

液状化サイトにおけるアレー観測記録を用いた 地盤履歴復元力特性の等価線形的同定

三神厚¹・江川智之²・澤田勉³

¹徳島大学工学部助手 建設工学科
(〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

E-mail: amikami@ce.tokushima-u.ac.jp

²和歌山県技師(元徳島大学大学院生) (〒640-8585 和歌山県和歌山市小松原通1-1)

E-mail: tomoyuki-1013@ezweb.ne.jp

³徳島大学工学部教授 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

E-mail: sawada@ce.tokushima-u.ac.jp

本研究は土の非線形・非定常性が顕著に現れた強震アレー観測記録を用いて、当該地盤の動特性をすべての深さについて一括して等価線形的に同定したものである。兵庫県南部地震の際に神戸ポートアイランドで観測された鉛直アレー観測記録は、土の液状化の影響を含んだ大変貴重な記録であるが、モデル誤差やノイズの影響を排除し、かつ非線形・非定常記録を取り扱うことのできる逆解析手法が必要である。本研究では、当該地盤を多自由度系でモデル化した上で繰り返し型拡張カルマンフィルターを適用することによって、深さ方向に非線形レベルの異なる地盤の履歴復元力特性を良好な精度で、かつ一度に同定することが可能となった。

Key Words : Kalman filter, system identification, borehole array, liquefaction, equivalent-linear identification

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震の際、ポートアイランドに設置された鉛直アレー観測システムによって強震記録が得られた。ポートアイランドでは地震時にほぼ全域にわたって大規模な液状化が発生し、顕著な地盤沈下やライフライン施設の甚大な被害がみとめられた。このことから、ポートアイランドで観測された鉛直アレー強震記録は顕著な液状化の影響が含まれた大変貴重な記録であることが推測される。地盤の大ひずみ領域における土の動特性はこれまで室内実験や数値解析による検討が行われているが、非常に複雑なため未だ十分に解明されていない。そのためポートアイランドで観測された強震記録を用い、逆解析手法によって土の動特性を解明することは大変意義深い。

これまで、実地震観測記録を用いて液状化地盤の地盤特性を評価する様々な取り組みがなされている。例えば、Zeghalら^{1), 2)}は、1987年のElmore Ranch地震およびそれに続くSuperstition Hills地震の際に観測された加速度記録と間隙水圧記録を用い、Abdel-Ghaffar and Scott^{3), 4)}の手法を適用して当該地盤の地

震時挙動の同定を行った。この方法はダムを等価な非線形1自由度系で置き換えた時の慣性力と履歴復元力のつりあいから履歴復元力特性を推定するもので、天端とアバットで観測された加速度記録を直線補間している。また、ポートアイランドで観測された強震記録を用いて地盤の動特性を解明しようとする研究についても多くある。Zeghalら²⁾、Elgamelら⁵⁾、風間ら⁶⁾は、Koga and Matsuo⁷⁾によって提案された簡便な手法を強震観測記録に適用し、土の応力-ひずみ曲線を求めている。この方法は、Abdel-Ghaffar and Scottの手法と同様、観測点間の地盤の加速度を直線分布で近似し、差分的な方法によって地盤の履歴復元力特性を求めるものである。神山ら⁸⁾は差分的な方法によって実観測記録からせん断応力、せん断ひずみの時刻歴を求め、それにコンプレックスエンベロップの概念を導入し、せん断剛性率や減衰比の非定常変動を示した。吉田ら⁹⁾は土の非線形モデルにマルチニリアを仮定した上で拡張カルマンフィルターを適用し地盤の動特性の逆解析を行っている。これらのうち、カルマンフィルターによる方法は、観測記録に含まれるノイズやモデル誤差の影響を取り除くことができる手法として非常に有

効である．

このような観点から，Mikami and Sawada¹⁰⁾は，ポर्टアイランドの地表から16mまでの地盤を線形1自由度系でモデル化し，それにローカルな繰り返しを伴う繰り返し型拡張カルマンフィルターを適用して地盤の履歴復元力を等価線形的に求めている．本研究はこの手法を多自由度モデルに発展させたものである．これにより，ノイズやモデル誤差が含まれ，かつ非線形・非定常な挙動を示す液状化地盤に対し，深さ方向に非線形レベルの異なるすべての層における地盤の履歴復元力を一度に同定することが可能になる．ここでは，ポर्टアイランドの鉛直アレー観測地点の地盤を3自由度の等価線形系でモデル化し，それに前述の繰り返し型拡張カルマンフィルターを適用して，当該地盤における地盤の履歴復元力を求め，考察を加えた．

