柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレイ強震記録 から推定した地盤の非線形性状と基盤露頭波

SOIL NONLINEARITY AND BEDROCK STRONG MOTIONS ESTIMATED FROM
DOWNHOLE ARRAY RECORDS AT KASHIWAZAKI-KARIWA NUCLEAR
POWER PLANT DURING THE 2007 NIIGATA-KEN CHUETSU-OKI

時松 孝次*, 新井 洋**, 蓑和 健太郎***

Kohji TOKIMATSU, Hiroshi ARAI and Kentaro MINOWA

Nonlinear soil properties as well as bedrock outcrop strong motions are back-calculated using 4-depth downhole strong motions recorded at the Kashiwazaki-Kariwa nuclear power plant during the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake. Adopted in the inverse analysis are genetic algorithms (GA) combined with a 1-D equivalent-linear response analysis in which strain-dependent damping ratios are assumed in the frequency domain. The inversion results show that the surface layer down to a depth of 70 m exhibited strong nonlinear behavior with a shear modulus ratio down to about 0.01 and a damping ratio up to about 35%.

Keywords: the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake, downhole array record, equivalent S-wave velocity, strain-dependent damping ratio, bedrock strong motion, genetic algorithm

2007年新潟県中越沖地震, 鉛直アレイ強震記録, S波速度, 減衰定数, 基盤露頭波, 遺伝的アルゴリズム

1. 序論

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⁾では, 震源域またはその近傍に位置する柏崎市や刈羽村などで, 地盤や建物等に多大な被害が生じた。その際, 震央距離 16 km 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, 地盤内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, 大地震時の震源域内のもので, しかも, 表層付近から深度 250m までの砂層および泥岩層内のものを含み, 激震時におけるこれらの地盤の地震時挙動(非線形性状)を把握する上で, また, この地域の基盤入力地震動を評価する上で, 極めて希有かつ貴重な資料と考えられる。

鉛直アレイ強震記録を用いて地盤の地震時挙動を把握する試みは, 太田⁴⁾の先駆的研究以来, 数多く行われている。太田⁴⁾は, S波の鉛直下方入射の仮定と1次元重複反射理論(例えば SHAKE などに代表される等価線形解析)⁵⁾に基づいて, 地表と地中の観測波形のフーリエスペクトル比の逆解析から, 地盤内各層の等価S波速度と等価減衰定数の分布を同定している。

小林ら⁶⁾は, 地盤の減衰が, せん断による材料(履歴)減衰と散乱減衰からなり, 前者はS波速度に, 後者は周波数に依存すると仮定した1次元重複反射理論に基づいて, 地盤物性の逆解析を行っている。佐藤⁷⁾は, 減衰の周波数依存性を考慮して, S波の斜め入射による影響について検討している。しかし, いずれの研究も, 減衰が微小ひずみレベルでの散乱減衰に支配されることを前提とし, せん断ひずみの大きさに依存する履歴減衰が卓越すると考えられる強震動に適用することができない。

Chang ら⁸⁾, 佐藤ら⁹⁾は, 減衰が履歴減衰に支配されることを前提とした等価線形解析に基づいて, 地盤減衰のせん断ひずみ依存性を同定している。しかし, これらの手法を直接, サービスホールの強震記録に適用することは難しいと考えられる。これは, これらの手法で用いられている等価線形解析を, 大ひずみレベルの地震記録に適用すると, 高周波(短周期)成分の応答が過減衰となることが, 以前から指摘されているためである¹⁰⁾。

杉戸ら¹⁰⁾は, 上記の問題を解決するため, 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1次元等

* 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授・工博

** 建築研究所構造研究グループ 主任研究員・博士(工学)

*** 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Senior Research Engineer, Dept. of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology

