

自治体観測点で得られる地震動指標と 木造家屋被害の関係

西川隼人¹

要旨：本研究では自治体観測点において得られる地震動指標(計測震度, 最大加速度)から木造家屋の被害状況を推定するために, 木造家屋を対象に計測震度 I や最大加速度 A_{\max} , $I-\log A_{\max}$ と被害状況の対応を調べた。木造家屋の被害状況は最大応答変形角によって評価した。解析には大きな被害が生じた地震の観測記録を用い, 各地震記録に対して木造家屋の最大応答変形角を評価した。解析の結果, 木造家屋の耐力が大きくなるにつれて, 最大加速度 A_{\max} と計測震度 I は最大応答変形角の相関が良くなったが, $I-\log A_{\max}$ は最大応答変形角との相関が低下した。

キーワード：自治体, 計測震度, 最大加速度, 木造家屋被害

1. 序論

地震動による建造物の被害を評価するために地震動指標と建造物の被害率との関係が調べられてきた。山口・山崎¹⁾や長谷川ら²⁾は1995年兵庫県南部地震の観測記録や被害データに基づき木造家屋などの被害関数を構築している。また, 境ら³⁾は1995年兵庫県南部地震の他に2000年鳥取県西部地震や2001年芸予地震などの地震動データと木造家屋や中低層建造物の被害率との関係を調べている。これらの被害関数の研究では最大速度や速度応答スペクトルの平均値が用いられており, 防災科学技術研究所のK-NET(強震ネットワーク)のように地震発生時にすぐにこれらの地震動指標を得ることが可能な場合は被害状況の把握に利用できると考えられる。しかし, 気象庁の震度速報で活用されている地震観測点の中で最も観測点数が多い自治体観測点では, 最大速度や応答スペクトルのデータを収集しているケースは少なく, 地震発生後すぐに上述の被害関数を利用することは難しい。一方, 自治体観測点では計測震度のデータは全ての都道府県で収集しており, 最大加速度についてもほとんどの都道府県でデータを収集, 保存している。計測震度と最大加速度をパラメータとする被害関数を構築すれば, 自治体観測点においても地震発生後, 迅速に被害状況を推定することが可能になると考えられる。

そこで本研究では最大速度や応答スペクトルが得られていない場合でも, 自治体観測点でも得られる計測震度と最大加速度の2つの地震動指標から建造物の被害状況を推定するために, これらの地震動指

標と建造物被害との関係を調べた。今回, 評価の対象とした建造物は2階建ての木造家屋であり, 建造物の被害状況を表す指標として被害状況との対応が良いことが指摘されている最大応答変形角を用いた。

解析は以下の手順ですすめた。まず, 大きな被害が生じた4つの地震(2000年鳥取県西部地震, 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)の地震波形記録に基づき, 各地震記録に対する木造家屋の最大応答変形角を評価した。地震波形記録は気象庁, K-NET, KiK-netで観測されたものを用いた。2階建ての木造家屋をバイリニア型の復元力特性を持つ1自由度系のモデルに置き換え, 林⁴⁾が提案した性能等価加速度応答スペクトルによって最大応答変形角を求めた。続いて, それぞれの地震記録における最大加速度, 計測震度, および計測震度と最大加速度を組み合わせた指標と地震記録から求めた最大応答変形角との対応を調べた。

2. 木造家屋の最大応答変形角の評価

2.1 評価手法

ある地震記録に対する木造家屋の被害程度に対応する指標を建造物の最大応答変形角 R とした。最大応答変形角は林⁴⁾が提案した性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} に基づいて評価した。林⁴⁾が提案した性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} とはある建物の耐震性能(限界変形角など)をそれと等価な地震荷重(ここでは加速度応答スペクトル)に換算したものであり, 任意の耐震性能を持つ建造物モデルに対するある地震観測記録の最大応答変形角 R を評価することができる。本研究では林⁴⁾に従い, Fig.1に示すバイリニア型の復元力特性を持つ木造家屋モデルに対す

