

2007年新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所サービスホール鉛直アレイ強震記録から推定した 表層地盤の非線形性状と露頭基盤波

○時松 孝次¹⁾, 新井 洋²⁾

1) 東京工業大学 理工学研究科 建築学専攻, kohji@o.cc.titech.ac.jp

2) 防災科学技術研究所, arai.h@bosai.go.jp

1. はじめに

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震(気象庁マグニチュード $M_J = 6.8$)¹⁾の際、震央距離16kmに位置する東京電力柏崎刈羽原子力発電所サービスホール(以下、サービスホール)では、表層付近から深度250mまでの砂層および泥岩層内4深度の鉛直アレイ強震記録が得られた^{2), 3)}。得られたアレイ強震記録は、原子炉サイト周辺では唯一のものであり、激震時におけるこれらの地盤の非線形性状を把握し、原子炉建屋の耐震性を評価する上で、極めて貴重な資料と考えられる。

鉛直アレイ強震記録から地盤の非線形性状を把握する試みは、地表と地中のスペクトル比に対して1次元等価線形解析(例えばSHAKE)⁴⁾を用いて地盤内の等価S波速度と減衰定数の分布を同定する逆問題として、数多く行われている⁵⁾⁻¹⁰⁾。しかし、既往の研究で用いられている等価線形解析では、減衰のひずみ依存性と周波数依存性のうち、いずれか一方のみしか考慮していないため、サービスホール強震記録のような大ひずみレベルの地盤応答を適切に評価することが難しい¹¹⁾。

そこで本論文では、各周波数の減衰定数が、せん断ひずみの時刻歴のフーリエ振幅に依存すると仮定した¹²⁾1次元重複反射理論に基づく逆解析により、サービスホールの鉛直アレイ強震記録から、2007年新潟県中越沖地震の本震および余震における地盤内の等価S波速度(せん断剛性比)と減衰定数のひずみ依存性(以下、 $G-\gamma$ 関係、 $h-\gamma$ 関係)、ならびに露頭基盤波を推定する。

2. 鉛直アレイ観測点の地盤と強震記録の特徴

図1^{2), 2)}に、サービスホール鉛直アレイの位置、この地点の深度250mまでの地盤のS波速度構造と地質構造および地震計の埋設深度(以下、SG1-SG4)を示す。地震計はいずれも3成分で、EW、NS成分の方位は、それぞれ真東および真北から時計回りに約19度回転している²⁾。なお、本震後、建物や観測井周辺の表層地盤は、相対的に15cm程度沈下し、極めて大きなひずみを受けたことが示唆される。また、付近に噴砂などは確認できなかった。

本論文では、公開されている鉛直アレイ強震記録のうち、7月16日10時13分の本震、同15時37

分の最大余震(以下、余震L: $M_J = 5.8$, 震源深さ23km, 震央距離10km)³⁾および同21時08分の余震(以下、余震S: $M_J = 4.4$, 震源深さ20km, 震央距離10km)³⁾の3地震について、その卓越方向となるEW成分を検討対象とする。図3に、本震のEW成分の加速度記録を示す。表層に向かって、短周期成分が減少し、最大加速度が小さくなっている。

図4に、3地震の観測記録(EW成分)の最大加速度と最大速度の深さ方向分布を●■▲印で示す。余震S、Lでは、最大加速度・最大速度とも地表に向かって増大している。一方、本震では、最大加速度

