

2004年新潟県中越地震における小千谷市の地盤・地震動特性と住宅建物被害 Nonlinear Site Amplification Characteristics and Damage to Residential Buildings in Ojiya City during the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake

新井 洋¹⁾, 関口 徹²⁾, 時松孝次³⁾
Hiroshi ARAI¹⁾, Toru SEKIGUCHI²⁾, and Kohji TOKIMATSU³⁾

- 1) 防災科学技術研究所, 研究員, 博士 (工学) (茨城県つくば市天王台 3-1, arai.h@bosai.go.jp)
Research Engineer, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.
- 2) 東京工業大学, 大学院生, 日本学術振興会特別研究員, 修士 (工学) (tsekiguc@mail.arch.titech.ac.jp)
Graduate Student, Tokyo Institute of Technology, JSPS Research Fellow, M. Eng.
- 3) 東京工業大学, 教授, 工学博士 (kohji@o.cc.titech.ac.jp)
Professor, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Effects of nonlinear site amplification characteristics on strong ground motions and damage to residential buildings in Ojiya, during the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake, are examined. With the soil profiles available at two sites in the damaged area, strong ground motion simulations are performed for the sites. Using the simulated ground motions and simplified wooden structural models, maximum responses of residential buildings are also estimated at the sites. The house responses evaluated are consistent with the damage statistics available at the sites. From the analyses results, it is revealed that the maximum house response could mainly be controlled by strong ground motion with a period of about 1-3 s, which is significantly amplified because of the nonlinear dynamic properties of subsurface soils at the heavily damaged site.

2004年新潟県中越地震, 小千谷市, 住宅建物被害, 表層地盤, 非線形震動増幅, 性能等価応答スペクトル
the 2004 Niigata-ken Chuetsu earthquake, Ojiya city, damage to residential buildings, subsurface soils,
nonlinear site amplification, equivalent-performance response spectrum

1. はじめに

2004年新潟県中越地震において, 震源域に近い小千谷市では, 多くの住宅建物が被害が生じた。これらの建物被害について, 地震後, 多くの機関により様々な調査が行われている。このうち, 地震直後に行われた組織的・統一的な悉皆調査 (全数調査) としては, 日本建築学会北陸支部災害委員会を中心とした災害調査 WG (委員長: 田守伸一郎/信州大学助教授) による調査¹⁾と, 罹災証明書発行を目的とした被災度判定訓練を受けた小千谷市の行政職員による調査²⁾の2件が挙げられよう。両者には, 調査の目的や方針において明確な違いがあるが, いずれの調査結果でも, 小千谷市の中心市街地に比べて, 西および西南側の山際に沿った時水・吉谷地区 (以下, 西地区) において, 住宅建物の被災度が大きくなることが報告されている (図1)³⁾。このことは, 小千谷市の中心市街地と西地区とでは, 本震時の地震動特性が大きく異なっていた可能性を示唆している。

小千谷市内では, 中心市街地に位置する3つの強震観測点 (防災科学技術研究所 K-NET, 気象庁 JMA, 三菱地所設計・大成建設/小千谷総合病院「水仙の家」SUI: 図1) において本震記録が得られている⁴⁾。これら3観測点間の距離 (0.7-0.9km) は本震の震央距離 (約7km) に比べて小さいが, K-NET 地点の本震記録の最大加速度・最大速度は JMA, SUI 地点のそれらの1.4-1.8倍程度

大きく, また, 記録波形の周期特性も互いに異なっている⁷⁾。この原因として, 時松ら^{7,8)}は, K-NET, JMA 地点の表層3m程度までの地盤のS波速度構造および非線形性の違いが強く影響したことを指摘している。藤川ら⁹⁾も, 同様の結論を報告している。このことから, 小千谷

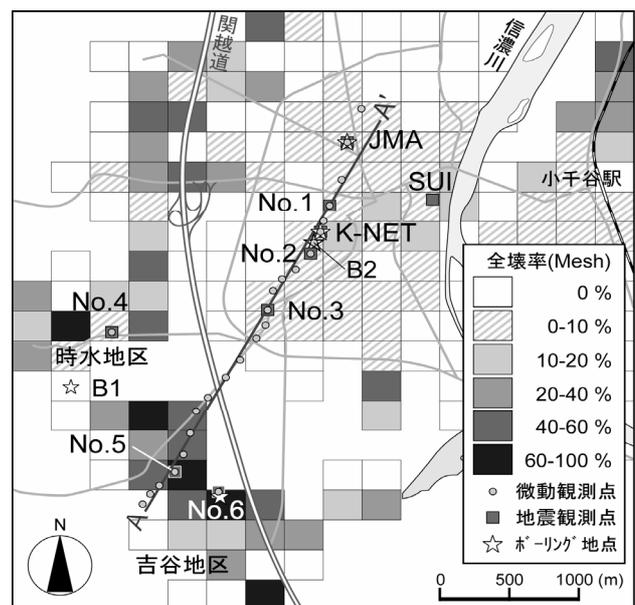


図1 小千谷市の住宅建物の全壊率の分布³⁾, 微動観測点, 地震観測点およびボーリング地点

では、本震時に、表層地盤の非線形震動特性が地表での強震動特性に強く影響し、その結果、場所によっては住宅建物被害が大きくなった可能性も推察される。

しかし、本震時に住宅建物被害が大きかった西地区では、地震記録が得られていないため、被害の要因については不明な部分が多い。近接する複数地域で住宅建物被害の様相が大きく異なった原因を解明し、表層地盤の非線形震動特性が大地震における住宅建物の被害程度を左右する可能性について検証しておくことは、今後、地震工学・防災に資する事例研究として重要と考えられる。

