

2014年長野県北部の地震における白馬村 神城地域での高密度常時微動計測に基づく 地震動の評価と住家のフラジリティカーブの構築

藤木 昂¹・秦 吉弥²・古川 愛子³・村田 晶⁴
常田 賢一⁵・宮島 昌克⁶・湊 文博⁷

¹ 学生会員 大阪大学 工学部 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: afujiki@civil.eng.osaka-u.ac.jp

² 正会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: hata@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³ 正会員 京都大学 大学院地球環境学堂 (〒615-8540 京都府京都市西京区京都大学桂)

E-mail: furukawa.aiko.3w@kyoto-u.ac.jp

⁴ 正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: murata@se.kanazawa-u.ac.jp

⁵ フェロー会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: tokida@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁶ 正会員 金沢大学 理工研究域 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

⁷ 学生会員 大阪大学 大学院工学研究科 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

E-mail: fminato@civil.eng.osaka-u.ac.jp

本稿では、2014年長野県神城断層地震において深刻な住家被害等が発生した白馬村神城地区を対象に、本震時に作用した地震動を広域かつ高密度に評価した。具体的には、まず、特性化震源モデルに基づく強震波形計算を行い、神城地区内における常時微動計測地点(計232地点)における本震時の地震動を推定した。次に、推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析を実施し、転倒率に関する実績値と推定値を比較することによって、推定地震動の適用性について確認を行った。最後に、推定地震動の指標値と住家の被災実績との関係に基づくフラジリティカーブを構築し、地震動指標に関する考察を行った。

Key Words : *Strong motion, site effect, fault model, tombstone fall-down rate, dynamic DEM analysis, wooden house damage, fragility curve*

1. はじめに

2014年11月22日に発生した長野県北部を震源とするマグニチュード6.7の地震(以後、2014年長野県神城断層地震¹⁾もしくは本震と呼ぶ)により、震源域の白馬村役場では震度6弱の強震動が観測された。役場周辺は被災が軽微であったものの、役場から南方に5km程度離れた神城地区では住家の倒壊などの深刻な被災が集中的に発生^{2,3)}しており、被災メカニズムの解明等のためにも本震時における神城地区での強震動の事後評価⁴⁾は非常に有意義である。この点に関する先行研究として、まず、Hata *et al.*⁵⁾は、神城地区内の被災集落である田頭集落および無被災集落である飯田集落(2地点(STA_1およびSTA_5) :

図-1参照)において臨時の余震観測を実施し、得られた記録とサイト特性置換手法⁶⁾の組合せに基づき、本震時に田頭集落および飯田集落に作用した地震動を推定し、両集落における推定地震動の比較結果が被災・無被災の実績に対して矛盾していないことを速報している。次に、秦ほか⁷⁾は、神城地区内においてわずか二つの集落(2地点)での強震動評価に留まっていること、震源断層近傍の地点へのサイト特性置換手法の適用には課題^{8,9)}が残されていることなどを考慮して、特性化震源モデル⁹⁾(神城地区周辺の既存強震観測点^{10,11)}で得られた本震記録を一定の精度で再現可能な断層モデル⁹⁾に基づき、本震時に作用した地震動を臨時余震観測点(8地点(STA_1~8) : 図-1参照)において広域評価している。最後に、藤木は

か¹²⁾は、神城地区に設けた臨時余震観測点(わずか8地点)の位置相当に作用した地震動だけを推定しているにすぎないこと、神城地区内における地震動を高密度に推定するには至っていないことなどを考慮して、神城地区内において常時微動計測を高密度に実施(232地点(図-2参照)において実施)し、得られた計測結果などに基づきサイト増幅特性を高密度に評価している。

上述した背景や先行研究の経緯を踏まえ、本稿では、2014年長野県神城断層地震時に神城地区に作用した地震動を広域かつ高密度に評価した。具体的には、まず、特性化震源モデル⁹⁾に基づく強震波形計算を行い、神城地区内における常時微動計測地点(計232地点)¹²⁾において本震時に作用した地震動を推定した。次に、推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析¹³⁾を実施し、墓石の転倒率に関する実績値と推定値を比較することによって、推定地震動の適用性について確認¹⁴⁾¹⁵⁾を行った。最後に、推定地震動の指標値と住家の被災実績との関係に基づく脆弱性カーブの構築¹⁶⁾¹⁷⁾を行った。

2. 強震動評価手法

強震動評価手法は、上述した先行研究⁷⁾と基本的に同様である。先行研究との大きな違いは、強震動評価地点が8地点(図-1参照)から232地点に急増していることに伴い、評価地点の位置情報が各々異なってくること、および位置情報の違いによりサイト増幅・位相特性も異なってくる事が挙げられる。それ以外に入力パラメータ(震源特性や伝播経路特性など)に大きな違いはない。

本研究では、図-3に示す波形インバージョンの結果¹⁸⁾を参考に構築した特性化震源モデル⁹⁾を採用した。このモデルは、余震分布に基づいて矩形断層面を仮定し、気象庁の震源を含むように形状を設定している。断層面の長さは20kmおよび幅は20kmである。波形インバージョンによる最大すべり速度の分布¹⁸⁾において、試行錯誤の結果、比較的すべり量の大きい領域に三つのサブイベント(Asperity_1, Asperity_2, Asperity_3)を配置したモデルである。表-1に特性化震源モデルの断層パラメータの一覧を示す。破壊伝播は、気象庁の震源から放射状に2.8km/sの速度で広がると仮定し、Q値については佐藤・巽による東日本の内陸部での推定値($Q=166 \times f^{0.76}$)¹⁹⁾を採用した。一方で、PRITIN(地震動エネルギーの水平二成分への分散を表す係数)については、K-NET白馬(神城地区に最も近い既存強震観測点)¹⁰⁾での設定値(0.85(N-S成分)および0.53(E-W成分))を採用⁷⁾した。

一方で、強震波形計算手法として、本研究では、経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震波形計算手法²⁰⁾²¹⁾を適用した。この方法では、まず式(1)により統計的グリーン関数を生成する。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f) \cdot \frac{o(f)}{|o(f)|_p} \quad (1)$$

ここに、(1)式における各々の変数の説明を以下に示す。

- $A(f)$: 地表における統計的グリーン関数のフーリエ変換で複素数
- $S(f)$: 中小地震の震源特性²²⁾で実数
- $P(f)$: 伝播経路特性²²⁾で実数

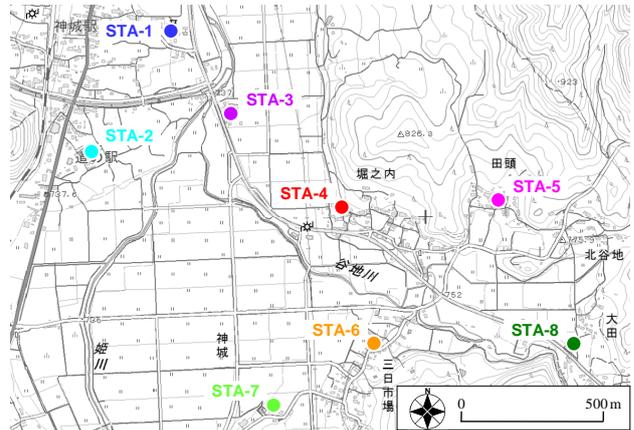


図-1 神城地区内に設けた臨時余震観測点の分布⁷⁾

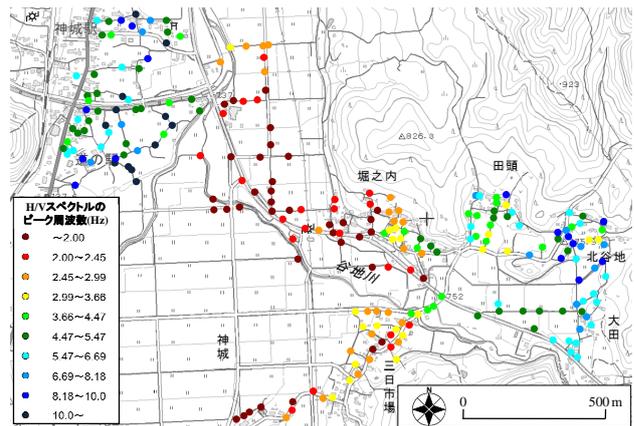


図-2 常時微動HVスペクトルのピーク周波数の分布¹²⁾

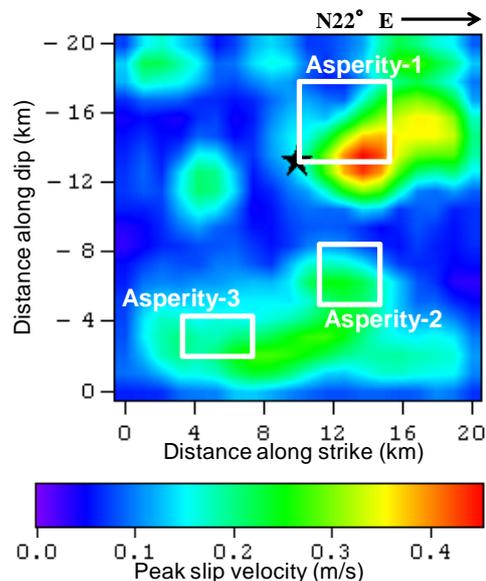


図-3 構築した特性化震源モデル⁷⁾⁹⁾

- $G(f)$: 各微動計測地点(計232地点: 図-2参照)でのサイト増幅特性(地震基盤~地表: 図-4参照)¹²⁾で実数
- $O(f)$: 各微動計測地点(計232地点: 図-2参照)が属する各ゾーン内の臨時観測点(図-1および図-5参照)で得られた余震記録(図-6参照)⁷⁾のフーリエ変換で複素数
- $|O(f)|_p$: $O(f)$ の絶対値に対してバンド幅0.05HzのParzen Windowを適用(添字 p で表示)したもので複素数

図-4に示すとおり, 同じ神城地区内ならびに同じゾーン内においても, ピーク周波数やスペクトル形状などのサイト増幅特性がばらついているのが確認できる. さらに, K-NET白馬と神城地区におけるサイト増幅特性の比較によれば, 両者の特性が明らかに異なっていることから, K-NET白馬で得られた本震観測記録を神城地区に作用した地震動と見なすことができない. 一方で, 図-5は, 常時微動H/Vスペクトル(地盤震動特性)の差異を定量的に評価する指標(DGS値)を用いて, 神城地区を8つのゾーンに分割したものである¹²⁾.

