

2018 年, 2019 年に発生した地殻内地震の観測記録による木造建物の最大応答変形角の評価

西川 隼人¹・野口 竜也²・池本 敏和³・梅田 貴仁⁴・杉山 敬亮⁵
宮島 昌克⁶

¹ 正会員 福井工業大学工学部建築土木工学科 准教授 (〒910-8505 福井県福井市学園3丁目6番1号)
E-mail: nishikawa@fukui-ut.ac.jp

² 正会員 鳥取大学工学研究科社会基盤工学専攻 助教 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4丁目101番地)
E-mail: noguchit@cv.tottori-u.ac.jp

³ 正会員 金沢大学理工研究域地球社会基盤学類 講師 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: tikemoto@se.kanazawa-u.ac.jp

⁴ 非会員 株式会社 IHI インフラシステム (〒590-0977 大阪府堺市堺区大浜西町3番地)

⁵ 非会員 三気建設株式会社 (〒501-0552 岐阜県揖斐郡大野町大字大衣斐264)

⁶ 正会員 金沢大学理工研究域地球社会基盤学類 教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
E-mail: miyajima@se.kanazawa-u.ac.jp

本研究では 2018 年, 2019 年に発生した M6 クラスの地殻内地震の地震観測記録を用いて, 木造建物の最大応答変形角の予測式を求めた. まず, 各対象地震に対して, 性能等価加速度応答スペクトルと観測記録から計算した加速度応答スペクトルによって木造建物の最大応答変形角を評価し, 実被害との対応を考察した. 次に震源特性, 伝播経路特性, 地盤増幅特性を考慮し, 表層 30m の平均 S 波速度をパラメータとする最大応答変形角の予測式を求めた. 予測式を求めた結果, 最大応答変形角の観測値と予測値の相関係数は 0.7~0.9 という, 良好な値となった.

Key Words : crustal earthquake, wooden building, maximum response deformation angle

1. 序論

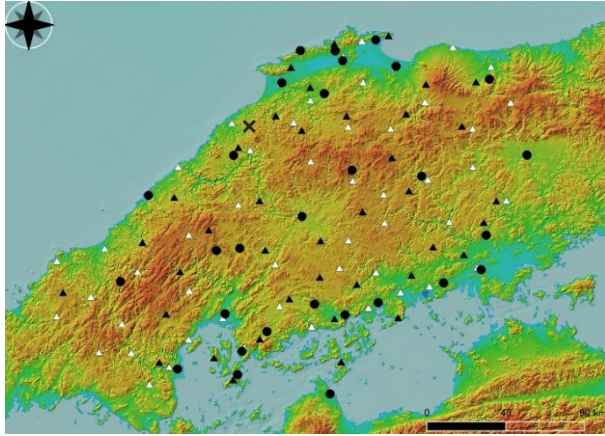
2018 年から 2019 年にかけて, 4 つの M6 クラスの地殻内地震 (2018 年島根県西部の地震, 2018 年大阪府北部の地震, 2018 年北海道胆振東部地震, 2019 年山形県沖の地震) が発生し, 地震によって被害程度は異なるが, 木造建物などに多数の被害が生じた^(例えば 1)~4). 特に 2018 年北海道胆振東部地震では最大で震度 7 の揺れを観測し, 震源付近では地震動により倒壊, 全壊した木造建物が複数見られた^(例えば 5). M6 クラスの地殻内地震でも内陸部で発生した場合は震源距離が小さいため, 大きな被害が生じる恐れがあることから, M6 クラスの地震を対象に, 地震動を構成する伝播経路特性や地盤増幅特性が木造建物の被害程度に及ぼす影響を把握し, 被害程度を精度良く評価することが重要である.

著者の一部⁶⁾は $M_{JMA}=6.6$ の 2016 年鳥取県中部の地震を対象に, 性能等価加速度応答スペクトル⁷⁾と加速度応

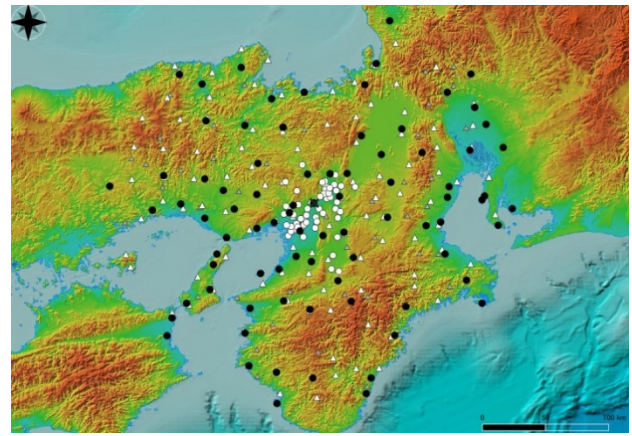
答スペクトルの関係をもとに, 震源特性, 伝播経路特性, 地盤増幅特性を考慮して木造建物の最大応答変形角を評価する手法を提案しており, 精度良く最大応答変形角を評価できることを示している. 提案手法を用いれば, 地震観測点以外の地点でも最大応答変形角の評価が可能となり, 実被害との対応を調べる際などに有用であると考ええる. ただし, 検討対象地震は中国地方で発生した 1 地震のみであり, 解析対象範囲は断層最短距離が 56km 以下という狭い範囲であった. 提案した評価手法が他地域で発生した M6 クラスの地殻内地震に対しても適用可能か検証する必要があるが, 2018 年北海道胆振東部地震のように震源距離が 60km 以上の地点でも震度 6 弱程度の揺れが生じる可能性があることから, より広範囲を対象とした評価が必要と考える. また, 提案した最大応答変形角の予測式は常時微動の H/V を評価した地点を想定したが, 常時微動を測定していない地点でも最大応答変形角を評価できることが望ましい.

表-1 解析対象地震

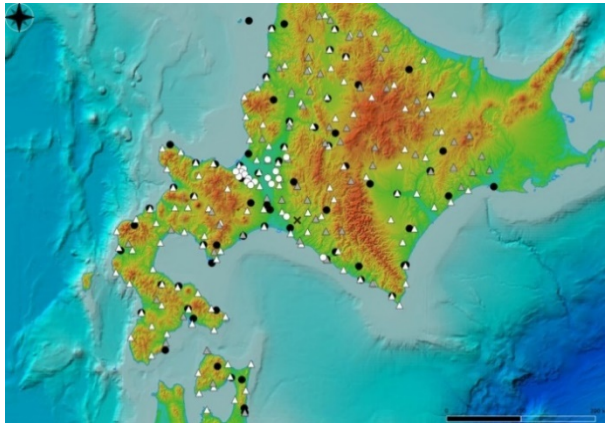
震央地名	地震発生日時	緯度 (°)	経度 (°)	深さ (km)	M_{JMA}	M_w	最大震度	気象庁	自治体	K-NET	KiK-net	解析対象範囲(km)
島根県西部	2018/4/9 1:32:31	35.1847	132.5867	12	6.1	5.6	6弱	29	0	60	40	132
大阪府北部	2018/6/18 7:58:34	34.8443	135.6217	13	6.1	5.5	6弱	82	52	110	52	125
胆振地方中東部	2018/9/6 3:07:59	42.6900	142.0067	37	6.7	6.6	7	68	17	140	62	200
山形県沖	2019/6/18 22:22:20	38.6067	139.4783	14	6.7	6.4	6強	80	7	108	67	185



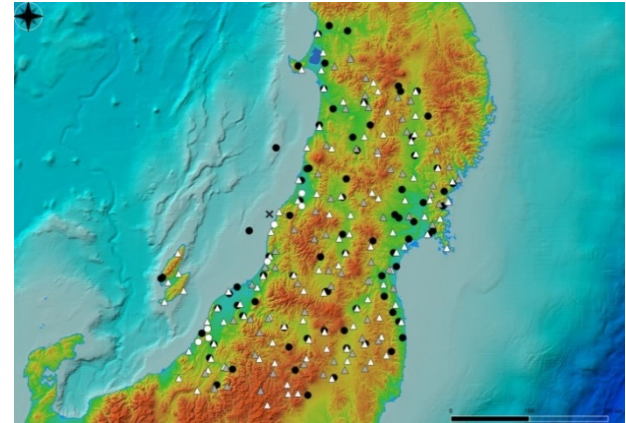
(1) 2018年島根県西部の地震



(2) 2018年大阪府北部の地震



(3) 2018年北海道胆振東部地震



(4) 2019年山形県沖の地震

図-1 解析対象地震の震央と地震観測点の分布 (●: 気象庁, ○: 自治体, △: K-NET, ▲: KiK-net)

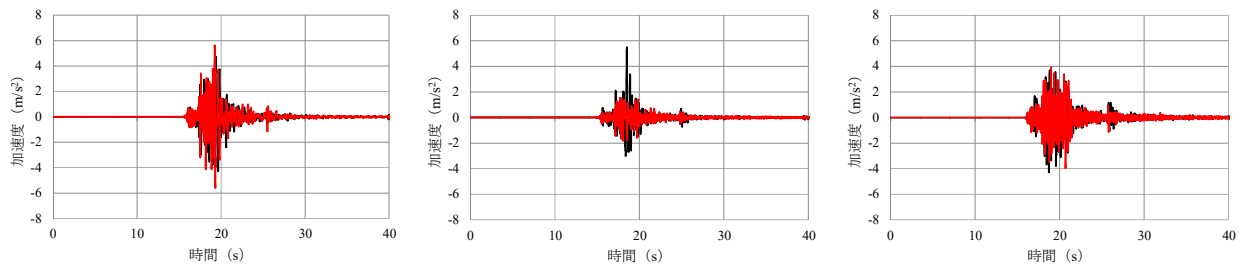
本研究では 2018 年, 2019 年に発生した 4 つの M6 クラスの地殻内地震を対象に, 著者ら⁹⁾の提案した木造建物被害予測式を基本としつつ, 解析対象範囲の拡張や地盤増幅特性のパラメータを変更した最大応答変形角予測式を求めることにより, 提案した被害評価手法の適用性を調べた. 以下に既往研究と本研究で求めた予測式の違いをまとめる.

