

有効応力解析に基づく基盤入射波推定法のロバスト性について

防災科学技術研究所 正会員 ○酒井 久和
 京都大学防災研究所 正会員 澤田 純男

1. はじめに

筆者らはこれまでに、時間領域で観測記録から基盤入射地震動を推定する手法に関して研究を進め¹⁾、基盤の記録から入射波成分を分離できることを確認している²⁾。ただし、本手法は全応力解析に基づくものであり、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、基盤入射波の推定法に有効応力解析を導入し、数値解析例を通じてその解析精度を調べる。さらに、実問題への適用性を検証するために、観測記録にホワイトノイズを付与し、本手法のロバスト性について検討をおこなう。

2. 計算方法

(1) 入射波逆算法の概要¹⁾

ある時刻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。

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

ここに、 M 、 C はそれぞれ質量、減衰マトリクス、 F_s は復元力ベクトルで、 \mathbf{x} は相対変位、 \mathbf{u} は過剰間隙水圧ベクトルの関数である。 \mathbf{i} はその成分が全て1であるベクトル、 $\ddot{\mathbf{z}}$ は基盤入力加速度、 \cdot は時間に関する微分を意味する。

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。

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

ここで、式(2)を式(1)に代入し、未知ベクトルを左辺に移行して整理すると次式が得られる。

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

ここで、上の式(3)は通常地震応答解析の運動方程式と同じ形式をしており、これを時間積分することで全ステップの相対加速度ベクトル $\dot{\mathbf{x}}$ が得られ、式(2)より基盤入射波が算定される。ここに、 M' は次式で与えられる。

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

ただし、 M'_{ij} 、 M_{ij} は、それぞれ、 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) 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³⁾を採用する。ただし、排水条件は非排水とする。

$$d\gamma = \frac{d\tau}{G_0} (1 + \alpha\beta |\Delta\tau/G_0|^{\beta-1}), \quad \alpha = (2/\gamma_{rf})^{\beta-1},$$

$$\gamma_{rf} = \gamma_{rfi} (\sigma'_0/\sigma'_{0i})^{m_r}, \quad G_0 = G_{0i} (\sigma'_0/\sigma'_{0i})^m,$$

$$\beta = \frac{2 + \pi h_{\max}}{2 - \pi h_{\max}} \quad (5)$$

ここで、 σ'_0 は有効拘束圧、 G_0 、 γ_{rf} は σ'_0 における初期せん断弾性係数および規準ひずみで、右下に添え字 i は、初期有効拘束圧 σ'_{0i} 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、 m 、 m_r は拘束圧依存性を表す定数 ($m=m_r=0.5$)、 $\Delta\tau$ はせん断応力反転からのせん断応力増分を示し、 G'_0 は骨格曲線で G_0 、履歴曲線で $2G_0$ とする。

また、過剰間隙水圧は次の式(6)~(8)で求める。

①有効応力経路が変相線にはじめてあたるまで

$$\frac{u}{\sigma'_{0i}} = \frac{2}{\pi} \text{Arcsin}(R_n^{1/2\alpha_f}), \quad R_n = \sum \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i-1}} \right),$$

$$n_i = 2 \left(\frac{\Delta\tau}{2\sigma'_0 C_1} \right)^{1/C}, \quad C_1 = (1/20)^C R_{20} \quad (6)$$

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

$$\Delta u = - \frac{1}{M_f} \frac{|\tau/\sigma'_0| - M_0}{M_f - M_0} |d\tau| \quad (7)$$

③有効応力経路が変相線を超えて除荷される場合

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{cr}} = f \left(\sum \frac{\Delta\tau_c}{\sigma'_0} \right) \frac{2}{\pi} \text{Arcsin}(R_{nc}^{1/2\alpha_f}),$$

$$R_{nc} = \left(\frac{\Delta\tau}{\tau_{cr}} \right)^3, \quad f(\xi) = \left(1 + \frac{2}{3 + \xi^2} \right)^{-1} \quad (8)$$

ここに、 R_{20} は繰返し回数20回で過剰間隙水圧比が100%に至るせん断応力比、 n_i は R_{20} に対するせん断応力反転後のせん断によって生じた等価な繰返し回数、 M_f

