

兵庫県南部地震の SGK サイトにおける 鉛直アレー記録に基づいた地盤物性の逆解析

國生剛治¹・青柳寮大²・涌波晶弘³

¹正会員 工博 中央大学教授 理工学部土木工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27)
²正会員 元中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (同上)
³学生会員 中央大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (同上)

兵庫県南部地震では、震源断層の近傍を含む 4 地点の鉛直アレー地震観測システムにおいて本震と多くの余震記録が得られた。本研究では関西電力㈱総合技術研究所構内で観測された本震記録と 5 つの余震記録の最大地表加速度 (PGA) を比較し、4 つのグループに分けた。その後、グループ毎に動的地盤物性を拡張ベイズ法により逆解析し、それぞれの解析結果を相互に比較すると共に地盤物性のひずみ依存性を調べた。本震と PGA 約 140gal を記録した余震の S 波速度は、特に浅い層での弱震に対応した値からの減少割合が大きく、地盤物性の非線形性があることを確認できた。

Key Words : vertical array, inversion analysis, Secondary wave velocity, Bayesian method

1. まえがき

兵庫県南部地震では、震源近傍の第四紀層の深部で最大 0.6G を越える強い加速度が観測された。また、震源断層近傍を含む 4 地点に設置された鉛直アレー地震観測システムでは本震と多くの余震記録も得られている。これらの鉛直アレー記録では各サイトで明瞭な地盤の非線形応答挙動が得られ、地盤の非線形性や、液状化によって地表の加速度がかえって低減する現象が捉えられた¹⁾。

本研究では、関西電力㈱総合技術研究所構内 (SGK サイト) で観測された地震記録を用いて動的地盤物性 (S 波速度と減衰比) を逆解析によって求め、強震記録による逆解析結果と弱震記録による結果の比較、逆解析物性による震動応答解析、逆解析物性のひずみ依存性について考察した。

2. 地震記録と解析地盤モデルの概要

SGK サイトでは本震 (MS と略) と 5 つの余震 (AS と略) において GL-0m、-24.9m、-97m の 3 深度、EW、NS、UD の 3 方向の地震記録が得られた。本研究は 3 深度の水平成分の記録を用い、各地震の最大地表加速度 (PGA) を比較し、PGA の大きい方から MS、AS-A、AS-B、AS-C の 4 グループに分けた (表-1)。MS では PGA 約 650gal、AS-A で約 140gal、AS-B で約 60gal を記録し、これらの地震記録には地盤物性の非線形性の影響が

表-1. SGK サイトで観測された地震の PGA (gal)

グループ	日時・時刻	M	PGA (gal)	
			EW	NS
MS	1995.01.17.05:46	7.2	647.5	298.6
AS-A	1995.01.17.07:38	5.4	78.87	139.64
AS-C	1995.01.17.08:58	4.5	13.26	13.96
AS-C	1995.01.17.13:05	4.7	27.72	27.27
AS-B	1995.01.25.23:16	5.1	62.33	42.76
AS-C	1995.02.18.23:15	2.8	8.93	7.00

含まれていると考えられるので単独のグループとした。

解析地盤モデルは一次元多層系モデルを用い、最も深い地震計設置深度である GL-97m より深層を解析上の基盤層とし、GL-0m と GL-97m の間を土質別に 12 層に分け、各層に地震前の PS 検層の結果から地盤物性を与えた。なお基盤層は $V_s=480\text{m/s}$ の更新統の粘土層である。

3. 解析方法と解析条件

本研究ではまず加速度記録より主要動を含む 20 秒間を抽出し、バンド幅 0.3Hz の Parzen Window により平滑化をして加速度フーリエスペクトルを求め、地表と地中のスペクトルから 2 点間を割り算して観測スペクトル比を求める。次にそれぞれのスペクトル比と一次元重複反射理論による伝達関数とが適合するように同構内における動的地盤物性を拡張ベイズ法で逆解析する。このとき、まず GL-0.0/-24.9m のスペクトル比を用いて

