

中小地震記録から推定した K-NET および JMA 小千谷の表層 S 波速度の回復過程

正会員 ○新井 洋*

新潟県中越地震 小千谷 スペクトル比
等価線形解析 逆解析 表層 S 波速度

1. はじめに

2004 年新潟県中越地震では、小千谷市内の 0.8km 離れた 2 地点 (K-NET および JMA 観測点, 図 1) において地震動特性の大きく異なる強震記録が得られた^{1), 2)}. 両地点では、本震以外にも多数の地震記録が得られており^{1), 2)}, これらを用いた検討から、本震後、表層地盤の初期 S 波速度が本震前の値まで回復していない可能性が指摘されている³⁾. このような傾向が実地盤で認められたことは珍しく³⁾, さらに多面的な検討が必要と考えられる. そこで本報では、K-NET, JMA 両地点において微動観測を行い、その H/V スペクトルに基づいて表層 S 波速度構造を推定する. これを参考に、複数の中小地震記録の 2 地点間スペクトル比の逆解析から各地震時における両地点の初期 S 波速度を同定することで、その回復過程の把握を試みる.

2. 微動の 1 点観測から推定した表層 S 波速度構造

観測は、2004 年 10 月 28 日 13-15 時頃 (本震発生から 115-117 時間後)、固有周期 2 秒の 3 成分速度計を用いて行った. K-NET, JMA 両地点で得られた微動の H/V スペクトル^(例えば 4)を 図 2 に○で示す. これを表面波によるものと考え、高次モードの影響を考慮した逆解析⁴⁾を行って、両地点の直下深度 40m 程度までの S 波速度構造を推定した. この際、両地点とも、深度 40m までの地盤層序は、地質図幅⁵⁾, 時松ら³⁾, 山中ら⁶⁾を参考に 3 層構造を仮定し (図 3), 各層の層厚と S 波速度を変数とした. また、深度 40m より深い地盤構造は、近傍の微動アレイ探査結果⁶⁾を著者の責任において読み取って用いた.

図 3 に K-NET, JMA 両地点で推定された表層 S 波速度構造とその標準誤差⁴⁾を示す. 図から、両地点とも、2-3 層目の境界深度を除いて、推定結果の不確かさは小さい. また、図 2 の実線は、推定地盤構造に対応する理論 H/V スペクトル⁴⁾である. 図から、両地点とも理論値は観測値と良く対応している. K-NET, JMA 両地点の推定 S 波構造から求めた地盤せん断振動の

1 次固有周期は 0.25 秒, 0.12 秒で、微動 H/V スペクトルのピーク周期 (0.28 秒, 0.12 秒) と対応している. これは、K-NET, JMA 両地点の推定地盤構造 (図 3) において、層厚 3m 程度の最表層 ($V_s = 47\text{m/s}$, 84m/s) とその直下層 ($V_s = 400\text{-}500\text{m/s}$ 程度) とのインピーダンスによるものである.

3. 複数の地震記録を用いた表層 S 波速度の回復過程の推定

図 3 の推定地盤構造から、K-NET, JMA 両地点とも、中小地震において非線形化する地層は深度 3m 程度までの最表層 (粘性土および砂礫質土) だけと考えられる. そこで、両地点で公開されている地震記録^{1), 2)} (2005 年 3 月現在) のうち、①同時に記録が得られており、②S/N 比が十分に大きく、③気象庁マグニチュード 3-5 程度、④震源深さ 6km 以上、⑤震央距離 30km 未満 (余震のみ) のデータ (NS, EW 成分) を対象に、各地震ごとに、次式が最小となる両地点の最表層の初期 S 波速度をグリッドサーチ (1m/s 間隔) によって求めた.

$$F = \int_{0.1}^2 \left(\frac{R_o(T) - R_c(T)}{R_o(T)} \right)^2 dT \bigg/ \int_{0.1}^2 dT \rightarrow \min. \quad (1)$$