以上の背景から、本研究では、小千谷市の中心市街地と西地区を対象として、まず、微動の移動観測および地震観測を行い、微動・地震動特性と住宅建物被害分布の関係を概観する。さらに、ボーリング資料等に基づく表層地盤モデルの地震応答解析を行い、地盤の非線形性が本震時の地震動特性および住宅建物被害に与えた影響を検討する。また、検討結果に基づいて、建物の耐震設計に相互作用を組み込む際に反映させるべき項目について指摘する。なお、本稿は、既発表文献¹⁰⁾の内容を拡充したものである。

2. 小千谷市の住宅建物被害分布の概要

小千谷市が実施した住宅建物被害の悉皆調査²⁾の結果は、緯度方向7.5秒、経度方向11.25秒の約250m四方メッシュ¹¹⁾ごとに集計されている³⁾。図1に、小千谷市の中心市街地と西地区を含む範囲における各メッシュごとの住宅建物の全壊率の分布³⁾を示す。メッシュを表示していない部分では、調査対象建物が少ないか、あるいは無いため、被害率が算定されていない。図から、3つの強震観測点(K-NET, JMA, SUI)が位置する中心市街地よりも、西および西南側の時水・吉谷地区(西地区)に

おいて、住宅建物の全壊率が大きくなる傾向が確認される。また、厚生労働省の調査結果¹²⁾によれば、西地区は軟弱な地盤上にあるが、大きな地盤変状や液状化の痕跡は報告されていないことから、この地区の建物被害は地盤震動によるものと推察される。以上から、小千谷市内の住宅建物被害分布には、それぞれの地区の地盤震動特性が強く影響した可能性が示唆される。

なお、小千谷市の住宅建物の構造種別(課税台帳上)は、その92%が木造であり、残りの5%がS造、2%がRC造、1%が軽量鉄骨系などとなっている³⁾。この地域の木造住宅建物には建築年が古いものも多く見られ、文献³⁾によれば、この地域の木造住宅建物のうち1971年以前に建てられたものの割合は、中心市街地に比べて、西地区で若干大きくなっている。建築年の古い木造建物では、その維持管理状態によっては耐震性能が経年劣化する場合のあることが指摘されており¹³⁾、このことが建物被害率に影響した可能性も推察される。

3. 微動のH/Vスペクトルと住宅建物被害率の関係

微動のH/Vスペクトル^{14,15)}は、地盤のS波速度構造を反映した量であり、また、地表1地点のみの簡単な観測から容易に得ることができる。そこで、小千谷市の中心市街地および西地区の地盤特性に関する先験的情報を把握するため、これらの地区を南南西-北北東に縦断するA-A'ライン上の24地点および西地区の2地点(図1:○印)において、微動の移動1点観測を行った。

観測は、固有周期2秒の3成分速度計を用いて、主として2005年10月12-13日の日中に行った。観測波形は増幅後、サンプリング周波数100ないし200HzでA/D変換(24bit)し、ノートパソコンに記録した。記録波形から、文献¹⁶⁾と同様の方法でH/Vスペクトルを求めた。

