

建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案

境有紀（東京大学地震研究所，yuuki@eri.u-tokyo.ac.jp）

神野達夫（防災科学技術研究所，kanno@bosai.go.jp）

纈纈一起（東京大学地震研究所，koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp）

震度は、地震直後の対応や地震危険度予測地図の作成に用いられるなど、地震防災上非常に重要な役割を果たす。しかしながら、2000年の新島・神津島近海を震源とする地震、鳥取県西部地震、2001年芸予地震では震度6弱、6強を記録したにもかかわらず被害はさほどでもなく、現行の計測震度は、実際の建物被害との対応性から再検討が必要と考えられる。

そこで本研究では、応答スペクトルを用い、震度6以上の高震度では建物被害と、震度5以下の低震度では人体感覚と対応する、本来の震度を正確に「計測」できる震度算定方法を提案する。

まず、震度6以上の高震度は、1995年兵庫県南部地震その他の日本で発生した地震の23強震記録とその周辺建物被害データを用い、応答スペクトルのどの周期帯が建物被害率と相関をもつかについて調べた結果¹⁾に基づいて、1-2秒の平均弾性応答（減衰定数5%、水平2成分ベクトル和）の関数とした。

次に、震度5以下の低震度は、現行の計測震度が人体感覚を表現していると考え、応答スペクトルのどの周期帯が現行の計測震度と相関をもつかを検討し、0.1-1秒の平均弾性応答（減衰定数5%、水平2成分ベクトル和）の関数とした。

そして、高震度と低震度における式を組み合わせ、震度を求めるアルゴリズムについて検討し、建物被害と人体感覚を考慮に入れた震度算定方法の提案を行った。速度応答スペクトルを用いる場合を例として、震度を算定するフローチャートをFig. 1に示す。提案計測震度は、弾性加速度あるいは速度応答を用いた非常に簡単な式で与えられ、現行の計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。

提案計測震度を現行のものと比較してTable 1に示す。現行の計測震度で6弱、6強であるにもかかわらず周辺に大きな建物被害がなかった1993年北海道南西沖地震余震の乙部小、1997年鹿児島県北西部地震のK-NET 宮之城、2001年芸予地震のK-NET 大野、東予などが、提案計測震度ではいずれも5強となった。1993年釧路沖地震の釧路JMAと2000年鳥取県西部地震のK-NET 米子は震度6弱のままだが、値は小さくなっている。一方、大きな被害をもたらした1995年兵庫県南部地震のJR 鷹取、葦合の値は、大きな値のままとなっていて、実際の被害と対応したものとなっている。

参考文献

- 1) 境有紀，纈纈一起，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，No.555，pp.85-91，2002.05.

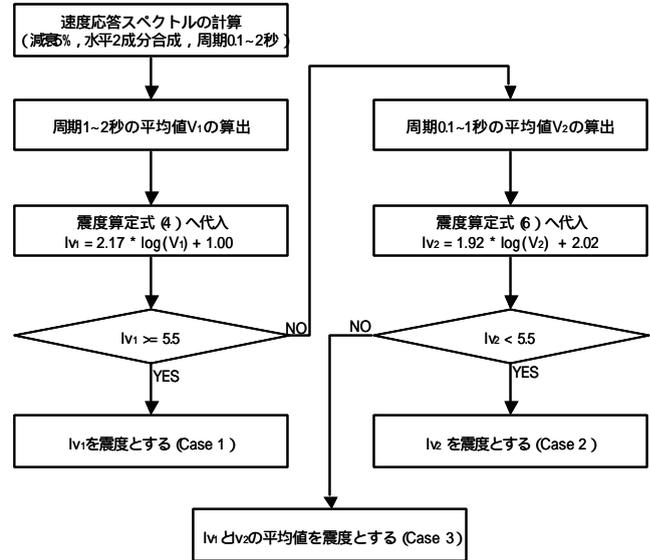


Fig. 1 Flowchart to calculate proposed seismic intensities using response velocities

Table 1 Comparison of current and proposed seismic intensity scales

地震	地点	I_M	I_P	d
1995年兵庫県南部	JR 鷹取	6.48*	6.63	59.4
1995年兵庫県南部	葦合	6.49*	6.39	20.2
1995年兵庫県南部	NTT 神戸	5.83	5.94	16.1
1995年兵庫県南部	JR 宝塚	6.15	5.92	7.2
1995年兵庫県南部	本山第一小	6.12	5.73	6.5
1995年兵庫県南部	神戸 JMA	6.43	6.09	3.2
1995年兵庫県南部	尼崎高架橋	5.69	5.84	2.4
1995年兵庫県南部	尼崎竹谷小	5.70	5.57	1.7
1995年兵庫県南部	尼崎港	5.74	5.70	0.0
1995年兵庫県南部	関西総合技研	5.95	5.54	0.8
1995年兵庫県南部	六甲アイランド	5.70	5.71	0.0
1995年兵庫県南部	JR 新大阪	5.42	5.33	0.0
1995年兵庫県南部	大阪 JMA	4.54	4.40	0.0
1994年三陸はるか沖	八戸市庁舎	5.82	5.57	1.9
2000年鳥取県西部	境港測候所	6.01	5.92	1.1
2000年鳥取県西部	K-NET 米子	5.82	5.76	0.0
1993年釧路沖	釧路 JMA	5.95*	5.64	0.0
1993年北海道南西沖余震	乙部小	6.15	5.44	0.0
2001年芸予	K-NET 大野	5.63	5.27	0.0
2001年芸予	K-NET 東予	5.57	5.16	0.0
2001年芸予	K-NET 三原	4.98	4.77	0.0
1997年鹿児島県北西部3/26	K-NET 宮之城	5.53	5.49	0.0
1997年鹿児島県北西部5/13	K-NET 宮之城	5.92	5.39	0.0

