2004年新潟県中越地震時に表層地盤の非線形震動増幅特性が 小千谷の木造住宅被害に与えた影響

EFFECTS OF NONLINEAR SITE AMPLIFICATION CHARACTERISTICS ON DAMAGE TO WOODEN HOUSES IN OJIYA DURING THE 2004 MID NIIGATA PREFECTURE EARTHQUAKE

時松孝次*, 新井 洋**, 関口 徹***
Kohji TOKIMATSU, Hiroshi ARAI and Toru SEKIGUCHI

Effects of nonlinear properties of surface soil on the variation in strong ground motion and damage to wooden houses within Ojiya city during the 2004 Mid Niigata Prefecture earthquake, are examined, based on field investigation including boring and microtremor measurements, as well as strong motion observation. It is revealed that the maximum response of wooden houses, i.e., damage level, could mainly be controlled by strong ground motion with a period of about 1-2 s. Such a period range was significantly amplified in the damaged sites due to strong soil nonlinearity while it was not in the slightly damaged sites due to weak soil nonlinearity.

Keywords: strong ground motion, surface soil, nonlinear, natural period, damage to wooden houses, equivalent-performance response spectrum

強震動, 表層地盤, 非線形, 固有周期, 木造住宅被害, 性能等価応答スペクトル

1. 序論

2004年新潟県中越地震では、震源域に近い小千谷において、多くの木造住宅に被害が生じた。これらの住宅被害について、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な悉皆調査としては、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による調査¹⁾と、罹災証明書発行を目的として統一的な被災度判定訓練を受けた小千谷市職員による調査^{2),3)}の2件がある。両者には、調査の目的や方針に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、西および南西側に1-2km程度離れた山際の時水・吉谷地区において、木造住宅の被災度が大きく異なることが報告されている¹⁻³⁾。このことは、小千谷市の中心市街地と時水・吉谷地区とでは、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強震観測点(防災科学技術研究所K-NET, 気象庁JMA, 小千谷総合病院「水仙の家」SSI)において、本震および余震の記録が得られている⁴⁻⁶⁾。いずれの観測点でも、得られた本震記録の最大加速度および最大速度は 8m/s^2 , 0.7m/s を超える大きな値であったが、観測点周辺の木造住宅の被災度は比較的小さ

かった^{1-3),7)}。この原因として、境ら⁷⁾は、これら3地点での本震記録の卓越周期が、いずれも0.5-0.7秒以下であり、木造住宅に大きな変形を生じさせる可能性の高い周期帯(1-2秒程度)から外れていたことを指摘している。一方、これら3地点の本震および余震記録の周期特性は、その加速度レベルの増大に伴う卓越周期の伸びを含めて、地点ごとに大きく異なっている^{8),9)}。この原因として、時松ら^{8),9)}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¹⁰⁾も、同様の結論を報告している。以上から、小千谷では、本震時に、表層地盤の非線形震動増幅特性が地表での強震動特性(とくに卓越周期の伸び)に強く影響し、その結果、場所によっては木造住宅の被害が大きくなった可能性が推察される。

しかし、本震時に木造住宅の被害が大きかった時水・吉谷地区では、表層地盤のS波速度構造および非線形性に関する情報が殆ど無く、また、本震あるいは余震の地震記録も無い。このため、中心市街地と時水・吉谷地区の木造住宅の被害に大きな差異が生じた要因について、不明な部分が多い。近接する複数地域で木造住宅の被害が大きく異なった原因を解明し、表層地盤の非線形震動増幅特性が大地震における

* 東京工業大学大学院理工学研究科建築学専攻 教授・工博

** 防災科学技術研究所 研究員・博士(工学)

*** 千葉大学大学院工学研究科建築・都市科学専攻
助教・博士(工学)

Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.
Research Engineer, Nat'l Res. Inst. for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.
Assist. Prof., Dept. of Architecture and Urban Science, Graduate School of Engineering, Chiba University, Dr. Eng.