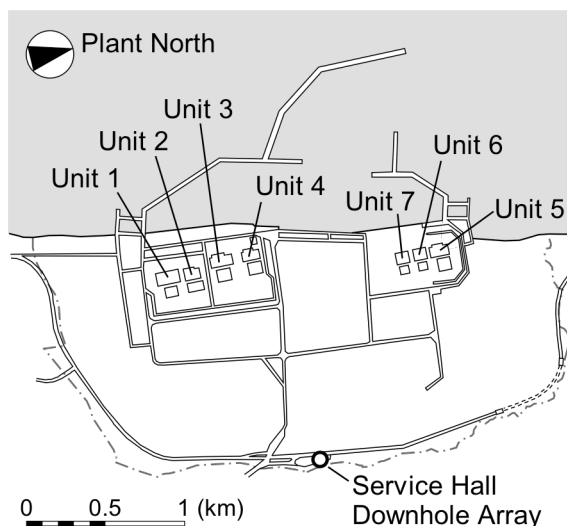


図1 原子力発電所と鉛直アレイの配置

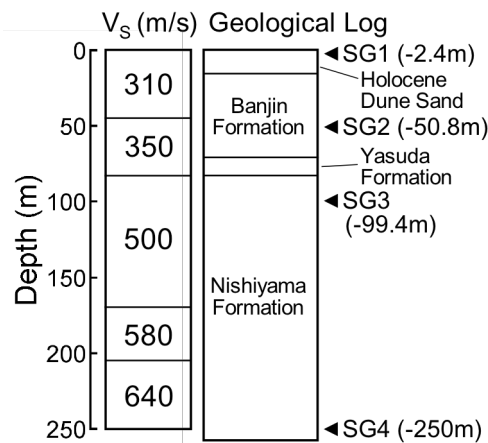


図2 鉛直アレイの地盤構造とS波速度構造

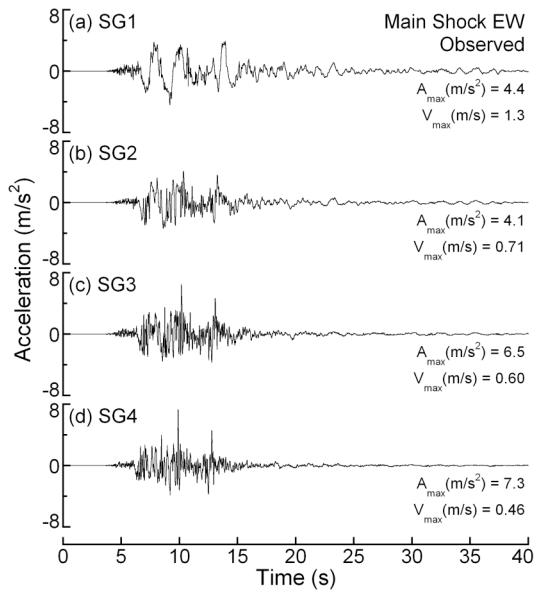


図3 本震における加速度の時刻歴

は地表に向かって減少していることが確認される。しかし、いずれに地震でも最大速度は、地表に向かって増加している。

図5に、余震 S, L, 本震における観測記録 (EW

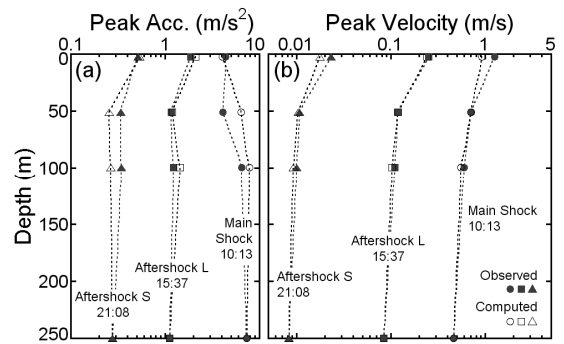


図4 3地震における観測及び逆解析された最大加速度及び速度の深度分布

成分) の SG1/SG2, SG2/SG3, SG3/SG4 のフーリエスペクトル比を黒細線で示す。図から、余震 S, L では、周期 0.1-2 秒に見られるスペクトルピークは、いずれも 5 程度以上で鋭く、その間に明瞭な谷 (Trough) を形成している。これに対して、本震では、周期 1 秒以上のスペクトルピークは、余震と同様に比較的鋭いが、周期 1 秒以下のスペクトルピークや谷が顕著でなくなる。また、SG1/SG2, SG2/SG3 の周期 1 秒以上のピーク周期は地震規模が大きくな