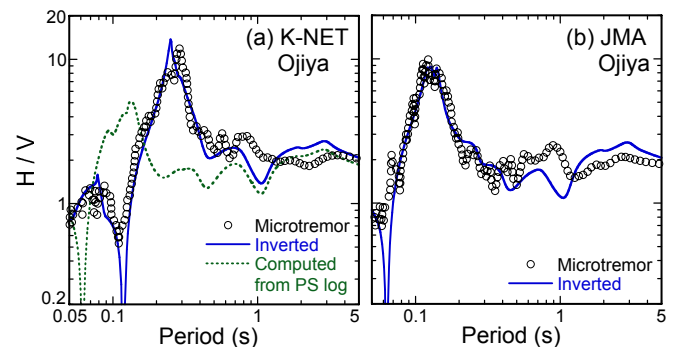


図 2 K-NET, JMA 小千谷の微動および理論 H/V スペクトル

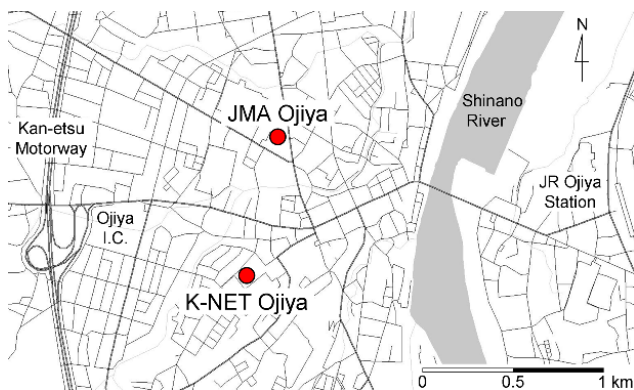


図 1 K-NET および JMA 小千谷強震観測点

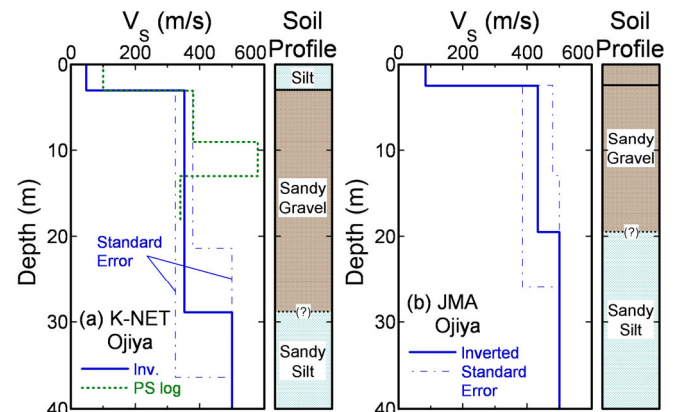


図 3 K-NET および JMA 小千谷の推定 S 波速度構造

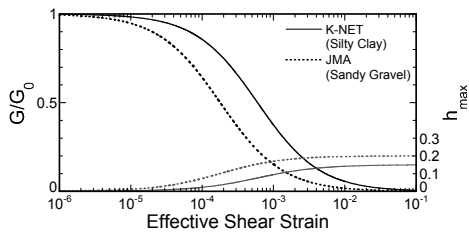
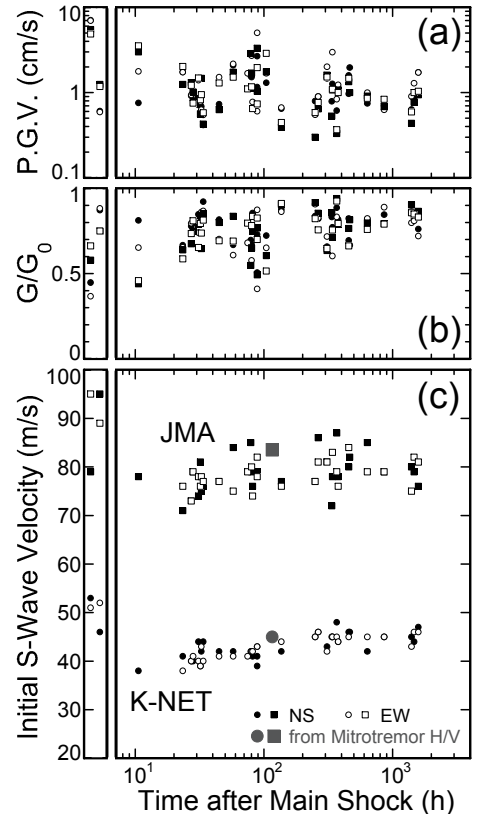
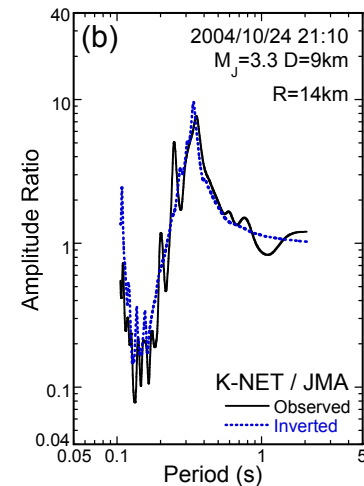
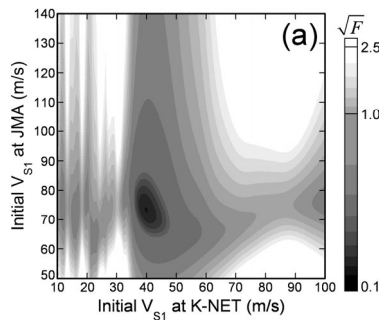


