

新潟県中越地震において観測された激震動に見られる表層地盤の非線形性状

関口 徹¹⁾, 時松 孝次²⁾

1) 東京工業大学 理工学研究科 建築学専攻, tsekiguc@mail.arch.titech.ac.jp

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

1. はじめに

平成 16 年新潟県中越地震(以下、本震)では、震源近傍に位置する川口町、小千谷市、長岡市、旧山古志村などで甚大な構造物被害や地盤災害が生じた。同時に小千谷市内にある防災科学技術研究所 K-NET、気象庁(JMA)の両強震観測点では、計測震度でそれぞれ 7 相当、6 強の非常に大きな強震記録が得られた。両地点は地形分類上同一の砂礫台地上に位置しているが、本震における K-NET の最大地動加速度、最大地動速度 (13.1 m/s²、1.29 m/s : EW 成分) は、JMA の値 (8.98m/s²、0.83m/s : EW 成分) に比べて 5 割程度大きくなっている。両地点では、本震以前の地震および余震で多くの記録が得られているが、微小地震の最大地動加速度は逆に JMA の方が K-NET よりも大きくなる傾向が認められる。さらに、これらの記録のスペクトル特性の比較から、地表で観測された強震時の地震動には表層地盤の非線形性の影響が強く反映されている可能性が示唆される。

強震時の地震動に地盤の非線形性の影響が強く現れることは以前から指摘されている(例えば、文献¹⁾⁻³⁾) が、新潟県中越地震時のように極めて大きな地震動を含む検討例は少ない。したがって、両地点における表層地盤の非線形性状および地震動特性を検討することは、地震被害の原因究明ならびに今後の震源域近傍での強震動予測や防災対策を考える上で重要な課題であると考えられる。しかし、この検討に必要な表層地盤構造は、JMA では不明、K-NET では公開されているが、観測された微動 H/V スペクトルのピーク周期を説明できない⁴⁾。また、実記録から地盤の非線形性状を検討するには、地中と地表で同時観測された強震記録を用いることが望ましいが、両地点では鉛直アレイ観測は実施されていない。同市内では、両地点から 800-900m の距離にある水仙の家(以下、SSI)において工学的露頭基盤と考えられる位置での強震記録が得られている⁵⁾。したがって SSI の強震記録を K-NET、JMA 両地点の工学的露頭基盤波と仮定することで、鉛直アレイ記録を用いた手法と同様に、両地点の表層地盤の非線形性が推定できると考えられる。

以上の背景から本研究では、K-NET・JMA 小千谷

の 2 地点でボーリング、P S 検層を実施し、ボーリングにより採取した不攪乱試料に対して中空ねじりせん断試験を実施して、表層地盤構造とその非線形性状を求めるとともに、両地点および同市内の工学的露頭基盤上の 1 地点(SSI) で得られた強震記録から K-NET、JMA の表層地盤の非線形性を推定する。さらに両結果の比較にもとづいて、両地点の表層地盤の非線形特性が新潟県中越地震を含めた地表での地震動特性に与えた影響について検討する。

2. 小千谷市内の強震観測点と地盤特性

2.1 地形分類

図 1 に小千谷市中心部の地形分類⁶⁾と K-NET、JMA、SSI の強震観測点を示す。小千谷市中心部は、新潟平野を北流する信濃川左岸に位置する。この一帯は砂岩、泥岩などからなる更新世魚沼層群の上に、信濃川による扇状地堆積物である砂礫台地が広く分布するが、所々河川により浸食された谷底平野となっている。また全域で、ごく表層は深度 2 - 5 m 程度まで粘性土や砂質土に被覆されている。K-NET、JMA は砂礫台地上、SSI はそれより標高が 10m 程度低い谷底平野に位置している。3 地点間の距離は 700-900m 程度である。

