

# Epistula

えびすたら



独立行政法人 建築研究所  
Building Research Institute  
Vol.44 発行：2009.1

特集

## 木造住宅の地震被害と地盤

### 建物の地震被害と地盤の関係は？

地盤の上に建っている建物は、地震動によって損傷するリスクを常に負っています。実際、過去の震災では、埋立地や旧河道など、地盤の悪いところに建物の被害が集中して生じた例が数多く報告されています。このため、建物の地震防災を考える上で、数十メートル程度の深さまでの表層地盤が地表での地震動特性や建物被害に与える影響を適切に評価することの重要性が、古くから指摘されてきました。

表層地盤が地震動特性に与える影響は、近年の研究では、①地盤の硬軟の深さ方向や水平方向の空間的な変化(S波速度構造)による増幅効果と、②土のせん断応力-ひずみ関係の非線形性状の2つの要因に概ね支配されることが分かってきました(図1)。しかし、これらの要因が、建物の被災メカニズムとどのような関わりがあるのでしょうか？

現時点では、被害の生じる場所で必ずしも地震記録が得られない場合も多く、また、地盤・地震動特性と建物被害の関係について、定量的な検討事例の蓄積が少ないため、よく分からない部分も未だ多く残されています。とくに、近年の大地震では、国民の大多数が居住している木造住宅に大きな被害が生じており、今後、木造住宅の耐震設計も性能規定型仕様に向かうことを考えると、この問題は喫緊の課題と言えます。

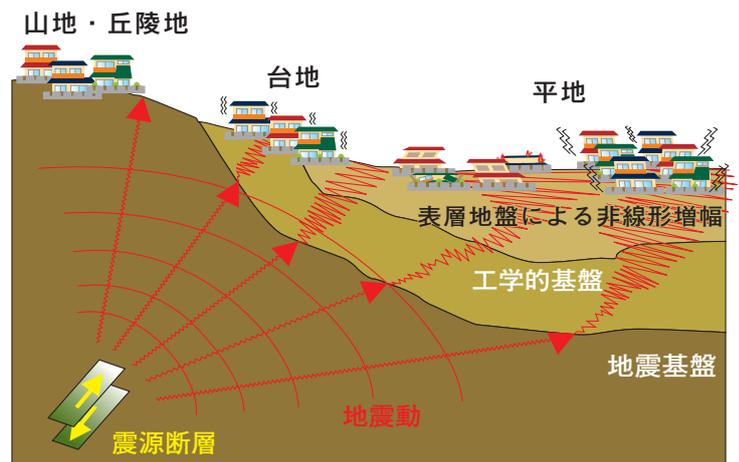


図1 地盤構造と土の非線形性によって地震動や建物被害は全く異なる

今回のえびすたらでは、地盤・地震動特性が木造住宅被害に与える影響を解明するためのアプローチの一つとして、近年の大地震における木造住宅被害の特徴をまとめるとともに、2004年新潟県中越地震における小千谷市の木造住宅被害を対象に行われた研究事例<sup>1)</sup>を紹介し

### 近年の大地震における木造住宅被害の特徴

2004年新潟県中越地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震など、近年の大地震で被災した建物に対して、様々な調査が行われています。その結果、木造住宅については、店舗併用で道路に面して大きな開口を有するもの、土塗壁を用いて屋根が重く建設年代が古いものなどで、大破や倒壊の大きな被害につながるケースが目立ちました。また、揺れが小さい場所では、住宅に付属する納屋、車庫、作業所など比較的小規模で耐震的配慮が不十分と思われる建物に被害が集まる傾向があります。写真1、2は、いずれも2004年新潟県中越地震の被害で、写真1は小千谷市で被害が集中した地域の状況、写真2は川口町の店舗併用

住宅の被災例です。地震被害の程度は、それぞれの建物の耐震性能と、その場所での地震動特性の両方によって決まると言えます。



写真1 被害集中地域の状況(小千谷市)



写真2 店舗併用住宅の被害例(川口町)

# 地盤による揺れの違いを考慮した 建物の地震防災に向けて

建物は、それ自体の特性だけでなく、建てられている地盤との組み合わせによって、地震時の揺れ方や被害の様子が大きく異なります。建物にとって、地震時に注意しなければいけない地盤とは、どのような地盤でしょうか？ 建築研究所では、地震防災研究の一環として、地盤・地震動特性が建物被害に与える影響のメカニズムを解明する研究を行っています。