- 1) 既往研究⁹⁾では単一の地震を対象としたが, 複数の M6 クラスの地震を対象とした.
- 2) 解析対象範囲を拡げ, 地震規模に応じて, 震源距離または断層最短距離が 125~200km 以内の地点を解析対象とした.
- 3) 佐藤・巽⁹⁾の研究において地殻内地震では震源距離による幾何減衰の変化が指摘されていることから, 特定の距離を境に幾何減衰の勾配を変化させた.
- 4) 常時微動未測定地点を評価対象とするために, 日

本全国で推定値が公開されている表層 30m の平均 S 波速度を予測式のパラメータとして用いた.

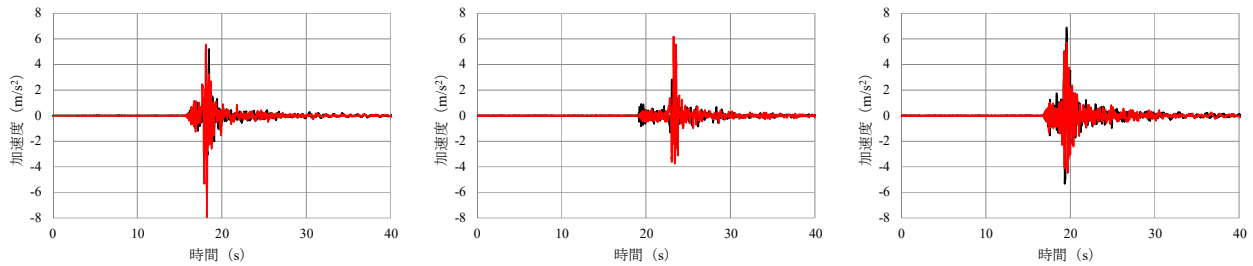
検討において, まず, 各地震の地震波形や応答スペクトルの特徴を調べるとともに, 性能等価加速度応答スペクトル⁷⁾により木造建物の被害指標の一つである最大応答変形角を求めた. また, 各解析対象地震に対して, 断層最短距離と最大応答変形角の関係を調べることで, 木造建物の耐震性に応じた最大応答変形角の距離減衰特性を考察した.

続いて, 解析対象とした 4 つの地震の観測記録を用い, 最大応答変形角予測式を求めた. 既往研究⁹⁾の式では地盤増幅特性として微動 H/V のピーク振動数を用いたが, 微動未測定地点に対しても最大応答変形角を評価するために, 推定値が公開されている表層 30m の平均 S 波速度を用いた. さらに予測式において距離による地震動の幾何減衰の変化を考慮し, 著者らの研究で提案した最大



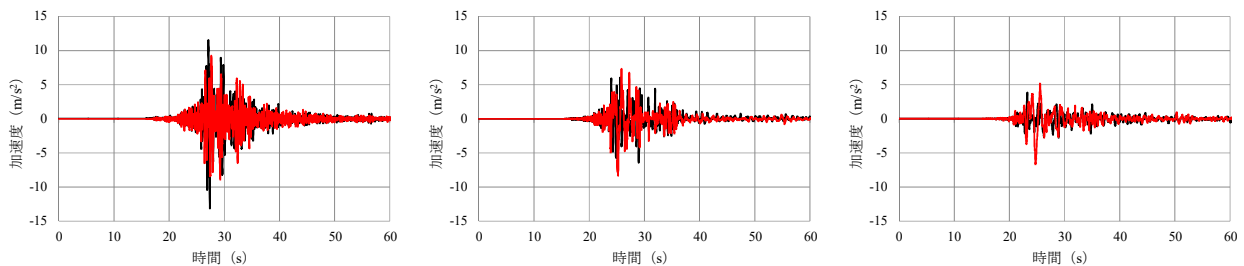
(1) K-NET 大田 (SMN006, $I_{Ma}=5.5$) (2) KiK-net 邑智 (SMNH04, $I_{Ma}=5.3$) (3) K-NET 邑智 (SMN007, $I_{Ma}=5.1$)

図-2 2018年島根県西部の地震の加速度波形 (NS成分: 黒線, EW成分: 赤線)



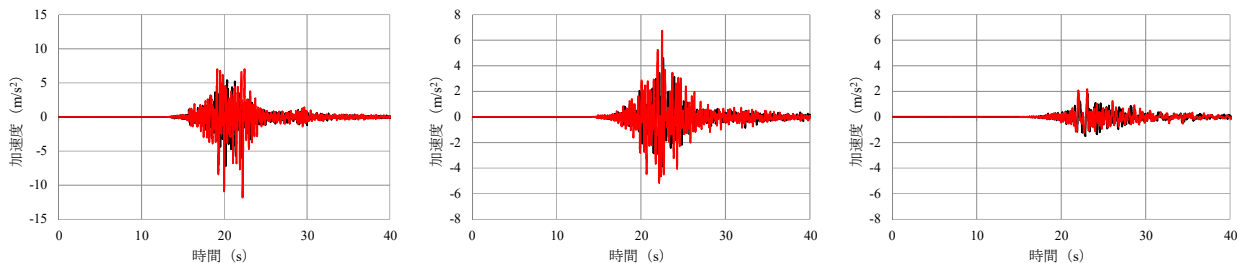
(1) K-NET 高槻 (OSK002, $I_{Ma}=5.6$) (2) 大阪北区茶屋町 ($I_{Ma}=5.6$) (3) 枚方市大垣内 ($I_{Ma}=5.6$)

図-3 2018年大阪府北部の地震の加速度波形 (NS成分: 黒線, EW成分: 赤線)



(1) KiK-net 追分 (IBUH01, $I_{Ma}=6.7$) (2) 厚真町鹿沼 ($I_{Ma}=6.5$) (3) K-NET 鶴川 (HKD126, $I_{Ma}=6.4$)

図-4 2018年北海道胆振東部地震の加速度波形 (NS成分: 黒線, EW成分: 赤線)



(1) 村上市府屋 ($I_{Ma}=6.1$) (2) 鶴岡市温海川 ($I_{Ma}=5.8$) (3) K-NET 鶴岡 (YMT003, $I_{Ma}=5.3$)

図-5 2019年山形県沖の地震の加速度波形 (NS成分: 黒線, EW成分: 赤線)

応答変形角の評価手法が今回対象とした地震においても適用可能かを調べた。

2. 解析対象地震と地震観測記録

表-1 に解析対象とした地震の情報と解析対象の気象庁, 自治体, K-NET, KiK-net 観測点の内訳, 図-1 に解析対象とした地震の震央と地震観測点の分布を示す。表-1 の解析対象範囲は各地震で対象とした断層最短距離の上限値であり, 福島・田中の距離減衰式⁹⁾から計算した最大地動加速度が 0.1m/s^2 に対応する距離とした。計

算に必要なモーメントマグニチュード M_w は F-net¹⁰⁾で公開されている値を用いた。なお, 解析対象とした地震観測点の断層最短距離として, 2018 年島根県西部の地震は震源距離, 他の 3 つの地震は文献 11)~13)の断層モデルをもとに計算した断層最短距離を用いた。

図-2~図-5 に各解析対象地震の計測震度上位 3 つの観測点の加速度波形を示す。キャプションの括弧内は観測点コード (K-NET, KiK-net のみ) と計測震度 I_{Ma} である。加速度波形の特徴を見ると, 2018 年島根県西部の地震の KiK-net 邑智 (SMNH04) は NS と EW 成分の最大加速度が大きく異なっている。2018 年大阪府北部の地

震の加速度波形は主要動が他の3地震に比べて短い傾向にあり、地震規模が影響を及ぼしていると考えられる。2018年北海道胆振東部地震において $I_{MA}=6.7$ のKiK-net追分(IBUH01)は最大加速度が 10m/s^2 を超える大きな値となっている。一方、K-NET 鶴川(HKD126)は加速度はKiK-net追分(IBUH01)と比較して小さいものの、EW成分に明瞭なパルス波が見られる。2019年山形県沖の地震の波形を見ると自治体観測点の村上市府屋と気象庁の鶴岡市温海川では短周期成分が卓越している。K-NET 鶴岡(YMT003)の最大加速度は計測震度が等しい図-2(2)のKiK-net 邑智の1/3程度しかない。これは後に示す図-10の加速度応答スペクトルから明らかのように、短周期成分が相対的に小さいためだと考えられる。

3. 木造建物の最大応答変形角の評価と分析

(1) 性能等価加速度応答スペクトル

最大応答変形角 R の評価には林⁷⁾が提案した性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} を用いた。性能等価加速度応答スペクトルは限界耐力計算¹⁴⁾に基づいて建物の耐震性能を等価な地震動で表したものであり、地震観測記録から求めた加速度応答スペクトル S_a との対応から簡便に木造建物の最大応答変形角を求めることができる。

図-6に示す固有振動数 f_e でバイリニアの復元力特性を持つ木造建物モデルの性能を等価な地震荷重に換算した性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} ¹⁵⁾は次式で表される。

$$S_{ae} = \frac{C_y g}{\mu F_h} \quad (1)$$

C_y はベースシア係数、 g は重力加速度、 μ は有効質量比であり0.9¹⁵⁾とした。加速度低減率 F_h ⁷⁾は式(2)で表される。

$$F_h = \frac{1.5}{1 + 10\{\lambda(1 - \sqrt{R_y/R}) + 0.05\}} \quad (2)$$

λ は既往研究⁷⁾をもとに0.2とした。 R_y は降伏変形角であり、本研究では R_y の値を既往研究⁷⁾で複数の構造要素実験を元に設定された値(1/100)にした。また、固有振動数 f_e は以下の関係式¹⁴⁾により求めた。

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_y g}{\mu H_e R_y \left\{ \left(1 + 9(R/R_y)^{0.7} \right) / 10 \right\}}} \quad (R \leq R_y) \quad (3)$$

$$f_e = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_y g}{\mu H_e R}} \quad (R > R_y) \quad (4)$$

H_e は建物の等価高さであり、4.5m¹⁵⁾とした。

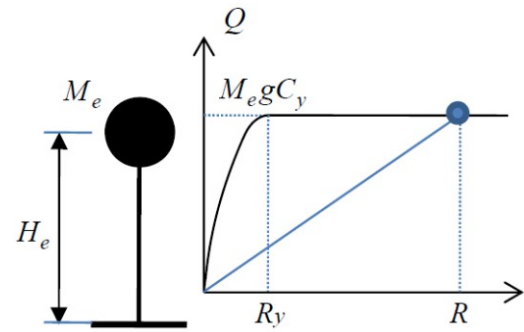


図-6 木造建物モデルと復元力特性¹⁵⁾

(2) 最大応答変形角の評価

図-7～図-10にある固有周期 T_e ($1/f_e$)に対する性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} (凡例の $C_y=0.1\sim1.0$)と図-2～図-5の加速度波形から求めた加速度応答スペクトル S_a を示す。 S_a は加速度波形の全区間を対象に計算した。 S_{ae} は最大応答変形角 $R=1/100\sim1/5$ に対応する値であり、 S_a との交点から R を求めた。