I_M : 現行の計測震度 (*がついたものは水平2成分による値),
 I_P : 提案計測震度, d: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合(%).

建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案

METHOD OF CALCULATING SEISMIC INTENSITIES CONSIDERING STRUCTURAL DAMAGE AND HUMAN BODY SENSE

境有紀¹，神野達夫²，瀨瀬一起³

¹ 東京大学地震研究所，助手 工博

Yuki Sakai, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, yuuki@eri.u-tokyo.ac.jp

² 防災科学技術研究所，特別研究員 博士(工学)

Tatsuo Kanno, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, kanno@bosai.go.jp

³ 東京大学地震研究所，助教授 理博

Kazuki Koketsu, Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, koketsu@eri.u-tokyo.ac.jp

SUMMARY

We have already shown in our past study that structural damage has a good correlation with elastic response spectra of 1 to 2s. We here show that low seismic intensities based on the human body sense have a correlation with elastic response spectra of 0.1 to 1s, and so we propose a method of calculating seismic intensities using earthquake response spectra in order that correspond to actual structural damage in the high intensity region and to human body sense in the low intensity region.

キーワード: 震度, 気象庁震度階級, 建物被害, 人体感覚, 応答スペクトル

Key words: Seismic Intensities, JMA Seismic Intensity Scale, Structural Damage, Human Body Sense, Response Spectrum

1 はじめに

震度などのいわゆる地震動の破壊力指標は、地震直後の対応や地震危険度予測地図の作成に用いられるなど、地震防災上非常に重要な役割を果たす。このことは、震度をはじめとする地震動の破壊力指標は、実際の被害と対応する必要がある、ということの意味する。震度は、1996年に時刻歴データから計算する計測震度となった。しかしながら、2000年の新島・神津島近海を震源とする地震、鳥取県西部地震、2001年芸予地震では震度6弱あるいは6強を記録したにもかかわらず被害はさほどでもなく、その一方で建物の耐震性能はやや異なるが、1999年台湾集集地震では震度6弱でも甚大な被害をもたらした地点もある¹⁾など、同じ震度でも被害程度が大きく異なる事例が見られた。従って、現行の計測震度は高震度において実際の建物被害との対応性から再検討が必要と考えられる。

筆者らは、1999年台湾集集地震、あるいは1995年兵庫県南部地震その他の日本で発生した地震の強震記録とその周辺建物被害データを用いた解析により、地動最大加速度、地動最大速度、スペクトル強度、計測震度などの従来

の地震動の破壊力指標では、建物被害を的確に予測できないことを指摘した。そして1.2~1.5秒、あるいはやや範囲を広げて1~2秒程度の弾性応答が実際の建物被害と強い相関をもつことを示し、これを地震動の破壊力指標として用いることを提案した²⁾。そして、震度5以上を対象として、建物被害と相関をもつようにその指標を用いた震度算定方法の提案を行った。

ここでは、震度5以下についても震度5以上と同様に応答スペクトルから算定する方法について検討し、これを震度5以上のものと併せて、低震度から高震度までの震度全体を応答スペクトルから算定する方法を提案する。

まず、震度算定の全体方針について述べ、次に高震度、低震度それぞれにおける定式化を行い、そしてその2つを併せた、震度算定のアルゴリズムについて検討する。

2 震度に対する考え方

震度は古くから存在し、地震直後の対応に用いられたり、過去の地震における被害レベルも震度で表現されるなど、広く浸透している。筆者らは、現行の計測震度が実際の建

物被害と対応しないのは、震度自体の問題ではなく、現行の計測震度が本来の震度と充分に対応していないためと考えている。よって本論文は、1996年の計測震度以前の震度に対応するもの、即ち、本来の震度を正確に「計測」できるものを提案することを目的としている。

1996年以前の震度の定義を Table 1³⁾に示す。これを見ると、高震度(V以上)は建物被害による記述が含まれているのに対して、低震度(V以下)では、主として人体感覚によって定義されていることがわかる。よって、高震度では建物被害と対応するように、低震度では人体感覚と整合するように設定することが必要となる。