一方で, フーリエ位相特性($O(f)$, $|O(f)|_p$)の取り扱いについては, 震源断層内で発生した比較的規模の大きな余震として, 以下に示す二つの中小地震を併用した.

- EQ_1: 2014/11/25 06:26 長野県北部 (M_j 3.9)
36.7658deg./137.9008deg./1.04km 逆断層型
- EQ_2: 2014/12/22 01:17 長野県北部 (M_j 4.4)
36.6915deg./137.8867deg./5.30km 逆断層型

ここに, ZONE_1およびZONE_5(図-5参照)内に位置する微動計測地点のサイト(フーリエ)位相特性としてEQ_1によるSTA_1, 5(図-1参照)での観測記録(図-6参照), ZONE_2, 3, 4, 6, 7, 8(図-5参照)内に位置する微動計測地点のサイト(フーリエ)位相特性としてEQ_2によるSTA_2, 3, 4, 6, 7, 8(図-1参照)での観測記録(図-6参照)をそれぞれ採用した. EQ_1とEQ_2の使い分けの判断基準は, EQ_1はSTA_1, 5においてのみ記録が得られている事実⁷⁾, 一方で, EQ_2はSTA_2, 3, 4, 6, 7, 8においてのみ記録が得られている事実⁷⁾にそれぞれ基づいている.

式(1)からわかるように, 本手法では, 統計的グリーン関数のフーリエ振幅は, 震源特性・伝播経路特性・サイト特性の積として求め, 統計的グリーン関数のフーリエ位相としては, 現地で得られた余震(EQ-1もしくはEQ-2)による観測記録のフーリエ位相を用いる. 式(1)をフーリエ逆変換し, 経験的グリーン関数法と同様の重ね合わせ²³⁾を行うことで, 大地震による波形が求まる. なお, Parzen Window(添字 p で表示)は, 因果性を満足する地震波を生成する目的で用いられている²¹⁾.

先行研究の成果の一つとして, 秦ほか⁷⁾は, 評価したサイト増幅・位相特性, 構築した特性化震源モデル, 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の組み合わせは, 神城地区周辺の既存強震観測点^{10),11)}における地震動(i)強震波形(速度波形), (ii)応答スペクトル, (iii)各種指標値(最大加速度PGA, 最大速度PGV, 速度

PSI値²⁴⁾, SI値²⁵⁾, 気象庁計測震度²⁶⁾, 修正計測震度²⁷⁾)の再現に有効であることを確認している. よって本稿では, 同じ組み合わせを神城地区内の常時微動計測地点(計232地点)に作用した地震動の推定にも適用する.

3. 墓石の転倒解析

(1) 位置付け

2.で述べたとおり, 秦ほか⁷⁾は, 神城地区周辺で得られた本震時の観測地震動に対して推定地震動を比較する

表-1 特性化震源モデルのパラメータの一覧

断層パラメータ	Asperity-1	Asperity-2	Asperity-3
走向 (deg.)	N22° E	N22° E	N22° E
傾斜 (deg.)	51	51	51
長さ (km)	4.5	3.0	3.5
幅 (km)	4.0	3.0	2.0
地震モーメント(Nm)	3.5×10^{17}	1.0×10^{18}	1.0×10^{18}
ライズタイム (s)	0.3	0.3	0.2
破壊伝播速度 (km/s)	2.8	2.8	2.8

