた場合の観測地震波の再現状況は良好ではなかった¹⁰⁾.

b) 土槽震動実験

加震前に最大加速度 10cm/s^2 程度で弱震動させた場合の GL-8cm (加速度計 G2) と GL-88cm (加速度計 G10) の観測記録から伝達関数を求め, 土槽内の V_s 分布を (1) 式で仮定し, 伝達関数を再現するように速度構造を設定した. 初期値として与える V_{s1} は, 弱震動記録から求めた伝達関数の 1 次のピークの振

表-1 解析対象の現地アレー観測地点, 観測地震および液状化状況

| 対象地点 | 対象地震 | 観測最大加速度 | 地表面の液状化状況 |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------|
| ①鹿島共同火力 ⁴⁾ | 1989年2月19日 海洋型 | 100 (cm/s^2) | 液状化していない |
| ②富津火力 ⁵⁾ | 1992年2月24日 海洋型 | 180 (cm/s^2) | 液状化していない |
| ③高砂 ^{6), 7)} | 1995年1月17日 兵庫県南部地震 内陸型 | 198 (cm/s^2) | 液状化していない |
| ④釧路西港 ⁸⁾ | 1993年1月15日 北海道釧路沖地震 海洋型 | 468 (cm/s^2) | 液状化していない |
| ⑤ポ-アイランド | 1995年1月17日 兵庫県南部地震 内陸型 | 423 (cm/s^2) | 液状化した |

表-2 解析対象の土槽震動実験, 入力地震波および液状化状況

| 対象実験 | 入力地震波 | 観測最大加速度 | 液状化状況 |
|-----------------------|---------------------------------|-------------------------|-------|
| ⑥土槽震動実験 ⁹⁾ | 1983年1月17日 日本海中部地震 (時間軸を1/4に縮尺) | 153 (cm/s^2) | 液状化した |

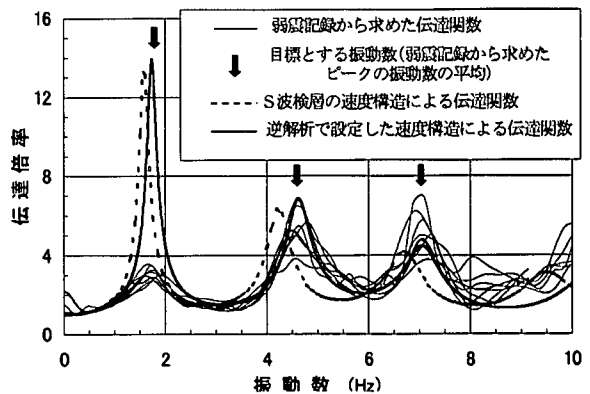


図-3 伝達関数 (鹿島共同火力)

動数から算定した土槽地盤全体での平均 V_s である. 逆解析では, この V_{s1} を調整しながら, 伝達関数を再現するように速度構造を設定した.

$$V_{s2}/V_{s1} = (\sigma_{m2}' / \sigma_{m1}')^{0.25} \quad (1)$$

V_{s2} : 任意の深度の V_s

V_{s1} : 土槽地盤中心深度 (GL-44cm) の V_s

σ_{m2}' : 任意の深度の有効拘束圧

σ_{m1}' : 土槽地盤中心深度 (GL-44cm) の有効拘束圧

(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最小の誤差で再現するようにMDMモデルのパラメータ^{1), 2), 3)}を決定した. 例として, ポートアイランドのまさ土, 土槽震動実験の豊浦標準砂のMDMによる再現状況を修正R-0モデルと合わせて図-4, 図-5に示す. 剛性低下率の試験データが○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モデルではひずみの

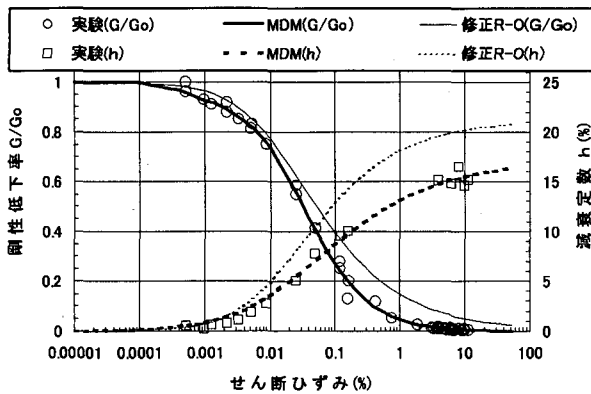


図-4 MDMモデル, 修正R-Oモデルによるひずみ依存曲線の再現状況 (ポートアイランド, まさ土)