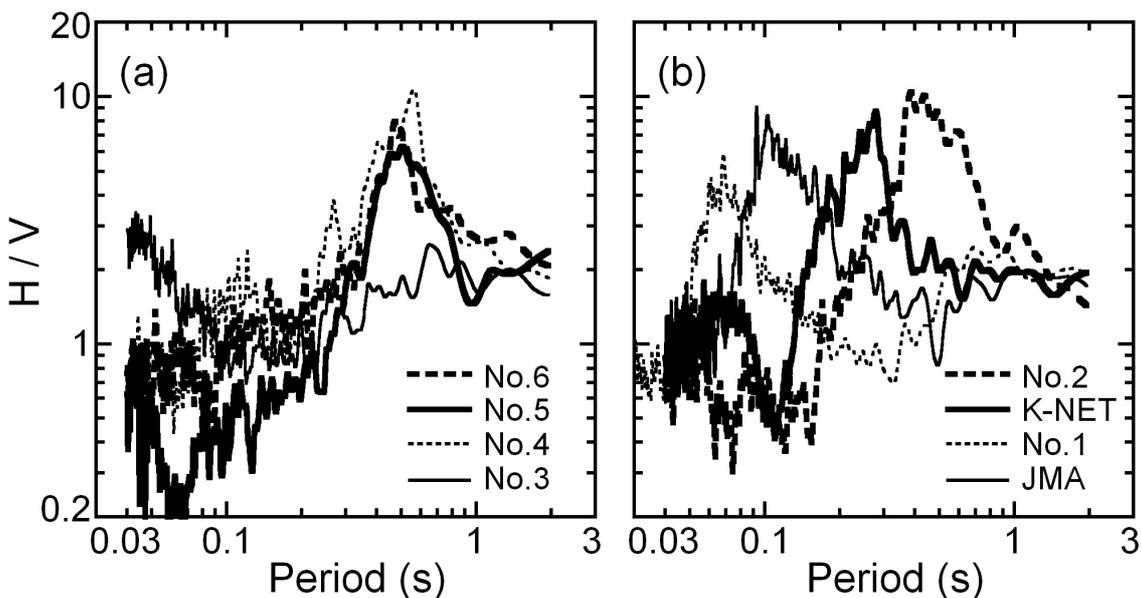


図2 Nos. 1-6 およびK-NET, JMA 地点で観測された微動のH/Vスペクトル

図2に, Nos. 1-6 地点 (図1) および K-NET, JMA 地点で得られた微動の H/V スペクトルを示す. 地点ごとに, H/V のスペクトル形状やピーク周期は大きく異なっている. 図3(a)に, A-A'ラインにおける H/V スペクトルの位置的变化を濃淡で示す. No. 5 地点周辺の西地区, 関越道周辺, および Nos. 2-3 地点の中間点から K-NET 地点付近までの区間では, 周期 0.3-0.5 秒程度に H/V スペクトルのピークが認められる. しかし, No. 3 地点付近および No. 1-JMA 地点間付近では, H/V スペクトルに顕著なピークが認められないか, あるいは周期 0.1 秒程度以下にピークが認められる.

図3(b)に, A-A'ライン上の微動観測点周辺における住

宅建物の被害率 (一部損壊, 半壊, 大規模半壊, 全壊)³⁾を示す. 建物被害率は図1に示すメッシュごとに算定されているため, 本報では, 観測点が含まれるメッシュの被害率をその観測点での値としている. ここで, 図3(b)上部の両括弧付き数字は, 各メッシュに含まれる住宅建物棟数 (被害率算定における母数) である. なお, 関越道周辺 (図中 1-1.5km 付近) では, 建物がほとんど無いため, 被害率は算定されていない. 図から, No. 5 地点周辺の西地区では全半壊率が高いのに対し, 関越道よりも北北東側の中心市街地では一部損壊率が高くなっている. また, No. 2 地点付近では, 中心市街地の他の地点に比べて半壊率が高くなっている. 以上から, 周期 0.4-0.5 秒程