価線形解析を提案している。この手法は、順解析では既に多くの実績があり、せん断ひずみ 10^{-2} を超える応答に対しても妥当な結果を与えている事例¹⁾もあることから、大ひずみレベルのアレイ強震記録から地盤物性を評価する逆解析に容易に適用可能と考えられる。

以上の背景から、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¹⁰⁾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波速度と減衰定数のひずみ依存性（以下、 h - γ 関係）を推定する。また、解析から得られた深度250mの基盤露頭波の特性について考察する。

2. 鉛直アレイ観測点の地盤と強震記録

サービスホールは、柏崎刈羽原子力発電所メインゲートの東側に位置している（図1）²⁾。サービスホールの深度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を図2²⁾に示す。この地点の標高は67.5mで、発電所1-4、5-7号機のそれ（5.3mおよび12.3m）と比べて、62.2mおよび55.2m高くなっている。そのため、発電所1-7号機の表層地盤にはほとんど存在しない新期砂層と番神砂層が、安田層と西山層（泥岩）の上部を覆っている。文献2)によると、地盤のS波速度は、新期砂層および番神砂層で310-350m/s、安田層で350m/s、西山層で500-640m/sと、深くなるにつれて大きくなっている。地震計は、深度2.4、50.8、99.4、250mの4深度（以下、SG1-SG4）に、それぞれ3成分（鉛直および水平EW、NS成分）埋設されている。ただし、水平EW、NSの方位は、プラント建屋の向きに合わせてあり、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。なお、本震後、サービスホールの建物周辺や観測井（特にSG1）周辺の地盤は、相対的に15cm程度沈下し、表層地盤が極めて大きなひずみを受けたことを示唆している。なお、付近に噴砂などは確認できなかった。

図1 柏崎刈羽原子力発電所および同サービスホール鉛直アレイの位置²⁾

図2 サービスホール鉛直アレイ地点のS波速度構造、地質構造、地震計埋設深度²⁾

図3 サービスホール鉛直アレイで得られた加速度時刻歴波形（7月16日21時08分の余震，EW成分）³⁾

図4 サービスホール鉛直アレイで得られた加速度時刻歴波形（7月16日10時13分の本震，EW成分）³⁾

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分の本震および同21時08分の余震($M_J=4.4$ 、震源深さ20km、震央距離10km)³⁾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、4に、余震および本震時に観測された4深度の水平EW成分の加速度時刻歴波形³⁾を示す。図には、各深度の観測波形の最大加速度と最大速度の値も示す。最大速度は、加速度波形の1自由度系(固有周期20秒、減衰定数0.707)の相対速度応答¹²⁾から求めた。余震(図3)では、最大加速度・最大速度とも地表に向かって増大する傾向が認められる。一方、本震(図4)では、最大速度は地表に向かって増大しているが、最大加速度は地表に向かって減少している。

図5、6に、各深度のEW成分の観測波のフーリエスペクトル比を、余震と本震で比較して、黒細線で示す。スペクトルはFFTにより求め、バンド幅0.2HzのParzen Windowで平滑化した後、除算している。図5から、余震では、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程度以上で鋭くなっている。一方、本震(図6)では、周期1秒以上のスペクトルピークは余震と同様に顕著である。しかし、深度100m以浅間のスペクトル比(SG1/SG2, SG1/SG3, SG2/SG3)は、いずれも、余震に比べ、1-2秒のピーク周期が長くなり、そのピーク値が3程度と小さくなっている。また、本震のいずれのスペクトル比においても、1秒以下の短周期領域に、顕著なスペクトルピークが見られず、スペクトルの値は概ね1またはそれ以下となっている。

以上のような、余震と本震における地震動の深さ方向の増減傾向(図

3,4)とスペクトル比性状の違い(図5,6)は、深度50-100m程度以浅の地盤のいずれかの層が本震時に非線形化した可能性を示唆している。

3. 遺伝的アルゴリズムによる地盤のS波速度と減衰定数の推定方法

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¹⁰⁾1次元重複反射理論に、大局的探索能力が高く、ロバスト性・安定性に優れた遺伝的アルゴリズム(GA)を適用した逆解析により、地盤物性を同定する。

