

柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレー観測記録の NIOM 解析

茂木秀則¹⁾・○ SHRESTHA Santa Man²⁾・川上英二³⁾・岡村真也⁴⁾

1) 正会員 埼玉大学工学部建設工学科, さいたま市桜区下大久保 255, hmogi-2008f@kiban.civil.saitama-u.ac.jp
2) 埼玉大学理工学研究科, 3) 正会員 埼玉大学地圏科学研究センター, 4) 埼玉大学工学部建設工学科 (研究当時)

1. はじめに

2007年新潟県中越沖地震では柏崎刈羽原子力発電所において極めて強い地震動が観測された. このような重要構造物では非常に高密度に地震観測が行われており, 東京電力株式会社によって中越沖地震とその余震, ならびに, 中越沖地震以前の観測記録が公開された¹⁾. 本研究では, 柏崎刈羽原子力発電所内のサービスホール (KSH) の鉛直アレーにおける観測記録を用いて NIOM 解析を行い, 中越沖地震とその前後における S 波速度の経時変化を検討した.

2. NIOM 解析の概要^{2),3)}

鉛直アレーの 2 点の観測記録を $f(t)$, $g(t)$ とする. この 2 つの波形の関係は, 伝達関数 $H(\omega)$ (ω は角振動数) を用いて以下のように関連づけることができる.

$$G(\omega) = H(\omega)F(\omega) \quad (1)$$

ここで, $F(\omega)$, $G(\omega)$ はそれぞれ, $f(t)$, $g(t)$ のフーリエ変換である. NIOM 法は 2 点の観測結果から求めた $H(\omega)$ に対して, 入力 $x(t)$ を $x(0) = 1$ を満たす単純な波形としたときの入力 $x(t)$ と出力 $y(t)$ を求める手法であり, 具体的には, 次式で与えられる.

$$X(\omega_i) = N\Delta t \frac{1}{\left(1 + \frac{k_X}{c_X} \omega_i^2\right) (c_X + c_Y |H(\omega_i)|^2)}$$

$$Y(\omega_i) = H(\omega_i) X(\omega_i) \quad (2)$$

ここで, Δt , N はそれぞれ, 観測記録の時間ステップとデータ数, c_X , c_Y , k_X , k_Y は NIOM 解析のパラメータで, 本研究では $c_X = c_Y = 1$, $k_X = k_Y = 0.001$ とした. 最後に, 得られた $X(\omega)$, $Y(\omega)$ をフーリエ逆変換すると, 単純化された時間の関数としての入力および出力モデルが得られる. なお, 本研究では, 式 (2) の入出力モデル $X(\omega)$, $Y(\omega)$ に後続の 0 を付加してデータ数を 16 倍に増やした後にフーリエ逆変換を行い, 観測記録の時間ステップ 0.01 秒を 1/16 に補間している.

3. 地盤構造

図-1 に地震計設置時の PS 検層の結果¹⁾を示す. 本研究では, 310 m/s 層 (新期砂層, 番神砂層上層) の S 波速度を β_1 , 350 m/s 層 (番神砂層下層, 安田層) を β_2 , 500 m/s 層 (西山層最上層) を β_3 とし, それぞれ, 「表層」, 「中間層」, 「基盤層」と呼ぶものとする.

本研究では, 各層の S 波速度はそれぞれの層内では深さによらず一定 (ただし, 時間や地震により変化する) と仮定し, 次式で S 波速度を推定した.

$$\beta_3 = 500 \alpha \text{ (m/s)}, \quad \alpha = T_{4-3}/t_{4-3}$$

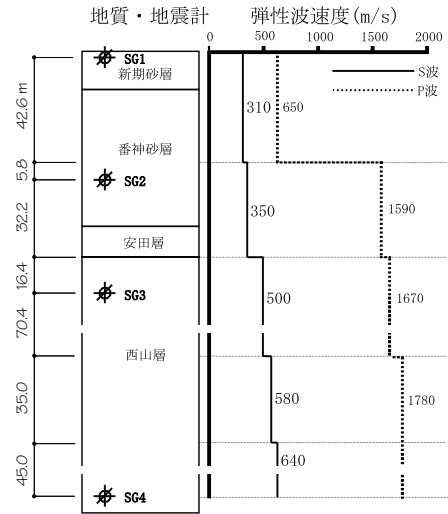


図-1 KSH 鉛直アレーにおける地盤構造¹⁾.

$$\beta_2 = \frac{32.2}{t_{3-2} - 16.4/\beta_3} \text{ (m/s)}$$

$$\beta_1 = \frac{42.6}{t_{2-1} - 5.8/\beta_2} \text{ (m/s)} \quad (3)$$

ここで, T_{4-3} は PS 検層の結果における SG4 から SG3 までの S 波の伝播時間 (0.271 秒), また, 例えば t_{2-1} は NIOM 解析によって得られる SG2 から SG1 までの伝播時間を表す. なお, 記録の時間ステップ 0.01 秒を伝播時間の読みとり誤差とすると, 伝播速度の推定誤差は 3 層とも 15 m/s 程度と見積もることができる.

