

# 有効応力解析に基づく基盤入射波の推定

酒井久和<sup>1</sup>・澤田純男<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士(工) 防災科学技術研究所 地震防災フロンティア研究センター  
(〒651-0073 神戸市中央区脇浜海岸通1丁目5-2 ひと未来館4F)

<sup>2</sup>正会員 博士(工) 京都大学防災研究所 助教授 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

筆者らはこれまでに、時間領域において観測記録から基盤入射地震動を推定する手法に関して一連の研究をおこない、大自由度の振動系において基盤の観測記録から入射波成分を分離できることを確認している。しかし、この手法では、地盤の復元力特性は全応力モデルに基づいており、振動系に液状化地盤が含まれる場合に解析精度の低下が懸念される。そこで本研究では、前述の基盤入射波の推定法に有効応力解析を導入する。また、液状化地盤を含む地盤震動系を対象として、基盤入射波の分離問題に対する数値解析例を実施し、解析精度の検証する。さらに、観測深度の影響および観測誤差に対するロバスト性についても検討をおこなう。

**Key Words :** backward calculation, input ground motion, effective stress analysis, time integration, earthquake response analysis, robustness

## 1. はじめに

近年、強震時における構造物の耐震性評価や被災メカニズムを解明するために、地盤-構造物系の地震応答解析が盛んにおこなわれている<sup>1)~5)</sup>。これらの解析では基盤における入射地震動を設定する必要があり、この入射地震動として地表面や地中部の観測記録から推定された加速度波形がしばしば採用されている。この場合、基盤入射波の算定は一般に解析コード“SHAKE”<sup>6)</sup>に代表される周波数領域での重複反射理論に基づいて行われ、地盤の非線形性は等価線形化手法により近似される。しかしながら、レベル2地震動のような強震時には、地盤はひずみレベルで $10^{-2}$ のオーダー以上の大ひずみが発生することが予想され、このような大ひずみレベルでは等価線形化手法の適用限界をすでに越えていると考えられている<sup>7)</sup>。そのため、周波数領域での解析では、近年、杉戸ら<sup>8)</sup>、吉田ら<sup>9),10)</sup>、中村・吉田<sup>11)</sup>は、“SHAKE”を改良し、大ひずみレベルへも適用できる手法を提案している。しかし、これらはあくまでも地盤の非線形性を等価線形化近似した解析手法である。一方、時間領域での入射波推定は、土岐ら<sup>12)</sup>がカルマンフィルタを用いて、須藤ら<sup>13)</sup>はEK-WLI法(拡張カルマンフィルタ重み付きローカル

な繰り返し法)<sup>14)</sup>を用いて、3自由度構造系の入射波の同定を行っている。さらに、丸山・星谷<sup>15)</sup>は拡張カルマンフィルタ<sup>16)</sup>を用いて非線形1自由度系に対する定式化を行い、入力地震動の同定を行っている。しかし、12), 13)はいずれも線形な系を対象とした定式化となっており、15)は数値解析で線形な系に対して検証を行うに留まっている。以上のように、時間領域での基盤入射波推定法は未だ確立されていないのが現状である。そこで、筆者らは、時々刻々変化する地盤の復元力特性を精度良く再現するために、時間領域において基盤入射地震動を推定する方法<sup>17)</sup>(以後、基盤入射地震動推定を入射波逆算、その方法を入射波逆算法と呼ぶ)を提案している。本入射波逆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射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、観測点の深度が深い場合に計算誤差が抑制される特性を有しており<sup>17)</sup>、地中における観測記録から基盤入射地震動を分離する問題には適用できることを確認し、実問題にも適用している<sup>18)</sup>。ただし、この入射波逆算法は全応力解析に基づいており、液状化地盤を対象とした場合に解析精度の低下が懸念される。そこで、本研究では、前述の入射波逆算法に有効応力解析を導入し、液状化層を含む地盤

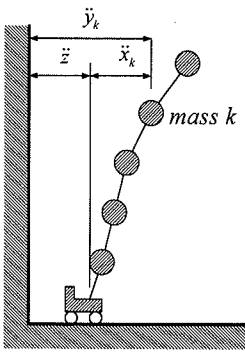


図-1 観測記録と基盤入射波の概念図

に対しても適用可能な手法とする。

本論文では、まず、有効応力解析に基づく入射波逆算法の計算方法について説明する。つぎに、液状化地盤を含む振動系に対する数値解析例を通じて、基盤入射波分離問題に対する解析精度を検証する。また、観測深度の影響を検討するために数ケースの解析をおこなう。さらに、実問題への適用を睨み、観測誤差に対するロバスト性の有無を確認する。

なお、入射波逆算法の解析パラメータ、計算誤差などに関する数値特性の詳細については、文献(17)を参照されたい。

## 2. 有効応力解析に基づく入射波逆算法

### (1) 運動方程式の定式化

あるタイムステップにおいて、過剰間隙水圧の影響を考慮に入れた振動系の運動方程式は次式で与えられる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F_s(x, u) = -M\ddot{z} \quad (1)$$

ここに、 $M$ 、 $C$  はそれぞれ質量、減衰マトリクス、 $x$  は相対変位、 $u$  は過剰間隙水圧ベクトルを表し、 $F_s$  は復元力ベクトルで  $x$  と  $u$  の関数である。 $i$  はその成分が全て1であるベクトル、 $\ddot{z}$  は基盤入力加速度を示す。