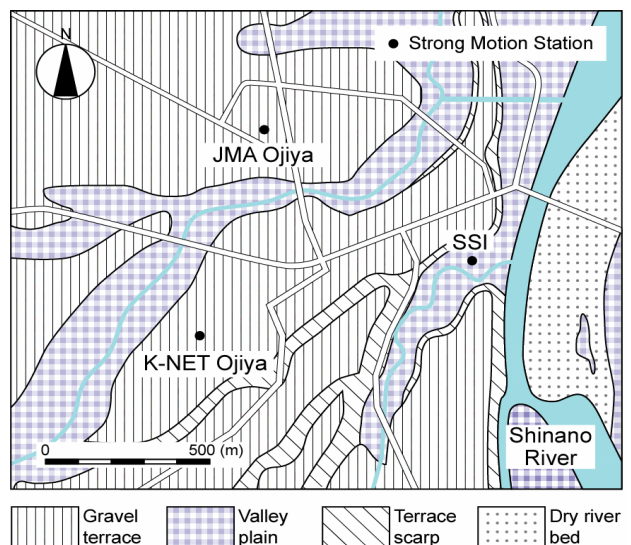


図 1 : 小千谷市における強震観測点と地形分類図⁷⁾

2.2 観測点の表層地盤構造

K-NET、JMA における表層地盤の土質およびS波速度構造を調べるため、両地点で深度7mまでボーリング調査およびPS検層を実施した。図2に、得られた2地点の地盤柱状図とS波速度の深度分布をSSIにおける免震建物建設前に行われた既往の調査結果⁵⁾とあわせて示す。ここでK-NET、JMAの7m以深については従来から公開されているK-NETの土質データを参考にした。K-NETでは、表層3m程度がVs=50m/s程度のきわめて軟弱なシルト質粘土または高有機質土、JMAでは、表層3m程度がVs=100m/s程度の砂質シルトである。両地点とも、表層3mの下はVs=400m/s程度の硬質な砂礫層、深度13m程度から更新世魚沼層群で、表層3mと砂礫層とのインピーダンス比が比較的高い。これに対しSSIでは、表層2mが砂質シルトで、その下にVs=430m/sの岩(魚沼層群)が直接存在する。強震計は、K-NET、JMAの2地点では地表に、SSIでは表層を掘削し岩盤上に建てられた免震建物の免震層下部に設置されている。

3. 強震観測点の地震動特性

本研究では本震を含む計18(本震前1、本震1、余震16)の地震時に3地点で観測された強震記録を検討対象とする。これらの記録は本震と同様にEW成分が卓越する傾向がある。

図3に本震における3地点での強震記録のEW成分の加速度時刻歴を示す。本震におけるK-NETとJMAの加速度時刻歴は、SSIのそれとの共通点を確認できるが、最大値や周波数特性は大きく異なっている。特にK-NETでは、9-12秒付近で地盤のサイクリックモビリティの影響と考えられるスパイク状の波形が見られる。

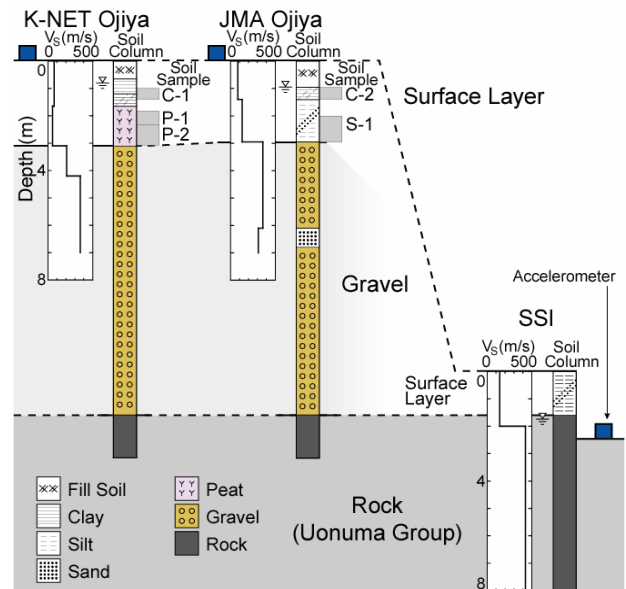


図2：3地点のボーリング調査結果⁷⁾

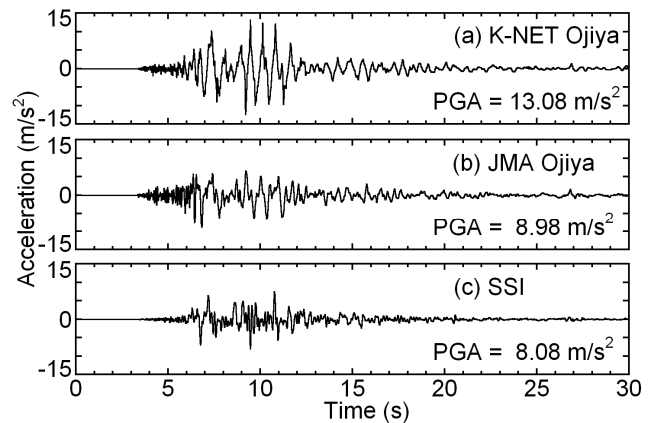


図3：地震観測記録(本震EW成分)

図4に本震、余震を含む4地震について3地点におけるEW成分記録の加速度フーリエスペクトル(バンド幅0.3HzのParzenウィンドウで平滑化)を示す。SSIのフーリエスペクトルは、本震、余震