## 小千谷市の木造住宅被害の分布

図2は、小千谷市が実施した被害調査結果に基づいて、住宅の全壊率の分布を示しています。小千谷市では、木造住宅の被害が広範囲にわたって発生しましたが、その被害率は、中心市街地よりも、西および南西側の時水・吉谷地区で高くなっています。また、図3は、吉谷地区と中心市街地を縦断するA-A'ライン(図2)に沿う住宅の建設年と被害率(全壊、大規模半壊、半壊、一部損壊)の分布を比較して示しています。中心市街地(C1-C3、K、J地点付近)では、半壊以上の被害率は2-3割程度以下、全壊被害はほとんど見られません。一方、時水・吉谷地区(W1-W3地点付近)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ます。ここで、住宅の建設年と被害率の対比から、時水・吉谷地区(W1-W3地点付近)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ほぼ同じ値となっており、建設年の比較的古い住宅に被害が集中した可能性が考えられます。しかし、全壊被害がほとんど見られない中心市街地(C1-C3、K、J地点付近)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(W1-W3地点付近)と同程度かやや小さい程度で、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て説明することができません。

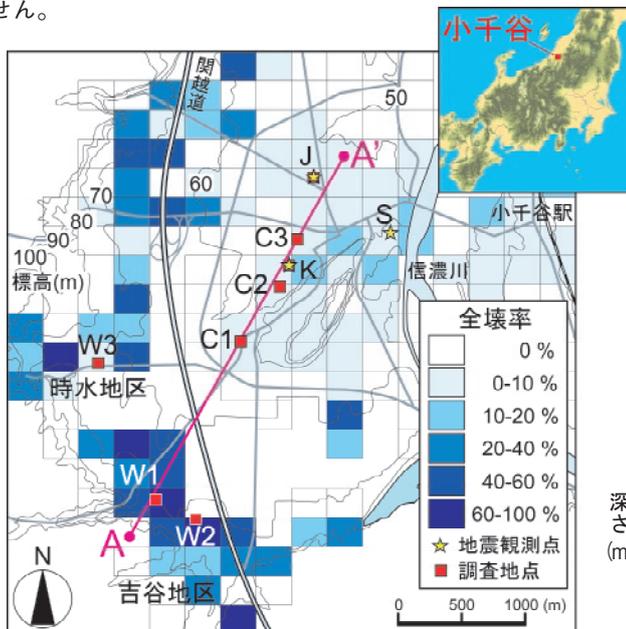


図2 小千谷における住宅全壊率の分布と地盤調査地点 (W1-W3、C1-C3、K、J)

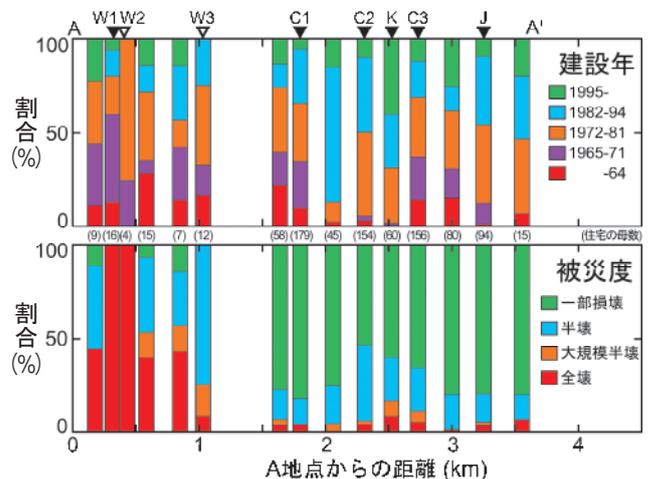


図3 図2のA-A'ラインに沿う(上)住宅建設年と(下)住宅被害率の分布

## 地盤による地震動特性の違い

では、このような住宅被害率の違いが、一体何によって生じたのでしょうか？ その原因を検討するため、吉谷・時水地区の3地点(W1-W3)と中心市街地の5地点(C1-C3、K、J：図2)で地盤調査を行いました。調査から得られた各地点の表層地盤構造(土質とS波速度構造)を図4に示します。図から、この地域では、S波速度400m/s程度以上の工学的基盤(一般的な建物の支持層)は砂礫層に対応していること、工学的基盤とそれよりも浅い層とのS波速度コントラストが明瞭な場合の多いことがわかります。また、中心市街地(C2、K地点)では高有機質土(ピート)を含む軟弱な層が5m程度、時水・吉谷地区(W1-W3地点)ではシルトや砂からなる層が15-20m程度以上、硬質な砂礫層の上に堆積しており、時水・吉谷地区と中心市街地とでは表層地盤が大きく異なっていることがわかります。

