

数値解析に基づく地震動SI値と 木造建物被害の関係の分析

星 幸江¹・丸山 喜久²・山崎 文雄³

¹千葉大学大学院生 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: s.hoshi@graduate.chiba-u.jp

²千葉大学大学院助教 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: ymaruyam@tu.chiba-u.ac.jp

³千葉大学大学院教授 工学研究科 建築・都市科学専攻 (〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町1-33)

E-mail: yamazaki@tu.chiba-u.ac.jp

地震動指標は地震の規模や被害を知る上で重要な役割を果たしており、実際の地震被害との相関が高いことが求められる。しかし近年の地震において、地震動指標値のみで建物被害を説明しきれないケースがあり、新しい指標が提案されるなど多くの研究がなされている。これを受け本研究では、計測震度、地動最大加速度(PGA)、地動最大速度(PGV)、SI値に関して、木造建物を対象とした地震応答解析を行い応答塑性率との相関性を検討した。解析結果からSI値に着目し、現行の減衰定数と積分周期帯について変更した修正SI値を提案した。この修正SI値と応答塑性率や実地震時の建物被害率との相関性を検討し、修正SI値の評価を行った。

Key Words : earthquake motion indices, numerical analysis, wooden house damage, spectrum intensity

1. はじめに

地震動の強さは、計測震度、地動最大加速度(PGA)、地動最大速度(PGV)、SI値など多様な指標で表わされている。地震動指標は、発生した地震動の強さやそれに伴う被害を把握することに用いられ、大きな役割を果たしている。加えて、地震発生直後に震度分布が広く報道されたり、地震被害想定などに計測震度分布地図が公表されるなど、一般の人々が地震の大きさを知る材料にもなっており、その重要性は年々高くなってきている。したがって、地震動指標値と実際の地震による被害との相関が高いことが望まれる。また、このことは地震後の被害を早期に把握するためにも重要であると言える。

本研究では地震被害の中でも、私達に多大な影響を及ぼす建物被害に着目する。1995年に発生した兵庫県南部地震では、死者の約80%以上が圧死、窒息死といった建物被害によって命を落とし、全半壊した建物は約24万棟に及んだ。地震発生時刻が早朝であり、ほとんどの人が就寝中であったこと、激しい震動により避難する間もなく建物が倒壊したことから、その大半は自宅の木造住宅の倒壊が主因であると考えられる¹⁾。

しかしながら近年、地震動指標と建物被害との相

関の低さが指摘され、再検討を必要とする意見が挙がっており、多くの研究がなされている^{2)~4)}。1995年兵庫県南部地震を契機として、翌1996年には震度が体感によるものから計測震度へと改正がなされた⁵⁾。一方で、2008年に発生した岩手・宮城内陸地震では震度6強を記録したが建物被害はほとんどみられず、同じく震度6強を記録した2007年能登半島地震では2500棟余り⁶⁾が全半壊し、被害が大きかったK-NET穴水周辺では木造建物の約20%が全壊した⁷⁾ことなど、計測震度だけで被害を説明することが難しい場合も多々見られる。以上のような状況をふまえて、2009年3月31日付けで気象庁震度階級関連解説表が改新された⁸⁾。これは社会情勢の変化に加えて、近年の地震被害を受けて変更されたもので、とくに建物被害に関しては耐震性の高低に応じて記載が区別されるようになった。

速度応答スペクトルの周期0.1-2.5秒の積分値として算出されるSI値は、都市ガスの供給停止基準⁹⁾や鉄道の地震後運転規制の判断に用いられる⁹⁾。応答スペクトルの積分周期帯は多くの構造物の固有周期を網羅できるように定められており、近年の地震でも社会基盤構造物の被害と相関が高いことが示されている¹⁰⁾。都市ガス供給事業者は、地震後に供給管被害を早期把握するだけでなく、建物倒壊の被害が

表-1 本研究で使用した地震記録

発生日時	地震名	M _{JMA}	強震観測点
1993.1.15	釧路沖地震	7.5	釧路地方気象台
1995.1.17	兵庫県南部地震	7.3	JR鷹取駅
			大阪ガス葺合供給所※1
			神戸海洋気象台
			NTT神戸
			JR宝塚駅
			本山第一小学校※2
			尼崎高架橋
尼崎竹谷小学校			
尼崎港			
関電総合技研			
1997.3.26	鹿児島県薩摩地方地震	6.6	K-NET宮之城 K-NET阿久根
1997.5.13	鹿児島県薩摩地方地震	6.4	K-NET宮之城
2000.10.6	鳥取県西部地震	7.3	JMA境港 K-NET米子
2001.3.24	芸予地震	6.7	K-NET大野 K-NET東予
2003.5.26	宮城県沖地震	7.1	JMA涌谷 JMA石巻 JMA大船渡
2003.7.26	宮城県北部地震	6.4	JMA涌谷
2003.9.26	十勝沖地震	8.0	K-NET広尾
			K-NET標津
			K-NET池田
			K-NET釧路
			KiK-net本別
2004.10.23	新潟県中越地震	6.8	川口町震度計
			K-NET小千谷
			JMA小千谷
			K-NET長岡
			JMA長岡
			KiK-net加茂
			K-NET小出
2007.3.25	能登半島地震	6.9	K-NET穴水
			JMA輪島(鳳至町)
			K-NET輪島
			JMA能登町(宇出津)
			K-NET能都
K-NET七尾			
2007.7.16	新潟県中越沖地震	6.8	K-NET柏崎
			上越市柿崎区震度計
			長岡市中之島震度計
			長岡市上岩井震度計
			柏崎市高柳町震度計
K-NET小千谷			
2008.6.14	岩手・宮城内陸地震	7.2	K-NET古川
			K-NET一関
2008.7.24	岩手県沿岸北部地震	6.8	K-NET八戸
			K-NET種市
			K-NET岩泉