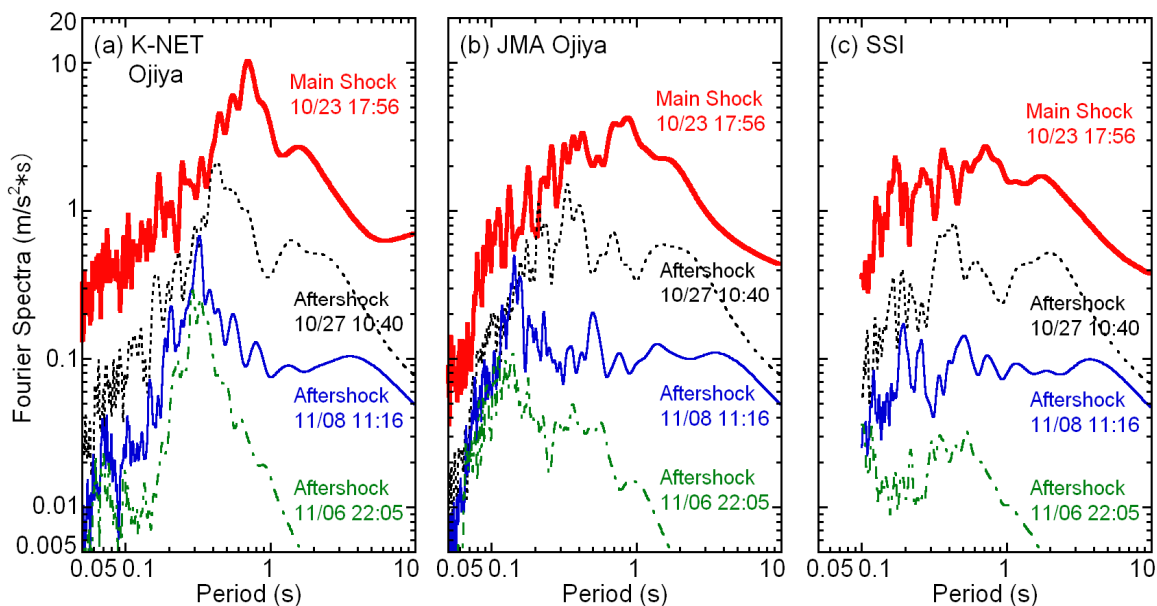


図4：加速度フーリエスペクトル(EW成分)

ともに明瞭なピークをもたず、工学的露頭基盤の地震動に近い性質を示している。これに対し、K-NET、JMA のフーリエスペクトルは、ほぼすべての周波数領域において SSI と同等かそれ以上の振幅を示し、JMA の本震記録を除いて、明瞭なスペクトルピークを持ち、そのピーク周期は、スペクトル振幅の増大にともなって延び、本震では微小地震と比べ、2 - 3 倍以上となっている。また両地点ともスペクトルピークの形状は微小地震では鋭いが、加速度レベルの増加とともに、鈍くなる傾向が見られる。以上の傾向は、特に JMA で顕著である。

地震動の振幅増加にともなって卓越周期が延びる傾向が、他の観測記録にも認められるかどうかを確認するため、図 5 に両地点について K-NET、JMA の公開された全記録の加速度フーリエスペクトルの卓越周期と最大地動加速度の関係を示す。図から、両地点とも最大地動加速度の増加とともに卓越周期の延びる傾向があること、またその傾向が K-NET (微小地震 0.25 s、本震 0.7 s) より JMA (微小地震 0.14 s、本震 0.5 s 以上) で顕著であることが確認できる。卓越周期の延びの違いは両地点の表層地盤の非線形性の違いによるものと推察される。

なお、K-NET の微小地震の卓越周期は、図 5 のように本震前は 0.25 s であったが、本震後は 0.30 s とやや大きくなっている。これは同地点での微動の H/V スペクトルの卓越周期が本震前より本震後に延びていること⁴⁾と矛盾がなく、表層地盤が本震により軟化した可能性を示唆している。

図 6 に 3 地点のうち各 2 地点間の最大地動加速度を比較して示す。K-NET と JMA の最大地動加速度は工学的露頭基盤と考えられる SSI の値に比べ、平均して 4 割程度大きい。また、ややばらつきはあるものの加速度レベルが小さいと、JMA の記録が K-NET の記録よりも大きい。加速度レベルが大きくなると JMA の記録が K-NET の記録と同程度かそれ以下になる傾向が確認される。このことは、入力レベルの増加によりサイト特性の変化する傾向

