

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

PROPOSAL OF INSTRUMENTAL SEISMIC INTENSITY SCALE FROM RESPONSE SPECTRA IN VARIOUS PERIOD RANGES

境有紀^{*}, 神野達夫^{**}, 瀧澤一起^{***}

Yuki SAKAI, Tatsuo KANNO and Kazuki KOKETSU

We propose a method of calculating seismic intensities by using response spectra in various period ranges. In the original JMA scale, weak, middle and strong ground motions are measured by human body sense and indoor objects motions, moderate damage to buildings, and heavy damage to buildings, respectively. These indices correspond to ground motions in period ranges of 0.1 - 1s, 0.5 - 1s and 1 - 2s. We then formulate low, middle and high intensities with average response spectra in the period ranges. We also propose an algorithm to synthesize these intensities into a single instrumental seismic intensity.

Keywords : earthquake damage mitigation, JMA seismic intensity

building damage ratio, vulnerability function, strong ground motion records

地震防災, 震度, 建物被害率, 被害関数, 強震記録

1. はじめに

地震発生直後の対応や地震危険度マップ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震度は, 1996 年に人による判断から機械判定, 即ち, 地震動の時刻歴データから計算する計測震度となった¹⁾. これにより, 地震発生後直ちに震度情報が得られ, 自治体などの迅速な対応が可能になるシステムが確立されたことは特筆に値する. しかしながら, 震度を地震防災に活用するのであれば, 震度は実際の被害と対応している必要があるが, 計測震度が運用されてからの 1997 年の鹿児島県北西部地震, 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, 2003 年の三陸南地震, 宮城県北部地震でいずれも震度 6 弱あるいは 6 強を記録したにもかかわらず, 観測点周辺での被害はさほどでもなく, 計測震度の被害との対応性が問題視されている.

震度が本来どうあるべきかについては, 様々な議論があるところだが, やはり表 1 の震度階級説明文がより所となるだろう. 表 1 の説明文は定性的な表現が多いなど完全ではなく, 計測震度が点の情報であるのに対して面的判断によるという違いもある. しかし, 人間が感じるかどうか, といった非常に小さな揺れから, 建物が倒壊するという非常に大きな揺れまで, 非常に広い範囲の地震動強さをカバーしていて, もしこれを定量的に計算することができれば地震動の強さを「1 つの指標」で表現するものとしては理想に近いものと言える. そのためには表 1 を見ればわかるように, 震度 5 程度以

下の低震度では人体感覚と室内物品の動き, 震度 5 程度の中震度では建物の中小被害, 震度 6 以上の高震度では建物の大きな被害, と震度の大きさに従って対象を変化させなければならない. 対象を固定してしまえば, 例えば, 震度 5 以下では建物の大きな被害は全く生じず, 一方, 人は震度 5 を越えると震度の違いを判別できなくなる²⁾など, カバーできる震度の範囲が限定されてしまうからである.

表 1 を定量的に表現することに関しては, 精力的に研究が行われているが³⁾⁴⁾, これを再現するように地震動の時刻歴データから震度を計算するには, 震度の大きさによって変化する対象に対応して, 地震動の周期を変化させなければならない. 対応する地震動の周期は, 人体感覚は 0.1 ~ 1 秒²⁾で, 最も敏感なのは 0.25 秒⁵⁾⁶⁾⁷⁾, 室内物品の動きは 0.5 秒⁷⁾, 大型の室内家具が 0.5 ~ 1 秒²⁾, 建物の大きな被害は 1.2 ~ 1.5 秒, やや範囲を広げて 1 ~ 2 秒⁸⁾⁹⁾と, 震度が大きくなるに従い長くなる傾向にある.

しかしながら, 震度の大きさに従って対応する地震動の周期を変化させることは難しく, 計測震度は対象とする地震動の周期を人体感覚に対応した 0.1 ~ 1 秒程度に固定していて, これが高震度で建物被害と対応しない原因となっている⁹⁾. しかし前述のように, もし震度の大きさに従って地震動の周期を変化させて震度を算定することが可能なら, 幅広い範囲で地震動の強さを震度という「1 つの指標」で表現することができる.

