

2007年新潟県中越沖地震における社寺被災度とPGV推定

PGV Estimation from Damage of Shrines and Temples for the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki Earthquake

山田真澄 —————*1 林 康裕 —————*2
 森井雄史 —————*3 朴 舜千 —————*4
 大西良広 —————*5 清水秀丸 —————*6

Masumi YAMADA —————*1 Yasuhiro HAYASHI —————*2
 Takeshi MORII —————*3 Sun-Cheon PARK —————*4
 Yoshihiro ONISHI —————*5 Hidemaru SHIMIZU —————*6

キーワード:

最大速度、震源域、墓石転倒率、社寺建築、2007年新潟県中越沖地震

Keywords:

Peak Ground Velocity, Source Region, Ratio of Overturned Tombstones, Structure of temples and shrines, 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki Earthquake

We performed a damage survey of temples and shrines near the source region of the 2007 Niigata-ken Chuetsu-oki earthquake to estimate the distribution of strong ground motions. We constructed a function to estimate peak ground velocity from the damage rank of main hall of temples and shrines, and estimated the PGV distribution in the source region. From our results, the PGV in the most of the Kashiwazaki basin exceeds 100cm/s. This PGV distribution agrees with the PGV estimated from the attenuation relationship and surface soil amplification. The conventional estimation method using the ratio of overturned tombstones underestimates the PGV in the basin.

1. はじめに

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震（JMA マグニチュードMj6.8）¹⁾では、震源域に近い柏崎市や刈羽村で多くの建物、土木構造物、地盤被害が生じた。この地震では、震源域に近い柏崎刈羽原子力発電所が大きな地震動を受け、原子炉建屋において設計荷重以上の地震動を計測するなど²⁾、社会的にも大きな影響を与えた。

新潟県中越沖地震の地震記録は、震源断層から10キロ以内の地点で、4点の地震観測点及び原子力発電所構内での地震波形が記録されている（図1参照）。観測された地動速度（表1）は、50cm/sから100cm/s以上とばらつきが大きく、このエリアだけでも不均一な速度分布であったことを示している。さらに、柏崎平野中心部の波形記録では、2秒以上の長周期成分が卓越し、地盤の強い非線形性を示す波形も見られるなど、周期成分も観測波形によって大きく異なっている。この地域の表層地盤は表層地質や層厚が激しく変化する複雑な堆積地盤構造をしており³⁾、それが地震動の表層地盤増幅に大きな影響を与えたと考えられる。

我々のグループは、7月25日から27日にかけて、震源域の社寺において被災調査を行い、構造物の被災度と墓石転倒率を調べた。墓石転倒率や建物被災率から地震動を推定する手法は、多くの既往の研究成果で提案されている⁴⁾⁻⁵⁾。新潟県中越沖地震の震源域は、複雑な堆積地盤構造、地盤の非線形化と、難しい問題はあるものの、調査結果からどの程度地震動を表現可能か、既往の研究成果を踏まえて検討した。本研究では、特に以下の点について報告する。

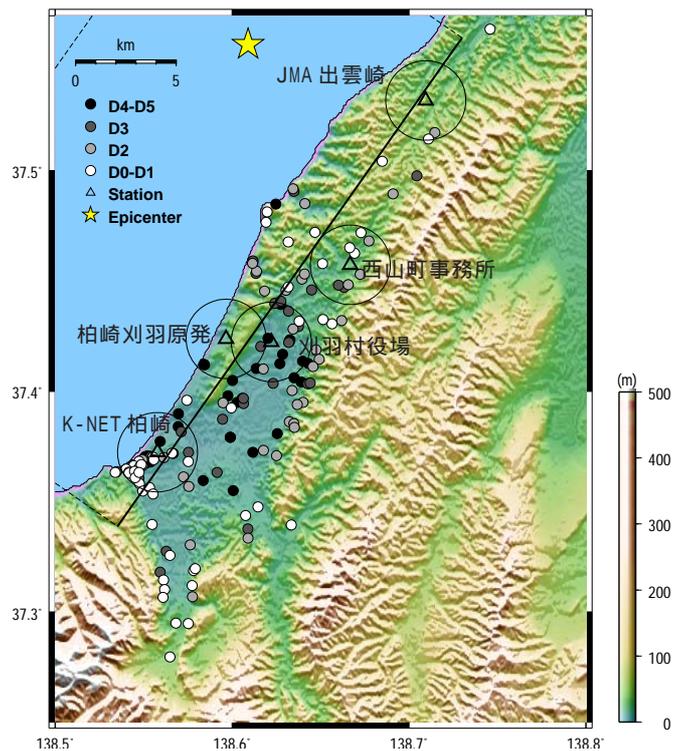


図1 被害調査地点及び地震観測点の位置と調査地域の地形

*1 京都大学次世代開拓研究ユニット 助教・Ph.D. (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

*2 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 教授・工学

*3 京都大学大学院工学研究科建築学専攻 助教・博士(工学)

*4 韓国気象庁気象研究所 気象研究士・博士(理学)

*5 地域地盤環境研究所 研究員

*6 防災科学技術研究所 研究員・博士(工学)

*1 Assist. Prof., Pioneering Research Unit for Next Generation, Kyoto Univ., Ph.D.