が両地点で異なっている可能性を示唆している。

以上の考察を踏まえ、図 7 に、本震、10 月 27 日 10 時 40 分の余震、11 月 6 日 22 時 5 分の微小余震での観測 EW 成分について、SSI に対する K-NET、JMA の伝達関数(フーリエスペクトル振幅比)を示す。微小余震に対する伝達関数のピーク周期は、K-NET で 0.30s、JMA で 0.12s 程度となっている。これらは、両地点の礫層を基盤としたときの表層地盤のせん断振動の 1 次固有周期 (それぞれ 0.27 s、0.10 s) に近い値となっている。これに対し、他の規模の大きな地震に対する伝達関数のピーク周期は両地点とも長周期側に移行する傾向がある。これは強震時に両地点の表層地盤が非線形化した影響が大きいものと推察される。また、本震における K-NET の伝達関数のピークは明瞭で、その値は 10 月 27 日 10 時 40 分の余震の値とほぼ同等であるが、JMA のピークは不明瞭でその値は小さくなっている。このことは、加速度レベルが大きくなるにつれて、JMA の

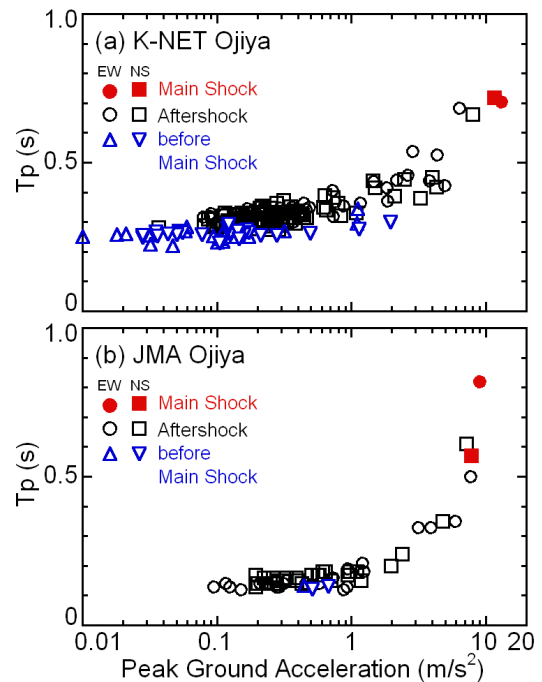


図 5 : 地震記録の卓越周期と最大地動加速度の比較⁸⁾

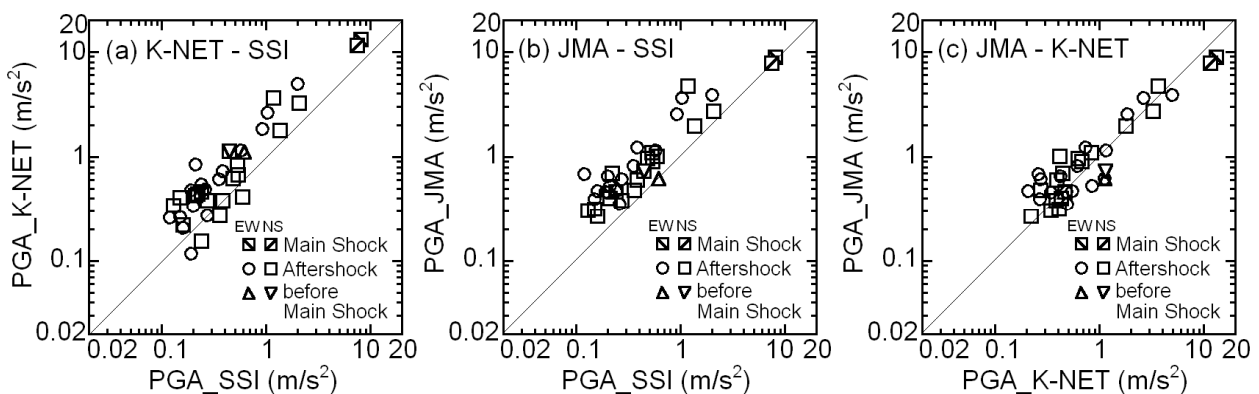


図 6 : K-NET 小千谷、JMA 小千谷、水仙の家の最大地動加速度の比較⁷⁾

地盤の方がより大きな減衰を持つようになることを示唆している。この傾向は、図 6 (c)に見られるように加速度レベルが大きくなると JMA の最大地動加速度が K-NET の値と同程度かそれ以下になる傾向があることと調和的である。

