

ポートアイランドにおける時間領域での 基盤入力地震動の推定

酒井久和¹・澤田純男²・土岐憲三³

¹正会員 工博 若築建設株式会社 (〒153-0064 東京都目黒区下目黒二丁目 23-18)

²正会員 工博 京都大学助教授 京都大学防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

³フェロー 工博 京都大学教授 大学院工学研究科 (〒606-0000 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、本手法の現実問題への適用例として、1995 年兵庫県南部地震本震におけるポートアイランドのポアホール記録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 次元の集中質点系で、地盤の非線形性は双曲線モデルを採用した。まず、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 記録を基に基盤入力地震動の推定を行い、等価線形化手法と比較することにより、非線形解析に用いる基盤波の推定法として適していることが確かめられた。

Key Words : backward calculation, input ground motion, time integration, non-linear system, array observation

1. はじめに

地盤を含む構造物系の動的解析を行う場合には、基盤における入力地震動が必要であるが、その基盤入力地震動は、"SHAKE"⁽¹⁾に代表される周波数領域における手法で観測波を基にしばしば推定されている。この場合、地盤の非線形性は等価線形化手法により近似されるため、推定波を入射波とした非線形地盤応答解析で算定される観測点の応答加速度は、応力-ひずみ関係が異なることから、観測波と必然的に異なることになる。この、観測点における応答波形と観測波形の不一致という問題を解決するためには、非線形地盤応答解析の応力-ひずみ関係をそのまま用いて推定された基盤入力地震動を採用する必要がある。この目的を実現するため筆者らは、全応力モデルではあるが、時間領域で基盤入力地震動を推定する方法⁽²⁾ (以後、提案法と呼ぶ)を提案している。ただし、この計算法は計算誤差による解の発散性が強く、地表面を観測点とした場合の基盤入力地震動の推定法として実問題に適用するまでには至っていない。しかしその一方で、提案法には観測点の深度が深い場合に計算誤差が抑制される特性がある⁽³⁾ことから、地中における観測記録から基盤入力地震動を分離する問題には適用できると考えられる。そこで本研究では、ポートアイランドのアレー観測地点を対象としてその適用性について検証を行う。まず、解析方法の概略を説明する。ただし、提案法の

数値特性、解析パラメータの設定等、詳細は文献⁽²⁾を参照されたい。つぎに、解析に用いたポートアイランド地震観測地点の地盤モデルについて解説する。さらに、El Centro (1940) NS 波を用いて推定精度に対する検証を行う。最後に、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を推定し、等価線形化手法を用いて推定した基盤入力地震動と比較する。

2. 計算法⁽²⁾

(1)運動方程式の定式化

復元力が非線形である振動系の運動方程式は次式で与えられる。

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

ここに、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ はそれぞれ質量、減衰、剛性マトリクス、 $\{x\}$ は相対変位ベクトル、 $\{Q\}$ は非線形復元力の線形項との調整外力ベクトルで $\{x\}$ の関数である。 $\{i\}$ はその成分が全て 1 であるベクトル、 $\ddot{z}$ は基盤入力加速度である。また、ベクトルおよびスカラーの上付の添字 n はタイムステップ数、 $\cdot$ は時間に関する微分を意味する。

n ステップ目のある質点 k の絶対応答加速度成分 $\ddot{y}_k^n$ が測定されている場合を想定すると、質点 k に関して次の関係式が成立する。

$$\ddot{z}^n = \ddot{y}_k^n - \ddot{x}_k^n \quad (2)$$

ここで、式(2)を式(1)に代入し、整理すると次式が得られる。ただし、応答値の下付の添字は質点番号を示す。

$$[M']\{\ddot{x}\}^n + [C]\{\dot{x}\}^n + [K]\{x\}^n - \{Q\}^n = -[M]\{i\}\ddot{y}_k^n \quad (3)$$

ここに、 $[M']$ は次式で与えられる。

$$M'_{ij} = M_{ij} - \sum_{k=1}^N M_{ik} \delta_{jk} \quad (4)$$

ただし、 M'_{ij} 、 M_{ij} は、各々、 $[M']$ 、 $[M]$ の*i*行*j*列成分、 δ_{jk} はKroneckerのデルタ、*N*は自由度の数である。

