

鉛直アレー観測記録を用いた 地盤の規準ひずみの逆解析

三神 厚¹・澤田 勉²・木島 久恵³

¹正会員 博(工) 徳島大学助手 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

²正会員 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770-8506 徳島県徳島市南常三島町2-1)

³学生会員 大阪大学大学院 博士前期課程1年(〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

堆積地盤の地震動を考える上で、地盤の剛性および減衰のひずみ依存性は重要なファクターである。地盤の非線形特性を表す双曲線モデルでは、地盤の剛性、減衰とひずみとの関係は規準ひずみで決定づけられる。本研究では鉛直アレー地震観測記録の逆解析から地盤の規準ひずみを同定する手法を示すとともに、同手法を実地震記録に適用し、地盤の規準ひずみとせん断波速度の同定を試みた。その際、S波の一次元重複反射理論に基づく等価線形化手法により地盤の応答解析を行い、実観測記録より得られる伝達関数を満足する規準ひずみを最適化理論により検索した。その結果、得られた規準ひずみは室内試験から得られる値と整合するものとなり、またせん断波速度についてもPS検層による値と概ね一致した。

Key Words : Borehole-allay, reference strain, identification, hyperbolic model

1. まえがき

近年、鉛直アレー強震観測記録の逆解析から土の動的特性を推定する試みが行われている。この場合、S波の一次元重複反射理論を仮定し、異なる深度で得られた実観測記録の伝達関数を満足する地盤構造を最適化理論により検索する方法がとられる。

地盤物性を表すモデルのうち、双曲線モデルはHardin-Drnevichモデルとも呼ばれ多用されている。地盤の $G-\gamma$ 関係(地盤のせん断弾性係数とせん断ひずみの関係)、 $h-\gamma$ 関係(地盤の減衰定数とせん断ひずみの関係)は拘束圧に依存して変化するが、双曲線モデルでは規準ひずみを導入することにより拘束圧に依存しない地盤モデルを実現している。

本研究では、鉛直アレー強震観測記録の逆解析から地盤の規準ひずみを同定する方法を示す。この方法は、水平成層地盤の地盤物性に双曲線モデルを仮定した上で、地震応答解析に一次元のS波の重複反射理論に基づく等価線形手法を適用し、得られる伝達関数が実観測記録のそれを最も満足するような規準ひずみ、せん断波速度を求めるものである。また同手法を東京大学生産技術研究所の千葉実験所構内で観測された鉛直アレー地震観測記録^{1),2)}に適用し、規準ひずみの同定を試みた。

2. 双曲線モデル

Hardin and Drnevich³⁾は地盤物性のモデルとして、式(1)で与えられる双曲線モデルを提案している。

$$\tau = \frac{G_{\max} \gamma}{1 + \frac{G_{\max} \gamma}{\tau_{\max}}} \quad (1)$$

ここで、 $G_{\max}$ は微小ひずみ時のせん断弾性係数、 $\tau_{\max}$ は破壊強度を表す。

規準ひずみを γ_r とすると、 $\tau_{\max} = G_{\max} \gamma_r$ であるから、結局、式(2)、(3)で示される $G-\gamma$ 関係および $h-\gamma$ 関係が得られる。

$$\frac{G}{G_{\max}} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2)$$

$$\frac{h}{h_{\max}} = \frac{\frac{\gamma}{\gamma_r}}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (3)$$

したがって、 $G/G_{\max} \sim \gamma$ 関係および $h/h_{\max} \sim \gamma$ 関係は規準ひずみを決定することにより一意的に定まり、 $\gamma = \gamma_r$ のとき、 $G/G_{\max}$ 、 $h/h_{\max}$ の値はともに0.5である。このことから、本研究では地盤の規準ひずみを逆解析から求め、 $G \sim \gamma$ 関係および $h \sim \gamma$ 関係の間接的な同定を試みる。

3. 同定の手順

(1) 鉛直アレー観測記録

地盤の規準ひずみを同定するにあたり、図-1に示す水平成層地盤へのSH波の鉛直入射を考える。実地震のアレー観測記録としては、深度の異なる2点 p, q の記録を用いるが、深い方の地震記録 q については事前に方向補正を行った。一般に比較的震源が深い近距離地震では、その強震部でせん断波が卓越した地盤震動となるので、震央直角成分はSH波であると考えられる。したがって、ここでは水平2成分を震源に対して直交する方向に合成して用いた。これらのアレー観測記録からフーリエスペクトルを求め、2点 p, q 間のせん断波の伝達関数を求める。その際、平滑化にはバンド幅を0.4(Hz)としてParzenウィンドウを用いた。以上から周波数応答倍率 $A_0(f)$ が求められる。

