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

RELATION OF NONLINEAR DYNAMIC SOIL PROPERTIES OBSERVED IN STRONG MOTION RECORDS AT K-NET AND JMA STATIONS IN OJIYA WITH THOSE OBTAINED FROM LABORATORY TEST

時松孝次*, 関口 徹**

Kohji TOKIMATSU and Toru SEKIGUCHI

Strain-dependent shear moduli and damping factors of surface soils at K-NET and JMA stations in Ojiya are estimated not only from cyclic torsional shear tests on undisturbed samples obtained at the sites but also from back-calculation of transfer function of the strong motion records between either of the two sites and a nearby rock outcrop site. Both laboratory test and back-calculation of strong motion records indicate that the near-surface peat at K-NET shows weaker nonlinearity than the near-surface silt at JMA, which might have had strong effects on the observed ground motions including those in the Mid Niigata Prefecture Earthquake in 2004 at the two sites.

Keywords: strong motion record, surface soil, nonlinear, laboratory test, shear modulus, damping factor

強震記録, 表層地盤, 非線形, 室内試験, せん断剛性, 減衰定数

1. 序論

平成 16 年新潟県中越地震の際、小千谷市内の 2 強震観測点（防災科学技術研究所 K-NET、気象庁 JMA）では、1 G に近いかそれを超える最大地動加速度をもつ強震記録が得られた。両地点は地形分類上、同一の砂礫台地にあったが、最大地動加速度は、本震では K-NET で、余震では JMA で大きくなる傾向があり、また加速度振幅レベルの増大にともなうフーリエスペクトル特性の変化も、そのピーク周期の延びを含めて、両地点で大きく異なっていた¹⁾。以上の結果は、両地点で観測された強震動に表層地盤の非線形特性が強く影響していることを示唆している。

既報¹⁾では両地点の地表記録のみから表層地盤の非線形特性を推定し、その違いが両地点での地震動特性の差に大きな影響を与えた可能性を指摘した。しかし、当該地点の地表記録のみを用いた解析では、入力地震動の震源特性と伝播特性の結果に与える影響が除去できず、また表層地盤の減衰定数を決定することが難しいため、得られた結果の信頼性に疑問が残っている。

入力地震動の震源特性と伝播特性の影響を除去して地盤の減衰特性を含む非線形特性を同定するため、従来から、鉛直アレー強震記録を用いた検討が行われている（例えば、文献²⁾⁻⁷⁾）。K-NET、JMA

では、鉛直アレー観測は実施されておらず、地中強震記録は無いが、同市内では、両地点から 700-900m の距離にある水仙の家 (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⁸⁾。また、K-NET と JMA の表層地盤直下には、SSI の工学的露頭基盤と同等の S 波速度をもつ砂礫層が存在している⁹⁾。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、鉛直アレー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より高い信頼性のもとに推定できると考えられる。

大振幅の強震記録にもとづく実地盤の非線形特性の把握に加えて、その推定結果と原位置から採取した土試料の室内動的変形試験結果とが、はたしてどのひずみレベルまで、どの程度の精度で対応するのかを把握しておくことは、今後の強震動予測や耐震設計のために重要と考えられる。しかし、そのような研究はほとんど見あたらない。

以上の背景から本研究では、小千谷市内の工学的露頭基盤上の 1 地点 (SSI) と軟弱地盤上の 2 地点 (K-NET、JMA) 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とともに、両地点で不攪乱試料を採取し、採取した土試料に対して中空ねじりせん断試験を実施してその非線形性状を求める。さらに両結果の比較にも

* 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授・工博

** 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻
大学院生・修士(工学)

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

とづいて、両地点の表層地盤の非線形特性が平成16年新潟県中越地震（以下、本震）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

図1に小千谷市中心部の地形分類¹⁰⁾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2-5m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2に、3地点の地盤柱状図とS波速度(V_s)の深度分布を示す。ここでK-NET、JMAの深度7mまでは筆者らの既報⁹⁾の調査結果を、

図1 小千谷市における強震観測点と地形分類図

図2 3地点のボーリング調査結果

それ以深は従来から公開されている土質データ¹¹⁾を参考にした。SSIについては免震建物建設前に行われた地盤調査の結果⁸⁾である。K-NETでは、表層3m程度が $V_s=50\text{m/s}$ 程度のきわめて軟弱なシルト質粘土または高有機質土、JMAでは、表層3m程度が $V_s=100\text{m/s}$ 程度の砂質シルトである。両地点とも、表層3mの下は $V_s=400\text{m/s}$ 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 $V_s=430\text{m/s}$ 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