いま、ある質点  $k$  の絶対応答加速度成分  $\ddot{y}_k$  が測定されている場合を想定する。この場合、質点  $k$  に関して次の関係式が成立する(図-1 参照)。ただし、応答値の下付の添字は質点番号を意味する。

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

ここで、式(2)を式(1)に代入すると次式が得られる。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F_s(x, u) = -M\ddot{i}(\ddot{y}_k - \ddot{x}_k) \quad (3)$$

さらに、上式の未知数を左辺に整理することで次式を得る。

$$M'\ddot{x} + C\dot{x} + F_s(x, u) = -M\ddot{i}y_k \quad (4)$$

ここで、式(4)は通常の順解析の運動方程式と左辺の質量マトリクス、右辺の加速度項が異なるだけで、同様の形式となっており、右辺は  $\ddot{y}_k$  が観測記録であるので既知の項である。したがって、式(4)を逐次積分することで全ステップの相対加速度ベクトル  $\dot{x}$  が得られ、これを式(2)に代入して  $\ddot{z}$  が算定される。ただし、 $M'$  は次式で与えられる。

$$M'_{ij} = M_{ij} - \sum_{l=1}^N M_{il} \delta_{jk} \quad (5)$$

ここに、 $M'_{ij}$ 、 $M_{ij}$  は、それぞれ、 $M'$ 、 $M$  の  $i$  行  $j$  列成分、 $\delta_{jk}$  は Kronecker のデルタ、 $N$  は自由度の数を表す。ただし、振動系の基盤を固定境界とすると、 $\ddot{z}$  は絶対加速度(上昇波成分 E+下降波成分 F)、粘性境界<sup>19)</sup> とすれば  $\ddot{z}$  は基盤入射波(2E)に対応する。

### (2) ペナルティ関数の導入

上述の基盤入射波逆算法では、剛体モードの相対加速度の誤差が発生する特性がある<sup>17)</sup>ことから、全質点に共通な誤差の推定値  $\alpha$  で、算定された応答加速度を次式のように補正する。

$$\ddot{x} = \ddot{x} + \alpha \mathbf{i} \quad (6)$$

ここに、 $\mathbf{i}$  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。また、 $\alpha$  は次の評価関数を最小にするように求める。

$$J = \sum_i^N \sum_j^N M_{ij} (\ddot{x}_i + \alpha - \ddot{x}_i^{pre})^2 + \sum_i^N \sum_j^N M_{ij} \alpha^2 \quad (7)$$

ただし、 $\ddot{x}_i^{pre}$  は前ステップの質点  $i$  における修正後の相対応答加速度の推定値を表す。また、上式では各質点の応答値の重み係数として質量マトリクスを採用している。

## 3. 数値解析例

本章では、まず、本数値解析例に用いる地盤の有効応力モデル、全応力モデルを概説し、つづいて、液状

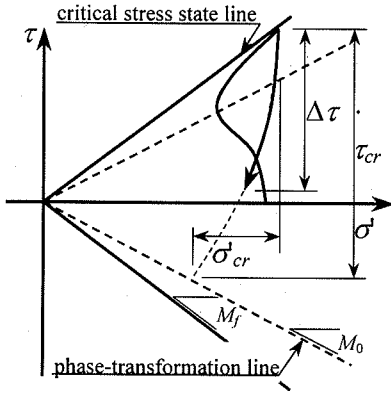


図-2 有効応力経路の概念図

化地盤を含む仮想の地盤震動系に対して数値解析例を実施し、解析精度の検証をおこなう。さらに、観測深度の影響について検討を加え、最後に、観測誤差に関する安定性を検討する目的で、ノイズに対するロバスト性の有無について検証をおこなう。

### (1) 有効応力モデル

本研究では、有効応力に基づく構成モデルとして、社本モデル<sup>20)</sup>を採用する。ただし、排水条件は非排水とする。

#### a) 応力-ひずみ関係

解析に用いる有効応力モデルの応力-ひずみ関係は、履歴曲線が Masing 則にしたがう Ramberg-Osgood モデル<sup>21)</sup>を採用する。すなわち、増分表示で次式のように表される。

$$d\gamma = \frac{d\tau}{G_0} (1 + \alpha\beta |\Delta\tau/G_0|^{\beta-1}) \quad (8)$$

ここに、 $\gamma$  はせん断ひずみ、 $\tau$  はせん断応力を表し、 $\Delta\tau$  はせん断応力反転からのせん断応力増分を意味する (図-2 参照)。 $\alpha$ 、 $\beta$  はそれぞれ式(9)、(10)で与えられ、 $G_0$  は初期せん断弾性係数で式(11)により算定される。また、 $G_0'$  は骨格曲線では  $G_0$ 、履歴曲線では  $2G_0$  の値をとるものとする。

$$\alpha = (2/\gamma_{df})^{\beta-1} \quad (9)$$

$$\beta = \frac{2 + \pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \quad (10)$$

$$G_0 = G_{0i} (\sigma'_m / \sigma'_{mi})^m \quad (11)$$

$$\gamma_{df} = \gamma_{dfi} (\sigma'_m / \sigma'_{mi})^{m'} \quad (12)$$

ここで、 $\sigma'_m$  は有効拘束圧、 $\sigma'_{mi}$  は初期有効拘束圧であり、 $\gamma_{df}$  は  $\sigma'_m$  における規準ひずみ、 $G_0$  と  $\gamma_{df}$  の右下の添え字  $i$  は、有効拘束圧が  $\sigma'_{mi}$  における値であることを意味する。また、 $h_{\max}$  は最大減衰定数である。 $m$ 、 $m'$  は初期せん断剛性および規準せん断ひずみの拘束圧依存性を表す定数で、既往の研究<sup>22),23)</sup>よりいずれも 0.5 とする。