4. 強震記録に基づく表層地盤非線形性状の推定

図 2 より K-NET、JMA 2 地点の表層 3 m の下に存在する砂礫層の S 波速度は SSI の岩盤層のものと同程度である。したがって、前章で求めた K-NET、JMA の SSI に対する強震記録の伝達関数 (図 7) は、両地点の深度 3 m 程度までの表層地盤の非線形増幅特性を強く反映したのものであると考えられる。そこで、SSI の強震記録を K-NET、JMA 両地点の工学的露頭基盤波と仮定し、文献²⁾の手法を参考にし、最適化手法を用いて両地点の各地震に対する表層地盤の等価せん断剛性 (以下、せん断剛性) G と等価減衰定数 (以下、減衰定数) h および有効せん断ひずみを推定する。まず、地盤を図 8 のように表層と基盤の 2 層にモデル化する。ここに、表層の層厚 H 、密度 ρ はボーリング調査結果を参考にそれぞれ K-NET で 3.10m、1.50t/m³、JMA で 2.95m、1.75 t/m³ とする。

最適化に用いる評価関数 S は、次式で表される規準化された理論及び観測による伝達関数の残差二乗和で、これを最小にする表層地盤構造 (S 波速度 V_s 、減衰定数 h) を求める解とする²⁾。

$$S = \int_{0.5f_p}^{2f_p} \{A_o(f) - A_c(f)\}^2 df / \int_{0.5f_p}^{2f_p} \{A_o(f)\}^2 df \Rightarrow \min \quad (1)$$

ここに $A_o(f)$ 、 $A_c(f)$ は、それぞれバンド幅 0.3Hz の Parzen ウィンドウで平滑化した表層と露頭基盤における観測記録の伝達関数および重複反射理論⁹⁾から求めた伝達関数で、 f は周波数である。解の検索方法は、グリッドサーチで、 V_s の検索範囲および間隔は、K-NET で 10-60m/s、1.0m/s、JMA で 20-120m/s、1.0m/s、 h の検索範囲および間隔は両地点ともに 0-50%、0.5%とした。(1)式の積分範囲は伝達関数の 1 次固有振動数 f_p を対象とし、仮定する地盤モデルの理論 1 次固有振動数 f_p の半分から 2 倍までとした。その結果 $A_o(f)$ のデータ数は各地震記録に対し 378 から 1186 となった。