3.1 地盤の等価線形応答解析と必要な地盤物性

地盤がN層から成るものとし、強震記録が異なるI深度(層境界)で得られているものとする。最下層は半無限、各層は粘弾性体とし、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次元重複反射理論に基づく線形解析(1次元等価線形解析)⁵⁾により、観測された各深度間の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は、層厚H、密度 ρ 、等価S波速度 V_{SE} 、減衰定数 h である。このうち、層厚Hと密度 ρ は既知、等価S波速度 V_{SE} および減衰定数 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¹⁰⁾の方法を参考に、次式により与えられるものとする。

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

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

図5 地震計埋設深度間の観測スペクトル比(黒細線)と逆解析による理論スペクトル比(灰太線)(余震EW成分)

図6 地震計埋設深度間の観測スペクトル比(黒細線)と逆解析による理論スペクトル比(灰太線)(本震EW成分)

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、 γ_{max}^* 、 $\gamma_{\text{eff}}(f)$ 、 $\Gamma(f)$ は、杉戸ら¹⁰⁾の方法と同様、 $\gamma_{\text{eff}}(f)$ の収斂計算(繰返し応答解析)を行えば求められるため、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つとなる。なお、逆解析から推定される $h_{\min}^*$ 、 $h_{\max}^*$ 、 γ_{ref}^* は、有効せん断ひずみ $\gamma_{\text{eff}} = 0.8\gamma_{\text{max}}$ 以下の h - γ 関係が最適と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ため、*をつけて区別している。

3.2 逆解析の方法

逆解析は、観測スペクトル比を説明できる最適な地盤パラメータを探索することで、その評価関数 F (misfit)を次式とすれば、これを最小とする地盤パラメータを同定することとなる。

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

ここに、 $A_{m,ij}(f)$ および $A_{c,ij}(f)$ は、地震計埋設深度(全 I 個)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。なお、理論スペクトル比の算定では、観測スペクトル比(図5, 6)と同等の平滑化処理を行う。

逆解析に用いた遺伝的アルゴリズム(GA)は、Goldberg¹⁴⁾、山中・石田¹⁵⁾などを参考に、突然変異率を高めに設定した単純GA¹⁴⁾にエリート選択を加える方法で、その概要は以下のとおりである。

まず、地盤各層の未知パラメータをJビット(Gray Code)¹⁴⁾に離散

表1 逆解析における地盤各層の最小・最大減衰定数および規準せん断ひずみの探索範囲

パラメータ	探索範囲
最小減衰定数 $h_{\min}^*$	0 ~ 5 (%)
最大減衰定数 $h_{\max}^*$	15 ~ 40 (%)
規準せん断ひずみ γ_{ref}^*	-4 ~ -2 ($\log_{10} \gamma_{\text{ref}}^*$)

化し、乱数を用いて M 個の地盤モデル(集団)を作成する。次に、各地盤モデル(個体)の適合度を(3)式の逆数をスケーリング¹⁴⁾した値により評価し、エリート選択、親選択、2点交叉、突然変異¹⁴⁾の操作を行って、次世代の集団を生成する。この評価・操作を L 世代繰り返した時点で最も良い適合度を持つ地盤モデルを1回の試行での最適解とする。GAは確率的探索法的一种であるから、乱数の初期値を変えて複数回の試行を行い、得られた最適解の分布を最終的な推定値とする。

3.3 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、ボーリング調査やPS検層結果、地震計の埋設深度など^{2), 3)}を参考に、 $N = 16$ 層に分割する(図7)。地震計埋設深度SG1-SG4は、第3, 9, 13, 16層の上端に位置している。地盤各層の密度 ρ は、地質や土質など^{2), 3)}から、新期砂層、番神砂層、安田層、西山層で、それぞれ1.65, 1.65-1.80, 1.80, 1.65-1.75 Mg/m³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、土の値として工学的に有り得る範囲とし、さらに、本震時の表層部での顕著な剛性低下を考慮して、図7および表1のように定める。