筆者らは, そのような震度の高低により対象, 即ち, 地震動の周

* 筑波大学大学院システム情報工学研究科 助教授・工博 Assoc. Prof., Graduate Sch. of Systems and Information Eng., University of Tsukuba, Dr. Eng.

** 広島大学大学院工学系研究科 助手・博士(工) Research Assoc., Graduate Sch. of Eng., Hiroshima University, Dr. Eng.

*** 東京大学地震研究所 教授・理博 Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Sci.

期帯を変化させた震度算定法を想定し、震度 5 以下では人体感覚と室内物品の動き（周期帯 0.1～1 秒）、震度 6 以上では建物の大きな被害（周期帯 1～2 秒）に対応する震度算定法を提案した⁹⁾。しかしながら、周期帯が 0.1～1 秒、1～2 秒の 2 つだけであったために、両者の境界領域の震度 5～6 で、2 つの周期帯によって算定した震度が大きく異なることがあると、応答スペクトルのわずかな差が大きな震度の差となる不連続が生じることがあった。また、両者の中間の周期帯に対応する建物の中小被害を表現できなかった。

そこで本論文では、人体感覚と室内物品の動き、建物の大きな被害に加えて、建物の中小被害に対応する地震動の周期帯について検討し、人体感覚と室内物品の動き、建物の中小被害、建物の大きな被害に対応する 3 つ周期帯を用いて、震度の大きさに従って対象、即ち、対応する地震動の周期を変化させた震度算定法を提案する。具体的には、

- ・震度をその大きさから低、中、高震度の 3 つの領域に分け、それぞれを人体感覚と室内物品の動き、建物の中小被害、建物の大きな被害に対応するように定式化する。
 - ・そのために、それぞれの対象に対応する地震動の具体的な周期帯を求め、それぞれの周期帯における速度応答を用いて低、中、高震度における震度算定式を求める。
 - ・そして、低、中、高震度における 3 つの震度算定式を組み合わせ、最終的な震度を算定するアルゴリズムを作成する。
- 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量に拡張して表現する。

2. 高震度における定式化

高震度における震度は、地震直後の対応にとって最も重要であり、人命の損失に繋がる可能性がある建物の大きな被害と対応するように定式化を行う。筆者らは、既に文献⁸⁾⁹⁾において、建物の大きな被害と相関をもつ地震動の周期帯を 1～2 秒と求め、1～2 秒における平均弾性応答を用いた高震度における震度の定式化を行った。その過程を簡単に述べるとともに、ここでは周期帯の設定根拠についても説明する。

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（表 2）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。対象とした被害レベルは建築研究所による 1995 年兵庫県南部地震のデータ¹⁰⁾の「全壊・大破」とそれに対応するもの（以下、全壊）、被害率は全壊・大破の割合（以下、全壊率）とした。横軸に系の弾性周期、縦軸に弾性速度応答（減衰定数 5%，水平 2 方向を 1 つの量で表現するために 2 成分ベクトル和とした）と全壊率の相関係数をとったものを図 1(1)に示す。相関係数は多くの建物の弾性周期（0.2～0.5 秒程度⁸⁾）では小さく、その塑性化による周期の伸びを考慮した 1 秒以上の等価周期で大きくなっていることがわかる。

ここで、相関係数が大きくなる周期帯について検討した。周期の伸びに比例して弾性周期（0.2～0.5 秒程度⁸⁾）に対応する周期帯の範囲も広がるので、周期帯の上限周期は下限周期の 2 倍（弾性周期とほぼ同じ倍率）と設定した。その結果、下限周期がほぼ 1 秒、即ち、ほぼ 1～2 秒で最も相関係数が大きくなった（図 1(2)）。

そこで、1～2 秒の平均弾性速度応答（以下 1-2 秒応答）で震度を

表 1 震度階級説明文¹⁾

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、カタカタと音が聞こえても、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。立っていると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の地震。	吊り下げ物が動くのがわかり、立っている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。眠っている目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が出はじめる。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。	