(2)運動方程式の逐次積分方法

本逆計算では、運動方程式を逐次積分する際の時間積分法としてNewmarkの β 法³⁾を採用する。この場合、各応答ベクトル間で以下の関係が仮定される。

$$\{\dot{x}\}^{n+1} = \{\dot{x}\}^n + (1-\gamma)\Delta t\{\ddot{x}\}^n + \gamma\Delta t\{\ddot{x}\}^{n+1} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \{x\}^{n+1} = \{x\}^n + \Delta t\{\dot{x}\}^n + \frac{1}{2}\Delta t^2\{\ddot{x}\}^n \\ + \beta\Delta t^2(\{\ddot{x}\}^{n+1} - \{\ddot{x}\}^n) \end{aligned} \quad (6)$$

ただし、 Δt は解析ステップ間の計算時間間隔、 γ 、 β は各ベクトルの関係を決定づけるパラメータを表す。ここで、式(5)、(6)を式(3)の運動方程式に代入し、未知ベクトル $\{\ddot{x}\}^{n+1}$ について整理すると次式が得られる。

$$\begin{aligned} \{\ddot{x}\}^{n+1} = ([M'] + \gamma\Delta t[C] + \beta\Delta t^2[K])^{-1} \\ \left(-[M]\{i\}\ddot{y}_k^{n+1} + \{Q\}^{n+1} + [C](\{\dot{x}\}^n + (1-\gamma)\{\dot{x}\}^n) \right. \\ \left. + [K]\left(\{x\}^n + \Delta t\{\dot{x}\}^n + \left(\frac{1}{2} - \beta \right) \Delta t^2\{\ddot{x}\}^n \right) \right) \end{aligned} \quad (7)$$

以降順次、式(7)を式(5)、(6)に代入することで各応答が計算され、式(2)により基盤入力加速度が求められる。ただし、式(7)中の $\{Q\}^{n+1}$ は $\{x\}^{n+1}$ の関数であることから $\{Q\}^{n+1}$ が収束するまで繰り返し計算が必要になる。

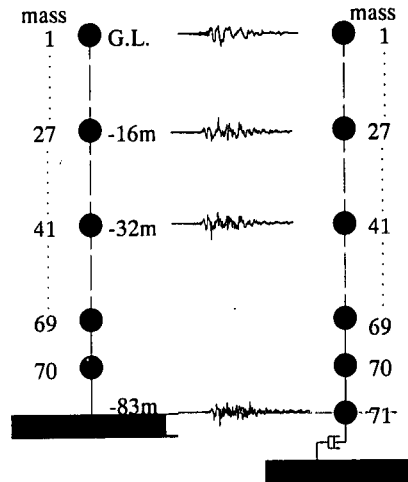
(3)ペナルティ関数による解の改良

上記の計算法は、解析中に計算誤差が増幅し易く、解の発散性が強いことから、解の改良を行う。

通常、計算誤差の最小化を行う場合には、各質点でそれぞれに計算誤差の推定を行う必要がある。しかし、本計算法では相対加速度に対して剛体モードの誤差が発生する特性を有することから、全質点に共通な誤差の推定値 α で式(7)の $\{\ddot{x}\}^{n+1}$ を次式のように補正し、*n*+1ステップ目における相対応答加速度の推定値とする。

$$\ddot{x}_i^{n+1} = \ddot{x}_i^{n+1} + \alpha^{n+1} \quad (8)$$

ここに、 α の上付数字はステップ数、下付数字は質点番号、 α 付きの相対応答加速度は各ステップにおける最終的な推定値であることを意味する。ただし、 α^{n+1} は次式の評価関数を最小にするよう決定する。



(a) Forward calculation (b) Backward calculation
Fig.1 Analytical model

$$J = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij} (\ddot{x}_i^{n+1} + \alpha^{n+1} - \ddot{x}_j^{n+1})^2 + \rho \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N M_{ij} (\alpha^{n+1})^2 \quad (9)$$

ここで、各質点の応答値の重み係数として質量マトリクスを用いている。また、 ρ 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す。

3. 地盤モデル

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⁴⁾を対象にして行う。解析対象とする周波数は20Hzまでとし、Fig.1(a)に示すように地表から基盤(G.L.-83m)までの地層を70の集中質点系にモデル化する。