地盤各層のせん断ひずみおよび各層境界での加速度の時刻歴や最大値などは、余震・本震とも、深度250m(SG4)の観測加速度波形(EW

図7 逆解析における地盤各層の等価S波速度の探索範囲および推定結果、解析から得られた最大せん断ひずみ(余震・本震, EW方向)

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、 $T = 81.92s$, $f_{min} = 0.2Hz$, $f_{max} = 25Hz$, $I = 4$ として、 $iC_2 = I(I-1)/2 = 6$ 組すべてのスペクトル比を(3)式の評価に用いる。また、GA では、 $J = 8$ ビット、 $M = 200$ 個体、 $L = 500$ 世代、親選択はルーレット規則、交叉率 70%、突然変異率 2%とし、10 回の試行を行った。

4. 逆解析から推定された地盤の等価 S 波速度と減衰定数

図 5, 6 の灰太線は、余震・本震それぞれについて、GA 全 10 試行のうち misfit (3)式)が最小となる最適解(地盤モデル)に対応する地震計埋設 4 深度間の 6 組の理論スペクトル比である。理論値は、いずれのスペクトル比においても、絶対値・周期特性とも、観測値と良く適合している。特に、本震時における、深度 100m 以浅間の 1 秒以上のスペクトル比 (SG1/SG2, SG1/SG3, 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 1 秒以下の短周期領域での顕著なスペクトルピークの消失なども良く再現している。また、GA 全 10 試行の最適解の misfit の変動係数は、余震・本震に対して 0.01, 0.03 であり、どの試行においても、理論と観測のスペクトル比は図 5, 6 と同程度に適合することを確認している。このことは、余震・本震とも、逆解析がある程度適切に行われたことを示唆している。ただし、本震では、SG4 を分母とする 3 スペクトル比 (SG1/SG4, SG2/SG4, SG3/SG4) において、逆解析による 1 次ピークが過小評価されている。その原因として、まず減衰定数の仮定の問題が考えられる。例えば、(1)式で定義した関数の自由度が少ないことによる影響などである。しかし、観測スペクトルのピーク値が余震より本震で大きいこと、また NS 方向ではそのような傾向はほとんど認められないことから、本震の EW 方向特有の問題、例えば、EW 方向の 2 次元的地形効果の影響などの可能性も考えられる。

図 7 に、余震・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} の分布を黒細線で示す。また、図 8, 9 に、新期砂層、番神砂層、安田層、西山層からそれぞれ代表的な 1-3 層(計 9 層)について、余震および本震に対して推定された最小・最大減衰定数 h_{min}^* , h_{max}^* と規準ひずみ γ_{ref}^* から求めた h - γ 関係 (1)式)の分布を示す。図 8, 9 では、解析で有効ひずみ $\gamma_{eff}(f)$ の値が得られた範囲のみを示している。

本論で用いた GA の場合、解のトレードオフが生じる可能性や、感度が低い解が存在する可能性がある。現状でその可能性を否定することは難しい。しかし、

得られた V_{SE} , γ_{ref}^* の平均変動係数は 0.1, 0.4 程度、 h_{min}^* , h_{max}^* の平均標準偏差は 0.008, 0.04 程度と比較的小さく、また、図 8, 9 から、本震に対して求められた地盤各層の h - γ 関係は余震の結果を概ね包含しており、比較的安定した解が得られていると判断される。ただし、図 7 から、余震・本震とも、地盤モデルの最上層を含む 4 層程度および最下層では、上方あるいは下方に地震記録が存在しないため、または、顕著な非線形化のためか、他よりばらつきがやや大きい。また、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)がある。その原因として、解析の仮定、評価関数の設定、地震記録の S/N 比、解のトレードオフなどの影響が考えられるが、その特定は今後の課題としたい。なお、等価 S 波速度 V_{SE} の探索範囲は、本震時の剛性低下も考慮して決定したため、本震と余震で異なっている。念のため、 V_{SE} の探索範囲を本震での探索範囲の最小値から余震での探索範囲の最大値とした試行を余震・本震に対して行い、探索範囲により、推定される V_{SE} に差異がないことを確認している。