木造住宅の被害程度を左右する可能性について検討しておくことは、今後の地震工学・防災に資する研究事例として重要と考えられる。

以上の背景から、本論文では、小千谷市の中心市街地と時水・吉谷地区において、微動の移動1点観測と地震動の同時多点観測を行い、表層地盤の微小ひずみレベルにおける線形震動（S波）増幅特性（以下、S波増幅特性）の差異を把握する。次に、地震観測点のボーリング調査および微動アレイ探査を行い、表層地盤構造をモデル化し、その結果に基づく地震応答解析から、表層地盤の非線形震動増幅特性が本震時の地震動特性および木造住宅被害に与えた影響を検討する。

2. 小千谷の木造住宅被害率分布の概要

小千谷市が実施した住宅被害の悉皆調査²⁾の結果は、緯度方向7.5秒、経度方向11.25秒の1/4基準地域メッシュ（昭和48年行政管理庁告示第143号：約250m四方）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時水・吉谷地区を含む地域における各メッシュの住宅全壊率の分布³⁾を50-100mの標高とともに示す。メッシュを表示していない部分では、住宅の数が少ないか、あるいは住宅が無いため、被害率が算定されていない。また、文献2),3)では、構造種別ごとの住宅被害率が算定されていない。しかし、この地域の住宅の構造種別は、木造92%、S造5%、RC造2%、その他1%となっており³⁾、木造住宅の割合が極めて高い。このため、本論文では、文献3)の住宅被害率を、近似的に、木造住宅の被害率として用いることとする。

図1から、小千谷市では木造住宅の被害は広範囲にわたって発生したが、全壊率は、3強震観測点（K-NET, JMA, SSI）が位置する中心市街地よりも、西および南西側の時水・吉谷地区において高くなる傾向が認められる。図2(a), (b)に、吉谷地区と中心市街地を南南西-北北東に縦断するA-A'ライン（図1）に沿うメッシュの住宅の課税台帳に基づく建設年³⁾および悉皆調査から得られた被害率（全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊）³⁾の分布を示す。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被害率（▽印）も同ラインに投影して示している。図2(b)から、中心市街地（C1, C3およびJMA地点周辺）では、半壊以上の被害率は2-3割程度以下であり、全壊被害は殆ど見られない。これに対して、時水・吉谷地区では、半壊以上の被害率は9割程度以上、全壊率は4割程度以上となっている。ここで、住宅の建設年（図2(a)）と被害率（図2(b)）との対比から、時水・吉谷地区では、1981年または1971年以前に建てられた住宅の比率と全壊率が概ね同等の値となっており、建設年の比較的古い住宅に被害が集中した可能性が示唆される。しかし、全壊被害が殆ど見られない中心市街地（C1, C3地

点周辺）でも、1981年または1971年以前に建てられた住宅の比率は、全壊率が4割を超える時水・吉谷地区と同程度かやや小さい程度となっており、住宅の建設年の違いだけでは両地区の全壊率の違いをすべ

図1 小千谷市の中心部付近における住宅全壊率の分布³⁾と微動・地震観測点およびボーリング調査地点

図2 A-A'ラインに沿う(a)住宅建設年の分布³⁾, (b)住宅被害率の分布³⁾および(c)微動H/Vスペクトルの位置的变化

表1 地震観測点の緯度と経度（世界測地系）

Site	Latitude	Longitude
W1	N 37° 17' 22.56"	E 138° 46' 42.82"
W2	N 37° 17' 17.29"	E 138° 46' 55.78"
W3	N 37° 17' 57.81"	E 138° 46' 24.72"
C1	N 37° 18' 03.53"	E 138° 47' 10.47"
C2	N 37° 18' 17.46"	E 138° 47' 22.46"
C3	N 37° 18' 29.98"	E 138° 47' 28.37"

て説明することはできない。

なお、厚生労働省の調査結果¹¹⁾によれば、時水・吉谷地区は軟弱な地盤上にあるが、木造住宅に被害を与えた可能性のある大きな地盤変状や液状化の痕跡は報告されていない。このことから、この地域の木造住宅被害は、主として地盤震動によるものと推察される。

3. 表層地盤の S 波増幅特性と木造住宅被害率との関係

この地域の地盤の S 波速度構造および震動特性に関する先験的情報を把握するため、A-A'ライン上の 24 地点 (図 1: ○印) において、微動の移動 1 点観測を行った¹²⁾。観測では、固有周期 2 秒の 3 成分速度計を用い、サンプリング周波数を 100 ないし 200Hz とした。また、木造住宅被害率の異なる W1-W3, C1-C3 地点 (図 1: □印, 表 1) において、2005 年 11 月から 2007 年 4 月まで地震動の同時観測を行った¹²⁾。観測で用いた地震計は (株) 東京測振の CV910、サンプリング周波数は 100Hz である。詳細は既報¹²⁾を参照されたい。

