

# 地盤の非線形性を考慮したポートアイランド 基盤入力地震動の推定

酒井久和<sup>1</sup>・澤田純男<sup>2</sup>・土岐憲三<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 正会員 若築建設株式会社 (〒153 東京都目黒区下目黒二丁目 23-18), 京都大学大学院工学研究科博士後期課程

<sup>2</sup> 正会員 工博 京都大学助教授 京都大学防災研究所 (〒611 京都府宇治市五ヶ庄)

<sup>3</sup> フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

筆者らはこれまで、時間領域における基盤入力地震動の推定手法に関する基礎的研究を進めてきたが、この手法の現実問題へのアプリケーションとして、ポートアイランドのポアホールを対象に基盤入力地震動の分離を試みた。解析モデルは1次元の46集中質点系で、地盤の非線形性はHardin-Drnevichモデルを採用し、地盤定数は順解析で鉛直アレー記録と一致するよう決定した。まず、入射波としてEl Centro(1940)のNS波を採用した場合について、推定精度の検証を行った結果、本手法は観測波から上昇波を誤差数%と高精度に分離できることが確かめられた。さらに、ポートアイランド G.L.-83m において観測された地震記録を基に、基盤入力地震動の推定を行った。

**Key Words :** backward calculation, input ground motion, time domain, time integration, non-linear dynamic soil system, Port Island, array observation

## 1. はじめに

阪神・淡路大震災以後、震災時にポートアイランドで観測された鉛直アレー記録を用いて、逆解析による地盤物性値の同定や基盤入力地震動の推定が盛んに行われている<sup>1), 2), 3)</sup>等。しかし、これらはいずれも、地盤の非線形性を等価線形により近似する線形計算に基づいて行われていることから、推定された入射波を用いて、地盤の非線形性を考慮した時刻歴応答解析を行った場合に、当該深度における応答波形は観測波形と必然的に異なることになる。そこで、筆者らは近年、時間領域での基盤入力地震動の推定法に関する研究<sup>4)</sup>を進めてきたが、本研究では、この手法の入射波の分離問題に対する適用性について数値解析例による検証を行い、さらに、ポートアイランド G.L.-83m における観測波から基盤入力地震動の推定を試みる。

## 2. 計算法<sup>4)</sup>

観測波(絶対応答加速度)が、その観測点における相対応答加速度と基盤入力地震動の和で表されることから、時間領域における逆算手法の運動方程式は次式で与えられる。

$$[M']\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + \{Fs(x)\} = -[M]\{1\}\ddot{y}_k \quad (1)$$

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ は、質量、減衰マトリクス、 $\{Fs(x)\}$ 、 $\{x\}$ 、 $\{1\}$ は各々、復元力、相対変位、その成分が全て1のベクトル、 $\ddot{y}_k$ は質点 $k$ の絶対応答加速度で観測波とする。また、 $[M']$ は以式で示される。

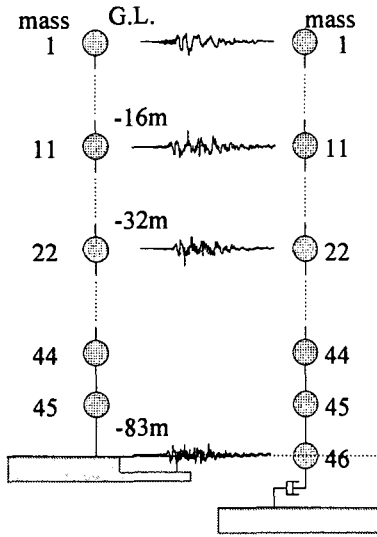
$$M'_{ij} = M_{ij} - \sum_{l=1}^N M_{il}\delta_{jk} \quad (2)$$

ただし、 $M_{ij}$ 、 $M'_{ij}$ はそれぞれ $[M]$ 、 $[M']$ の $i$ 行 $j$ 列成分を表し、 $\delta_{jk}$ はKroneckerのデルタ、 $N$ は自由度数である。

各質点の相対応答加速度は、式(1)を初期状態から逐次積分することで順次、決定され、基盤入力地震動は、質点 $k$ の観測波(絶対応答加速度)と相対応答加速度の差として算定される。ただし、時間積分はNewmarkの $\beta$ 法で行う。