¹ 舞鶴工業高等専門学校, 学生課 教育研究支援センター, 技術職員

る性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} を計算し、ある地震観測記録に対する応答変形角を求めた。性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} の計算は林の研究⁴⁾に従い以下の式により行った。まず、最大応答変形角 R の時の塑性の程度を表す係数 D_f を降伏変形角 R_y で次のように表わされるものとする。

$$D_f = R/R_y \quad (1)$$

また、減衰定数 h 、加速度低減率 F_h は以下の式で与えられる。

$$h = \gamma (1 - 1/D_f^{0.5}) + 0.05 \quad (2)$$

$$F_h = 1.5 / (1 + 10h) \quad (3)$$

最大応答変形角 R に対する等価建物固有周期 T_e と T_c に対する性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} は以下の式で求められる。

$$T_e = 2\pi (\mu H_e R / C_y g)^{0.5} \quad (4)$$

$$S_{ae} = Q_y / (M_e F_h) = C_y g / (\mu F_h) \quad (5)$$

$$\mu = M / M_e \quad (6)$$

ここで Q_y は降伏せん断力、 H_e は等価高さ、 M 、 M_e はそれぞれ総質量と等価質量である。木造家屋の等価高さなどのパラメータも林⁴⁾と同様の値とした。解析においてFig.1の降伏せん断力係数 C_y を0.2, 0.4, 0.6に変化させ、それぞれの場合における応答変形角を評価した。地震観測記録から求めた加速度応答スペクトル S_a と性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} の対応の一例をFig.2に示す。同図の実線と破線は2004年新潟県中地震においてK-NET観測点の小千谷(観測点コードNIG019)で観測された記録から求めた加速度応答スペクトル S_a である。その他の線は C_y が0.2, 0.4, 0.6の場合の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} であり、最大応答変形角 R が1/5, 1/10, 1/20, 1/30, 1/60, 1/100の対応する S_{ae} を連ねた曲線で示している。地震記録から求めた応答スペクトル S_a に対するFig.1の復元力特性を持つ木造家屋モデルの最大応答変形角 R は S_a と S_{ae} の交点における R から求められる。この地震記録における最大応答変形角 R は C_y が0.2の場合は1/18, C_y が0.4と0.6の場合はそれぞれ1/17, 1/20である。

2.2 対象とした地震記録

本研究では大きな被害が生じた2000年鳥取県西部地震, 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において気象庁, K-NET, KiK-netで観測された地震波形記録を用い、木造家屋モデルの最大応答変形角を求めた。これらの地震の諸元や各地震における記録数はTable1に示すとおりである。Table1の M_J は気象庁マグニチュードである。

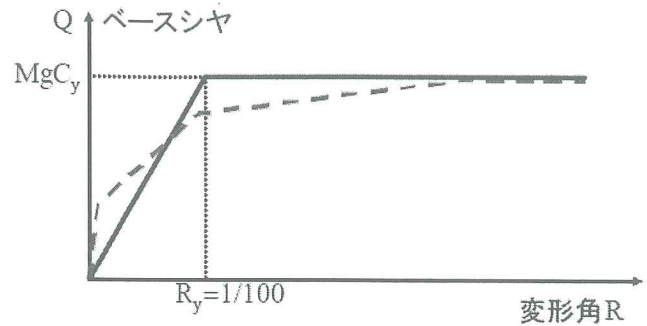


Fig.1 Restoring force characteristics⁴⁾.