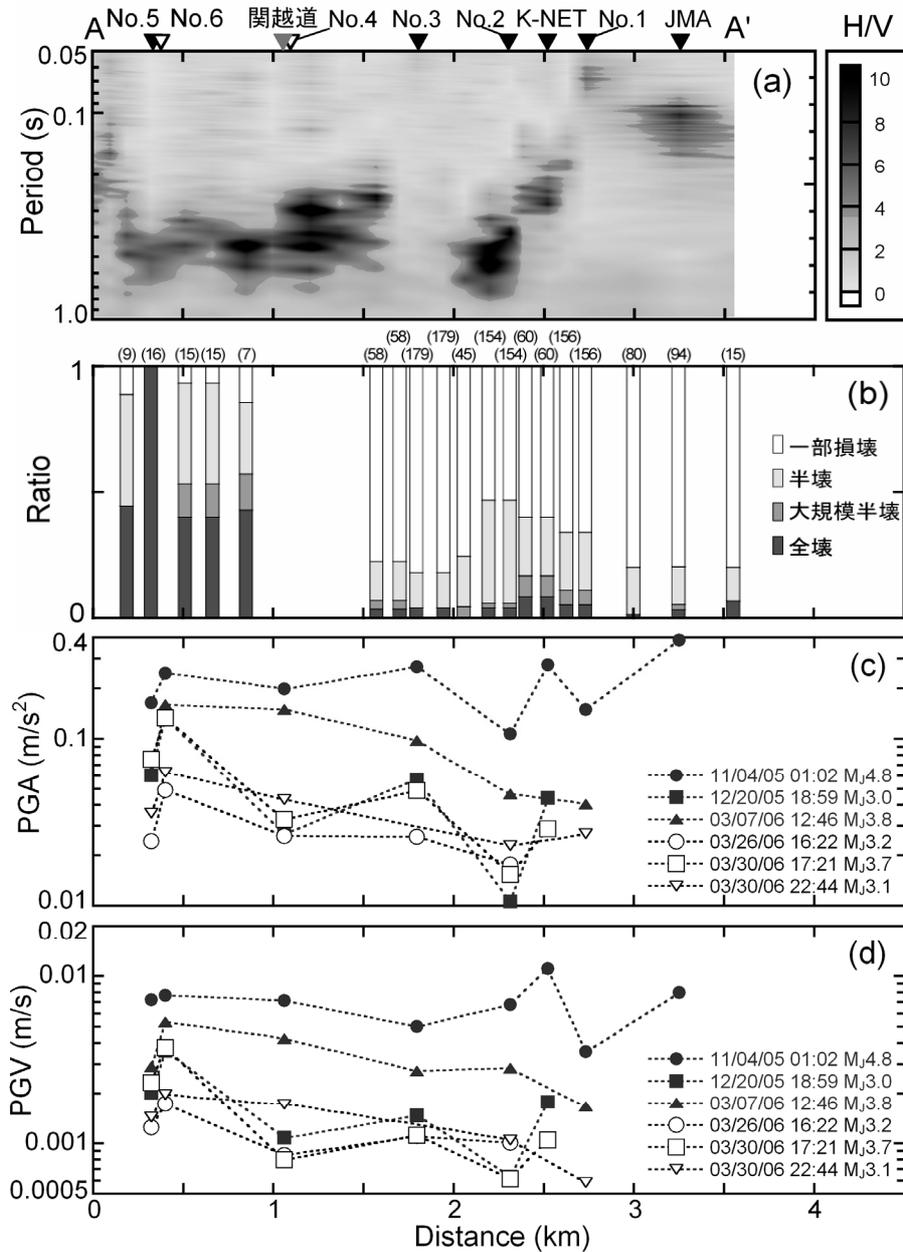


図3 A-A'ラインに沿う (a) 微動のH/V スペクトル, (b) 住宅建物の被害率³⁾, (c) (d) 微小地震記録の最大加速度および最大速度 (水平2成分合成) の位置的变化

度に H/V スペクトルのピークが見られた西地区および No. 2 地点付近での住宅建物被害率(半壊以上)が相対的に高く、周期 0.3 秒以下にピークが見られるかまたは顕著なピークが認められない K-NET, JMA および Nos. 1, 3 地点では被害率が低くなる傾向が認められる。

4. 微小地震動特性と住宅建物被害率の関係

住宅建物の被害率が異なる複数地点での地震動特性を把握するため、図 1 に□印で示す Nos. 1-6 地点で、2005 年 11 月 3 日から地震観測を行っている。地震計は広帯域サーボ型速度計を組み込んだデジタル強震計(株東京測振製 CV910)であり、低感度速度(フルスケール 2m/s)、高感度速度(0.05m/s)、加速度(20m/s²)それぞれ 3 成分の波形を記録している。2006 年 11 月 6 日までに発生した 33 個の地震において、少なくとも 2 つ以上の観測点で同時記録が得られている。このうち、13 個の地震では、全 6 地点での同時記録に成功している。

Nos. 1-6 地点で同時観測に成功した 13 個の地震のうち、新潟県内で発生した 6 つの地震(気象庁マグニチュード $M_J = 3-5$ 程度)について、各地点の記録および K-NET, JMA 地点の観測記録^{4, 5)}の最大加速度および最大速度(PGA, PGV: いずれも水平 2 成分合成)の分布を図 3(c), (d) に示す。これらの記録の PGV は最大で 0.01m/s 程度であるため、観測された地震動については、各地点の表層地盤の非線形化の程度は小さいと推察される。図から、各地点における PGA, PGV は、本震での住宅建物被害率の高い西地区(Nos. 4-6 地点)で値が相対的に大きくなる傾向があるものの、被害率の低い K-NET, JMA 地点で値がさらに大きくなるなど、PGA, PGV の大小と被害率の高低は符号しない場合が多い。

図 4 に、2005 年 11 月 4 日に新潟沖で発生した地震(M_J

= 4.8) の際に各地点で観測された記録の速度応答スペクトル(水平 2 成分合成, 減衰定数 5%)を示す。本震での住宅建物被害率の高い西地区(Nos. 4-6 地点)および No. 2 地点では、周期 0.4-0.5 秒付近にスペクトルのピークが見られ、その周期帯での応答が他の地点よりも大きくなっている。一方、被害率は低い地震記録の PGA, PGV が大きい K-NET, JMA 地点では、周期 0.3 秒より短周期側にピークが見られ、また同様に被害率の低い Nos. 1, 3 地点では、応答の卓越する周期帯が認められない。したがって、微動 H/V スペクトルと同様、各地点の微小地震の地震動特性についても、周期 0.4-0.5 秒程度に速度応答スペクトルのピークが見られた西地区および No. 2 地点付近での住宅建物被害率が相対的に高く、周期 0.3 秒以下にピークが見られるか、または、卓越する周期帯が認められない K-NET, JMA および Nos. 1, 3 地点では被害率が低くなる傾向が認められる。

5. 表層地盤構造と住宅建物被害率の関係

前章までの検討から、西地区(Nos. 4-6 地点)と No. 2 地点は同様の微動・微小地震動特性を示すにもかかわらず、西地区の住宅建物全壊率は No. 2 地点付近のそれに比べて極めて高いことがわかる。このような差異が生じた原因を検討するため、本章では、西地区および No. 2 地点付近のボーリング資料等に基づく地盤構造モデルの地震応答解析を行い、表層地盤特性が本震時の強震動特性および住宅建物被害に与えた影響を検討する。

5.1 ボーリング資料から推定される表層地盤構造

図 1 に☆印で示す 5 地点(西地区の B1 および No. 6 地点, No. 2 地点近傍の B2 地点, K-NET⁴⁾ および JMA⁸⁾ 地点)では、表層地盤のボーリング調査が行われている。