(2) 地震応答解析

次に、同定対象地盤に適当な物性値の初期値 $\{\alpha\}$ を与えた上で、深い方のアレー観測記録を入力し地震応答解析を行う。従来より多用されてきたSHAKE⁴⁾に代表される方法では、周波数領域全域にわたり一定の等価ひずみを与えるため、高周波数領域でのスペクトルが過大に減衰するという欠点がある。そこで、ひずみ振幅のスペクトル特性を考慮することによって周波数依存型の等価ひずみ γ_{eq} を設定する杉戸らの方法(FDEL)⁵⁾を用いた。

周波数依存型の等価平均ひずみは次式で表される。

$$\gamma_{eq}(\omega) = C \cdot \gamma_{\max} \cdot \frac{|F_r(\omega)|}{|F_{r,\max}|} \quad (4)$$

ここで、 C は周波数軸上での等価ひずみ全体のレベルを調整する係数、 $\gamma_{\max}$ は最大せん断ひずみ、 $F_r(\omega)$ はひずみ波形のフーリエスペクトル、 $F_{r,\max}$ は $F_r(\omega)$ の最大値である。

以上の等価線形解析法により、周波数応答倍率 $A(f; \alpha)$ が求められる。

(3) 逆解析

アレー観測記録から直接求めた周波数応答倍率と等価線形手法による地盤の応答解析で求めた周

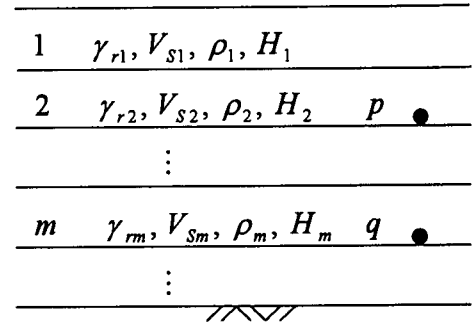


図-1 水平成層地盤

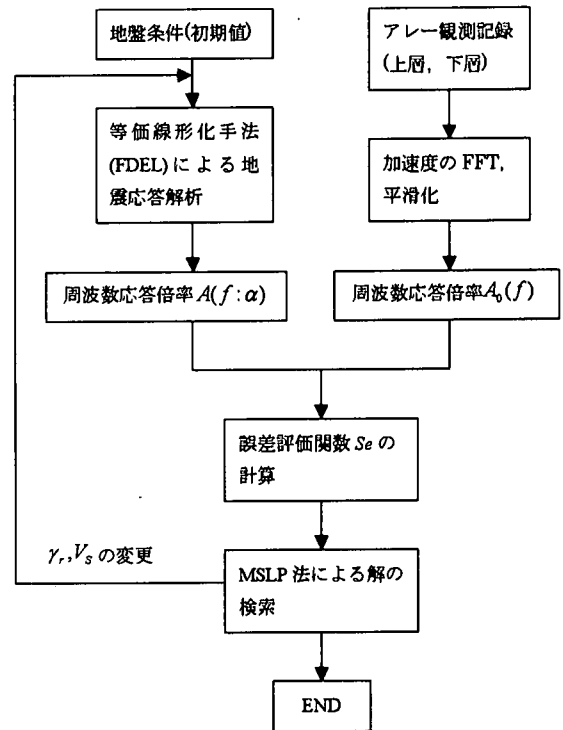


図-2 規準ひずみ同定の流れ

波数応答倍率を考え、それらの残差平方和の最小化を図ることにより規準ひずみの同定を行う。このような最小化問題では、解の一意性が保たれないという問題があるため、本研究では評価関数に先験的情報を導入するベイズのアプローチを採用した。これにより、せん断波速度がある範囲内で収束するような制約を評価関数に付加した上で、評価関数が最小となるように地盤パラメータを決定する。評価関数としては次式を用いた。

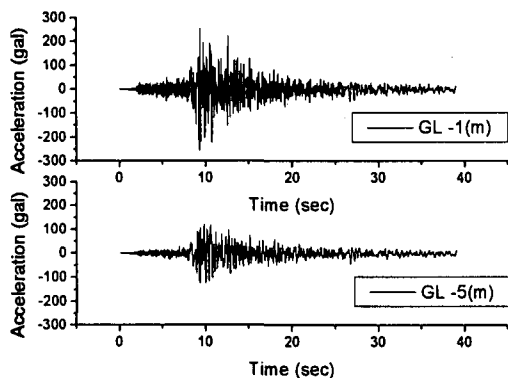
$$S_e(\alpha) = \sum_{j=1}^{N_f} \{A(f_j; \alpha) - A_0(f_j)\}^2 + w \sum_{i=1}^{N_l} (\alpha_i - V_{i0})^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