2．同定の手順

(1) 当該地盤のモデル化

ここでは，鉛直方向の $n+1$ 点に地震計が設置されているものとして，解析モデルを構築する．カルマンフィルターを多自由度系に適用する場合，各自由度の位置において観測記録が必要となるので，ここでは各地震計の埋設深さに自由度を有する多自由度モデルを構築する．最も深いところに設置された地震計の位置を多自由度系の基部と考え，そこに地震動が入力された場合の，それより上の n 点における応答を出力として用いる．したがって， $n+1$ 点に地震計が設置されている地盤は n 自由度モデルで表現されることになる．本研究では，多自由度系のパラメーターのうち質量については同定の対象とせず与えるものとし，ばねおよび減衰について同定を行う．運動方程式は以下のように表わされる．

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} \quad (1)$$

ここで， $\{x\}$ =それぞれ各自由度の位置における基部からの相対変位ベクトル， $\{x_g\}$ =モデル基部における絶対変位ベクトル， $[M]$ ， $[C]$ ， $[K]$ =それぞれ質量マトリックス，減衰マトリックス，剛性マトリックスである．

これに対して，復元力が非線形で表される場合には，運動方程式は以下ようになる．

$$[M]\{\ddot{x}\} + \{Q(\dot{x}, x)\} = -[M]\{\ddot{x}_g\} \quad (2)$$

これらを等置すると，非線形履歴復元力は以下のようになる．

$$\{Q(\dot{x}, x)\} = [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} \quad (3)$$

本研究では，上式に基づいて地盤の履歴復元力の

同定を等価線形的に行う．一般に鉛直アレーを構築して地震観測を行っている場合，地震計の深さ方向埋設間隔は一様でなく，また逆解析の用途に対して必ずしも十分密に設置されているとは言えない．そのため，集中質量を用いると質量のバランスが悪く可能性があり，また地盤密度の分布を一定と仮定するならば，地震計設置位置を含む深さ方向の幅広い領域において水平方向の加速度分布を一様であると仮定していることになる．そのため，地盤の一部が液状化し，水平方向加速度の深さ方向分布が急変する可能性がある地盤のモデル化には大きな誤差を与える恐れがある．そこで本研究では，地震計間の変位関数に1次式を仮定した整合質量マトリックスを用いることにした．この場合，Zeghalや風間らと同様，深さ方向に対し，地震計間において加速度の直線分布を仮定することになる．

要素整合質量マトリックス $[m_{ij}]$ は以下のように表される．

$$m_{ij}^k = \int_0^{H_k} \rho_k(z) N_i(z) N_j(z) dz \quad (4)$$

ここで， $\rho_k(z)$ ， H_k は要素 k における地盤密度分布および層厚である． $N_i(z)$ ， $N_j(z)$ は要素の変位関数で z を要素上端から下方へとり以下のように表される．

$$N_i(z) = 1 - \frac{z}{H_k} \quad (5), (6)$$

$$N_j(z) = \frac{z}{H_k}$$

(2) 状態空間表現

(1)式で与えられる運動方程式を状態空間表現するにあたり，まず(1)式を線形加速度法によって解くと，以下の応答が得られる．

$$\{\ddot{x}(t+1)\} = [A]^{-1} \{-[M]\{\ddot{x}_g(t+1)\} - [C]\{a(t)\} - [K]\{b(t)\}\}$$

$$[A] = [M] + \frac{1}{2}\Delta t[C] + \frac{1}{6}\Delta t^2[K]$$

$$\{a(t)\} = \{\dot{x}(t)\} + \frac{1}{2}\Delta t\{\ddot{x}(t)\}$$

$$\{b(t)\} = \{x(t)\} + \Delta t\{\dot{x}(t)\} + \frac{1}{3}\Delta t^2\{\ddot{x}(t)\} \quad (7)-(10)$$

ここで Δt は時間刻みである．この式は時刻 t から $t+1$ への前進過程を表現するものであるが，(1)式に含まれる入力値は観測値であるからノイズが含まれる．ここでは加速度記録の段階でノイズを考慮し，除去する澤田の方法¹¹⁾を用いて，この入力ノイズの影響を除去する．この方法では，以下のように加速

度差分 $w(t)$ を導入する .

$$w(t) = \ddot{x}_g(t+1) - \ddot{x}_g(t) \quad (11)$$

この $\{w(t)\}$ は入力加速度がノイズを含まないとき , 正確な加速度差分となるが , ノイズを含むときには加速度差分にノイズが加わった量になる . この加速度差分を用いて , 時刻 t から $t+1$ への入力加速度 , 速度 , 変位の推移が以下のように与えられる .