観測された 3 成分微動データに対し、時松・新井¹³⁾と同様の方法で H/V スペクトル^{13), 14)}を求め、その A-A' ラインに沿う位置的变化を図 2(c) に濃淡で示す。図 2(b) との比較から、全壊被害の少ない C1 および K-NET 地点より東側では、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。一方、全壊率の高い時水・吉谷地区では、周期 0.3-0.5 秒程度に明瞭なピークが認められる。以上のように、スペクトルピーク周期の長短と木造住宅被害率の高低との間にはある程度の対応関係が認められる。しかし、C2 地点では、住宅全壊率が低いにもかかわらず、スペクトルピーク周期が 0.4-0.5 秒程度にあるなど、両者の対応関係は一意ではない。

既往の研究から、K-NET および JMA 地点の微動 H/V スペクトルのピークは、各地点の深度 3m 程度までの軟弱層 (S 波速度 50-100m/s 程度) とそれ以深の砂礫層 (S 波速度 350-400m/s 程度、いわゆる工学的基盤) との S 波速度コントラストを反映していることが指摘されている^{9), 15)}。このようなコントラストを持つ地盤では、レイリー波の特性を反映した微動 H/V スペクトルのピーク周期が地盤の S 波増幅特性の 1 次固有周期 (以下、線形時固有周期) と対応する場合が多い¹⁶⁾。したがって、この地域で微動 H/V スペクトルに明瞭なピークが見られる場合、そのピーク周期は工学的基盤以浅の地盤の線形時固有周期に近い可能性が高い。一方、C1 地点のように、顕著なスペクトルピークが見られない場合、工学的基盤がほぼ露頭していると考えられる¹⁶⁾。一方、ある程度近傍かつ深発の微小地震を対象とすれば、K-NET, JMA, SSI のうち任意の 2 地点の水平動の振幅比スペクトルは、各地点の工学的基盤以浅の地盤の S 波増幅特性のそれに対応している^{9), 10), 15)}。

以上の考察から、同様の微小地震において、この地域の任意地点の C1 地点に対する水平動振幅比スペクトルは、その地点の工学的基盤以浅の地盤の S 波増幅特性を近似している可能性が高い。そこで、W1-W3, C1-C3 および K-NET 地点で同時記録された 8 個の微小地震 (気象庁マグニチュード 3-5 程度、震央距離 30km 未満、震源深さ 8km 以上) の水平動記録 (直交 2 成分) を用いて、各地点の C1 地点に対するフーリエ振幅比スペクトルを求め、図 3 に灰細線で示す。図では、観測データの S/N 比が 10 以上となる周期帯 (0.07-2 秒) のみを示している。図から、得られた水平動振幅比スペクトルは、地震により若干変動があるものの概ね安定した周期特性を示し、その 1 次ピーク周期は各地点の線形時固有周期 (微動 H/V スペクトルのピーク周期、図

2(c)) とほぼ対応している。したがって、図 3 の水平動振幅比スペクトルは各地点の表層地盤の S 波増幅特性を近似していると考えられる。なお、住宅全壊率の異なる W1-W3 地点と C2 地点の水平動振幅比スペクトルは、いずれも周期 0.3-2 秒の範囲で、そのピーク周期を含めて、概ね同様の傾向を示していることから、これらの地点の表層地盤の S 波増幅特性に大きな違いは無いものと推察される。

4. ボーリング調査および微動アレイ探査に基づく地盤構造

3 章の検討から、時水・吉谷地区 (W1-W3) と C2 地点の微動 H/V スペクトルおよび表層地盤の S 波増幅特性に大きな差異は認められないが、W1-W3 地点の住宅全壊率は C2 地点のそれに比べて極めて高いことが確認された。この原因を検討するため、本章では、W1, W3, C2 地点でボーリング調査を、W1-W3, C1-C3 地点で微動アレイ探査を行い、各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。

4.1 ボーリングに基づく土質調査

ボーリング調査は、W1, C2 地点では 2006 年 9 月、W3 地点では 2007 年 2 月に実施した。掘削深度は N 値 50 以上の礫層が数 m 現れるまで (W1 地点で 20m, W3 地点で 22m, C2 地点で 7m) とし、深度 1m ごと