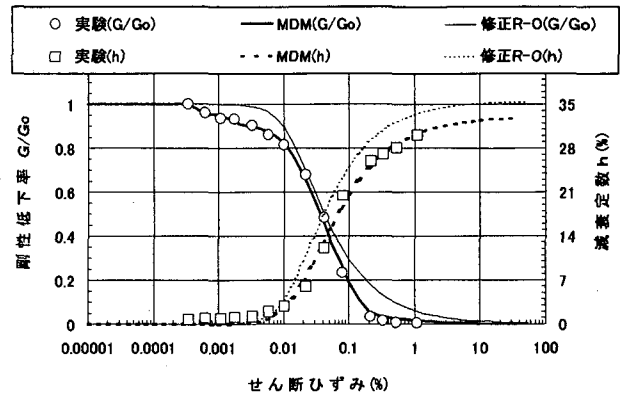


図-5 MDMモデル, 修正R-Oモデルによるひずみ依存曲線の再現状況 (豊浦標準砂)

広い範囲に渡っての再現状況は良好ではない。また、MDMモデルの拘束圧依存性を考慮して、参照ひずみ (以下、 γ_r)^{1), 2), 3)}を(2)式により、深度ごとに設定した。

$$\gamma_{r2} / \gamma_{r1} = (\sigma_{m2}' / \sigma_{m1}')^{0.5} \quad (2)$$

- 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観測地震波の再現状況は良好ではなかった。

(3) 解析メッシュサイズ, 積分時間刻み, レーリー減衰

解析メッシュサイズは、現地アレー地震観測の再現では1m, 土槽震動実験の再現では2~3cmとした。

積分時間刻みは、現地アレー地震観測の再現では0.002秒, 土槽震動実験の再現では0.0005秒とした。

解析では、地盤の履歴減衰のほか、解の安定性のため、剛性比例型のレーリー減衰を考慮した。その定数は0.0005である。

なお、紙面の都合で割愛するが、解析条件の詳細については、釧路西港では参考文献11), 土槽震動実験では参考文献12)を参照されたい。

4. 解析結果

加速度時刻歴波形, フーリエスペクトルの再現状況を図-6に示す。実線が観測, 点線が解析である。6地点のどのアレー観測記録においても、観測記録と解析結果は良く一致している。紙面の都合で割愛するが、MDMのほか、等価線形解析, 振動数依存等価線形解析, 修正R-Oモデル依存非線形全応力解析の3手法でも解析を実した。観測地震波の最大加速度が100cm/s²以下の鹿島共同火力の場合には4手法いずれにおいても良好な再現結果が得られているが、その他の地点でのアレー観測記録の再現状況は、MDM以外の3手法では良好ではなかった¹³⁾。

5. まとめ

6つの実地盤地震応答アレー観測記録を対象に行った再現シミュレーション解析の結果についてまとめる。

(1) 地盤の剛性と減衰のひずみ依存性を高精度に再現可能なMDMモデル依存非線形全応力解析によれば、地盤が液状化しなかった場合から地盤が極めて著しい液状化を呈した場合まで、加速度時刻歴波形, 加速度フーリエスペクトルを良好に再現できた。

(2) 速度構造, 地盤の非線形性, 解析メッシュサイズ, 積分時間刻みの解析条件をいずれの地点においても同一の方法で設定し、アレー観測記録を良好に再現できている。よって、本稿で示すMDMモデル依存非線形全応力解析の信頼性, 解析条件の設定方法の妥当性が確認された。

参考文献

- 1) 熊崎幾太郎, 杉山武, 上田稔: Hysteresis Model Considering Shear-Strain Dependency of Fractal Dimension and Momentary Deformation Modulus, Proceedings of International Association for Mathematical Geology, pp. 602-607, イタリア, 1998年10月。
- 2) 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年9月。
- 3) 熊崎幾太郎, 上田稔: 液状化地盤応答解析が可能な非線形全応力モデルによる乾燥砂と飽和砂の要素シミュレーション, 第56回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第三部門, 2001年10月。
- 4) 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。
- 5) LNG地下タンク躯体の構造性能照査指針, 土木学会, pp85-91
- 6) 副田悦生, 玉井秀喜, 仲津直之, 竹澤諒一郎, 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回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 273-276, 1999年7月。
- 7) 強震動アレー観測 No. 3, (財) 震災予防協会, 1998年3月。
- 8) 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, pp. 115-131, 1995. 3。
- 9) 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, pp. 1201-1204, 1993年。
- 10) 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回地震工学研究発表会, 2001年8月。
- 11) 上田稔, 熊崎幾太郎, 山崎浩之, 恒川和久: MDMモデル依存非線形全応力解析による北海道釧路沖地震のアレー観測記録の再現と液状化判定, 第26回地震工学研究発表会, 2001年8月。
- 12) 上田稔, 熊崎幾太郎, 今枝康博, 恒川和久, 福武毅芳: いくつかの全応力地震応答解析による液状化土槽震動実験アレー観測記録の再現, 第36回地震工学研究発表会, 2001年6月。
- 13) 上田稔, 熊崎幾太郎, 恒川和久, 今枝康博: MDMモデル依存非線形全応力解析によるいくつかの実地盤応答アレー観測記録の再現, 第36回地震工学研究発表会, 2001年6月。