地盤の構成関係は双曲線モデル⁵⁾を採用し、3つの観測点(G.L., -16m, -32m)において観測記録と順解析による応答加速度が近づくよう地盤パラメータの調整を行う。Fig.4に解析対象地点の*N*値、せん断波速度*V_s*ならびに解析に用いた単位体積質量*ρ*、最大せん断応力 τ_{max} 、減衰定数*h*を、Fig.2に各観測点における応答波形および観測波を示す。ただし、基盤入力動はG.L.-83mのNS成分の観測波を方向補正した波⁶⁾(Fig.3参照)を上昇波+下降波(E+F)として採用する。

ここで、双曲線モデルでは規準ひずみがパラメータのひとつとなるが、本解析では規準ひずみを最大せん断応力と最大せん断剛性の比 τ_{max}/G_{max} とし、 τ_{max} はMohr-Coulombの破壊規準に基づいて決定した。ただし、砂質土は、文献7)、8)で急速載荷時は緩速載荷時に比べて最大で10%、一般に1%から数%の強度増加を示されているが、数%の増加は内部摩擦角では1°程度で、推定精度に対して有意な値でないことから、*N*

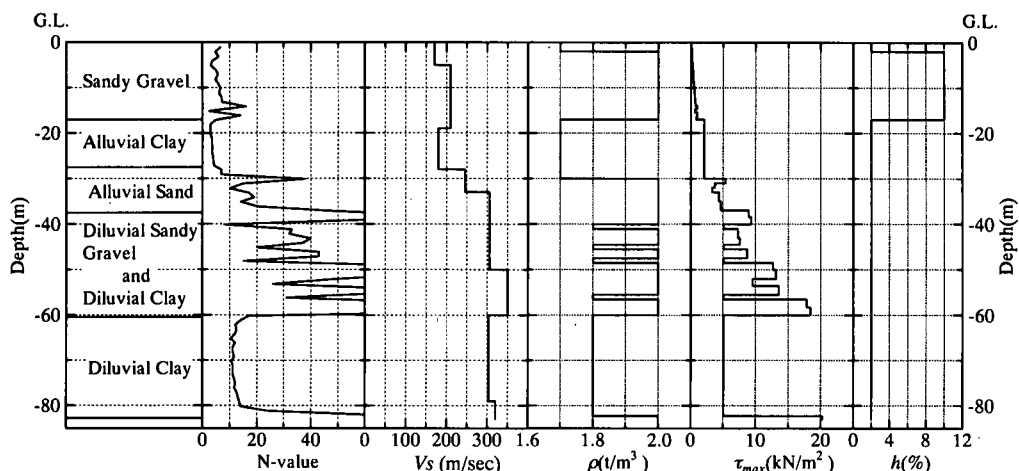


Fig.4 Measured N-value and shear velocity, and modeled unit mass, maximum shear stress and damping constant

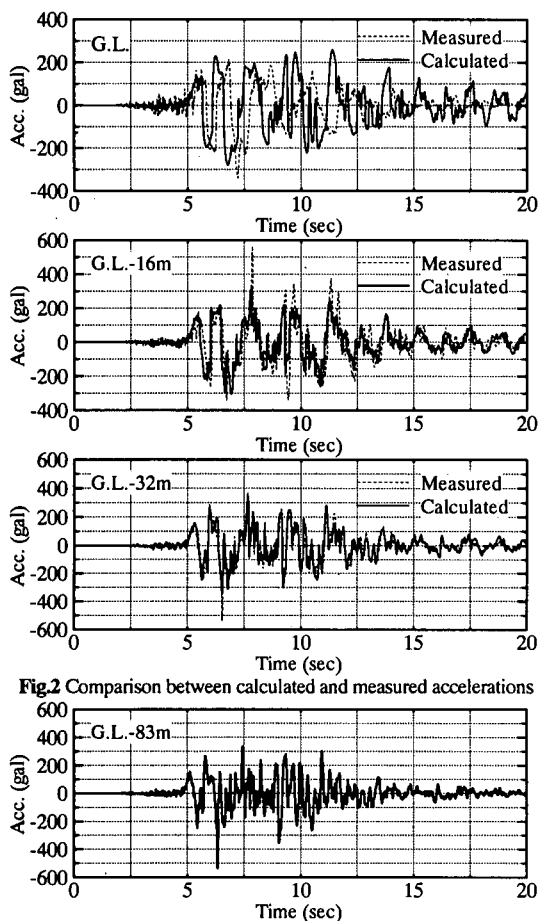


Fig.2 Comparison between calculated and measured accelerations

Fig.3 Measured acceleration (G.L.-83m)