$$\begin{aligned} \ddot{x}_g(t+1) &= \ddot{x}_g(t) + w(t) \\ \dot{x}_g(t+1) &= \dot{x}_g(t) + \Delta t \ddot{x}_g(t) + \frac{\Delta t^2}{2} w(t) \\ x_g(t+1) &= x_g(t) + \Delta t \dot{x}_g(t) + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{x}_g(t) + \frac{\Delta t^3}{6} w(t) \end{aligned} \quad (12)-(14)$$

システムノイズ $w(t)$ については以下の性質を持っていると仮定する .

$$\begin{aligned} E[w(t)] &= \{0\} \\ E[w^2(t)] &= V(t) \end{aligned} \quad (15), (16)$$

ここで $V(t)$ はシステムノイズの共分散行列であり , 次式より近似的に得られる .

$$V(t) = \frac{1}{T_a} \int_{t-T_a}^t w^2(u) du \quad (17)$$

ここで , T_a は平均化時間である .

解析モデルの各自由度における加速度 , 速度 , 変位ならびにすべてのばね定数 , 減衰係数を状態量にとると , 次の一般的な状態空間表現が得られる .

$$\{X(t+1)\} = G\{X(t)\} + \{\Gamma(t)\}w(t) \quad (18)$$

また各自由度における加速度 , 速度 , 変位を観測量にとると , 次の観測方程式が得られる .

$$\{Y(t+1)\} = [H]\{X(t)\} + \{v(t)\} \quad (19)$$

ここで , $[H]$ は観測行列 , $\{v(t)\}$ は観測ノイズベクトルで以下の性質を持つ .

$$\begin{aligned} E[\{v(t)\}] &= \{0\} \\ E[\{v(t)\} \cdot \{v(t)\}^T] &= [R(t)] \end{aligned} \quad (20), (21)$$

ここで $[R(t)]$ は観測ノイズの共分散行列である .

(3) 繰り返しを伴う拡張カルマンフィルター
(18)式に示されるシステム方程式は非線形状態方

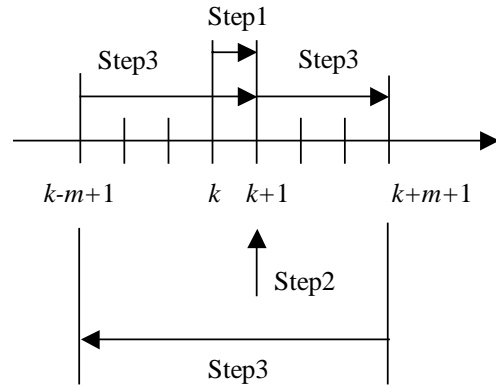


図-1 繰り返しを伴う拡張カルマンフィルター

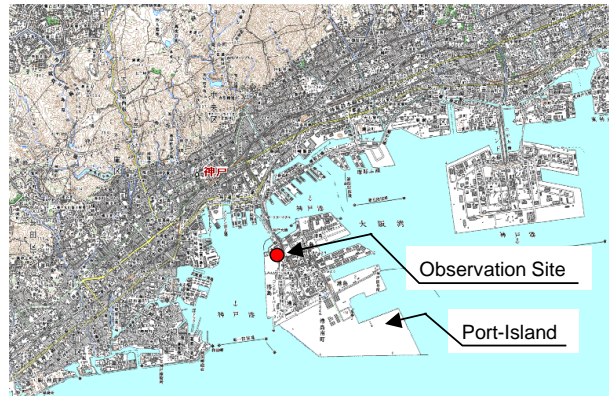


図-2 ポートアイランド

程式であるから , 拡張カルマンフィルターを適用する . 拡張カルマンフィルターは非線形なシステム方程式を近似的に線形化するものであるから , システムが強い非線形性を有する場合にはその誤差が大きくなる .

またここでの観測記録には液化化という極めて非定常性の強い現象が含まれている . これに対応する方法としては , 忘却係数を用いる適応型カルマンフィルターやローカルな繰り返しを行う繰り返し型カルマンフィルターがある . ここでは以下に示す繰り返し型の拡張カルマンフィルター¹²⁾を用いる .

繰り返しの方法を図-1に示す . まず時間ステップ k から $k+1$ にかけて通常の拡張カルマンフィルターをほどこし (Step1) , 次にローカルな時間ステップにおいて誤差共分散行列に重みを付加する (Step2) . それを用いて , 時間ステップ $k+1$ から時間軸の方向に m ステップ前進 , $2m$ ステップ後退 , さらに m ステップ前進し , 再び $k+1$ に戻る . この m の値は同定対象の非定常性の程度において変化させる . またローカルな繰り返しの回数 n を複数回にすることも可能であるが , ここでは $n=1$ 回とする . 以上によって , 非定常性が強い現象での同定が可能となる .