図-7の2018年島根県西部の地震の S_{ae} と S_a を見ると、最大震度を記録したK-NET 大田(SMN006)は $C_y=0.1\sim1.0$ の範囲で最大応答変形角が $1/100\sim1/60$ となっており、本研究で設定した降伏変形角 R_y (1/100)を上回っている。KiK-net 邑智(SMNH04)はNS成分とEW成分の加速度応答スペクトルの振幅が大きく異なっており、NS成分の $C_y=0.4\sim1.0$ における最大応答変形角が $1/100\sim1/60$ である。K-NET 邑智(SMN007)は S_{ae} と S_a が交わっておらず、最大応答変形角が1/100未満である。

図-8の2018年大阪府北部の地震で震度6弱を記録した3観測点の応答スペクトルを見ると、いずれもNS、EW成分で振幅や形状が大きく異なっている。K-NET 高槻(OSK002)ではEW成分がNS成分よりも振幅が大きく、 $C_y=0.1$ では最大応答変形角が $1/60\sim1/30$ 、 $C_y=0.2$ 以上では $1/100\sim1/60$ である。K-NET 高槻周辺では木造建物の瓦屋根の被害が報告されている¹⁶⁾。大阪北区茶屋町は $C_y=0.1\sim0.3$ では両成分、 $C_y=0.4\sim1.0$ ではEW成分により最大応答変形角が1/100以上の値となっている。枚方市大垣内は周期0.8秒以上ではEW成分、0.8秒以下ではNS成分の方が最大応答変形角が大きくなっている。

図-9の2018年北海道胆振東部地震の S_{ae} と S_a を見ると、KiK-net 追分(IBUH01)のNS成分の加速度応答スペクトルが周期0.5秒で 50m/s^2 に近い非常に大きな値だが、周期1秒前後の応答スペクトルは極端に大きくないため、最大応答変形角は最大でも1/30程度である。既往の研究でも観測点周辺の建物に大きな被害は報告されていない⁵⁾。気象庁の厚真町鹿沼とK-NET 鶴川(HKD126)はEW成分の周期1～2秒の加速度応答スペクトルが大きく、 C_y によっては最大応答変形角が1/10を超えている。

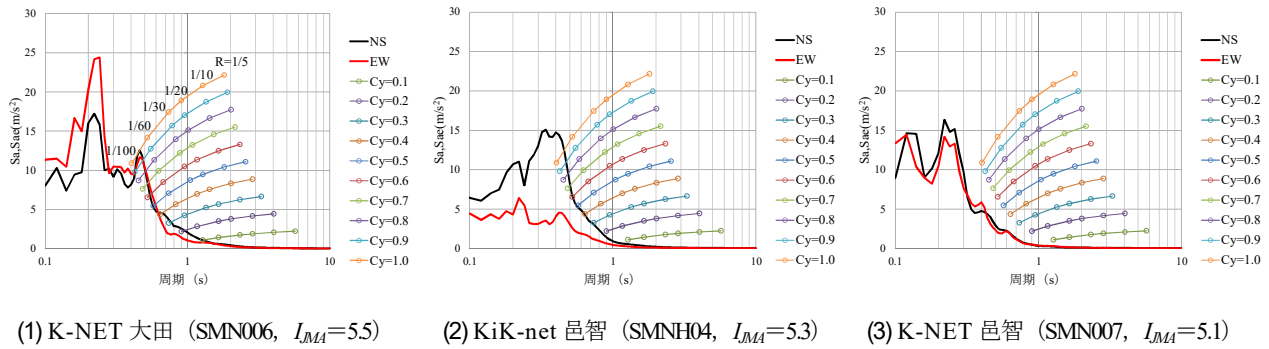


図-7 2018年伊勢根西部の地震の加速度応答スペクトルと性能等価加速度応答スペクトル

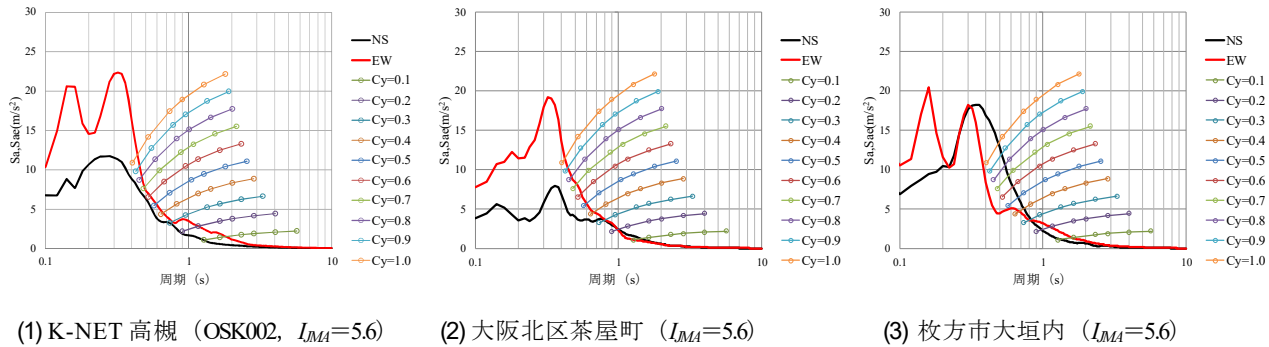


図-8 2018年大阪府北部の地震の加速度応答スペクトルと性能等価加速度応答スペクトル

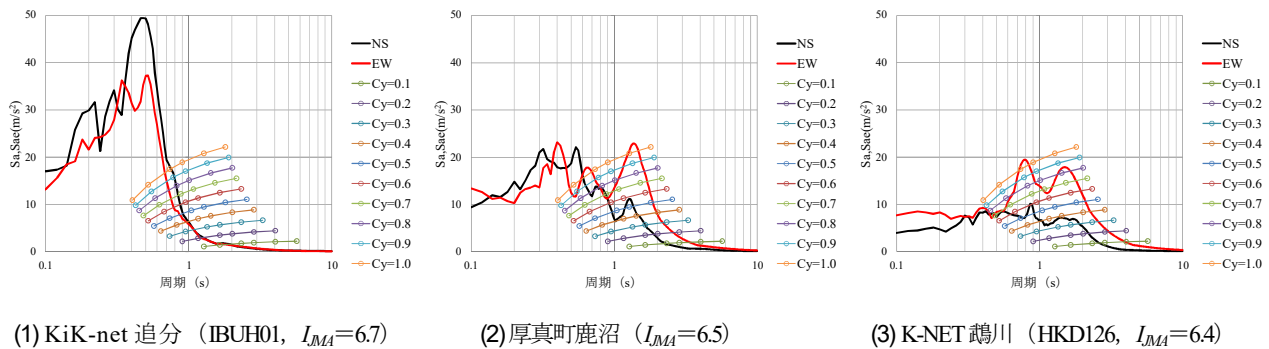


図-9 2018年北海道胆振東部地震の加速度応答スペクトルと性能等価加速度応答スペクトル

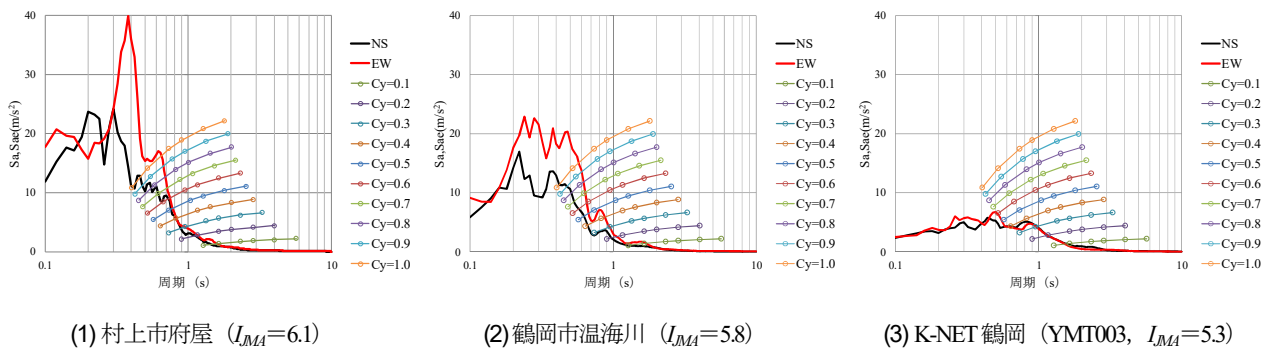


図-10 2019年山形県沖の地震の加速度応答スペクトルと性能等価加速度応答スペクトル

むかわ町に位置する K-NET 鶴川 (HKD126) 周辺では複数の木造建物の大きな被害が報告されており、中澤他⁵⁾によると観測点から 200m 以内の木造全壊率は 6.7%であった。一方、気象庁の厚真町鹿沼は観測点から 200m 以内で木造社殿が倒壊したが、それ以外の木造建物 8 棟には大きな被害が出なかったことが報告されている⁵⁾。

図-10の2019年山形県沖の地震の S_{ae} と S_a を見ると、最

大震度6強を記録した村上市府屋ではEW成分の周期0.4秒付近で振幅が大きい、この周期付近の S_a は S_{ae} と交わっておらず、周期0.6~0.8秒の S_a によって $C_y=0.4$ 以上の最大応答変形角が1/60以上になっている。気象庁の鶴岡市温海川はEW成分の加速度応答スペクトルがNS成分より大きい傾向にあり、いくつかの C_y で最大応答変形角が1/60以上となっている。K-NET鶴岡 (YMT003) は