上記の推定法には、各質点の応答加速度に剛体モードの計算誤差が発生しやすい特性があることから、さらに、次の評価関数を最小にする誤差の推定値 $\alpha^{n+1}$ を用いて、解の改良を行う。

$$J = \sum_i^N \sum_j^N M_{ij} (\ddot{x}_i^{n+1} + \alpha^{n+1} - \ddot{x}_i^n)^2 + \rho \sum_i^N \sum_j^N M_{ij} (\alpha^{n+1})^2 \quad (3)$$



(a) Forward analysis (b) Back analysis  
Fig.1 Analytical model

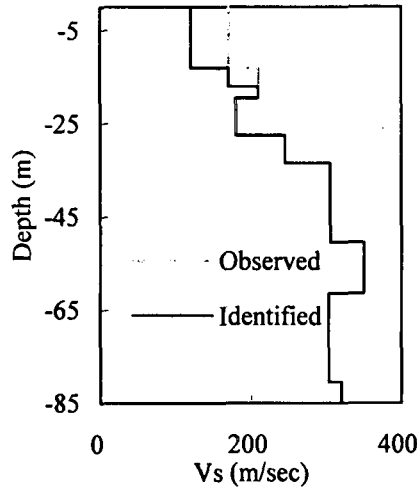


Fig.3.1 Observed and identified shear velocities

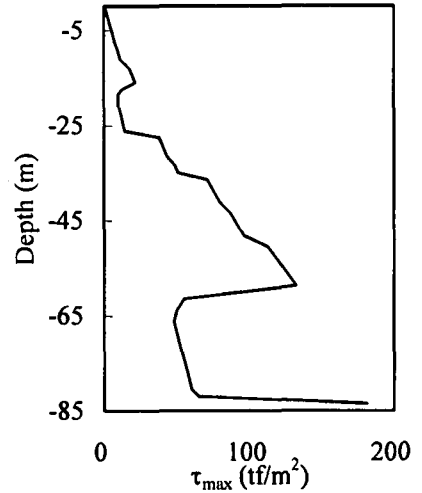


Fig.3.2 Identified maximum shear stresses

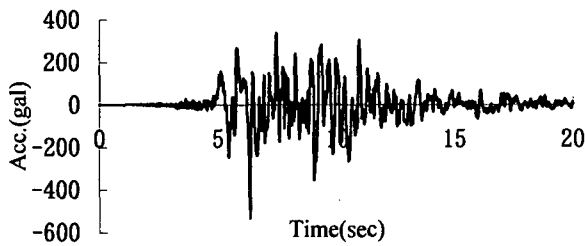
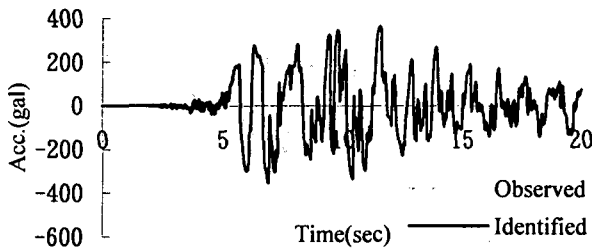
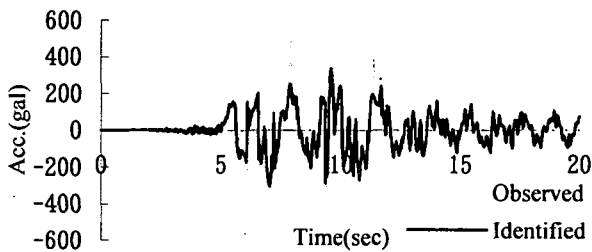


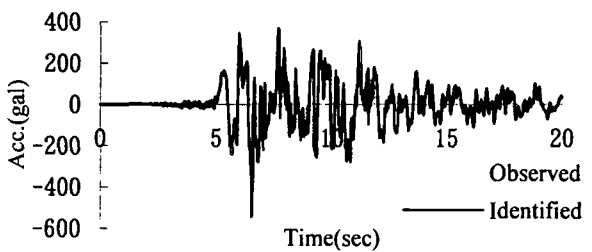
Fig.2 Observed acceleration (G.L.-83m)



(a) G.L.