※1 水平2成分のみ

※2 振り切れ補正波形を使用¹⁾

甚大な地域で、効率よく供給停止を実施することが求められている。したがって、SI値を算出する際の応答スペクトルの積分周期帯や減衰定数などを調整し、建物被害と相関が向上するのであれば、防災力の向上につながる。

よって本研究では、既存の地震動指標よりも建物被害との相関が高い指標を検討すべく、数値解析を行った。木造建物を対象とした建物モデルを構築し、様々な地震記録を入力した地震応答解析を行う。建

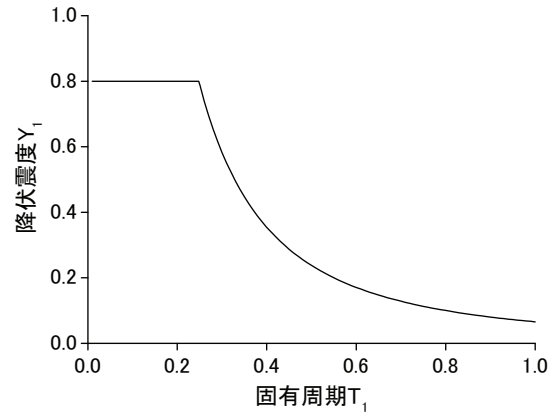


図-1 初期剛性時の固有周期 T_1 と降伏変位 Y_1 の関係

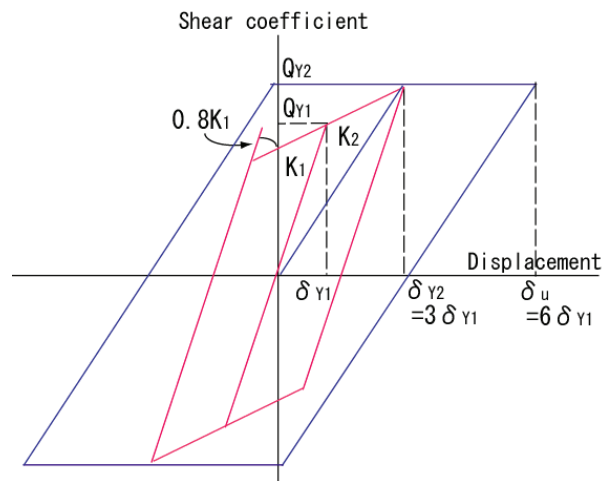


図-2 建物モデルの復元力特性

物の被害を表現する指標として、応答塑性率を算出し、既存の地震動指標との相関性の評価を行う。今回既存の地震動指標として、計測震度、地動最大加速度(PGA)、地動最大速度(PGV)、SI値の4つを用いた。この解析結果からSI値に着目し、これまでの減衰定数と積分周期帯について変更した修正SI値を提案する。最終的に提案した修正SI値と数値解析結果、加えて実際の地震による建物被害率との相関性を検討し、修正SI値について評価を行う。

2. 木造建物の地震応答解析

(1) 地震記録

本研究では、地震の多様性に対応し、結果に一貫性・普遍性を持たせるために、表-1に示す地震記録を使用した。1993年釧路沖地震から、2008年岩手県沿岸北部を震源とする地震までの14地震による51の強震観測点の波形記録を使用した。強震ネットワーク(K-NET)を中心に、気象庁(JMA)や各自治体の計測震度計などによる地盤加速度の観測記録を使用した。

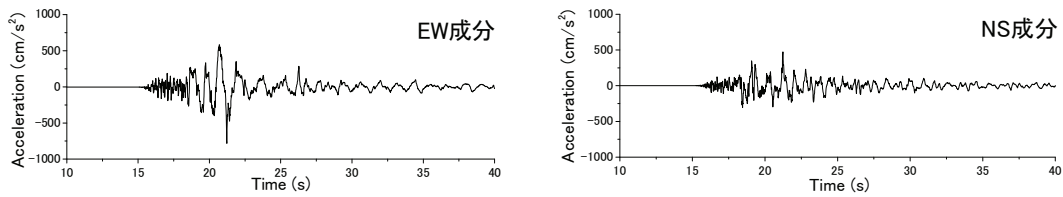


図-3 K-NET 穴水の加速度波形 (水平 2 成分)