図 3 微小地震の水平動および表層地盤の S 波増幅特性の C1 地点に対する振幅比スペクトル

に標準貫入試験（自動落打法）を行い、採取された土試料に対して粒度試験など各種土質試験を行った。

調査から得られた W1, W3, C2 地点の N 値および土質の深さ方向分布を図 4(a), (c), (d)に, (b) W2, (e) K-NET, (f) JMA 地点の調査結果⁸⁾とともに示す。図から, C2 地点では K-NET 地点と同様に N 値 10 未満の有機質土を含む軟弱な層が 5m 程度, W1-W3 地点（時水・吉谷地区）では N 値 50 未満のシルト質粘土・シルト・砂からなる層が 15-20m 程度以上, 硬質な砂礫層（N 値 50 以上）の上に堆積しており, 時水・吉谷地区と C2 地点の表層地盤の構造および土質は大きく異なっていることが確認される。

4.2 微動アレイ観測に基づく S 波速度構造探索

W1-W3, C1-C3 地点の微動のアレイ観測は, 2006 年 5 月の日中に行った。アレイの形状は直線（センサ間隔: 0.5, 1, 2m）および中心 1 点を持つ五角形（等価半径: 全地点で 5, 10, 20m, W1-W3 地点ではさらに

40m）とした。各アレイともセンサには固有周期 1 秒の 3 成分速度計 6 台を用い, センサ間隔あるいは等価半径を変えながら, アレイごとに微動を同時観測した。観測波形は増幅後, サンプル周波数 100-1000Hz で A/D 変換（24bit）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 2048 ないし 4096 ポイントのデータを 10-30 セット程度作成して, 以後の解析に用いた。

各地点で得られた鉛直動データセットに対して, F-k スペクトル解析^{16), 17)}を行い, 周期一位相速度の関係（分散曲線）を求めた（図 5）。また, 各地点の最大アレイの中心で得られた 3 成分データセットに対して, 3 章と同じ方法で H/V スペクトルを求めた（図 6）。各地点で得られた分散曲線および H/V スペクトルが, それぞれレイリー波および表面波（レイリー波とラブ波）によるものと考え^{13), 16), 18), 19)}, 高次モードの影響を考慮した同時逆解析²⁰⁾を行った。この際, 各地点の地盤構造は, 地表から深度 20-30m までは, 図 4 を参考に 3-5 層にモデル化

図4 W1, W2, W3, C2, K-NET⁸⁾, JMA⁸⁾地点のボーリング調査結果

図5 微動の鉛直成分およびレイリー波の分散曲線

図6 微動および表面波の H/V スペクトル

した。また、各層の密度とP波速度はS波速度の関数と仮定し、層厚とS波速度を逆解析パラメータとした。なお、H/Vスペクトルピークの理論値を求めるために必要となる深度20-30m以深の地盤構造は、近傍の微動アレイ探査結果²¹⁾を参考に、表2のようにモデル化した。

逆解析から推定されたW1-W3, C1-C3地点の表層地盤のS波速度構造を図7に示す。図には、別途行ったK-NET, JMA地点の微動アレイ探査結果¹⁵⁾も示す。ここで、図5,6の実線は、各地点の推定地盤構造に対応するレイリー波の理論分散曲線¹⁶⁾および表面波の理論H/Vスペクトル¹³⁾である。また、図3の黒太線は、各地点の推定地盤構造から重複反射理論²²⁾(減衰定数2%)により求めたS波増幅特性のC1地点に対する振幅比スペクトルである。図3,5,6から、推定地盤構造から算定した理論値は、微動観測データ、地震観測データの傾向を概ね説明しており、推定されたS波速度構造(図7)の妥当性が示唆される。

図7から、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程度以上の工学的基盤とそれよりも浅い層とのコントラストが明瞭である。図7と図4との比較から、S波速度400m/s程度以上の工学的基盤はN値50以上の砂礫層に対応しており、その上面深度は、時水・吉谷地区(W1-W3地点)とC2地点とでは大きく異なっていることが確認される。さらに、C2地点の表層の極めて低いS波速度(50m/s)層は高有機質土であることが分かる。