#### b) 過剰間隙水圧

過剰間隙水圧は以下の3つ有効応力経路の状態に応じて、それぞれ算定式に基づいて求める。

① 有効応力経路が変相線にはじめてあたるまで、

$$\frac{u}{\sigma'_{mi}} = \frac{2}{\pi} \arcsin(R_n^{1/2\alpha_f}) \quad (13)$$

ここに、 $\alpha_f$  は過剰間隙水圧の上昇度を決定するパラメータ、 $R_n$  は液状化に関する累積損傷度を表すパラメータで、次式で与えられる。

$$R_n = \sum \left( \frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i-1}} \right) \quad (14)$$

$$n_i = 2 \left( \frac{\Delta\tau}{2\sigma'_{mi} C_1} \right)^{1/C} \quad (15)$$

$$C_1 = (1/20)^C R_{20} \quad (16)$$

ここに、 $R_{20}$  は繰り返し回数 20 回で過剰間隙水圧比 100% に至るせん断応力比、 $n_i$  は  $\Delta\tau$  によって生じた  $R_{20}$  に対する等価な繰り返し回数を、 $C$  は液状化に至るせん断応力比と繰り返し回数を両対数軸表示した場合の勾配を表す<sup>24)</sup>。

② 有効応力経路が変相線を超えてせん断応力がさらに載荷される場合、

$$\Delta u = -\frac{1}{M_f} \frac{|\tau/\sigma'_m| - M_0}{M_f - M_0} |\Delta\tau| \quad (17)$$

ここに、 $\Delta u$  は過剰間隙水圧の増分であり、 $M_f$ 、 $M_0$  はそれぞれ有効応力経路の包絡線と変相線の傾きを示す (図-2 参照)。

③ 有効応力経路が変相線を超えて除荷される場合、

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{cr}} = f \left( \sum \frac{\Delta\tau_c}{\sigma'_m} \right) \frac{2}{\pi} \arcsin(R_{nc}^{1/2\alpha_f}) \quad (18)$$

$$R_{nc} = \left( \frac{\Delta\tau}{\tau_{cr}} \right)^3 \quad (19)$$

表-1 解析ケースおよび各ケースの  $R_{20}$

Case	1	2	3
$Dr(\%)$	60	70	79
$R_{20}(\%)$	19.5	22.0	26.0

表-2 各ケース共通の要素パラメータ

$C$	$\alpha_f$	$h_{max}$	$M_0$	$M_f$	$e_{max}$	$e_{min}$
-0.11	0.80	0.28	0.64	0.86	0.977	0.605

せん断応力反転後にそれ以降の応力反転がないと仮定した場合に、変相線に至るまでの平均有効拘束圧およびせん断応力の増分を意味する。また、式(18)中の関数  $f$  は繰返しせん断の進行にしたがって間隙水圧の上昇が大きくなることを反映するための関数で、次式で与える。

$$f(\xi) = \left(1 + \frac{2}{3 + \xi^2}\right)^{-1} \quad (20)$$

ただし、社本モデルでは、中空ねじり試験のサイクリックモビリティ現象が現れはじめる段階で、過剰間隙水圧上昇量の変化およびせん断ひずみの進行が、試験結果例<sup>25)</sup>と比べてともに小さいことから、本研究では上式を採用する。ちなみに、社本モデルでは、式(18)の有効拘束圧  $\sigma'_m$  の代わりに初期有効拘束圧  $\sigma'_{mi}$  を、式(20)の  $\xi$  のべき乗として2の代わりに4を採用している。

### c) 中空ねじり試験のシミュレーション

上記の有効応力解析モデルの妥当性の検証を行う目的で、豊浦砂に対する中空ねじりせん断試験<sup>25)</sup>の数値シミュレーションを行う。実験の詳細は文献 25)を参照されたい。本研究で行う3つの解析ケースを表-1に表し、各ケースのせん断試験、数値解析におけるせん断応力-ひずみ関係、有効応力経路を図-3に示す。ただし、微小ひずみ時の初期せん断弾性係数  $G_{0i}$  は式(21)で示す岩崎-龍岡の式<sup>26)</sup>で求め、有効応力解析モデルの有効応力経路、および、応力-ひずみ関係を規定する各種パラメータは、実験結果と整合するように設定した。解析に使用したパラメータの値を表-1および表-2に示す。ちなみに、各ケースで異なる値を使用しているのは、表-1の  $R_{20}$  と規準ひずみ  $\gamma_{fl}$  である。

$$G_{0i} = 900 \frac{(2.17 - e)}{1 + e} (\sigma'_{mi})^{0.4} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (21)$$