*2 Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

*3 Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

*4 Researcher, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Dr. Sci.

*5 Researcher, Georesearch Institute

*6 Research Engineer, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.

- ・社寺本堂の被災率を観測記録と対応させて経験式を構築し、震源域周辺での平均的なPGV推定を試みる。
- ・墓石の転倒率に既応の墓石転倒率曲線を適用し、観測記録と比較して、この墓石転倒率曲線が本地震におけるPGV推定に適用可能か検討する。
- ・距離減衰式から震源域のPGVを算出し、調査結果から推定したPGV分布との対応を確認する。

2. 調査方法

我々は震源域東側において、社寺の被災調査を行った。調査範囲は柏崎市から出雲崎町まで南北30km、東西20kmにわたっている(図1)。調査対象としたのは、神社、寺及び墓地212か所である。このうち、墓地を併設した社寺が74ヶ所、墓地を併設しない社寺が81ヶ所、墓地のみが57ヶ所であった。調査方法は、2-3名を1チームとして各地点を回り、建物・墓石・物体等の被害状況を記録した。すべての調査地点で、携帯型GPSにより緯度経度を計測した。

本堂、鐘楼などの構造物については、岡田・高井の木造建物破壊パターン⁶⁾に基づき、D0(無被害) D1~D2(一部破損) D3(半壊・写真1(a)参照) D4~D5(全壊・写真1(b)参照)で外観から被災度(DR)を判定した。墓地がある場合は、竿石の長さが80cm前後の墓石を対象として、墓石の全数と転倒数をカウントし転倒率を算出した。いくつかの墓地では、2-3本の竿石を任意に抽出し、幅・奥行き・高さを計測した。墓石数が10未満の墓地や、地震後の修復歴のある墓地は、データ解析の対象から外した。その他、鳥居や石碑、狛犬などの物体についても移動・倒壊などの被災度を記録した。

3. 社寺本堂の被災率・墓石転倒率と観測記録の関係

3.1 観測記録の振動特性

社寺本堂の被災率・墓石転倒率と、地震動との相関を調べるために、観測記録を用いてキャリブレーションを行った。使用した観測記録は、JMA出雲崎、柏崎市西山町事務所(以下西山町事務所と略す)、刈羽村役場、K-NET柏崎(観測点コードNIG018・柏崎市役所内)、柏崎



(a) D3
写真1 社寺本堂の被害と被災度の関係
(b) D4

表1 観測記録の振動特性

No.	観測点名	緯度	経度	震度	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	T _e (s)	ARV	微動卓越周期(s)
1	JMA出雲崎	37.532	138.710	5.9	494	48	0.61	1.19	不明瞭
2	西山事務所	37.457	138.667	6.2	841	78	0.58	1.56	0.31
3	刈羽村役場	37.422	138.622	6.0	465	121	1.63	2.35	1.25
4	柏崎刈羽原発	37.424	138.597	6.1	437	130	1.87	2.09	-
5	K-NET柏崎	37.372	138.558	6.4	668	110	1.03	2.09	1.25
6	1号機地震観測小屋	37.424	138.597	6.5	890	167	1.18	2.09	-
7	5号機地震観測小屋	37.436	138.602	6.4	1223	90	0.46	2.09	-

刈羽原子力発電所サービスホール(以下柏崎刈羽原発と略す)の5地点である。各観測記録の振動特性を表1に示す。表1には、柏崎刈羽原発の1号機と5号機の地震観測小屋で得られた観測記録も合わせて示している。これらの記録は、周囲で被害調査を行うことができなかったため、解析の対象からは外してある。

各記録は加速度で計測されているので、始めにDCオフセットを取り除き、Iwanら⁷⁾の基線補正を行った後、時刻歴で積分して速度記録を得た。水平2成分の記録のうち、最大値の大きいものを最大速度(PGV)として使用している。最大加速度(PGA)はPGVと同じ成分のものを記した。地震動の卓越周期T_eは、次式により求めている。

$$T_e = 2 / (PGA/PGV) \quad (1)$$

ARVについては4.1節で記述する。柏崎刈羽原発を除く4地点の観測点では、常時微動計測を行った。微動のH/Vスペクトルの卓越周期を合わせて示す。刈羽村役場・K-NET柏崎は1.25秒と周期が長く、西山事務所とははっきりと異なった周期特性を示している。JMA出雲崎のスペクトルには明瞭なピークは見られなかった。