4. 解析結果

図-2 に中越沖地震以前の地震 (2006/3/12 23:12 M2.4), 中越沖地震本震の NIOM 解析結果を示す. この結果は本震が 38~42 秒の 4 秒間, 2006/3/12 の地震は主要動の 2.5 秒間を解析したもので, EW 成分のものである. 図中破線が入力モデル波形 (上下 2 つの記録のうち上の観測点の波形), 実線が出力モデル波形 (下の観測点の波形) を示す. 例えば図-2(a)を見ると, SG1 にパルス波が時刻 0 で現れ, SG2 においては -0.184 秒に入射波が通過し, +0.18 秒前後に反射波が通過する様子がわかる. なお, 反射波が対称に現れるのは地表近くに地震計のある SG1-SG2 の結果だけである.

図-3 に (a) 中越沖地震以前の地震, (b) 中越沖地震本震, (c) 中越沖地震の余震の伝播時間から求めた S 波速度を示す. これらの結果のうち, 本震以前の地震と余震については地震ごとに主要動の 2.5 秒間の NIOM 解析, 本震では 4 秒間の解析を記録の開始 30 秒後から 2 秒ずつずらしながら連続的に行ったものである.

本震以前の結果をみると, 基盤層の S 波速度 β_3 が 480~490 m/s 前後で PS 検層による 500 m/s に近い値が得られたのに対し, それより上の層では β_2 が 300~310 m/s, β_1 が 250~260 m/s となり, PS 検層の結果よりも小さい S 波速度が得られた. また, 中越沖地

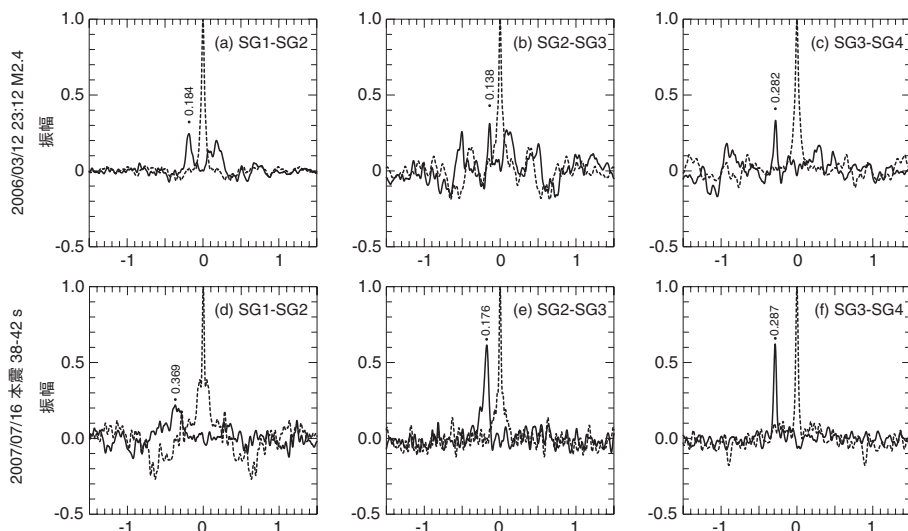


図-2 (a)~(c) 2006/03/12 23:12 M2.4 の地震と、(d)~(f) 中越沖地震本震の NIOM 解析結果。NIOM 解析は本震が記録の 38~42 秒の 4 秒間、本震以前の地震は主要動部分の 2.5 秒間、どちらも EW 成分の結果を示す。