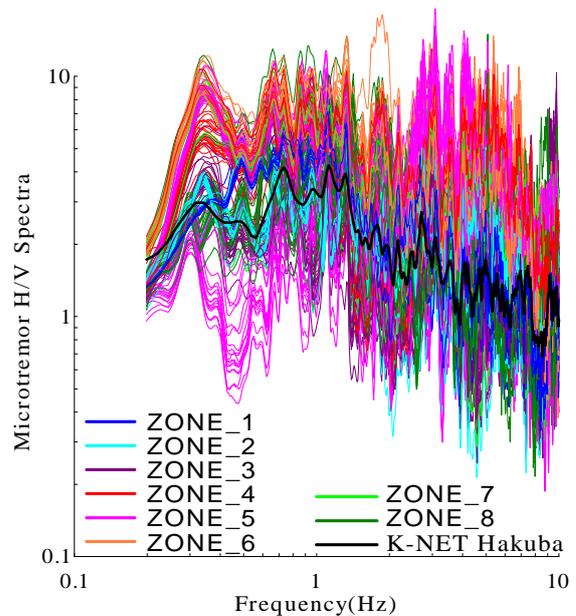


図-4 サイト増幅特性(地震基盤~地表)¹²⁾の比較

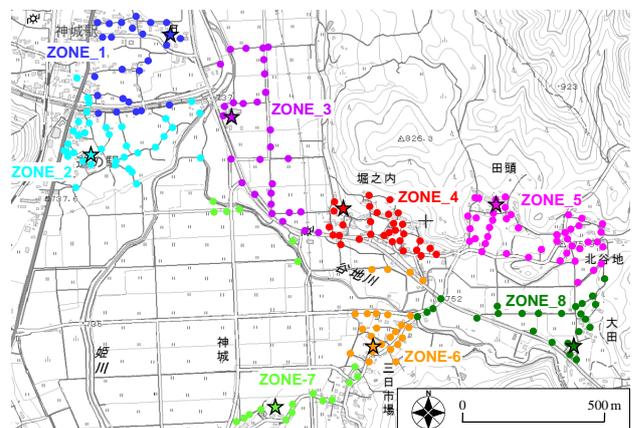


図-5 地盤震動特性によるゾーニング¹²⁾

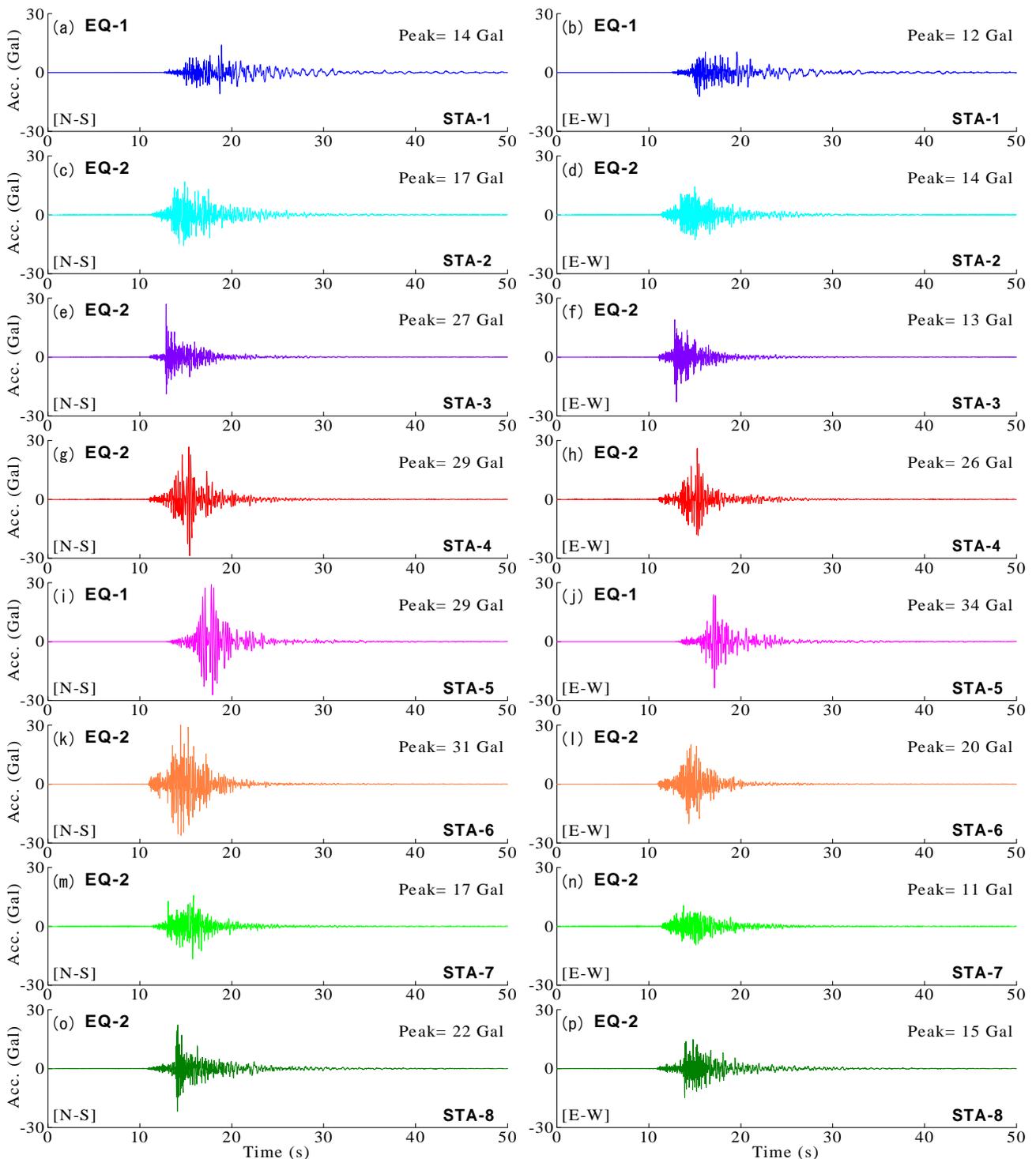


図6 サイト位相特性として採用した余震(EQ-1もしくはEQ-2)による観測地震動の加速度時刻歴⁷⁹⁾

ことよって、地震動評価手法の神城地区への適用性を確認している。しかしながら、神城地区とその周辺の既存強震観測点間においては比較的距離を有しておりサイト増幅・位相特性の差異が比較的大きい⁷⁾こと、常時微動H/Vスペクトルに基づき評価されたサイト増幅特性(図4参照)の適用性について十分な適用性確認が行われていない¹²⁾こと、などを踏まえれば、観測地震動と推定地震動の比較のみでは、地震動評価手法の神城地区への適用性確認が十分に行われたとは言い難い面もある。

神城地区内にも幾つかの墓地(既存強震観測点に比べその数が圧倒的に多い)が位置していること(図7参照)、本震直後に著者らによる現地調査(墓石の転倒の有無などに着目)²⁾が実施されていること、墓石の転倒(特に転倒の有無)に関して十分な再現性を有する数値解析手法が提案¹³⁾されていることなどを考慮すれば、地震動評価手法の適用性確認を更に高めるための新たな手段として、既往研究^{14),15)}と同様の試みを採用することで、神城地区内における墓石の転倒実績を利活用できる可能性が高い。

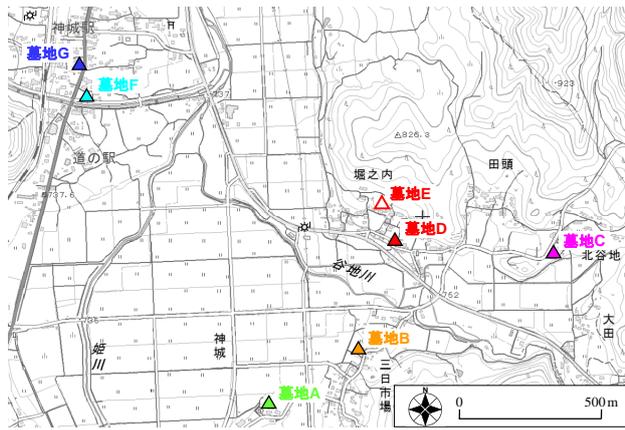


図-7 検討対象とした神城地区内における墓地の分布



写真-1 墓石の写真測量の一例

表-2 墓石の転倒実績とその再現解析結果

墓地名	①墓石総数	②転倒数	③転倒率 (実績値)	④転倒率 (解析値)
墓地A	2	0	0.00	0.00
墓地B	4	4	1.00	0.50
墓地C	5	5	1.00	0.80
墓地D	10	10	1.00	0.60
墓地E	1	1	1.00	1.00
墓地F	1	1	1.00	1.00
墓地G	50	2	0.04	0.00

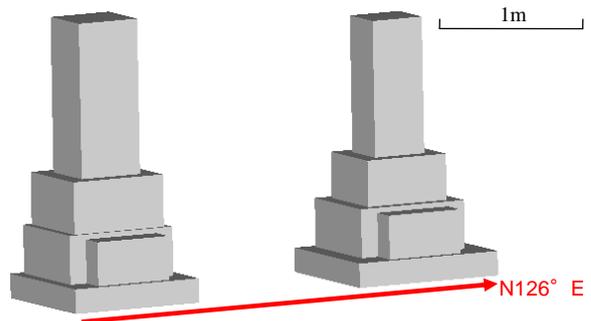


図-8 推定地震動による墓石の転倒解析結果(墓地A)

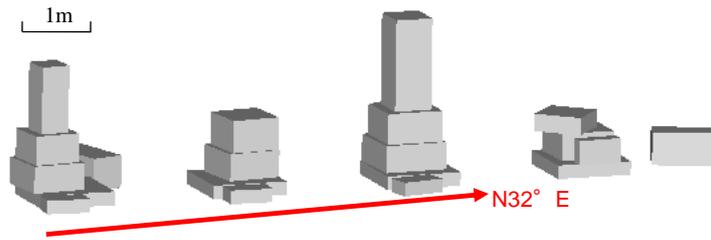


図-9 推定地震動による墓石の転倒解析結果(墓地B)

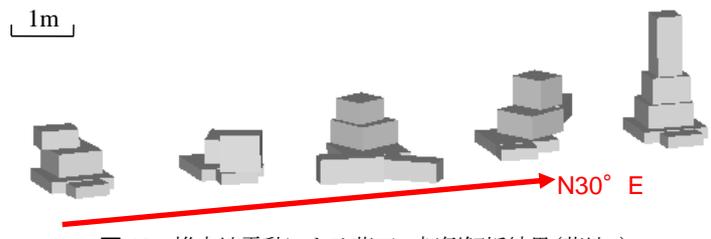


図-10 推定地震動による墓石の転倒解析結果(墓地C)

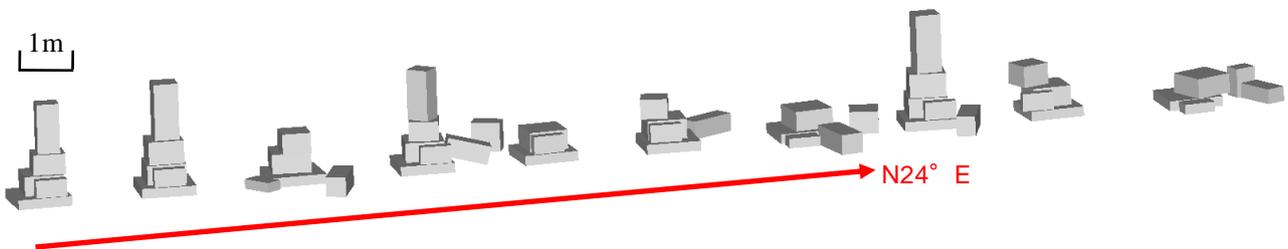


図-11 推定地震動による墓石の転倒解析結果(墓地D)

そこで本稿では、本震時に神城地区内の墓地(図-7参照)に作用した地震動を推定し、得られた推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析を実施した。そして、墓石の墓石の転倒率(主に転倒の有無)に関して実績値と解析

値について比較検討を行うことで、地震動推定手法(2.で述べたとおり、観測地震動と推定地震動による比較検討については先行研究⁷⁾において実施済)の適用性について追加の確認を行った。

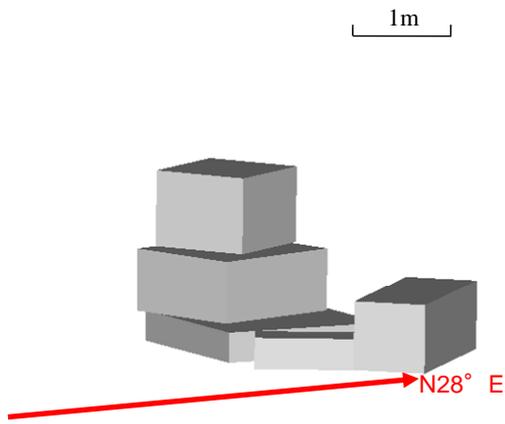


図-12 推定地震動による墓石の転倒解析結果(墓地E)

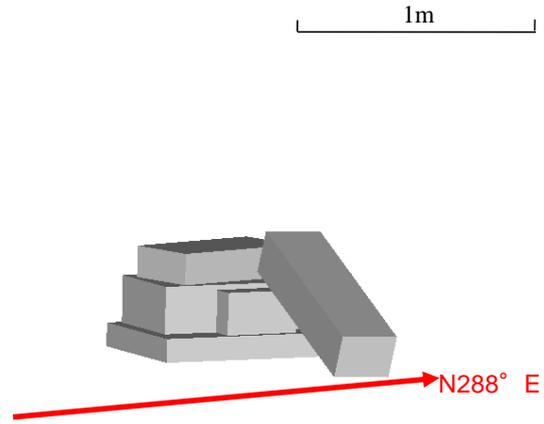


図-13 推定地震動による墓石の転倒解析結果(墓地F)

