

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月21日現在

機関番号：32689

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21510198

研究課題名（和文） 微動測定に基づく市街地での地震被害率推定法に関する研究

研究課題名（英文） A study on earthquake damage evaluation method in provincial town based on micro-tremor measurements

研究代表者

前田 寿朗（MAEDA TOSHIRO）

早稲田大学・理工学術院・教授

研究者番号：80329086

研究成果の概要（和文）：近年の M7 クラスの中規模地震において、木造建物の被害集中域が見られる場合が多い。被害分析に必要な地盤調査結果は、多くの被害地域で経済的活動度が低いためきわめて限られている。そこで、微動測定を用いて表層地盤構造を簡易に推定し、地震観測記録より地盤非線形特性を推定し、基盤で推定した入射波を用いた計算により地震動の集中を評価する手法を条件の大きく異なる2地点に適用し、手法の一般性を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Damage concentration of wooden structures exerted by middle class earthquakes has been observed. Most of damaged areas are rural and detailed soil structure, which is inevitable for analyses, can be hardly obtainable. Combination of subsurface structure evaluated by micro-tremor, soil non-linearity estimated by recorded ground motion, and computation with evaluated bedrock motion can explain concentration of earthquake ground motion. By applying this method to Anamizu town and Sakae village, which have little in common in terms of geography and data resources, generality of this method was revealed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	400,000	120,000	520,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,900,000	1,170,000	5,070,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：自然災害予測・分析・対策

1. 研究開始当初の背景

2004年新潟県中越地震における小千谷市、川口町、十日町市、2007年能登半島地震における門前町、穴水町、2007年新潟県中越沖地震における柏崎市のようにマグニチュード7クラスの地震による被害が中部日本海側に連続して発生した。地震被害の特徴として、せまい範囲での木造住宅の集中的な被

害が認められ、その要因として表層地盤構造の影響が考えられた。しかしながら、これらの地域は必ずしも経済的活動度が高くなく、そのため既存の地盤調査結果がきわめて少ないため地盤構造の推定が困難である。

地震被害に及ぼす地震動の影響を検討する上で、地表付近の表層地盤構造が最も重要であり、かつ比較的容易に調査ができる領域

でもある。近年においては外部震源の不要な微動測定を用いて表面波速度および表面波粒子軌跡の振動数特性のシミュレーションにより表層地盤構造を推定することが実用化されつつある。地盤調査結果のきわめて少ない地域においても高密度の微動測定を行うことによって、地震被害集中を引き起こす表層地盤構造の評価が可能であると考え、その実用化によって地震発生時の被害状況の推定が可能となり、被災時の迅速な救援活動に役立てることができると考えられた。

2. 研究の目的

高密度の微動測定を用いて表層地盤構造の不整形性をモデル化し、地震観測記録を用いて地盤のひずみ依存性をモデル化し、市街地各地点での大地震の地表地震動ならびに地震被害率を推定する方法の開発を目的とする。これによって、微動測定を用いて市街地全域での表層地盤構造を少額の予算で推定し、市街地周辺での地震観測記録を用いて地盤の大変形に起因する非線形性を推定することにより、地震災害に対して脆弱な地域をあらかじめ特定し、被災時の迅速な救援活動に役立てることが可能となる。

3. 研究の方法

2007年能登半島地震(M6.9)において震央から20km以上に位置する穴水町では200m四方程度に集中的な被害を受け、その原因として表層地盤構造の影響が推定された。また、穴水町には防災科学技術研究所のK-NetおよびKik-Netの地震観測点があり、地震記録とともに表層地盤の速度構造が得られており、検討を行う上で恵まれた状況にある。そこで、穴水町をテストサイトとして高密度の微動測定を行い、詳細な表層地盤構造を推定する。また、地震観測記録を用いて地盤の大変形に起因する非線形性を推定する。これらより大地震時にも適用可能な表層地盤構造モデルを被害集中区域も含めて作成し、地震記録から評価した入射波を基盤に入力し、被害調査で得られた地震被害分布に対応する地震動分布が評価されることを確認する。

比較的好条件に恵まれた穴水町で本手法の適用性を確認した後、より条件の悪い地域での適用性を検討する。具体的には、2011年3月12日の長野県北部の地震(M6.7)で大被害を受けた長野県栄村を対象とする。穴水町とは異なり栄村は震源のほぼ直上に位置し、1km程度の間隔で千曲川沿いに位置する3つの集落が被害を受けた。いずれも同様な震源距離であるが集落間の被害程度にかなりの差があり、また集落内においても被害の相対的な集中が認められている。これらの集落の一つにおいて震度計を用いた地震観測が長