(b) G.L.-16m



(c) G.L.-32m

Fig.4 Comparison between identified and observed accelerations

ただし、上付、下付数字はそれぞれ、タイムステップ数、質点番号を表し、 $\rho$  付きの相対応答加速度は各ステップにおける補正後の推定値であることを意味する。また、 $\rho$  は正の定数で計算誤差の抑制の程度に関する重み係数を表し、今回の推定では 1 を採用する。

### 3. 計算モデル

解析は、ポートアイランド北西部に神戸市開発局が設置したアレイ観測地点を対象にし、解析モデルは、1次元多質点系モデルで、地盤の非線形性は修正 Hardin-Drnevich モデルを採用する。以下にモデル化の手順を示す。

- (1) 観測点において、震災時に液状化したと考えられる埋土層以外の部分は、解析対象周波数を 20Hz とし、Fig.1(a)に示すように地表から基盤(G.L.-83m)までの地層を 45 の集中質点系に分割する。
- (2) 時刻歴応答解析を行い、地表面 (G.L.) の記録を除いた G.L.-16m, -32m における応答加速度が、観測記録に適合するように地盤パラメータせん断波速度  $V_s$  および最大せん断力  $\tau_{max}$  の調整を行う。この場合の計算条件を以下に示す。
  - (a) 底面境界は固定境界とする。
  - (b) 基盤入力地震動は、G.L.-83m の NS 成分の観測波を方向補正した波<sup>5)</sup> (Fig.2 参照) を上昇波+下降波 (E+F) として採用する。
  - (c)  $V_s$  は、埋土層部分を液状化の影響を考慮し、2~3 割低減するが、それ以深は PS 検層の結果をそのまま採用する。Fig.3.1 に  $V_s$  の PS 検層結果および同定値を示す。
  - (d)  $\tau_{max}$  は、粘着力、内部摩擦角を用いて、Mohr-Coulomb の破壊規準により決定する。ただし、粘

着力は土質試験により求められた値を2倍程度、内部摩擦角は  $N$  値を基に大崎の式から算定した値を約  $5^\circ$ 、大きく設定した。Fig.3.2 に同定された  $\tau_{max}$  の値を示す。

(e) 減衰は Rayleigh 減衰で、系の基本振動数および 10Hz において、埋土上層で  $h=5\%$ 、それ以外で  $h=1\%$  となるように設定する。

以上の計算条件で時刻歴応答解析を行った場合に、各観測点における絶対応答加速度および観測波を Fig.4(a)~(c) に示す。ただし、順解析は、時間積分法として Newmark の  $\beta$  法を採用し、計算時間間隔  $\Delta t = 1/1,000$  秒、積分パラメータ  $\beta = 1/4$  で行った。また、これ以降の順解析も同じパラメータで行う。(3) 逆計算を行う場合の解析モデルは、(1), (2) により決定した解析モデルを地盤定数はそのまま、底面の境界条件のみを Fig.1(b) に示すように粘性境界に変更する。この変更により、振動系への入射波は、E+F から 2E (上昇波の2倍) が対象となる。

#### 4. 解析精度の検証

逆算手法の実問題に対する適応性を検討する目的で、数値解析による解析精度の検証を行う。

まず、逆計算の準備段階として、Fig.1(b)の振動モデルに Fig.5.1 の El Centro(1940)の NS 成分を入射し、時刻歴応答解析による順解析で最下質点 46 の絶対応答加速度を求める。得られた応答加速度を Fig.5.2 に示す。

次に、本計算例ではこの絶対応答加速度が観測されているとして、入射波の推定を行う。したがって、推定波形の Target は、Fig.5.1 になる。解析パラメータとして、 $\Delta t = 1/1,000$  秒、 $\beta = 2$ 、式(3)の誤差制御パラメータ  $\rho = 1$  を用いて逆計算を行うことにより、Fig.5.3 に示す推定入射波が得られる。

Fig.5.3 を見る限りでは、推定波がほとんど Target と一致する程、高精度であることが分かる。ちなみに、この場合、Target の最大振幅に対する解析誤差の比は、最大 3.5% である。