図2は各記録の水平1成分の加速度応答スペクトルである。JMA出雲崎と西山支所では、0.5秒程度の周期にはっきりとピークが現れ、それ以上の周期で急激に応答が落ちてくるのに対し、柏崎平野部の3記録は、1秒から3秒付近まで一様に高い応答が続いている。

3.2 社寺本堂の被災率と観測記録の関係

観測点近傍の調査地点の社寺本堂の被災率と、観測記録の対応関係を調べた。本論では、観測点から一定の半径の円内を観測点近傍と定義した。半径の大きさは、サンプル数が少なすぎず、かつ、地形や地盤条件の変化をできるだけ敏感に反映できるように、2kmとした。観測点近傍の領域を図1中に円で示す。JMA出雲崎と柏崎刈羽原発以外の観測点では、9点以上の調査地点を確保できている。JMA出雲崎の周辺は、2点と調査地点が少ないが、目視で確認した限り周辺の被害は少なく、概ね調査結果(D2:1棟、D0-D1:1棟)と対応していると判断した。柏崎刈羽原発近傍は、ほとんどを原発の敷地で占められており、調査地点は4点のみであった。

図3は観測点近傍の社寺本堂のD3・D4被災率とPGV_{obs}との関係を示している。ここで、D3(D4)被災率とは、観測点近傍の社寺本堂全数における、D3(D4)被災度以上の社寺本堂棟数の割合を指す。D3・D4被災率はPGVが大きくなるにつれて増加する傾向が見られる。この関係を対数正規分布の累積確率分布関数(x)で回帰し、社寺本堂被災率-PGV関係式を求める。PGVがある値のときに被災度DR以上の被害が発生する確率P_{DR}(PGV)は、ln(PGV)の平均値及び標準偏差を用いて、

$$P_{DR}(PGV) = ((\ln(PGV) - \mu) / \sigma) \quad (2)$$

で表される。 α は、確率紙を用いた最小二乗法により求めた。その結果得られた回帰係数は、

D3 被災率: $\alpha = 4.61$, $\beta = 0.31$

D4 被災率: $\alpha = 4.81$, $\beta = 0.19$

であった。この回帰式を図3中に合わせて示す。

3.3 墓石転倒率と観測記録の関係

図4は観測点近傍の墓石転倒率と観測記録のPGV(PGV_{obs})との関係を示している。×印が個々の調査地点の墓石転倒率、●印が調査地点の墓石数による重み付き平均である。印横の数字は表1の観測記録に対応している。点線で示されているのは、金子・林⁵⁾によって提案されている経験式である($\alpha = 4.41$, $\beta = 0.4$)。一般に、墓石転倒率はPGVと相関が良いと言われているが⁵⁾、この図からは正の相関は見られない。

金子・林⁵⁾によれば、墓石の竿石のサイズから決定される等価固有周期 T_b が、地震動の卓越周期 T_e よりも大きい場合は、墓石転倒率はPGVとよい相関を示す。墓石の等価固有周期 T_b は、その竿石の高さ

H(cm)と幅B(cm)から次式で決定される。

$$T_b = H^{0.5} (1 + B/H)^{1.5} / 15.6 \quad (3)$$

我々は、任意の墓地から竿石のサンプル計測を行い、BとHを計測した。その結果、平均値はH=76cm、B/H=0.40で、平均値より求めた T_b は0.93秒であった。一方、 PGV_{obs} の固有周期が0.93秒以下だったのは、JMA出雲崎と西山町事務所の2点のみであった(表1参照)。従って、既往の墓石転倒率曲線が適用できるのは、一部の地域に限定されている。

図4から、 T_b が0.93秒以上であった観測点近傍では、墓石転倒率から推定したPGVは過小評価になることが分かる。一方、 T_b が0.93秒以下であった西山町事務所においても、墓石転倒率は金子・林の経験式から大きく外れており、これらの地域においては、墓石転倒率からPGVを推定することは難しいと考えられる。周期が1秒以上の地震動に対する墓石転倒率曲線は、金子・林(2000)の論文で解析的に示されているものの、これまでの被害地震において確認されているわけではない。図4は、実地震のデータにおける、長周期地震動に対する墓石転倒率曲線の限界を示している。