図 4 (左上) K-NET および JMA 小千谷において仮定した最表層(粘性土および砂礫質土)のせん断剛性および減衰のひずみ依存性

図 5 (中列) 地震記録の K-NET/JMA 水平動振幅スペクトル比の逆解析における(a)平均残差率曲面の解平面への投影図および(b)観測値と理論値のフィッティングの例

図 6 (右列) 対象とした中小地震(32 地震 61 成分)における K-NET および JMA 小千谷の(a)水平動最大速度および推定された最表層の(b)せん断剛性低下率, (c)初期 S 波速度



ここに、 T は周期 (積分区間: 0.1-2 秒), $R_0(T)$ および $R_c(T)$ は地震記録および理論 S 波の K-NET/JMA 振幅スペクトル比である。 $R_c(T)$ の算定では、K-NET, JMA 各地点の地震記録を、仮定した地盤構造を用いて周波数依存型の減衰を持つ等価線形解析⁷⁾により地震基盤⁹⁾まで逆算し、その伝達関数の比を求めた。この際、最表層のせん断剛性および減衰のひずみ依存性は、古山田ら⁸⁾を参考に、拘束圧を考慮して図 4 のように仮定した。また、有効せん断ひずみが 10^3 を越えた場合は対象外とした。

図 5 は、ある対象地震でのグリッドサーチにおける(a)平均残差率 (F^2) 曲面の解平面への投影図と(b)最適解に対応する理論と観測のスペクトル比である。図から、理論値は観測値と良く適合しているが、得られた最適解は、K-NET 地点に比べて、JMA 地点では感度が良くないことがわかる。

図 6(a)-(c)に、全ての対象地震(本震前 2 地震 4 成分, 本震後 30 余震 57 成分)における K-NET, JMA 両地点の最大速度および推定された最表層のせん断剛性低下率と初期 S 波速度を、地震発生時刻(本震発生からの経過時間, 余震のみ)に対して示す。図から、対象地震における両地点の最大速度と推定せん断剛性低下率の値は地震によって大きく異なっているが、推定された初期 S 波速度の値は、K-NET 地点では、本震前後とも地震によるばらつきが小さく、時間に依存して変化する傾向が明瞭に認められる。一方、JMA 地点では、解の感度が悪い(図 5(a)), 推定された初期 S 波速度の値はばらつきが大きくなり、その時間変化の傾向を読み取ることは難しい。

K-NET 地点では、図 6(c)から、本震前の表層 S 波速度の値は 50-53m/s 程度と推察される。一方、本震後の値は、約 10 時

間で 38m/s 程度、約 100 時間で 40-45m/s 程度、約 1000 時間で 43-47m/s 程度と推定される。これは、本震時に、表層では大きなひずみが生じたため初期 S 波速度が 3 割程度以上低下したが、時間の経過とともにその値が徐々に回復する過程を示している。また、ここで推定された表層 S 波速度の値は、微動 H/V から得られた値(図中●)と調和的である。

なお、本報で用いたデータの範囲(2004 年末まで)では、表層 S 波速度は本震前の値までは回復していない。また、本報の結果は、仮定した土の非線形性(図 4)の下で得られたものであることに注意を要する。これらについては、今後、地震記録の公開などを待って、追加検討する必要がある。

4. まとめ

K-NET および JMA 小千谷強震観測点を対象に、微動および地震記録を用いた逆解析から、2004 年新潟県中越地震の前後(同年末まで)における表層 S 波速度を推定した。その結果、K-NET 地点では、本震によって初期 S 波速度が 3 割程度以上低下したが、その後、徐々に回復する過程が確認された。

謝辞: 本報で用いた地震記録は、防災科学技術研究所および気象庁により記録・公開されたものである。また、東京工業大学時松孝次教授および山中浩明助教授には、小千谷における表層地盤情報および微動アレイ探査に関して貴重なご教示を賜った。記して謝意を示す。

【参考文献】1) 防災科学技術研究所: 強震観測網 K-NET ホームページ, <http://www.k-net.bosai.go.jp/> 2) 気象庁, 気象業務支援センター: 強震波形データ CD-ROM, 1996 年 10 月-2004 年 12 月. 3) 時松ほか: 第 92 回工学地震学・地震工学談話会, 東工大 CUEE, 2004. 4) Arai and Tokimatsu: BSSA, 94(1), 53-63, 2004. 5) 柳沢ほか: 5 万分の 1 地質図幅「小千谷」, 地質調査所, 1986. 6) 山中ほか: 日本地震工学会 被害調査報告会, 35-38, 2004. 7) 杉戸ほか: 第 28 回土質工学研究発表会, 1129-1132, 1993. 8) 古山田ほか: 第 38 回地盤工学研究発表会, 2077-2078, 2003.