図 7 の破線は、推定された地盤構造 (S 波速度 V_s 、減衰定数 h) に対する理論伝達関数である。

推定された S 波速度 V_s から表層地盤のせん断剛性 G とせん断剛性比 G/G_0 が次式で表される。

$$G = V_s^2 \rho \quad (2)$$

$$G/G_0 = (V_s/V_{s0})^2 \quad (3)$$

ここで、 V_{s0} は微小地震の解析から求めた表層の平均 S 波速度であり、図 2 の $P-S$ 検層結果を参考に

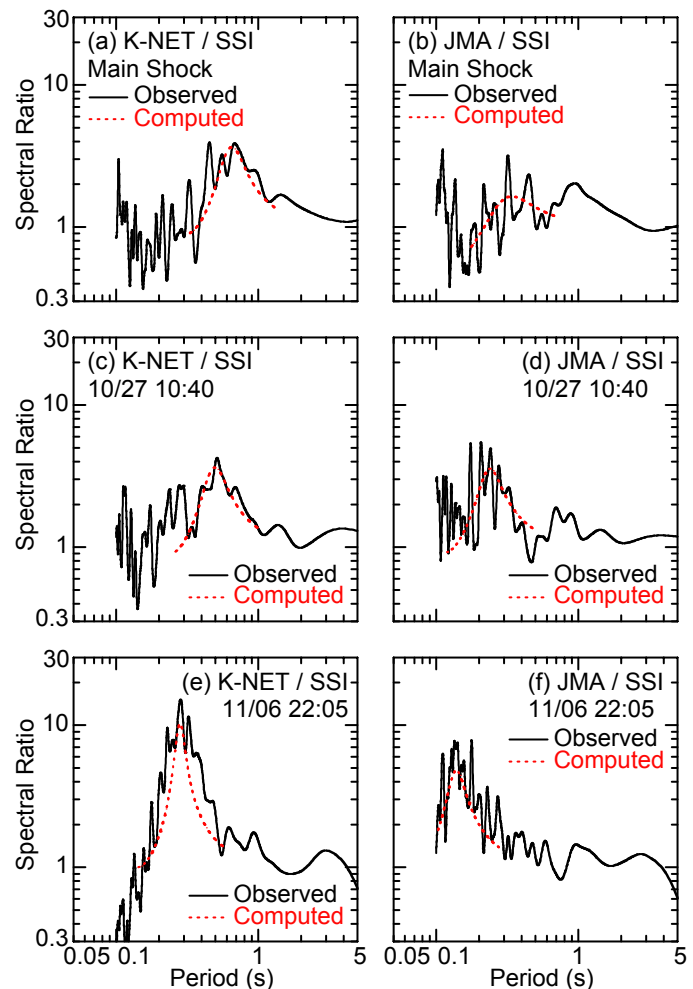


図 7 : K-NET 小千谷、JMA 小千谷と水仙の家とのフーリエスペクトル振幅比 (EW 成分)⁷⁾

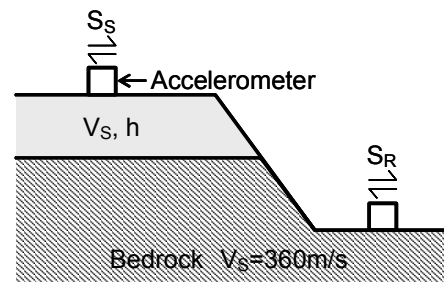


図 8 : 推定地盤モデル⁷⁾

K-NET では 42m/s、JMA では 100m/s とした。対応する有効せん断ひずみは、推定された地盤構造 (S 波速度 V_s 、減衰定数 h) と K-NET または JMA の地表記録を用いて重複反射理論⁹⁾から算定される表層中央 (深度 $H/2$) での最大せん断ひずみ γ_{max} に定数 ($=0.65$) を乗じて求めた。

図 9 に解析から得られた K-NET、JMA の等価せん断剛性比および等価減衰定数と有効せん断ひずみとの関係を白抜き印で示す。せん断ひずみの増加とともに両地点におけるせん断剛性比は減少し、減衰定数は増加する傾向が認められ、その傾向は、 S 波速度の大きい JMA で顕著である。すなわち、本震時に K-NET では $\gamma = 1 - 2\%$ 、 $G/G_0=0.21-0.35$ 、 $h=6 -$

15% に対して、JMA では $\approx 0.5 - 1\%$ 程度、 $G/G_0 = 0.06 - 0.12$, $h = 15 - 39\%$ となっている。

図 9 から、強震記録の解析から求めた減衰定数のひずみ依存性は、せん断剛性比のそれに比べ、その変動が大きく、推定値の精度が相対的に悪いことが示唆される。これは、前者が伝達関数のピーク周期のみに依存するのに対し、後者は伝達関数の周期特性にも依存するためと考えられる。また、JMA の EW 成分記録については推定された減衰定数が 30% 以上と非常に大きくなった。この成分に対しては、加速度時刻歴波形の主要動部だけを用いた推定も試みたが、推定される減衰定数に大きな変化はなかった。

5. サンプリング試料の室内動的変形試験結果と強震記録に基づく推定結果の比較

K-NET、JMA 両地点で、観測地震動に大きな影響を与えたと考えられる表層 3 m までの深度で採取した土試料に対して、中空ねじりせん断試験を行い、その動的変形特性を求めた。対象試料は、K-NET で 3 深度 (図 2 の C-1, P-1, P-2)、JMA で 2 深度 (C-2, S-1) から得られたものである。まず試料を中空円筒供試体 (外径 7 cm、内径 3 cm、高さ 10 cm) に成形し、飽和の後、原位置の有効応力 (16 ~ 28 kN/m²) にできるだけ近くなるよう設定した拘束圧 (C-1、C-2、P-1 で 29 kN/m²、P-2、S-1 で 39 kN/m²) で等方圧密した。試験は、非排水条件のもと、各供試体に対して、ひずみレベルが 10^{-5} 程度から 5×10^{-2} 程度まで、13 または 14 段階に増加す

るよう、応力制御により繰返しトルク荷重を加えるステージテスト方式とし、各段階においてトルク荷重 (周波数 0.1 Hz の正弦波) を 10 波程度載荷し、10 波目の履歴ループよりせん断剛性、減衰定数を求めた。

結果を図 9 に黒印で示す。K-NET のシルト質粘土 (C-1) は、ひずみの増加にともなうせん断剛性比の低下と減衰定数の増加が顕著であるが、初期せん断剛性比の低い高有機質土 (P-1, 2) は、ひずみの増加にともなうせん断剛性比の低下と減衰定数の増加が緩やかである。すなわち、シルト質粘土は、 $\approx 1\%$ でせん断剛性比は 0.1 程度、減衰定数は 15% 以上であるが、高有機質土は $\approx 1\%$ でせん断剛性比は 0.5 程度、減衰定数は 10% 以下である。また高有機質土の $\approx 1\%$ での値はシルト質粘土の $\approx 0.1\%$ での値にほぼ等しくなっている。一方、JMA の表層地盤は砂質シルト (S-1)、シルト質粘土 (C-2) はともに、K-NET のシルト質粘土と同様、小さなせん断ひずみからせん断剛性比が低下し、減衰定数が増加する傾向が認められる。