続いて、工学的基盤(砂礫層)が地表にほぼ露出しているS地点(図2)の本震記録とW1-W3、C1-C3、K、J各地点の地盤調査

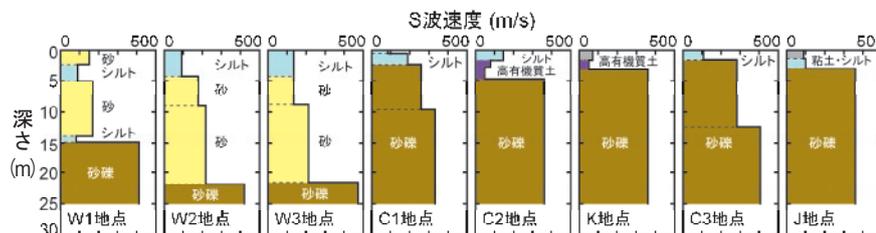


図4 地盤調査結果(土質とS波速度構造の場所による違い)

### コラム

#### 地盤のS波速度構造

地震波の一種であるS波(横揺れの波)が地盤内を伝わる速さは、地層によって異なり、これが地盤内どのように分布しているかを示したものです。S波速度が大きいほど、その地層が硬く、揺れにくいことを意味する。

#### 建物の降伏ベースシヤ係数

地震動の作用によって、建物が弾性的性質を失う(降伏する)時点における、建物に生じるせん断力の総和を建物の総重量で割った値。この値が大きいほど、建物の強度が高く、大きな外力に耐えられることを意味する。

結果を用いて、数値シミュレーションにより、本震地震動(東西方向)を推定しました。図5は、シミュレーションから得られた代表地点の推定地震動(加速度の時刻歴)を、図6は、W1-W3、C1-C3、K、J各地点で推定地震動の強さが最大となる周期(卓越周期：▼印)の分布を、それぞれ示しています。図6には、比較のため、各地点で平時または微小地震時に地盤の揺れの強さが最大となる周期(地盤の初期固有周期：●印)の分布も示しています。図6から、地盤の初期固有周期(●印)は、どの地点も0.2-0.5秒程度となっています。一方、推定された本震地震動の卓越周期(▼印)は、C1、C3、J地点では0.4-0.5秒程度、C2地点やK地点では0.7-0.8秒程度、W1-W3地点では、さらに長くなって、1-2秒程度となっていて、地点ごとに大きく異なっています。これは、地盤の固有周期は、強震時には土の非線形性によって長くなりますが、その程度が土の種類によって異なることが原因です。具体的には、高有機質土(PEAT)を多く含むC2地点やK地点に比べて、砂やシルトを多く含むW1-W3地点の方が、強震時に地盤が軟らかくなりやすいため、中心市街地に比べて、時水・吉谷地区の方が、地盤の固有周期が長くなりやすく、地震動の卓越周期にも、その影響が強く現れたのです。

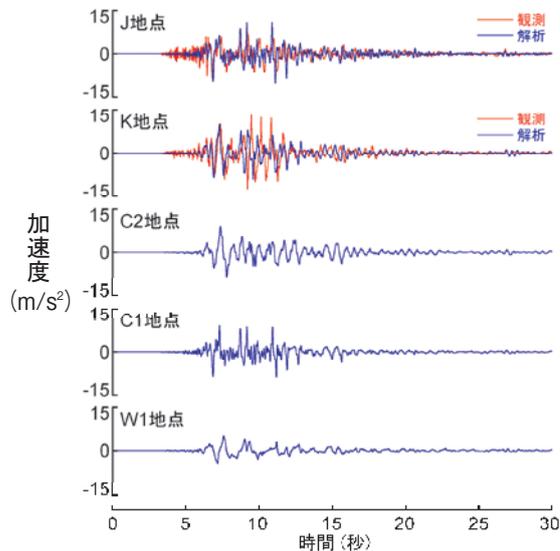


図5 地震動の場所による違い(加速度の時刻歴)