そこでまず高震度では、建物被害率(大破・全壊以上の建物(低層住宅、全建物)の割合)と強い相関をもつ1~2秒の平均弾性応答²⁾を用いて定式化を行う。

一方、低震度については、現行の計測震度のフィルター特性は、人体感覚に対応したものとなっており⁴⁾(これは、現行の計測震度は震度の高低にかかわらず人体感覚のフィルターを用いているということになり、このことが高震度で実際の建物被害との対応を悪くしている一因であるとも言える)現行の計測震度をそのまま用いることも選択肢の1つであると考えられる。

しかしながら、現行の計測震度の算出方法は非常に複雑でわかりにくく、低震度も応答スペクトルで表現できれば、全ての震度を応答スペクトルのみで算定できることになる。よって、低震度を現行の計測震度と整合するように、応答スペクトルから震度を算定する方法について検討する。

高震度と低震度の境界は、Table 1で、家屋の倒壊という大きな被害に言及しているのはVI以上であることから、震度VIの下限である5.5とした。なお、震度は4、6弱というようにある一定の範囲を代表する離散値であるが、ここでは計測震度と同様に連続なものに拡張して表現する。

3 高震度における定式化

ここでは、高震度(5.5以上)を建物被害率と強い相関をもつ1~2秒程度の弾性応答²⁾を用いて定式化を行う。

まず、1995年兵庫県南部地震などの日本で発生した地震の強震記録とその周辺建物被害データを用い、応答スペクトルのどの周期帯が建物被害率と相関をもつかについて調べた結果²⁾を簡単に示す。検討対象としたのは、Table 2の23記録とその周辺の建物被害率である。横軸に系の弾性周期、縦軸に弾性応答(減衰定数5%、水平2成分ベクトル和)と建物被害率の相関係数をとったものを、速度応答を例として(加速度応答の場合もほとんど変わらない) Fig. 1に示す。相関係数は建物の弾性周期(0.2~0.5秒程度)では小さく、その塑性化を考慮した等価周期(1~2秒程度)で大きくなっていることがわかる。

そこで、1~2秒の平均弾性加速度あるいは速度応答で震度を表現する。具体的には、まず震度が主として家屋の

Table 1 Definition of seismic intensity scales before 1996³⁾

昭和24(1949)年~平成8(1996)年 地震津波業務規則 別表第4付表による		参考事項(昭和53年) 地震観測指針(観測編)(1991年版)による
階級	説明	
0	無感。人体に感じないで地震計に記録される程度。	吊り下げ物がわずかにゆれるのが目視されたり、カタカタと音がこえるても、体にゆれを感じなければ無感である。
	微震。静止している人や、特に地震に注意深い人だけに感ずる程度の地震。	静かにしている場合にゆれをわずかに感じ、その時間も長くない。立っただけでは感じない場合が多い。
	軽震。大勢の人に感ずる程度のもので、戸障子がわずかに動くのがわかるくらい地震。	吊り下げ物が動くのがわかり、立っただけでもゆれをわずかに感じるが、動いている場合にはほとんど感じない。眠っていても目をさますことがある。
	弱震。家屋が揺れ、戸障子がガタガタと鳴動し、電灯のようなつり下げ物は相当ゆれ、器内の水面の動くのがわかる程度の地震。	ちょっと驚くほどに感じ、眠っている人も目をさますが、戸外に飛び出すまでないし、恐怖感はない。戸外にいる人もかなりの人に感じるが、歩いている場合感じない人もいる。
	中震。家屋の動揺が激しく、座りの悪い花瓶などは倒れ、器内の水はあふれ出る。また、歩いている人にも感じられ、多くの人々は戸外に飛び出す程度の地震。	眠っている人は飛び起き、恐怖感を覚える。電柱・立木などのゆれるのがわかる。一般の家屋の瓦がずれるのがあっても、まだ被害らしいものではない。軽いめまいを覚える。
	強震。壁に割れ目が入り、墓石・石灯ろうが倒れたり、煙突・石垣などが破損する程度の地震。	立っていることはかなりむずかしい。一般家屋に軽微な被害ははじめる。軟弱な地盤では割れたりくずれたりする。すわりに悪い家具は倒れる。
	烈震。家屋の倒壊は30パーセント以下で、山崩れが起き、地割れを生じ、多くの人々が立っていることができない程度の地震。	歩行はむずかしく、はわないと動けない。
	激震。家屋の倒壊が30パーセント以上に及び、山崩れ、地割れ、断層などを生じる。	

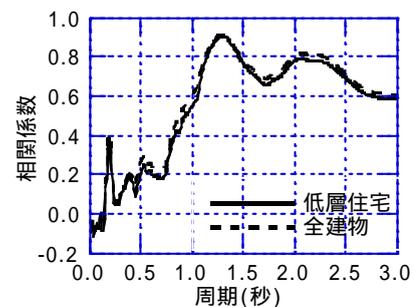


Fig. 1 Correlation coefficients to building damage ratios for various elastic velocity response periods

被害を対象としていることから (Table 1) 対数正規分布を用いて1~2秒の平均弾性加速度あるいは速度応答による低層住宅の被害関数を求める。求めた被害関数を以下に示す。

$$D = (-10.26 + 3.84 * \log(V_1)) \quad (1)$$

$$D = (-11.94 + 3.60 * \log(A_1)) \quad (2)$$

ここで、Dは建物被害率(%), V_1, A_1 はそれぞれ1~2秒の

平均弾性速度および加速度応答(それぞれ cm/s , cm/s^2 、いずれも減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和、以下同じ) (x): 標準正規分布の累積確率である。