図 8 地盤各層で推定された減衰定数のせん断ひずみ依存性(余震 EW 成分)

図 9 地盤各層で推定された減衰定数のせん断ひずみ依存性(本震 EW 成分)

図7より、深度70m以深の層（安田層・西山層）の余震および本震の最大せん断ひずみは、それぞれ $1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5}$ 程度、 $5 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$ 程度であるが、等価S波速度は、余震・本震で概ね同等であり、地震前に実施されたPS検層結果（黒点線）とも概ね整合している。また、図8,9から、これらの層の余震・本震における最大減衰定数は3%程度以下および5%程度以下であり、地震の大小による違いが少ない。以上の結果は、本震において、深度70m以深の層の非線形化は顕著でなかったことを示唆している。

一方、図7から、深度70m以浅の層（新期砂層・番神砂層）の本震の最大せん断ひずみは $2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2}$ 程度であり、余震時の値（ $3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-4}$ 程度）より100倍程度大きい。また、本震における等価S波速度は、余震における値やPS検層結果に比べて小さく、その傾向は浅い層ほど顕著である。なお、余震における等価S波速度は、深度30m以深ではPS検層結果と概ね整合しているが、それ以浅では200m/sとPS検層結果の0.7倍程度となっている。その原因は不明であるが、地盤各層の本震時の等価S波速度のPS検層結果および余震時の等価S波速度に対する比（括弧内が余震の値に対するもの）は、番神砂層で0.6-0.8（0.7-0.9）程度、新期砂層で0.1-0.3（0.1-0.4）程度であり、せん断剛性比にして、番神砂層で0.4-0.6（0.5-0.8）程度、新期砂層で0.01-0.1（0.01-0.2）程度となる。これらの結果は、既往の砂試料の室内動的試験結果（せん断ひずみ 10^{-3} でせん断剛性比0.2-0.5程度、せん断ひずみ 10^{-2} でせん断剛性比0.05-0.2程度）^{16), 17)}と概ね調和的である。

図8,9から、これら砂層の最大減衰定数は、上方に地震記録が存在しない第2層を除いて、余震時には5-10%程度であるが、本震時には20-35%程度で、本震時に大きなひずみを生じる層で大きな値となる傾

向があり、減衰のひずみ依存性が明瞭に認められる。図8,9の灰点線は、既往の砂試料の室内動的試験結果の範囲（深度2-30m程度）^{16), 17)}を示している。同定されたh- γ 関係は、余震・本震時とも、既往の室内試験結果と概ね調和的であるものの、やや大きめの値となっている。

図7-9に示す地盤各層の等価S波速度およびh- γ 関係は、それぞれ独立に同定されたものである（3章）。それにもかかわらず、同定された等価S波速度（図7）およびh- γ 関係（図8,9）から推察された各層の非線形化の程度は、いずれも上述のとおり、既往の室内試験結果と定性的には整合している。このことは、推定結果の妥当性を支持する要素の一つとも考えられ、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唆している。なお、減衰定数が既往の室内試験結果に比べて大きめに推定された原因として、1次元波動理論の仮定（鉛直入射、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が、その特定は今後の課題としたい。

