

新潟県中越地震における表層地盤の非線形増幅特性が木造住宅被害に与えた影響

時松 孝次¹⁾ , 関口 徹²⁾ , 新井 洋³⁾

- 1) 東京工業大学 理工学研究科 建築学専攻, kohji@o.cc.titech.ac.jp
- 2) 東京工業大学 理工学研究科 建築学専攻, tsekiguc@mail.arch.titech.ac.jp
- 3) 防災科学技術研究所, 防災システム研究センター, arai.h@bosai.go.jp

1. はじめに

2004 年新潟県中越地震において、震源近傍に位置する小千谷市では多くの住宅が被害を受けたが、その空間分布は一様ではなく、市の中心部よりも西の山際に位置する時水・吉谷地区で全壊率がより高くなる傾向が見られた¹⁾。この建物被害分布には各地点の地盤特性が影響している可能性があるが、時水・吉谷地区の地盤特性に関する情報がほとんど無く、また本震あるいは余震の地震記録も無い。このため、市の中心部と時水・吉谷地区で住宅建物の被害に大きな違いが生じた原因について不明な点が多い。近接する複数地域で住宅建物被害が大きく異なった原因を解明することは、首都圏大震災軽減に資する研究事例として重要であると考えられる。そこで本研究では、被害程度の異なる複数地点において微動および地震観測およびボーリング調査を行い、その結果に基づく表層地盤モデルの地震応答解析から、各地点の非線形地盤応答特性が本震時の地震動特性および住宅被害に与えた影響を検討する。

2. 小千谷市内の住宅建物被害分布の概要

新潟県中越地震本震の直後、小千谷市は、罹災証明書発行のため、市内の全ての建物について被害調査を行っている。図 1 に、この調査結果に基づく市内中心部付近の住宅建物の全壊率分布¹⁾を、メッシュを用いて示す。小千谷市内では、建物の全壊被害が広範囲にわたって発生したが、気象庁 (JMA) や K-NET の強震観測点がある市内中心部よりも、西および西南の山際に位置する時水および吉谷地区において全壊率が大きくなる傾向がある。なお、この地域の住宅の多く (92%) は木造建物である¹⁾。

図 2(a) に、市中心部と時水・吉谷地区を北北東-南南西に縦断する A ライン (図 1) に沿ったメッシュにおける住宅建物被害率¹⁾ (全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊) の分布を示す。なお図には時水・吉谷地区の W2, W3 地点 (図 1) を含むメッシュの住宅建物被害率も A ラインに投影して示している。また、図の下部には被害率の母数にあたるメッシュ内の住宅数を示している。図から、W1 地点周辺の