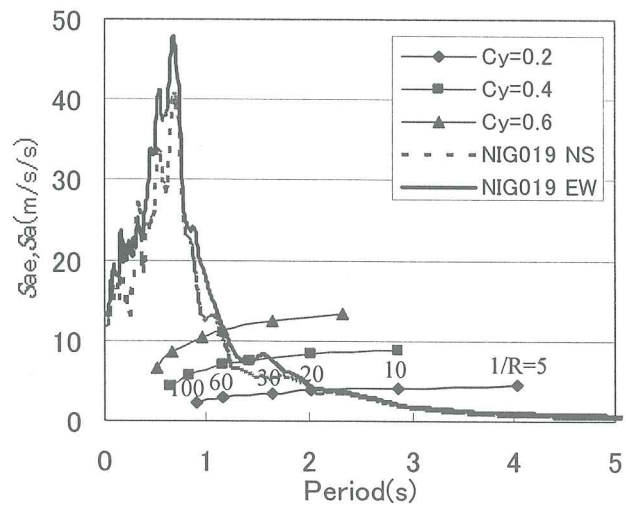


Fig.2 Comparison of equivalent-performance response spectra with observed response spectra.

Table1 Parameters of earthquakes.

	M_J	Depth (km)	Number of data
2000Totori-Ken-Seibu Earthquake	7.3	9	37
2004Niigata-Ken-Chuetsu Earthquake	6.8	13	32
2007Notohanto Earthquake	6.9	11	19
2007Niigata-Ken-Chuetsuoki Earthquake	6.8	17	29

なお、各地震において震度5弱よりも大きな揺れ、すなわち計測震度4.5以上観測した地震記録を解析に用いた。解析対象とした地震記録における最大加速度 A_{max} と計測震度 I の度数分布をFig.3、代表的な加速度応答スペクトルをFig.4に示す。Fig.4の凡例のTTRH02はKiK-net日野, OJIYAは気象庁小千谷, ISK005とNIG018はそれぞれK-NETの穴水, 柏崎観測点を示している。Fig.3を見ると最大加速度は200~400cm/s²を観測した記録が最も多い。計測震度は4.5~5の記録が多く、計測震度が大きくなると記録数が減少していることが分かる。Fig.4に示す加速度応答スペクトルはいずれも震度6強よりも

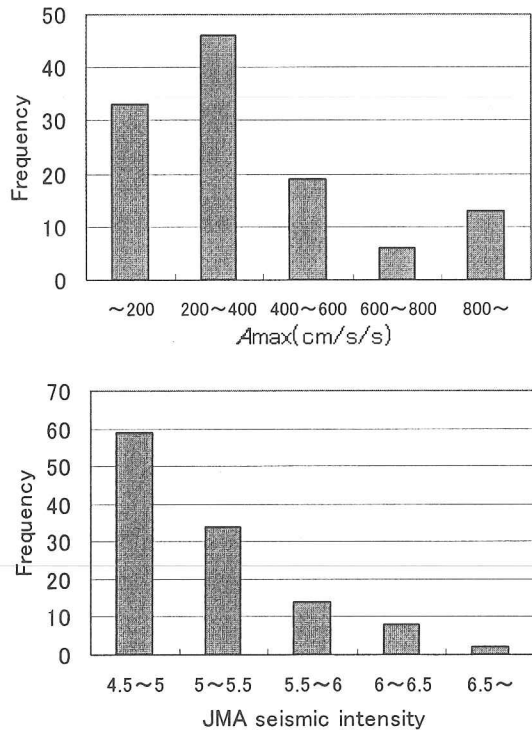


Fig.3 Histograms of peak acceleration (A_{max}) and JMA seismic intensity (I).

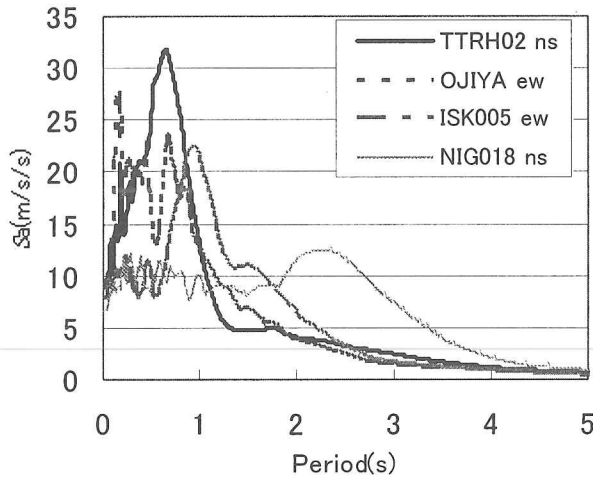


Fig.4 Acceleration response spectra analyzed in this study.