$C_y=0.1\sim0.3$ で最大応答変形角が1/100以上となっている。これらの地震観測点周辺では建物の被害調査が行われており¹⁷⁾、いずれの地震観測点周辺でも建物に大きな被害が見られなかった。周辺建物の瓦被害に着目すると、観測点から200m以内の建物棟数が100棟以上の村上市府屋とK-NET鶴岡における周辺建物の屋根瓦の被害率は村上市府屋が31.0%であるのに対して、K-NET鶴岡は0%であった。瓦被害と相関の高い周期0.1~1秒¹⁸⁾の加速度応答スペクトルを見ると、村上市府屋はこの周期帯の振幅が周期1秒以上に比べて明らかに大きい、K-NET鶴岡は周期0.1~1秒の振幅が周期1~2秒よりも小さい周期帯も見られる。このような周期0.1~1秒の地震動強さが瓦被害の差異の要因になった可能性がある。

(3) 最大応答変形角の分布と距離減衰特性

図-11~図-14に各地震の $C_y=0.1, 0.3, 0.6, 1.0$ の場合の最大応答変形角の分布図、図-15に各地震の断層最短距離(2018年島根県西部の地震は震源距離)と最大応答変形角の対応を示す。最大応答変形角はNS成分、EW成分の大きい方の値とした。

図-11の2018年島根県西部の地震の最大応答変形角の分布を見ると、 $C_y=0.1$ の場合は震央北東の出雲平野の2地点で最大応答変形角が相対的に大きく、1/100以上となっているが、 $C_y=0.3$ 以上では震央の西側で最大応答変形角が1/100を超えている。

図-12の2018年大阪府北部の地震では震央付近の地点で最大応答変形角が大きく、 $C_y=0.1, 0.3$ の場合は最大応答変形角が1/60~1/30の地点が複数見られるが、 C_y が大きくなるにつれて、最大応答変形角が1/100以上の地点が減っていることが分かる。

図-13の2018年北海道胆振東部地震の最大応答変形角分布の特徴を見ると、いずれの C_y でも最大応答変形角が1/30を超える地点が見られる。また、 $C_y=0.1$ では震央の北西から南東の地域において最大応答変形角が1/60~1/30の地点が複数見られ、北西の札幌市では最大応答変形角が1/30を超える地点もある。 C_y が大きくなるほど、全体的に見て1/100以上の地点が減っているが、震央付近では C_y が大きくなっても、最大応答変形角が1/30を超える地点が見られる。

図-14の2019年山形県沖の地震の最大応答変形角分布を見ると、震央付近の地域で最大応答変形角が大きく、東から北東で1/60以上の地点が複数見られる。また、 C_y が大きくなるほど、最大応答変形角が1/100以上の地点が減少していることが分かる。

続いて、図-15の断層最短距離と最大応答変形角の対応を見ると、いずれの地震も C_y が大きくなるほど(耐震性が高くなるほど)、最大応答変形角が全体的に小さくなる傾向にあり、その結果、見かけ上、距離による減

衰の勾配が大きくなっている。 $C_y=0.1$ の場合、地震によって程度が異なるが、遠方でも最大応答変形角が相対的に大きいデータが見られる。 $C_y=0.1$ の最大応答変形角は加速度応答スペクトルの長周期側の振幅の影響が大きい、表面波による長周期成分の影響により、断層最短距離が大きい場合でも最大応答変形角が大きくなった可能性が考えられる。2019年山形県沖の地震では $C_y=0.1$ だけでなく、0.3, 0.6の場合も断層最短距離=100km前後で最大応答変形角が大きなデータが複数見られることから、表面波以外の影響も考えられる。この特徴については後述する最大応答変形角の予測式で検討した。

4. 最大応答変形角の予測式

(1) 解析結果

本研究では著者の一部⁹⁾が提案した木造建物の最大応答変形角評価手法の適用性を調べるために、2018年、2019年に発生した4つの地震を対象に最大応答変形角予測式を求めた。

著者の一部⁹⁾は地震動推定を行わずに、震源スペクトル、伝播経路特性、地盤増幅特性により表した加速度応答スペクトルと最大応答変形角の関係をもとに直接的に木造建物の最大応答変形角を評価する式を導いている。この式では地盤増幅特性の評価のために常時微動のH/Vを利用しているが、本研究では常時微動未測定地点に対しても木造建物の最大応答変形角を評価するために、推定値が公開されている表層30mの平均S波速度 V_{s30} をパラメータとして用いた。

また、幾何減衰項において、佐藤・巽⁸⁾を参考にある距離 X_r を境に減衰を変化させた。本研究では X_r を40~150kmまで変化させて、回帰分析を行った。以下に最大応答変形角の予測式を示す。

$X < X_r$ の場合

$$\log R = c_1 - \log(X^2 + s) + c_2 X + c_3 \log V_{s30} \quad (5)$$

$X \geq X_r$ の場合

$$\log R = c_1 - \log(X \cdot X_r + s) + c_2 X + c_3 \log V_{s30} \quad (6)$$

$c_1 \sim c_3$ は回帰係数である。震源近傍での地震動の頭打ちを考慮するために、式(5)、(6)の第2項の幾何減衰項に定数 s を導入している。第3項は粘性減衰と散乱減衰に対応している。

第4項の V_{s30} はK-NET観測点では地表から深さ10~20mまでしかS波速度の情報が公開されていないため、式(7)の経験式¹⁹⁾によって、 V_{s30} を求めた。

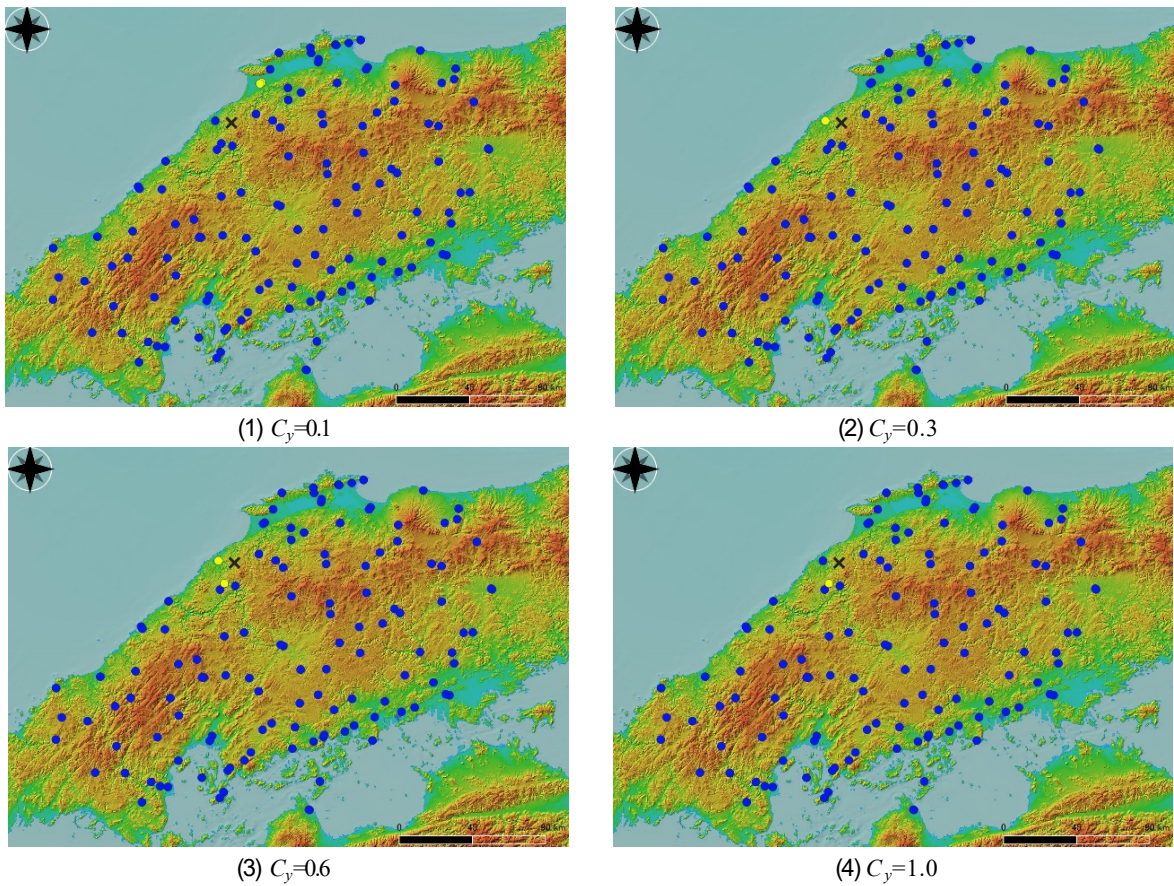


図-11 2018年島根県西部の地震の最大応答変形角分布 (●1/100未満, ●1/100以上1/60未満, ●1/60以上1/30未満, ●1/30以上)