K-NET の室内試験結果は、せん断剛性比、減衰定数ともに伝達関数にもとづく推定結果 (白抜き印) を概ね内包している。JMA の室内試験結果も、本震 EW 成分に対する減衰定数を除き、推定結果と比較的よく対応している。なお、高有機質土が、本実験結果のように、他の土質に比べ、極めて弱い非線形性を示すことは過去の室内実験結果からも認められている¹⁰⁾。

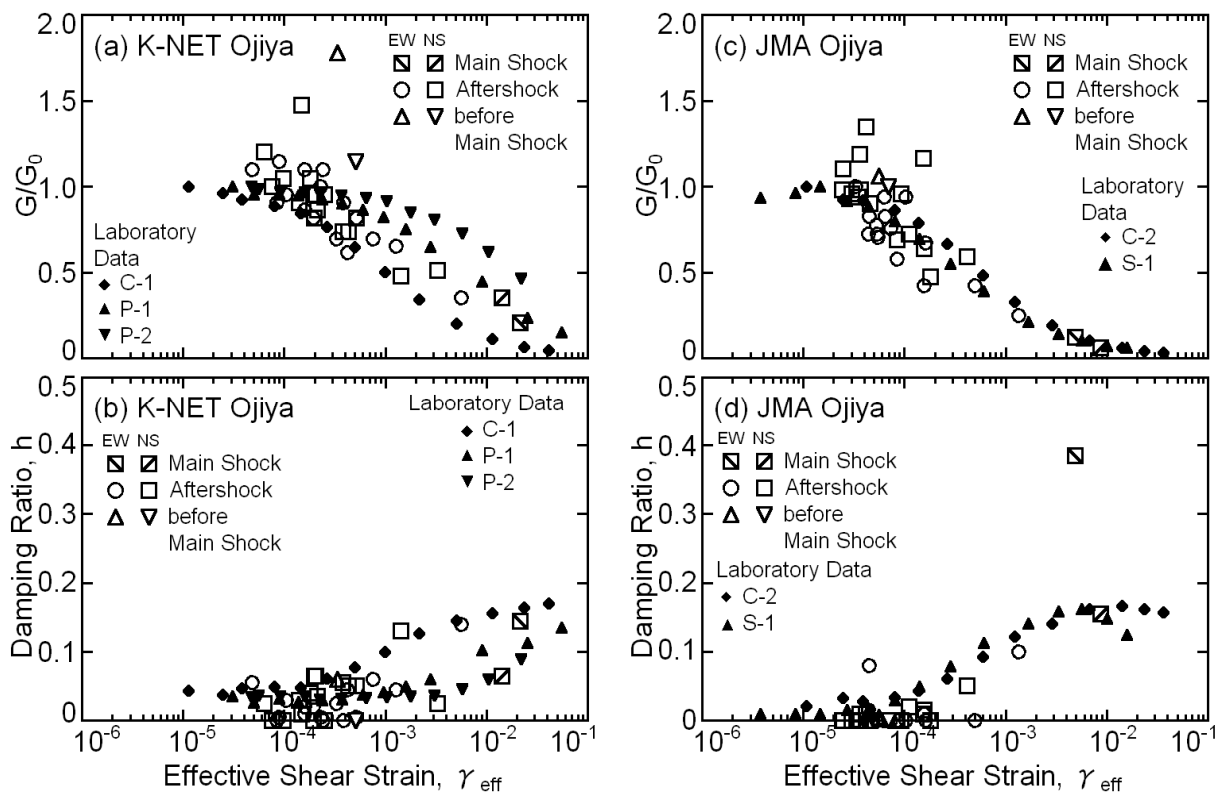


図 9 : 強震記録から推定した地盤の非線形性と室内動的試験結果⁷⁾

以上から、K-NET の表層にある高有機質土は、その S 波速度は 50m/s 程度と極めて小さいが、本震時に極めて弱い非線形性を示したことで、一方、JMA の表層地盤は、S 波速度は 100m/s 程度とより大きく、微小地震時に短周期成分をより増幅させたが、本震時には強い非線形性を示したことで、図 5 (c) のように、微小地震時には、JMA の地動加速度が、本震時には K-NET の地動加速度が相対的に大きくなったものと考えられる。

なお、JMA における本震 EW 成分から推定された減衰定数が室内試験結果の 2 倍程度大きくなった原因として、(1)別の地点で観測された記録を鉛直アレー観測されたものとした仮定、(2)室内試験(正弦波の段階載荷)と地震動(不規則波載荷)の載荷条件の違いなどが考えられる。また、K-NET の本震記録に見られたサイクリックモビリティを示唆するスパイク状の波形の原因は本報告の検討からは解明されていない。これらの検討は今後の課題としたい。