ここに、 $e$  は間隙比を表す。

## (2) 全応力モデル

### a) 骨格曲線

本数値解析例では、全応力モデルにおける骨格曲線

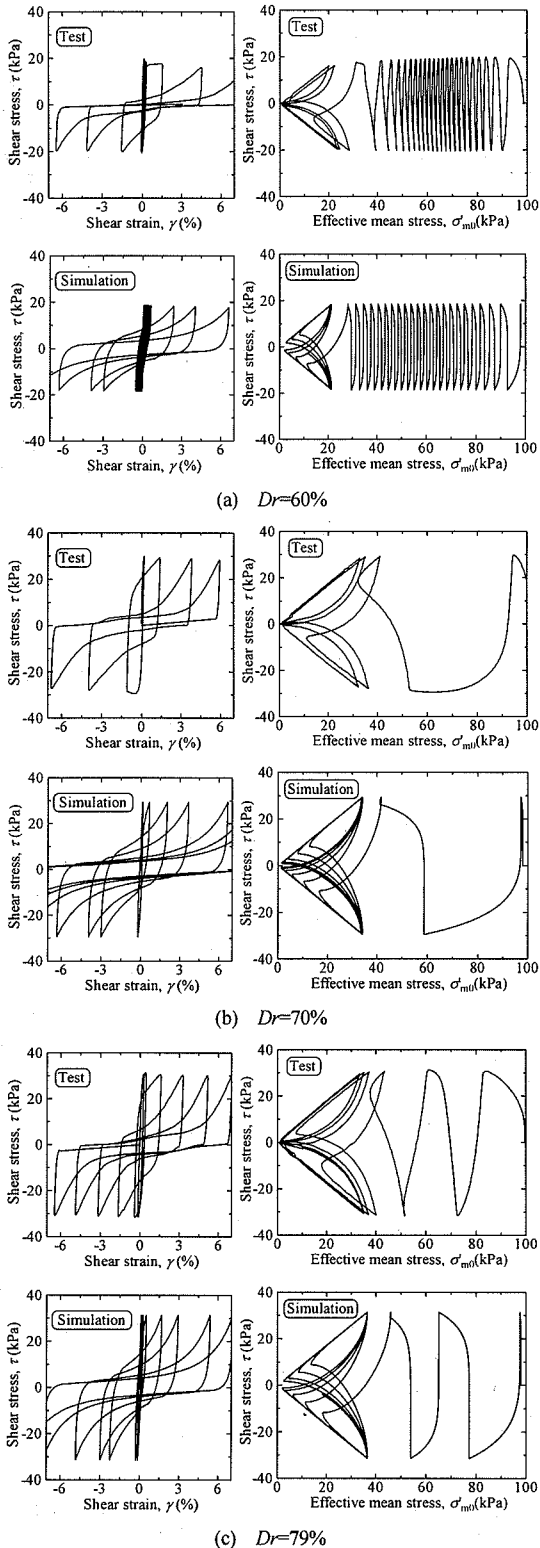


図-3 せん断応力-ひずみ関係および有効応力経路

ここに、 $\sigma'_{cr}$ 、 $\tau_{cr}$  は図-2 に示すように、それぞれ、せん断

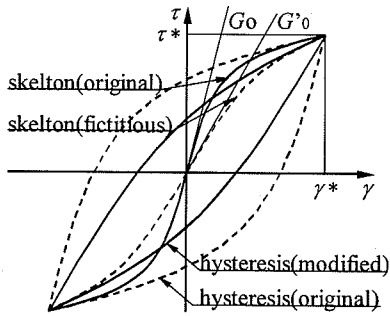


図-4 履歴曲線の概念図

として、設定すべきパラメータの数が比較的少なく、大ひずみ領域においても  $G-\gamma$  曲線との適合度の良い福嶋らのモデル<sup>27)</sup>を採用する。次にその骨格曲線を示す。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + |\gamma/\gamma_H|^\zeta} \quad (22)$$

ここで、

$$\zeta = \zeta_A \log_{10}(\gamma/\gamma_H) + \zeta_B \quad (23)$$

ここに、 $\zeta_A$ 、 $\zeta_B$ はフィッティングパラメータである。

### b) 履歴曲線

次に履歴曲線は、上の骨格曲線にそのまま Masing 則を適用すると実験結果を十分に再現できないため、 $h-\gamma$  (減衰定数-せん断ひずみ) 曲線に適合するよう仮定の初期せん断剛性を変化させて、Masing 則を適用する石原ら<sup>28)</sup>の双曲線モデル (図-4 参照)を採用する。履歴曲線を次式に示す。

$$\tau - \tau^* = \frac{G'_0(\gamma - \gamma^*)}{1 + |\gamma - \gamma^*|/2\gamma_H} \quad (24)$$

ただし、 $\tau^*$ 、 $\gamma^*$ は折り返し点のせん断応力、せん断ひずみを表し、 $G'_0$ は除荷時の初期せん断剛性である。ただし、本数値計算例では、 $h-\gamma$ 関係は、骨格曲線の割線剛性  $G$ を用いて、次式で計算する。

$$h = h_{\max}(1 - G/G_0) \quad (25)$$

### (3) 解析精度の検証

数値解析例を通じた入射波の逆算精度の検証は、図-5 に示すように、液化化層を含む4つの地層で構成される地盤モデルでおこなう。ただし、図中の $\rho$ は密度、 $V_{si}$ は初期せん断波速度、 $D$ は地表面からの深さ(正の値)、 $\alpha_R$ 、 $\beta_R$ はそれぞれ Rayleigh 減衰の質量項およ