野県によって行われているが、観測点周辺の地盤速度構造に関する情報はない。このように、震源との位置関係および地盤形成過程、ならびに地盤情報および地震記録に関する条件のかなり異なる2地域に本手法を適用し、その一般的適用性について明らかにする。

4. 研究成果

(1) 穴水町における検討結果

① 表層地盤構造の検討

石川県穴水町の中心市街地は、震源距離約20kmとやや遠いにもかかわらず震度6強が観測され、全壊棟数72棟と石川県全域の全壊棟数の1割強をしめている。その建物被害は500m四方程度に限定的であり、その中でも200m四方の穴水駅に隣接する地区の全壊率の割合が特徴的に高い。その理由を検討するために、被害地区周辺に重点をおいた市街地一帯での微動測定を、加速度計を用いて100点程度で各15分間行った。それらよりH/Vスペクトルを計算すると、被害のほとんどない地区の卓越振動数が1Hz以下あるいは3Hz以上であることが示されると共に、全壊建物の集中した200m四方程度の地区が周囲をほぼ3Hz以上の領域で囲まれた特徴的な領域であることがわかった(図1)。

穴水町で震度6強が観測されたK-Net穴水観測点は市街地の被害のきわめて少ない地区にあり、そこでの卓越振動数は1.5Hz程度である。観測点のPS検層による地盤調査結果は公開されており、岩盤上に高有機質土主体の軟弱層が堆積し、基盤面でのコントラストの大きな比較的単純な構造である。市街地18点のボーリング調査結果を整理したところ、その基盤深度と卓越振動数には相関がある。また、PS検層に従った地盤モデルの卓越振動数も概ね微動測定結果に対応したため、PS検層結果を参考に表層Vs100m/s、基盤Vs500m/sの2層地盤モデルを設定した。レイリー波基本モード粒子軌跡の卓越振動数 f と表層厚 H の関係を求めると $f=24/H$ となり、

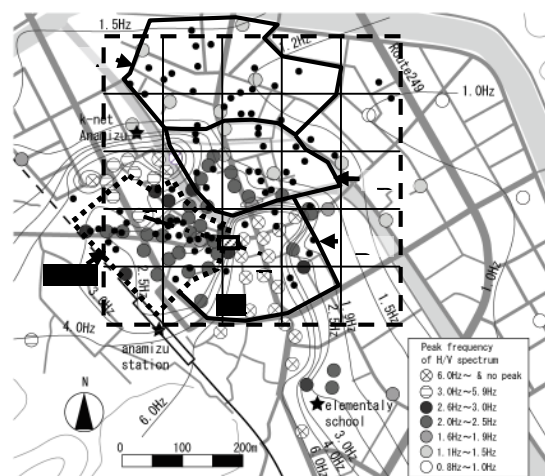


図1 穴水町の被害状況と微動卓越振動数

鉛直入射せん断波に対する1/4波長則相当となる。この関係式を用いてH/V卓越振動数から表層厚を求めることにより、穴水町市街地の2層地盤構造を推定することができる。

本検討での主対象は、全壊建物の集中した200m四方程度の領域の生成要因を明らかにすることである。上述の2層地盤構造より、同領域は周辺の基盤が浅く北東に口の開いた、盆地状の基盤面を有する。そこで、主要な被害の見られた道路沿いに測線を設定し、その方向の水平成分を用いた2次元面内波動場の検討を行うこととした。盆地端部の基盤傾斜をモデル化するために、同測線に沿って5m~10mピッチで高密度の測定を行い、得られたH/Vスペクトルの卓越振動数の個数および空間的变化を2次元FEMモデルでシミュレーションし、傾斜角45度程度が最適であることが示された。この結果は他機関による弾性波探査と調和的な結果となった。リッカー波を用いた検討より、地盤モデル両端の傾斜地盤から中心に向かって伝播する表面波が干渉し、さらに盆地中央部の1次元的な波動が重なって大きな振幅となる波動伝播特性が示された。

②入力地震動の検討

穴水町の東側7km地点にKik-net観測点があり、能登半島地震本震記録が不完全ながら得られている。同観測点で得られた岩盤中の記録とK-Net穴水の記録から引き戻した基盤波の2.5Hz以下のスペクトル比より、岩盤記録を3倍して基盤波に用いることとした。なお、7km分の距離補正は1.3であるため、岩盤(地震基盤)から工学的基盤までの増幅率は2.3倍となる。また、K-Net穴水の記録と推定基盤波から等価線形解析で得た地表地震動の振幅および経時特性は調和的である。等価線形解析で用いた動的変形特性は地表記録速度成分から推定した有効ひずみと表層物性に基づいており、等価線形解析における最大ひずみは1%程度に達した。