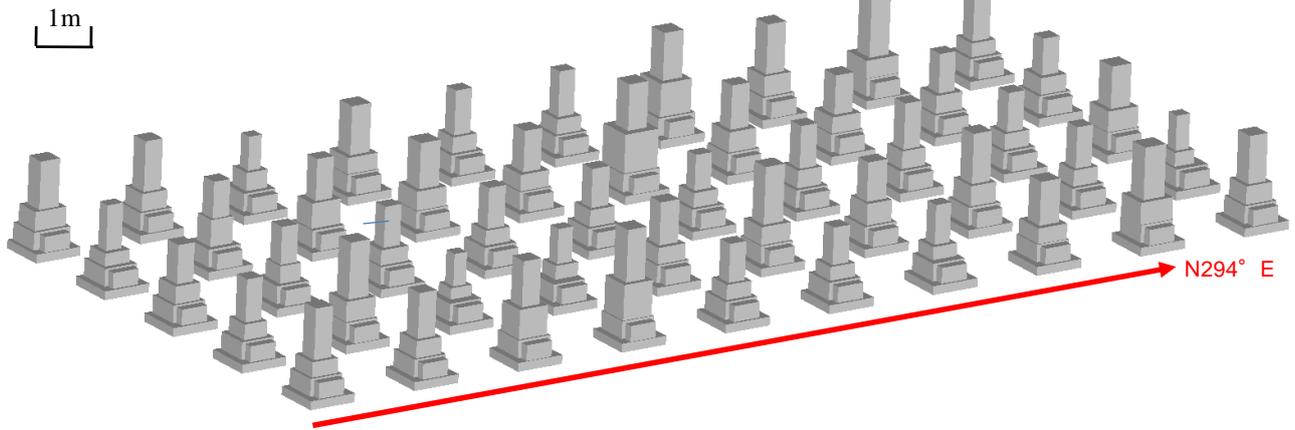


図-14 推定地震動による墓石の転倒解析結果(墓地G)

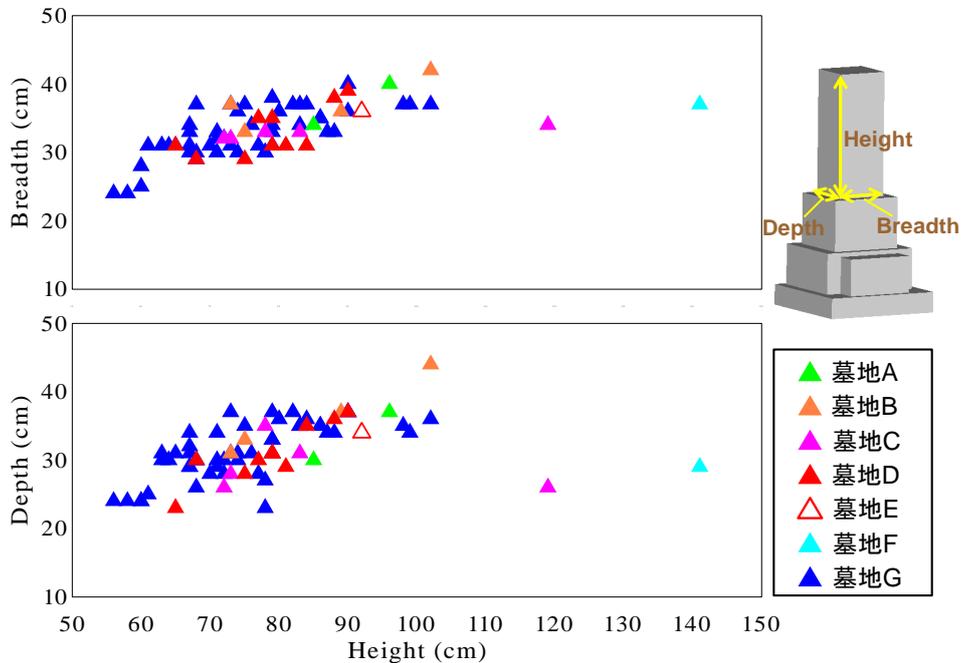


図-15 写真測量に基づく対象墓地内における棹石の寸法

(2) 墓石のモデル化

表-2は、本震直後に著者らが行った神城地区内の7つの墓地(墓地A~G: 図-7参照)における①墓石の総数、②転倒していた墓石の総数、③上記を踏まえて計算し

た墓石の転倒率(実績値)に関する一覧表である。ここに、上記7つの対象墓地は、各石を積み上げただけの無補強和型墓石によってのみ構成されている墓地であり、補強墓石が含まれている墓地は検討対象外とした。なお、

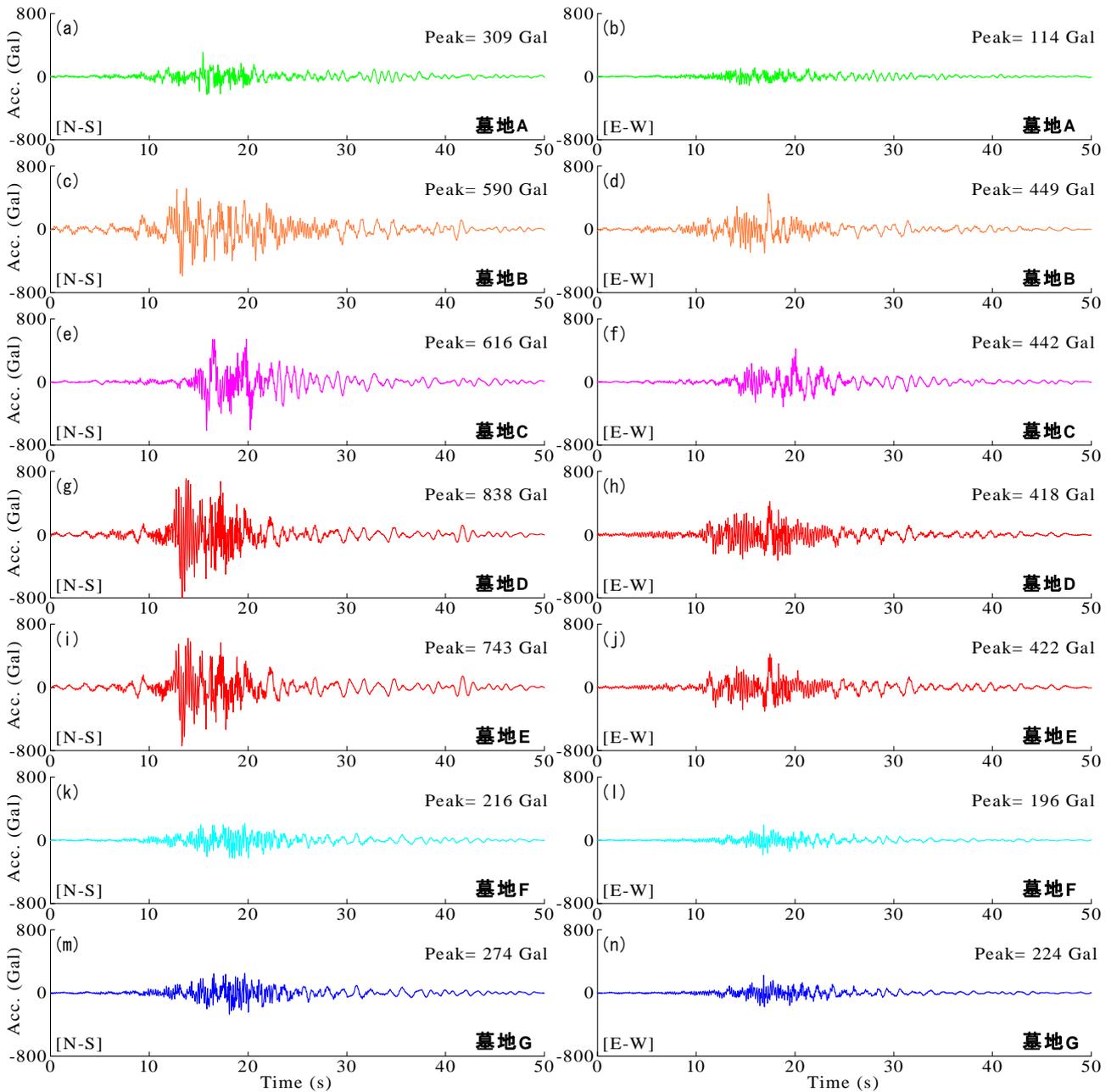


図-16 本震時における対象墓地での推定地震動の加速度時刻歴

表-3 墓石のDEM解析モデルパラメータの一覧¹⁴⁾

物性値パラメータ	墓石 (花崗岩)	台座 (コンクリート)
単位体積重量 (tf/m ³)	2.7	2.3
ヤング率 (kPa)	4.0×10 ⁷	2.0×10 ⁷
ポアソン比 (-)	0.25	0.20