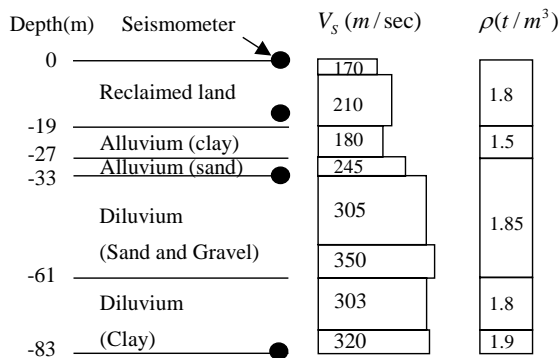


図-3 地震計設置位置

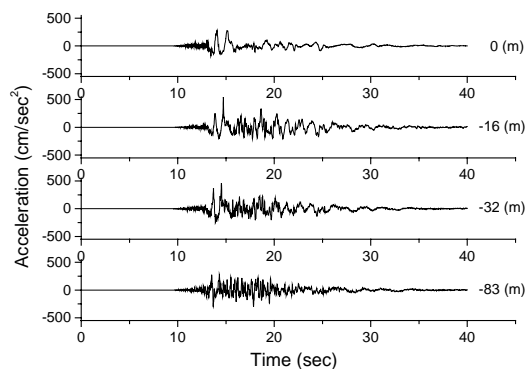


図-4 アレー強震観測記録(E-W成分)

3. 神戸ポートアイランドで観測された地震波形

(1) 観測位置と地震計の配置

ポートアイランドの強震観測システムは、神戸市によってポートアイランドの北西端に1993年に設置されたもので(図-2)、3成分地震計が図-3に示すように配置されている。図-3には、せん断波速度と地盤密度の深さ方向分布を併せて示している。地表および地表から16m、32m、83mの合計4箇所に地震計が埋設されており、地表から約19mまでが埋立土になっている。

(2) 観測された地震記録

観測された地震記録のうち、東西成分について図-4に示す。最大加速度については、深い方から303(gal), 462(gal), 543(gal), 284(gal)となっており、地表における値が他と比べ最も小さくなっている。最深部(GL-83m)の観測記録については、地震計の水平方向の向きが反時計方向に15~25度ずれていることが指摘されている。本研究では、Sugitoら¹³⁾が得た結論をもとに、22度の方向補正を行った。また記録には図-5に示すバンドパスフィルター(実線、フィルターAとして示す)をかけ、直流成分や

表-1 カルマンフィルターに用いるパラメーター

Parameters	considered value
Number of data for an iteration m	30
Number of local iteration n	1
Weighting factor r	1.1

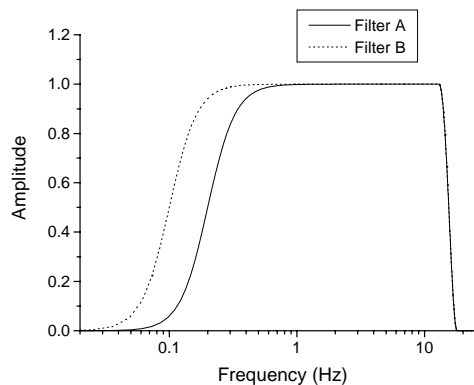


図-5 フィルター特性

空間的なエイリアジングを考慮した。

4. 逆解析の結果

(1) 同定を制御するパラメーター

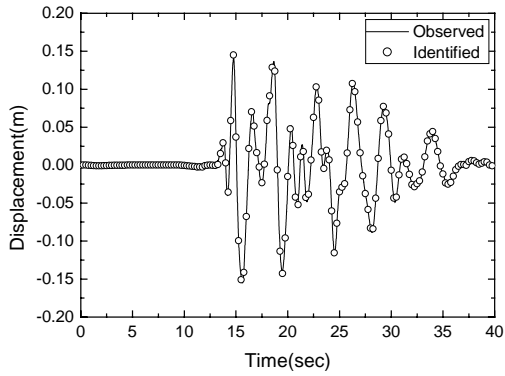
本研究において適用した繰り返し型拡張カルマンフィルターでは、その同定に関するパラメーターとして、ローカルな繰り返しに用いるデータ数 m 、ローカルな繰り返し数 n 、システムノイズの収束を抑えるための重み r があり、これらを適切に設定することが重要となる。ここでは、地表から16mの区間に本手法を適用した際の検討結果¹⁰⁾から、最も同定精度の高いパラメーターの組み合わせを用いることにする。表-1にそれらのパラメーターの値を示しておく。