大きな揺れを観測した記録である。応答スペクトルの特徴を見ると TTRH02 と OJIYA では周期 1 秒よりも短周期側にピークがあり、ISK005 と NIG018 ではそれぞれ周期 1 秒と 2.3 秒付近にピークが見られる。

3. 地震動指標と木造家屋被害の対応

3.1 地震動指標

1. 序論で述べたようにほとんどの自治体観測点で得られる地震動指標は計測震度と最大加速度である。本研究ではこの 2 つの地震動指標の他にこれらの地震動指標と最大速度の間に見られる相関関係を利用

した指標を検討に用いた。最大加速度と最大速度、計測震度の関係を調べた研究⁵⁾において計測震度は最大加速度と最大速度の積との相関が良いことが指摘されている。計測震度の計算は加速度波形 3 成分に対して加速度と速度の中間的な性質を持つフィルターによる処理などによって行う。このような計算過程におけるフィルター処理が計測震度が最大加速度と最大速度の中間的な性質を有する要因になっていると考えられる。本研究ではこのような地震動指標間の相関関係から最大速度の代替となる指標を考えた。まず、以下のように計測震度が最大加速度と最大速度の積によって表わされるものとする。

$$I = C_1 \log(A_{max} \cdot V_{max}) + C_2 \quad (7)$$

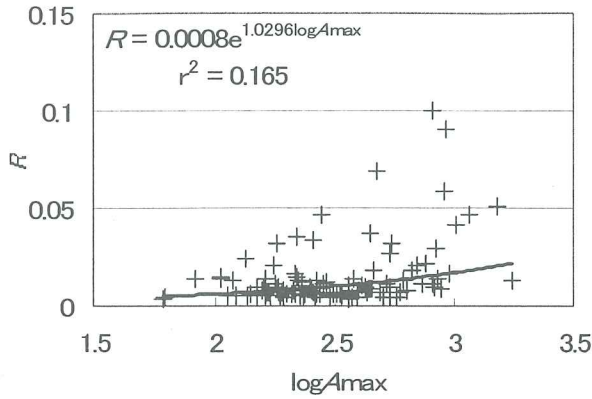
ここで I は計測震度、 A_{max} は最大加速度、 V_{max} は最大速度である。また、 C_1 と C_2 は係数である。藤本・翠川⁶⁾の研究では計測震度 I が 4~7, 5~7, 6~7 のデータセットにおいて C_1 は 1 に近い値となっている。式(7)において C_1 を 1 とすると以下ようになる。

$$I - \log A_{max} = \log V_{max} + C_2 \quad (8)$$

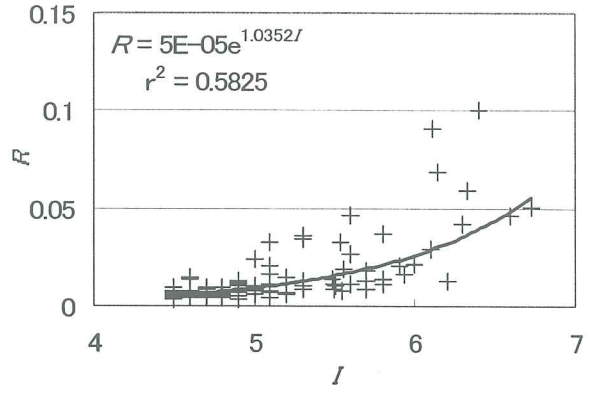
右辺に C_2 があるので $I - \log A_{max}$ と $\log V_{max}$ が等しくはないが、 $I - \log A_{max}$ は $\log V_{max}$ と関係する指標であることが分かる。最大速度は最大加速度や計測震度に比べて長周期の地震動成分と対応していることから、 $I - \log A_{max}$ も最大加速度と計測震度に比べて周期の長い成分と対応が良いことが予想される。本研究では計測震度と最大加速度に加えて、 $I - \log A_{max}$ を検討に用い、地震動指標と木造家屋の被害との対応を調べた。