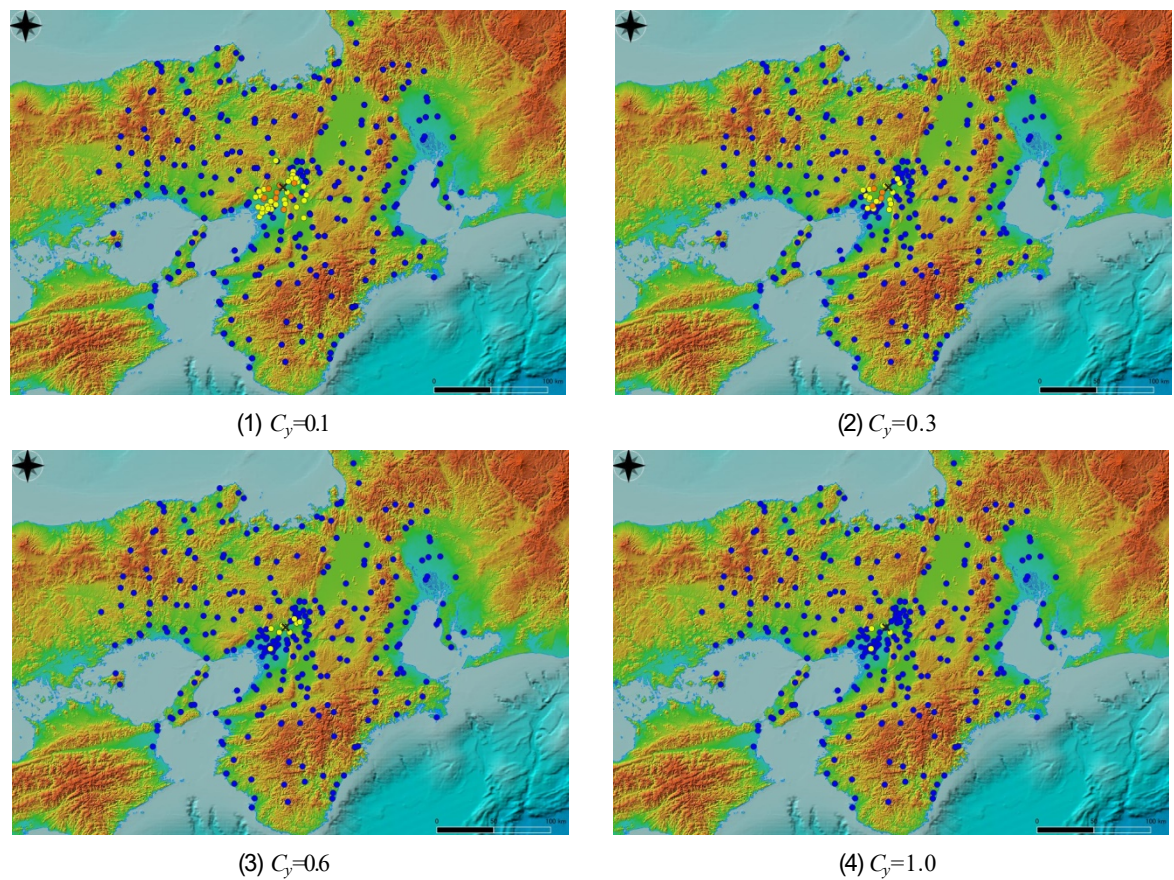


図-12 2018年大阪府北部の地震の最大応答変形角分布 (●1/100未満, ●1/100以上1/60未満, ●1/60以上1/30未満, ●1/30以上)

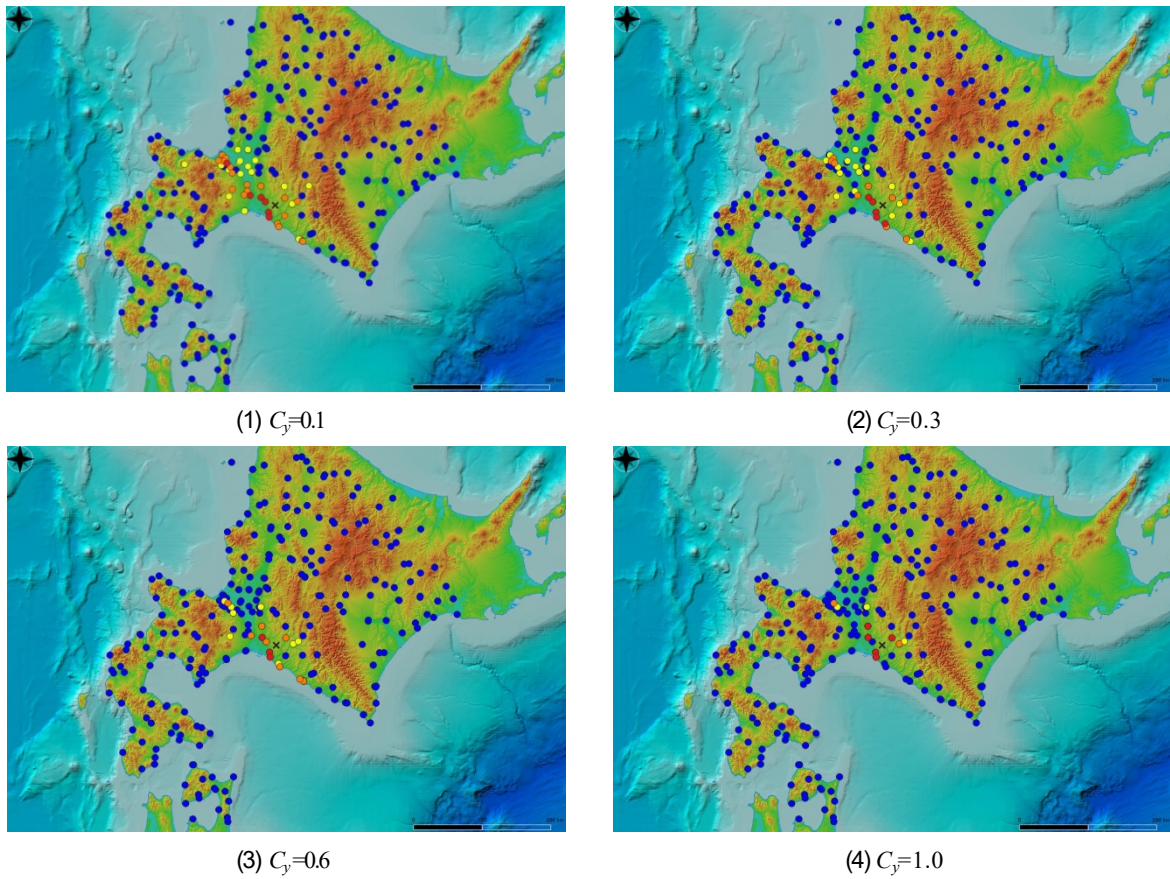


図-13 2018年北海道胆振東部地震の最大応答変形角分布 (● 1/100未満, ● 1/100以上 1/60未満, ● 1/60以上 1/30未満, ● 1/30以上)

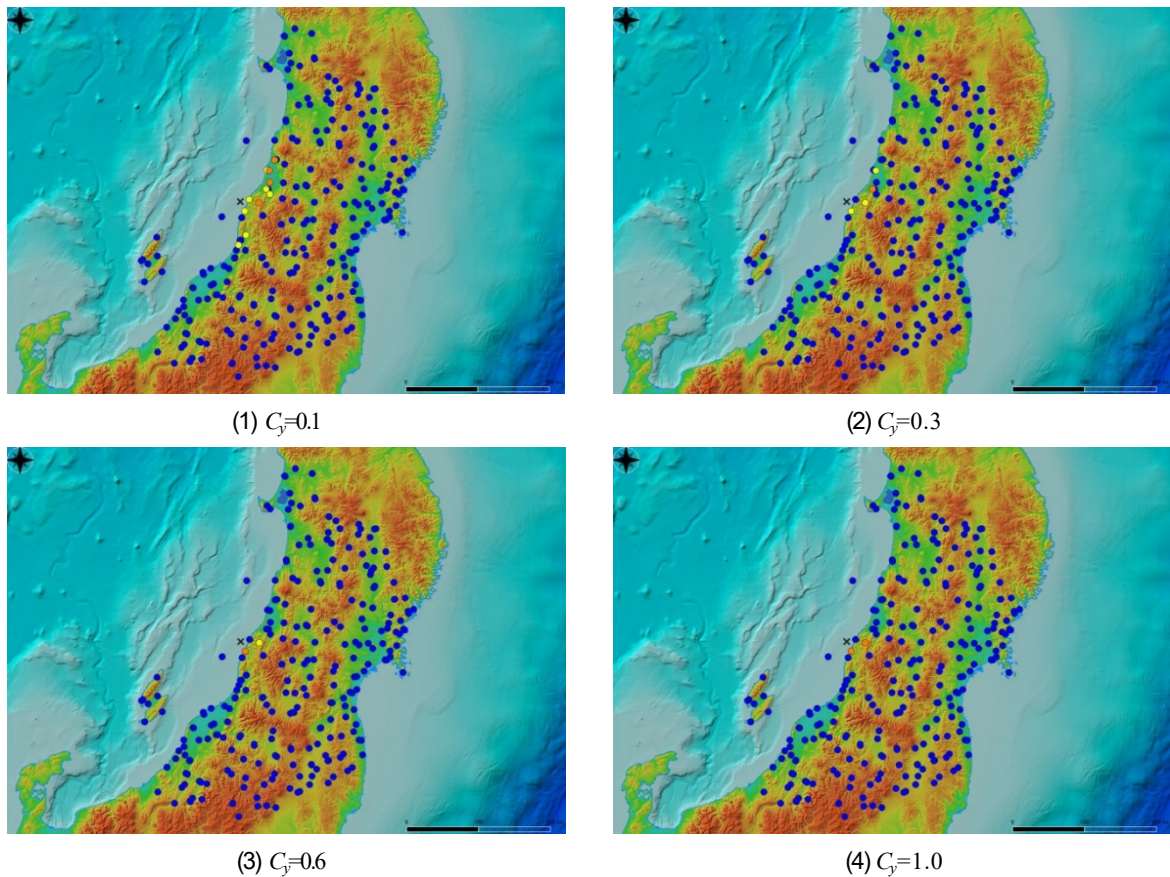


図-14 2019年山形県沖の地震の最大応答変形角分布 (● 1/100未満, ● 1/100以上 1/60未満, ● 1/60以上 1/30未満, ● 1/30以上)