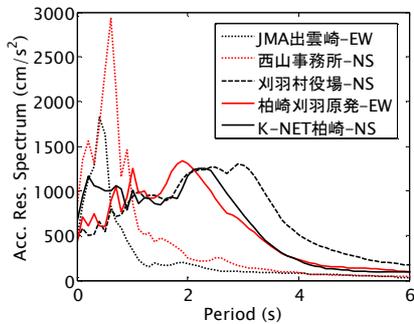


図2 観測記録の加速度応答スペクトル

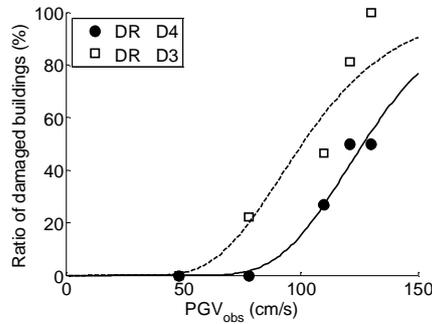


図3 PGV_{obs} と社寺本堂の被災率の関係

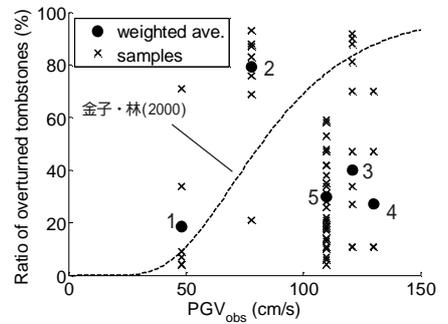


図4 PGV_{obs} と墓石転倒率の関係

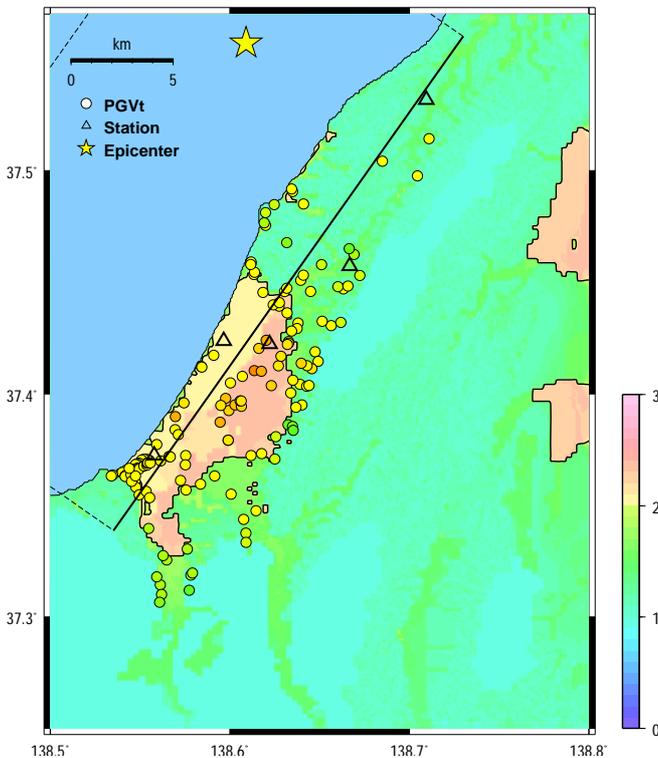


図5 社寺本堂被災度から推定した PGV_t (丸印)とARVの分布

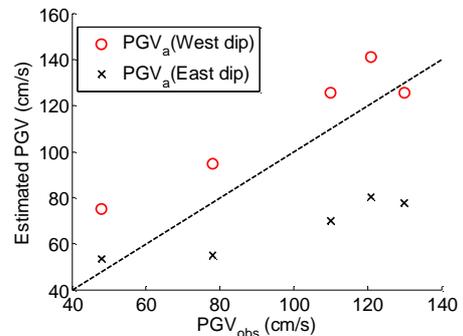


図6 PGV_{obs} と PGV_a の関係

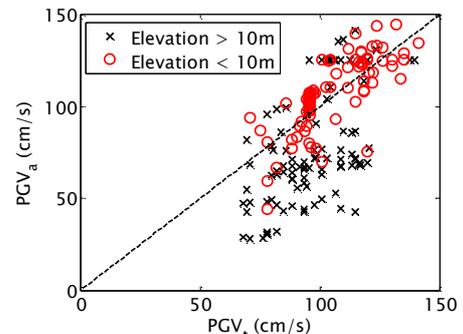


図7 PGV_t と PGV_a の関係

4. 震源域における地震動推定

4.1 距離減衰式とARVを用いたPGV推定

PGV推定の精度を確認するため、PGVの距離減衰式⁸⁾と地下30mから地表までの速度増幅度(ARV)を用いたPGV推定を行った。PGVの算出方法は、藤原らが用いた手法⁹⁾に従った。この手法によって推定されたPGVをPGV_aと呼ぶことにする。