3.2 地震動指標と最大応答変形角の関係

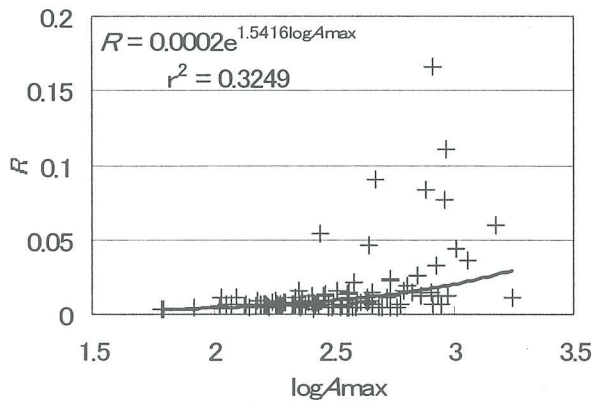
各地震動指標と最大応答変形角 R の関係を指数関数で表わした結果を最大加速度の常用対数 $\log A_{max}$ 、計測震度 I 、 $I - \log A_{max}$ の順に Fig.5, 6, 7 に示す。なお、それぞれの地震動指標において降伏せん断力係数 C_y を 0.2~0.6 に変化させて検討を行った。Fig.5, 6, 7 の散布図は各地震動指標に対する R であり、曲線は回帰分析によって求めた地震動指標と R の関係式である。 r^2 は決定係数であり、地震動指標と最大応答変形角 R の相関の程度を表している。これらの図から明らかなように降伏せん断力係数 C_y が 0.2 の場合は $I - \log A_{max}$ 、計測震度 I 、 $\log A_{max}$ の順に相関が高くなっており、 C_y が 0.4, 0.6 の場合は計測震度 I 、 $I - \log A_{max}$ 、 $\log A_{max}$ の順に相関が高い。地震動指標ごとにそれぞれの C_y と決定係数 r^2 の関係を見ると $\log A_{max}$ と I は C_y が大きくなるにつれて決定係数 r^2 も高くなるのに対して、 $I - \log A_{max}$ は決定係数 r^2 が低下しており、 $I - \log A_{max}$ と最大応答変形角 R の対応が