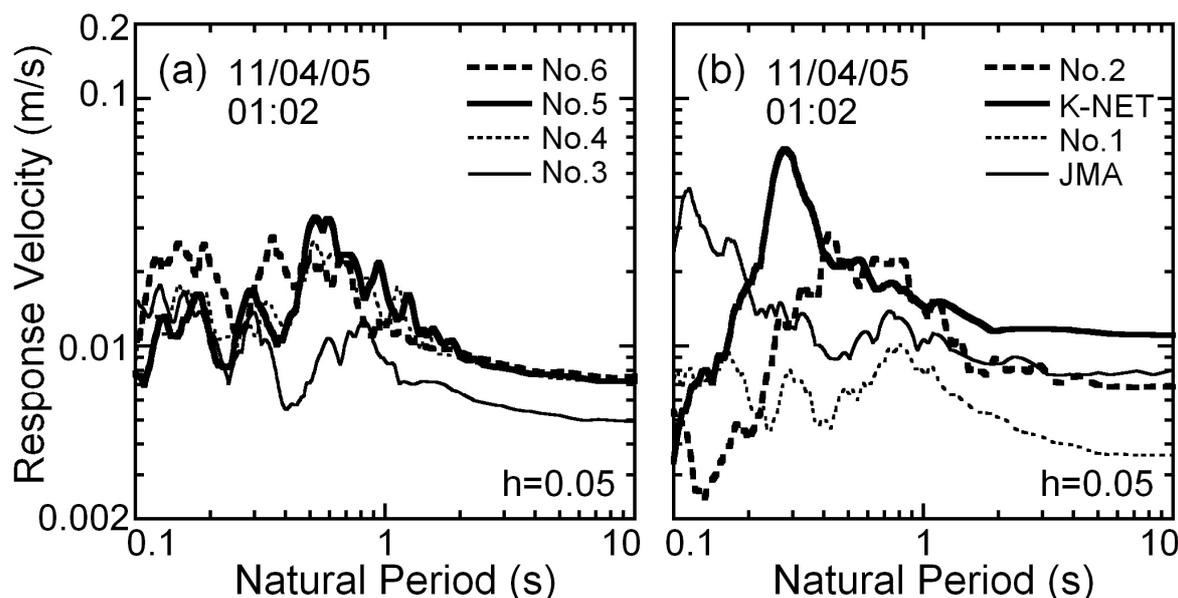


図 4 Nos. 1-6 および K-NET, JMA 地点で観測された微小地震記録の速度応答スペクトル(水平 2 成分合成)

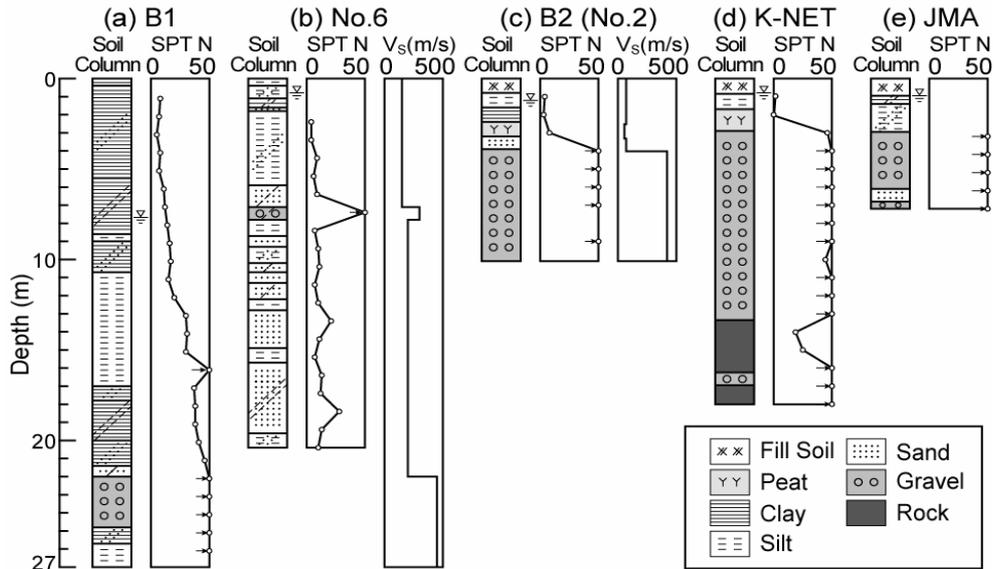


図5 B1, No. 6, B2(No. 2)およびK-NET⁴⁾, JMA⁸⁾地点のボーリング調査結果

これらの調査結果に基づく各地点の土質とN値の深さ方向分布を図5に示す。図から、B2 (No. 2) 地点ではK-NET地点と同様N値10未満の高有機質土を含む軟弱な層が5m程度、西地区のB1およびNo. 6地点ではN値50未満のシルト質粘土・シルト・砂からなる層が20m程度以上、硬質な砂礫層 (N値50以上) の上に堆積しており、両者の表層地盤構造は大きく異なっている。図5(b), (c)には、No. 6およびB2 (No. 2) 地点のボーリング資料および太田・後藤の式¹⁷⁾などを参考に推定したS波速度構造を示す。図から、S波速度400m/s程度の層 (建築分野における工学的基盤) はN値50程度以上の砂礫層に対応していると考えられる。

図6にK-NET地点で採取された高有機質土、JMA地点で採取された砂質シルトおよびシルト質粘土の土試料に対して行われた室内動的試験の結果⁷⁾を示す。図から、せん断剛性比が0.5、減衰定数が10%となるせん断ひずみの値は、K-NET地点の高有機質土で2%程度、JMA地点の砂質シルトおよびシルト質粘土で0.1%未満となっており、高有機質土は他の土試料に比べて非線形性が弱い⁷⁾。したがって、図5から、No. 2地点と西地区とでは、非線形性が大きく異なる地盤構造により、本震時の地震動特性 (地盤せん断振動の1次固有周期の伸び) が異なった可能性があり、このため住宅建物の全壊率に大きな差異が生じた可能性も推察される。

5.2 地震応答解析による本震地震動の推定

Nos. 1-6地点のうち、近傍でボーリング資料の得られているNos. 6, 2地点において、周波数・ひずみ依存型の減衰を持つ等価線形解析¹⁸⁾を行い、本震の地表地震動を推定した。この際、解析対象地盤は、両地点のS波速度400m/s程度の砂礫層上面 (No. 6地点では深度22m, No.