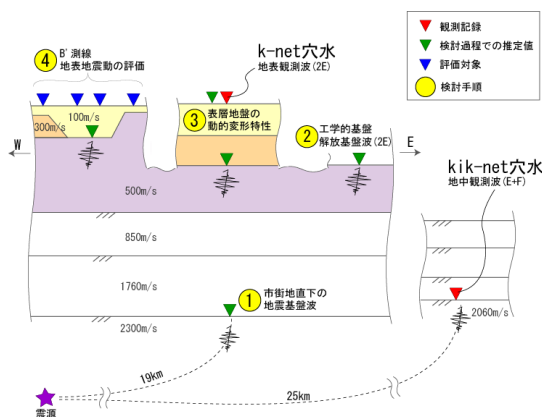


図2 入力地震動と地表地震動の評価法

③地表地震動の検討

①で評価した2次元地盤FEMモデルに上記基盤波を入力し、等価線形解析により地表地震動分布を評価した(図2)。木造家屋の損傷に大きく寄与する周期1秒から2秒の成分について、盆地中央部の応答は地震観測点の10%増しであり、盆地端部基盤傾斜部の30%増し程度となった。盆地中央部は被害集中領域に相当し、被害集中の生成要因として地盤の非線形性と不整形性による局所的に大きな地震動の発生の可能性が示された。

(2)栄村における検討結果

①表層地盤構造の検討

長野県栄村の森、青倉、横倉の3地区は500m四方程度の集落であり、1km程度の間隔で千曲川沿いに位置する。3地区は2011年3月12日に発生した長野県北部の地震の震源直上に位置し、森地区の震度計で震度6強が計測された。3地区は震源直上の隣接地区であったが被害の程度は異なり、青倉の全壊建物が最も多い。いずれも背後に山を控え、第三紀地盤を崩壊堆積土が覆う構造であるが、森が川に張り出す平地であるのに対し、青倉は山側に食い込んだ平地といった地勢的な違いがある(図3)。また、青倉の中でも中心部が壊滅的な被害を受けているのに対して縁の部分の被害は相対的に小さい。その理由を検討するために3地区で各50点程度の微動測定を行うと共に、森地区の中学校校庭で微動アレー測定を実施した。

森地区の代表的なH/V卓越振動数が4Hz程度であるのに対し、青倉地区は3Hz程度とやや低く、被害集中領域の北東側の地表は平坦であるのに卓越振動数は急激に増大する(図4)。中学校のボーリング調査結果を参考としてアレー測定で得られた表面波分散曲線を2層地盤のレイリー波基本モード分散曲線でシミュレートして、表層Vs250m/s、基盤Vs630m/sの2層地盤を設定し、震度計の設置された栄村役場のボーリング調査結果の表層厚でチェックをしたのち、1/4波長則相当の $f=63/H$ により各地区の2層地盤の表層厚を推定した。卓越振動数分布より、青倉地区の被害集中領域はその北東側で急激に基盤が浅くなる特徴を示した(図4)。

本検討の主対象は、青倉地区と森地区の地

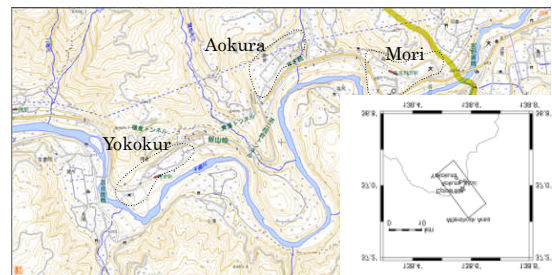


図3 栄村で被害の集中した3地区の位置関係

震動の違いならびに青倉地区内での被害集中領域の地震動の分布である。両地区において川に対しておおよそ平行と直交の2測線を設定し、上述の2層地盤構造より測線沿いの断面を切り出して2次元FEMモデルを作成した。両地区の特徴的な振動数を代表振動数とするリッカー波を用いて波動伝播特性を検討したところ、川に向かって傾斜しつつ表層厚が増大する川直交測線では、山側で表層厚が増大し始める傾斜部から表面波が川方向に伝播する特徴が見られ、森地区の川平行測線は比較的1次元的な構造で重複反射が特徴的であり、被害の集中した青倉地区の川平行測線（図5）では盆地的な構造の端部両側から中央に向かう表面波が観察された。