(2) 変位記録の同定結果

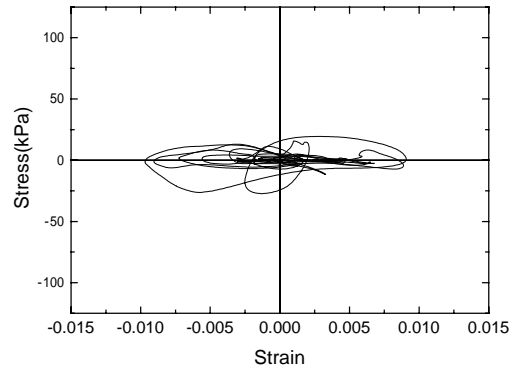
図-6にそれぞれの深さごとに変位記録の同定結果を観測記録とともに示す。同定した変位の大きさはいずれも観測結果とほぼ一致しており、同定が精度良く行われていることがわかる。

(3) 履歴復元力特性

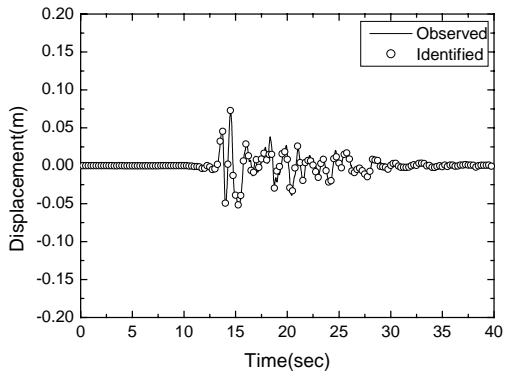
図-7には図-6のそれぞれに対応した履歴復元力特性を示す。ここでは応力-ひずみ曲線の形で示している。最深部(GL-83m~GL-32m)における応力-ひずみ曲線は他者に比べて傾きが大きく、またほぼ直線上の軌跡を描いており、剛性が大きく履歴減衰が小さいことがわかる。それより浅くなるに従い、応力-ひずみ曲線の傾きが小さくなり、またひずみが大きくなっている。



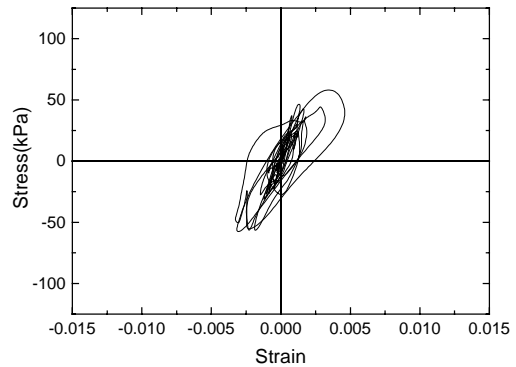
(1) 0-16 m



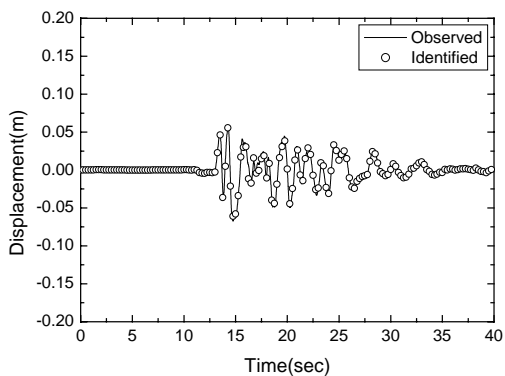
(1) 0-16 m



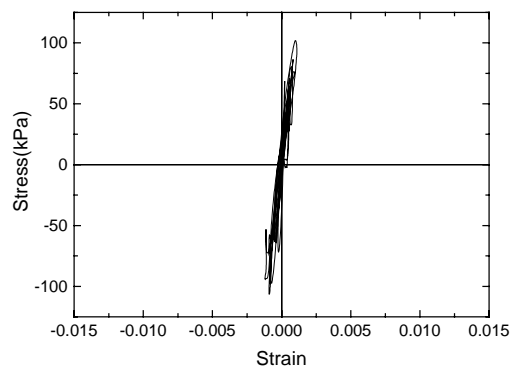
(2) 16-32 m



(2) 16-32 m



(3) 32-83 m



(3) 32-83 m

図-6 変位記録の同定結果

図-7 履歴復元力の同定結果

本研究では、(3)式によって等価線形的に履歴復元力特性の同定を行っているのだが、ここで、剛性 $[K]$ と減衰 $[C]$ の時間変化について考察する。図-8、9にばね定数、減衰係数の時間変化を深さごとに示す。図-8より深い所ほどばね定数が大きくなっている傾向は見られるが、いずれの値も大きくばらついており、また、時間帯によっては負の値になっている部分もある。減衰係数についても同様で、非常にばらつきが大きくなっていることが図-9から

わかる。これらの理由は、本研究の等価線形的同定手法において用いられる線形多自由度振動系では、そのばね定数、減衰係数が単なる履歴復元力を同定する過程における媒介変数的な意味しか持たないからである。