表-2においては、新井・柏による調査研究^{28),29)}においても指摘されているとおり、段丘斜面³⁰⁾などの地盤の変状を主要因とする墓石の転倒結果が含まれていること(墓地C, D, E), 墓石の総数が比較的小ないために転倒率に関する信頼性が低いこと(墓地A, B, F), などに留意する必要がある。

図-8~図-14は、墓地A~Gにおける墓石を直方体要素

でモデル化したDEM解析モデルである。写真-1に一例を示すように、墓石の寸法については全て写真測量(本震後に実施)の結果に基づいている。ここに、写真測量の精度としては、一定精度が確保できていると考えられる1cm単位で撮影写真から読み取りを行った。写真測量により得られた結果の一例として、棹石の寸法を対墓地ごとに図-15に示す。表-3に示すように、墓石の単位体積質量、ヤング率、ポアソン比は、花崗岩(墓石)とコンクリート(台座:固定要素)の一般的な値³¹⁾を用いた。墓地A~Gは、いずれも無補強和型墓石であるため、墓石間の引張強度と粘着力はゼロとした。摩擦力の上限値を与える動摩擦係数は、既往の実験値³²⁾を参考に0.438とし、墓石~台座間についても墓石~墓石間と同じ値を用いた。計算時間間隔は、差分近似する際の解の収束性

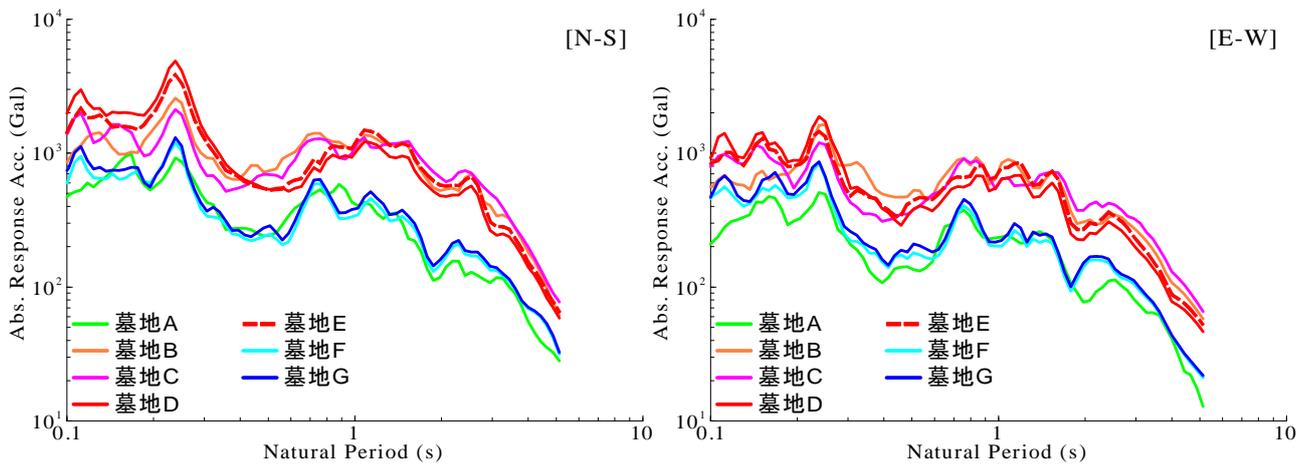


図-17 本震時における対象墓地での推定地震動の加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較

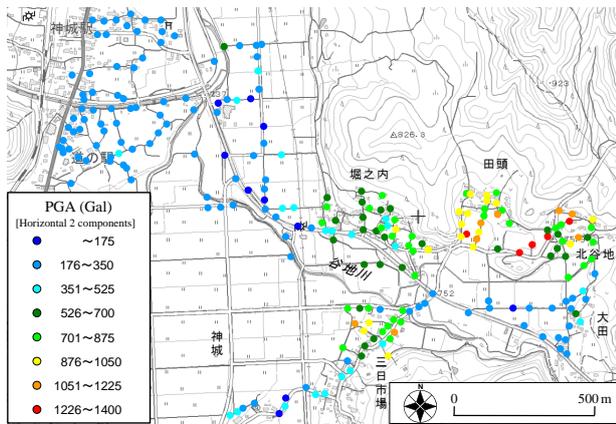


図-18 神城地区内における推定地震動のPGAの分布

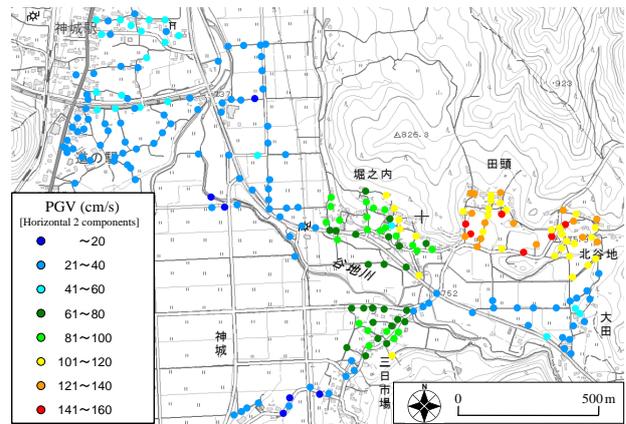


図-19 神城地区内における推定地震動のPGVの分布

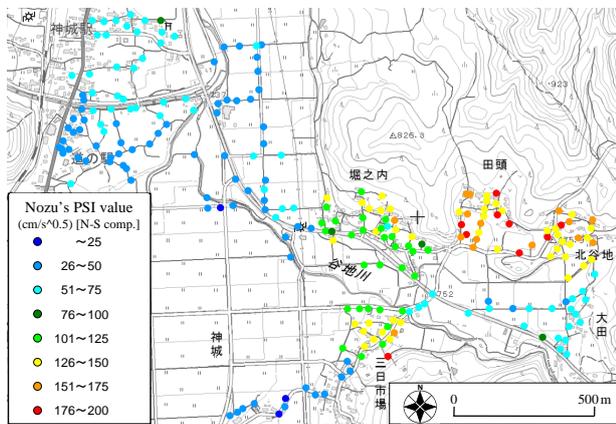


図-20 神城地区内における推定地震動のPSI値(N-S成分)の分布

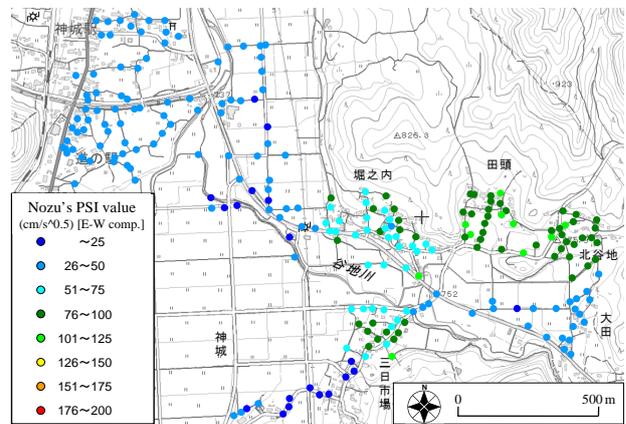


図-21 神城地区内における推定地震動のPSI値(E-W成分)の分布

および安定性を考慮して 1.0×10^5 sを採用³³⁾した。図-15と表-3を比較すると、神城地区内における墓石の寸法に大きな差異がないにも関わらず、墓石の転倒率には有意な差異があり、墓地ごとに作用した地震動の特性が大きく異なっていた可能性が高い。

(3) 墓地サイトでの推定地震動

図-16は、墓地A~Gにおける推定地震動(水平動)の加速度時刻歴である。図-17には、推定地震動による絶対

加速度応答スペクトル(減衰定数5%)の比較をN-SおよびE-W成分について示す。

墓地A~Gの位置情報(図-7参照)によって、地震基盤相当に作用する地震動特性、常時微動HVスペクトルに基づき評価されたサイト増幅特性(図-4参照)¹²⁾、EQ_1もしくはEQ_2による観測地震動に基づき評価されたサイト位相特性(図-6参照)の計三つの特性がそれぞれ異なることに起因して、図-16および図-17に示すとおり、墓地A~Gにおける推定地震動の特性(波形振幅、波形形状、