6. 結論

小千谷市内にある K-NET、JMA の強震観測点において、ボーリング、PS 検層を実施し、採取した土試料に対して室内動的変形試験を行った。さらに両地点および工学的露頭基盤(水仙の家)で得られた強震記録の伝達関数の逆解析から、K-NET、JMA の表層地盤のせん断剛性比と減衰定数のひずみ依存性を推定し、以下の結論を得た。

1. K-NET では $V_s=50\text{m/s}$ 程度のきわめて軟弱なシルト質粘土または高有機質土が、JMA では $V_s=100\text{m/s}$ 程度の砂質シルトが、ともに $V_s=400\text{m/s}$ 程度の硬質な礫層の上に 3 m 程度堆積しており、両地点とも表層と礫層とのインピーダンス比の比較的高いサイトである。
2. 露頭基盤と表層で得られた強震記録の伝達関数の逆解析から、両地点ともひずみの増加とともに地盤のせん断剛性が低下し、減衰定数が増加する傾向が認められた。本震時のせん断剛性比、減衰定数は、せん断ひずみ 0.5-2 % 程度に対して、それぞれ K-NET で 0.21-0.35、6-15% 程度、JMA で 0.06-0.12、15% 以上と推定され、表層 S 波速度の小さい K-NET の地盤の方が JMA の地盤に比べ弱い非線形性を示した。
3. 室内動的変形試験結果から、K-NET 表層の高有機質土は、直上のシルト質粘土および JMA の表層に比べ、極めて弱い非線形性を示した。すなわち、せん断剛性比が 0.5、減衰定数が 10% 程度となるせん断ひずみは、K-NET の高有機質土では 1% 程度であり、他の試料の 0.1% 程度に比べ約 10 倍大きかった。
4. 工学的露頭基盤と表層で得られた強震記録の伝

達関数の逆解析から推定された K-NET、JMA の表層地盤のせん断剛性、せん断剛性比および減衰定数のひずみ依存性と、室内動的変形試験結果は良い対応を示した。

5. 平成 16 年新潟県中越地震における K-NET、JMA の地表での地震動特性の違いには、表層 3 m 程度までの S 波速度構造およびその非線形性の違いが大きく影響していると推察された。

参考文献

- 1) 時松孝次, 翠川三郎: 地表で観測された強震記録から推定した表層地盤の非線形性状, 日本建築学会構造系論文集, No. 388, pp. 131-137, 1988.6.
- 2) 時松孝次, 古山田耕司, 岩崎友洋: 鉛直アレー強震記録から推定した地盤の動的特性(その1)地盤の動的特性のひずみ依存性, 第28回地盤工学研究発表会, Vol. 1, pp. 1139-1140, 1993.6.
- 3) 翠川三郎: 強震時にみられる地盤特性の非線形性, 地震 第2輯, 第46巻, pp. 207-216, 1993.
- 4) 翠川三郎, 三浦弘之, 秋場俊一: 2004年新潟県中越地震の地震動について, 地震工学研究レポート, No. 92, pp. 1-10, 2004.11.
- 5) 溜正俊, 鴫田隆: 免震建物の地震観測記録と振動解析結果, 平成16年新潟県中越地震被害調査報告会梗概集, pp. 111-116, 2004.12.
- 6) 1/50,000 土地分類基本調査(地形分類図)「小千谷」新潟県, 1977.
- 7) 時松孝次, 関口徹: K-NET・JMA 小千谷の強震記録に見られる土の非線形性状と室内試験から求めた動的変形特性との関係, 日本建築学会構造系論文集, No. 603, 2006.5.
- 8) 時松孝次, 関口徹, 三浦弘之, 翠川三郎: 強震記録から推定した K-NET・JMA 小千谷における表層地盤の非線形性状, 日本建築学会構造系論文集, No. 600, pp.43-49, 2006.2.
- 9) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC Report, No. 72-12, 1972.
- 10) Wehling, T. M., Boulanger, R.W., Arulnathan, R., Harder, L.F.Jr., and Driller, M.W.: Nonlinear dynamic properties of a fibrous organic soil, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 129(10), 929-939, 2003.10.

謝辞

本研究で用いた K-NET、JMA 小千谷の強震記録は防災科学技術研究所の K-NET、気象庁の提供による。両地点の調査にあたり、小千谷市社会体育課、小千谷地域消防本部にご協力いただいた。水仙の家の強震記録、地盤情報は小千谷総合病院、三菱地所設計、大成建設より提供いただいた。ここに記して感謝いたします。