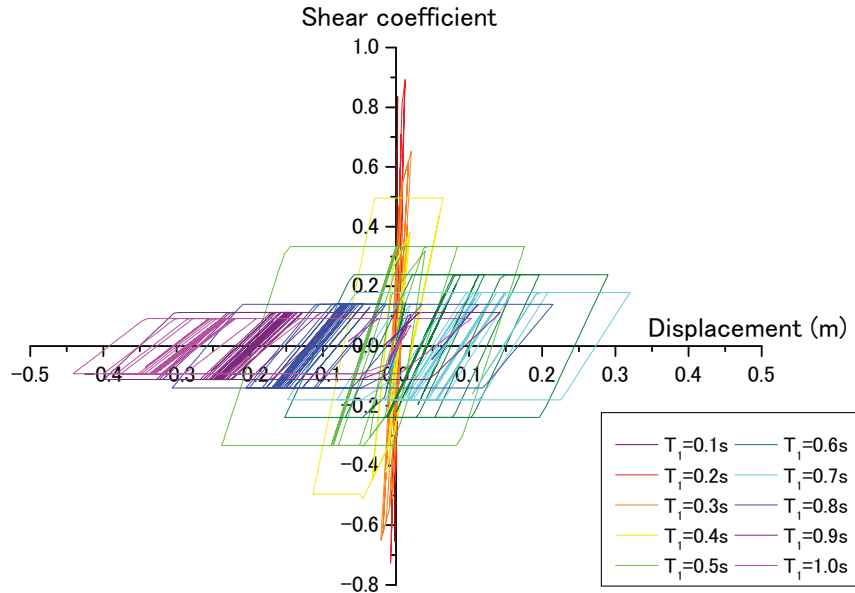


図-4 K-NET 穴水 EW 成分の応答履歴曲線 ($T_1=0.1\sim 1.0s$)

(2) 地震応答解析

建物モデルは、木造建物を対象とした基礎固定の1質点系モデルを用いた。建物の初期剛性時の固有周期 T_1 は0.1~1.0秒(0.1秒刻み)にし、減衰定数は5%と設定した。固有周期 T_1 と降伏震度 Y_1 の関係は、図-1に示すような神奈川県¹²⁾に基づき、式(1)で表わされるものとした。ただし Y_1 の最大値は0.8と定められている。

$$Y_1 = \frac{0.073}{(T_1 + 0.054)^2} \quad (1)$$

また、復元力特性も神奈川県¹²⁾に基づき、2段階Bi-Linear型を使用した。これは図-2に示すように、変位が δ_{Y1} を超えない場合は剛性 K_1 のLinear型で、 δ_{Y1} を超えると降伏後剛性が0.2 K_1 のBi-Linear型の第1ループに推移する。さらに変位が大きくなり δ_{Y2} を超えると剛性 K_2 の完全弾塑性Bi-Linear型の第2ループに推移する。この建物モデルに51強震観測点の水平2成分EW, NS波形の計102個の地震記録を入力する。

応答解析後、式(2)に示すように建物モデルの最大応答変位 δ_u を降伏変位 δ_{Y2} で除した応答塑性率 μ を算出する。同じく地震応答解析で算出した計測震度、地動最大加速度(PGA), 地動最大速度(PGV), SI値の4つの地震動指標との相関性を検討する。

$$\mu = \frac{\delta_u}{\delta_{Y2}} \quad (2)$$

3. 地震動指標と応答塑性率の相関分析

解析の一例として、2007年3月に発生した能登半島地震のK-NET穴水(EW成分)の結果を示す。この観測点周辺は多くの建物が被害を受け、全壊率は18.8%であった⁷⁾。各地震動指標値は計測震度6.30, PGA=896.1 cm/s^2 , PGV=99.7 cm/s (PGA, PGVともに水平2成分合成値), 東京ガス方式(水平面上で2成分波形を合成し最大となる方向のSI値)のSI=125.5 cm/s である。図-3に水平2成分の加速度波形, 図-4にEW成分を入力したときの応答履歴曲線を建物固有周期 T_1 ごとに示す。 $T_1=0.3s$ までは最大変位が δ_{Y2} まで達せず、第1ループ内で応答が推移しているのが分かる。しかしながら $T_1=0.4s$ 以降では第2ループに推移しており、それと同時に応答塑性率が大きくなることを見てとれる。この結果は、多くの木造建物で被害が生じたことと調和的であると考えられる。

解析により得られた応答塑性率と、計測震度、地動最大加速度(PGA), 地動最大速度(PGV), SI値の4つの地震動指標との相関性の評価を行う。図-5に51箇所×2成分の計102個の入力地震動に対する、木造建物モデルの固有周期 $T_1=0.3s$ の塑性率と地震動指標との関係を示す。各地震動指標については、入力地震動との対応性を図るために、EW, NSの2成分