## 地盤による木造住宅被害の違い

さらに、各地点で推定された本震地震動と木造住宅の簡易解析モデル<sup>2)</sup>を用いて、数値シミュレーションにより、木造住宅の最大変形角(傾き)を推定しました。木造住宅の簡易解析モデルは、今のところ、小千谷の木造住宅の耐震性能に関するデータが少ないため、標準的な2階建てを想定し、強度が低・中・高の3種類(降伏ベースシヤ係数 $C_v = 0.2, 0.4, 0.6$ )の耐震性能を仮定しました。図7は、W1-W3、C1-C3、K、J各地点で推定された木造住宅の最大変形角(傾き)の分布を示しています。建物の最大変形角(傾き)が大きいほど、被害が大きいことを意味します。推定された木造住宅の最大変形角(傾き)は、住宅の強度が高い( $C_v = 0.6$ )場合、地区による違いはあまり見られませんが、それ以外( $C_v = 0.2, 0.4$ )の場合、中心市街地(C1-C3、K、J地点)に比べて、時水・吉谷地区(W1-W3地点)では1/10程度の大きな値となっていて、住宅被害率の分布(図3)を概ね説明することができます。この結果は、より精緻な木造住宅の解析モデルを用いて数値シミュレーションを行った場合でも、大きく変わりません。

図6、7の比較から、W1-W3地点の木造住宅の最大変形角(傾き)が他の地点よりも大きくなった原因は、W1-W3地点での推定地震動の卓越周期が他の地点よりも長く(1-2秒程度)になったためと考えることができます。これは、前述のとおり、各地点の表層地盤の固有周期の伸び方の違いによるものです。したがって、各地点の木造住宅被害の大小は、強震時に地盤の固有周期が1-2秒程度まで伸びるかどうかにより大きく左右されると言えます。

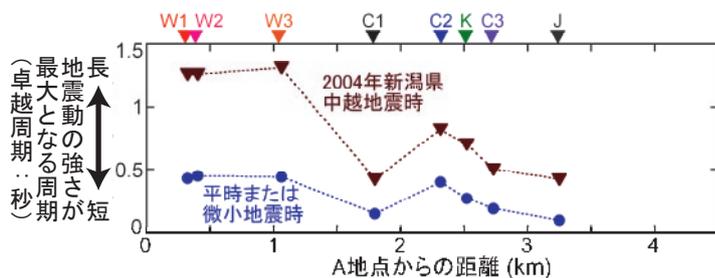


図6 地震動の強さが最大となる周期(卓越周期)の場所による違い(A-A'ラインに沿う分布)：平時(または微小地震時)と強震時では、様子が全く異なっている。これは、強震時の地盤の固有周期の伸び方が土の種類(非線形性)によって大きく異なるためである。

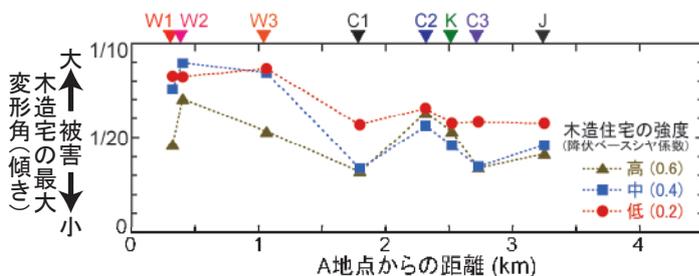


図7 木造住宅の最大変形角(傾き)の場所による違い(A-A'ラインに沿う分布)：変形角(傾き)が大きいほど被害が大きく、住宅の被害率分布(図3)の傾向を概ね説明している。また、図6との比較から、地盤の固有周期の伸び方が木造住宅被害の大小を左右していると言える。

## 木造住宅にとって地震時に注意しなければいけない地盤とは？

同様の検討は、2007年能登半島地震における門前町の木造住宅被害についても行われています<sup>3)</sup>。これらの結果を総合すると、今のところ、木造住宅にとって、地震時に大きな被害が生じる可能性の高い、注意しなければいけない地盤は、“初期固有周期0.5-0.7秒程度の砂質地盤または1秒程度の粘性土地盤”と言えます。

盤”と言えます。逆に、これらの値よりも初期固有周期の短い地盤では、大地震時でも、地盤の固有周期が木造住宅に大きな変形(傾き)を生じさせる1-2秒程度まで伸びないため、大きな被害にはつながりにくいと言えます。

しかし、冒頭にも述べましたが、このような検討事例は、蓄積が未だ少ないのが現状です。建築研究所では、今後も、実際の被害データと地盤調査結果に基づく検討を積み重ね、地盤・地震動特性が建物被害に与える影響のメカニズムを解明するための研究を進めていきます。(H.A.)

### 【参考文献】

- 1) 時松孝次, 新井洋, 関口徹: 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, 日本建築学会構造系論文集, No.620, pp.35-42, 2007.
- 2) 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.
- 3) 新井洋, 森井雄史, 山田真澄, 清水秀丸, 林康裕: 2007年能登半島地震の震源域における最大地動速度の評価と木造住宅被害の要因分析, 日本建築学会構造系論文集, Vol.73, No.624, pp.227-234, 2008.