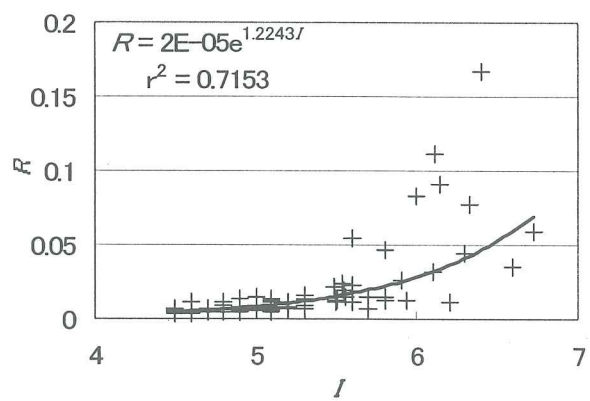
(1) $C_y=0.2$



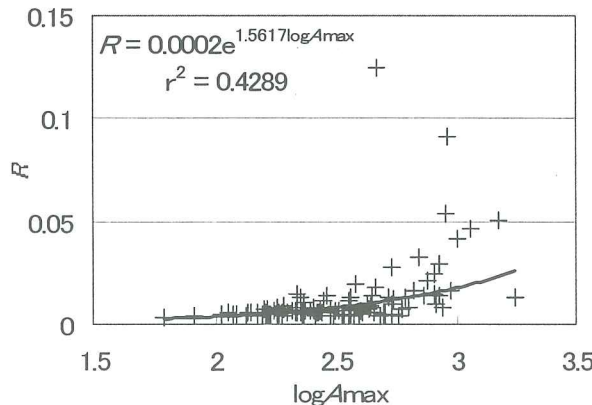
(1) $C_y=0.2$



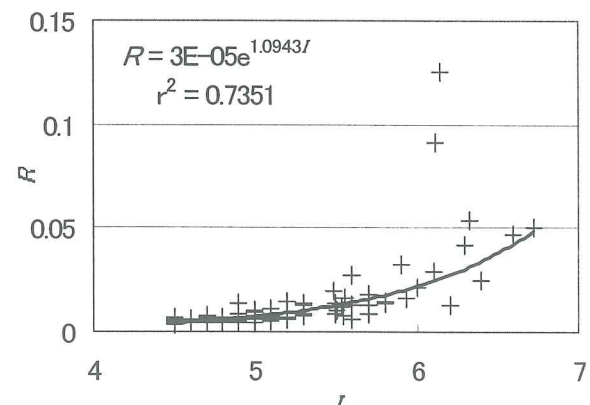
(2) $C_y=0.4$



(2) $C_y=0.4$



(3) $C_y=0.6$



(3) $C_y=0.6$

Fig.5 Relationship between $\log A_{max}$ and maximum drift angle R .

Fig.6 Relationship between JMA seismic intensity and maximum drift angle R .

悪くなっていることが分かる。このような C_y による地震動指標と最大応答変形角 R の相関関係の変化には C_y の値に応じて最大応答変形角 R に対応する応答スペクトルが変化することが関係している。Fig.2 において最大応答変形角 R が同じ値の場合の性能等価加速度応答スペクトル S_{ae} を見ると、 C_y が大きくなるほど、 S_{ae} の値が大きくなり、なおかつ短周期側にシフトしていることが分かる。今回、対象としたほとんどの地震記録において C_y が変化しても、それ

ほど最大応答変形角 R は変化しないが、上述のように C_y が大きくなるほど最大応答変形角 R に対応する応答スペクトルは短周期側にシフトしている。そのため長周期側での応答スペクトルとの相関が高い I - $\log A_{max}$ は C_y が大きくなるにつれて最大応答変形角 R との相関が低下し、 $\log A_{max}$ と計測震度 I は C_y の増大に伴い最大応答変形角 R との相関が向上したものと考えられる。以上の解析結果から、耐力の低い (C_y が小さい) 木造家屋の被害を評価する指標として

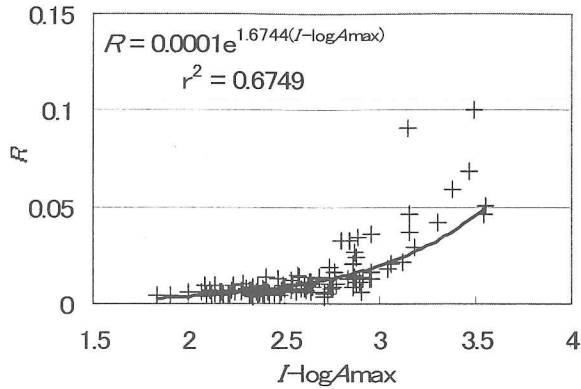
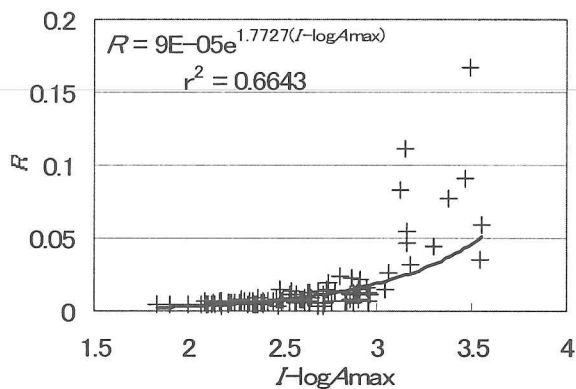
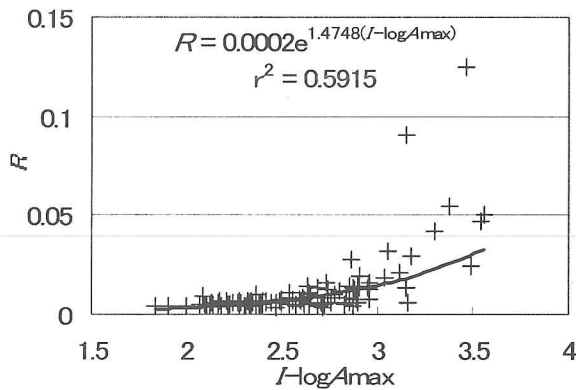
(1) $C_y=0.2$ (2) $C_y=0.4$ (3) $C_y=0.6$