表-1 アレー観測記録と地震の諸元

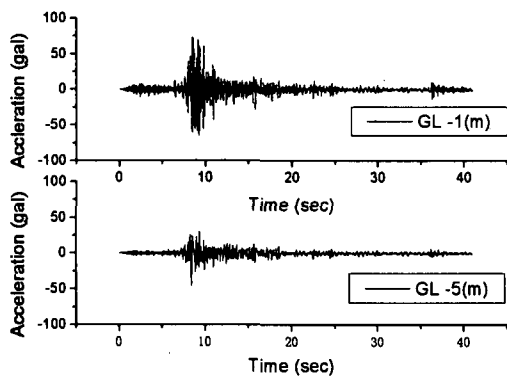
Record	Mag	Depth (km)	Epc. Dist. (km)	Max Acc (gal)
SKN26	6.7	58	45.0	240
SKN41	5.4	50	40.2	121

表-2 地震応答解析における地盤のモデル化

Layer No.	Thickness (m)	ρ (tf/m^3)	V_s (m/sec)
1	1.00	1.15	140.0
2	1.00	1.15	140.0
3	1.00	1.15	140.0
4	1.00	1.15	140.0
5	1.00	1.15	140.0

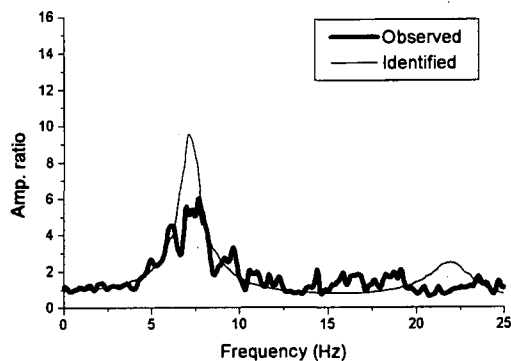


(a) SKN26

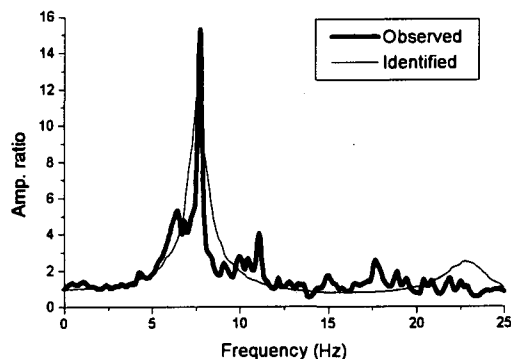


(b) SKN41

図-3 実地震記録



(a) SKN26



(b) SKN41

図-4 伝達関数の同定結果

ここで、 w はせん断波速度の制約を支配する重み係数であり、 $w = 10^{-4} \sim 10^{-8}$ が用いられる。また N_i は地盤の層数、 α_i は同定するせん断波速度、 V_{i0} はPS検層より得られるせん断波速度を表す。

最適化手法については、澤田らによって提案されている MSLP 法を用いた⁹⁾。この方法は、従来の SLP 法の欠点である最適解近傍での収束性を改善した改良 SLP 法を SLP 法と併用することによって解を求めるものである。以上の逆解析の一連の流れを図-2 に示す。

4. 実観測記録および逆解析結果

地盤の規準ひずみを同定するにあたっては、地盤が顕著な非線形性を示すようなある程度振幅

の大きい地震動記録を用いる必要がある。ここでは、表-1 および図-3 に示される、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内で千葉県東方沖地震の際に観測された記録 (SKN26) と同観測点において 1990 年に観測された記録 (SKN41) を用いた。SKN26, SKN41 とともに、GL-5(m) と GL-1(m) の記録をそれぞれ系に対する入出力として用いる。ここでは、規準ひずみに加えせん断波速度も未知量として逆解析を行うが、せん断波速度の初期値については、当該地盤における PS 検層結果から $V_s = 140(m/s)$ としている。また規準ひずみについては、室内試験結果を参考にしてその初期値を $\gamma_r = 0.01$ とした。また当該地点の土質はロームである。なお、対象地盤の応答解析においては、表-2 のように地盤を 5