	<b>non-liquefiable layer</b>	
	$\rho=2.0t/m^3, V_{si}=200m/s, h_{\max}=20\%, \zeta_A=0.0, \zeta_B=1.0,$	
-3m	$\gamma_r=(12.5+8.86D) \times 10^{-6}, \alpha_R=2.0, \beta_R=0.0004$	▽
	<b>liquefiable layer</b>	
	$\rho=2.0t/m^3, V_{si}=200m/s, h_{\max}=27\%, R_{20}=0.35,$	
	$M_f=0.86, M_0=0.64, C=-0.25, \alpha_f=0.7,$	
-13m	$\gamma_r=(7.50+2.08(D-3.0)) \times 10^{-6}, \alpha_R=1.0, \beta_R=0.0004$	
	<b>non-liquefiable layer</b>	
	$\rho=2.0t/m^3, V_{si}=200m/s, h_{\max}=20\%, \zeta_A=0.0, \zeta_B=1.0,$	
-20m	$\gamma_r=1.5 \times 10^{-4}, \alpha_R=2.0, \beta_R=0.0004$	
	<b>basement</b>	
	$\rho=2.0t/m^3, V_{si}=350m/s$	

図-5 解析モデル

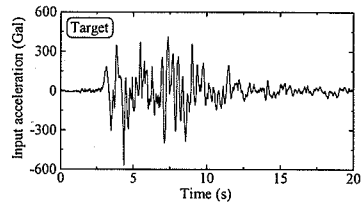


図-6 基盤入射波

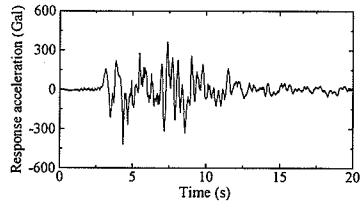


図-7 -20mにおける絶対応答加速度(観測波)

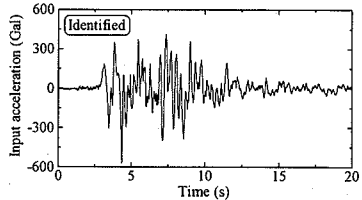


図-8 基盤入射波の推定波形

び剛性項に対する比例定数を表す。また、振動モデルは各地層を 1m に細分化した集中質点系モデルとし、解析精度は順解析、逆算、いずれも倍精度で計算をおこなっている。

ここで、あらかじめ順解析でモデル下端からポートアイランドの基盤波<sup>29)</sup>を入射し、-20mにおける絶対応答加速度を求めておく。基盤入射波を図-6に、-20mの絶対応答加速度を図-7に示す。つぎに、図-7の-20mの応答加速度が観測され、振動系の各パラメータも既知であると仮定して、基盤入射波の逆算をおこな

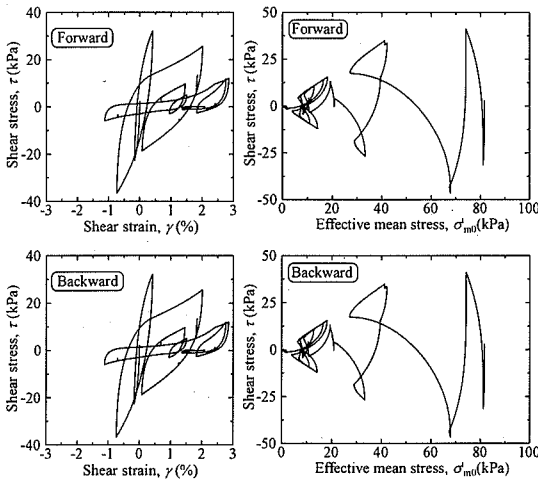


図-9 応力-ひずみ関係

図-10 有効応力経路

う. すなわち, 図-6 の順解析の入射波が逆算で推定すべき基盤入射波の Target となる. ただし, 計算時間間隔は順解析, 逆算とも 1/10,000 秒を用いた.

ここで, 解析精度を定量的に評価するため, 基盤入射波の逆算誤差  $Er$  を次式で定義する.

$$Er = \sum_{m=1}^M (\ddot{z}(m) - \ddot{\bar{z}}(m))^2 / \sum_{m=1}^M \ddot{z}^2(m) \quad (26)$$

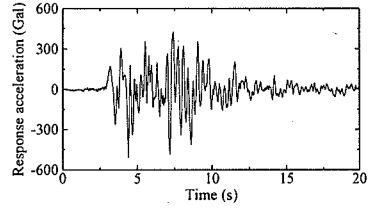
ここに,  $\ddot{z}(m)$ ,  $\ddot{\bar{z}}(m)$  はそれぞれ,  $m$  番目の Target の加速度, 入射波の逆算加速度を表し,  $M$  はデータ数を意味する.

逆算による基盤入射波の推定波形を図-8 に示す. また, 液状化層のうち, 上から 4 番目の細分化層の逆算における応力-ひずみ関係, 有効応力経路, 基盤入射波をそれぞれ, 図-9, 図-10 に順解析の結果と比較して示す.

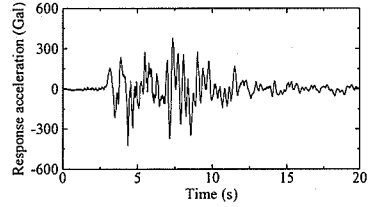
図-8 から本入射波逆算法は, 基盤入射波において, 逆算による結果が Target にほぼ一致していることが分かる. ちなみに, この場合の逆算誤差  $Er$  は  $1.3 \times 10^{-5}$  であり, 非常に高精度な推定がおこなえている. また, 液状化地盤における応力-ひずみ関係, 有効応力経路についても高精度に再現がおこなわれていることが分かる.