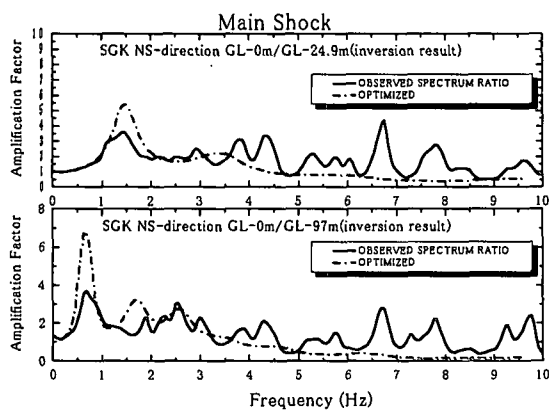


図-1 MS の観測スペクトル比と伝達関数

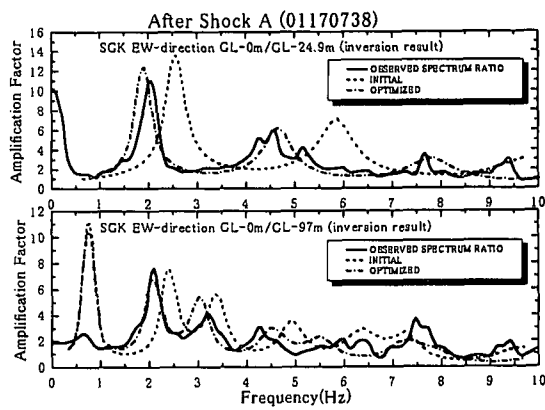


図-2 AS-A の観測スペクトル比と伝達関数

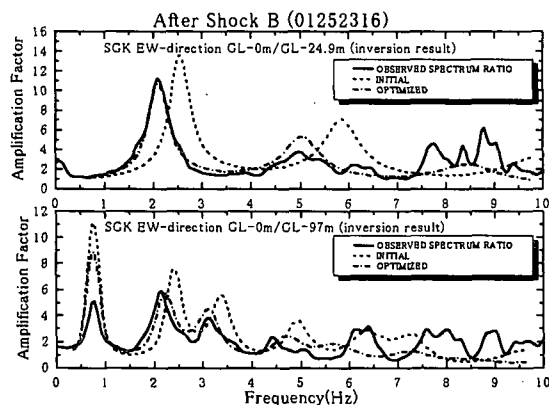


図-3 AS-B の観測スペクトル比と伝達関数

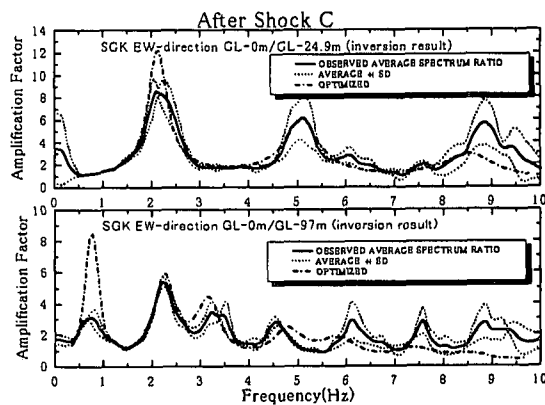


図-4 AS-C の観測平均スペクトル比と伝達関数

GL-0.0m と GL-24.9m の間の地盤物性を求め、その物性を用いて GL-0.0/97.0m のスペクトル比により GL-24.9m と GL-97.0m の間の地盤物性を逆解析する。求める地盤物性は S 波速度と減衰比で、層厚、単位体積重量は既知とする。理論値も観測記録と同じバンド幅 0.3Hz の Parzen Window により平滑化を行った。また解析対象周波数は、GL-0.0/24.9m で 0.6~10Hz, GL-0.0/97.0m では MS で 0.4~10Hz, AS で 0.3~10Hz とする。なお、減衰比の周波数依存性は考慮していない。

(1) 拡張ベイズ法

ベイズ法における評価関数 J は

$$J = \frac{1}{2} \{ (x - \bar{x})^T M^{-1} (x - \bar{x}) + (z - h(x))^T R^{-1} (z - h(x)) \}$$

と表される。ベイズ法では、事前情報と事後情報の重みは同じであるが、実際の問題ではむしろそうではない場合が多い。拡張ベイズ法では、事前情報と事後情報の相対的な重みを評価するパラメータ d を用いて、

$$J = \frac{1}{2} \{ d(x - \bar{x})^T M^{-1} (x - \bar{x}) + (z - h(x))^T R^{-1} (z - h(x)) \}$$