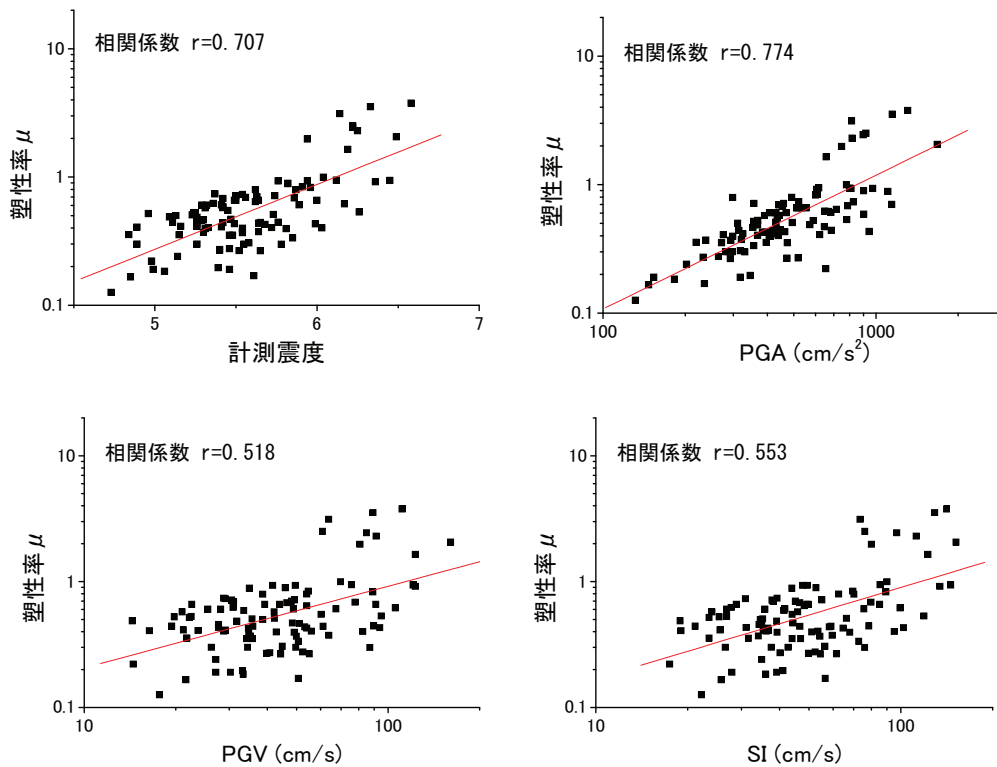


図-5 応答塑性率と地震動指標の関係 ($T_1=0.3s$)

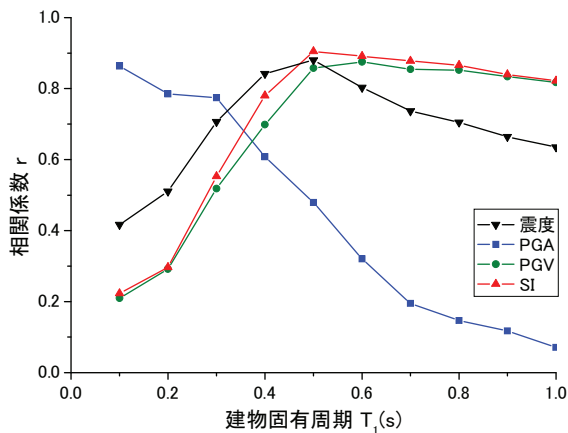


図-6 固有周期 T_1 と各指標の相関係数

別々に指標値を算出した。塑性率を対数で縦軸にとり、計測震度は線形、それ以外の指標は対数軸で横軸に表示した。これらの図におけるばらつきを定量的に表すために直線回帰を行い、相関係数 r を算出した。この相関係数を建物固有周期 $T_1=0.1\sim 1.0s$ (0.1s刻み) について算出した(図-6)。

計測震度については $T_1=0.3\sim 0.6s$ でとくに相関が高く、他の指標に比べ平均的にあてはまりが良いと言える。PGAは、建物固有周期が短周期では相関は高いが、周期が長くなるにつれて相関は低下する。PGVとSI値に関しては、短周期では相関は低い、 $T_1=0.4s$ 以降では相関は高くなる。

木造建物の固有周期は、岩田らの研究によると $T_1=0.1\sim 0.5s$ 程度とされている¹³⁾。その内1981年以降の筋交いの入った在来軸組工法住宅は $T_1=0.2s$ 以下の小さい値を示している。1995年兵庫県南部地震で倒壊・崩壊と判定された建物の多くが、昭和46年以前に建てられた古い建物であることが定量的に示されている¹⁴⁾が、建築年代が非常に古いものや1階部分が大きく開口しているものは、それよりも周期が長いものと考えられる。それを考慮して、建物固有周期 $T_1=0.4\sim 0.5s$ に着目すると、計測震度、PGV、SI値の相関係数が高いことが分かる。そこで本研究では、計測震度と比較する指標という意味合いも含めてPGVとSI値に着目する。

これら2つの地震動指標値がさらに塑性率との相関性が高くなるには、PGVに関しては考慮する振動数領域の変更、SI値に関しては応答スペクトルの積分周期帯や減衰定数の変更が挙げられる。これらはフーリエスペクトル、応答スペクトルの違いはあるものの、両者には近似関係¹⁵⁾もあることから、大局的にはほぼ等価であると考えられる。そこで、本研究では、地震防災システムで利用の実績があるSI値に関して更なる検討を行う。

4. 修正SI値と応答塑性率との相関分析

(1) SI値の修正

SI値は式(3)で表わされるように、減衰定数20%の速度応答スペクトル S_V の周期0.1~2.5秒の平均値と

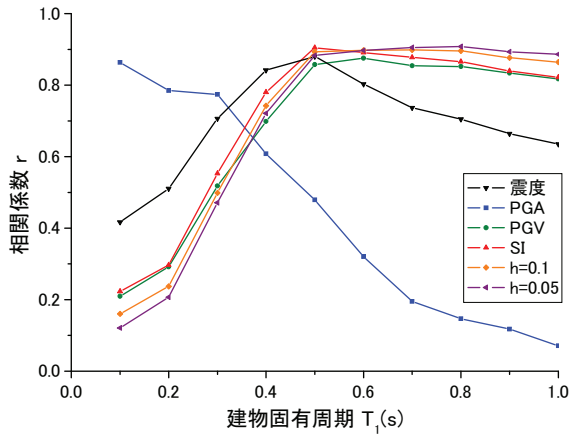


図-7 減衰定数の変更 ($T_a \sim T_b = 0.1 \sim 2.5s$)