5. 地震応答解析に基づく本震地震動の推定

4章の検討から、時水・吉谷地区(W1-W3地点)とC2地点の表層地盤構造(土質およびS波速度構造)は大きく異なっていることが確認された。とくに、C2およびK-NET地点の高有機質土は、W1-W3地点の砂やシルトなど他の土質に比べて、S波速度は低い、非線形性が極めて弱い(図8)⁹⁾。このことから、小千谷市の中心市街地では、時水・吉谷地区に比べて、強震時でも表層地盤の固有周期が伸びにくく、木造住宅の被害に大きな影響を与える周期1-2秒程度の地震動増幅が小さかったため、両地区の住宅全壊率に大きな差異が生じた可能性が考えられる。

そこで、W1-W3, C1-C3, K-NET, JMA地点のS波速度400m/s程度以下の表層地盤(図7のく印以浅)を対象に、工学的基盤露頭波と考えられるSSI地点の本震記録^{9), 9), 10)}(ほぼ主軸方向のEW成分)を入力として、1次元有効応力解析を行い、各地点の本震地震動を推定した。対象地盤の多質点系モデルへの置換は、S波に対して10Hz以下の周波数成分を表現できるよう行い、モデルの底面は粘性境界²³⁾とした。地盤の土質は、W1, W2, W3, C2, K-NET, JMA地点ではボーリング調査結果(図4)を、ボーリング資料の無いC1, C3地点では比較的近傍のボーリング資料等を参考に、図7に示すとおりとした。解析は非排水条件とし、土のせん断応力-ひずみ関係には修正Ramberg-Osgood(R-O)モデル²⁴⁾、せん断に伴う過剰間隙水圧の変化を規定する関係式はおわんモデル²⁵⁾を用いた。この際、修正R-Oモデルの規準ひずみと最大減衰定数は、高有機質土層ではK-NET地点の室内試験結果(図8)⁹⁾を、粘性土・シルト・砂・砂礫層では文献26)を参考に、拘束圧を考慮して設定した。図8の実線・破線・点線は、各土質に対して設定したせん断剛性比と減衰定数のひずみ依存性(拘束圧98kPa)である。おわんモデルのパラメータは、K-NET, JMA地点については室内試験結果⁹⁾の水圧変動を再現できるように設定したものを用い、W1-W3, C1-C3地点のシルト層についてはJMA地点と同じものを、砂礫層については文献27)の値を用いた。また、W1-W3地点の砂質土層については、各層の拘束圧で規準化したS波速度の値が210m/s程度を超え、高い液状化強度を有すると考えられたため、文献28)を参考に、規準化したS波速度が210m/s(適用限界)のときの液状化強度(応力比1.0で10回載荷したとき両振幅軸ひずみが5%)と同等となるよう設定した。解析は時刻歴で行い、減衰は初期剛性比例型(1次固有モードの減衰定数0.1%)とし、

図7 表層地盤の推定S波速度構造および土質

図8 有効応力解析に用いた土のせん断剛性比と減衰定数のひずみ依存性およびK-NET地点の室内試験結果⁹⁾

表2 仮定した深部地盤構造

Depth (m)	ρ (Mg/m ³)	V_P (m/s)	V_S (m/s)
- 50	2.0	1500 - 1600	330 - 470
50 - 300	2.0	1800 - 2300	550 - 900
300 - 950	2.1	2700	1200
950 - 2800	2.1	3100	1500
2800 - 6000	2.1	4000	2200
6000 -	2.3	6000	3400

数値積分には Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$, 時間間隔 1/1000 秒) を用いた。

図 9, 10 に, 解析から得られた推定地表地震動の加速度時刻歴 (JMA, K-NET, C2, C1, W1 地点) および加速度応答スペクトル (K-NET, JMA 地点: 減衰定数 5%) を, それぞれ実線で示す。図 9, 10 の破線は, K-NET, JMA 地点の本震記録^{4), 5)} (EW 成分) の加速度時刻歴および加速度応答スペクトル (減衰定数 5%) である。図 9, 10 から, K-NET, JMA 地点とも, 推定結果は観測結果の振幅および位相・周期特性を概ね再現できており, 解析結果の妥当性が示唆される。また, 図 9 から, 推定地表地震動の振幅および位相特性は, 地点ごとに大きく異なっていることが確認される。

図 11 に, 解析から得られた W1, W2, C1, C2 地点の表層地盤の非線形震動増幅特性 (推定地表波と入力波のフーリエ振幅比スペクトル) を実線で示す。図の破線は, 4.2 節で算定した各地点の表層地盤の S 波 (線形震動) 増幅特性である。W1, W2, C2 地点の表層地盤の S 波増幅特性 (図 11 破線) は, 各地点の C1 地点に対する水平動振幅比スペクトル (図 3) と概ね対応しており, 3 章の議論の妥当性が再確認される。