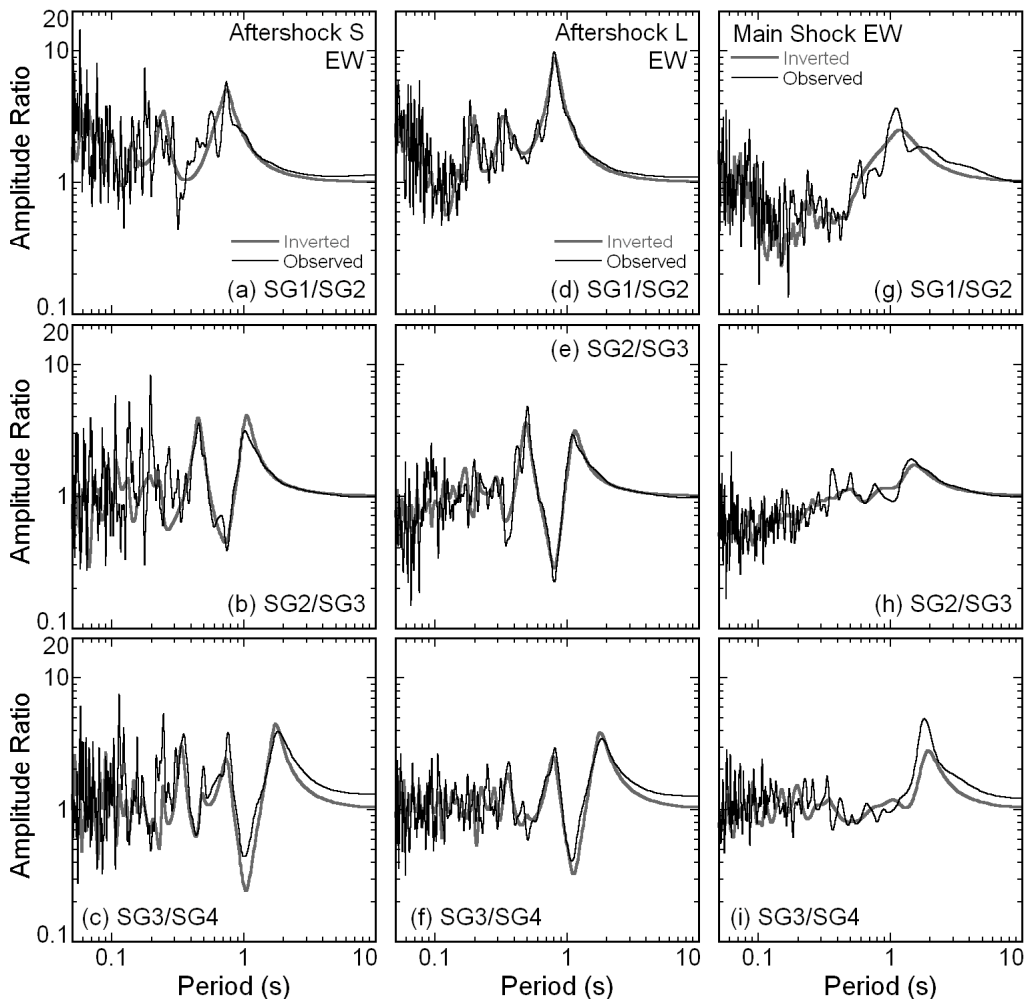


図5 3地震の観測および逆解析されたスペクトル比の比較

るにしたがって延びているが、SG3/SG4 ではそのような傾向は認められない。以上から、SG1/SG2, SG2/SG3 に対応する、深度 50-100m 程度以浅の地盤が、それ以深(S3/S4 に対応)に比べて、本震時に大きく非線形化した可能性が示唆される。