時水・吉谷地区では全壊率が高いのに対し、関越道よりも北北東の市中心部では一部損壊率が高くなっている。

厚生労働省の調査結果²⁾によると時水・吉谷地

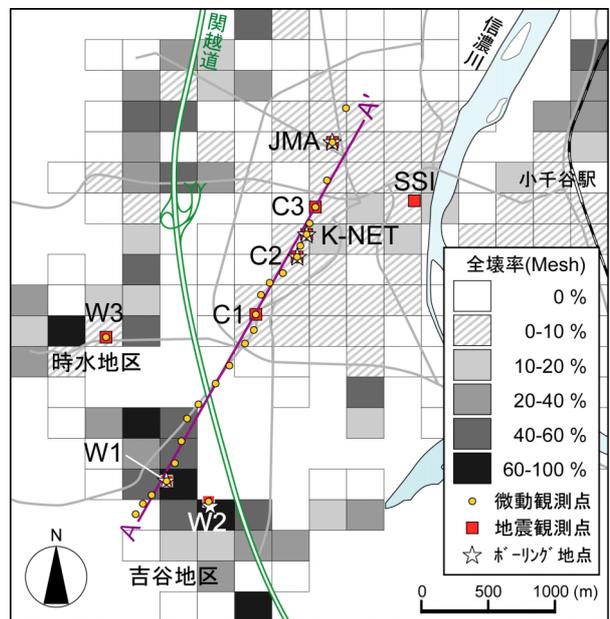


図 1: 小千谷市の中心部付近における住宅全壊率の分布¹⁾と微動・地震観測点およびボーリング調査地点

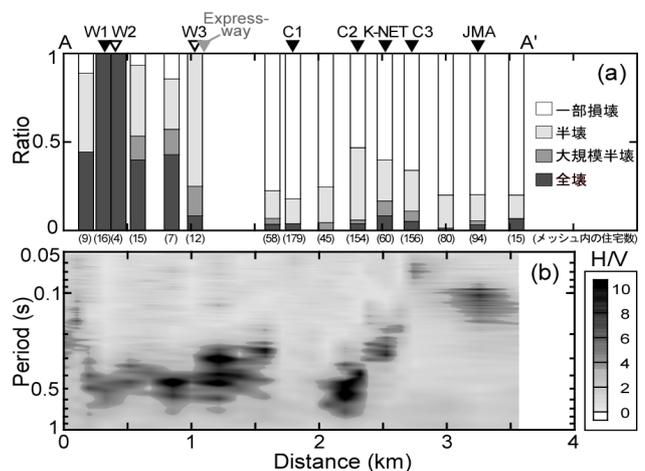


図 2: A ラインに沿う (a) 住宅建物被害率の分布¹⁾と (b) 微動 H/V スペクトルの位置的变化

区は軟弱な地盤上にあり，建物等に被害を及ぼしたとみられる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，これらの地区の建物被害は地盤震動によるものと推察される．

3. 小千谷市内の微動・微小地震動特性

小千谷市中心部および時水・吉谷地区のサイト特性を検討するため，Aライン上の24地点（図1：印）において，微動1点観測を行った．図2(b)にその結果得られたAラインの微動H/Vスペクトル^{3, 4)}の位置的变化を濃淡で示す．時水・吉谷地区（W1地点周辺），関越道周辺およびC2地点付近において周期0.4-0.5s程度にH/Vスペクトルのピークが認められる．その他の地点では，K-NET，JMA地点のように周期0.3s以下にH/Vスペクトルのピークが見られるか，または顕著なピークは認められない．

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W1-W3，C1-C3地点で，2005年11月3日から地震観測を行っている．図3に，2004年11月4日新潟沖の地震（ $M_j = 4.8$ ）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）を示す．H/Vスペクトルと同様に，W1-W3，C2地点では周期0.4-0.5s程度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，被害率の低いK-NETおよびJMA地点では，周期0.4s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C1，C3地点では，応答の卓越する周期帯が認められない．

以上のように，時水・吉谷地区（W1-W3地点）とC2地点では，観測された微動および微小地震動は同様の特性を示したが，時水・吉谷地区とC2地点の住宅建物の全壊率は大きく異なっていた（図1，2(a)）．

4. ボーリングおよび微動アレイ観測による地盤調査

W1-W3，C1-C3地点の表層地盤構造（土質およびS波速度構造）を把握するため，W1，C2地点でボーリング調査を，W1-W3，C1-C3地点で微動アレイ観測を行った．

ボーリング調査から得られたW1，C2地点のN値および土質の深さ方向分布を図4(a)，(c)に示す．図には，(b)W2地点，(d)K-NET地点の調査結果⁵⁾も示す．図から，C2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，W1，W2地点（吉谷地区）ではN値50未満のシルト質粘土・シルト・砂等からなる層が15-20m程度以上，硬質な砂礫層（N値50以上）の上に堆積している．このように，C2地点と吉谷地区の表層地盤は，堆積層の土質，層厚とも，大きく異なっている．

微動のアレイ観測は，2006年5月19-21日の日中に行った．各地点で得られた鉛直動の分散特性と微動のH/Vスペクトルに対して同時逆解析⁶⁾を行い，各地点の深度25m程度までのS波速度構造を推定した．図5に，W1-W3，C1-C3地点で推定された表層S波速度構造を示す．各地点のS波速度構造は，C1，C3地点を除いて，S波速度400m/s程度以上の層（以下，工学的基盤）とそれよりも上部の堆積層と