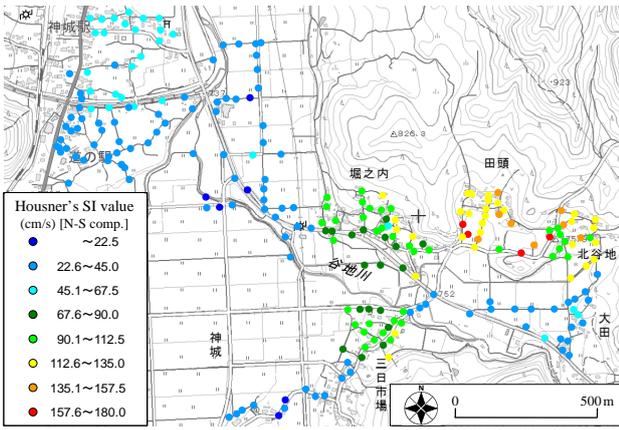


図-22 神城地区内における推定地震動のSI値(N-S成分)の分布

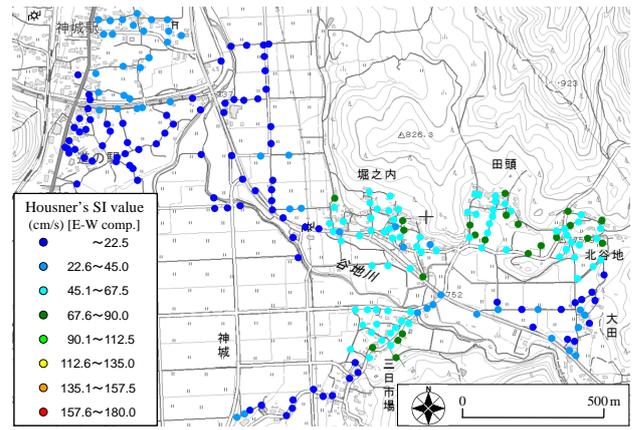


図-23 神城地区内における推定地震動のSI値(E-W成分)の分布

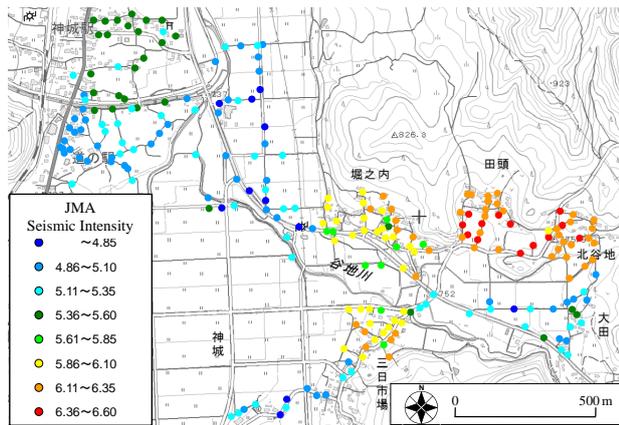


図-24 神城地区内における推定地震動の気象庁計測震度の分布

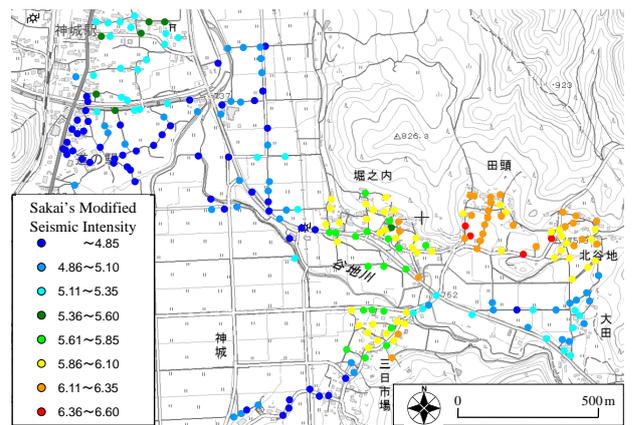


図-25 神城地区内における推定地震動の修正計測震度の分布

スペクトル形状など)に差異が生じている。一方で、墓地A~Gでは、推定地震動の特性だけでなく、3.(2)で述べたとおり、墓石の寸法(図-15参照)やその転倒率(表-1参照)にも違いが見受けられる。

そこで本稿では、地震動評価手法(2.参照)の適用性を更に高めるために、墓地A~Gにおける水平2成分の推定地震動(図-16参照)を入力波とした三次元DEMに基づく墓石の転倒解析¹³⁾を実施した。

(4) 解析結果

図-8~図-14および表-2には、墓地A~Gにおける墓石の転倒解析の結果および④墓石の転倒率(解析値)についても同時に示す。表-2に示すように、墓石の転倒率に関して③実績値と④解析値を比較すると、実績値に対して若干過小に評価しているものの、一定の精度で再現できている。過小評価している要因としては、本解析において、上述したように地盤変状の影響が考慮されていないこと、水平2成分の推定地震動を入力波として採用しているため鉛直地震動の影響を無視していること、などが挙げられる。上記の過小評価の要因を踏まえれば、墓地A~Gにおける墓石の転倒率に関する一定の再現性(表-2参照)は、2.で述べた地震動評価手法の適用性が高いことをあらためて示唆するものである。なお、墓石の転倒

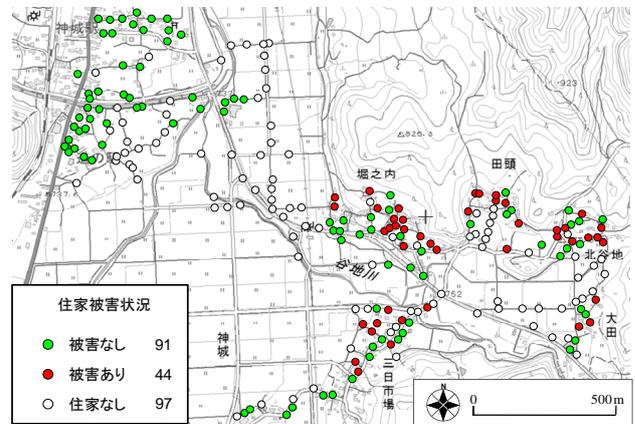


図-26 二価関数に基づく住家被害の有無に関する判定

方向に関する実績値と解析値の比較については、現地調査時に住民等から転倒した一部の棹石を地震後に意図的に移動させた旨のヒアリング結果を一部得たため、本稿では、墓石の転倒方向に関する検討を見送ることとした。

4. 推定地震動と被災・無被災実績の関係

(1) 推定地震動の分布

図-18~図-25は、本震時に神城地区内の各微動計測地

点(計232地点: 図-2参照)に作用した推定地震動の各種指標値(最大加速度PGA, 最大速度PGV, 速度PSI値²⁴⁾, SI値²⁵⁾, 気象庁計測震度²⁶⁾, 修正計測震度²⁷⁾)の分布である。ここに, 採用した指標は, 2.でも述べたとおり, 先行研究⁷⁾における観測波と推定波の比較により, 一定の精度で指標値を再現可能であることを確認済みである。

図-18~図-25に示すとおり, 神城地区内で住家の深刻な被害が報告²⁾されている堀之内・田頭集落・三日市場集落では, 比較的被害が軽微であった他集落(例えば, 飯田集落)と比較して, 推定地震動の指標値が明らかに大きくなっている。すなわちこれは, 神城地区内の被災集落に作用した本震時の地震動は, 同じ神城地区内の無被災集落などに作用した本震時の地震動よりも明らかに大きく, 住家の被災・無被災の実績に対して矛盾していないことを示唆するものである。

(2) フラジリティカーブの構築

地震動の大きさに応じた被災確率を評価する方法の一つとして, 本研究では, 2014年長野県神城断層地震における神城地区内での住家の被災・無被災実績(図-26参照)に対し, 最尤法³⁴⁾を適用してフラジリティカーブを求めた。具体的には, 地震動指標 I における被災確率 $F(I)$ は, 次式で表されると仮定する。

$$F(I) = \Phi[\ln(I/C)/\zeta] \quad (2)$$

ここに, Φ は標準正規分布の累積関数, C と ζ はそれぞれフラジリティカーブの地震動指標の中央値と対数標準偏差である。よって, 尤度関数 L は, N 個の地震動評価地点に対して次式で表される。

$$L = \prod_{i=1}^N [F(I_i)]^{x_i} [1 - F(I_i)]^{1-x_i} \quad (3)$$

ここに, 被災有と判定した地点に対しては $x_i=1$, 被災無と判定した地点に対しては $x_i=0$ である。したがって, パラメータ C および ζ は, 次式を満足するように算定した。

$$\frac{d \ln L}{dC} = \frac{d \ln L}{d\zeta} = 0 \quad (4)$$

図-26は, 地震動推定地点相当における住家被災の有無に関する分布である。住家被災の有無の判断については, 地震動推定地点に最も近い住家(135地点)を対象に, 文献³⁵⁾や著者ほかによる本震直後の調査結果に基づいて, 被災グレードD5, D4と判定³⁶⁾した住家(91地点)を被災有($x_i=1$), 被災グレードD3, D2, D1, D0と判定³⁶⁾した住家(44地点)を被災無($x_i=0$)とし, 被災の有無を二価関数(0または1)で評価した。なお, 近傍に住家が存在しないサイト増幅特性評価地点は対象外(97地点)とした。

表-4(上段および中段)に得られた回帰パラメータ(C および ζ)の一覧を示す。さらに, 図-27には, 神城地区内での住家の被災・無被災実績(図-26参照)に対し, フラジリティカーブを統計評価した結果を示す。ここで, フ

ラジリティカーブの評価において必要となる地震動指標については, 神城地区内での個別地点におけるサイト特性を考慮した推定地震波形が推定できており, 種々の地震動指標を採用した場合のフラジリティカーブの構築に関する検討が実施可能である点が本研究の強みであることから, 4.(1)で述べた8つの指標を採用した。