図 11 から, 工学的基盤がほぼ露頭している C1 地点では, 線形・非線形時とも, 大きな震動増幅は認められない。一方, W1, W2, C2 地点では, 比較的大きな震動増幅が認められ, そのピークとなる 1 次周期 (固有周期) は, 線形時には, 各地点とも 0.4-0.5 秒程度であるが, 非線形 (本震) 時には, C2 地点では 0.8 秒程度に伸び, W1, W2 地点では, さらに長周期化して 1-2 秒程度となっている。ここで, 解析から得られた表層地盤の等価せん断ひずみは, C1, C2 地点でそれぞれ 0.4, 5% 程度, それ以外の地点では 1-2% 程度となっている。このひずみレベルでは, 図 8 から, 高有機質土を多く含む C2 および K-NET 地点に比べて, 砂やシルトを多く含む W1-W3 地

点の方が, 地盤のせん断剛性が低下しやすく, 固有周期が伸びやすい。したがって, 図 11 の固有周期の伸びの違いは, 各地点の表層地盤の非線形性の違いに起因すると考えられる。

図 12 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^{4), 5)} の加速度応答スペクトル (減衰定数 5%, EW 成分) を実線・破線・点線で示す。図上部の▼印は, 各地点の表層地盤の線形時固有周期を示している。図から, 応答スペクトルの卓越周期についても, 図 11 と同様の傾向が認められる。すなわち, C1, C3 地点では周期 0.4 秒程度以下の短周期成分が卓越しているが, C2 および K-NET 地点ではそれぞれ 0.8, 0.7 秒程度, W1-W3 地点では 1-2 秒程度の成分が卓越している。

図 10 K-NET, JMA 地点の推定された本震地震動および本震記録^{4), 5)}の加速度応答スペクトル (EW 成分)

図 9 推定された本震地震動および本震記録^{4), 5)}の加速度時刻歴 (EW 成分)

図 11 推定された表層地盤の震動増幅特性

6. 地盤の固有周期の伸びが木造住宅被害に与えた影響

本章では、表層地盤の非線形震動増幅特性が木造住宅被害に与えた影響を検討するため、5章で推定した W1-W3, C1-C3 地点の本震地震動および K-NET, JMA 地点の本震記録の加速度応答スペクトル (図 12) から、林²⁹⁾の提案する性能等価加速度応答スペクトルに基づき、各地点の木造住宅の最大応答変形角 R_{max} を推定する。

木造住宅の性能等価加速度応答スペクトルは、住宅を基礎固定の等価 1 質点系モデルに置換し、その復元力特性を降伏変形角 $1/100$ のバイリニア型と仮定して、与えられた変形角 R を住宅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²⁹⁾。したがって、木造住宅の等価高さ H_e を仮定すれば、性能等価加速度応答スペクトルは、降伏せん断力係数 (以下、等価耐力) C_{ye} ごとに、変形角 R に対応する固有周期-加速度応答平面上の曲線で表される (図 12)。なお、図の曲線は、 $1/R$ が 5-100 までの範囲を示している。この曲線と地震動の加速度応答スペクトルとの交点から、木造住宅の最大応答変形角 R_{max} および最大応答に最も寄与する地震動の周期成分が推定される²⁹⁾。

現時点では、小千谷で被災した木造住宅の高さや耐力に関する情報は少ないが、2000 年鳥取県西部地震や 2003 年宮城県北部の地震で被災した木造住宅の詳細構造調査に基づく耐震診断結果^{30), 31)}、同様の木造住宅の調査結果および載荷試験結果など³²⁻³⁶⁾から、多くの場合、2 階建て木造住宅の等価高さは 4-5m 程度、等価耐力は 0.2-0.6 程度を中心に分布していると推察される。そこで、標準的な 2 階建て木造住宅を想定し、等価高さ $H_e = 4.5m$ ^{29), 36)}、等価耐力 $C_{ye} = 0.2, 0.4, 0.6$ ^{33), 36)}を持つ木造住宅の性能等価加速度応答スペクトルを求め、これを図 12 に○付き細線で示す。また、図 12 から、各地点における想定木造住宅の最大応答変形角 R_{max} を等価耐力 C_{ye} ごとに求め、その分布を図 13 に示す。