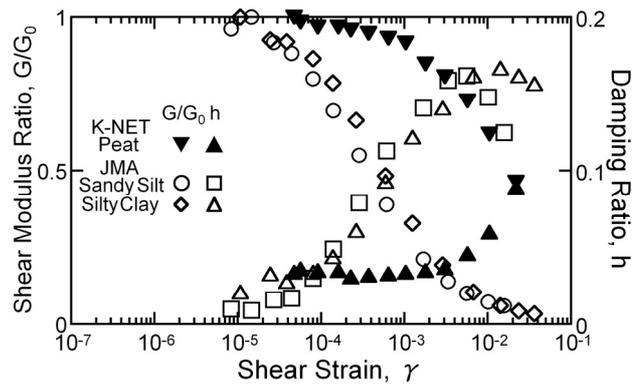


図6 K-NET, JMA地点の土試料の室内動的試験結果⁷⁾

2地点では深度4m: 図5) より浅い部分とし、入力波には、工学的基盤上面における露頭波と考えられるSUI地点の本震記録^{6, 7, 9)} (EW成分) を用いた。土の非線形性は、図5の土質区分に基づいて、シルト・粘性土および高有機質土層ではK-NET, JMA地点の土試料の室内動的試験結果 (図6) ⁷⁾を、砂質土および砂礫層では文献¹⁹⁻²¹⁾を参考に、有効拘束圧を考慮して設定した。

図7に、Nos. 6, 2地点の解析から得られた推定地表地震動およびK-NET, JMA地点の本震記録^{4, 5)}の加速度応答スペクトル (減衰定数5%, EW成分) を示す。ここで、微小地震の卓越周期 (≡微動H/Vスペクトルのピーク周期: 図上部の▼印) は、Nos. 6, 2地点とも0.4-0.5秒程度であったが、推定された本震地震動の卓越周期は、No. 2地点ではK-NET地点と同様0.7秒程度、No. 6地点ではさらに長周期化して1秒程度以上となっている。これらの地点では、工学的基盤と堆積層の硬軟コントラストが比較的明瞭であることから (図5)、微動H/Vスペクトル

のピーク周期は地盤せん断振動の1次固有周期に対応する可能性が高く^{14,15)}、また、地震動の卓越周期の伸びは地盤の固有周期の伸びに対応すると考えられる^{8,22)}。このことから、図7に見られる地震動の卓越周期の伸びの違いは、既往の研究^{8,9)}でも指摘されているように、各地点の地盤の非線形性の違いに起因すると考えられる。

5.3 地盤の非線形震動特性が住宅建物被害に与えた影響

地震動に対する木造建物の最大応答を推定する方法の一つとして、林の提案する性能等価地震荷重の概念に基づく性能等価応答スペクトル²³⁾を利用する方法²⁴⁾がある。木造建物の性能等価応答スペクトルは、建物を基礎固定の1質点系に置換し、その荷重-変形関係を降伏変形角1/100のバイリニア型と仮定して、与えられた変形角Rを建物の変形限界としたときの地震荷重の換算値に相当している²³⁾。よって、系の等価高さ H_e を仮定すれば、性能等価応答スペクトルは、等価ベースシヤ係数(耐力) C_y ごとに、Rの変化に対応する周期-応答平面上の曲線で表現される。これと任意の地震動の応答スペクトルとの交点から、その地震動に対する建物の最大応答変形角 R_{max} が推定できる²³⁾。

本研究で対象とする地域の木造住宅建物の耐力は不明であるが、文献^{24,25)}などから、多くの場合、木造建物の耐力は0.6程度以下に分布していると推察される。そこで、標準的な木造住宅(2層)建物を想定し、等価高さ $H_e=4.5m$ ²³⁾、等価耐力 $C_y=0.2, 0.4, 0.6$ の場合について性能等価加速度応答スペクトルを求め、図7に○付き細線で示す。これと地震動の加速度応答スペクトルとの交点から求めた想定建物の最大応答変形角 R_{max} の値は、いずれの耐力の場合でも、K-NET, JMA およびNo. 2 地点では1/20程度以下となっているのに対し、No. 6 地点では1/10程度となっている。参考のため、文献^{26,27)}で用いられている木造住宅建物を想定した2質点系モデル($C_y=0.4$, 基礎固定条件)に対して、Nos. 6, 2 地点の推定本震地震動およびK-NET, JMA 地点の本震記録^{4,5)}(EW成分)を入力波とした非線形時刻歴応答解析を文献^{26,27)}と同等の条件下で行ったところ、各地点の想定建物の最大応答変形角は、上記の結果と概ね同じ値となった。最大応答変形角 R_{max} が大きいほど、木造建物に大きな損傷が生じる確率は高くなると考えられる²⁴⁾。したがって、以上の解析結果は、本震時の住宅建物全壊率の高低(図3(b))と定性的には良く対応している。