(4) 長周期成分の影響

以上の検討では、図-5に示すフィルターAを用いて観測記録の前処理を行ってきたが、低周波数領

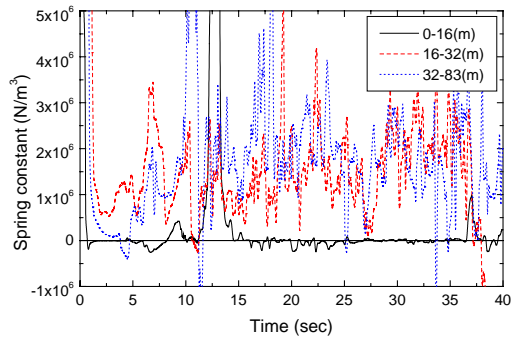
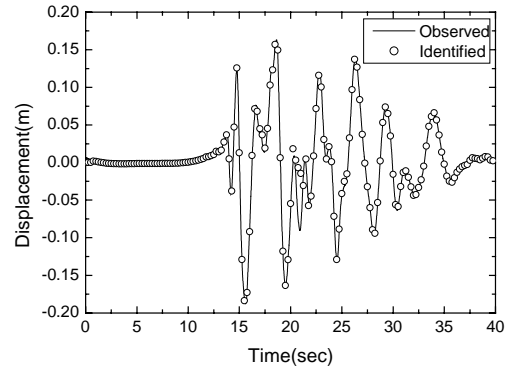


図-8 ばね定数の時間変化



(1) 0-16 m

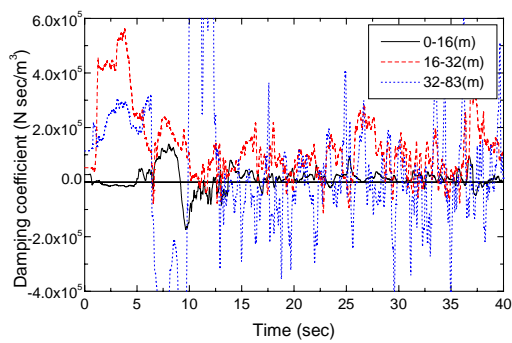
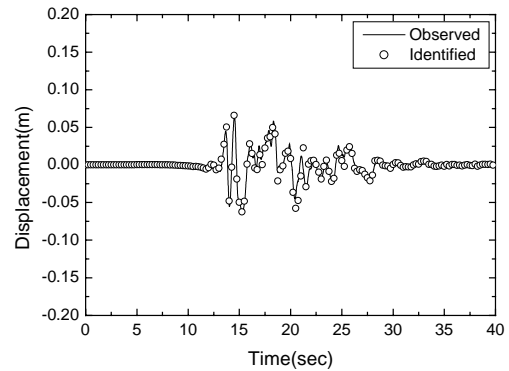
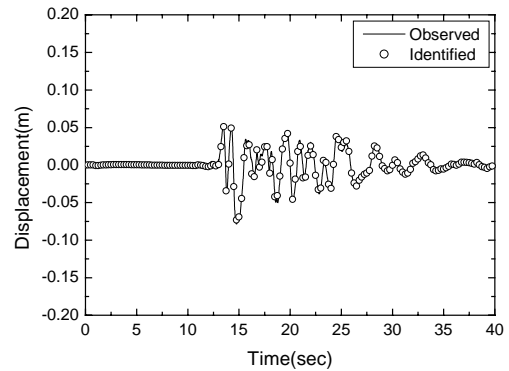


図-9 減衰係数の時間変化



(2) 16-32 m



(3) 32-83 m

図-10 履歴復元力の同定結果(フィルターB)

域のフィルターの設定によっては、液状化によって卓越した長周期成分を除去してしまう可能性がある。そこで、同図のフィルターBを用いて、解析を行った場合との比較を行う。図-10, 11に変位応答および履歴復元力の同定結果を示す。図-11を図-7と比較すると、履歴復元力の大きさについては概ね等しいが、発生する最大ひずみが0-16mの区間において、約20%ほど大きくなっていることがわかる。しかしながら、図-10を見ると、S波が到達する約13秒以前の部分に直流成分と思われる長周期成分が現れており、前述のせん断ひずみの増加分がそのまま液状化によって卓越した長周期成分の影響であるとは判断できない。液状化地盤において観測された強震記録のフィルター処理については、今後、より詳細な検討が必要である。