表 2 高震度の定式化に用いた強震記録と周辺の建物被害率

地震	地点	PGA	PGV	I _J	D _H
1995 年兵庫県南部	JR 鷹取	742.7	161.9	6.48	59.4
"	糺合	834.0	139.8	6.49*	20.2
"	NTT 神戸	331.3	91.2	5.83	16.1
"	JR 宝塚	690.4	91.7	6.15	7.2
"	本山第一小	794.0	86.7	6.12	6.5
"	神戸 JMA	847.9	96.6	6.43	3.2
"	尼崎高梁橋	340.7	57.9	5.69	2.4
"	尼崎竹谷小	367.8	60.2	5.70	1.7
"	尼崎港	473.2	64.8	5.74	0.0
"	関西総合技研	555.9	64.2	5.95	0.8
"	六甲アクト	368.0	79.8	5.70	0.0
"	JR 新大阪	253.0	41.5	5.42	0.0
"	大阪 JMA	83.1	19.5	4.54	0.0
1994 年三陸はるか沖	八戸市庁舎	433.7	49.2	5.82	1.9
2000 年鳥取県西部	境港測候所	762.6	88.3	6.01	1.1
"	K-NET 米子	435.6	54.1	5.82	0.0
1993 年釧路沖	釧路 JMA	752.3	45.8	5.95*	0.0
1993 年北海道南西沖余震	乙部小	1615.6	58.3	6.15	0.0
2001 年芸予	K-NET 大野	450.4	32.6	5.63	0.0
"	K-NET 東予	509.3	33.4	5.57	0.0
"	K-NET 三原	641.6	11.8	4.98	0.0
1997 年鹿児島県北西部3/26	K-NET 宮之城	542.8	37.7	5.53	0.0
1997 年鹿児島県北西部5/13	K-NET 宮之城	978.0	47.5	5.92	0.0

PGA: 地動最大加速度 (cm/s²), PGV: 地動最大速度 (cm/s) (いずれも水平 2 成分ベクトル和), I_J: 計測震度 (*がついたものは水平 2 成分による値), D_H: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合 (%), 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、被災度判定は自治体によるもので、建物被害率は 2 分の 1 とした¹¹⁾。PGV は周期 15 秒、減衰定数 70.7%の系の最大速度応答¹²⁾。表中の JMA は気象庁、K-NET、KiK-net は防災科学技術研究所の観測点を表す。

表現した。具体的には、まず震度が主として家屋の被害を対象としていることから、標準正規分布の累積確率による対数正規分布（以下、単に対数正規分布）を用いて 1-2 秒応答による低層住宅の被害

関数を求めた．求める手順は文献⁸⁾と同じである．求めた被害関数を以下に示す．

$$D_H = (-10.26 + 3.843 \cdot \log(V_H)) \quad (1)$$

ここで， D_H ：全壊率(%)， V_H ：1-2 秒応答 (cm/s)， (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 $D4^{4)}$ を基に設定した式(2)⁹⁾を用い，式(1)(2)より全壊率 D_H を消去して， I_H を V_H によって表現し，高震度における震度算定式とした(式(3))．

$$D_H = (-12.03 + 1.770 \cdot I_H) \quad (2)$$

$$I_H = 2.171 \cdot \log(V_H) + 1.002 \quad (3)$$

式(3)で算定される I_H は，1-2 秒応答 V_H 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(以下，1-2 秒震度)．現行の計測震度と1-2 秒震度の実際のデータとの対応関係を図2に示す．1-2 秒震度による被害関数は，実際のデータ(全壊率)とよい対応関係が見られる．現行の計測震度では，全壊率が大きく異なる1995年兵庫県南部地震のJR鷹取，葦合，神戸JMA(それぞれ59.4, 20.2, 3.2%)の値がいずれも6.5程度とほぼ同じなのに対して，1-2 秒震度ではこれらの差異を表現できている．また，相関係数も0.83と現行の計測震度(0.56)より大きくなっており，1-2 秒震度が実際の建物被害をよりの確に予測できることがわかる．

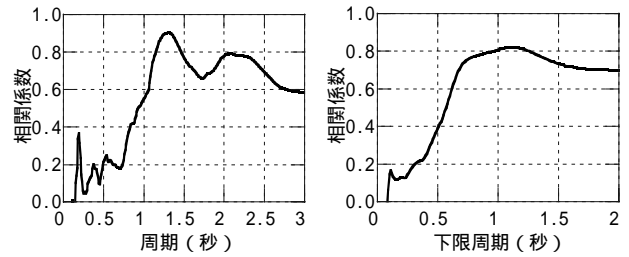
3. 低震度における定式化

低震度においては，人体感覚と室内物品の動きを対象とする．既往の研究によれば，人体感覚に対応する周期は，0.1～1 秒²⁾で，最も敏感な周期は0.25 秒⁵⁾⁶⁾⁷⁾，室内物品の動きに関しては0.5 秒⁷⁾，大型の室内家具が0.5～1 秒²⁾という報告がある．一方，筆者らの検討⁹⁾によると，現行の計測震度が対応している周期帯は0.1～1 秒で，この周期帯は人体感覚と室内物品の動きに対応している．

