

微動および余震記録を用いた K-NET および JMA 小千谷の表層地盤 S 波速度の推定

新潟県中越地震 小千谷 表層地盤

防災科学技術研究所 国際会員 ○新井 洋

1. はじめに

2004年10月23日17時56分頃に発生した新潟県中越地震では、小千谷市内の僅か0.8km離れた2地点(K-NET および JMA 観測点)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<sup>1,2)</sup>。この原因として、サイト特性(S波速度構造)の影響が考えられる。また、いくつかの災害調査結果から、構造物や地盤の被害には表層地盤特性が強く影響した可能性が指摘されている<sup>3)</sup>。そこで本研究では、被害要因を定量的に評価するための準備的検討として、K-NET および JMA 両地点において微動の1点3成分観測を行い、表層地盤のS波速度構造を推定し、その妥当性を両地点の余震記録を用いて検討する。

2. 微動1点3成分観測に基づく表層S波速度推定

観測は、2004年10月28日13-15時頃(本震発生から115-117時間後)、小千谷市内のK-NET および JMA 強震観測点(図1)において、固有周期2秒の3成分速度型微動計を用いて行った。観測波形は増幅後、サンプリング周波数100HzでA/D変換(24bit)し、ノートパソコンに記録した。記録波形が定常性を保っていると考えられる区間を選び、各成分4096ポイントのデータセットを12個程度作成して、FFTによりH/Vスペクトル<sup>4,5)</sup>を求めた。図2に、両地点で得られた微動のH/Vスペクトルを○印で示す。これを表面波によるものと考え、高次モードまで考慮した逆解析<sup>5)</sup>を行って、K-NET および JMA 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K-NET 地点のボーリングデータ<sup>1)</sup>やこの地域の地質図幅<sup>6)</sup>、時松ら<sup>7)</sup>、山中ら<sup>8)</sup>を参考に仮定し(図3)、各層のS波速度( $V_s$ )のみを変数とした。また、深度40mより深い構造は、近傍で行われた微動アレイ探査の結果<sup>8)</sup>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波速度構造を示す。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<sup>5)</sup>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おり、逆解析が適切に行われたことが示唆される。K-NET, JMA 両地点の推定S波速度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( $V_s = 50\text{m/s}$ ,  $84\text{m/s}$ )とその直下層( $V_s = 400\text{-}500\text{m/s}$ )とのインピーダンスによるものである。なお、K-NET 地点のPS検層結果<sup>1)</sup>を用いて算定した表面波のH/Vスペクトル<sup>5)</sup>(図2(a)破線)は観測微動のそれと対応が悪い。同様の指摘は、翠川ら<sup>9)</sup>によってもなされている。

3. 余震記録を用いた推定S波速度の検証

K-NET, JMA 両観測点では、本震・余震を含む多数の地震記録が得られている<sup>1,2)</sup>。そこで本報では、これらの地震記録の水平成分を用いて2地点間のS波振幅スペクトル比を求め、推定S波速度の妥当性を検討する。この際、使用する地震記録は、均質な小地震で、S波が卓越し、地盤の非線形性の影響が小さいと考えられるデータを選択する。具体的には、両地点で公開されている地