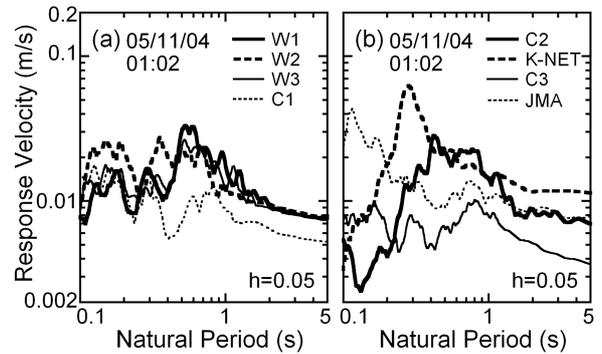


図3：地震記録の速度応答スペクトル

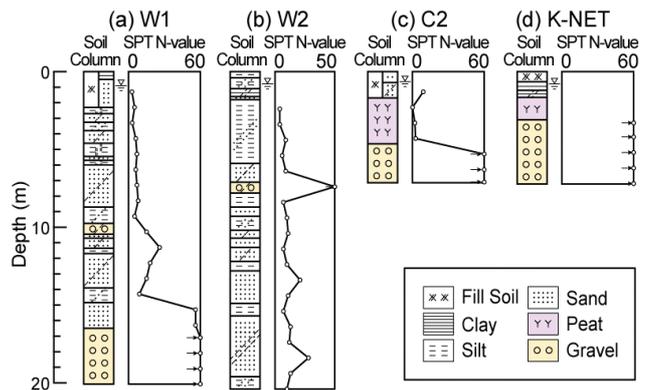


図4：小千谷市内のボーリング調査結果

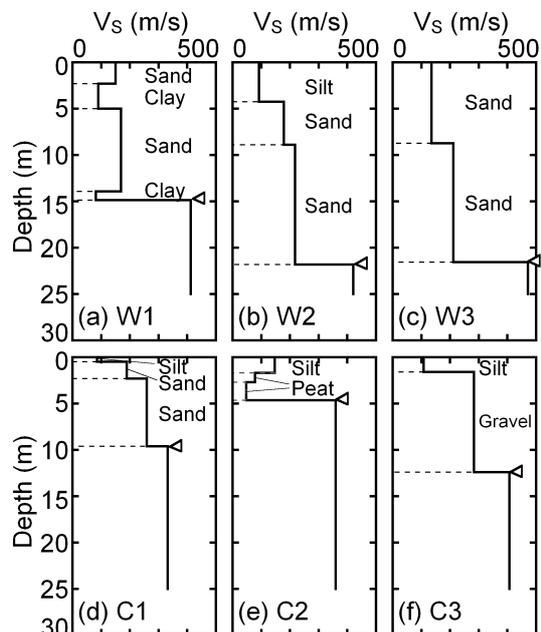


図5：表層地盤の推定S波速度構造と土質

のコントラストが明瞭である。図4と図5の比較から、この工学的基盤はN値50以上の砂礫層に対応すると考えられ、その出現深度および上部堆積層のS波速度は、時水・吉谷地区(W1-W3地点)では15-22m、100-200m/s程度、市中心部(C2, K-NET地点)では3-5m、50m/s程度と、大きく異なっていることが確認される。

5. 地震応答解析に基づく本震地震動と建物応答の推定

W1-W3, C1-C3地点の工学的基盤上面と考えられる深度(図5の白抜き三角印)以浅の地盤を対象に、工学的基盤露頭波と考えられるSSI地点(図1)の本震記録⁷⁾(EW成分)を入力として、1次元全応力解析を行い、各地点の地表地震動を推定した。この際、各地点の地盤の土質は、図4のボーリング調査結果等に基づき、図5のように設定した。また、土のせん断応力-ひずみ関係には修正R-Oモデルを用い、その規準ひずみと最大減衰定数の値は、高有機質土層ではK-NET地点の室内試験結果⁸⁾を、粘性土、シルト、砂質土および砂礫層では文献⁹⁾を参考に設定した。図6に、各土質に対して設定した単位拘束圧(98kPa)におけるせん断剛性比と減衰定数のひずみ依存性を示す。

図7に、W1-W3, C1-C3地点の解析から得られた推定地表地震動およびK-NET, JMA地点の本震記録の加速度応答スペクトル(減衰定数5%, EW成分)を示す。図には参考のため、各地点で得られた微小地震記録の応答スペクトル(図3)の卓越周期を印で示す。応答スペクトルの卓越周期は、微小地震において、W1-W3地点, C2地点ともに0.4-0.5s程度であったが、推定された本震地震動においては、C2地点ではK-NETと同様0.7s程度、W1-W3地点ではさらに長周期化して1s程度となっている。これは、W1-W3地点とC2地点とでは、表層地盤の非線形性状の違いにより、本震時の地盤の固有周期の伸びが異なったためと考えられる。すなわち、図4, 5に示すような表層地盤の土質の違い、特にC2地点に堆積する非線形性の極めて弱い高有機質土層、によりW1-W3地点とC2地点における本震時の地震動特性は異なっていた可能性がある。

さらに、各地点における本震時の住宅の最大応答を推定するため、2層木造建物の性能等価加速度応答スペクトル¹⁰⁾(建物の等価高さ $H_e = 4.5m$, 等価耐力 $C_{ye} = 0.2, 0.4, 0.6$)を求め、図7に、建物の等価耐力ごとに付き細線で示す。これと地震動の加速度応答スペクトルとの交点から、建物の最大応答変形角 R_{max} が推定される¹⁰⁾。図8に、各地点で推定された木造住宅の最大応答変形角 R_{max} を、図2

と同様にAラインに投影して示す。W1-W3地点の木造建物の最大応答変形角 R_{max} は、いずれの等価耐力の場合も、他の地点よりも大きくなっており、実際の住宅被害率の高低と調和的である。このことは、各地点で推定された地震動の妥当性を示唆している。ここで、各地点の木造建物の最大応答 R_{max} の差異は、図7から、各地点の地震動の周期1-3秒程度の加速度応答の大小によるものであり、これは、各地点の表層地盤の固有周期の伸びの違いに起因している。