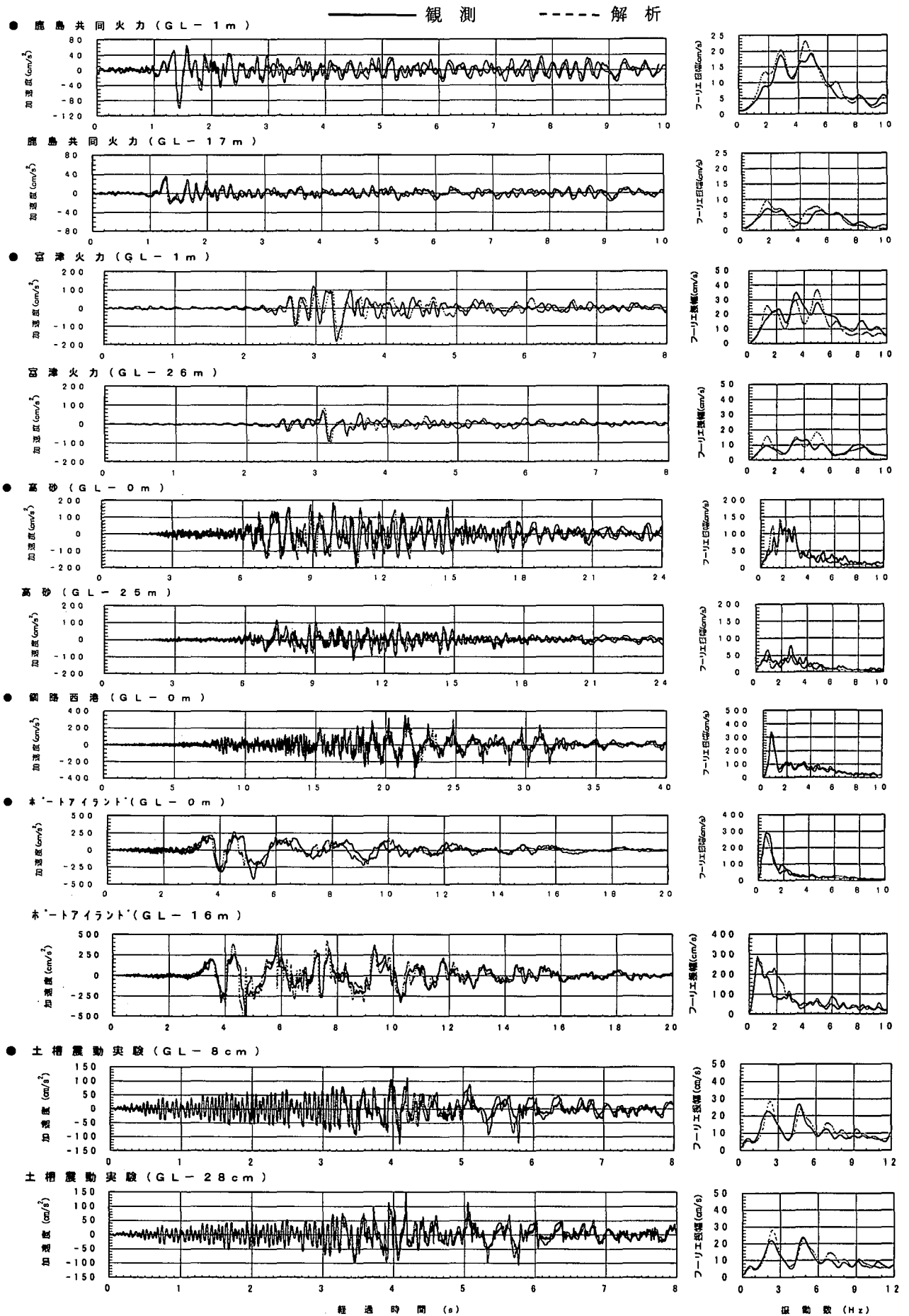


図-6 加速度時刻歴波形，加速度フーリエスペクトルの観測と解析の比較
(5地点の現地アレー地震観測，1つの土槽震動実験)