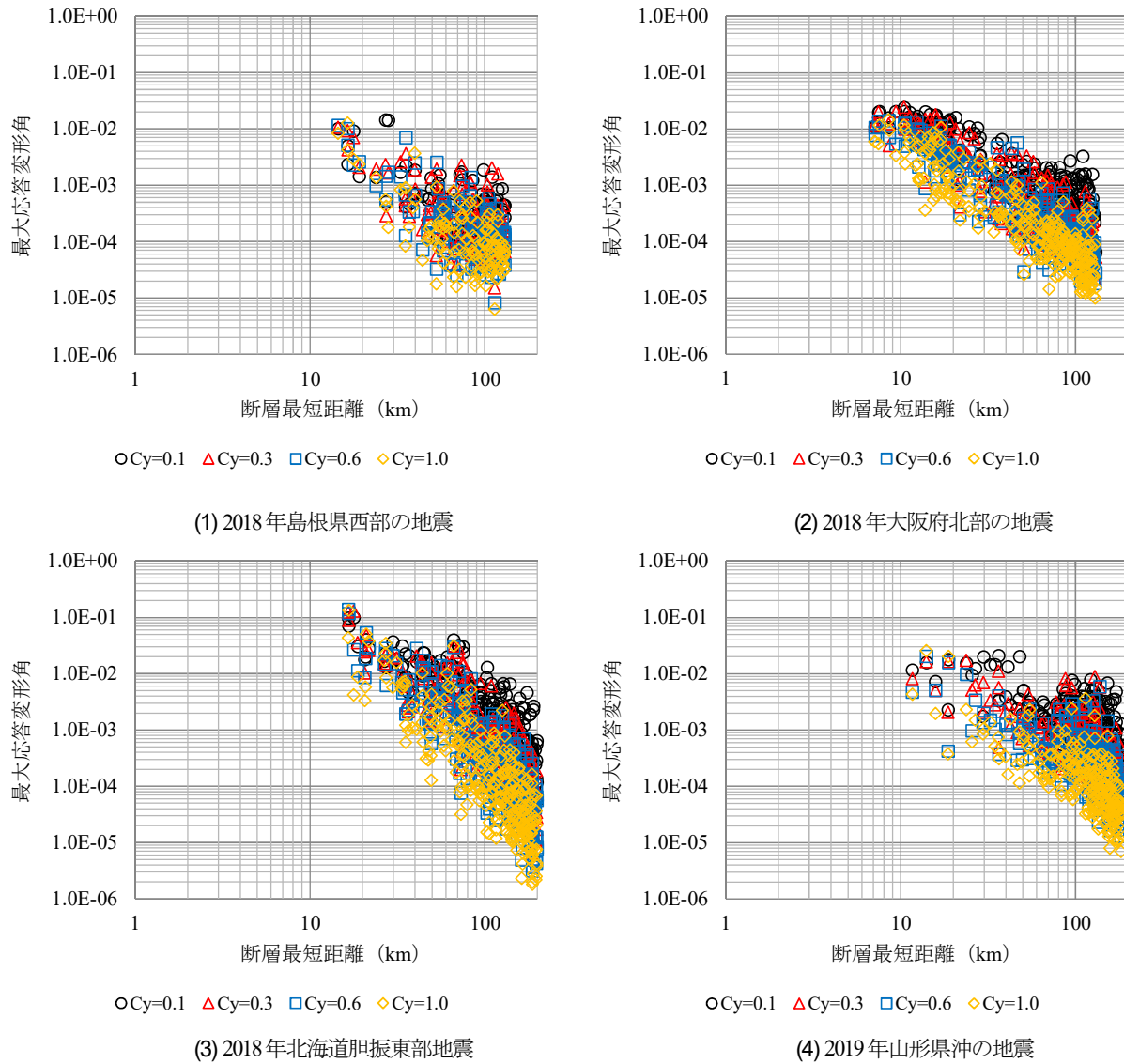


図-15 断層最短距離と最大応答変形角の対応

$$\log V_{S30} = a \log V_{SZ} + b \log V_S + c \quad (7)$$

V_{SZ} は深さ z までの地盤の平均S波速度, V_S はデータの最深部 z でのS波速度, a , b , c は回帰係数である. V_{SZ} は式(8)で求めた.

$$V_{SZ} = \frac{z}{\sum \frac{h_i}{V_{Si}}} \quad (8)$$

h_i は i 番目の層の層厚, V_{Si} は i 番目の層のS波速度である. KiK-net観測点の V_{S30} は公開されているS波速度構造の情報をを用いて式(8)により計算し, 気象庁と自治体観測点はJ-SHISの250mメッシュの V_{S30} の情報²⁰⁾を用いた. 図-16に各地震の V_{S30} の分布を示す. 同図を見ると, (2)の2018年大阪府北部の地震では震央付近, (3)の2018年北海道胆振東部地震では震央の北西側の札幌市付近, (4)の2019年山形県沖の地震では震央の南西の新潟平野付

近で V_{S30} が200m/s未満の観測点が多くみられる.

(2) 考察

地震観測記録から求めた最大応答変形角や断層最短距離, V_{S3} を用いて, 回帰分析により式(5), (6)の各係数を求めた. 左辺の最大応答変形角 R は $C_y=0.1 \sim 1.0$ を対象に S_a は S_{ae} によって計算し, NS, EW成分から求めた R の大きい方の値を用いた. 断層最短距離 X は2018年島根県西部の地震のみ震源距離とした.

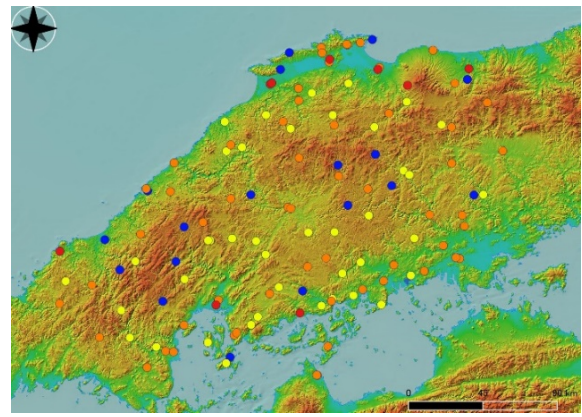
表-2に各地震の式(5)の回帰係数 $c_1 \sim c_3$, X_r , s および相関係数と標準偏差, 図-17には各地震の最大応答変形角の観測値と予測値の対応を示す. 表-2の相関係数と標準偏差は S_a と S_{ae} によって計算した最大応答変形角(観測値)と式(5), (6)の予測式に X , V_{S30} を代入して求めた最大応答変形角(予測値)の常用対数値を線形の式で回帰して得られた値である.

地震ごとに表-2の回帰係数や相関係数、標準偏差の特徴を見ると、(1)の2018年島根県西部の地震の粘性減衰と散乱減衰に対応している回帰係数 c_2 が $C_y=0.1$ で正の値になっているのは表面波の影響によるものと推測される。地震動の頭打ちを考慮するための定数 s が全て0になっているのは震源近傍のデータを含んでいないためだと考えられる。震源近傍のデータがないことにより、大きな最大応答変形角のデータがなく、このことが相関係数に対しても影響していると考えられる。なお、(1)以外の地震については地震の規模が大きいくほど、定数 s も大きくなる傾向が見られた。(2)の2018年大阪府北部の地震は $C_y=1.0$ 以外は相関係数が0.9以上であり、対象地震の中で標準偏差が最も小さい。図-17を見ても最大応答変形角の観測値と予測値のばらつきが小さいことが分かる。(3)の2018年北海道胆振東部地震は全体的に相関係数が高いが、 C_y が大きくなるほど標準偏差が大きくなっている。また、図-17からも C_y が大きくなるほど、観測値と予測値のばらつきが大きくなっている。(4)の2019年山形県沖の地震は4つの地震の中で相関係数が最も低く、標準偏差は2018年北海道胆振東部地震に次いで大きい。

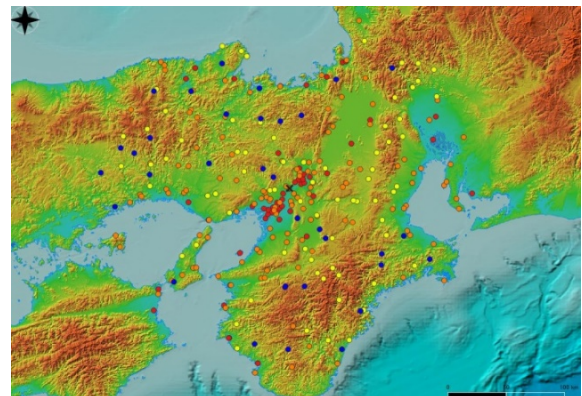
解析対象地震の最大応答変形角の観測値と予測値の相関係数は0.719~0.916であり、全体的に見れば評価精度が良好なことから、既往研究⁹⁾で提案した木造建物の最大応答変形角評価手法が適用可能であると考えが、一部、予測値と観測値の差が大きいデータがあったことから、その要因を考察する。

$C_y=0.1$ の最大応答変形角の観測値と予測値の比が3以上のデータが最多であった2019年山形県沖の地震の速度波形を図-18、地震波形から計算したH/Vを図-19に示す。図-18のKiK-net雫石(IWTH16)の速度波形を見ると60秒付近から表面波が見られ、気象庁の南魚沼市六日町は表面波も含め全体的に周期が長い。図-19のH/Vを見るとKiK-net雫石(IWTH16)は0.3Hz前後、南魚沼市六日町は0.4~1Hzでピークがあり、この振動数の地震動の影響により、断層最短距離が大きいくわに最大応答変形角が大きくなったものと考えられる。地盤増幅特性を表すパラメータとして導入した V_{s30} だけでは十分に表面波の影響を考慮できないことから、 V_{s30} が大きく表面波が卓越した地点では $C_y=0.1$ の観測値と予測値の差が大きくなったものと考えられる。

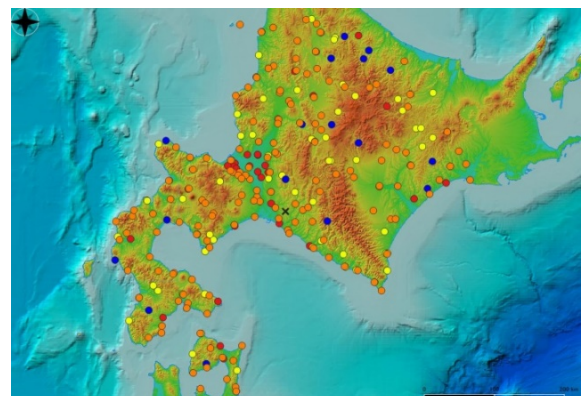
続いて、 $C_y=0.1, 0.3, 0.6, 1.0$ 全てで、最大応答変形角の観測値が予測値の3倍以上になった観測点として、2019年山形県沖の地震の気象庁の柏崎市西山町池浦を例に地盤特性を考察する。図-20の柏崎市西山町池浦の地震動H/V(波形全区間対象)を見ると2~3Hzに明瞭なピークがあり、スペクトル比が30前後になっている。このスペクトル比の大きなピークの影響によって、広範囲の



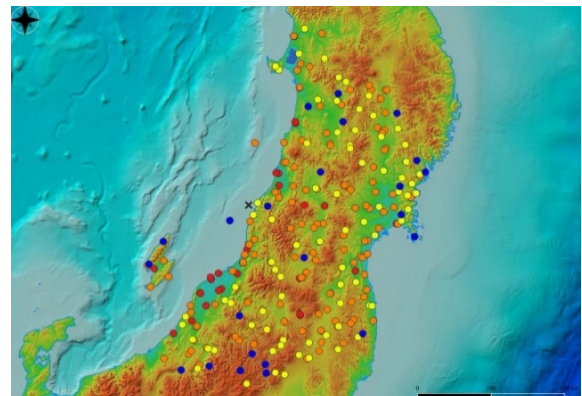
(1) 2018年島根県西部の地震



(2) 2018年大阪府北部の地震



(3) 2018年北海道胆振東部地震



(4) 2019年山形県沖の地震

図-16 V_{s30} 分布 (● : 200m/s 未満, ● : 200~400m/s, ● : 400~600m/s, ● : 600m/s 以上)