表1にSSIを含む2地点以上で強震記録が得られている19の地震についての主な諸元と各地点の最大地動加速度を示す。これらの地震は、小千谷市の東方に位置し、北北東-南南西に走行する逆断層を震源とするため、本震(2004年10月23日17時56分)を含めてEW成分が卓越する傾向が認められる。なお、表1より、2004年10月23日17時59分の地震については、SSIの記録が他の2地点の記録と比べて振幅が非常に小さくまた継続時間も短く、特異な傾向を示す。したがって、以下の検討でこの地震を除く18の地震時に得

表1 解析に用いた強震記録

Date Time	M_j	Focal Depth (km)	Epicentral Distance (K-NET) (km)	PGA (m/s^2)		
				K-NET ^{NS} _{EW}	JMA ^{NS} _{EW}	SSI ^{NS} _{EW}
2001/01/04 13:18	5.1	14	38	1.14 1.11	0.74 0.63	0.44 0.61
2004/10/23 17:56	6.8	13	7	11.47 13.08	7.79 8.98	7.40 8.08
2004/10/23 17:59	5.3	16	6	3.67 2.62	4.76 3.65	1.18 1.03
2004/10/27 00:56	4.3	13	8	0.41 0.61	1.01 0.83	0.59 0.35
2004/10/27 02:05	3.8	11	12	0.39 0.49	0.61 0.36	0.38 0.26
2004/10/27 10:26	4.3	14	12	0.62 0.85	0.97 0.53	0.48 0.21
2004/10/27 10:40	6.1	12	9	1.78 4.96	1.97 3.91	1.35 1.99
2004/11/01 04:35	5.0	8	14	0.83 1.16	1.10 1.16	0.53 0.57
2004/11/02 00:40	4.1	9	14	0.34 0.27	0.31 0.40	0.13 0.15
2004/11/03 05:28	3.0	8	10	0.15 0.12	-	0.24 0.19
2004/11/03 18:02	3.2	9	9	0.22 0.21	0.27 0.47	0.16 0.16
2004/11/04 08:57	5.2	18	18	3.26 1.86	2.71 2.55	2.07 0.92
2004/11/05 14:56	4.2	7	15	0.44 0.43	0.70 0.66	0.22 0.20
2004/11/06 22:05	4.4	13	10	0.27 0.55	0.48 0.47	0.36 0.24
2004/11/08 11:15	5.9	0	24	0.67 0.73	0.90 1.23	0.54 0.38
2004/11/09 04:15	5.0	0	19	0.38 0.27	0.38 0.62	0.27 0.27
2004/11/10 03:43	5.3	5	20	0.47 0.34	0.47 0.46	0.24 0.20
2004/11/11 18:04	3.9	7	12	0.43 0.26	0.41 0.69	0.21 0.12
2004/11/12 02:24	4.3	10	15	0.41 0.48	0.32 0.46	0.15 0.19

られた強震記録を検討対象とする。

図3に、本震における3地点での強震記録のEW成分の時刻歴、図4に、3地点の本震および微小余震(2004年11月6日22時5分)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)、図5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。なお図4のSSIについては、地震計の感度が悪くなる0.1s以下の成分のスペクトルは表示していない。

表1、図3-5の比較から、以下の点を指摘できる。

- (1) 表1より、3地点間の距離(700-900m)に対し検討対象とした地震記録の震央距離(6-38km)は長く、3地点の地表での地震動特性の違いに与える震源特性、伝播経路特性の影響は小さいものと考えられる。
- (2) 図3より、本震におけるK-NETとJMAの加速度時刻歴は、SSIのそれとの共通点が確認できるが、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。
- (3) 図4より、SSIのフーリエスペクトルは、本震、余震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っている。
- (4) 表1、図5(a)、(b)より、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。本震時のJMAの最大地動加速度はSSIの値と同程度である。
- (5) 表1、図5(c)より、既報¹⁾と同様に、加速度レベルが小さいとJMAの最大地動加速度がK-NETの値より大きい。加速度レベルが大きくなるとJMAの値がK-NETの値と同程度かそれ以下になる傾向が認められる。

以上から、K-NET、JMAで観測された地震動特性は、両地点には存在するがSSIには存在しない、軟弱な表層地盤の非線形特性の影響を強く受けている可能性が示唆される。

以上の考察を踏まえ、図6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0.27s、0.10s)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分の余震の値とはほぼ同等であるが、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5(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。

図3 地震観測記録(本震EW成分)

図4 加速度フーリエスペクトル(EW成分)

図5 K-NET小千谷、JMA小千谷、水仙の家の最大地動加速度の比較

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、JMA2地点の表層3m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等である。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6)は、両地点の深度3m程度までの表層地盤の非線形増幅特性を強く反映した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⁵⁾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 γ を推定する。まず、地盤を図7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¹⁾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⁵⁾。