3. 遺传的アルゴリズムによる地盤の等価 S 波速度と減衰定数の推定方法

3.1 地盤の地震応答解析および逆解析の方法

地盤が N 層から成り、強震記録が異なる I 深度(層境界)で得られているとする。S 波の鉛直下方入射を仮定し、各層の等価物性値を用いた 1 次元等価線形解析⁴⁾により、各深度間の観測スペクトル比を説明できるものとする。この地盤の地震応答解析に必要な各層の物性値のうち、層厚 H と密度 ρ は既知、等価 S 波速度 V_{SE} と減衰定数 h は未知とし、 V_{SE} は一意に、 h は、Hardin-Drnevich (HD) モデル¹³⁾および杉戸ら¹²⁾の方法を参考に、次式により与えられるものとする。

$$h = h_{\min} + (h_{\max} - h_{\min}) (\gamma_{\text{eff}}(f) / \gamma_{\text{ref}}) / (1 + \gamma_{\text{eff}}(f) / \gamma_{\text{ref}}) \quad (1)$$

$$\gamma_{\text{eff}}(f) = 0.8 \gamma_{\max} \cdot \Gamma(f) \quad (2)$$

ここに、 f は周波数、 h_{\min} , h_{\max} は各層の最小および最大の減衰定数、 γ_{ref} , γ_{\max} , $\gamma_{\text{eff}}(f)$, $\Gamma(f)$ は、各層の規準せん断ひずみ、最大せん断ひずみ、各周波数に対する有効せん断ひずみ、せん断ひずみの基準化フーリエスペクトル(最大値 1)である。このうち、各層に対して独立の未知パラメータは、 V_{SE} , h_{\min} , h_{\max} , γ_{ref} の 4 つであり、これらの値を逆解析により推定する。なお、推定される h_{\min} , h_{\max} , γ_{ref} は、有効せん断ひずみ ($0.8\gamma_{\max}$) 以下の h - γ 関係が最適になるように求められた値で、実際の地盤材料の最大・最小値などと直接対応しない可能性がある。

逆解析は、次式で与えられる評価関数 F (misfit) を、最小とする(観測スペクトル比を説明する)地盤構造を求めることとなる。

$$F = \sum_{i=1}^{I-1} \sum_{j=i+1}^I \sum_{k=k_{\min}}^{k_{\max}} w_k^2 (\log_{10} A_{m,ij}(f_k) - \log_{10} A_{c,ij}(f_k))^2 \quad (3)$$

ここに、 $A_{m,ij}(f)$ および $A_{c,ij}(f)$ は、地震計埋設 I 深度のうち任意の 2 深度 i , j 間の観測および理論スペクトル比、 k_{\min} , k_{\max} は整数で、それぞれ f_{\min}/T , f_{\max}/T , f_{\min} , f_{\max} は対象周波数の最小値と最大値、 T は加速度記録の継続時間、 w_k は重みで $1/f_k$ である。

(3) 式の最適化手法には、大局的探索能力が高く、ロバスト性・安定性に優れた遺传的アルゴリズム (GA) を用いる。ここでは、Goldberg¹⁴⁾, 山中・石田¹⁵⁾などを参考に、単純 GA¹⁴⁾ にエリート選択¹⁴⁾を加える方法とする。ただし、乱数の初期値を変えて複数回の試行を行い、各試行で得られた最適解の分布を最終的な推定結果とする。

3.2 サービスホール鉛直アレイ記録への適用

逆解析にあたり、サービスホール直下の地盤を、

図 2²⁾ および文献 2), 3)などを参考に、N = 16 層に分割する。地盤各層の密度 ρ は、地質や土質^{2), 3)}などから、 $1.65-1.80 \text{ Mg/m}^3$ と仮定する。各層の未知パラメータ (V_{SE} , h_{\min} , h_{\max} , γ_{ref}) の探索範囲は、PS 検層²⁾や既往の室内動的試験結果など^{16), 17)}を参考に、地盤工学的に有り得る値の範囲を設定した。