#### (4) 観測深度の影響

本節では, 観測点の深度の影響について検討をおこなう. 前節の図-5 の地盤モデルにおいて, 順解析で各深度での時刻歴応答加速度を算定し, これを観測記録として基盤入射波の逆算をおこなう. 解析結果のうち, -14m と -19m のケースについて, 観測記録および基盤入射波の推定波形を図-11, 図-12 にそれぞれ, 示す.

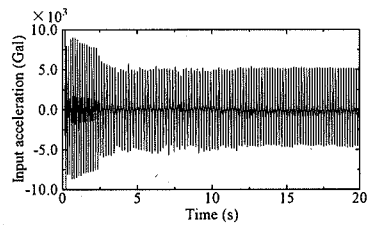


(a) 観測点-14m

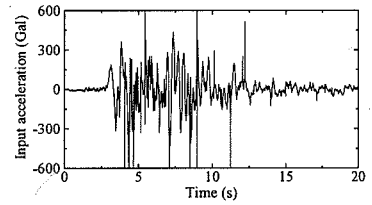


(b) 観測点-19m

図-11 観測記録 (各深度の絶対応答加速度)

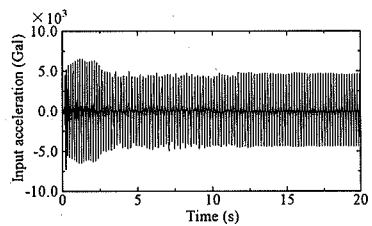


(a) 観測点-14m

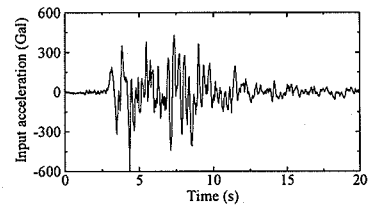


(b) 観測点-19m

図-12 観測深度ごとの基盤入射波の推定波形



(a) 観測点-14m



(b) 観測点-19m

図-13 観測深度ごとの基盤入射波の推定波形 (20Hz のローパスフィルター処理)

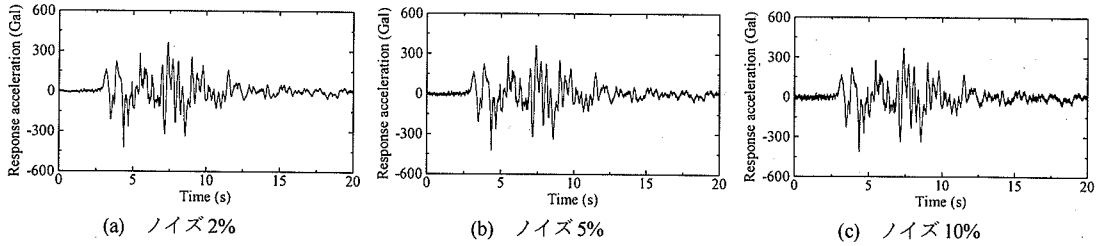


図-14 観測記録 (ノイズ有)

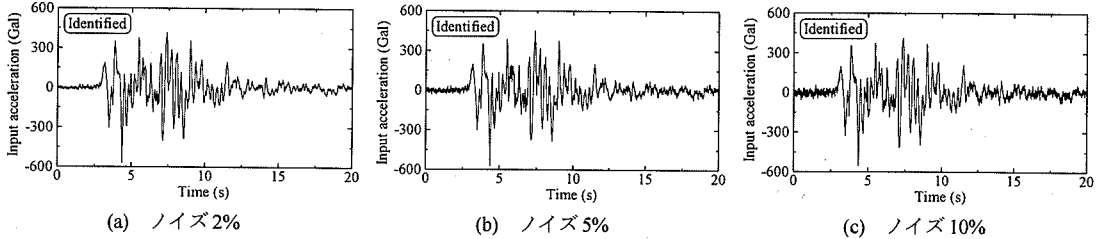


図-15 基盤入射波の推定波形

表-3 逆算精度

ノイズ振幅	0%	2%	5%	10%
逆算誤差 $Er$	$1.3 \times 10^{-5}$	$1.0 \times 10^{-3}$	$2.4 \times 10^{-2}$	$1.8 \times 10^{-2}$