断層距離を求めるための基準となる断層面は、青井らが波形インバージョンに使用した西落ちの3次元モデル¹⁰⁾を使用した。断層距離が3km以下の地点については、一律で3kmとしている。ARVの算出は、松岡らの手法¹¹⁾に従い、新潟地域250mメッシュ地形・地盤分類データベースVer.2¹²⁾と数値地図50mメッシュ(標高)¹²⁾を用いて、標高・傾斜・第三系の山地丘陵からの距離を計算した。

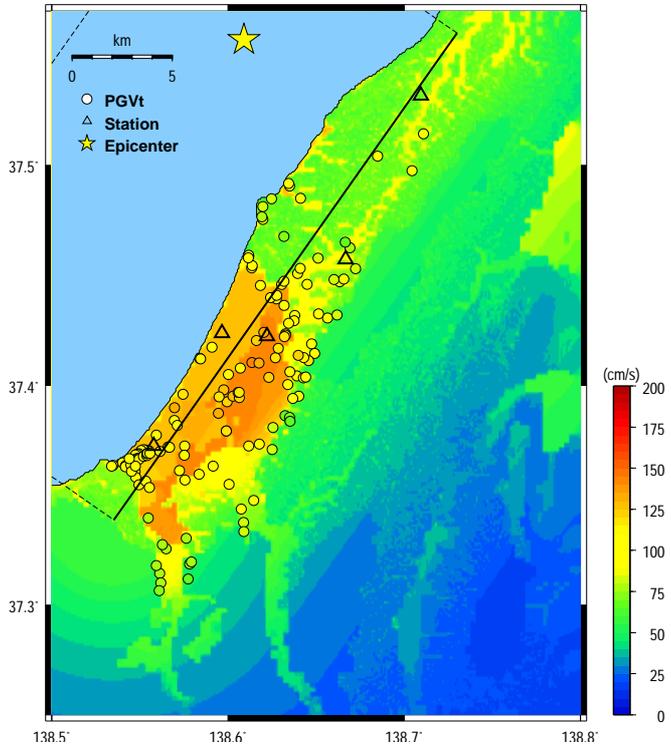


図8 社寺本堂被災度から推定したPGV_t (丸印)とPGV_aの分布

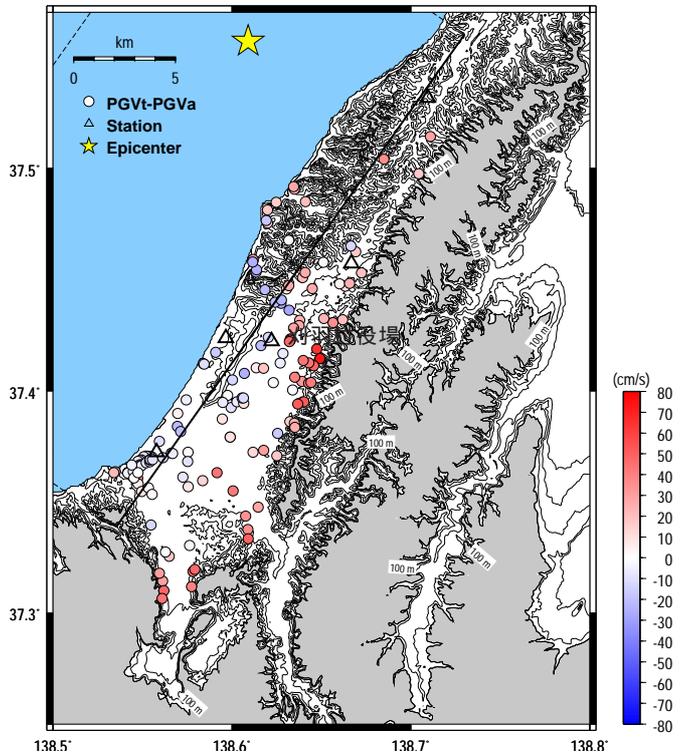


図9 PGV_tとPGV_aの差分(=PGV_t-PGV_a)(等高線は10mから100mまで10m間隔に描画されている)