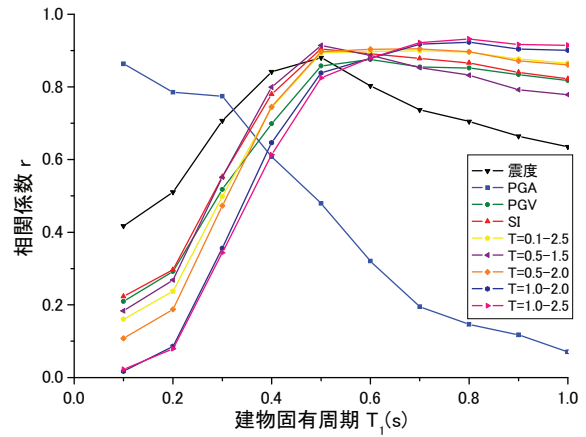


図-9 積分周期帯の変更 ($h=0.1$)

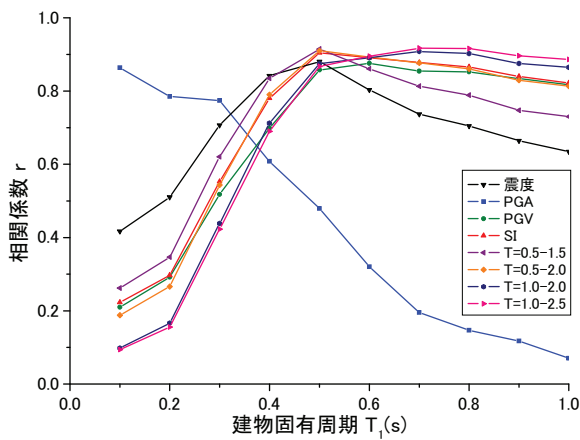


図-8 積分周期帯の変更 ($h=0.20$)

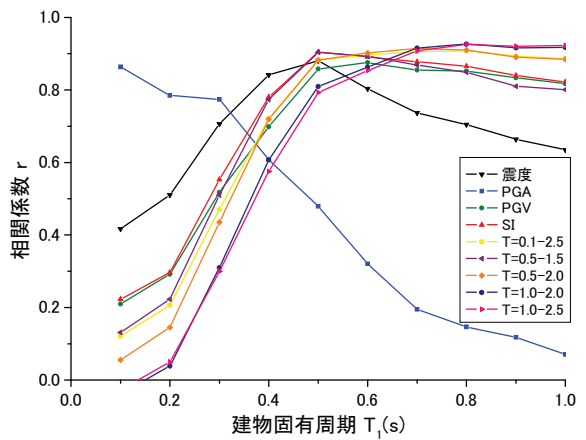


図-10 積分周期帯の変更 ($h=0.05$)

して定義されることが多い¹⁶⁾。SI値は都市ガスのセンサー⁸⁾や、鉄道の地震検知システム⁹⁾に導入されており、地震発生直後に被害の程度を判断するために用いられている。

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} S_v(T) dT \quad (3)$$

SI値に関して、より建物被害との相関を高めるために、減衰定数 h と積分周期帯 $T_a \sim T_b$ の変更を試みる(式(4))。減衰定数は現行の $h=0.2$ から 0.1 、 0.05 に変更する。積分周期帯に関しては、被害が大きかった観測点の速度応答スペクトルが1秒以上の長周期で卓越している点、境らの研究で、弾性応答スペクトルにおいて建物の弾性周期よりも2~4倍程度の長い周期において被害との相関が高いことが示されている⁴⁾点を踏まえて、短周期帯をカットすることが有効ではないかと考え、現行の $T_a \sim T_b = 0.1 \sim 2.5s$ から $0.5 \sim 1.5s$ 、 $0.5 \sim 2.0s$ 、 $1.0 \sim 2.0s$ 、 $1.0 \sim 2.5s$ に変更する。現行のSI値も含めて計15種類のSI値を、表-1に示した14地震51強震観測点の水平2成分EW、NS波形の計102個の地震記録について算出する。

$$SI(h, T_a, T_b) = \frac{1}{T_b - T_a} \int_{T_a}^{T_b} S_v(h, T) dT \quad (4)$$

本章では、算出された各SI値と前章の地震応答解析で得られた塑性率の相関係数を分析し、応答スペクトルの積分周期帯や減衰定数の変更により、どの程度相関性が向上するか検討する。

(2) 応答塑性率との相関分析

図-7から図-10に修正SI値と塑性率との相関係数の変化を示す。赤線が現行のSI値の結果である。図-7に、積分周期帯 $T_a \sim T_b = 0.1 \sim 2.5s$ において、速度応答スペクトルの減衰定数を変更した場合の相関係数の変化を示す。減衰定数の変更では、現行SI値と大きな差は見られず、さらに構築した建物モデルの減衰定数の設定が多分に影響していると考えられる。