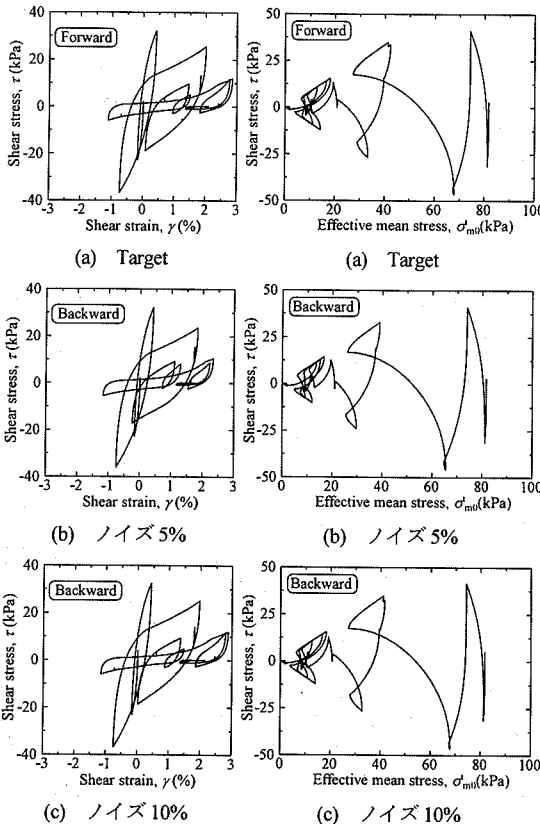


図-16 応力-ひずみ関係

図-17 有効応力経路

図-12 より観測点が-14m の場合には、計算された

基盤入射波は Target のオーダーと大きく異なり、推定が全くおこなえていない。また、観測点が-19m の場合には、波形の概略については推定できているものの、一部高周波のノイズが載っており、高精度の基盤入射波が推定できているとは言い難い。そのため、図-12 の推定波形に 20Hz のローパスフィルターを作用させた波形を図-13 に示す。図より、-14m の観測記録については、ローパスフィルターで処理しても基盤入射波の推定はおこなえないが、-19m では精度良い基盤入射波の推定がおこなえている。ちなみに、この場合の逆算誤差  $Er$  は  $5.0 \times 10^{-3}$  と高精度であるが、-18m に観測点がある場合には、-14m の場合と同様にローパスフィルターを施したとしても基盤入射波の推定はおこなえていない。

### (5) ロバスト性の検討

本節では、逆算手法の観測誤差に対するロバスト性を検討するため、前節と同様に順解析で求めた-20m の観測記録に最大振幅の 2%、5%、10%の最大値をもつホワイトノイズ (パワー比の平方根で 1.8%、4.7%、10.3%) を付加し、それを既知の加速度記録として、基盤入射波の推定をおこなう。図-14 にノイズを付加した加速度記録を示す。ただし、ホワイトノイズの位相スペクトルは乱数で与えており、各ケースで異なる。逆算結果として、基盤入射波の推定波形を図-15 に、逆算精度を表-3 に示す。また、ノイズ 5%、10%の場合について、逆算に基づく応力-ひずみ関係、有効応力経路を図-16、図-17 に Target とともに示す。

表-3 より、観測波形に 2% のノイズが含まれる場合、推定基盤入射波の逆算誤差は 0.1% と非常に小さく、波形も図-15 と図-6 の比較より、Target とほとんど差

が見られない。つぎに、5%、10%のノイズの場合においても、表-3より入射波の逆算誤差が数%と小さく、また、波形には主要動前後で高周波成分のノイズが確認されるが、構造物の耐震性検討で重要となる主要動においては、非常に精度良く推定されていることが分かる。

また、有効応力経路については、ノイズ5%の場合にTargetおよび他のケースと比較して有効拘束圧の低下が若干早く、応力-ひずみ関係においても、せん断ひずみレベルの1~3%付近でTargetとの差が大きくなっている。一方、ノイズ10%の場合には、応力-ひずみ関係、有効応力経路の履歴が5%のときよりも精度良く再現されている。以上の結果より、逆算に基づく応力履歴はTargetと若干の違いはあるものの、履歴形状の概略は精度良く再現されていることが分かる。ここで、ノイズが5%の場合よりも10%の場合に、応力履歴、入射波の逆算精度が良くなっているが、これは、ノイズと入射波との位相の影響によるものと考えられる。ちなみに、ノイズ5%のケースのホワイトノイズ波形を単純に振幅を倍にし、図-7の観測波形に付加した加速度を観測記録として入射波逆算をおこなった場合、基盤入射波の逆算誤差は4.4%であり、各応力経路も図-16(b)、図-17(b)と同等に再現精度が悪化することを確認している。

#### 4. まとめ

本研究では、観測記録から基盤入射波を分離する方法に有効応力解析を適用し、液状化地盤を含む振動系に対する数値解析例を通じて手法の有効性について検証をおこなった。その結果、以下のことが確認された。

- ① 振動特性が既知で観測記録にノイズが含まれない場合、本基盤入射波逆算法により推定された基盤入射波は、Targetにほぼ一致するほど高精度であることが確認された。また、この場合、液状化地盤のせん断応力-ひずみ関係、および、有効応力経路も非常に精度良く再現されることが分かった。
- ② 観測記録が浅い深度で得られている場合には、基盤入射波の逆算精度は大幅に悪化することが確かめられた。このため、本手法は現時点で基盤入射波の分離問題にのみ適用可能である。
- ③ 基盤入射波分離問題における数値計算例では、観測記録に最大振幅の10%のホワイトノイズが付加されている場合においても、逆算誤差で数%と精度良い基盤入射波の推定が可能であり、観測誤差に対して十分なロバスト性を有していることが確かめられ