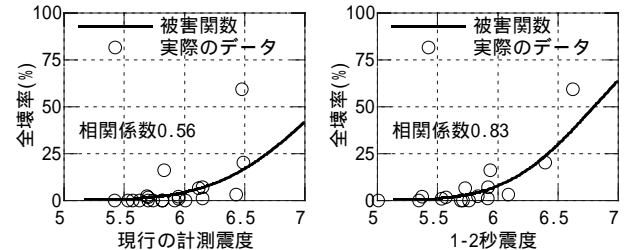
そこで，現行の計測震度を人体感覚と室内物品の動きに対応した震度と考え，この0.1～1 秒という周期帯における応答スペクトル値を用いて現行の計測震度を表現し，低震度における震度の定式化を行った．ここでは，文献⁹⁾で用いた記録にKiK-netの地表の記録，および2001年12月3日以降に発生した地震による強震記録を補充し，人体感覚に与える上下動の影響⁵⁾⁶⁾も考慮に入れて，水平上下3成分を用いた定式化を行う．

まず，弾性速度応答スペクトル(減衰定数5%，水平上下3成分ベクトル和)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再検討する．縦軸，横軸にそれぞれ下限周期，上限周期をとって，平均弾性速度応答と現行の計測震度との相関係数をコンターで図3に示す．用いたデータは，2003年10月31日までにK-NETおよびKiK-netの地表において観測された地震のうち，最大震度が震度5弱以上を観測した地震の全ての記録(12134 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析を行った．図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 秒の平均弾性速度応答(以下，0.1-1 秒応答)が現行の計測震度と最も相関が高いという結果になった．

そこで，0.1-1 秒応答を用いて震度を表現する．0.1-1 秒応答と現



(1) 単一周期 (2) 周期帯
図1 弾性速度応答の周期と全壊率との相関係数の関係



(1) 計測震度 (2) 1-2 秒震度
図2 震度と実際のデータ(全壊率)との対応

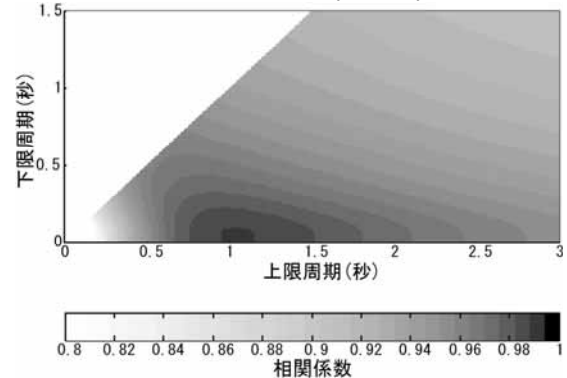


図3 弾性速度応答と現行の計測震度との相関係数

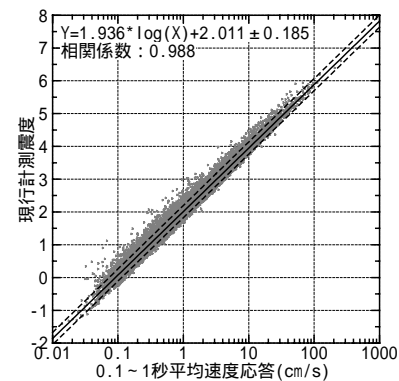


図4 0.1-1 秒応答と現行の計測震度の関係

行の計測震度の関係を図4に示す．相関係数は0.988と非常に高く，変動係数(0.185)を見ても既往の同様の検討¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾と同等かそれ以上の精度を有している．よって，図4から求めた回帰式を低震度領域における震度算定式とした(式(4))．

$$I_L = 1.936 \cdot \log(V_L) + 2.011 \quad (4)$$

ここで， V_L ：0.1-1 秒応答 (cm/s)である．式(4)は式(3)と同様に，0.1-1 秒応答 V_L 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(以下，0.1-1 秒震度)．