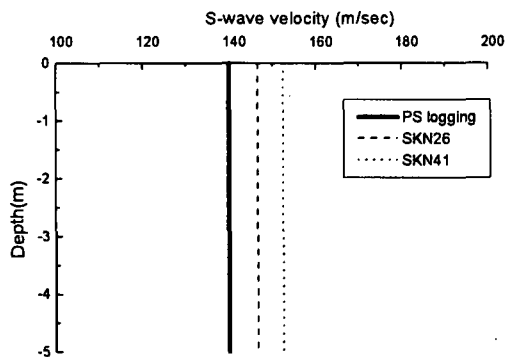


図-5 セン断波速度の同定結果

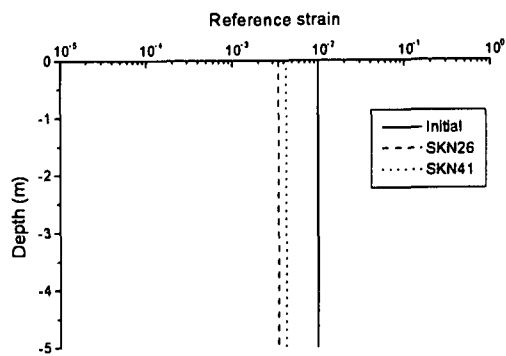


図-6 規準ひずみの同定結果

層に分割した。

図-4にGL-5(m), GL-1(m)間の周波数応答倍率を示す。太線が観測記録から得られたもので、細線がその同定結果である。伝達関数のピークの部分で幾分ずれが見られるが、両者は概ね一致している。また、約7(Hz)で伝達関数がピークを示していることもわかる。

せん断波速度の同定結果をPS検層の値とともに図-5に示す。両方の同定値ともPS検層から得られる値よりも若干大きな値となっているが、比較的精度良く同定されている。規準ひずみの同定結果を図-6に示す。同定値は $3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ 程度となり、室内試験による結果のうち粘土の値(3×10^{-3} 程度)とほぼ整合する。これは当該地点の土質であるロームが細かい粒子からなり、かつ結合力が強いという性質を有するため、砂よりもむしろ粘土に近い性質を有するためであると思われる。SKN26およびSKN41から求められる規準ひずみの間には若干の差異が認められるが、SKN41の記録が規準ひずみを同定するには十分な大きさでないことがその要因として考えられる。対象地盤の応答解析において各層に発生した最大ひずみを図-7に示す。地震動の大きいSKN26では、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 程度の最大ひずみが発生しているが、SKN41ではそれより1オーダー程度小さい値となっている。

5. まとめ

本研究では、地震時の地盤の非線形を同定するために、周波数依存型の等価線形解析法を導入し、同定問題を定式化した。この方法は、地盤の規準ひずみを同定することにより、地盤の剛性および減衰のひずみ依存性を間接的に同定するものである。提案した手法を実アレー観測記録に適用して実地盤のせん断波速度と規準ひずみの同定を試みたところ、以下の結果が得られた。

- (1) セン断波速度の同定値は、PS検層で得られた値に比べ幾分大きな値を示したが、ほぼ一致した。
- (2) 規準ひずみについては、その同定値が $3 \times 10^{-3} \sim 5 \times 10^{-3}$ 程度となり、室内試験の値(砂で $5 \times$

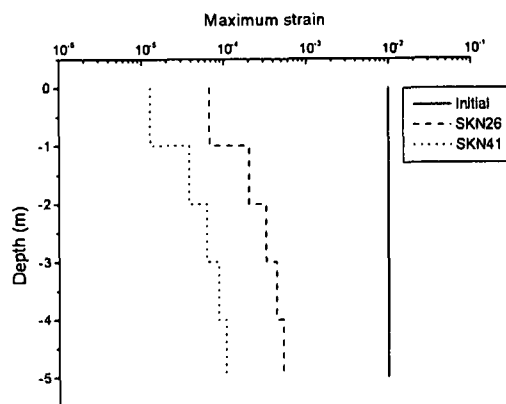


図-7 最大ひずみ

10^{-4} 、粘土で 3×10^{-3} 程度)のうち、粘土とほぼ整合する結果が得られた。

謝辞：本研究では、(財)震災予防協会の強震動アレー観測記録データベースに収録されている記録のうち、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内で観測された記録を使用いたしました。記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) (財)震災予防協会：強震動アレー観測記録データベース，No.1, 1993.
- 2) (財)震災予防協会：強震動アレー観測記録データベース，No.2, 1995.
- 3) Hardin B.O. and Drnevich V.P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Proc. ASCE, SM7, pp.667-692, 1972.
- 4) Schnabel, P.B., Lysmer, J., and Seed H.B.: SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972.
- 5) 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一考察，土木学会論文集，No.493/Ⅲ-27, pp.49-58, 1994.
- 6) 澤田勉，辻原治，平尾潔，山本英史：地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるSLP法の改良とその適用，土木学会論文集，No.446/I-19, pp.205-213, 1992.

(2001. 05. 25 受付)