地盤各層のせん断ひずみや各層境界での加速度の時刻歴波形・最大値は、深度 250m (SG4) の観測記録 (EW 成分) を S 波の within motion として用いた場合の応答解析結果を用い、 $T = 81.92 \text{ s}$, $f_{\min} = 0.2 \text{ Hz}$, $f_{\max} = 25 \text{ Hz}$, $I = 4$ (SG1-SG4) とする。また、GA では、パラメータの離散化ビット数 8 (Gray Code)¹⁴⁾, 個体数 200, 世代数 500, 交叉率 0.7, 突然変異率 0.02 とし、10 回の試行を行った。

4. サービスホール直下地盤の等価 S 波速度(せん断剛性比)と減衰定数のひずみ依存性

図 5 の灰太線は、余震 S, L, 本震について、GA 各 10 試行のうち misfit ((3) 式) が最小となる最適解(地盤モデル)に対応する SG1/SG2, SG2/SG3, SG3/SG4 の理論スペクトル比 (EW 成分) である。いずれの場合も、理論スペクトル比は、絶対値・周期特性とも、観測スペクトル比と良く適合している。とくに、本震時の深度 100m 以浅間の 1 秒以上のスペクトル比 (SG1/SG2, SG2/SG3) のピーク周期の伸びやピーク値の低下ならびに全スペクトル比における周期 1 秒以下の顕著なスペクトルピークとその間の谷の消失なども良く再現している。

図 6 に、余震 S, L, 本震に対して推定された地盤各層の等価 S 波速度 V_{SE} および最大せん断ひずみ γ_{\max} の分布を灰太線・黒破線・黒細線で示す。図から、いずれの地震においても、地盤モデルの最上層および最下層では、上方あるいは下方に地震記録が存在しないため、GA 全 10 試行の最適解のばらつきが大きい。しかし、この 2 層を除く深度 1.2-250m の 14 層では、解のばらつきは比較的小さい。ただ

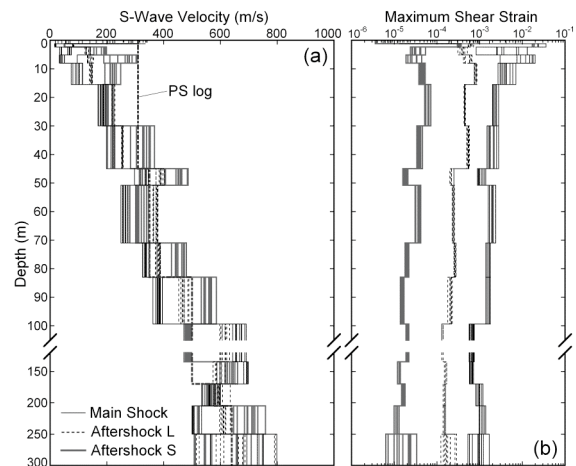


図 6 3 地震の逆解析から求めた S 波速度構造とせん断ひずみ

し、余震より本震の方が大きな等価S波速度が推定されている層（例えば第12層）もある。また、余震Sにおける等価S波速度は、深度30m以深では、PS検層結果（350-700m/s程度）と概ね整合しているが、それ以浅では、せん断ひずみ 10^{-5} レベルで、PS検層結果の0.7倍（200m/s）程度となっている。その原因は不明であるが、以下では、余震Sにおける値を弾性時のものとする。