次に、岡田・高井による震度の被害関数⁷⁾に修正を加えたもの²⁾(式(3))を用い、式(1)(2)と式(3)より、それぞれ震度を 1~2 秒平均弾性加速度あるいは速度応答によって表現した。求めた震度算定式(以下、提案計測震度)を式(4)(5)に示す。

$$D = (-12.03 + 1.77 * I) \quad (3)$$

$$I_{V1} = 2.17 * \log(V_1) + 1.00 \quad (4)$$

$$I_{A1} = 2.03 * \log(A_1) + 0.05 \quad (5)$$

ここで、 I は震度、 I_{V1} , I_{A1} はそれぞれ V_1 , A_1 を用いた提案計測震度である。

式(4)(5)で与えられる提案計測震度は、それぞれ 1~2 秒平均弾性速度あるいは加速度応答を用いた非常に簡単な式で与えられ、現行の計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。現行の計測震度と提案計測震度の実際のデータとの対応関係を対数正規分布による被害関数と併せて

Fig. 2 に示す。なお、提案計測震度は、式(4)を用いた場合を示している。また、図中の相関係数は被害関数とのものである。提案計測震度は、現行の計測震度と比べると、実際のデータとよりよい対応関係が見られ、実際の建物被害をよりの確に予測できることがわかる。

よって震度 5.5 以上の場合は、式(4)あるいは(5)で震度を表現する。

4 低震度における定式化

2 節で述べた理由により、震度 5.5 未満についても、5.5 以上と同様に平均弾性応答(減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和)を用いて表現する。具体的には、現行の計測震度が人体感覚を表現している⁴⁾と考え、応答スペクトルの何秒(下限周期)から何秒(上限周期)までの平均値を用いれば、現行の計測震度と最も対応するかについて検討する。縦軸、横軸にそれぞれ下限周期、上限周期をとって、平均弾性応答と現行の計測震度との相関係数を、速度応答を例としてコンターで Fig. 3 に示す。用いたデータは、1996 年 5 月 11 日から 2001 年 12 月 2 日までに K-NET において現行の計測震度の最大値が 5 弱以上を記録した地震 5481 記録のうち、震度 5.5 未満の 5469 記録である。ただし、震度の高低に対するデータ数のアンバランスを補正するために、各震度でデータ数の逆数で重み付けをして回帰分

Table 2 Strong ground motion records and building damage ratios in surrounding areas

地震	地点	PGA	PGV	I_M	V_1	A_1	d
1995 年兵庫県南部	JR 鷹取	742.7	161.9	6.48*	391.6	1737.4	59.4
1995 年兵庫県南部	箕合	834.0	139.8	6.49*	305.6	1395.9	20.2
1995 年兵庫県南部	NTT 神戸	331.3	91.2	5.83	188.3	819.2	16.1
1995 年兵庫県南部	JR 宝塚	690.4	91.7	6.15	185.2	811.7	7.2
1995 年兵庫県南部	本山第一小	794.0	86.7	6.12	151.4	666.4	6.5
1995 年兵庫県南部	神戸 JMA	847.9	96.6	6.43	220.9	864.7	3.2
1995 年兵庫県南部	尼崎高架橋	340.7	57.9	5.69	169.3	734.9	2.4
1995 年兵庫県南部	尼崎竹谷小	551.0	60.2	5.70	127.6	524.3	1.7
1995 年兵庫県南部	尼崎港	473.2	64.8	5.74	145.9	623.8	0.0
1995 年兵庫県南部	関電総合技研	555.9	64.2	5.95	123.2	498.6	0.8
1995 年兵庫県南部	六甲アイランド	368.0	79.8	5.70	148.8	694.6	0.0
1995 年兵庫県南部	JR 新大阪	253.0	41.5	5.42	70.2	296.7	0.0
1995 年兵庫県南部	大阪 JMA	83.1	19.5	4.54	40.5	174.7	0.0
1994 年三陸はるか沖	八戸市庁舎	433.7	49.2	5.82	103.4	396.8	1.9
2000 年鳥取県西部	境港測候所	762.6	88.3	6.01	184.3	750.9	1.1
2000 年鳥取県西部	K-NET 米子	435.6	54.1	5.82	156.1	645.5	0.0
1993 年釧路沖	釧路 JMA	752.3	45.8	5.95*	100.8	385.9	0.0
1993 年北海道南西沖余震	乙部小	1615.6	58.3	6.15	64.1	123.2	0.0
2001 年芸予	K-NET 大野	450.4	32.6	5.63	57.3	205.8	0.0
2001 年芸予	K-NET 東予	509.3	33.4	5.57	52.5	166.2	0.0
2001 年芸予	K-NET 三原	641.6	11.8	4.98	21.7	61.3	0.0
1997 年鹿児島県北西部 3/26	K-NET 宮之城	542.8	37.7	5.53	51.7	189.9	0.0
1997 年鹿児島県北西部 5/13	K-NET 宮之城	978.0	47.5	5.92	64.9	195.1	0.0