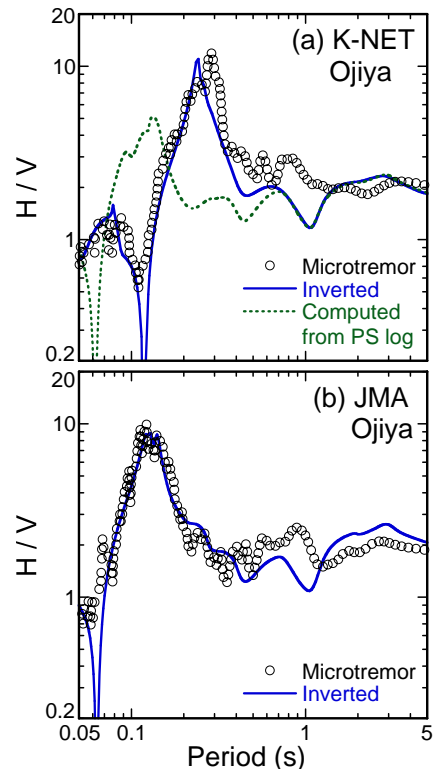


図2 K-NET および JMA 小千谷の微動および理論H/Vスペクトル

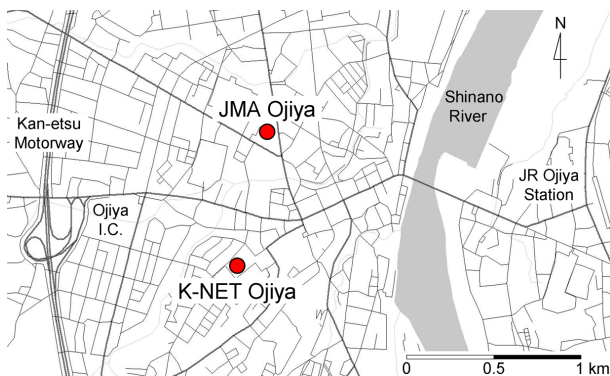


図1 小千谷市内のK-NET および JMA 強震観測点

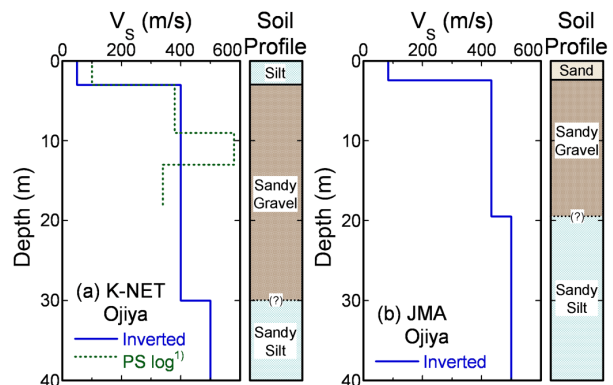


図3 K-NET および JMA 小千谷の推定S波速度構造

震記録<sup>1),2)</sup> (2005年2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震央距離が20km未満,④震源深さが6-15km,⑤気象庁マグニチュードが3-4.5,⑥推定地盤構造に基づく等価線形解析から得られた最表層の平均有効せん断ひずみがK-NET地点(粘性土)<sup>1),7)</sup>では0.02%未満,JMA地点(砂礫質土)<sup>6),7)</sup>では0.01%未満のデータ(24余震96成分)を選択し,以後の検討に用いた.なお,等価線形解析における土のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存性および拘束圧依存性は,文献<sup>10),11)</sup>を参考にモデル化した.

図4(a)-(c)に,選択された小余震におけるK-NET,JMA両地点の最大速度,等価線形解析から得られた最表層の平均有効せん断ひずみ,平均等価せん断剛性低下率を,余震発生時刻(本震発生からの経過時間)に対して示す.また,各余震に対してNS,EW成分のK-NET/JMAフーリエ振幅スペクトル比を求め,そのピークおよびトラフ周期をK-NETおよびJMA地点の等価卓越周期と考え,これを図4(d)に示す.図から,K-NET地点の等価卓越周期は,本震後24時間程度の小余震では0.4秒弱であるが,時間が経つにつれ徐々に短くなり,本震後100時間程度の小余震では0.3秒程度となり,その後の小余震ではほぼ安定している.JMA地点でも同様の傾向が若干認められる.ここで,本報で選択した余震は,K-NET,JMA両地点とも最大速度1-2cm/s程度以下の小地震データであり,その値の範囲・ばらつきは余震発生時刻に対してほぼ一様である(図4(a)).また,両地点の最表層の初期せん断剛性の値は2.8倍異なるが,用いた小余震においては,その等価せん断剛性低下率の値の範囲・ばらつきは両地点とも同様の傾向を示している(図4(c)).このため,これらの小余震では,最表層の非線形性による等価固有周期の伸び率の値の範囲・ばらつきは,初期せん断剛性に対して比較的鈍感であり,本震後100時間程度の前後はほぼ一様と考えられる.したがって,図4(d)の等価卓越周期が経時変化する傾向は,本震時に低下した最表層の初期せん断剛性が時間が経つにつれ回復する過程を反映している可能性が高い.また,微動観測時(図4破線)以後は,両地点とも最表層の初期せん断剛性がほぼ安定していると考えられる.

以上から,微動観測後の13余震記録を対象に,K-NET,JMA両地点の推定地盤構造(図3)の最表層のせん断剛性をその平均低下率(0.75,図4(c))倍した地盤モデルに対して,2地点間の理論S波振幅スペクトル比を求め,これを余震(NS成分)の平均フーリエ振幅スペクトル比と比較して図5に示す.図から,理論値(太実線)は観測値(○印)と良く対応している.一方,最表層のせん断剛性低下を無視して算定した理論振幅比(図5破線)は,これを考慮した場合に比べ,観測値との対応がやや悪い.EW成分についても同様であった.以上の結果は,両地点で推定された表層S波速度の妥当性を示している.