図7に、新期砂層、番神砂層、西山層のそれぞれ代表的な1層について、余震S、L、本震に対して推定された等価S波速度 V_{SE} と有効せん断ひずみ $(0.8\gamma_{max})$ から求めた $G-\gamma$ 関係および最小・最大減衰定数 h_{min} 、 h_{max} と規準ひずみ γ_{ref} から求めた $h-\gamma$ 関係（(1)式）を示す。この際、せん断剛性 $G = \rho V_s^2$ 、初期剛性 G_0 は余震Sに対して推定された等価S波速度のGA全10試行の平均値を用いて算定している。また、 $h-\gamma$ 関係は、解析で有効ひずみの値が得られた範囲のみを示している。図から、得られた地盤各層の $G-\gamma$ 関係は、ある程度安定しており、また、 $h-\gamma$ 関係は、ややばらつきが大きい。ほとんどの地層で、本震の結果が概ね余震の結果を包含しているように見える。

図6より、深度70m以浅の砂層（新期砂層・番神砂層）の最大せん断ひずみは、本震では、余震S、Lより100、10倍程度大きく、 $2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2}$ 程度に達している。また、図6、7から、これら砂層のせん断剛性比は、余震Sの値に対して、余震Lで0.3-0.8程度、本震で0.01-0.5程度、一方、最大減衰定数は、余震Sで5-10%程度、余震Lで10-30%程度、本震で20-35%程度となっており、各層に生じるひずみが大きいほど、せん断剛性比は小さく、減衰定数は大きくなる傾向があり、剛性および減衰のひずみ依存性が明瞭に認められる。また、その傾向は、浅い層ほど顕著である。

図7の灰破線は、既往の砂試料の室内動的試験結果の範囲（有効拘束圧20-294kPa）^{16), 17)}を示している。逆解析から得られた $G-\gamma$ および $h-\gamma$ 関係は、同程度の原位置拘束圧条件下では、既往の室内試験結果と概ね調和的である。以上の結果は、深度70m以浅の砂層が、本震時に顕著に非線形化し、その程度は浅い層ほど顕著であったことを強く示している。ただし、推定された減衰定数は、既往の室内試験結果に比べて、やや大きめの値をとる傾向も認められる。この原因として、1次元波動理論の仮定（鉛直入射や水平成層）、散乱減衰を無視したことの影響、室内実験と原位置の応力条件の相違などが考えられる。一方、図6、7から、深度70m以深の泥岩層（安田層・西山層）の最大せん断ひずみは、余震S、Lおよび本震において、 10^{-5} 程度から $5 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$ 程度の範囲で10倍程度ずつ異なっているが、等価S波速度は、3地震とも概ね同等（せん断剛性

比は概ね1であり、PS検層結果（500-700m/s程度）と調和的である。また、図7から、安田層・西山層の減衰定数は、余震Lではやや大きめに推定されている場合もあるが、概ね5%程度以下であり、深度70m以浅の砂層に比べて、地震の大小による違いが少ない。以上から、本震・余震ともに、深度70m以深の泥岩層の非線形化は顕著でなかったことが示唆される。

図8には、本震における最適地盤モデルの応答解析から得られたSG1-SG3の理論加速度時刻歴波形、SG4位置での露頭基盤波を示す。本論文では、時刻歴の波形や最大値は最適化の対象ではないが、図3、8の比較から、最適地盤構造に対して求められた加速度時刻歴はいずれも観測値と良く適合していることが分かる。また、図8から、深度250mでの推定露頭基盤波の最大加速度は1.2G程度、最大速度0.76m/s程度であることが分かる。