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

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¹²⁾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8に本震EW成分のK-NET、JMAの伝達関数(K-NET/SSI、JMA/SSI)に対する評価関数Sの V_s -h平面における等値線図を示す。等値線は評価関数Sの最小値 S_{min} を基準としたデシベル表示(0.8dB間隔で8dBまで)である。K-NETでは、等値線図が明瞭な極小値を持ち、解の推定がある程度の精度で行われたことを示唆している。余震に関してもほぼ同様である。これに対し、JMAの本震では、図6(b)の観測記録の伝達関数に複数のピークが存在するため、等値線図に極小値が複数存在し、最小値周辺の等値線の間隔が広く、推定結果の精度がやや悪いことが示唆される。ただし、余震に対してはK-NETと同様に明瞭な極小値が存在する。図6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。

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

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

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PS検層結果を参考に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¹²⁾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 α (=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、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

図6 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)

図7 推定地盤モデル

図8 評価関数の等値線図(本震EW成分)

き印で示す。K-NET に対して推定されたせん断剛性は微小地震時の $\gamma=5 \times 10^{-5}$ で 3 MN/m^2 程度と非常に小さい。これに対し、JMA に対して推定されたせん断剛性は K-NET の約 5 倍の 15 MN/m^2 程度と相対的に大きい。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と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、微小地震時のせん断剛性の大きい JMA で顕著である。すなわち、本震時に K-NET では $\gamma=1-2\%$ 、 $G=1.0 \text{ MN/m}^2$ 以下、 $G/G_0=0.21-0.35$ 、 $h=6-15\%$ に対して、JMA では $\gamma=0.5-1\%$ 程度、 $G=1.0-2.0 \text{ MN/m}^2$ 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。図 8 (b) の結果と考察から、この推定値の信頼性は低いと考えられる。なお、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. サンプル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 までの土試料を採取した。試料採取にあたり、K-NET のシルト質粘土に対しては、軟らかい粘性土を適用範囲とする固定ピストン式シンウォールサンプラーを、その他の土質に対しては、硬さが中位の粘性土または締まりの程度が中位以上の砂質土を適用範囲とするトリプルチューブサンプラーを用いた。

両地点から採取した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 ($16 \sim 28 \text{ kN/m}^2$) にできるだけ近

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

くなるよう設定した拘束圧 (C-1、C-2、P-1 で 29kN/m^2 、P-2、S-1 で 39kN/m^2) 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 0.1Hz 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、せん断剛性比および減衰定数を求めた。

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、 $\gamma = 1\%$ 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 $\gamma = 1\%$ 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 $\gamma = 1\%$ の値はシルト質粘土の $\gamma = 0.1\%$ 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、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¹³⁾。

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、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

小千谷市内の K-NET、JMA と工学的露頭基盤 (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と減衰定数のひずみ依存性を推定し、さらに両地点で採取した土試料の室内動的変形試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 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 $0.5\sim 2\%$ 程度に対して、それぞれ K-NET で $0.21\sim 0.35$ 、 $6\sim 15\%$ 程度、JMA で $0.06\sim 0.12$ 、 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。

- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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 3m 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。

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。

参考文献

- 1) 時松孝次, 翠川三郎, 関口徹, 三浦弘之: K-NET・JMA 小千谷の強震記録から推定される表層地盤の非線形性状, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp. 2111-2112, 2005.7.
- 2) 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, 229, pp. 35-41, 1975.3.
- 3) Abdel-Ghaffar, A.M., and Scott, R.F.: Shear moduli and damping factors of earth dams, Journal of the Geotechnical Engineering Division 105(12), 1405-1426, 1976.
- 4) 田蔵隆, 清水勝美, 佐藤正義, 広瀬利光, 小山和夫: 非線形振動に伴う地盤の卓越周期と減衰定数の時間的変化の同定, 第 19 回地震工学研究発表会, pp. 93-96, 1987.7.
- 5) 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.
- 6) 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振動と強振動の分析, 日本建築学会構造系論文報告集, 449, pp. 55-68, 1993.7.
- 7) Zeghal, M., Elgamal, A.W., Tang, H.T. and Stepp, J.C.: Lotung downhole array. II: Evaluation of soil nonlinear properties, J. Geotech. Engrg., 121(4), 363-378, 1995.
- 8) 溜正俊, 錦田隆: 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.
- 9) 時松孝次, 関口徹: 室内試験から求めた K-NET・JMA 小千谷の動的変形特性と強震記録に見られる非線形性上との関係, 第 40 回地盤工学研究発表会, pp. 2113-2114, 2005.7.
- 10) 1/50,000 土地分類基本調査 (地形分類図) 「小千谷」新潟県, 1977.
- 11) 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>
- 12) 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.
- 13) 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.

(2005年11月9日原稿受理, 2006年1月27日採用決定)