PGA: 地動最大加速度 (cm/s^2), PGV: 地動最大速度 (cm/s), I_M : 現行の計測震度 (*がついたものは水平 2 成分による値), V_1 , A_1 それぞれ減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和の 1~2 秒平均速度、加速度応答 (cm/s , cm/s^2), d: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合(%), ただし、2000 年鳥取県西部地震境港測候所周辺の建物総数は不明のため、代わりに世帯数を用い、d は自治体による被災度判定の全壊の 1/2 とした⁵⁾。PGV は、周期 15 秒、減衰定数 70.7%の系の最大速度応答を用いた⁶⁾。

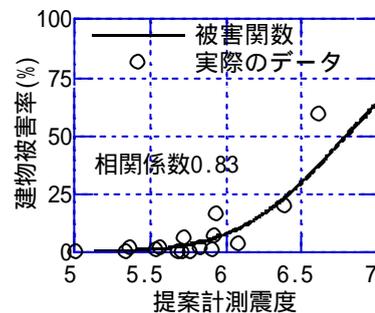
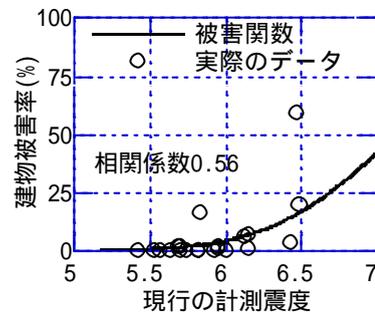


Fig. 2 Correlation of the current and proposed seismic intensities scales with building damage ratios

析を行っている。

Fig. 3 を見ると現行の計測震度と最も相関が高いのは、下限周期が 0.1 秒程度、上限周期が 1 秒程度、即ち、0.1

~1 秒の平均速度応答が現行の計測震度と最も相関が高いことがわかる。これは、人体感覚の周期 0.1~1 秒⁴⁾とも一致している。加速度応答を用いた解析もほぼ同様の結果となった。

よって震度 5.5 未満においては、0.1~1 秒の平均弾性応答を用いて震度を表現する。0.1~1 秒の平均弾性応答と現行の計測震度の関係を Fig. 4 に示す。相関係数は速度、加速度のいずれも 0.99 と非常に高く、変動係数(速度で 0.17、加速度で 0.13)を見ても既往の同様の検討⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾と同等かそれ以上の精度を有している。Fig. 4 から求めた回帰式を式(6)(7)に示す。

$$I_{V2} = 1.92 \cdot \log(V_2) + 2.02 \quad (6)$$

$$I_{A2} = 1.97 \cdot \log(A_2) - 0.24 \quad (7)$$

ここで、 I_{V2} 、 I_{A2} はそれぞれ V_2 、 A_2 を用いた提案計測震度で、 V_2 、 A_2 はそれぞれ 0.1~1 秒の平均弾性速度および加速度応答(それぞれ cm/s, cm/s², いずれも減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和、以下同じ) である。

式(6)(7)は式(4)(5)と同様に、それぞれ 0.1~1 秒平均弾性加速度あるいは速度応答を用いた非常に簡単な式で与えられ、現行の計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。

よって震度 5.5 未満の場合は、式(6)あるいは(7)で震度を表現する。

5 提案計測震度を求めるアルゴリズム

3 節、4 節のそれぞれで、震度 5.5 以上、5.5 未満について震度を定式化した。最終的な震度は、これらの式を組み合わせることで求めることになる。また用いる式は、速度応答を使った式(4)(6)あるいは、加速度応答を使った式(5)(7)のどちらかとなる。これ以降は、説明をわかりやすくするため、速度応答、即ち式(4)(6)を用いる場合を例として説明を行う。加速度応答を用いる場合は、式(4)を式(5)に、式(6)を式(7)に置き換えればよい。

震度は、高震度における式(4)と低震度における式(6)を用いて算定する必要があるが、同じ記録を用いても式(4)と(6)では、異なる値が算出される。また、算出された値が式(4)と(6)でそれぞれ 5.5 以上、5.5 未満となるとは限らない。よって、最終的な震度を求めるアルゴリズムは慎重に決定する必要がある。

まず、式(4)の値が 5.5 以上となる場合 (Case 1) は、大きな建物被害が出ている可能性が高いので式(6)の値にかかわらず、式(4)の値をそのまま採用する。次に、式(4)(6)でいずれも 5.5 未満となる場合 (Case 2) は、人体感覚を優先し、式(6)の値を採用する。問題となるのは、式(4)で 5.5 未満となり、式(6)で 5.5 以上となる場合 (Case 3) であり、2000 年の新島・神津島近海を震源とする地震、鳥取県西部地震、2001 年芸予地震において震度 6 弱あるいは 6 強を記録したにもかかわらず、被害はさほどでもなか