図4に、3地震における最適地盤モデルの応答の

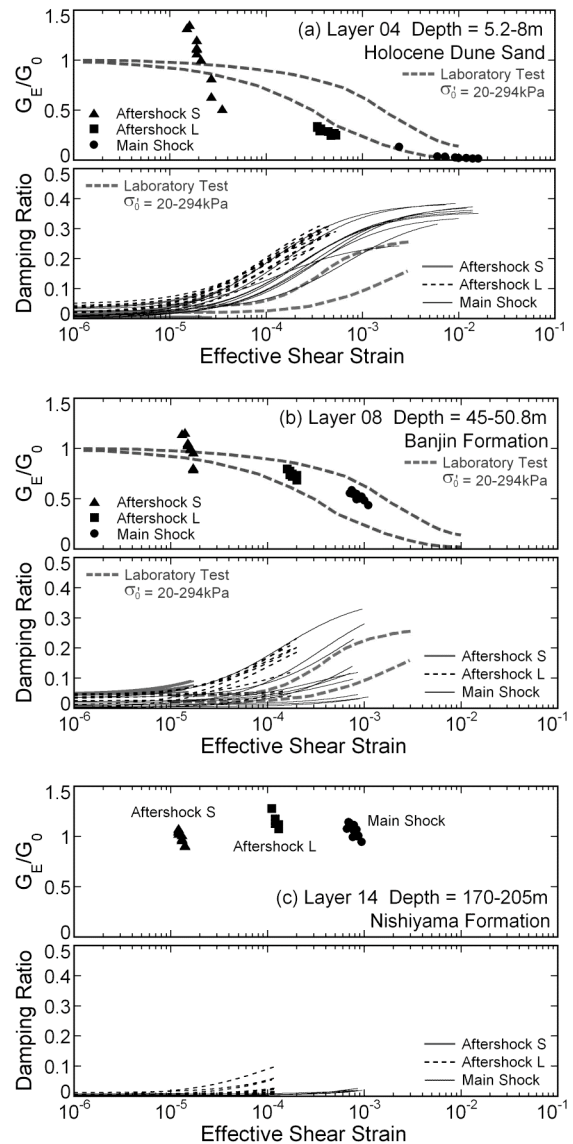


図7 逆解析から推定された地盤の非線形性状と室内試験結果の比較

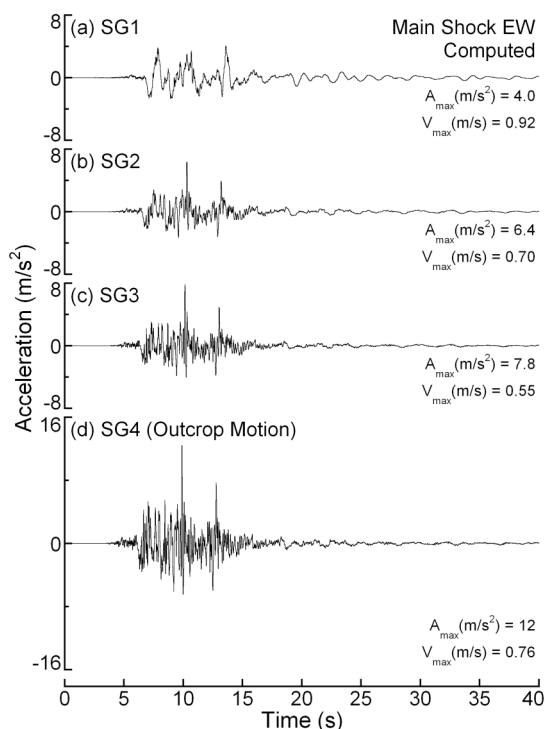


図8 逆解析から推定された本震における各深度の加速度時刻歴

SG1-SG3 の最大加速度・最大速度を●■▲印で示す。図から、余震 S と本震の深度 50.8m (SG2) の最大加速度を除いて、理論および観測の最大値も概ね適合していることが分かる。以上の結果は、3 地震とも、露頭基盤波を含めた逆解析がある程度適切に行われたことを示唆している。

5. まとめ

せん断ひずみのフーリエ振幅に依存する周波数特性を持つ減衰を仮定した 1 次元等価線形解析に遺伝的アルゴリズムを適用した逆解析法を示し、2007 年新潟県中越沖地震における柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレイ記録から、地盤各層の非線形形状（せん断剛性と減衰定数のひずみ依存性）を推定した。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 提案手法により求められた地震計埋設深度間のフーリエスペクトル比および各深度の時刻歴波形・最大値は、本震・余震とも、観測記録のそれと良く対応する。このことは、推定された地盤各層の非線形形状の妥当性を示している。
- 2) 深度 70m までの砂層（せん断ひずみ 10^{-5} レベルでの等価 S 波速度 200-350m/s 程度）は、本震時に、大きく非線形化したと考えられ、その最大せん断ひずみは $2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2}$ 程度、せん断剛性比は 0.01-0.8 程度、減衰定数は 20-35%程度と推定される。また、最大余震時の砂層の非線形化の程度は、本震時と小余震時の中間程度と推察される。
- 3) 本震および余震から推定された砂層のせん断剛