4. 中震度における定式化

文献⁹⁾では，式(3)(4)の高震度と低震度を対象とした2つの式を使

って震度を算定していた．しかしながら，両者の対象とする周期帯（0.1～1秒，1～2秒）が大きく異なるために両者の間の中震度がうまく表現できなかった．表1の震度階級説明文を見ると，震度5では「家屋の軽微な被害」という建物の中小被害に関する記述がある．よって，建物の中小被害，具体的には，家屋の軽微な被害を対象として震度の定式化を行い，式(3)(4)と組み合わせて震度を算定する．

まず，家屋の軽微な被害が地震動のどの周期帯と相関があるかについて検討する．用いた被害データと強震記録は，翠川・藤本が収集した自治体罹災調査に基づいたデータ¹⁶⁾のうち強震記録が得られたものに，建築研究所による1995年兵庫県南部地震のデータ¹⁰⁾を補充したものをを用いた(表3)．家屋の軽微な被害に対応する被害レベルは，文献¹⁶⁾では半壊，文献¹⁰⁾においては，自治体判定の半壊に対応する¹¹⁾「軽微な損傷」とした．以下，両者を「半壊」と総称する．対象とする被害率は，半壊以上の割合(以下，全半壊率)とした．表3の D_H は，自治体判定による全壊率で，2章の全壊率 D_H とは異なることに注意されたい．

ここで，全半壊率の中に D_H の割合が多いもの，具体的には D_H が半壊率 D_N (半壊のみの割合)の1/3より大きいものは，検討対象から除外した(表3で地点が括弧， D_H/D_N が太字)．なぜなら，対象とする半壊より大きな被害は，地震動のより長い周期帯によって決まり， D_H の割合が多いものはその影響が含まれてしまうからである．よって，表3のデータの中で D_H が半壊率 D_N の1/3より大きい6点を除いた36点について，全半壊率 D_M が地震動のどの周期と相関をもつかを調べた．

弾性速度応答の周期と全半壊率との相関係数の関係を図5に示す．図5(1)を見ると全半壊率と最も相関をもつのは，1秒よりやや短い周期帯となった．高震度の場合と同様に，上限周期を下限周期の2倍とすると，最も相関係数が大きくなる周期帯は，0.5～1秒となった(図5(2))．これは全壊率 D_H と相関をもつ周期帯1～2秒の半分であり，被害レベルが低い分，周期の伸びも小さくなったためと考えられ，等価周期の概念とも対応している．

次に，全半壊率と相関をもつ0.5～1秒平均弾性速度応答(以下，0.5-1秒応答)で中震度の定式化を行う．関数形は，高震度における定式化と同じ対数正規分布とした．表3の36点から，全半壊率0のものを除き(対数正規分布には被害率0の点が理論的に存在しないため)，更に，全半壊率1%以上(たまたまとても古い家屋や施工不良のものが倒壊するなどという偶然性を排除するために有意な量として1%以上を対象とした)の9点について0.5-1秒応答と全半壊率の関係を図6に示す．そして，これから求めた被害関数を以下に示す．

$$D_M = (-7.367 + 3.150 \cdot \log(V_M)) \quad (5)$$

ここで， D_M : 全半壊率(%), V_M : 0.5-1秒応答(cm/s)である．

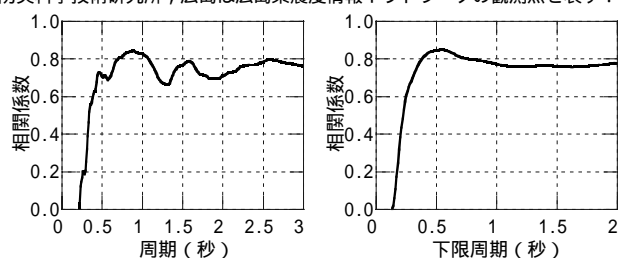
次に，被害レベル半壊に対応した震度の被害関数，即ち，全半壊率による中震度領域の震度の定義を行う．まず，表1の震度階級説明文で，震度5で軽微な被害が発生すると記述があることから，震度5弱の下限(4.5)が軽微な被害(半壊)が発生する下限と考え，震度4.5で有意な最低量として1%，岡田・鏡味による研究³⁾から，震度6.0で50%となるように標準正規分布の累積確率を用いて式(6)のように設定した．