表-2 式(5), (6)の回帰係数, X_r , s と相関係数, 標準偏差

(1) 2018年島根県西部の地震

C_y	c_1	c_2	c_3	s	X_r	相関係数	標準偏差
0.1	3.068	0.0003	-1.144	0	60	0.780	0.313
0.2	3.243	-0.0011	-1.228	0	45	0.756	0.343
0.3	3.178	-0.0016	-1.195	0	50	0.759	0.360
0.4	2.828	-0.0023	-1.062	0	50	0.762	0.362
0.5	2.902	-0.0027	-1.092	0	50	0.765	0.372
0.6	2.721	-0.0030	-1.044	0	50	0.774	0.368
0.7	2.687	-0.0032	-1.043	0	50	0.790	0.356
0.8	2.384	-0.0030	-0.951	0	50	0.788	0.352
0.9	1.940	-0.0027	-0.804	0	50	0.763	0.369
1.0	1.802	-0.0024	-0.764	0	55	0.756	0.378

(2) 2018年大阪府北部の地震

C_y	c_1	c_2	c_3	s	X_r	相関係数	標準偏差
0.1	2.975	-0.0012	-0.968	185	65	0.904	0.292
0.2	2.474	-0.0031	-0.780	205	65	0.900	0.317
0.3	1.949	-0.0056	-0.623	116	40	0.910	0.309
0.4	1.552	-0.0052	-0.485	105	50	0.916	0.305
0.5	1.300	-0.0050	-0.401	125	55	0.910	0.315
0.6	0.969	-0.0008	-0.368	50	115	0.908	0.318
0.7	0.900	-0.0043	-0.309	90	60	0.910	0.315
0.8	0.533	-0.0007	-0.249	30	115	0.906	0.324
0.9	0.248	-0.0003	-0.173	20	125	0.900	0.330
1.0	-0.029	-4.7E-05	-0.093	15	125	0.893	0.338

(3) 2018年北海道胆振東部地震

C_y	c_1	c_2	c_3	s	X_r	相関係数	標準偏差
0.1	5.179	-0.0079	-1.287	2017	40	0.896	0.321
0.2	5.382	-0.0089	-1.456	962	40	0.914	0.333
0.3	5.138	-0.0095	-1.413	571	40	0.912	0.360
0.4	4.977	-0.0097	-1.398	296	40	0.904	0.391
0.5	4.635	-0.0096	-1.323	32	40	0.899	0.413
0.6	4.603	-0.0086	-1.261	532	95	0.897	0.419
0.7	4.121	-0.0095	-1.181	53	45	0.884	0.443
0.8	3.955	-0.0093	-1.140	43	50	0.879	0.454
0.9	3.634	-0.0094	-1.059	7	45	0.872	0.464
1.0	3.510	-0.0091	-1.033	0	50	0.868	0.472

(4) 2019年山形県沖の地震

C_y	c_1	c_2	c_3	s	X_r	相関係数	標準偏差
0.1	4.070	-0.0029	-1.110	1320	55	0.768	0.348
0.2	3.669	-0.0035	-1.028	971	50	0.780	0.349
0.3	3.150	-0.0035	-0.934	384	40	0.763	0.373
0.4	2.929	-0.0037	-0.877	332	40	0.764	0.375
0.5	2.503	-0.0034	-0.759	315	40	0.733	0.393
0.6	1.982	-0.0039	-0.564	422	40	0.719	0.400
0.7	1.700	-0.0035	-0.511	258	40	0.720	0.394
0.8	1.457	-0.0035	-0.453	163	40	0.723	0.394
0.9	1.356	-0.0034	-0.450	69	40	0.735	0.387
1.0	1.138	-0.0037	-0.377	93	40	0.745	0.378

C_y で最大応答変形角が大きくなったものと考えられる。

しかし、この観測点の V_{S30} は428m/sという大きな値であり、H/Vのピークの大きさと対応していない。J-SHISで公開されている V_{S30}^{20} は250mメッシュの値であるため、対象地点の実際の V_{S3} が428m/sよりも小さい可能性があり、最大応答変形角予測式の評価精度に影響を及ぼした可能性がある。このように、予測式の地盤増幅特性に関するパラメータとして用いた V_{S3} が十分に機能しない場合には最大応答変形角の評価精度が低下するものと考えられる。

5. まとめ

本研究では著者らの一部が提案した木造建物の最大応答変形角評価手法が対象地震の規模や対象地域が異なっても適用可能か調べるために、2018年、2019年に発生したM6クラスの4つの地殻内地震を対象に解析対象範囲の拡張や一部のパラメータを変更した最大応答変形角予測式を求めた。

予測式を求めるにあたり、まず、性能等価加速度応答スペクトルに基づき、木造建物の最大応答変形角を評価した結果、2018年北海道胆振東部地震では最大応答変形角が1/30を超える観測点が複数見られ、K-NET鵠川では周辺の木造建物の被害と対応する結果となった。他の3つの地震については対象とした地震観測点の最大応答変形角が1/30を超えた地点はなく、倒壊や全壊のような大きな被害に対応する最大応答変形角の地点は見られなかった。また、今回対象とした全観測点を調べたわけではないが、計測震度の大きい主要な観測点の実被害は最大応答変形角の値と調和的なものであった。断層最短距離と最大応答変形角の対応を調べた結果、ベースシア係数が0.1の場合、表面波の影響によって断層最短距離が大きいわりに最大応答変形角が大きい地点が見られた。

続いて、幾何減衰の変化を考慮し、表層30mの平均S波速度をパラメータとする最大応答変形角の予測式を求めた。2018年島根県西部の地震では最大応答変形角の観測値と予測値の相関係数が0.756~0.790であり、2018年大阪府北部の地震と2018年北海道胆振東部地震では最大応答変形角の観測値と予測値の相関係数が0.8後半から0.9前半という高い値となった。また、2019年山形県沖の地震は0.719~0.780であった。地震によって差があるものの、全体的には相関係数が良好であったことから、著者らの提案した最大応答変形角予測式が今回の解析対象地震にも適用できたと考える。

最大応答変形角の観測値と予測値の差異が大きかった観測点では表面波が卓越したものや地震動スペクトルのピークを十分に考慮できないものがあつた。いずれの場合も表層30mの平均S波速度だけでは十分にこれらの特性を反映できなかったことが観測値と予測値の剥離の原因になったと推測される。

また、平均S波速度以外にも断層の破壊伝播効果や放射特性、伝播経路による減衰特性の違いなどを考慮していないことも評価精度の低下に影響を及ぼした可能性がある。今後はこれら震源や伝播経路に関する影響を調べた上で、これらの特性も予測式に考慮するとともに、今回対象としなかった地震も解析対象に加え、地震ごとに応答変形角予測式を求めるのではなく、汎用性のある予測式を求める予定である。

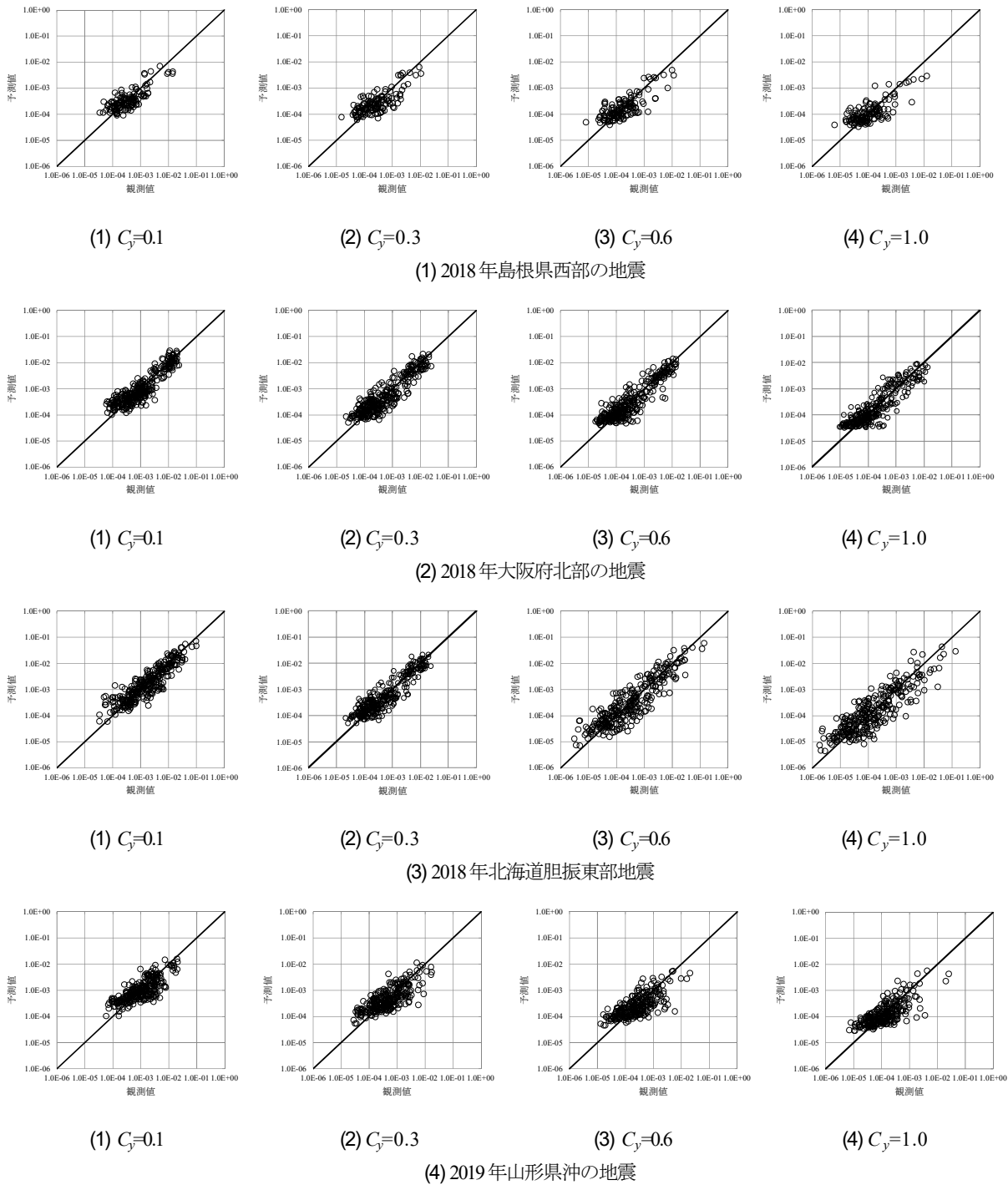
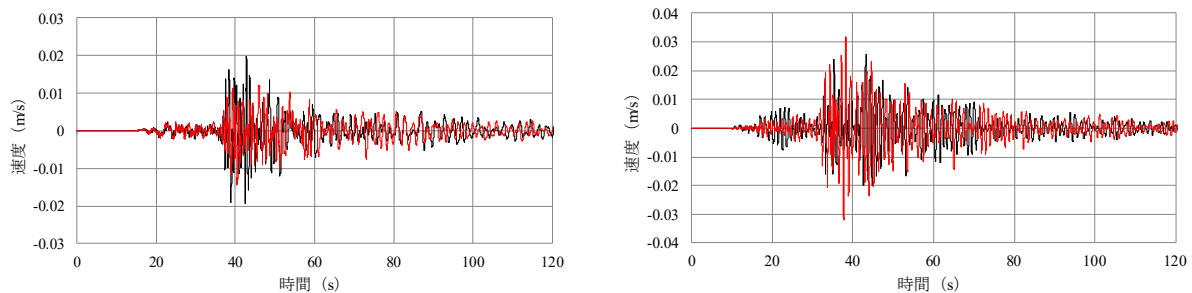