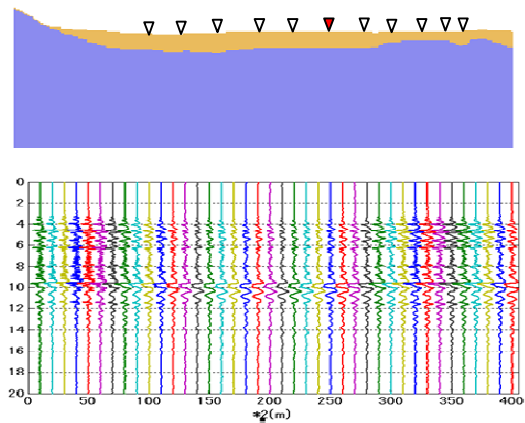


図5 青倉の川平行測線での地表応答

②入力地震動の検討

栄村においては周辺の岩盤での地震動記録がなく、地表の震度計記録から基盤に引き戻した波を入射地震動として用いた。同記録の速度成分から動的変形特性を推定し、1次元等価線形解析で解放基盤波を推定したところ、最大のせん断ひずみは1%程度となった。

③地表地震動の検討

①で評価した2次元地盤FEMモデルに上記基盤波を入力し、等価線形解析により地表地震動分布を評価した（図5）。その結果、木造家屋の損傷に大きく寄与する周期1秒から2秒の成分について、青倉の2測線の結果は森よりも大きな応答を示した。地盤非線形の影響を受けて、表層の厚い青倉において被害に関連する振動数域に地盤卓越振動数が生じたと考えられる。青倉地区内においては、盆地構造の中心よりもやや北東側（図5赤▽周辺）の被害集中領域で10%強程度の応答の増加が見られ、盆地縁辺部の基盤傾斜面で発生した表面波による局所的に大きな地震動の発生の可能性が示された。

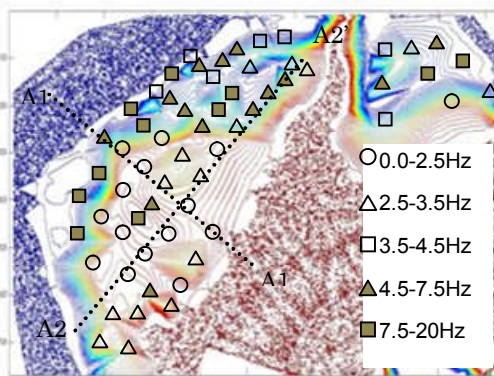


図4 青倉の卓越振動数と推定表層厚分布

(3)被害集中評価方法の一般化と将来展望

本研究においては、高密度の微動測定と周辺の地震記録の活用により、地盤構造の不明な地域の地震動集中領域を評価する方法を検討し、条件の大きく異なる穴水町と栄村において同様な方法により、実際の地震被害集中域が地震動集中領域に重なる可能性を示した。国内外において高密度の微動測定による地盤構造推定から地震記録による地盤の動的変形特性の評価を介してFEM解析による地震動評価にいたる一連の検討が行われた例は稀である。

上述の方法の適用によりあらかじめ地震被災度の高そうな領域を把握しておくことは、防災計画上有用である。本研究では実際の被害に関連した地震記録を用いているが、そのような記録がない場合でも低予算で実施可能な微動測定によって地盤構造を推定しておくことにより、一般的な動的変形特性と入力地震動に対する地表応答分布の評価により本手法の適用が可能である。

今後の展望として、3次元盆地形状による地震動集中を簡便に評価する方法を実現し、被害集中と地震動集中の関連をより明確に説明することにより、本手法の信頼性を向上することが望まれる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① 清水 亮、前田 寿朗、2007年能登半島地震における穴水町の建物被害の集中と表層地盤構造の関係、日本建築学会構造系論文集、査読あり、第75巻、648号、2010、pp. 269-277

〔学会発表〕（計6件）

- ① 前田 寿朗、木村 友彦、加藤 敦士、2011年長野県北部地震の栄村被害に関連

した地盤モデル構築の試み、第30回日本自然災害学会学術講演会、2011年11月、東京。

- ② 前田 寿朗、木村 友彦、加藤 敦士、2011年長野県北部地震の栄村被害に関連した微動測定結果、日本地震工学会大会、2011年11月、東京。
- ③ T. Maeda and R. Shimizu、Topographical effects of shallow subsurface structure on concentration of structural damage、14th European Conference on Earthquake Engineering、2010年8月、Macedonia。
- ④ T. Maeda and R. Shimizu、The effects of subsurface structure on the concentration of structural damage during the 2007 Noto-Hanto earthquake、9th U.S. National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering、2010年6月、Toronto, Canada。
- ⑤ 前田 寿朗、清水 亮、斎藤 豪、2007年能登半島地震における穴水町の建物被害と表層地盤構造、日本建築学会大会、2009年8月、仙台。
- ⑥ 清水 亮、前田 寿朗、常時微動記録を用いた石川県穴水町の表層地盤構造の推定、日本地球惑星科学連合大会、2009年5月、千葉。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

前田 寿朗 (MAEDA TOSHIRO)
早稲田大学・理工学術院
研究者番号：80329086

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：