図-8から図-10に、速度応答スペクトルの減衰定数を $h=0.2$ 、 0.1 、 0.05 としたときに、積分周期帯を変化させた際の相関係数を示す。積分周期帯を変化させると、建物固有周期が短周期のときは相関係数は低いが、 $T_1=0.6s$ 以降に関しては現行のSI値や他の地震動指標より相関が高いことが分かる。とくに積分周期帯に短周期帯を含まない $T_a \sim T_b = 1.0 \sim 2.0s$ 、 $T_a \sim T_b = 1.0 \sim 2.5s$ のときに、全ての減衰定数について相関が高いことが分かる。このことから、減衰定数を変更するより積分周期帯を変更した方が、相関係

表-2 実際の木造建物被害率^{7),17)}と地震動指標値

発生日時	地震名	強震観測点	被害率 (%)	計測震度	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	SI (cm/s)
1995.1.17	兵庫県南部地震	JR鷹取駅	59.4	6.48	742.7	155.8	165.3
		大阪ガス葺合供給所	20.2	6.50	834.0	129.7	154.3
		神戸海洋気象台	3.2	6.44	847.9	106.0	122.9
		NTT神戸	16.1	5.84	331.3	88.6	80.6
		JR宝塚駅	7.2	6.12	690.4	98.8	93.8
		本山第一小学校	6.5	6.12	796.8	81.7	90.3
		尼崎高架橋	2.4	5.70	340.7	57.3	59.9
		尼崎竹谷小学校	1.7	5.71	367.8	52.7	56.9
		関電総合技研	0.8	5.96	687.3	58.7	75.1
2000.10.6	鳥取県西部地震	JMA境港	1.1	6.02	762.6	84.8	86.6
2003.9.26	十勝沖地震	K-NET標津	1.3	5.92	583.7	63.0	84.0
2004.10.23	新潟県中越地震	川口町震度計	19.8	6.52	1677.9	160.7	153.0
		JMA小千谷	1.8	6.34	974.0	93.5	108.1
2005.3.25	能登半島地震	K-NET穴水	18.8	6.30	896.1	99.7	125.5
		JMA輪島(鳳至町)	4.7	6.15	472.2	98.9	107.3
		K-NET輪島	2.9	5.50	546.3	44.3	50.3
2007.7.16	新潟県中越沖地震	K-NET柏崎	5.3	6.37	812.0	133.4	131.9

表-3 修正SI値と実際の被害率との相関係数

相関係数 r		積分周期帯 $T_a \sim T_b$ (s)					既存の地震動指標	
		0.1-2.5	0.5-1.5	0.5-2.0	1.0-2.0	1.0-2.5		
減衰定数 h	0.2	0.665	0.573	0.681	0.758	0.742	計測震度	0.545
	0.1	0.631	0.645	0.701	0.766	0.729	PGA	0.265
	0.05	0.635	0.679	0.687	0.741	0.699	PGV	0.711

数により効果的に影響を与えることが出来ると考えられる。

しかしながら、相関係数が高くなったのは一般的な木造建物の固有周期に比べて長い周期である。被害を受ける確率が高い建築年代が古いものや、1階に開口部があるものについては多少固有周期は長くなるものの、この比較だけでは、修正SI値と木造建物の被害との相関が高いと言うには疑問が残る。また数値解析のみから結論を導くには、木造建物の建築年代ごとの固有周期、耐力の分布を考える必要があり、更なる検討が必要である。

5. 地震動指標と実際の被害率の相関分析

前章の結果を受けて、修正SI値に関して更なる検討をすべく、ここでは実際の地震後の木造建物被害率との相関性を検討し、修正SI値の妥当性を評価する。

実地震時の建物被害率については、表-2にあるように、観測点を中心とした半径200mの円内にある車庫・プレハブを除いた木造建物を対象とした全壊率を使用する^{7),17)}。被害率0%の地点と、2004年新潟県中越地震以降で木造建物棟数が50棟未満の地点を

除いた計17点で評価する。地震動指標に関しては、修正SI値に加え、計測震度、地動最大加速度(PGA)、地動最大速度(PGV)、現行SI値についても比較を行う。表-2にあるように、PGA、PGVは水平2成分合成値で、現行のSI値は東京ガス方式で算出した。SI値は前章同様、減衰定数と積分周期帯を変更した計15の組み合わせを算出する。

相関性の評価には、被害率が対数正規分布であると仮定し、確率紙上で直線回帰を行った際の決定係数 R^2 を用いる^{18),19)}。これにより求めた実際の被害率と、修正SI値や既存の指標値との相関係数を表-3に示す。また、図-11に回帰直線の対数平均、対数標準偏差から算出した各地震動指標の対数正規累積分布を示す。

PGAに関しては、数値解析では建物固有周期が短周期で相関が高かったが、木造建物の実被害との関係では相関は低い。PGVとSI値に関しては、実被害率との関係では、計測震度よりも相関が高い。また、表-3から分かるように、SI値の減衰定数の変更はあまり効果はなかったが、積分周期帯の変更で、とくに短周期帯を含まない $T_a \sim T_b = 1.0 \sim 2.0s$ 、 $T_a \sim T_b = 1.0 \sim 2.5s$ で高い値を得ることが出来た。これは数値解析の結果と同様であり、SI値の積分周期帯の変更がよい影響を及ぼすことが確認された。