No. 6 地点の想定木造建物の最大応答が他の地点のそれよりも大きくなった原因は、図7から読み取ることができる。すなわち、この原因は、No. 6 地点での推定本震地震動の周期1-3秒程度の成分が他の地点でのそれよりも大きかったためである。この周期1-3秒程度の地震動増幅の差異は、5.2節の考察から、各地点の地盤の固有周期の伸びの違いによるものと考えられる。したがって、各地点の想定木造建物の最大応答の差異は、表層地盤の

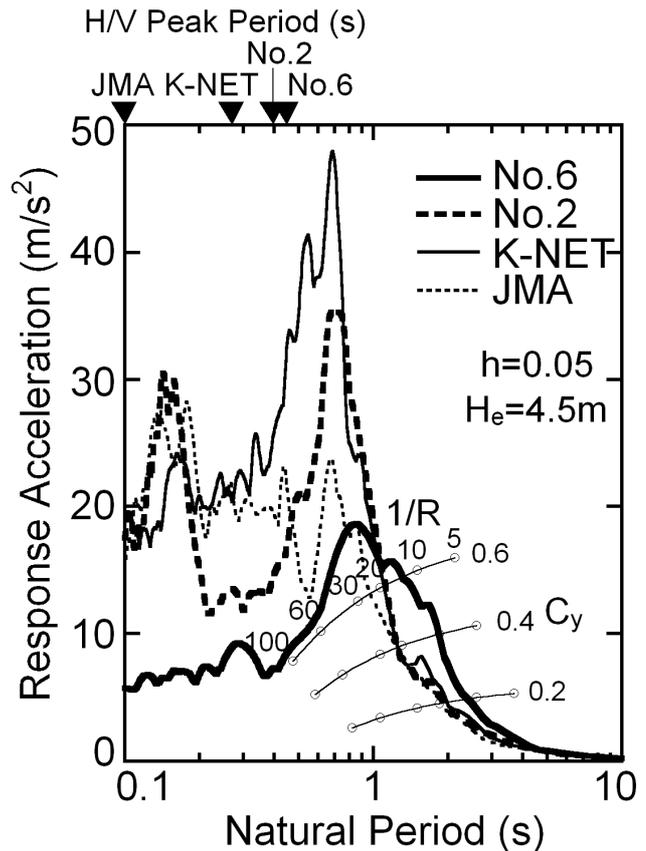


図7 Nos. 6, 2 地点で推定された本震地震動および K-NET, JMA 地点の本震記録^{4,5)}の加速度応答スペクトル(EW成分)と標準的な木造住宅建物を想定した性能等価加速度応答スペクトル²³⁾の比較

非線形性の違いに起因していると言える。

以上の結果は、5.1節の仮説の妥当性を、ある程度支持している。すなわち、小千谷市の住宅建物の全壊率が中心市街地に比べて西地区で大きかった原因は、各地点の表層地盤の非線形震動特性の違いが強く影響したためと考えられる。ただし、現時点では、Nos. 6, 2 いずれの地点もS波速度および土質・非線形性等の地盤構造が正確には分かっていないため、本章の解析結果(等価線形解析)は、あくまでも準備的な試算の域を出ない。今後、Nos. 1-6 地点において微動アレイ探査・ボーリング調査など必要な地盤調査を実施し、十分な地盤情報の下で非線形全応力解析を行う予定である。

なお、本報では、木造住宅建物の最大応答を推定する解析モデルにおいて、基礎固定条件を仮定したが、大地震時には、地盤と建物基礎との間に生じる局所的な非線形相互作用が建物応答に影響する可能性も考えられる。また、2章で述べたように、木造建物の耐震性能の経年劣化が被害率に影響を与えた可能性¹³⁾も否定できない。これらの影響については、現時点では、情報不足などのため検討が難しく、今後の課題と考えられる。

6. まとめ

2004年新潟県中越地震において住宅建物に多大な被害が生じた小千谷市の中心市街地および時水・吉谷地区(西地区)を対象として、地盤特性と地震動特性、住宅建物被害の関係を検討した。

まず、この地域の地盤特性に関する先験的情報を把握するため微動の移動1点観測を、被害程度の異なる6地点において地震観測を行い、観測された微動・地震動特性と住宅建物被害の関係を概観した。その結果、建物被害率が相対的に高い西地区および中心市街地に位置するNo. 2地点では、微動のH/Vスペクトルについては周期0.4-0.5秒程度に明瞭なピークが認められ、微小地震の速度応答スペクトルについてもこの周期帯においてピークが認められ、その値は中心市街地の他の地点よりも大きいことが確認された。