図 13 から、推定された R_{max} の値は、 $C_{ye} = 0.6$ の場合、0.035-0.065 程度の範囲にあり、W2 地点で最大、C1, C3 地点で最小となるが、地区ごとの差異は顕著ではない。しかし、 $C_{ye} = 0.2, 0.4$ の場合、中心市街地の C1, C3 地点で 0.035 程度、C2 および K-NET 地点で 0.040-0.065 程度であるのに対して、時水・吉谷地区 (W1-W3 地点) では 0.08-0.09 程度と大きくなっている。最大応答変形角 R_{max} が大きいほど、木造住宅に大きな損傷が生じる確率は高くなると考えられる^{35), 36)}ことから、推定された木造住宅の最大応答変形角 R_{max} の分布 (図 13) は、住宅被害率の分布 (図 2(b)) を定性的に再現していると考えられる。

図 12 から、W1-W3 地点の想定木造住宅の最大応答変形角 R_{max} が他の地点のそれよりも大きくなった原因は、W1-W3 地点での推定本震地震動の周期 1-2 秒程度の成分が他の地点のそれよりも大きかったためと考えることができる。これは、序論に述べた境⁷⁾の指摘とも調和的である。この周期 1-2 秒程度の地震動増幅の差異は、5 章の検討から、各地点の表層地盤の固有周期の伸びの違いによるものであり、したがって、各地点の木造住宅の最大応答変形角 R_{max} および被害率の差異は、表層地盤の非線形震動増幅特性の違いに大きな影響を受けているものと考えられる。参考までに、文献 33) で用いられている標準的な 2 階建て木造住宅を想定した 2 質点系モデル (基礎固定、1 階の降

図 12 W1-W3, C1-C3 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 2 階建て木造住宅を想定した性能等価加速度応答スペクトル²⁹⁾の比較

図 13 A-A'ラインに沿う想定木造住宅の最大応答変形角の分布

伏せん断力係数 = 0.2, 0.4, 0.6) に対して、各地点の推定地表地震動を入力とした時刻歴非線形応答解析を文献 33) と同等の条件下で行ったところ、想定木造住宅の最大応答変形角は、性能等価応答スペクトルによる結果 (図 13) と概ね整合した。

以上の結果は、5 章の冒頭の仮説「小千谷市の木造住宅の全壊率が中心市街地に比べて時水・吉谷地区で大きかった原因は、各地点の表層地盤の非線形性の差異による周期 1-2 秒程度の地震動増幅の大小、すなわち非線形震動増幅特性 (非線形性および S 波速度構造) の違いが強く影響したためと考えられる。」の妥当性を示している。

なお、本論文では、木造住宅の最大応答変形角 R_{max} を推定する建物解析モデルとして基礎固定の等価質点系^{29), 33)}を仮定したが、大地震時には、建物基礎に接する地盤の局所的な大変形による非線形相互作用が木造住宅の応答に影響した可能性も考えられる。また、この地域の木造住宅の耐力、変形性能、経年劣化の詳細な情報はほとんど無かったため、本論文では、他の地域における既往の研究結果²⁹⁻³⁶⁾を参照した。小千谷の木造住宅の構造的特徴を反映した等価質点系のモデル化や、その時刻歴応答と被害との関係については、今後の課題とし、別報で詳細に検討・考察する予定である。

7. 結論

2004 年新潟県中越地震時に木造住宅の被害が地区により顕著な相違の見たれた小千谷において、微動・地震観測およびボーリング調査を行い、その結果に基づく地震応答解析から、表層地盤の非線形震動増幅特性（非線形性および S 波速度構造）の差異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) 中心市街地と時水・吉谷地区では、微動の H/V スペクトルや表層地盤の S 波（線形震動）増幅特性は同様（いずれも、周期 0.4-0.5 秒程度にピークを持つ）であったが、木造住宅の被害率は前者に比べ後方で極めて大きかった。
- 2) 中心市街地で本震時の木造住宅被害率が小さかったのは、この地区の表層地盤が非線形性の弱い高有機質土などを含み、本震時の固有周期が木造住宅の被害に大きな影響を与える 1-2 秒程度まで伸びなかったためと考えられる。
- 3) 時水・吉谷地区で本震時の木造住宅被害率が大きかったのは、表層地盤の非線形化により、その固有周期が木造住宅の被害に大きな影響を与える 1-2 秒程度まで伸びたためと考えられる。