さらに、推定精度の周波数特性を調べるため、Target と推定波のコヒーレンスと位相差を Fig.5.4, 5.5 にそれぞれ示す。図より、全周波数領域において、振幅、位相とも精度の良い推定が行えており、特に、低周波数領域で高精度であることが分かる。ただし、比較対象周波数は、入射波(Target)の計測時間間隔を考慮して、最大で 25Hz とする。

#### 5. ポートアイランド基盤入力地震動の分離

前章では、本逆算法が与えられた解析モデルに対し

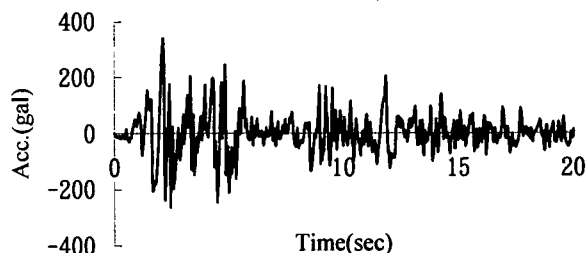


Fig.5.1 Input acceleration (target)

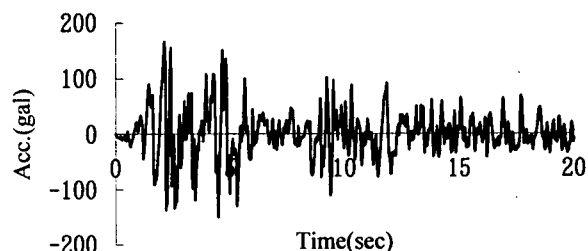


Fig.5.2 Absolute response acceleration at basement calculated by the forward analysis

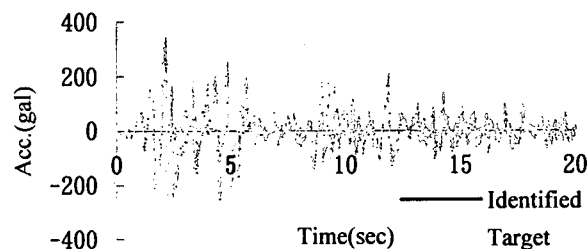


Fig.5.3 Identified input acceleration

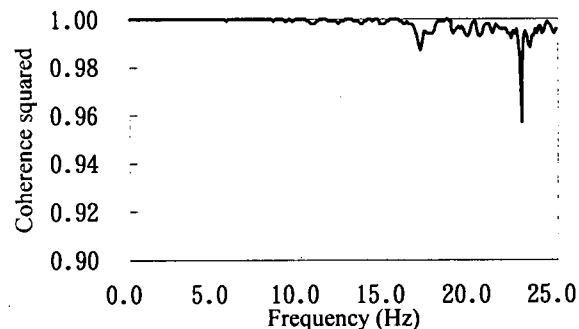


Fig.5.4 Coherence squared function

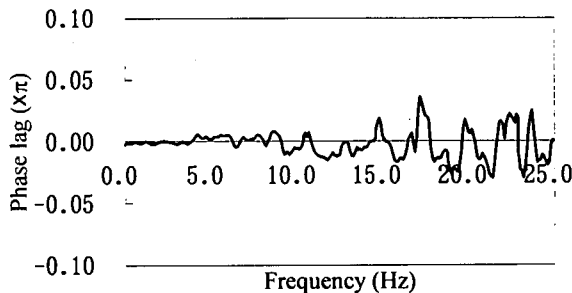


Fig.5.5 Phase lag function

て、基盤における観測波から入力地震動を高精度に分離できることを示した。ここでは、Fig.2 のポートアイランド G.L.-83m の観測波から上昇波の分離を行う。推

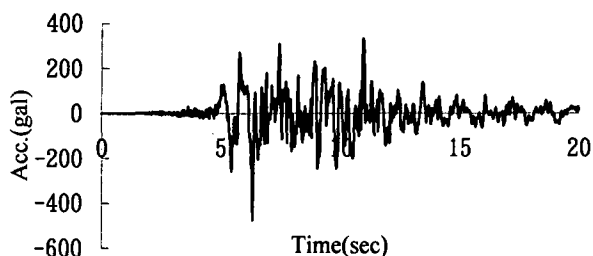


Fig.6.1 Identified upward wave at basement (E)