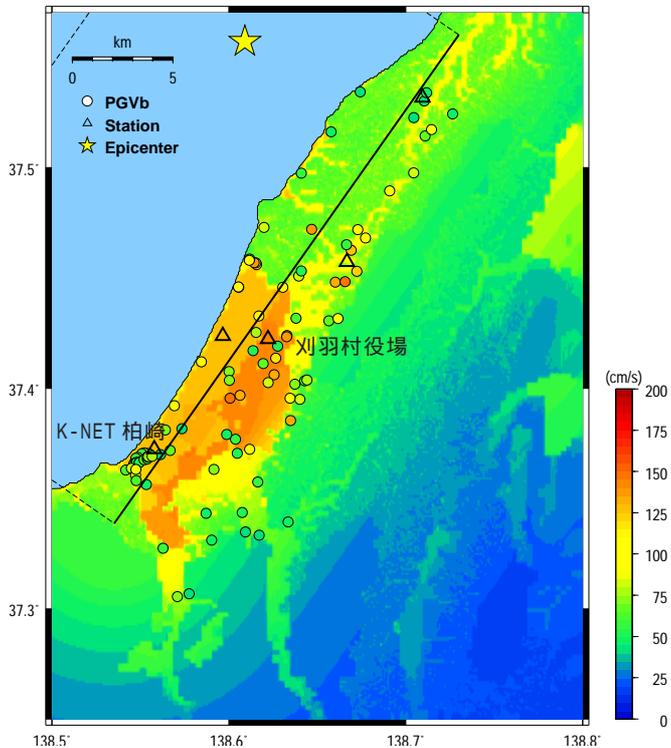


図10 墓石転倒率から推定したPGV (丸印)とPGV_aの分布

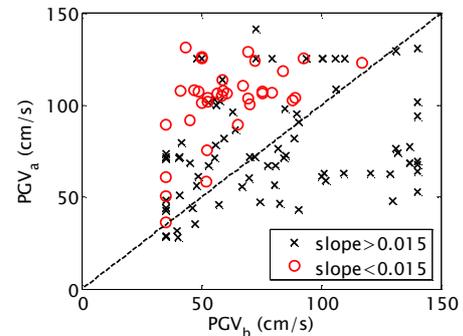


図11 PGV_bとPGV_aの関係

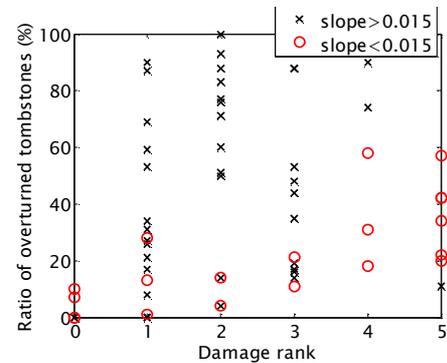


図12 墓石転倒率と社寺本堂の被災度の関係

図5に震源域でのARV分布を示す。黒線の矩形は青井らの断層面、黒線のコンターは、ARVが2.0の等高線を示している。このコンターで囲まれたARVの高い地域は、地形分類が後背湿地・海岸低地・三角州・砂丘に分類されており、柏崎平野の大部分を占めている。地形区分が山地・丘陵の地域ではARVは標高や傾斜によらず、一定値となっている。

算出した PGV_a と観測記録の関係を図6に示す。 PGV_a は観測記録と比較的よく対応しているが、JMA出雲崎では観測記録とのずれが大きい。JMA出雲崎周辺の断層面は、滑り量も小さく、地震動自体が小さかった可能性がある¹⁰⁾。藤原らの用いた手法は、断層距離と表層地盤増幅しか考慮していないため、滑り量分布によっては実際のPGV分布と対応しないことがある。このように、断層距離と地盤情報のみでPGVを推定するには限界があるが、震源域近傍の観測点周辺では概ねよく一致していると考えられる。

なお、本震の断層面の向きについては、現在の時点では明確な結論が得られていない¹⁰⁾。我々は西落ち・東落ち断層面のそれぞれについて PGV_a を算出し、観測記録との相関を調べた(図6参照)。その結果、西落ち断層面の方がよい対応関係が見られたので、本論では西落ち断層面を採用した。

4.2 社寺本堂被災率 - PGV 関係式による PGV 推定

社寺本堂の被災度を図1中に丸印で示す。特に被害が大きかった(D3-D5)建物は、柏崎市中心部から刈羽村にかけての地域に集中している。このエリアは柏崎平野と概ね一致しており、平野部の全体で強い速度の地震動を受けたと考えられる。被害が大きかったエリアでは、基礎被害や地盤変状、液状化の噴砂の跡も確認した。K-NET柏崎や柏崎刈羽原子力発電所の観測記録では、2秒程度の周期が卓越しており、この周期の地震動が建物被害に大きく関係した可能性がある。

第3節で構築した社寺本堂被災率 - PGV 関係式を用いて、社寺本堂の被害からのPGV推定を試みる。推定方法は、被災調査を行ったすべての社寺本堂について、各本堂の半径2km以内にある社寺本堂の全数と、D3以上の被災度の社寺本堂棟数カウントし、その割合をD3被災率とした。この被災率を式(2)の逆関数に代入することにより、PGVを逆算定した。D3被災率が0%の場合は、対数正規分布に理論的に存在しないため、解析の対象から外した。D3被災率が100%の地点はなかった。母数が5以上の調査地点のみ対象とした。我々は、半径1km以内の社寺本堂の被災率も解析したが、1kmではサンプル数が確保できず、十分な分解能が得られなかったために、半径2kmの被災率を採用した。この地域の堆積地盤構造は複雑なため、PGV分布の局所的な変化をとらえるには限界があるものの、地域全体の大局的な地震動分布は評価できると考えられる。