図-17 最大応答変形角の観測値と予測値の対応



(1) KiK-net 雫石 (IWTH16, $V_{S30}=535\text{m/s}$, 断層最短距離 161km) (2) 南魚沼市六日町 ($V_{S30}=353\text{m/s}$, 断層最短距離 171km)

図-18 2019年山形県沖の地震で観測された速度波形

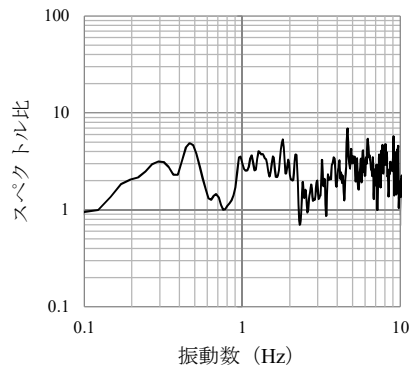
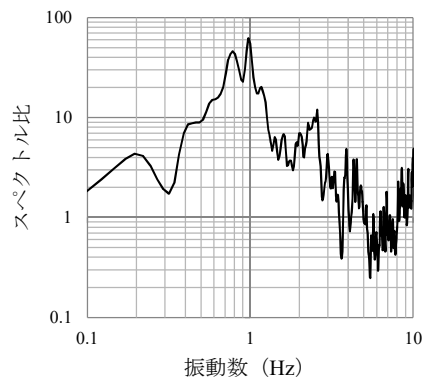
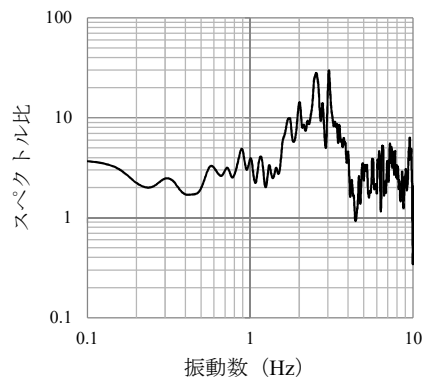

(1)KiK-net 雫石 (Iwth16, $V_{S30}=535\text{m/s}$)

(2)南魚沼市六日町 ($V_{S30}=353\text{m/s}$)

図-19 $C_y=0.1$ で最大応答変形角の観測値と予測値の差が大きかった地震観測点の地震動 H/V

図-20 柏崎市西山町池浦の地震動 H/V ($V_{S30}=428\text{m/s}$)

謝辞：本研究では気象庁、大阪府、京都府、奈良県、滋賀県、兵庫県、北海道、新潟県、山形県、国立研究開発法人 防災科学技術研究所の K-NET、KiK-net 観測記録を使用させて頂きました。一部の図の作成において、QGIS²¹⁾、国土地理院の地理院タイル²²⁾を利用させて頂きました。標高図の海域部は海上保安庁海洋情報部の資料を使用して作成しました。また、本研究は JSPS 科研費 JP18H01677 (研究代表者：宮島昌克) の助成を受けたものです。記して御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 総務省消防庁ホームページ：平成 30 年 04 月 09 日 島根県西部を震源とする地震 (第 17 報)，<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/190820simanekennseibujisinn17.pdf> (2019 年 9 月 10 日閲覧)
- 2) 総務省消防庁ホームページ：平成 30 年 06 月 18 日 大阪府北部を震源とする地震による被害及び消防機関等の対応状況 (第 32 報)，<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/190820oosakafuhokubujisinn32.pdf> (2019 年 9 月 10 日閲覧)
- 3) 総務省消防庁ホームページ：平成 30 年 09 月 06 日 平成 30 年北海道胆振東部地震による被害及び消防機関等の対応状況 (第 35 報)，<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/190820hokkaidoujissinn35.pdf> (2019 年 9 月 10 日閲覧)
- 4) 総務省消防庁ホームページ：令和元年 06 月 18 日 山形県沖を震源とする地震による被害及び消防機関等の対応状況 (第 16 報)，<https://www.fdma.go.jp/disaster/info/items/yamagataoki16.pdf> (2019 年 9 月 10 日閲覧)
- 5) 中澤駿佑，境 有紀，汐満将史，三木彩加，新井蒼太：2018 年北海道胆振東部地震における強震観測点周辺の状況と発生した地震動との対応性，日本地震工学学会論文集，第 19 巻，第 7 号，pp.7_67-7_104，2019.
- 6) 西川 隼人，野口竜也，西村 武，宮島昌克，香川敬生：2016 年鳥取県中部の地震を対象とした木造建物の最大応答変形角予測式の検討，土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)，第 75 巻，第 4 号，pp. I_383-I_390，2019.
- 7) 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論文集，pp.651-656，2002.
- 8) 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，第 67 巻，第 556 号，pp.15-24，2002.
- 9) 福島美光，田中貞二：新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂，地震学会 1992 年秋季大会講演予稿集，p.116，1992.
- 10) 広帯域地震観測網 F-net ホームページ：<http://www.fnet.bosai.go.jp/top.php?LANG=ja> (2019 年 9 月 1 日閲覧)
- 11) 地震調査研究推進本部ホームページ：2018 年 6 月 18 日 大阪府北部の地震の評価，https://www.static.jishin.go.jp/resource/monthly/2018/20180618_osaka_2.pdf (2019 年 6 月 17 日閲覧)
- 12) 国土地理院ホームページ：平成 30 年北海道胆振東部地震の震源断層モデル (暫定)，<https://www.gsi.go.jp/cais/topic180912-index.html> (2019 年 8 月 28 日閲覧)
- 13) 国土地理院ホームページ：2019 年 6 月 18 日山形県沖の地震の震源断層モデル (暫定)，https://www.gsi.go.jp/cais/topic180912-index_00001.html (2019 年 8 月 28 日閲覧)
- 14) 建設省：平成 12 年建設省告示第 1457 号，2000.
- 15) Hayashi, Y., Nii, A. and Morii, T. : Evaluation of building damage based on equivalent-performance response spectra, *Proceedings of the 14th WCEE*, Paper ID 05-01-0407,

- 2008.
- 16) 京都大学防災研究所ホームページ 災害調査報告：大阪府北部の地震の被害調査速報，<http://www.eqh.dpri.kyoto-u.ac.jp/~masumi/eq/osaka2018/> (2019年9月10日閲覧)
 - 17) 山形大学 汐満研究室のホームページ：山形県沖の地震における強震観測点周辺の被害調査，<http://shiomitsu.site/eq/1906ymgt.html> (2019年9月10日閲覧)
 - 18) 境 有紀，神野達夫，額綱一起：震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度算定法の提案，日本建築学会構造系論文集，第69巻，第585号，pp.71-76，2004.
 - 19) 翠川三郎，野木淑裕：深さ30mまでの地盤の平均S波速度を深さの浅いデータから推定する方法について，日本地震工学会論文集，第15巻，第2号，pp.291-296，2015.
 - 20) 地震ハザードステーションホームページ：<http://www.j-shis.bosai.go.jp/> (2019年10月25日閲覧)
 - 21) QGIS ホームページ：<https://www.qgis.org/ja/site/index.html> (2019年9月2日閲覧)
 - 22) 国土地理院ホームページ，地理院タイル一覧：<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (2019年9月3日閲覧)
- (2019.11.12 受付，2020.1.17 修正，2020.2.16 受理)

EVALUATION OF MAXIMUM RESPONSE DEFORMATION ANGLE OF WOODEN BUILDINGS BASED ON OBSERVATION RECORDS OF CRUSTAL EARTHQUAKES IN 2018 AND 2019

Hayato NISHIKAWA, Tatsuya NOGUCHI, Toshikazu IKEMOTO, Takahito UMEDA, Keisuke SUGIYAMA and Masakatsu MIYAJIMA

In this study, the maximum response deformation angle of wooden building was evaluated using earthquake observation records of M6 class crustal earthquakes that occurred in 2018 and 2019, and the evaluation formula of the maximum response deformation angle of the wooden building was obtained. First, for each target earthquake, the maximum response deformation angle of the wooden building was evaluated from the performance equivalent acceleration response spectrum and the acceleration response spectrum calculated from the observation records, and the correspondence with the actual damage was considered. Next, evaluation formula for the maximum response deformation angle using the average S-wave velocity at the surface layer of 30 m was obtained in consideration of the source effect, path effect, and site effect. As a result of obtaining the evaluation formula, the correlation coefficient between the observed value of the maximum response deformation angle and the predicted value was a good value of 0.7-0.9.