値を基に大崎の式⁹⁾から算定した内部摩擦角をそのまま採用した。また、液状化したと推定される沖積砂層では、間隙水圧の上昇に伴ないせん断耐力が低下することを考慮して、 τ_{max} の値を50%に低減した。一方、粘性土については、文献10)で一般的に急速載荷時には緩

速載荷時に比べて破壊強度がかなり大きくなることから、粘着力を土質試験値¹¹⁾の2倍とし、G.L.-60m以浅の洪積層では試験値がないことから、-60~-82mの洪積層と同一の粘着力とした。ただし、上記の地盤パラメータのうち、土の粘着力、液状化土層の τ_{max} に関しては、土質試験値等に対する倍率の論拠が乏しいことから、これらを変数として観測点での応答波形が観測波形と近くなるよう試行錯誤を行い、上記の倍率を得た。また、減衰はRayleigh減衰で系の基本振動数(0.8Hz)と10Hzにおいて所定の値となるよう設定した。順解析は時間積分法としてNewmarkの β 法を採用し、計算時間間隔 $\Delta t=1/1,000$ 秒、 $\beta=1/4$ とする。以降、順解析では同じ値を用いる。

ここで、本論文の論旨は大自由度非線形系に対する解析手法の適用性の検証にあり、ポートアイランドの基盤入力地震動を精度良く推定することでない。したがって、設定された地盤パラメータは、上記のように試行錯誤により設定したもので、実地盤の応答を十分な精度で再現し得たものではないことに注意されたい。

また、Fig.2の観測記録と応答波形のかい離は、主に地盤のモデル化における誤差によるものであるが、推定される入射波は当然、このモデル化誤差の影響を受けることになる。ここで、本解析は全応力解析であり、埋立土層の液状化の影響を精度良く再現することは難しいことから、Fig.2に示すように、観測記録と応答波形のかい離がG.L.では非常に大きく、埋立土層のモデル化が不十分なものとなっている。しかし、深度が大きいほど観測記録と応答波形のかい離は小さく、かつ、G.L.-32mにおいてかい離が小さいことから、この液状化層のモデル化誤差がG.L.-83mにおいて分離される入射波に及ぼす影響は小さいと考えられる。

つぎに、逆計算を行う場合の解析モデルは、地盤定数はそのまま底面の境界条件のみをFig.1(b)に示す粘

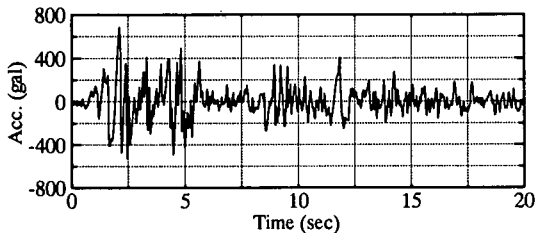


Fig.5.1 Incident acceleration (Target)

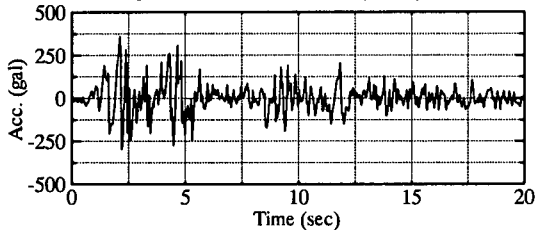


Fig.5.2 Absolute response acceleration at basement calculated by the forward calculation (Assumed as the measured record)