この手法により算出した PGV (以後、 PGV_t とする)と、4.2節で計算した PGV_a の比較を図7に示す。図7では、標高が10m以下の調査地点を印、それ以外の調査地点を×印で表示している。 PGV_t と PGV_a の相関係数は0.65であった。また、図8に PGV_a の地図上の分布と、調査地点における PGV_t を示す。ほとんどの調査地点において、 PGV_t と PGV_a は概ね対応している。特に、100cm/s以上の速度を記録した柏崎平野中心部では、 PGV_t 、 PGV_a 共に100cm/s以上の値を示している。

PGV_t と PGV_a の乖離が大きい地域を調べるために、 PGV_t と PGV_a の差分を地図上にプロットしたものを図9に示す。標高が10mから100mの地域は10mごとに等高線を描画し、標高が100m以上の地域は灰色で示してある。特に差分が大きいのは、刈羽村役場東側など標高が急変する調査地点である。この地域は現地調査においても、全壊した木造住宅が多数見られ、被害の大きい地域であった。この地域の PGV_a が小さく推定されている原因の一つとして、山地丘陵からの距離が近いために、地盤増幅が小さく抑えられていることが挙げられる。(松岡らの経験式は、第三系の山地丘陵からの距離が近いほど、ARVが小さくなる。)また、この地域の一部は地形分類が山地に分類されており、標高や傾斜に関係なくARVが一定値となっている。標高が急変する地域で PGV_a が小さくなる傾向は図7からも確認できる。一般に、地盤構造が急激に変化する盆地端部においては、地震波の干渉により地震動が大きくなる¹⁴⁾。これらの要因によって、社寺本堂の被災率から推定した PGV_t が大きくなったことが可能性として考えられる。

4.3 既往の墓石転倒率曲線を用いた PGV 推定

3.3節で示した観測点近傍のデータ分析結果より、本地震の観測点近傍の墓石転倒率は、既往の墓石転倒率曲線と対応しないことが明らかになった。さらに、どのような地形条件で距離減衰式から求めたPGVとの乖離が生じているかを確認するため、すべての墓石調査地点に、金子・林⁵⁾の墓石転倒率曲線を適用し、 PGV_a との対応を調べた。墓石転倒率が0%及び100%の場合は、対数正規分布に理論的に存在しないため、解析の対象から外した。

この推定式により算出した PGV (以後、 PGV_b とする)と PGV_a の地図上の分布を図10に示す。 PGV_b は、特に柏崎平野において、 PGV_a よりも小さく評価されている。K-NET柏崎や刈羽村役場周辺では、110-120cm/sのPGVを観測しており、 PGV_b の推定もそれに近いものとなっているにも関わらず、墓石転倒率から推定した PGV_b は特にK-NET柏崎周辺で80cm/s以下となり、実際の地震動と対応していない。それぞれの調査地点における PGV_a と PGV_b の比較を図11に示す。 PGV_a と PGV_b には明確な相関は見られない。特に相関の良くない地点を調べるために、図11中には傾斜が0.015以下の調査地点を丸印で描いている。傾斜が0.015以下の地点では、すべての地点で $PGV_a > PGV_b$ となり、傾斜の小さい平野部で PGV_b が過小評価になるという結果となった。これは、表1の T_g が大きい平野部の観測点で経験式が適用できないという3.3節の結果と一致している。

墓石転倒率の被害の傾向は、社寺本堂の被災度とも大きく異なっている。図12には墓地を併設した社寺における、社寺本堂の被災度と墓石転倒率を比較している。この図においても、調査地点の傾斜によって被害の特徴が変化しており、傾斜が0.015以上の地点では墓石転倒率が大きく、社寺本堂の被害が小さい傾向にある。逆に、傾斜が0.015以下の地点では、倒壊した社寺本堂も多数見られたが、墓石転倒率は低めに抑えられる傾向にあった。

我々は、地震動が長周期化した柏崎平野において、墓石転倒率から推定したPGVが実際の地震動と対応していないことを確認した。また、距離減衰式から推定したPGVと比較すると、特に傾斜の小さい平野部で PGV_b は PGV_a よりも小さくなることが分かった。周期が1秒以上の地震動が墓石転倒率に与える影響は、本論では明らかではな