のように書き直す。そして、ガウスニュートン法に基づいてこの式を最小にする x を求めるための漸化式として次式を得る。

$$x_{k+1} = x_k + P_k \{ H_k^T R^{-1} (z - h(x_k)) + dM^{-1} (\bar{x} - x_k) \}$$

$$P_k = (dM^{-1} + H_k^T R^{-1} H_k)^{-1} = \frac{1}{d} M - K_k H_k M,$$

$$K_k = \frac{1}{d} M H_k^T \left(\frac{1}{d} H_k M H_k^T + R \right)^{-1}$$

収束が得られるまで k についての更新を行って、 J が最小となる点を求める。ここで、 H_k は $h(x)$ の x についての微係数の x_k における値、 R は観測値に対する共分散行列、 M は未知パラメータ x の共分散である。

4. 解析結果

観測スペクトル比と逆解析後の伝達関数を示す。図-1 は MS の逆解析結果であり上段の図は GL-0.0/24.9m で下段の図は GL-0.0/97.0m である。両図ともに 1 次のピークの位置はよく一致しているが、振幅は大きく評価している。図-2 は、AS-A に基づいたものであり、図中の破線は PS 検層から求めた S 波速度に基づく伝達関数である。実線の観測記録に対し一点鎖線の同定値は上段、下段の両図ともにピークの位置については 1 次、2 次でほぼ一致し、振幅については 1 次のピークで大きく評価しているが 2 次ではよく一致した。図-3 は AS-B に基づいたものである。上段、下段の両図ともにピークの位置

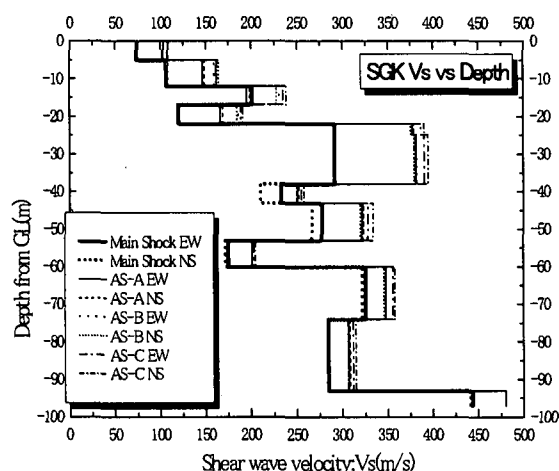


図-5.逆解析した S 波速度の比較

は 1 次, 2 次で一致し, 振幅は上段の図では 1 次のピークが, 下段の図は 2 次のピークがよく一致している。地盤物性の非線形性の影響が小さいと考えられる AS-C では, 異なる 3 つの観測スペクトル比を平均した観測平均スペクトル比を用いて解析を行った。図-4 に, AS-C の平均スペクトル比と逆解析後の伝達関数を示す。上段, 下段の両図ともピークの位置は 1 次, 2 次で一致し, 振幅は 6Hz 位まで近い値を示しており, 中でも 2 次ピークでよく一致した。いずれの場合についても下段に示す地表と最深レベルの間の伝達関数においては 4~5Hz 以上の高次のピークについては逆解析による再現ができていないことがわかる。これは低次のピークの再現性を重視したためのやむを得ない結果と考えている。

(1) 逆解析物性の比較

逆解析された各グループの S 波速度と減衰比を深度に対して整理し, 非線形性の影響が考えられる MS, AS-A, AS-B と AS-C の地盤物性の比較を行う。図-5 は, 各解析によって求めた S 波速度を比較したものである。ほぼ全ての層で MS, AS-A, AS-B, AS-C の順に大きい値を示し, 中でも MS の S 波速度は, 明らかに低い値を示した。MS と AS-C を比較すると, GL-38m よりも浅い層では, AS-C の S 波速度よりも MS の S 波速度は 20%~35%の割合で減少し, それよりも深い層では, 10%前後の割合で減少している。AS-A と AS-C との関係は GL-22m よりも浅い層では 5~15%の割合で減少しているのに対し, それより深い層では 2~3%の割合で減少している。よって深層に比べ浅い層では MS と AS-A の S 波速度は AS-C からの減少割合がより大きく, これにより, このサイトでは MS と PGA 約 140gal を記録した AS-A で S 波速度の非線形性があることを確認できた。

図-6 は, 各解析によって求めた減衰比を比較したものである。MS の減衰比は AS に比べ明らかに大きい値を示し, 特に浅い層では 10%以上になっていることから,