$$D_M = (-9.308 + 1.551 \cdot I_M) \quad (6)$$

表3 中震度の定式化に用いた強震記録と周辺の建物被害率

地震	地点	PGA	PGV	I_J	D_H	D_M	D_N	D_H/D_N
1995年兵庫県南部	関電総合技研	555.9	64.2	5.95	6.0	31.8	25.8	0.20
"	千里供給所	313.4	33.5	5.35*	0.0	0.0	0.0	-
"	NTT豊中	266.7	31.7	5.41	0.0	0.0	0.0	-
"	JR宝塚	690.4	91.7	6.15	5.4	36.1	30.8	0.18
"	(JR藤取)	742.7	161.9	6.48	56.9	81.0	24.1	2.36
"	(本山第一小)	794.0	86.7	6.12	29.1	48.9	19.8	1.47
"	尼崎竹谷小	367.8	60.2	5.70	7.9	36.6	28.7	0.28
"	*神戸JMA	847.9	96.6	6.43	12.5	58.6	46.1	0.27
"	*尼崎高梁橋*	340.7	57.9	5.69	2.9	23.1	20.2	0.15
"	* (NTT神戸)	331.3	91.2	5.83	27.6	65.5	37.9	0.73
"	* (尼崎港)	473.2	64.8	5.74	7.0	19.0	12.0	0.59
"	* (舊合)	834.0	139.8	6.49*	35.2	57.6	22.4	1.57
1997年鹿児島県西部 3/26	JMA阿久根	500.1	39.1	5.38	0.2	0.2	0.0	-
"	K-NET阿久根	295.9	44.8	5.67	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET出水	902.5	16.8	5.23	0.0	0.0	0.0	-
1997年鹿児島県西部 5/13	K-NET出水	753.1	23.1	5.23	0.0	0.0	0.0	-
2000年鹿児島県西部	KiK-net 伯太	844.4	44.5	5.76	0.0	11.4	11.4	0.00
"	K-NET新見	876.3	26.8	5.67	0.0	0.0	0.0	-
"	JMA新見	788.3	21.7	5.09	0.0	0.0	0.0	-
"	JMA米子	280.4	28.8	5.15	0.0	1.3	1.3	0.00
"	K-NET米子	435.6	54.1	5.82	0.0	2.9	2.9	0.00
"	境港測候所	762.8	88.3	6.01	2.0	13.0	11.0	0.18
"	K-NET松江	217.2	26.2	5.12	0.0	0.0	0.0	-
"	JMA松江	223.5	17.6	4.88	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET土庄	146.5	9.8	4.45	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET高野	482.0	13.1	5.09	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET油木	539.6	14.2	5.05	0.0	0.0	0.0	-
2001年芸予	(広島河内町)	1377.0	36.0	5.99	0.1	0.1	0.0	-
"	K-NET東予	509.3	33.4	5.57	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET長浜	399.6	32.9	5.46	0.0	0.0	0.0	-
"	広島倉橋	576.1	22.9	5.48	0.0	0.0	0.0	-
"	JMA倉橋	385.2	11.7	4.91	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET因島	401.7	19.3	5.29	0.0	0.0	0.0	0.00
"	JMA三原	243.7	21.7	5.19	0.0	0.5	0.5	0.00
"	K-NET三原	641.6	11.8	4.98	0.0	0.0	0.0	-
"	広島大柿町	579.4	18.0	5.18	0.0	0.0	0.0	-
"	広島新市町	274.0	7.8	4.51	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET玖珂	191.6	18.6	4.89	0.0	0.0	0.0	-
"	広島世羅西町	404.4	10.4	4.70	0.0	0.0	0.0	-
"	広島三良坂町	299.2	8.7	4.67	0.0	0.0	0.0	-
"	広島下浦刈町	1212.1	30.7	5.37	0.0	0.0	0.0	-
"	K-NET東和	223.2	23.5	5.23	0.0	0.4	0.4	0.00