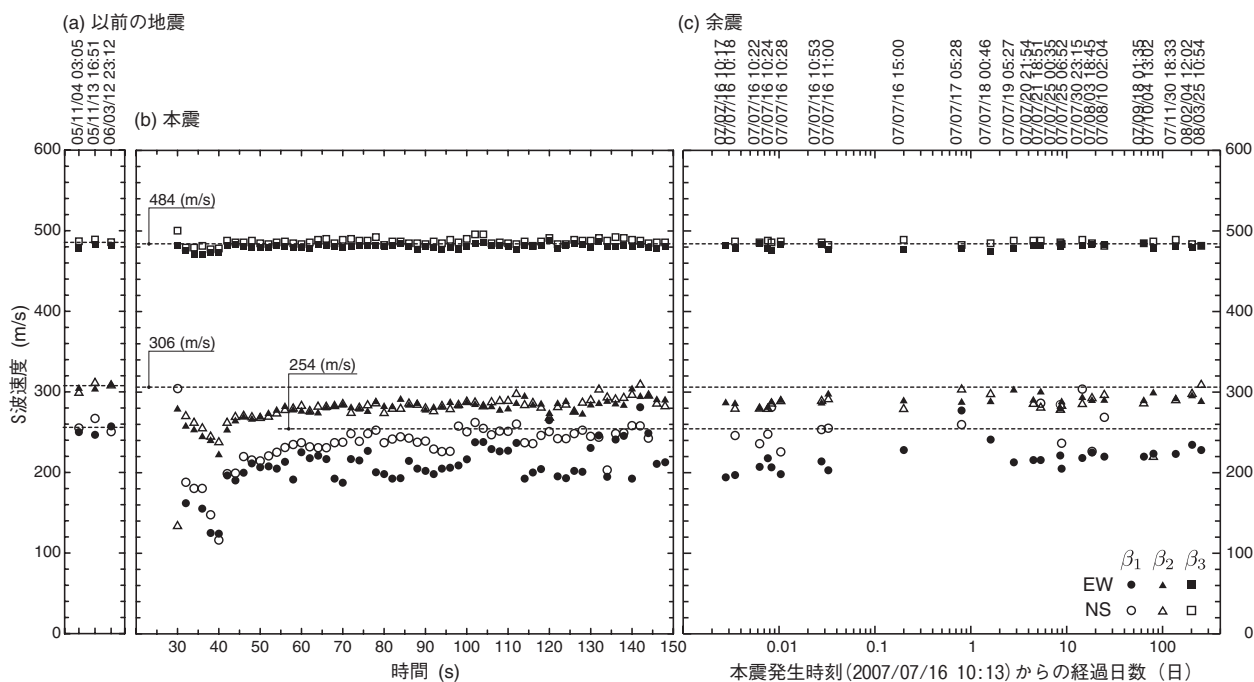


図-3 (a) 中越沖地震以前の地震、(b) 中越沖地震本震、(c) 余震記録の NIOM 解析によって求めた S 波速度。図中破線は中越沖地震以前の 3 地震から求めた S 波速度の平均値を示す。

震本震の結果をみると、表層の S 波速度が本震以前の 250~260 m/s から主要動時に 120 m/s 程度 (EW 成分 125 m/s, NS 成分 116 m/s) まで大きく低下し、中間層においても本震以前の 300~310 m/s から主要動時に 220~240 m/s 程度 (EW 成分 223 m/s, NS 成分 245 m/s) まで低下していることがわかる。また、主要動の直後から S 波速度が緩やかに上昇する様子もみることができる。1995 年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの鉛直アレー観測記録の解析結果³⁾と較べると、本解析結果においては主要動部分でも出力モデル波形には比較的明瞭なピークがみられること、主要動直後の S 波速度の上昇が始まるのが早いことから、大規模な液状化は生じなかったものと考えられる。また、基盤層における S 波速度の低下はごくわずかであり、強震動による非線形化の影響は殆どないものと考えられる。

本震主要動以降の表層の S 波速度 β_1 には水平 2 成分の間で違いがみられ、NS 成分の伝播速度の方が EW

成分の伝播速度よりも大きいという結果が得られた。この理由として、本震における 2 成分の地震動の最大振幅が異なることが考えられる。また、本震の主要動直後からみられる S 波速度の上昇は余震の結果にもみられ、本震から 8 ヶ月経過した後も、S 波速度が本震以前の値までには回復していないという結果が得られた。今後、土の異方性や非線形化後の挙動についてさらなる検討が必要と考えられる。

謝辞 本研究では、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所における加速度時刻歴波形データ<改訂版>に収録された観測記録を使わせて頂いた。関係各位に深謝の意を表す。

文献 1) 東京電力株式会社原子力設備管理部新潟県中越沖地震対策センター：東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所における加速度時刻歴波形データ<改訂版>、2008。2) Kawakami, H. and Haddadi, H. R.: Modeling wave propagation by using Normalized Input-Output Minimization (NIOM), *Soil Dyn. Earthq. Engng.*, 17, pp.117-126, 1998。3) Haddadi, H. R. and Kawakami, H.: Effect of liquefaction on ground motion during the Hyogoken-nanbu earthquake, 1995, in Japan by using NIOM method, *The Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, Balkema, 2, pp.1015-1022, 1998。