い。墓石転倒率とPGVの長周期成分の関係を調べるためには、より詳細な検討が必要である。

5. まとめ

本論文では、2007年新潟県中越沖地震の震源域での社寺被害調査を行い、社寺本堂の被災度と墓石転倒率から、本震時の地震動推定を試みた。得られた結論を以下に示す。

- ・観測点周りでの社寺本堂の被災率と観測記録の対比を行い、特にPGVとよい相関があることを示した。これに基づき、2007年新潟県中越沖地震について、被災率よりPGVを推定する経験式を提案した。半径2kmの円内においてD3以上の被害を受けた建物の割合を P_{D3} とすると、 P_{D3} とPGVとの関係は、
$$P_{D3}(PGV) = (\ln(PGV) - 4.61) / 0.31$$
となった。
- ・構築した社寺本堂被災率 - PGV関係式から震源域での平均的なPGV分布の推定を試みた。その結果、柏崎平野の大部分でPGVは100cm/sを超えていたことが示された。
- ・社寺本堂被災率から推定した PGV_l は、距離減衰式から推定した PGV_a とも概ね対応していたが、標高が急変する地域では、 PGV_l は PGV_a よりも小さくなった。これらの地域では、推定した地盤の速度増幅度が実際の地震動と対応していなかった可能性がある。
- ・既存の墓石転倒率曲線を墓石転倒率に適用し、観測記録との対比を行った。2007年新潟県中越沖地震では、一部の観測点で1秒を超える長周期成分が卓越していることから、既存の墓石転倒率曲線から推定したPGVとは対応が良くない。
- ・墓石転倒率から推定した PGV_b と距離減衰式から推定した PGV_a は相関が低く、特に傾斜の小さい平野部で PGV_b は PGV_a よりも小さくなった。地震動が長周期化した柏崎平野においては、墓石転倒率からPGVを推定することは難しいと考えられる。墓石転倒率に与える地震動の長周期成分の影響については、より詳細な検討が必要である。

謝辞

地震後のご多忙中、被災調査にご協力いただきました住民の方々には厚く御礼申し上げます。強震記録は、防災科学技術研究所のK-NET観測点、気象庁の観測点、気象庁との共同研究の枠組みにより入手した自治体の観測点、東京電力より提供された柏崎刈羽原子力発電所の観測点の記録を使用しました。本研究の一部は科学技術振興調整費の支援によるものです。ここに記して謝意を示します。

参考文献

- 1) 気象庁：災害時地震・津波速報 平成19年(2007年)新潟県中越沖地震, http://www.seisvol.kishou.go.jp/eq/2007_07_16_chuetu-oki/chuetu-oki-saigai.pdf
- 2) 東京電力：柏崎刈羽原子力発電所における平成19年新潟県中越沖地震時に取得された地震観測データの分析に係る報告(第一報), http://www.tepco.co.jp/cc/press/betu07_j/images/070730d.pdf
- 3) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所・北陸建設共済会：新潟県平野部の地盤図集(新潟平野編, 柏崎平野編), 1981

- 4) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫：1995年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, No.502, pp.61-68, 1997
- 5) 金子美香, 林康裕：剛体の転倒率曲線の提案, 日本建築学会構造系論文集, No. 536, pp.55-62, 2000
- 6) 岡田成幸, 高井伸雄：地震被害調査のための建物分類と破壊パターン, 日本建築学会構造系論文報告集, No.524, pp.65-72, 1999
- 7) Iwan, W., Moser, M., Peng, CY.: Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerograph, Bulletin of the Seismological Society of America, No.75(5), pp.1225-1246, 1985
- 8) 司宏俊, 翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, No.523, pp.63-70, 1999
- 9) 藤原広行, 河合伸一, 青井真, 石井透, 早川譲, 奥村俊彦, 功刀卓, 神野達夫, 森川信之, 小林京子：確率的地震動予測地図作成手法の検討と試作例, 防災科学技術研究所研究資料, No.236, 2002
- 10) 青井真, 関口春子, 森川信之, 功刀卓, 白坂光行：近地強震動記録による2007年新潟県中越沖地震の震源インバージョン(暫定版), <http://www3.kyoshin.bosai.go.jp/k-net/topics/chuetsuoki20070716/inversion/index.html>
- 11) 松岡昌志, 若松加寿江, 藤本一雄, 翠川三郎：日本全国地形・地盤分類メッシュマップを利用した地盤の平均S波速度分布の推定, 土木学会論文集, No.794, 1-72, pp.239-251, 2005
- 12) 若松加寿江, 松岡昌志, 坂倉弘晃：新潟地域250mメッシュ地形・地盤分類データベース ver.2, 防災科学技術研究所川崎ラボラトリー, 2006
- 13) 国土地理院：数値地図50mメッシュ(標高), CD-ROM, 2002
- 14) 川瀬博, 松島信一, Graves, R., Somerville, P.: 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析 兵庫県南部地震の際の震災帯の成因 地震, 第2輯, pp.431-450, 1997