5. 観測波形のシミュレーションと基盤露頭波の特徴

図10, 11に、余震・本震それぞれについて、GA全10試行のうちmisfitが最小となる最適解（地盤モデル）を用いた地震応答解析から得られた地震計埋設深度SG1-SG4の理論加速度時刻歴波形（EW成分、SG4のみ基盤露頭波）を示す。図には、各深度の理論波形の最大加速度と最大速度の値も示している。本論文では、本震など顕著な非線形現象が生じたと考えられる地震動に対して、等価線形解析を実施しているが、図3,4との比較から、余震・本震とも、その最大値は、深度50.8mのSG2で観測値との適合度がやや悪いものの、その他の深度の

図10 最適地盤モデルの応答解析から得られたSG1-SG4の理論加速度時刻歴波形（SG4のみ基盤露頭波）（余震EW成分）

図11 最適地盤モデルの応答解析から得られたSG1-SG4の理論加速度時刻歴波形（SG4のみ基盤露頭波）（本震EW成分）

図 12 推定された SG4 の基盤露頭波と SG1, SG4 の観測記録の加速度フーリエスペクトル (余震・本震, EW 成分)

図 13 推定された SG4 の基盤露頭波の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%, 余震・本震, EW 成分)

最大値と各深度の理論波形は、観測結果と概ね適合している。他の試行の最適解の時刻歴も、概ね同程度に観測結果と適合しており、推定結果の妥当性を示唆している。

図 10, 11 の深度 250m の SG4 における基盤露頭波の最大加速度・最大速度は、余震で 0.7m/s^2 , 0.02m/s 程度、本震で 12m/s^2 , 0.8m/s 程度であり、ともに同深度における観測記録のおよそ 2 倍となっている。図 12, 13 に、これら基盤露頭波の加速度フーリエスペクトルおよび加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) を灰太線で示す。図 12 には、比較のため、余震・本震における SG1, SG4 の観測記録 (EW 成分) の加速度フーリエスペクトルを黒細線・黒点線で示す。図から、推定された基盤露頭波の加速度フーリエスペクトルの形状は、余震・本震とも、SG1, SG4 の観測記録のスペクトル形状と比べて、周期 0.1 秒程度から 2-3 秒までの範囲が比較的平坦であり、概ね台形に近い形状となっている。これは、余震・本震いずれに対しても、深度 250m 以浅の地盤応答の影響が除去されたためと考えられる。図 13 の黒点線は、荷重指針¹⁸⁾の工学的基盤露頭波の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) において、余震・本震に対して、最大速度 $V_{\max} = 0.01\text{m/s}$, 0.5m/s と仮定した場合の速度一定領域のスペクトル形状を示している。図から、余震・本震とも、推定された基盤露頭波の最大速度は、仮定した $V_{\max}$ よりも大きい、加速度応答スペクトルの速度一定領域の形状は、指針のそれと良く対応している。

6. 結論

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いう仮定に基づく 1 次元重複反射理論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の本震および余震における柏崎刈羽原子力発電所サービshallの鉛直アレイ記録から、地盤内の等価 S 波速度および減衰定数のせん断ひずみ依存性 (h - γ 関係) を推定し、さらに得られた深度 250m の基盤露頭波の特性について考察した。得られた結論は以下のようにまとめられる。

- 1) 提案手法により求め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加速度時刻歴波形は、本震・余震とも、観測記録の特徴をよく説明できる。このことは、推定された地盤各層の等価 S 波速度および減衰定数のせん断ひずみ依存性、基盤露頭波が、ある程度の精度を有することを示唆している。
- 2) 余震記録の逆解析から推定された最大せん断ひずみは、深度 70m までの砂層で $3 \times 10^{-5} - 3 \times 10^{-4}$ 程度、それ以深で $1 \times 10^{-5} - 2 \times 10^{-5}$ 程

度、対応する等価 S 波速度は 200-350m/s 程度、500-700m/s 程度である。推定された表層の等価 S 波速度は、PS 検層結果の 0.7-1 倍程度であるが、それより深部の推定値は、PS 検層結果と調和的である。また、推定された最大減衰定数は、表層で 5-10% 程度、深部で 3% 程度以下である。