(3) 地震動指標の評価

図-27に示すフラジリティカーブには, 被害率³⁷⁾³⁸⁾についても同時に示している。ここに, 被害率³⁷⁾³⁸⁾は, 以下に示す手順で計算した。まず, 0または1の二価関数で表される被災の有無(図-26参照)と, それに対応する推定地震動の評価指標のデータ(総数: 135)を, 地震動指標の小さい順に並び替えた。次に, 並び替えたデータを地震動指標値が小さい順に順次15データずつ取っていった。最後に, 15データごとに被害率(被災有と判断した数/地点数(=15)), ならびに対応する推定地震動の評価指標の平均値を算出した。よって本検討では, 被害率のデータは計9個作成されることになり, 一つの被害率に15地点分の住家のデータが含まれていることになる。なお, 被害率は, 全体的には正の相関であるものの, SAF値が大きくなると被害率が頭打ち・低下している。この要因としては, 本稿では被害率算定の際に住家の耐震性能を一定と見なしていること, 段丘斜面の変状などの地盤災害³⁹⁾を伴う住家被害が含まれていること, などが最大の要因であると思われる。

図-27に示すように, フラジリティカーブと被害率の分布が概ね調和的であることから, 構築したフラジリティカーブは被災データを概ね説明できていることが読み取れる。特に, 修正計測震度は, 他の地震動指標と比較して, フラジリティカーブと被害率が良い一致を示している。地震動指標としては, 実被害をよく説明できること, すなわち実被害との適合度が相対的に高いことが必要となる。構築したフラジリティカーブ(図-27参照)による尤度 L (適合度)を各地震動指標について比較したものを表-4(下段)に示すが, 修正計測震度の尤度が最も高くなっているのが読み取れる。

よって, フラジリティカーブと被害率の一致度およびフラジリティカーブの尤度(適合度)を踏まえれば, 神城地区における住家の被災評価に最も有効な地震動指標として, 修正計測震度が挙げられる。境ほか²⁷⁾により提案されたこの指標は, 周期1.2-1.5sにおける速度応答スペクトルの平均値に基づいて計算される。すなわち, 一般的な住家等の建物被害の大小が, 線形時の固有周期における応答の大小よりも, 建物の塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期における地震応答の大小に左右されるとの実績に基づいており, 先行研究による知見と本研究で得られた成果は調和的であるといえる。

表4 フラジリティカーブの構築に伴い設定したパラメータの一覧, およびフラジリティカーブの適合度

地震動指標	水平2成分合成 最大加速度 PGA (Gal)	水平2成分合成 最大速度 PGV (cm/s)	気象庁 計測震度	境ほかの 修正計測震度	SI値 [N-S成分] (cm/s)	SI値 [E-W成分] (cm/s)	速度PSI値 [N-S成分] (cm/s ^{1/2})	速度PSI値 [E-W成分] (cm/s ^{1/2})
パラメータC	699	86.5	6.02	5.89	96.2	45.3	108	65
パラメータζ	0.15	0.15	0.03	0.03	0.12	0.20	0.15	0.14
尤度L (適合度)	38.1	39.2	40.9	36.7	39.7	43.3	41.2	41.4

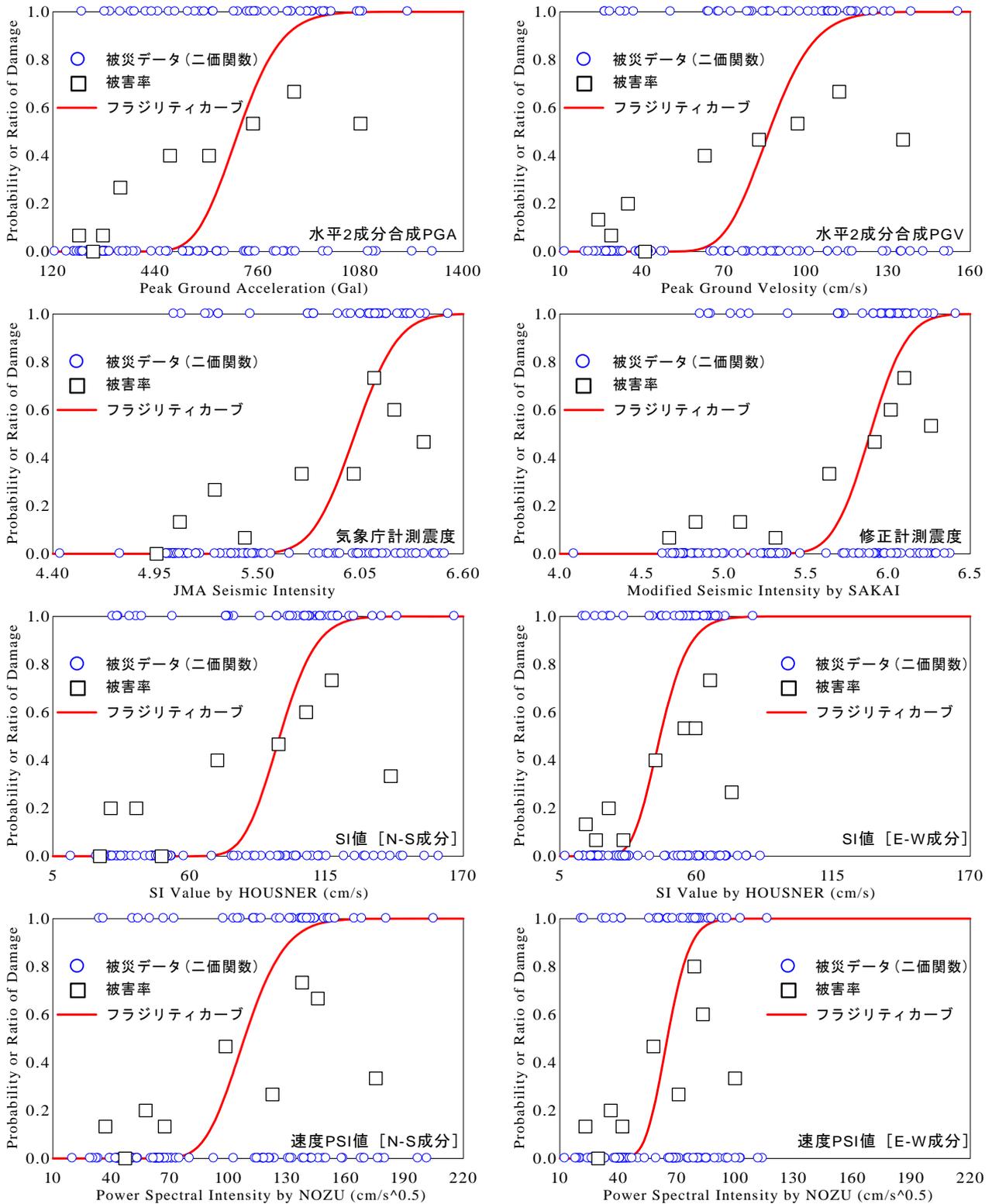


図-27 各種地震動指標に基づく神城地区内の住家被害に関するフラジリティカーブ

5. まとめ

本研究では、2014年長野県神城断層地震において白馬村神城地区に作用した強震動の分布を、臨時余震観測ならびに高密度常時微動計測の実施記録に基づいて広域かつ高密度に評価した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 神城地区内の墓地における推定地震動を入力波とした墓石の転倒解析(三次元 DEM 解析)に基づく転倒率は、実績値を一定の精度で再現可能である。
- (2) 上記(1)の知見は、観測地震動と推定地震動の比較に基づいて適用性が既に確認されている地震動推定手法について、神城地区に同手法を適用するにあたり、その適用性が更に高いことを示唆するものである。
- (3) 神城地区内において広域かつ高密度に推定した地震動は、その指標値(最大加速度, 最大速度, 速度 PSI 値, SI 値, 気象庁計測震度, 修正計測震度)に有意な差異が確認でき、この差異は、住家の被災・無被災実績に対して非常に調和的である。
- (4) 神城地区内における住家の被災・無被災実績に基づいてフラジリティカーブを構築した。このとき、実被害との適合度が比較的良好な地震動指標値は、修正計測震度である。

また、本研究で評価した 2014 年長野県神城断層地震による神城地区内での地震動は、動的解析などによる住家の耐震検討などへの利活用が期待できる。さらに、本研究で構築されたフラジリティカーブは、特定のサイト(ここでは神城地区)に特化したサイトスペシフィックなフラジリティカーブであり、同種の住家における地震被災の早期把握などの一助になることが期待できる。

謝辞: 常時微動計測などの現地調査の実施にあたり、白馬村役場の職員の皆様および神城地区の住民の皆様は大変お世話になりました。現地踏査の実施にあたっては山田雅行氏および住家被災調査の実施にあたっては羽田浩二氏(ともに(株)ニュージェック)にご協力いただきました。科学研究費補助金・若手研究A「超高密度地震観測に基づく宅地造成斜面におけるダイナミック地すべり挙動の広域的評価(15H05532)」の一部を使用しました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 長野県災害対策本部室：長野県神城断層地震による県内の被害状況等，平成 26 年 11 月 24 日災害情報プレスリリース，2014.
- 2) 小長井一男，吉見雅行，秦吉弥，後藤浩之，池田隆明：2014 年長野県北部の地震 地震被害調査速報，土木学会誌，Vol.100, No.2, pp.8-11, 2015.
- 3) 向坊恭介，佐藤英佑，鈴木祥之：木造建築物被害，日本地震工学会 2014 年長野県北部の地震に関する調査団報告，pp.72-86, 2015.
- 4) 例えば，牧加奈子，村田晶，秦吉弥，辻美佳子，宮