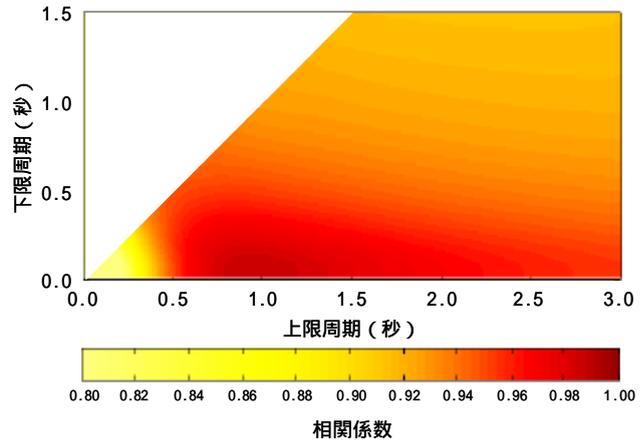


Fig. 3 Correlation coefficients of elastic velocity response periods to current seismic intensities

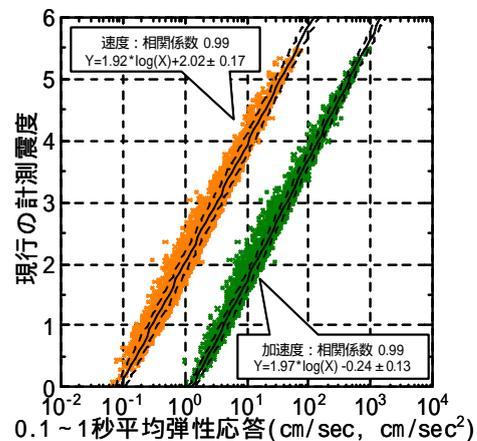


Fig. 4 Relations between current seismic intensities and average elastic responses from 0.1 to 1 s

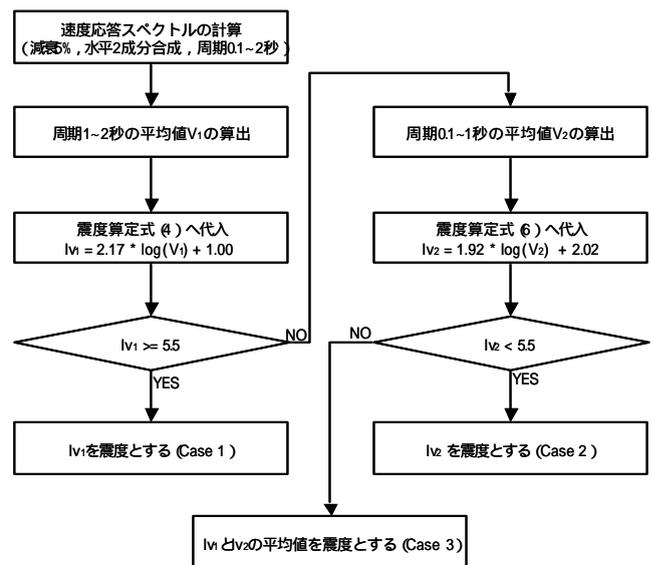


Fig. 5 Flowchart to calculate proposed seismic intensities using response velocities

ったものは、まさにこのケースである。これは、体感是非常に大きい大きな建物被害はほとんど生じない、というケースであり、判断が難しい。そこでここでは、体感と被害の両方を考慮に入れるために、 I_{V1} と I_{V2} がそれぞれ建物被害と人体感覚を、震度という同じ尺度で評価しているものと考え、 I_{V1} と I_{V2} の平均値とした。以上の震度を求めるアルゴリズムをフローチャートで Fig. 5 に示す。提案計測震度は、弾性加速度あるいは速度応答を用いた非常に簡単な式で与えられ、現行の計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。

この方法を用いて、まず 4 節で用いた K-NET の 5481 記録を使った震度の算定を行った。その結果、Case 1, 2, 3 に該当する記録数はそれぞれ、3, 5470, 8 だった。このうち Case 3 の 8 記録は、現行の計測震度では 6 弱、5 強がそれぞれ 6, 2 記録だったのが、提案計測震度では、5 強、5 弱がそれぞれ 7, 1 記録となった。

次に Table 2 の 23 強震記録を用いて提案計測震度の算定を行った。求めた提案計測震度を現行のものと比較して Table 3 に示す。現行の計測震度で 6 弱、6 強であるにもかかわらず周辺に大きな建物被害がなかった 1993 年北海道南西沖地震余震の乙部小、1997 年鹿児島県北西部地震の K-NET 宮之城、2001 年芸予地震の K-NET 大野、東予が、提案計測震度ではいずれも 5 強となった。1993 年釧路沖地震の釧路 JMA と 2000 年鳥取県西部地震の K-NET 米子は震度 6 弱のままだが、値は小さくなっている。一方、大きな被害をもたらした 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取、葦合の値は、大きな値のままとなっている。

以上のことから、提案計測震度は、実際の建物被害を的確に表現し、現行の計測震度と比較しても、実際の建物被害により対応したものになっていることがわかる。

本方法は、人体感覚と大きな建物被害を考慮に入れたものであるが、Table 1 の震度 V には、建物の中小被害に対する記述もあり、より厳密にはこれを考慮に入れた詳細な検討を今後行っていく必要があるだろう。