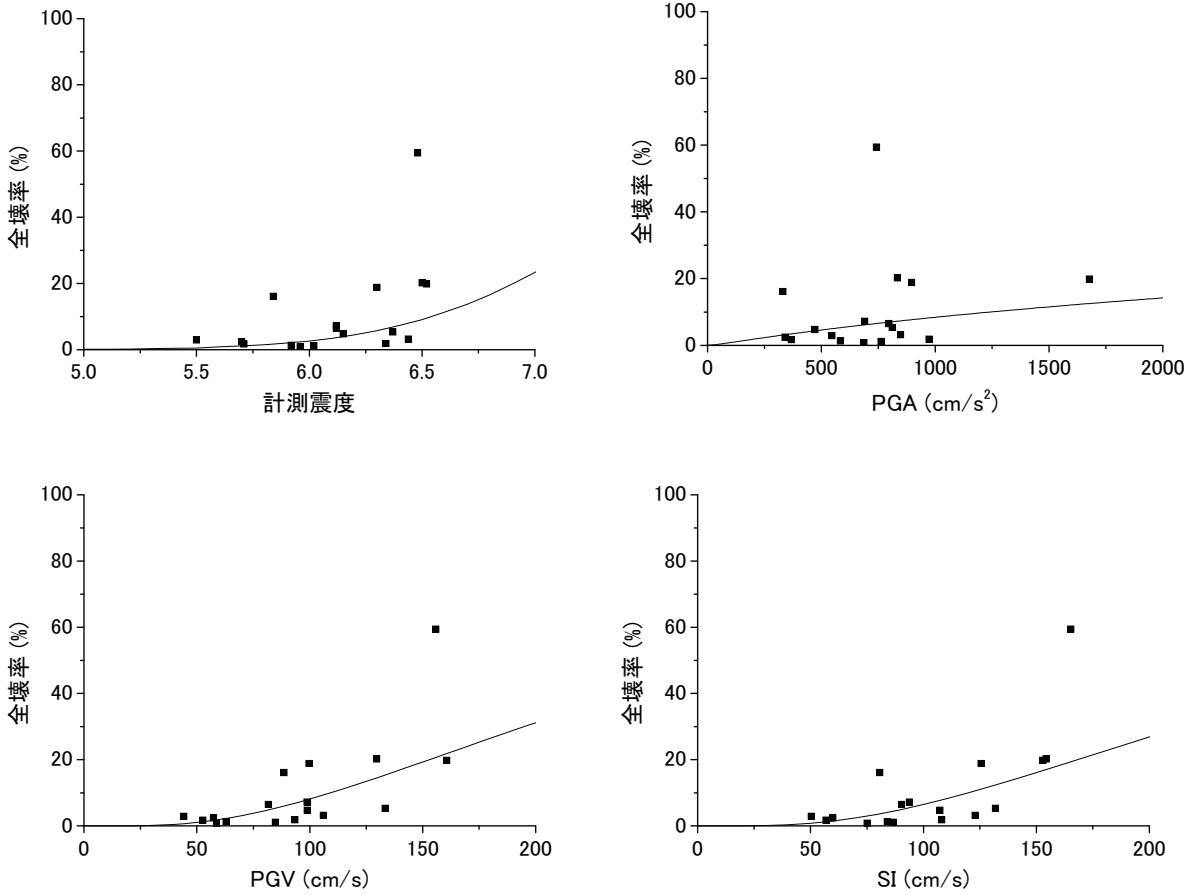


図-11 各地震動指標に対する木造建物被害率の対数正規累積分布

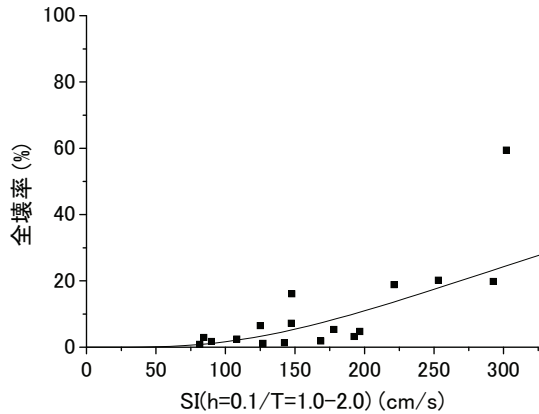


図-12 修正 SI 値($h=0.1/T=1.0-2.0$) に対する木造建物被害率の対数正規累積分布

とくに相関の高かった減衰定数 $h=0.1$ 、積分周期帯 $T_a \sim T_b=1.0 \sim 2.0s$ の対数正規累積分布を図-12に示す。前章の数値解析では、修正SI値の相関性に疑問が残ったが、ここではSI値の減衰定数と積分周期帯を変更することで、実際の木造被害との相関係数が高くなった。

6. まとめ

本研究では、木造建物を対象に建物被害と相関の高い地震動指標の検討を行った。建物数値モデルを構築し、14地震による51強震観測点の様々な強震記録を用いて地震応答解析を行った。解析から応答塑性率を算出し、計測震度、地動最大加速度(PGA)、地動最大速度(PGV)、SI値の4つの地震動指標との相関性を検討した。その結果、地動最大速度(PGV)とSI値が、建物固有周期が短周期のときは相関は低いが、建築年数が古いものなど被害を受けやすい建物が多い周期帯での相関が高いことが分かった。