性比および減衰定数のひずみ依存性は、既往の砂試料の室内動的試験結果（有効拘束圧 20-294kPa）と、同程度の原位置拘束圧条件下では、概ね調和的である。ただし、減衰定数は、既往の室内試験結果より、やや大きめの値となる傾向が見られる。

- 4) 深度 70m 以深の泥岩層（せん断ひずみ 10^{-5} レベルでの等価 S 波速度 500-700m/s 程度）は、本震時・余震時ともに、ほとんど非線形化しなかったと考えられ、その最大せん断ひずみは $5 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$ 程度、せん断剛性比は概ね 1、減衰定数は 5%程度と推定される。
- 5) 逆解析された深度 250m での露頭基盤波の最大加速度は 1.2G 程度、最大速度 0.76m/s 程度である。

謝辞

本論文では、東京電力株式会社が公開した文献 2)、3) のデータを使用した。また、現地調査は同社のご厚意により行った。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 気象庁：平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震について(第 3 報), <http://www.jma.go.jp/jma/press/0707/16c/kaisetsu200707161600.pdf>
- 2) 東京電力(株)：柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年新潟県中越沖地震時に取得された強震観測データの分析に係る報告(第一報), 2007.
- 3) 東京電力(株)：柏崎刈羽原子力発電所における平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震の加速度時刻歴波形データ(本震, 余震), (財)震災予防協会, 2007.
- 4) Schnabel, P. B. *et al.*: SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, *EERC Report*, **72-12**, 1972.
- 5) 太田裕：地震工学への最適化法の適用, 日本建築学会論文報告集 **229**, 35-41, 1975.
- 6) Chang, C. Y. *et al.*: Evidence of Nonlinear Soil Response during a Moderate Earthquake, *12th Int'l Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1927-1930, 1989.
- 7) 佐藤智美ほか：堆積盆地における S 波伝播の識別と土の非線形性の同定, 日本建築学会構造系論文報告集 **449**, 55-68, 1993.
- 8) 時松孝次, 岩崎友洋：鉛直アレイ強震記録から推定した表層地盤の非線形特性, *9JEES*, 793-798, 1994.
- 9) 小林喜久二ほか：伝達関数の多地点同時逆解析による地盤減衰の推定(その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, 253-254, 1999.
- 10) 佐藤智美：鉛直アレイデータに基づく S 波の斜め入射を考慮した地盤の減衰定数の同定, 日本建築学会構

- 造系論文集 **569**, 37-45, 2003.
- 11) Tokimatsu, K. and Sekiguchi, T.: Effects of Nonlinear Properties of Surface Soils on Strong Ground Motions Recorded in Ojiya during the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake, *Soils and Foundations*, **46**(6), 765- 775, 2006.
 - 12) 杉戸真太ほか：周波数依存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，**493**/II-27, 49-58, 1994.
 - 13) Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, *ASCE*, SM7, 667-692, 1972.
 - 14) Goldberg, D. E.: Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Addison-Wesley Publishing Company, Inc.*, 412pp., 1989.
 - 15) 山中浩明, 石田寛：遺伝的アルゴリズムによる位相速度の逆解析，日本建築学会構造系論文集 **468**, 9-17, 1995.
 - 16) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用, 236-260, 1996.
 - 17) Kokusho, T.: Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range, *Soils and Foundations*, **20**(2), 45-60, 1980.