Fig.7 Relationship between $I-\log A_{\max}$ and maximum drift angle R .

$I-\log A_{\max}$ が優れており、耐力が高い木造家屋では計測震度 I が被害を評価する上で適していることが明らかになった。

4. まとめ

本研究では自治体観測点で得られる計測震度などの地震動指標から木造家屋の被害状況を推定するために、計測震度や最大加速度と構造物被害との関係

を調べた。木造家屋の被害程度を表す指標として最大応答変形角を用いた。解析は大きな被害が生じた4つの地震(2000年鳥取県西部地震, 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)の地震波形記録に基づき、各地震記録に対する木造家屋の応答変形角を評価した。地震波形記録は気象庁, K-NET, KiK-netにおいて震度5弱以上の揺れを観測したものをを用いた。解析に用いる構造物モデルとしてバイリニア型の復元力特性を持つ2階建ての木造家屋を考え、性能等価加速度応答スペクトルによって最大応答変形角を求めた。

続いて、それぞれの地震記録における最大加速度の常用対数 $\log A_{\max}$, 計測震度 I , および計測震度と最大加速度を組み合わせた指標 $(I-\log A_{\max})$ と地震記録から求めた最大応答変形角との対応を調べた。その結果、耐力が低い場合は $I-\log A_{\max}$ と最大応答変形角の相関が良く、耐力が高い場合は計測震度 I が最大応答変形角との相関が良いことが明らかになった。

謝辞

解析には気象庁, 独立行政法人 防災科学技術研究所の K-NET, KiK-net の観測記録を使用させて頂きました。本研究は平成19年度科学研究費補助金(奨励研究:課題番号 19919008)の支援を受けて実施しました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 山口直也, 山崎文雄: 西宮市の被災度調査結果に基づく建物被害関数の構築, 地域安全学会論文集, No. 2, pp.129-138, 2000.
- 2) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志: 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建築物群の震害予測 - その2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例 -, 日本建築学会構造系論文報告集, 第505号, pp.53-59, 1998.
- 3) 境 有紀, 額額一起, 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, 第555号, pp.85-91, 2002.
- 4) 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.
- 5) 翠川三郎, 藤本一雄, 村松郁栄: 計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係, 地域安全学会論文集, pp.51-56, 1999.
- 6) 藤本一雄, 翠川三郎: 近年の強震記録に基づく地震動強さ指標による計測震度推定法, 地域安全学会論文集, No.7, pp.241-246, 2005.

(2007.11.9 受付)

Relationship between earthquake motion intensity obtained from observation station in local governments and damage of wooden house

Hayato NISHIKAWA

ABSTARCT: In order to evaluate the damage of wooden house from earthquake motion intensity obtained from observation station in local governments, I examined a relationship between JMA seismic intensity (I), peak acceleration (A_{\max}), $I-\log A_{\max}$ and damage of wooden house. The damage of wooden house was evaluated from maximum drift angle. Maximum drift angle of wooden house were estimated from ground motion records observed in earthquakes that occurred severe damage. The larger strength of wooden house, the more highly A_{\max} and I correlate to maximum drift angle. On the other hand, correlation between $I-\log A_{\max}$ and maximum drift angle was reduced as strength of wooden house increase.

Key Words: local governments, JMA seismic intensity, peak acceleration, damage of wooden house