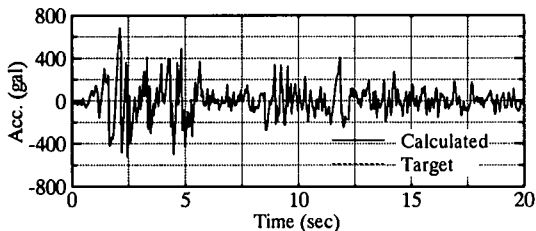


Fig.5.3 Identified incident acceleration

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。

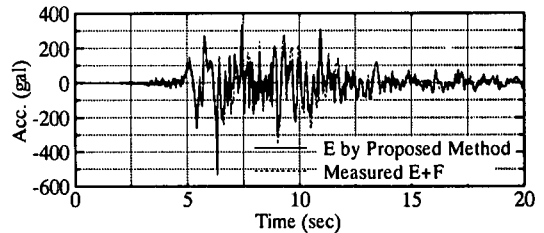
また、後で比較のために等価線形手法に基づく基盤入力動の推定を行うが、この場合の地盤条件は末富・吉田¹²⁾にしたがって、埋め土部分は吉田¹³⁾によるモデル化、沖積層、洪積層は神戸市開発局による地盤調査結果⁴⁾に基づいた。詳細は文献⁴⁾, 12), 13)を参照されたい。ちなみに、この地盤モデルでは地層を 46 層に分割し、各地層毎に $G-\gamma$, $h-\gamma$ 曲線を設定している。

4. 推定精度の検証

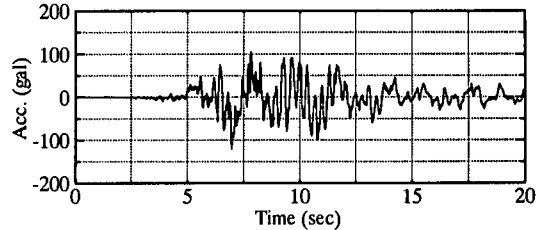
提案法の基盤入力動の分離問題に対する適応性を検討する目的で、数値解析による解析精度の検証を行う。

まず、Fig.1(b)の地盤モデルに El Centro(1940)の NS 成分の振幅を 2 倍にしてダッシュポットの下端から入射し (Fig.5.1 参照), 時刻歴応答解析による順解析で最下質点 71 の絶対応答加速度を求める。Fig.5.2 に得られた応答加速度を示す。

つぎに、本計算例ではこの絶対応答加速度が観測されているものとして、入射波の推定を行う。計算には $\Delta t=1/1,000$ 秒, $\beta=2$ ²⁾, $\rho=1$ を採用する。Fig.5.3 に入射波の推定波形を示す。ここで、最大解析誤差を次式



(a) Upward wave (E)



(b) Downward wave (F)

Fig.6 Calculated wave at basement by Proposed method

Table 1 Maximum acceleration amplitude at G.L.-83m (gal)

	Proposed method	SHAKE
measured (E+F)	536	
upward wave (E)	500	439
downward wave (F)	121	159

のように定義する。

$$\text{最大解析誤差} = \frac{|\text{厳密解(近似解)} - \text{推定値}|_{\max}}{\text{厳密解(近似解)の最大振幅}}$$

Fig.5.3 に示すように、推定波がほぼ入射波(Target)と一致する程、高精度であることが分かる。この場合、最大解析誤差は 5.4% である。ちなみに、Taft (1952) S69E 波の振幅を 2 倍に調整した波について同様の解析を行った場合には、最大解析誤差は 3.5% となる。

5. ポートアイランド基盤入力地震動の推定

前章では、提案法が与えられた解析モデルに対して、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、3 章で設定した地盤条件に基づいて、Fig.3 のポートアイランド G.L.-83m の観測波から基盤入力地震動の推定を行う。

推定は前章と同様に、 $\Delta t=1/1,000$ 秒, $\beta=2$, $\rho=1$ の条件で行う。Fig.6(a), (b) にそれぞれ、推定された観測点(G.L.-83m)における上昇波(E)および下降波(F)を示す。ただし、Fig.6(a)には参考のために、観測波(E+F)を波線で示す。また、この場合の上昇波、下降波および観測波の最大加速度振幅を次章で算定する等価線形手法の結果と共に Table 1 に示す。