最後に、提案および現行計測震度の対応関係について考察しておく。K-NET の 5481 記録と Table 1 の 23 記録、計 5504 記録について、提案および現行計測震度の対応関係を、速度応答を用いた場合を例として Fig. 6 に示す。

これを見ると、震度 5 程度以下では、現行の計測震度は提案計測震度にほぼ対応しているが、それ以上では、現行の計測震度がほとんどのケースで提案計測震度より大きくなっており、実際の建物被害を的確に予測する提案計測震度は、現行の計測震度の下限を押さえる形になっている。これは、現行の計測震度は被害を小さく予測することはほとんどない反面、大きく予測することが非常に多い、ということの意味している。例えば、現行の計測震度で 5.7 となった場合、5.7 に対応する被害が生じている可能性はあ

Table 3 Comparison of current and proposed seismic intensity scales

地震	地点	I_M	I_{V1}	I_{V2}	I_P	C	d
1995 年兵庫県南部	JR 鷹取	6.48*	6.63	6.07	6.63	1	59.4
1995 年兵庫県南部	葦合	6.49*	6.39	6.13	6.39	1	20.2
1995 年兵庫県南部	NTT 神戸	5.83	5.94	5.53	5.94	1	16.1
1995 年兵庫県南部	JR 宝塚	6.15	5.92	6.03	5.92	1	7.2
1995 年兵庫県南部	本山第一小	6.12	5.73	5.83	5.73	1	6.5
1995 年兵庫県南部	神戸 JMA	6.43	6.09	6.36	6.09	1	3.2
1995 年兵庫県南部	尼崎高架橋	5.69	5.84	5.55	5.84	1	2.4
1995 年兵庫県南部	尼崎竹谷小	5.70	5.57	5.66	5.57	1	1.7
1995 年兵庫県南部	尼崎港	5.74	5.70	5.46	5.70	1	0.0
1995 年兵庫県南部	関電総合技研	5.95	5.54	5.94	5.54	1	0.8
1995 年兵庫県南部	六甲アイト	5.70	5.71	5.38	5.71	1	0.0
1995 年兵庫県南部	JR 新大阪	5.42	5.01	5.33	5.33	2	0.0
1995 年兵庫県南部	大阪 JMA	4.54	4.49	4.40	4.40	2	0.0
1994 年三陸はるか沖	八戸市庁舎	5.82	5.37	5.77	5.57	3	1.9
2000 年鳥取県西部	境港測候所	6.01	5.92	5.84	5.92	1	1.1
2000 年鳥取県西部	K-NET 米子	5.82	5.76	5.54	5.76	1	0.0
1993 年釧路沖	釧路 JMA	5.95*	5.35	5.93	5.64	3	0.0
1993 年北海道南西沖余震	乙部小	6.15	4.92	5.95	5.44	3	0.0
2001 年芸予	K-NET 大野	5.63	4.82	5.73	5.27	3	0.0
2001 年芸予	K-NET 東予	5.57	4.73	5.59	5.16	3	0.0
2001 年芸予	K-NET 三原	4.98	3.90	4.77	4.77	2	0.0
1997 年鹿児島県北西部3/26	K-NET 宮之城	5.53	4.72	5.49	5.49	2	0.0
1997 年鹿児島県北西部5/13	K-NET 宮之城	5.92	4.93	5.84	5.39	3	0.0

I_M : 現行の計測震度 (*がついたものは水平 2 成分による値), I_{V1} : 式(4)による I_{V1} , I_{V2} : 式(6)による I_{V2} , I_P : Fig. 5 のアルゴリズムによって求めた提案計測震度, C: 本文中の Case ?の?, d: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合(%)