地点が括弧になっているものは $D_H/D_N > 1/3$ となり対象外となったもの．PGA: 地震最大加速度(cm/s^2)，PGV: 地震最大速度(cm/s ，周期15秒，減衰定数70.7%の系の最大速度応答¹²⁾ (いずれも水平2成分ベクトル和)， I_J : 計測震度(*がついたものは水平2成分による値)， D_H ， D_M ， D_N : 観測地点周辺における自治体による全壊，半壊以上，半壊の家屋の割合(%)，地点の前に*がついているものは，補充した文献¹⁰⁾によるデータで D_H は，自治体による全壊に対応する¹¹⁾「中程度の損傷」以上の割合した．表中のJMAは気象庁，K-NET，KiK-netは防災科学技術研究所，広島は広島県地震情報ネットワークの観測点を表す．



(1) 単一周 期 (2) 周期帯
図5 弾性速度応答の周期と全半壊率との相関係数の関係

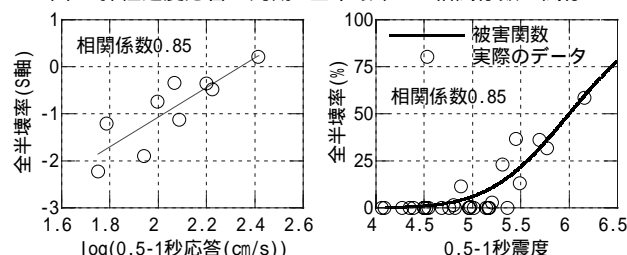


図6 全半壊率0の点を除いた0.5-1秒応答と全半壊率の関係 図7 0.5-1秒震度と実際のデータ(全半壊率)との対応

ここで、 D_M : 全半壊率(%), I_M : 中震度領域における震度である。この式は、 $D_M=6.1\%$, 21.9% でそれぞれ $I_M=5.0, 5.5$ となり、全半壊率が 6.1% , 21.9% を越えるとそれぞれ震度 5 強, 6 弱となる。

式(5)(6)より全壊率 D_M を消去して、 I_M を V_M によって表現し、中震度における震度算定式とした(式(7))。

$$I_M = 2.030 \cdot \log(V_M) + 1.251 \quad (7)$$

式(7)で算定される I_M は、0.5-1 秒応答 V_M 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(以下、0.5-1 秒震度)。0.5-1 秒震度と実際の被害データの対応を図 7 に示す。

0.5-1 秒震度による被害関数は、実際の被害データ(全半壊率)とよく対応している。

5. 震度を算定するアルゴリズム

2~4 章において、低、中、高震度という 3 つの領域それぞれにおける震度算定式の定式化を行った。これらをまとめて記すと次のようになる。

$$I_L = 1.936 \cdot \log(V_L) + 2.011 \quad (4)$$

$$I_M = 2.030 \cdot \log(V_M) + 1.251 \quad (7)$$

$$I_H = 2.171 \cdot \log(V_H) + 1.002 \quad (3)$$

ここで、 I_L, I_M, I_H : それぞれ低、中、高震度領域における震度(それぞれ 0.1-1 秒震度、0.5-1 秒震度、1-2 秒震度)、 V_L, V_M, V_H : それぞれ 0.1~1 秒、0.5~1 秒、1~2 秒平均弾性速度応答 (cm/s, 減衰定数 5%, V_L は水平上下 3 成分ベクトル和、 V_M, V_H は水平 2 成分ベクトル和)である。これらはいずれも、それぞれ 0.1~1 秒、0.5~1 秒、1~2 秒平均弾性速度応答の対数の 1 次式という、入力のみから決まる単純で同じ形の式になっている。

最終的な震度は、低、中、高震度についてそれぞれ式(4)(7)(3)を用いることになるが、それぞれの算定式によって求めた震度が、それぞれ想定する領域に収まるとは限らない(例えば、高震度領域における震度(1-2 秒震度)が実際に高震度になるとは限らない)。そこで、これらの式を組み合わせる最終的な震度を算定するアルゴリズムについて検討する。