Fig.6(a)より、観測波と推定基盤波の形状がほぼ一致して見えるが、最大振幅では Table 1 に示すよう 40gal 程

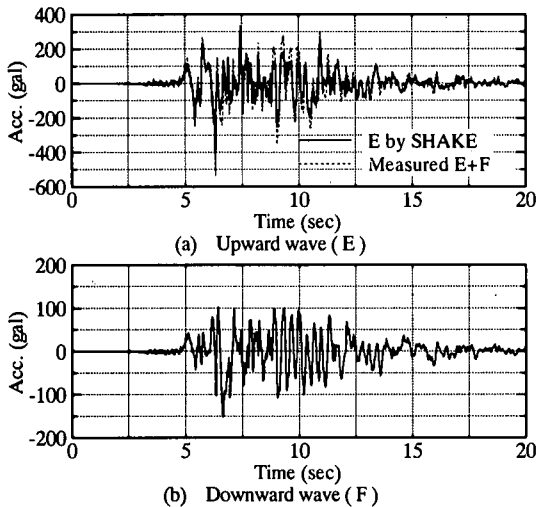


Fig.7 Calculated wave at basement by SHAKE

度の差があり、下降波成分もFig.6(b)に示すように最大値が約120galとそれ程小さくないことが分かる。

6. 等価線形化手法による推定基盤波との比較

本章では等価線形化手法に基づいて推定された基盤入力動と前章で推定した基盤入力動との比較を行う。等価線形化手法に基づく推定では、プログラム SHAKE を用い、解析対象周波数を 50Hz までとして G.L-83m の観測波から基盤入力動を分離する。観測点における上昇波(E)および下降波(F)の推定波をFig.7(a), (b)に、それぞれ示す。また、この場合の上昇波および下降波の最大加速度振幅をTable 1に示す。

Fig.7(a)より、等価線形化手法による推定基盤入力動は、提案法による推定波と同様に観測波と似た波形となっているが、振幅はTable 1に示すように提案法より若干小さくなっている。2つの推定波の違いを明確にするため、下降波に着眼し、各々のフーリエスペクトルをそれぞれFig.8(a), (b)に示す。参考のため、図中に観測波のフーリエスペクトルを破線で示す。Fig.8より、提案法の下降波は等価線形化手法に比べて 0.5Hz あたりの成分が大きく、1.2Hz 付近の成分が著しく小さくなっており、2つの推定波では周波数特性が大きく異なる領域があることが分かる。

つぎに、観測波とそれが計測された地点での応答加速度とを比較することにより、提案法および等価線形化手法の推定精度の検証を行う。Fig.6(a), Fig.7(a)の提案法と等価線形化手法による推定基盤波をFig.1(b)に示す振動系に入射する場合について時刻歴応答解析を行い、G.L-83m の観測点における応答加速度を計算する。提案法および等価線形化手法により求められた絶対応

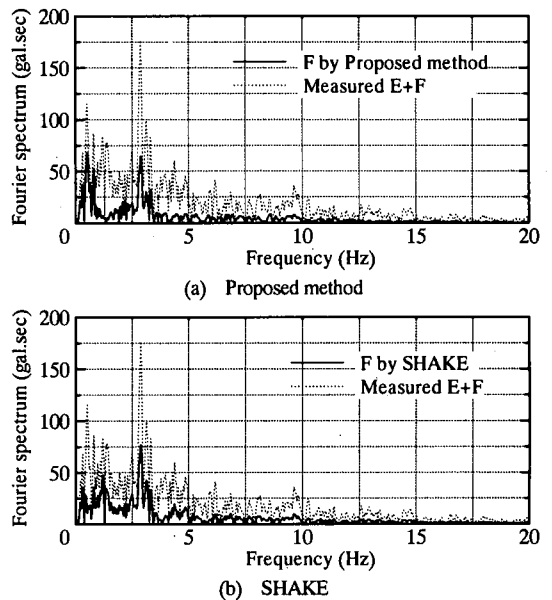


Fig.8 Fourier spectrum of calculated downward wave at basement

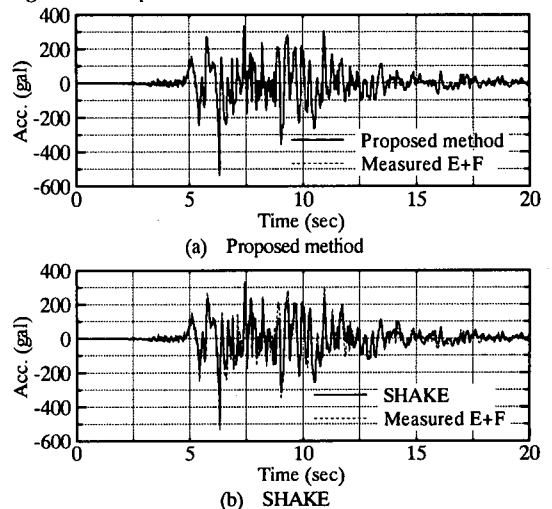


Fig.9 Comparison between observed acceleration and response acceleration at G.L-83m from calculated input motion