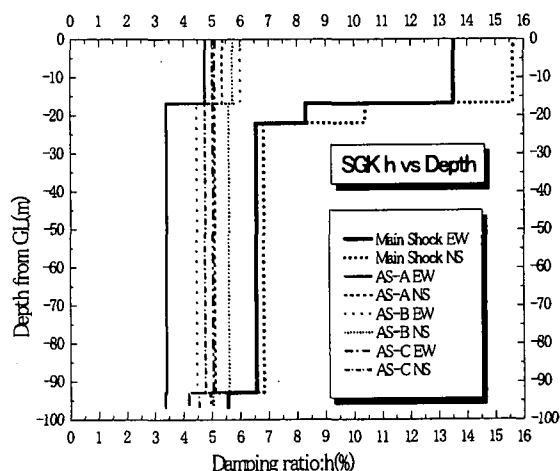


図-6.逆解析で求めた減衰比:h の比較

MS は減衰比でも非線形性の影響があるといえる。AS の減衰比は全体的に 3~6%となり, 大きい余震の方が小さい値を示している場合もあり, はっきりした傾向がつかめなかった。

(2) 逆解析物性による震動応答解析

多層系地盤モデルの各層に逆解析物性を与え, 基盤層である GL-97.0m から観測波形を入力して震動応答解析を行い, GL-24.9m と GL-0.0m の加速度波形を再現した。図-7 は MS, 図-8 は AS-A, 図-9 は AS-B, 図-10 は AS-C の代表例である。どの波形もある程度よく再現されており, 特に主要動の部分での再現性がよい。最大加速度も若干のばらつきがあるものの近い値が算出されている。よって, 今回の逆解析物性は地震波を再現するにあたり妥当な結果であると思われる。

(3) 逆解析物性のひずみ依存性に関する検討

図-11 では有効ひずみとせん断剛性比の関係を示した。有効ひずみは最大せん断ひずみの 0.65 倍の値として定義し, せん断剛性比 G/G_0 は MS, AS-A, AS-B の S 波速度の同定値 V_s と, 最も小さい余震群 AS-C の S 波速度の同定値 V_{s0} から, 以下の式で算出した。

$$G/G_0 = (V_s/V_{s0})^2$$

図-11 よりひずみが大きくなるにつれてせん断剛性比が低下していく傾向が明瞭に見られる。また図-12 は有効ひずみと減衰比の関係をしたものであり, ひずみが大きくなるにつれて減衰比が増加していく傾向が読み取れる。さらに, 図中に異なる記号で示した土質の違いに着目すると, 粘性土ほど非粘性土に比べてグラフの右側に位置する傾向が見られる。この傾向は従来の室内土質試験によるものと一致しており, 自然地盤においても土は室内試験と定性的に同じ非線形挙動を示すことが前回の研究²⁾と同様に SGK 地点のみでも明らかになったと言える。