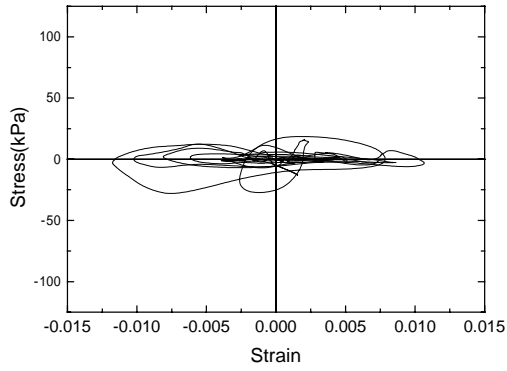
(5) 質量のモデル化による違い

前述のように、本研究では地震計間の変位関数に直線分布を仮定し、整合質量マトリックスを用いている。これは本研究のように、液状化層と非液状化が混在することが想定される場合に深さ方向の加速度分布をできるだけ滑らかにしようとしたためである。ここで試みに、集中質量マトリックスによる同定を行ってみる。このことは、一様な質量分布を仮定するならば質点に質量を集中させる範囲において加速度分布を一定とおくことに相当する。図-12に

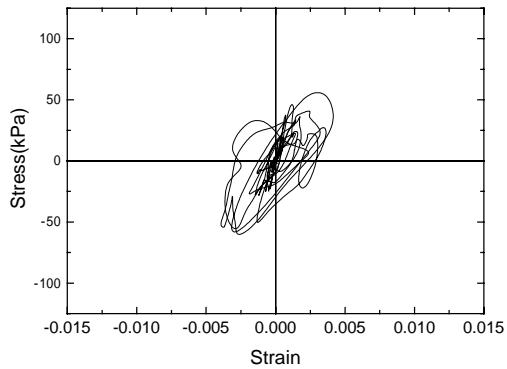
結果を示す。最も浅い部分(地表～GL-16m)において質量のモデル化による差異が生じているが、32m以深では顕著な差異は見られない。よって、32m以浅における水平方向加速度の深さ方向分布が、それ以深に比べ急激な変化を伴っている可能性がある。

5. 結論

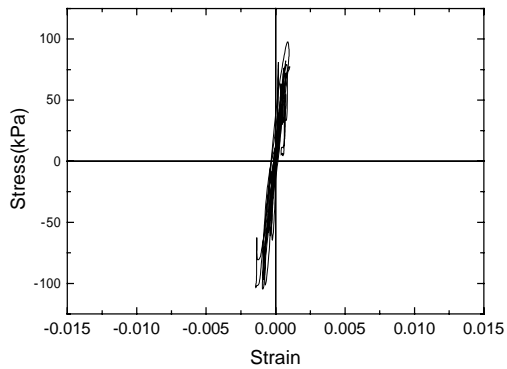
本研究では、兵庫県南部地震の際、甚大な液状化



(1) 0-16 m

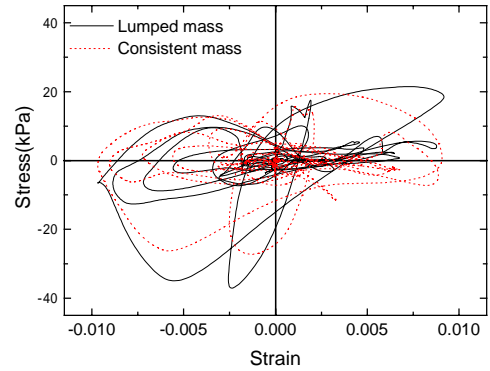


(2) 16-32 m

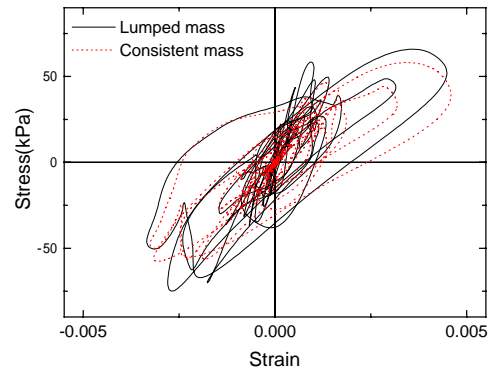


(3) 32-83 m

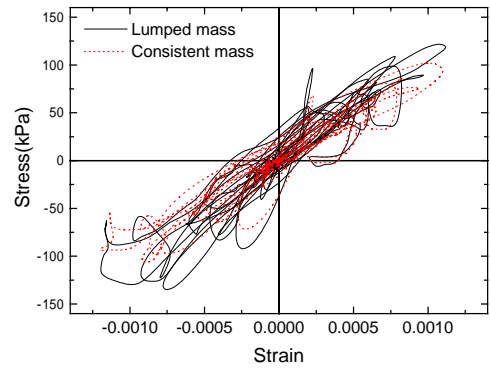
図-11 履歴復元力の同定結果(フィルターB)