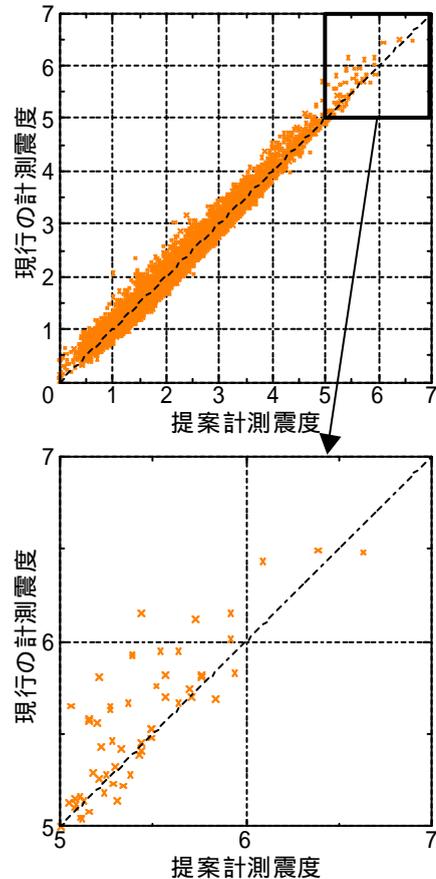


Fig. 6 Relationships between current and proposed seismic intensities

るが、5.7以上の被害が生じている可能性は小さい。しかしながら、実際には5.7以下の被害しか生じていないケースが多い、ということになる。

よって、現行の計測震度を使用するのであれば、それ以下の被害しか生じていないことが多いということに注意する必要がある。

6 まとめ

応答スペクトルを用いて、本来の震度を正確に「計測」できる震度算定方法を提案した。

提案する震度算定方法は、震度6以上の高震度が、筆者らの既往の研究に基づいた、建物被害率と強い相関をもつ1-2秒の平均弾性応答（減衰定数5%、水平2成分ベクトル和）で、震度5以下の低震度が、人体感覚に対応した0.1-1秒の平均弾性応答（減衰定数5%、水平2成分ベクトル和）で表現されている。即ち、震度6以上では建物被害率と強い相関をもち、5以下では人体感覚に対応したものとなっている。

謝辞

強震記録は、1995年兵庫県南部地震を震災予防協会¹¹⁾、JR総合技術研究所¹²⁾、大阪ガス、NTTファシリティーズ、積水ハウス¹³⁾、関西地震観測研究協議会、地域地盤環境研究所香川敬生氏¹⁴⁾、気象庁より、1993年釧路沖地震、1994年三陸はるか沖地震を建築研究所より、2000年新島・神津島近海を震源とする地震と2000年鳥取県西部地震（境港測候所）を気象庁より提供を受けました。また、防災科学技術研究所K-NETの記録を使用させていただきました。記録入手の際、竹中工務店技術研究所小林喜久二氏、建築研究所鹿嶋俊英氏に労を取っていただきました。

建物被害データは、1995年兵庫県南部地震については、建築研究所のCD-ROMデータ¹⁵⁾を使用し、1994年三陸はるか沖地震八戸市庁舎周辺を秋田県立大学鈴木有先生に提供いただき¹⁶⁾、建物総数を八戸市役所に調べていただきました。2000年鳥取県西部地震境港測候所周辺の被害データは、愛媛大学森伸一郎先生に提供していただきました¹⁷⁾。2000年鳥取県西部地震のK-NET米子は米子市役所に、1997年鹿児島県北西部地震K-NET宮之城は、飛鳥建設技術研究所の三輪滋、沼田淳紀両氏に情報を提供していただきました¹⁸⁾。

気象庁計測震度を求めるプログラムは、文献³⁾の巻末のリストを基に早稲田大学山田真氏、中村操氏らがコーディングし、東京電力植竹富一氏が修正したものに手を加えて使わせていただきました。

各位に心より感謝申し上げます。

参考文献

1) 境有紀, 吉岡伸悟, 瀧澤一起, 壁谷澤寿海: 1999年台湾集集地震に基づいた建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討, 日本建築学会構造系論文集,

No.549, pp.43-50, 2001.11.

- 2) 境有紀, 瀧澤一起, 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, No.555, pp.85-91, 2002.05.
- 3) 気象庁: 震度を知る 基礎知識とその活用, ぎょうせい, 1996.
- 4) 岡田成幸: 防災学に必要な地震動入力尺度について考える～震度のフィルター特性の検証を通して～, 第26回地震工学研究発表会パネルディスカッション, 土木学会地震工学委員会, pp.13-19, 2001.8.
- 5) 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, No.612/ -46, 325-336, 1999.1.
- 6) 渡部丹, 大橋雄二, 長谷部廣行: 高層建築物の耐震設計入力地震動について(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B 構造, pp.135-136, 1985.
- 7) 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集, No.524, pp.65-72, 1999.10.
- 8) 董華南, 山崎文雄: 地震動強さ指標と新しい気象庁震度の対応関係, 生産研究, 第48巻, 第11号, pp.31-34, 1996.
- 9) 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, Vol.1, pp.51-56, 1999.11.
- 10) 功刀卓: K-NET強震計記録に基づく気象庁計測震度と計測改正メリカリ震度の関係, 地震, 2, 53, 1, pp.89-93, 2000.
- 11) 震災予防協会: 強震動アレー観測, No.3, 1998.3.
- 12) 中村豊, 上半文昭, 井上英司: 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(), JR地震情報, No.23d, 1996.3.
- 13) 積水ハウス株式会社: 六甲アイランドCITY 1995年兵庫県南部地震の地震動観測記録と分析(地盤と地震動について), 1996.12.
- 14) 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.
- 15) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書, 1996.3.
- 16) 1994年三陸はるか沖地震とその被害に関する調査研究, 平成6年度文部省科学研究費(総合研究A)研究成果報告書, 研究代表者長谷川昭, pp.193-196, 1995.3.
- 17) 森伸一郎, 圓井洋介, 盛川仁: 2000年鳥取県西部地震における境港および米子のアンケート震度, 第36回地盤工学研究発表会講演集, pp.2127-2128, 2001.6.
- 18) 1997年5月13日鹿児島県北西部地震被害調査報告書, 飛鳥建設株式会社, 1997.5.