以上から、表層地盤の非線形性の違いが大地震時の地震動特性(表層地盤の固有周期の伸び)に強く影響し、このため住宅建物被害に差異が生じた可能性が考えられる。

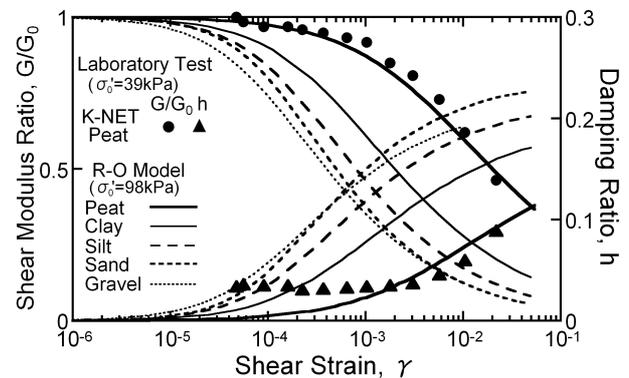


図6：土のせん断剛性比と減衰定数のひずみ依存性

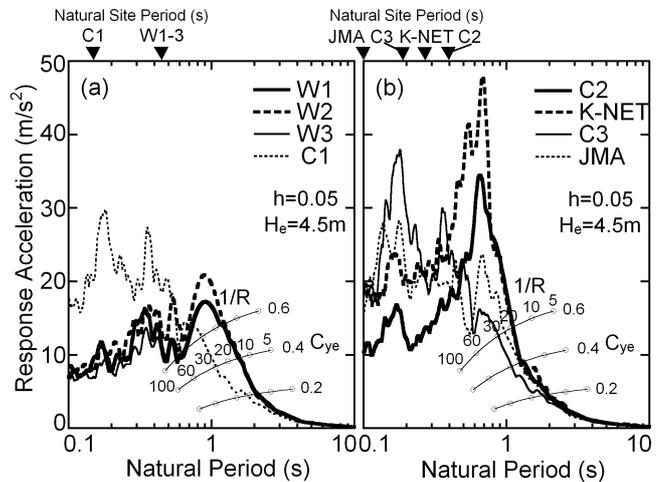


図7：推定された本震地震動および本震記録の加速度応答スペクトル(EW成分)と2層木造建物の性能等価加速度応答スペクトル¹⁰⁾

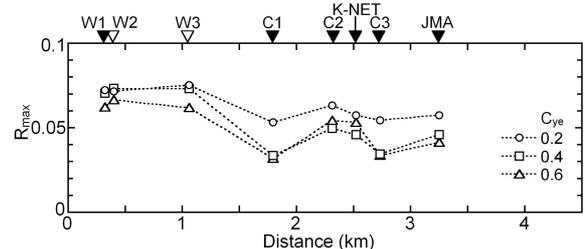


図8：推定された木造住宅の最大応答変形角の分布

6. 結論

小千谷市内の住宅の被害程度が異なる複数地点において、地盤調査を行い、調査結果に基づく表層地盤モデルの地震応答解析を行い、表層地盤の非線形増幅特性が木造住宅被害に与えた影響を検討し、以下の結論を得た。

1. 微動・微小地震動特性が同様である場合でも、住宅建物の被害率に大きな差異が生じる場合がある。
2. 同様の微動・微小地震動特性が見られた市中心部と時水・吉谷地区では、非線形性およびS波速度の大きく異なる表層地盤構造（特に市中心部に堆積する非線形性の極めて弱い高有機質土層）により、本震時の地震動特性（表層地盤の固有周期の伸び）が異なり、その結果住宅建物の被害率に大きな差異が見られた可能性がある。
3. 表層地盤の固有周期の伸びの違いに起因する地表地震動の周期1-3秒程度の成分の大小が、この地域の木造住宅の被害程度を左右した可能性がある。

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の提供による。水仙の家の強震記録は小千谷総合病院、三菱地所設計、大成建設より提供いただいた。W2地点のボーリング資料は小千谷市役所に提供していただいた。記して謝意を示す。

参考文献

- 1) 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講演概要集，pp. 39-40，2006。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 時松孝次，新井洋：レイリー波とラブ波の振幅比が微動の水平鉛直スペクトル比に与える影響，日本建築学会構造系論文集，No. 511，pp. 69-75，1998。
- 5) 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。
- 6) Arai, H. and Tokimatsu, K.: S-Wave Velocity Profiling by Joint Inversion of Microtremor Dispersion Curve and Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectrum, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 95, No. 5, pp. 1766-1778, 2005.
- 7) 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。
- 8) 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。
- 9) 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。
- 10) 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。