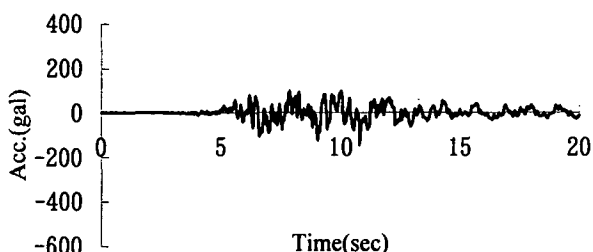


Fig.6.2 Calculated downward wave at basement (F)

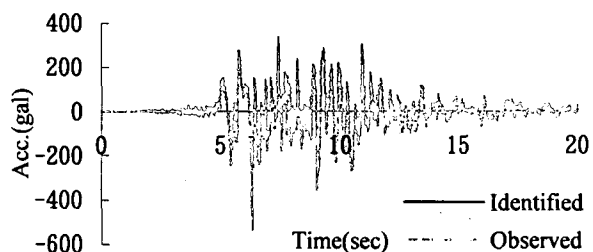


Fig.6.3 Comparison between observed acceleration and response acceleration by identified input motion (G.L.-83m)

定は、計算時間間隔  $\Delta t = 1/1,000$  秒、積分パラメータ  $\beta = 2$ 、誤差制御パラメータ  $\rho = 1$  の条件で行う。Fig.6.1, 6.2 にそれぞれ、算定された上昇波、下降波を示す。

この場合、基盤における観測波、および上昇波、下降波の最大加速度振幅は、それぞれ、536gal, 476gal, 145gal となる。

また、得られた基盤入力地震動を入力とした時刻歴応答解析を行い、基盤における観測波と応答加速度を比較することにより、逆計算の検証を行う。Fig.6.3 にそれぞれの加速度波形を示す。

Fig.6.3 より、観測波と応答加速度は、ほぼ一致しており、設定された地盤モデルに対して、高精度の入力地震動の推定が行えていることが分かる。ちなみに、この場合、観測波の最大振幅に対する解析誤差は最大 3.6% である。

## 6. まとめ

時間領域での逆算に基づく方法（計算誤差に関するペナルティ関数を用いた改良法）の実問題に対する適

用性を確かめるため、設定したポートアイランドの地盤モデルに対して、数値解析を実施し、以下の結論を得た。

- (1) El Centro(1940)のNS成分を数値解析例を行った結果、地盤の非線形性を考慮した復元力をもつ大自由度系に対しても、計算誤差が最大数%の精度で基盤入力地震動の分離が可能であった。
- (2) ポートアイランドにおける鉛直アレー記録を用いて、基盤における入力地震動の分離を行った。この場合、推定された入射波を用いた順解析により、基盤の応答加速度が、観測波とほぼ一致することが確かめられた。
- (3) (1), (2)の数値解析の結果、本逆算手法が大深度の観測地点における入射波を精度良く分離することができ、現実問題に対しても十分に適用可能であることが確かめられた。

最後に、本逆算手法を用いることにより、設定した地盤モデルに対する基盤入力地震動の高精度の分離は可能であるが、推定した入力地震動による応答を各深度での鉛直アレー記録とさらに合致させるためには、地盤特性を精度良く同定することが不可欠である。したがって、今後、非線形大自由度系に対しても適応可能なシステムパラメータの同定手法の開発が課題である。

## 参考文献

- 1) 吉田望・末富岩雄・中村晋・規矩大義：兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動，第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.117-124, 1996.
- 2) 江尻譲嗣・後藤洋三：ポートアイランド鉛直アレー地震観測記録を用いた基盤入射波分離の試み，土木学会第50回年次学術講演会，I-568，pp.1136-1137, 1995.
- 3) K.Sato, T.Kokusho, M.Matsumoto and E.Yamada: Nonlinear seismic response and soil property during strong motion, Special issue of soils and foundations, Japanese Geotechnical Society, pp.41-52, 1996.
- 4) 酒井久和・澤田純男・土岐憲三：時間領域での基盤入力地震動の推定法に関する基礎的研究，土木学会論文集，投稿中。
- 5) 関口宏二・杉戸真太・岡二三生・八嶋厚・田口洋輔・加藤要一：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，第1回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.109-116, 1996.