それを受けSI値に関して検討を行い、建物被害との相関を高めるべく、速度応答スペクトルの減衰定数と積分周期帯を変更した修正SI値を算出し、修正SI値についても応答塑性率との相関性を検討した。減衰定数の変更では、大きな違いはみられなかったが、積分周期帯に短周期帯を含まない $T_a \sim T_b = 1.0 \sim 2.0s$ 、 $T_a \sim T_b = 1.0 \sim 2.5s$ のときに、 $T_1 = 0.6s$ 以降の長周期で相関係数が高いことが分かった。また、減衰定数の変更よりも積分周期帯の変更の方が、相関係数により効果的に影響を与えることが分かった。しかしながら対象となる木造建物の固有周期とは多少ずれがあり、数値解析のみで結論を導くのは難し

い結果となった。

そこで、修正SI値を含め各地震動指標と実地震時の建物被害率との相関性を検討した。数値解析の際に一般的な木造建物の固有周期帯と相関が高かった計測震度とPGAの相関が低くなった。一方、PGV、SI値と実被害率の相関係数が向上し、とくに積分周期帯に短周期帯を含まない修正SI値で高い値を得ることが出来た。

しかしながら、兵庫県南部地震以降の地震に関しては、建物被害に関する定量的なデータが乏しいのも事実である。よって地盤データを組み込むなどして、より詳細な被害データを得ることが必要ではないかと考えられる。また、今回建物被害を表現するのに用いた応答塑性率に関しては、実際の建物被害とどの程度調和的であるかを定量的に検討することが必要であり、今後、応答塑性率を含めた数値解析結果と実被害率との関係性について評価することが求められる。

参考文献

- 1) 岡田恒男, 土岐憲三: 地震防災のはなし—都市直下地震に備える—, 朝倉書店, 2006.
- 2) 童華南, 山崎文雄, 佐々木裕明, 松本省吾: 被害事例に基づく地震動強さと家屋被害率の関係, 第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2299-2304, 1994.
- 3) 清野純史, 藤江恵悟, 太田裕: 組合せ震度の提案・定式化とその活用について, 土木学会論文集, No.612, pp.143-151, 1999.
- 4) 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, 第555号, pp.85-91, 2002.
- 5) 気象庁: 震度を知る 基礎知識とその応用, ぎょうせい, 1996.
- 6) 気象庁: <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/shindo/kaisetsu.html>
- 7) 境有紀, 野尻真介, 熊本匠, 田中佑典: 2007年能登半島地震における強震観測点周辺の被害状況と地震

動の対応性, 日本地震工学会論文集, 第8巻, 第3号, pp.79-105, 2008.

- 8) Shimizu, Y., Yamazaki, F., Yasuda, S., Towhata, I., Suzuki, T., Isoyama, R., Ishida, E., Suetomi, I., Koganemaru, K. and Nakayama, W.: Development of Real-Time Safety Control System for Urban Gas Supply Network, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 2, pp. 237-249, 2006.
- 9) JR 東日本: 新幹線早期地震検知システムの改良等について, http://www.jreast.co.jp/press/2005_2/20051020/no_3.html, 2005.
- 10) 中村豊: 地震動指標間および被害との関係, 日本地震工学会論文集, Vol. 7, No. 2, pp. 235-249, 2007.
- 11) Kagawa, T., Irikura, K. and Yokoi, I.: Restoring Clipped Records of Near-Field Strong Ground Motion during the 1995 Hyogo-ken Nanbu (Kobe), Japan, Earthquake, *Journal of Natural Disaster Science*, Vol.18, No.1, pp. 43-57, 1996.
- 12) 神奈川県西部地震被害想定調査〔建物・火災被害調査〕報告書: 神奈川県環境部防災消防課, 国際航業株式会社, 1993.
- 13) 岩田真次, 川口陽子, 中園真人, 藤田香織, 坂本功: 伝統的木造住宅の固有周期の簡易推定法に関する研究, 日本建築学会技術報告集, 第17号, pp.137-140, 2003.
- 14) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書, 1996.
- 15) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994.
- 16) 佐藤暢彦, 片山恒雄, 大保直人, 川崎勝幸: 新しい制御用地震センサーの開発と試作, 第18回地震工学研究発表会, pp.105-108, 1985.
- 17) 境有紀: 地震動の性質と建物被害の関係, 日本地震工学会誌, No.9, pp.12-19, 2009.
- 18) 柴田明徳: 確率的手法による構造安全性の解析—確率の基礎から地震災害予測まで—, 森北出版, 2005.
- 19) 山口直也, 山崎文雄: 1995年兵庫県南部地震の建物被害率による地震動分布の推定, 土木学会論文集, 612/I-46, pp. 325-336, 1999.

(原稿受理 2009年6月28日)

RELATIONSHIP BETWEEN THE DAMAGE OF WOODEN HOUSES AND SPECTRUM INTENSITY BASED ON NUMERICAL SIMULATION

Sachie HOSHI, Yoshihisa MARUYAMA and Fumio YAMAZAKI

Various earthquake motion indices, e.g., seismic intensity, peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV) and spectrum intensity (SI), are expected to be correlated with structural damages. This study evaluates the correlation between the earthquake motion index and building damage ratio performing seismic response analyses using numerical models of Japanese typical wooden houses. Furthermore, the SI is recalculated by changing the damping ratio and the range of period for integration process. As a result, the SI values obtained by integrations between the periods of 1.0 to 2.0 s and 1.0 to 2.5 s are highly correlated with the numerically simulated structural and actual damages.