謝辞

本論文で用いた K-NET, JMA, SSI 地点の強震記録は、防災科学技術研究所、気象庁、小千谷総合病院・三菱地所設計・大成建設から提供されたものである。W2 地点のボーリング資料は小千谷市役所から提供して頂いた。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，鍋田隆：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) 境有紀，中村有紀子，大月俊典，小杉慎司：2004 年新潟県中越地震で発生した地震動と建物被害の対応性，日本建築学会構造系論文集，No. 601, pp. 69-73, 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) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 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) 新井洋，関口徹，時松孝次：2004 年新潟県中越地震後の K-NET・JMA 小千谷における表層 S 波速度の回復過程，第 12 回日本地震工学シンポジウム，pp. 1414-1417, 2006.
- 16) Tokimatsu, K.: Geotechnical Site Characterization Using Surface Waves, *Proc. IS-Tokyo '95 / 1st Intl. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, Vol. 3, pp. 1333-1368, 1997.
- 17) Capon, J.: High-Resolution Frequency-Wave Number Spectrum Analysis, *Geophysics*, Vol. 34, No. 1, pp. 21-38, 1969.
- 18) 堀家正則：微動の研究について，地震 2，第 46 巻，pp. 343-350, 1993.
- 19) Okada, H.: The Microtremors Survey Method, *Geophysical Monograph Series No. 12, Soc. Exploration Geophys. Japan*, 155pp, 2004.
- 20) Arai, H., and K. Tokimatsu: S-Wave Velocity Profiling by Joint Inversion of Microtremor Dispersion Curve and Horizontal-to-Vertical (H/V) Spectrum, *BSSA*, Vol. 95, No. 5, pp. 1766-1778, 2005.
- 21) Yamanaka, H., K. Motoki, S. Fukumoto, T. Takahashi, N. Yamada, and K. Asano: Estimation of Local Site Effects in Ojiya City Using Aftershock Records of the 2004 Mid Niigata Prefecture Earthquake and Microtremors, *Earth Planets and Space*, Vol. 57, No. 6, pp. 539-544, 2005.
- 22) Schnabel, P. B., J. Lysmer, and H. B. Seed: SHAKE – A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, *EERC Report*, No. 72-12, 1972.
- 23) Lysmer, J., and R. L. Kuhlemeyer: Finite Dynamic Model for Infinite Media, *ASCE*, EM4, pp. 859-877, 1969.
- 24) Jennings, P. C.: Periodic Response of a General Yielding Structure, *ASCE*, Vol. 90, No. EM2, pp. 131-166, 1946.
- 25) 福武毅芳，松岡元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈，土木学会論文集，第 412 号，III-12, pp. 143-151, 1989.
- 26) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，pp. 236-260, 1996.
- 27) 福武毅芳：土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液化解析に関する研究，名古屋工業大学博士論文，1997.
- 28) Tokimatsu, K., S. Tamura and S. Kuwayama: Liquefaction Potential Evaluation Based on Rayleigh Wave Investigation and Its Comparison with Field Behavior, *Proc. Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, pp. 357-364, 1991.
- 29) 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.
- 30) 須田達，森井雄史，林康裕，鈴木祥之：地震被害に基づく木造建物の限界変形性能の評価（2000 年鳥取県西部地震に基づく検討事例），日本地震工学会大会－2003 梗概集，pp. 32-33, 2003.
- 31) 清水秀丸，林康裕，鈴木祥之，斎藤幸雄，後藤正美：2003 年 7 月 26 日宮城県北部の地震による被災木造住宅の構造的特徴と耐震性能，日本建築学会構造系論文集，No. 598, pp. 43-49, 2005.
- 32) 鈴木祥之，中治弘行，岩井哲，北原昭男：在来構法木造住宅の実大水平力載荷実験，日本建築学会構造系論文集，No. 499, pp. 69-76, 1997.
- 33) 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.
- 34) 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－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.
- 35) 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.
- 36) 林康裕，更谷安紀子，森井雄史：木造住宅の経年劣化と地域地震環境を考慮した地震時損傷度予測手法，日本建築学会構造系論文集，No. 615, pp. 77-84, 2007.

(2007 年 4 月 10 日原稿受理，2007 年 6 月 22 日採用決定)