- 島昌克：長野県神城断層地震の被災地域における常時微動観測を利用した地震動推定，第 35 回地震工学研究発表会講演論文集，Paper No.842, 2015.
- 5) Hata, Y., Murata, A. and Miyajima, M.: Preliminary report on strong motion estimation at damaged and non-damaged clusters in Kamishiro District, Hakuba Village during a large earthquake ($M_{JMA}=6.7$) in northern Nagano Prefecture, central Japan, *Journal of JSCE Disaster Fact Sheets*, FS2015-E-0001, 2015. <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2015-E-0001> [Accessed Jan. 25, 2016]
- 6) Hata, Y., Nozu, A. and Ichii, K.: A practical method to estimate strong ground motions after an earthquake based on site amplification and phase characteristics, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.101, No.2, pp.688-700, 2011.
- 7) 秦吉弥，村田晶，野津厚，羽田浩二，山田雅行，宮島昌克，藤木昂，常田賢一：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2014 年長野県神城断層地震における白馬村神城地区での強震波形の広域評価，第 35 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.734, 2015.
- 8) 秦吉弥，村田晶，野津厚，宮島昌克：サイト特性置換手法に基づく 2011 年長野・新潟県境地震における栄村横倉集落での地震動の評価，日本地震工学会論文集，Vol.12, No.2, pp.60-77, 2012.
- 9) 秦吉弥，村田晶，野津厚，宮島昌克：2014 年長野県神城断層地震における特性化震源モデルの構築とその応用，土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集，I-223, pp.445-446, 2015.
- 10) Aoi, S., Kunugi, T., and Fujiwara, H.: Strong-motion seismograph network operated by NIED: K-NET and KiK-net, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.65-74, 2004.
- 11) 鷹野澄，額綱一起，工藤一嘉，古村孝志，山中佳子，ト部卓，土井恵治：首都圏強震動総合ネットワーク SK-net，記念シンポジウム「日本の強震観測 50 年」一歴史と展望一講演集，防災科学技術研究所資料，No.264, pp.119-122, 2005.
- 12) 藤木昂，秦吉弥，村田晶，山田雅行，羽田浩二，湊文博，常田賢一，古川愛子，一井康二：高密度常時微動計測に基づく長野県白馬村神城地区におけるサイト増幅特性の評価，第 35 回地震工学研究発表会講演論文集，土木学会，Paper No.735, 2015.
- 13) 古川愛子，三輪滋，清野純史，大塚久哲：基礎の剛性と接着剤の塗布面積が墓石の地震時挙動に及ぼす影響の解析的検討，応用力学論文集，土木学会，Vol.12, pp.469-480, 2009.
- 14) 秦吉弥，古川愛子，野口竜也，香川敬生：強震動推定の適用性確認のための墓石の転倒解析の活用に関する基礎的研究—2000 年鳥取県西部地震における墓地を例として—，土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp. L111-122, 2015.
- 15) 秦吉弥，一井康二，野津厚，古川愛子，常田賢一：経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2009 年駿河湾の地震における東名高速道路盛土崩落地点での地震動の推定，土木学会論文集 A, Vol.66, No.4, pp.673-690, 2010.
- 16) 秦吉弥，秋山充良，高橋良和，後藤浩之，野津厚，一井康二：SPGA モデルと経験的サイト増幅・位相特性を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震における

- 長町高架橋での地震動とフラジリティカーブの評価, 構造工学論文集, Vol.60A, pp.214-227, 2014.
- 17) 秦吉弥, 酒井久和, 静間俊郎, 野津厚, 一井康二, 丸山喜久: サイト特性を考慮した推定地震動に基づく堤防道路の通行機能に着目した被害関数の評価—大規模地震による鳴瀬川堤防の被災を例に一, 土木学会論文集 A1, Vol.71, No.4, pp.1_894-914, 2015.
 - 18) 野津厚: 2014年11月22日長野県北部の地震(M6.7)の震源モデル(暫定版)—デジタルデータ付き—, 港湾空港技術研究所地震防災研究領域 HP 研究ノート, 2015. [Accessed Jan. 25, 2016]
 - 19) 佐藤智美, 巽誉樹: 全国の強震記録に基づく内陸地震と海溝性地震の震源・伝播・サイト特性, 日本建築学会構造系論文集, No.556, pp.15-24, 2002.
 - 20) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎: 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No.512, pp.97-104, 1998.
 - 21) 野津厚, 長尾毅, 山田雅行: 経験的サイト増幅・位相特性を考慮した強震動評価手法の改良—因果性を満足する地震波の生成—, 土木学会論文集 A, Vol.65, No.3, pp.808-813, 2009.
 - 22) Boore, D. M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol.73, No.6A, pp.1865-1894, 1983.
 - 23) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子: 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 日本地震学会秋季大会講演予稿集, No.2, B25, 1997.
 - 24) 例えば, 野津厚, 井合進: 岸壁の即時被害推定に用いる地震動指標に関する一考察, 第28回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.18-19, 2001.
 - 25) Housner, G. W.: Intensity of earthquake ground shaking near the causative fault. *Proc. of 3rd World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, pp.94-115, 1965.
 - 26) Nishimae, Y.: Observation of seismic intensity and strong ground motion by Japan Meteorological Agency and local governments in Japan, *Jour. of Japan Association for Earthquake Engineering*, Vol.4, No.3, pp.75-78, 2004.
 - 27) 境有紀, 瀬瀬一, 神野達夫: 建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案, 日本建築学会構造系論文集, No.555, pp.85-91, 2002.
 - 28) 新井洋, 柏尚稔: 2014年長野県北部地震による白馬村神城地区の被害調査(その1), 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1737-1738, 2015.
 - 29) 柏尚稔, 新井洋: 2014年長野県北部地震による白馬村神城地区の被害調査(その2), 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.1739-1740, 2015.
 - 30) 吉川登代子, 秦吉弥, 村田晶, 山田雅行, 常田賢一: 高密度微動アレー計測による段丘斜面の震動特性の評価—長野県白馬村神城地区を例として—, 第18回斜面防災対策技術フォーラム'15 in 高松—若い技術者のために—講演集, 斜面防災対策技術協会, pp.45-48, 2015.
 - 31) 例えば, 岡田清, 小柳治, 明石外世樹: 土木材料学, 国民科学社(オーム社), 316p., 1998.
 - 32) 日本石材産業協会: 地震に強いお墓の報告書, 2006.
 - 33) Cundall, P. A.: Rational design of tunnel supports -A computer model for rock mass behavior using interactive graphics for the input and output of geometrical data-, *Technical Report MRD-2-74, Missouri River Division, U.S. Army Corps of Engineers*, 1974.
 - 34) 例えば, 中村孝明, 宇賀田健: 地震リスクマネジメント, 技報堂出版, 290p., 2009.
 - 35) 盛川仁, 後藤浩之, 吉見雅行, 飯山かほり, 竿本英貴: 余震観測・微動単点観測, 日本地震工学会2014年長野県北部の地震に関する調査団報告, pp.34-39, 2015.
 - 36) 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.
 - 37) 中村孝明, 長沼敏彦, 静間俊郎, 篠塚正宣: 統計解析による道路橋脚の地震時損傷確率に関する研究, 第10回地震工学シンポジウム論文集, pp.3165-3170, 1998.
 - 38) 秦吉弥, 酒井久和, 静間俊郎, 常田賢一, 湊文博, 吉川登代子: 既往の大規模地震における鳴瀬川堤防沿いでの推定地震動と被害率の関係, 土木学会第70回年次学術講演会講演概要集, I-224, pp.447-448, 2015.

(2015.10.25 受付, 2016.2.27 修正, 2016.2.29 受理)

EVALUATION OF STRONG MOTION AND FRAGILITY CURVE IN KAMISHIRO DISTRICT, HAKUBA VILLAGE, NAGANO PREFECTURE FOR THE 2014 NORTHERN NAGANO PREFECTURE EARTHQUAKE

Akira FUJIKI, Yoshiya HATA, Aiko FURUKAWA, Akira MURATA,
Fumihiko MINATO, Ken-ichi TOKIDA and Masakatsu MIYAJIMA

In Kamishiro District, a residential area in Hakuba Village, serious damage of many wooden houses was caused by the 2014 Northern Nagano Prefecture Earthquake ($M_j6.7$). To better understand the mechanism of the damage, it is necessary to have a better understanding on the seismic response of the residential area during the 2014 main shock with high accuracy by taking into account local site effects. In this study, we first estimated the seismic waveforms at 232 sites in the area. Next, we carried out 3-D DEM calculation of tombstone at 7 graveyard sites in the area, in order to confirm the applicability of the estimated waveforms. Based on the estimated waveforms, finally, we discussed the characteristics of ground motion which influenced the seismic damage of the wooden house. The estimated waveforms and obtained findings will be useful in future study on seismic performance evaluation of a wooden house.