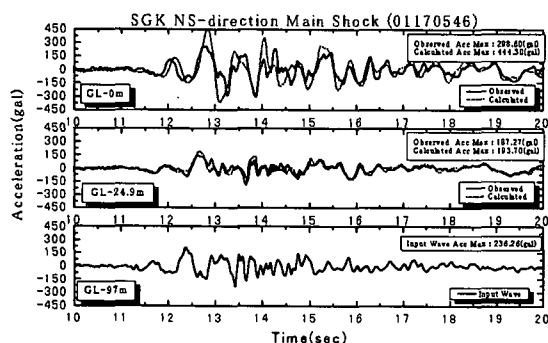


図-7 MS の観測記録と震動応答解析結果

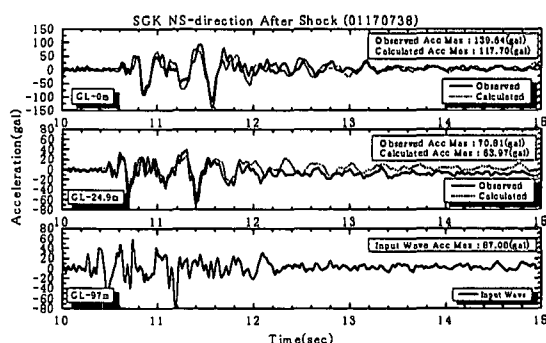


図-8 AS-A の観測記録と震動応答解析結果

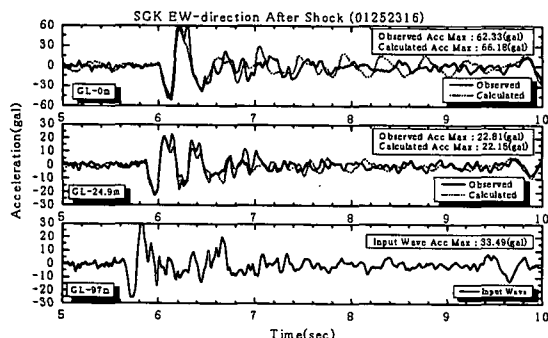


図-9 AS-B の観測記録と震動応答解析結果

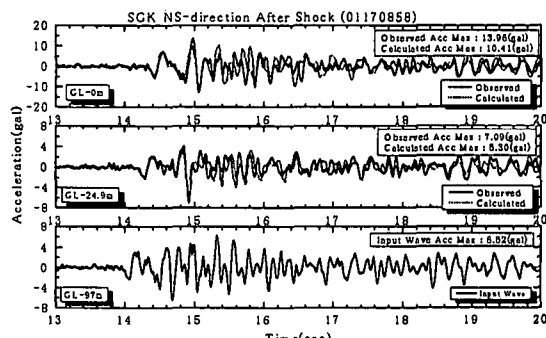


図-10 AS-C の観測記録と震動応答解析結果

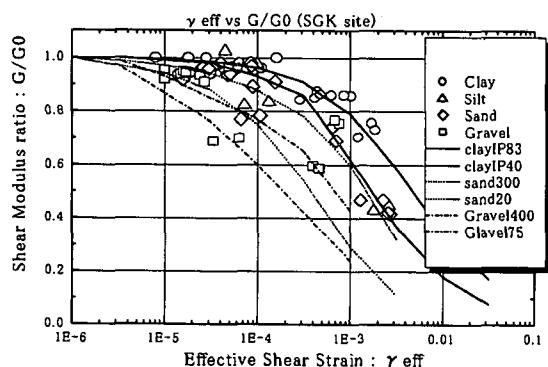


図-11 有効ひずみとせん断剛性比

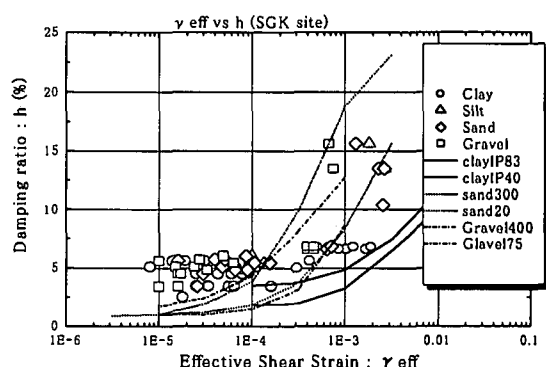


図-12 有効ひずみと減衰比

5.まとめ

- 1) 深層に比べ浅い層では MS と AS-A の S 波速度は AS-C からの減少割合がより大きく、これにより、このサイトでは MS と PGA 約 140gal を記録した AS-A で S 波速度の非線形性があることを確認できた。
- 2) MS の減衰比は AS に比べ明らかに大きい値を示したが、AS の減衰比は大きい余震の方が小さい値を示している場合もあり、はっきりした傾向がつかめなかった。
- 3) 逆解析物性による震動応答解析では、どの波形もある程度よく再現されており、特に主要動の部分の再現性がよい。
- 4) 逆解析物性のひずみ依存性に関する検討ではひず

みが大きくなるにつれてせん断剛性比が低下し、減衰比が増加していく傾向にあった。また、土質別の変化傾向は室内試験と同様であることが分かった。

謝辞：今回用いた地震データを提供していただいた関西電力㈱建設部ならびに解析ソフトの提供とご指導をいただいた佐藤工業㈱の末富岩雄様に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 國生剛治, 松本正毅, 他 (1998): 兵庫県南部地震の鉛直アレー記録によるサイトの非線形増幅特性: 第 10 回地震工学シンポジウム論文集/第 1 分冊 pp999-1004
- 2) Kokusho T. and Matsumoto M. (1998): Nonlinearity in site amplification and soil properties during the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake: Special Issue of Soils and Foundations pp1-8