## 建築生産研究グループ

建築生産研究グループでは、企画・設計から施工、維持管理、再生まで、建物が「生まれ」「育ち」「役割を終え」「生まれ変わる」までを、時間の観点を含め研究しています。現在、グループ長以下6名の研究者がいますが、その対象も様々で「建築生産におけるマネジメント技術」や「劣化診断や補修技術」「ユニバーサルデザイン」「リサイクル」の研究など、「建築生産研究グループ」は「ミニ建研」と言われるほど多岐に渡ります。一方で、最近面白いことに気づきました。全くの偶然ですが、メンバー3名が「落ちる」をキーワードに研究をしているのです。

写真3は、近年脱落事故が報告されている天井を対象とした振動実験の様子で、平面規模で約6m×18mの試験体を揺すったものです。このような実験結果を基に、天井が脱落して人身に危害を及ぼすことのないような対策が望まれています。

写真4は、階段の転落防止を目的とし、手すりの高さを身長との関係から検討しているものです。あまり知られていませんが、転落による死亡事故は年間約600人と思いのほか多いため、データの充実が望まれます。

写真5は、外壁タイルが剥がれ落ちた様子です。長い供用期間には診断し適切にメンテナンスを行わなければ、写真のような「剥落」という現象が起こり得ます。とは言え原因は様々で、事故を未然に防ぐために個々の対策が必要です。

「落ちる」という言葉一つとっても、対象・方法が多岐に渡るのが、やはり建築生産研究グループのようです。



写真3 天井の脱落に関する実験



写真4 被験者を用いた手すり高さの実験



写真5 外壁タイルの剥落の様子

## 編集後記

昔から家を建てるときは良い地盤を選ぶように言われてきました。家が傾くとか車の振動で揺れるという問題の他に、地震時の揺れ方があります。実際、震災調査では、田圃の埋立地だけ周りに比べて被害が大きいという例もたびたび目にしています。

今回ご紹介したのは、さらに深い所までの地下の状態を考慮して地面の揺れ方を推定し、これによって木造住宅の被害の全体像を説明できそうだという研究成果です。

木造住宅の耐震性については明治24年の濃尾地震以来、長い研究の歴史があり

ます。基準も整備され、現行規定を守って建てた普通の木造住宅なら、兵庫県南部地震くらいの地震でも倒壊を免れていると言われています。まだまだ研究の余地はありますが、ここまで耐震設計が可能になったのは20世紀の研究成果と言って良いでしょう。

今後、さらに精度の高い耐震設計を目指すならば、今回ご紹介したような、その地盤でどのような揺れ方が起こり易いかという検討も重要になりそうです。2～30年後の木造住宅の設計には、こうした考え方が普通に用いられているかもしれません。

(N.K.)

## 建築研究所講演会のご案内

建築研究所では、研究成果や調査報告を通して、最新の技術情報を広く一般の方々に提供することを目的に、毎年3月に講演会を開催しています。

今回の「平成20年度建築研究所講演会」では、建築・住宅に関連した関心の高いテーマを2部構成とし、午前の第一部を「安全・安心な住宅・建築・都市の構築に向けて」、午後の第二部を「建築分野における低炭素社会づくりに向け」として、発表を行います。特に研究発表については、この3年間を研究期間として取り組んできたものの中から厳選し、いち早くその成果を皆様にご報告します。

入場は無料、事前登録は不要、参加者には講演内容をまとめたテキストを無料配付いたします。また、講演会は(社)日本建築士会連合会の建築士会継続能力開発(CPD)プログラムにも認定されており(午前3単位：午後3単位)ので、多数のご来場を心よりお待ちしております。

### 開催概要

日時 平成21年3月6日(金)  
10:00～16:30(開場9:40)  
会場 有楽町朝日ホール  
(東京・有楽町マリオン11階)  
テーマ 第一部 安全・安心な住宅・建築・都市の構築に向けて  
第二部 建築分野の低炭素社会づくりに向け  
特別講演 妹島和世氏  
(建築家・慶應義塾大学教授)



Epistula  
えびすたら



第44号 平成21年1月発行  
編集：えびすたら編集委員会  
発行：独立行政法人 建築研究所

〒305-0802 茨城県つくば市立原1  
Tel. 029-864-2151 Fax. 029-879-0627

●えびすたらに関するご意見、ご感想は  
epistula@kenken.go.jp までお願いいたします。  
また、バックナンバーは、ホームページでご覧になれます。  
(<http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/publications/epistula.html>)