キーワード 基盤入射波、有効応力解析、逆解析、ロバスト性

連絡先 〒651-0073 神戸市西区脇浜海岸通1-5-2 人と防災未来センター ひと未来館 E-mail:sakai@edm.bosai.go.jp

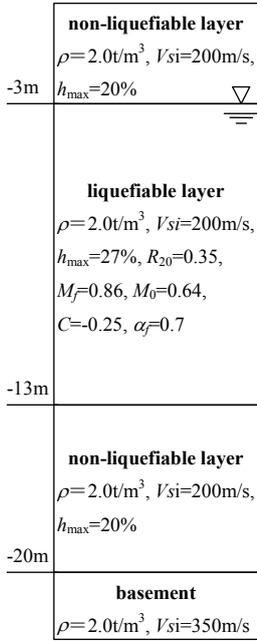


図 1 解析モデル

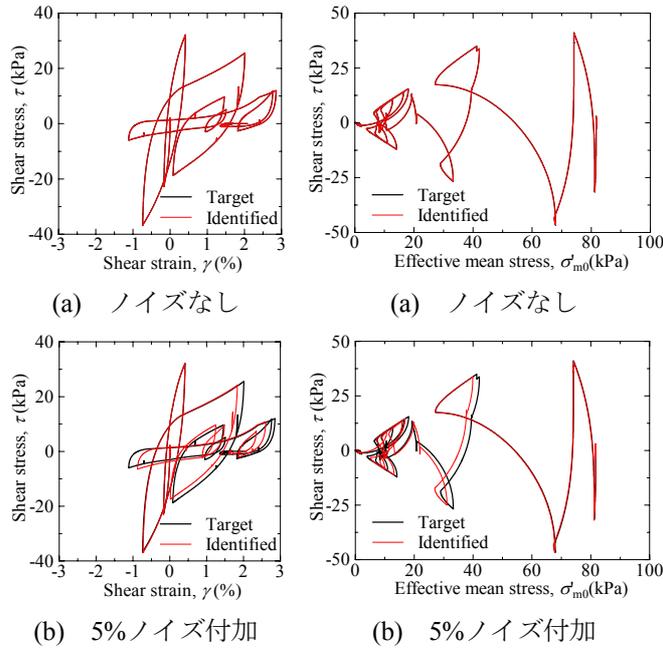


図 2 応力-ひずみ関係

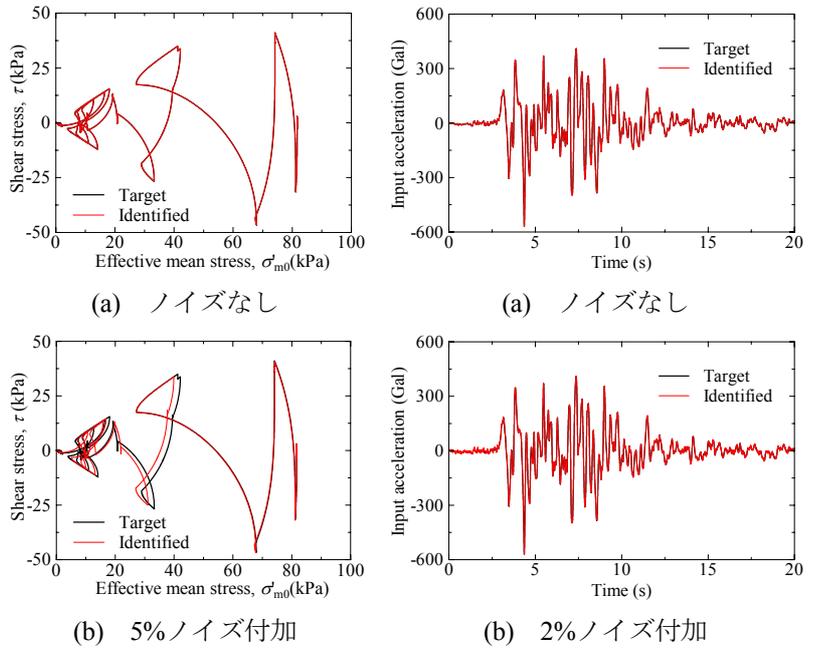


図 3 有効応力経路

M_0 はそれぞれ、有効応力経路の包絡線、変相線の傾きを示す。また、 C は過剰間隙水圧比が100%に達するせん断応力比と繰返し回数の両対数軸上の勾配、 α_f は過剰間隙水圧の上昇度を決定するパラメータ、 $\Delta\tau_c$ は有効応力経路が変相線を越えてせん断応力がさらに载荷される状態でのせん断応力の増分である。 σ'_{cr} 、 τ_{cr} はそれぞれ、応力の反転位置から単調除荷と仮定した場合に反対側の変相線あたまでの有効応力、せん断応力の差分を表す。

3. 数値計算

図1に示す地盤モデルにおいて、順解析でモデル下端からポートアイランドの基盤波を入射する。本研究では、順解析における-20mの応答加速度が観測されていると仮定して、基盤入射波の逆算を行った。図2～図4の(a)に液状化層のうち、上から4番目の細分化層の順解析と基盤波逆算における応力-ひずみ関係、有効応力経路、基盤入射波をそれぞれ示す。ただし、地層はそれぞれ1mに細分化して集中質点系モデルとした。また、非液状化層は吉田らのモデル⁴⁾を採用し、計算時間間隔は順解析、逆算とも1/10,000秒を用いた。

図2(a)～図4(a)から本逆算法は、有効応力経路、応力-ひずみ関係、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。

さらに、本逆算手法のロバスト性を検討するため、上記と同じ-20mの観測記録に最大振幅の2%、5%のホワイトノイズを付加した加速度を既知の記録として、基盤入射波の推定を行った。結果を図2(b)～図4(c)に示す。

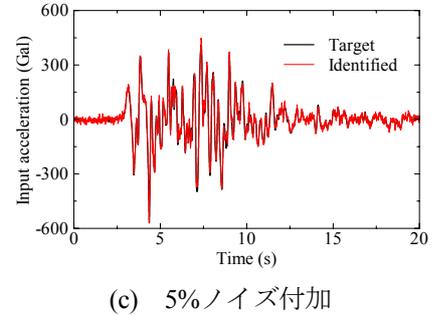


図 4 基盤入射波

図より、観測記録にノイズが付加されている状態でも、応力-ひずみ関係と有効応力経路の形状の再現、および、基盤入射波の逆算がいずれも高精度であることが分かる。

4. まとめ

本研究では、有効応力解析に基づいて観測記録から基盤入射波を分離する方法を提案し、数値解析例を通じて解析精度の検証を行った。その結果、本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非常に高精度であり、十分なロバスト性も有していることが確認された。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 吉田望, 辻野修一, 石原研而: 地盤の1次元非線形解析に用いる土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1639-1640, 1990.