答加速度をそれぞれ、Fig.9(a), (b)に示す。

Fig.9(a)より、提案法による基盤波を入射した場合は、入力動の推定に使用した G.L-83m の観測波と応答加速度が、ほぼ一致していることから、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、観測波に対する最大解析誤差は 1.6%である。一方、Fig.9(b)より、等価線形化手法に基づく推定基盤波を入射した場合は、G.L-83m の応答加速度と観測波との一致の程度が明らかに提案法の場合に比べて悪くなっていることが分かる。ちなみに、G.L-83m における応答加速度の最大解析誤差は 22%に及び、SHAKE で求めた入力波を非線形 FEM に入力した場合には、観測波を十分再現できない

ことが分かる。

7. まとめ

時間領域での逆算に基づく方法²⁾(計算誤差に関するペナルティ関数を用いた改良法)の基盤入力地震動の分離問題に対する適用性を確かめるため、兵庫県南部地震のポートアイランド記録を対象として基盤入力波を推定した結果、以下の結論を得た。

- ① El Centro(1940)のNS成分の振幅を2倍に調整した波形を用いて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、解析誤差が最大数%の精度で基盤入力地震動の分離が可能であった。
- ② 提案法により推定された基盤波を用いて時刻歴応答解析を行うことにより、観測点における応答加速度と観測波との解析誤差が最大で数%とほぼ一致することが確かめられた。一方、等価線形化手法による基盤波を入射した場合に解析誤差は、最大で22%であった。
- ③ ①、②より、提案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ることから、現実問題に対しても十分に適用可能であり、また、非線形解析に用いる基盤波の推定法としては、等価線形化手法より適していることが確かめられた。

以上のように、提案法の適用性に関する検証を主目的として、数値計算を行うことにより、基盤入力地震動の高精度の分離が可能であることを示すことができた。しかし、対象地盤の地盤パラメータの設定法には課題を残しており、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必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、神戸市開発局には貴重な観測記録を使用させて頂いた。佐藤工業の吉田望氏、

末富岩雄氏には、等価線形化手法に基づく基盤波の推定に際して地盤モデルデータを提供して頂いた。また、本誌査読委員には本論文をとりまとめるにあたり、貴重な御指摘、御助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Schnabel,P.B., J.Lysmer and H.B.Seed : SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *EERC Report*, Vol.72, No.12, University of California, Berkeley, 1972.
- 2) 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, No.577, pp.53-64, 1997.
- 3) Newmark,N.M. : A method of computation for structural dynamics, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol.85, No.EM3, pp.67-94, 1959.
- 4) 神戸市開発局 : 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査(ポートアイランド, 六甲アイランド)報告書, 1995.
- 5) 国生剛治, 桜井彰雄 : MODIFIED HARDIN-DRNEVICHモデルについて, 土木学会第33回年次学術講演会, 第III部門, pp.116-117, 1978.
- 6) 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, 阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.109-116, 1996.
- 7) Lambe,T.W. and R.V.Whitman : *Soil Mechanics, SI Version*, John Wiley and Sons, pp.145, 1979.
- 8) Whiteman,R.V. and K.A.Healy : Shear strength of sands during rapid loadings, *American Society of Civil Engineers Transactions*, Vol.128, pp.1553-1594, 1963.
- 9) 東京地盤調査研究会 : 東京地盤図, 技報堂, 1959.
- 10) 石原研而 : 土質動力学の基礎, pp.179-185, 鹿島出版会, 1976.
- 11) 稲富隆昌他 : 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等の被害報告, 港湾技研資料, No.857, 1997.
- 12) 末富岩雄, 吉田望 : 兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動(その2), 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.65-72, 1997.
- 13) 吉田望 : 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析, 土と基礎, Vol.43, No.10, pp.49-54, 1995.

(1997.10.21 受付)

A NON-LINEAR BACKWARD CALCULATION TO IDENTIFY THE INCIDENT WAVE AT PORT ISLAND

Hisakazu SAKAI, Sumio SAWADA and Kenzo TOKI

We proposed a backward calculation method to identify the incident wave in time domain for applying non-linear analysis (Proc. JSCE, No.577, 1997). In this paper, as an application of the proposed method, the incident wave is identified at Port Island from the measured acceleration at G.L.-83m. The numerical results show the accuracy and the utility of this method. In case of the non-linear dynamic response analysis for the soil system, the proposed method is more suitable for the identification of the incident wave than the equivalent linear method.