しかし、西地区とNo. 2地点の住宅建物の全壊率は大きく異なっており、この原因を検討するため、既存のボーリング資料に基づく地盤構造モデルの地震応答解析を行い、表層地盤特性が本震時の地震動特性および住宅建物被害に与えた影響を検討した。その結果、No. 2地点と西地区とでは、非線形性が大きく異なる地盤構造により、本震における地盤の固有周期の伸びが異なった可能性が高いこと、また、この固有周期の伸びの違いに起因する周期1-3秒程度の地震動増幅の違いが、木造住宅建物の最大応答変形角に大きく影響したことが示唆された。

以上から、表層地盤の非線形震動特性は、大地震時に木造住宅建物の被害程度を左右する重要な要因であると言える。また、今後、木造住宅建物の耐震設計に相互作用を組み込む際、地盤の非線形震動特性の影響として、周期1-3秒程度の地震動増幅の変化を適切に考慮する必要があると考えられる。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所および気象庁の地震記録を使用させて頂いた。水仙の家の強震記録は、小千谷総合病院、三菱地所設計、大成建設より提供して頂いた。ボーリング資料は、小千谷市役所に提供して頂いた。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：2004年10月23日新潟県中越地震災害調査報告, 238pp, 2006.
- 2) 堀江啓, 重川希志依, 牧紀男, 田中聡, 林春男:新潟県中越地震における被害認定調査・訓練システムの実践的検証 -小千谷市のり災証明書発行業務への適用-, 地域安全学会論文集, No. 7, pp. 123-132, 2005.
- 3) 堀江啓, 林春男, 吉富望, 田中聡:新潟県中越地震における住家の被害認定過程に関する一考察 -罹災調査結果を用いた被害分析-, 第25回日本自然災害学会学術講演会, pp. 39-40, 2006.

- 4) 防災科学技術研究所:強震ネットワーク K-NET ホームページ, <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/>
- 5) 気象庁, 気象業務支援センター:強震波形データ CD-ROM (2004年, 2005年, 2006年1-6月).
- 6) 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, 日本地震工学会ほか, pp. 111-116, 2004.
- 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, pp. 63-68, 2006.
- 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.
- 9) 藤川智, 先名重樹, 藤原広行, 大井昌弘:2004年新潟県中越地震の強震観測点における表層地盤の地震動増幅, 日本地震工学会論文集, 第6巻, 第3号, pp. 27-42, 2006.
- 10) 関口徹, 新井洋, 時松孝次:小千谷市における建物被災地域の微動・地震動特性評価, 第12回日本地震工学シンポジウム, pp. 1422-1425, 2006.
- 11) 若松加寿江, 松岡昌志, 板倉弘晃:新潟地域 250m メッシュ地形・地盤分類データベース Ver. 2 について, <http://www.kedm.bosai.go.jp/>
- 12) 新潟県中越地震水道現地調査団(厚生労働省健康水道課):新潟県中越地震水道被害調査報告書, 2004.
- 13) 更谷安紀子, 林康裕, 森井雄史:被害経験に基づいた木造住宅群の地震被害予測手法(その2)経年劣化を考慮した方法, 日本建築学会大会, 構造II, pp. 597-598, 2005.
- 14) 中村豊, 上野真: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, pp. 265-270, 1986.
- 15) 時松孝次, 宮寺泰生:短周期微動に含まれるレイリー波の特性と地盤構造の関係, 日本建築学会構造系論文集, No. 439, pp. 81-87, 1992.
- 16) Arai, H. and Tokimatsu, K.: S-Wave Velocity Profiling by Inversion of Microtremor H/V Spectrum, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol. 94, No. 1, pp. 53-63, 2004.
- 17) 太田裕, 後藤典俊:S波速度を他の土質的諸指標から推定する試み, 物理探鉱, 第29巻, 第4号, pp. 31-41, 1976.
- 18) 杉戸真太, 合田尚義, 増田民夫, 悦永賢司:周波数特性を考慮した等価線形化手法に関する一考察, 第28回土質工学研究発表会, pp. 1129-1132, 1993.
- 19) 日本建築学会:入門・建物と地盤との動的相互作用, pp. 240-245, 1996.
- 20) 古山田耕司, 宮本裕司, 三浦賢治:他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, pp. 2077-2078, 2003.

- 21) 今津雅紀, 福武毅芳: 砂礫材料の動的変形特性, 第21回土質工学研究発表会, Vol. 1, pp. 509-512, 1986.
- 22) 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報告集, No. 388, pp. 131-137, 1988.
- 23) 林康裕: 性能等価応答スペクトルに基づく建築物の地震荷重評価, 第11回日本地震工学シンポジウム, pp. 651-656, 2002.
- 24) 森井雄史, 林康裕, 更谷安紀子: 耐震性能評価と地震被害経験に基づいた木造住宅の地震時損傷度予測手法, 地域安全学会論文集, No. 7, pp. 281-289, 2005.
- 25) 木造軸組構法建物の耐震設計マニュアル編集委員会: 伝統構法を生かす木造耐震設計マニュアルー限界耐力計算による耐震設計・耐震補強設計法, 学芸出版社, 231pp, 2004.
- 26) 林康裕, 北原昭男, 平山貴之, 鈴木祥之: 2000年鳥取県西部地震の地震動強さの評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 548, pp. 35-41, 2001.
- 27) 林康裕, 鈴木祥之, 後藤正美, 小嶋伸仁: 2001年芸予地震における木造家屋被害の分析, 日本建築学会構造系論文集, No. 556, pp. 35-42, 2002.