#### 4. まとめ

小千谷市内のK-NETおよびJMA強震観測点において微動観測を行い,H/Vスペクトルの逆解析から表層地盤のS波速度を推定した.一方,両地点の余震記録を用いた検討から,最大速度1-2cm/s程度の小地震でも表層地盤が非線形化すること,また,表層地盤の初期せん断剛性は,本震後100時間程度までは時間が経つにつれ徐々に回復するが,その後は安定している可能性が高いことを示した.このことを考慮した2地点間の理論および余震のS波振幅スペクトル比の比較から,推定された表層S波速度の妥当性を示した.

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の非線形性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-2003年12月,2004年1月-12月(暫定版) 3) 例えば,林,新井:2004年新潟県中越地震調査速報,http://www.archi.kyoto-u.ac.jp/~hayashi/topics/nig.pdf 4) 中村,上野:地表面震動の上下成分と水平成分を利用した表層地盤特性推定の試み,第7回日本地震工学シンポジウム,265-270,1986. 5) Arai and Tokimatsu: S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, BSSA, 94(1), 53-63, 2004. 6) 柳沢ほか:5万分の1地質図幅「小千谷」,地質調査所,1986. 7) 時松ほか:2004年新潟県中越地震調査報告—地盤地震動災害—,第92回工学地震学会・地震工学談話会,東工大CUEE,2004. 8) 山中ほか:2004年新潟県中越地震の余震および微動の観測,日本地震工学学会被害調査報告会,35-38,2004. 9) 翠川ほか:2004年新潟県中越地震の地震動について,第92回工学地震学会・地震工学談話会,東工大CUEE,2004. 10) 日本建築学会:入門・建物と地盤との動的相互作用,236-260,1996. 11) 古山田ほか:多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性,第38回地盤工学研究発表会,2077-2078,2003.

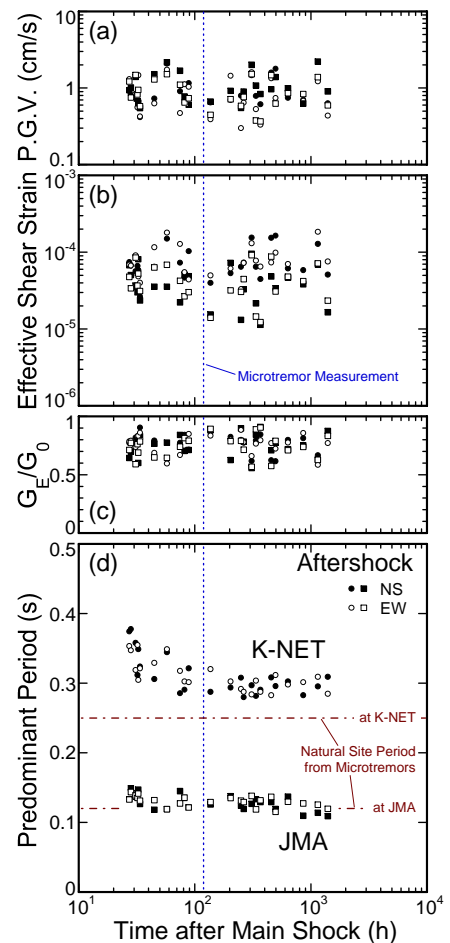


図4 小余震におけるK-NETおよびJMA地点の(a)最大速度,(b)等価線形解析から得られた最表層の平均有効せん断ひずみ,(c)平均等価せん断剛性低下率,および(d)2地点間のフーリエ振幅スペクトル比から求めた等価卓越周期

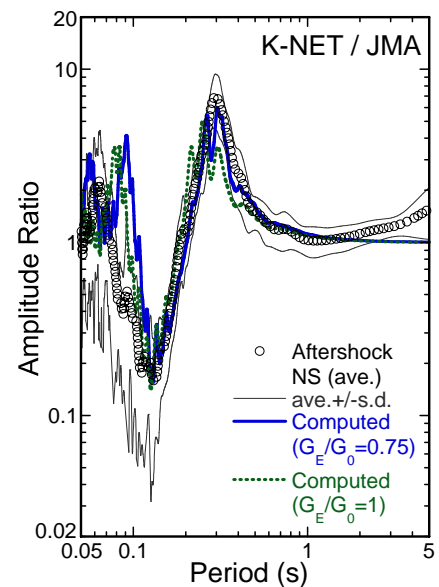


図5 微動観測時(本震発生から115-117時間後)以後の小余震におけるK-NET,JMA地点間の平均フーリエ振幅スペクトル比(NS成分)と推定地盤構造から求めた理論S波振幅比との比較