- 3) 本震記録の逆解析から推定された最大せん断ひずみは、深度 70m までの砂層で $2 \times 10^{-3} - 3 \times 10^{-2}$ 程度、それ以深で $5 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-3}$ 程度、対応する等価 S 波速度は 20-250m/s 程度、400-700m/s 程度である。表層 S 波速度は、余震記録の逆解析および PS 検層の結果のそれぞれ 0.1-0.9, 0.1-0.8 倍程度 (せん断剛性比で 0.01-0.8, 0.01-0.6 程度) となっているが、それより深部の推定値は、余震に対する推定結果ならびに PS 検層結果と調和的である。また、推定された減衰定数は、表層で 20-35% 程度、深部で 5% 程度以下である。
- 4) 逆解析から求められたせん断剛性比と減衰定数のせん断ひずみ依存性は、減衰定数の絶対値を除いて、既往の砂試料の室内動的試験結果と概ね調和的である。
- 5) 以上から、表層 70m 程度までの地盤が、本震時に大きく非線形化したものと推察される。
- 6) 逆解析から推定された深度 250m での基盤露頭波は、本震・余震とも、その加速度フーリエスペクトルの形状が、周期 0.1 秒程度から 2-3 秒までの範囲で比較的平坦であり、工学的基盤露頭波の特性を有していると考えられる。また、推定された本震の基盤露頭波の最大加速度は 12m/s^2 、最大速度は 0.8m/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、現地調査は東京電力株式会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/070716c/kaisetsu200707161600.pdf>, (参照 2007-08-05).
- 2) 東京電力株式会社: 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) 東京電力株式会社: 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) 太田裕: 地震工学への最適化法の適用, 1. 八戸港湾 SMAC 設置点の地下構造推定, 日本建築学会論文報告集, No. 229, pp. 35-41, 1975.

- 5) Schnabel, P. B., J. Lysmer, and H. B. Seed: SHAKE – A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, *EERC Report*, No. 72-12, 1972.
- 6) 小林喜久二, 久家英夫, 植竹富一, 真下貢, 小林啓美: 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) Q 値の基本式に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp. 253-254, 1999.
- 7) 佐藤智美: 鉛直アレーデータに基づく S 波の斜め入射を考慮した地盤の減衰定数の同定 –焼き鈍し法の適用–, 日本建築学会構造系論文集, No. 569, pp. 37-45, 2003.
- 8) Chang, C. Y., M. S. Power, Y. K. Tang, and C. M. Mok: Evidence of Nonlinear Soil Response during a Moderate Earthquake, Proc., *12th Int'l Conf. of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp. 1927-1930, 1989.
- 9) 佐藤智美, 佐藤俊明, 川瀬博: 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 –足柄平野久野地区の鉛直アレーで観測された弱震動と強震動の分析–, 日本建築学会構造系論文報告集, No. 449, pp. 55-68, 1993.
- 10) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫: 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, No. 493/II-27, pp. 49-58, 1994.
- 11) Tokimatsu, K., and T. Sekiguchi: Effects of Nonlinear Properties of Surface Soils on Strong Ground Motions Recorded in Ojiya during the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake, *Soils and Foundations*, Vol. 46, No. 6, pp. 765- 775, 2006.
- 12) 木下繁夫: 格子型フィルタの地震観測への応用, 地震 2, Vol. 39, No. 1, pp. 1-14, 1986.
- 13) Hardin, B. O., and V. P. Drnevich: Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, Proc., *ASCE*, SM7, pp. 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, No. 468, pp. 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, pp. 236-260, 1996.
- 17) Kokusho, T.: Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range, *Soils and Foundations*, Vol. 20, No. 2, pp. 45-60, 1980.
- 18) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, pp. 406-409, 1997.

(2008年1月8日原稿受理, 2008年4月24日採用決定)