(1) 0-16 m



(2) 16-32 m



(3) 32-83 m

図-12 履歴復元力の比較

被害を受けた神戸ポートアイランドにおいて観測された鉛直アレー強震記録を用いて、当該地盤における履歴復元力特性の等価線形的な同定を試みた。

地盤を多自由度等価線形モデルに置き換え、繰り返し型の拡張カルマンフィルターを適用したところ、深さ方向に非線形レベルの大きく異なる地盤の履歴復元力特性を一括して、かつ良好な精度で同定を行うことができた。

また当該地盤を多自由度系に置き換える際の質量

のモデル化について、集中質量によるモデル化と整合質量によるモデル化を比較したところ、地表面に近い地盤で顕著な差異がみられた。このことは地表付近において加速度分布を一定と置くことが適当でないことを意味しており、本研究のように液状化地盤の逆解析を行う時に集中質量を用いることは好ましくない。

謝辞：本研究を行うにあたり，関西地震観測研究協議会(座長：入倉孝次郎京都大学教授)により提供された強震観測記録を使用させて頂きました．深く感謝の意を表します．

参考文献

- 1) Zeghal, M. and Elgamal, A.: Analysis of site liquefaction using earthquake records, *J. Geotech. Engrg.*, ASCE, Vol.120, No.6, pp.996-1017, 1994.
- 2) Zeghal, M., Elgamal A-W. and Parra, E.: Identification and modeling of earthquake ground response II: site liquefaction, *Soil Dyn. Earthquake Engng.*, Vol.15, No.8, pp. 523-547, 1996.
- 3) Abdel-Ghaffar, A. M. and Scott, R. F.: Investigation of the dynamic characteristics of an earth dam, *Rep. No. EERL 78-02*, Earthquake Engineering Laboratory, Pasadena, Calif, 1978.
- 4) Abdel-Ghaffar, A. M. and Scott, R. F.: Shear moduli and damping factors of earth dam, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, Vol.105, No.12, pp.1405-1426, 1979.
- 5) Elgamal, A-W., Zeghal, M. and Parra, E.: Liquefaction of reclaimed island in Kobe, Japan, *J. Geotech. Engng.*, ASCE, Vol.122, No.1, pp.39-49, 1996.
- 6) 風間基樹，柳沢栄司，稲富隆昌，菅野高弘，稲垣紘史：アレー観測記録から推定した神戸ポートアイランドの地盤の応力 - ひずみ関係，土木学会論文集，No.547/III-36, pp.171-182, 1996.
- 7) Koga, Y. and Matsuo, O.: Shaking table tests of embankments resting on liquefiable sandy ground, *Soils Foundations*, Vol.30, No.4, pp.162-174, 1990.
- 8) 神山 眞，吉田 勝：鉛直アレー強震記録による地盤剛性ならびにダンピングの非定常変動の解析，土木学会論文集，No.647/I-54, pp.379-394, 2000.
- 9) 吉田郁政，栗田哲史：兵庫県南部地震の観測記録を用いたポートアイランド表層地盤の動特性の逆解析，土と基礎，Vol.43-9, pp.44-48, 1995.
- 10) Mikami, A., Sawada, T., and Ekawa, T.: Identification of non-linear and non-stationary soil properties during the 1995 Hyogoken-nanbu earthquake, *Soil Dyn. Earthquake Engng.*, Vol.23, No.4, pp.279-286, 2003.
- 11) 澤田 勉，平尾 潔，畠 一樹，成行義文，山村猛：拡張カルマンフィルタによる線形多自由度系の部分同定における入力ノイズ処理法，土木学会論文集，No.570/I-40, pp.175-186, 1997.
- 12) 澤田 勉，原井大輔，平尾 潔，成行義文，辻原治：カルマンフィルタによる非線形 1 自由度系の等価線形的同定，応用力学論文集，Vol.1, pp.99-108, 1998.
- 13) 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, *J. Structural Engng. Earthquake Engng.*, JSCE, No.531/I-34, 1996.

(2003. 6. 30 受付)

SIMULTANEOUS IDENTIFICATION OF TIME AND SPACE VARIANT SOIL PROPERTIES AT A LIQUEFIED SITE

Atsushi MIKAMI, Tomoyuki EKAWA and Tsutomu SAWADA

Time and space variant soil properties at a liquefied site were simultaneously identified in the time domain by using the borehole array strong motion records. At a liquefied site, soils show a wide variety of non-linear and non-stationary behavior along the depth. In this study, the instrumented soil was modeled by the equivalent linear MDOF system, and an Extended Kalman filtering algorithm with local iteration was employed for the identification of the soils. The identification process was successfully conducted, and the stress-strain relationships of the soils at the liquefied site were obtained from different depths all at once.