た。

謝辞：本研究を行うにあたり、清水建設の社本康広博士、応用地質の吉田望博士、竹中工務店の吉澤睦博氏、防災科学研究所の新井洋博士には、有効応力解析について、大変貴重なご助言、ご指摘、資料の提供を頂きました。また、要素試験の数値シミュレーションでは、元北海道大学大学院生小林悟史氏の実験結果を使用させて頂きました。ここに各位に対して記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：土木構造物の被害原因の分析(耐震設計基準の変遷、構造システムと耐震性、トンネル・地下構造物)、Vol.5, 1999.
- 2) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：土木構造物の被害原因の分析(地盤・土構造物、港湾・海岸構造物等)、Vol.6, 1999.
- 3) 土木学会：阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証-解析方法の適用と比較、コンクリート技術シリーズ、Vol.49, 2002.
- 4) 土木学会地震工学委員会杭基礎耐震設計研究小委員会：区域その耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告書、2001.
- 5) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<技術資料>、2002.
- 6) Schnabel,P.B., Lysmer,J. and Seed,H.B. : SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *ERC Report*, Vol.72, No.12, University of California, Berkeley, 1972.
- 7) 国生剛治, 本山隆一：等価線形解析の大ひずみレベルへの適用の試み, 第33回地盤工学研究発表会, pp.773-774, 1998.
- 8) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する考察, 土木学会論文集, No.493, pp.49-58, 1994.
- 9) 吉田望, 小林悟, 三浦均也：大ひずみ領域を考慮した等価線形地震応答解析手法, 第25回地震工学研究発表会, pp.297-300, 1999.
- 10) 吉田望, 末富岩雄：DYNEQ-等価線形化手法に基づく水平成層地盤の地震応答解析プログラム, 佐藤工業株式会社技術研究所報, pp.61-70, 1996.
- 11) 中村晋, 吉田望：周波数領域での地盤材料の動的変形特性に基づく地盤の非線形地震応答解析法の提案, 土木学会論文集, No.722, pp.169-187, 2002.
- 12) Toki,K., Sato,T. and Kiyono,J. : Identification of structural parameters and input ground motion from response time histories, *Proc. of the Japan Society of Civil Engineers*, No. 410/I-12, pp.243-251, 1989.
- 13) 須藤敏史, 星谷勝, 柳河勇：絶対応答を用いた地震動入力とシステムパラメータ同定, 構造工学論文集, Vol.41A, pp.709-716, 1995.
- 14) Hoshiya,M. and Saito,E. : Structural identification by extended Kalman filter, *Journal of the Engineering Mechanics Division*,



- ASCE, Vol.110, No.12, 1984.
- 15) 丸山収, 星谷勝: 構造系に対する入力地震動の同定, 第19回地震工学研究発表会講演概要, pp.145-148, 1987.
  - 16) Jazwiniski, A.H.: *Stochastic process and filtering theory*, Academic Press, 1970.
  - 17) 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.
  - 18) 酒井久和, 澤田純男, 土岐憲三: 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, 土木学会論文集, No.612, pp.373-378, 1999.
  - 19) Lysmer, J. and Kuhlemeyer, R.L.: Finite dynamic model for infinite media, *Proc. of ASCE*, EM4, pp.859-877, 1969.
  - 20) 社本康広, 時松孝次, 有泉浩蔵: 一次元有効応力解析の実地盤に対する適用性, 日本建築学会構造系論文報告集, No.433, 1992.
  - 21) Jennings, P.C.: Periodic response of a general yielding structure, *Proc. of ASCE*, EM2, pp.131-163, 1964.
  - 22) 國生剛治: 土の動的性質と非線形震動応答, 電力中央研究所報告, No.301, pp.176-306, 1982.
  - 23) 佐々木康, 岩崎敏男: 土の動的性質, 講座「地震応答解析のための土の動的性質」, 土と基礎, pp.85-91, 1946.
  - 24) 社本康広: 繰返しせん断時における密な砂の有効応力モデル, 清水建設研究所報告, Vol.41, pp.1-10, 1985.
  - 25) 小林悟史: 繰返し荷重を受ける砂のダイレイタンシー特性と体積変化特性に関する研究, 北海道大学大学院修士論文, 2000.
  - 26) Iwasaki, T. and Tatsuo, F.: Effects of grain size and grading on dynamic shear moduli of sands, *Soil and Foundations*, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.
  - 27) 福島研一, 岡本晋, 坂下克之, 立石章, 志田智之: 大きなひずみレベルでの動的相互作用問題に適用可能な地盤非線形モデルの提案, 地震工学研究発表会講演論文集, Vol.25, pp.449-452, 1999.
  - 28) Ishihara, K., Yoshida, N. and Tsujino, S.: Modeling of stress-strain relations of soils in cyclic loading, *Proc. of 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, pp.373-380, 1985.
  - 29) 沿岸開発技術センター: 埋立地の液状化対策ハンドブック, 1997.

(2003. 7. 31 受付)

## BACKWARD CALCULATION OF INCIDENT SEISMIC WAVE BASED ON EFFECTIVE STRESS ANALYSIS

Hisakazu SAKAI and Sumio SAWADA

We propose a methodology to retrieve the up-going (incident) component of ground motion from borehole records by applying a backward calculation based on an effective stress analysis. Most of the available techniques to date are based on an equivalent linear analysis that is not accurate in cases of strong non-linearity. Numerical examples are conducted to examine the accuracy of the identified incident wave in cases of liquefaction. It is concluded from the results as follows: 1) The incident wave, as well as the stress-strain hysteresis and effective stress path of a liquefied layer, is retrieved from the noiseless record with high accuracy. 2) In case the observed record is not given at the sufficient depth, the accuracy of identified incident wave will decrease. 3) The proposed methodology can be applied to the records with white noise.