まず、低、中、高震度という 3 つの領域は、表 1 の震度階級説明文を参考にし、低震度を人体感覚と室内物品の動きに対応するものとして 5.5 以下、中震度を建物の中小被害に対応するものとして 5.0 以上 6.0 未満、高震度を建物の大きな被害に対応するものとして 5.5 以上とする。低震度と中震度、中震度と高震度の領域にそれぞれ 5.0~5.5, 5.5~6.0 という重なりを設けたのは、想定する震度領域の境界で算定した震度が大きく異なることがあると、応答スペクトルのわずかな差が大きな震度の差となる不連続が生じることがあるのを避けるためである。具体的には、次のようなアルゴリズムを考えた。

- ・まず、1-2 秒震度 I_H が 6.0 以上の場合には、全壊率が 8%以上と予想され⁸⁾、建物の大きな被害が生じる可能性が大きいので、全壊率との正確な対応性を最優先し、 I_H をそのまま採用する (Case 1)。
- ・次に、1-2 秒震度 I_H が 5.5 以上 6.0 未満なら、全壊率は 8%未満と

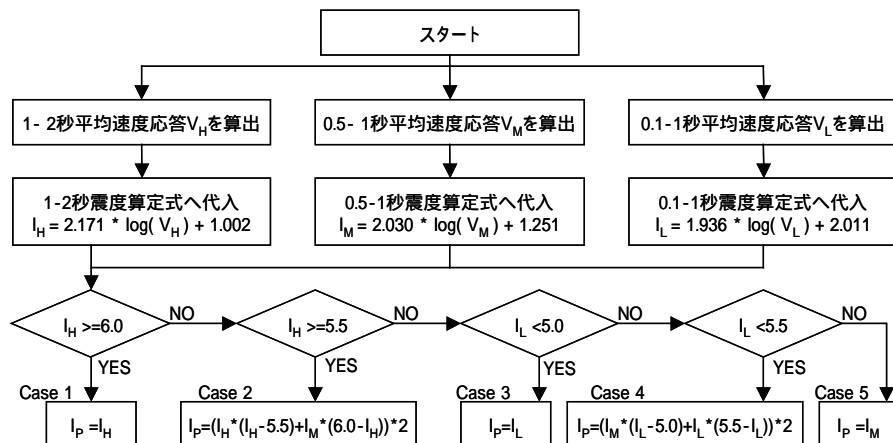


図 8 震度算定のフローチャート

予想され⁸⁾、全半壊率も併せて考慮するために、1-2 秒震度 I_H と 0.5-1 秒震度 I_M から震度を算定する。具体的には、0.5-1 秒震度 I_M と 1-2 秒震度 I_H を $I_H=5.5$ で I_M が 100%, $I_H=6.0$ で I_H が 100%になるように比例配分する (Case 2)。これを式で書くと算定される震度 I_p は、次のようになる。

$$I_p = (I_H * (I_H - 5.5) + I_M * (6.0 - I_H)) * 2 \quad (8)$$

- ・0.1-1 秒震度 I_L が 5.0 未満の場合は、人体感覚と室内物品の動きを最優先し、 I_L をそのまま採用する (Case 3)。

- ・0.1-1 秒震度 I_L が 5.0 以上 5.5 未満なら、半壊程度の被害は発生している可能性があり、人体感覚と室内物品の動きも併せて考慮するために、0.1-1 秒震度 I_L と 0.5-1 秒震度 I_M から震度を算定する。具体的には、0.5-1 秒震度 I_M と I_L を $I_L=5.5$ で I_M が 100%, $I_L=5.0$ で I_L が 100%になるように比例配分する (Case 4)。これを式で書くと算定される震度 I_p は、次のようになる。

$$I_p = (I_M * (I_L - 5.0) + I_L * (5.5 - I_L)) * 2 \quad (9)$$

- ・これ以外 ($I_H < 5.5$ かつ $I_L > 5.5$ の場合) は、建物の大きな被害は発生しないと予想されるが、体感是非常に大きいというケースであり、建物の中小被害が発生している可能性が高いので 0.5-1 秒震度 I_M とする (Case 5)。

以上のアルゴリズムをフローチャートで描くと図 8 のようになる。提案する震度算定法は一見複雑に見えるが、実際には、0.1~2 秒の弾性速度応答スペクトルを計算し、式(4)(7)(3)から I_L, I_M, I_H を求め、Case 1~5 の 5 通りの場合分けに従って最終的な震度 I_p を求めるもので、プログラムも応答計算を含めて 100 行程度、計算時間も 2004 年 1 月現在、10 万円以下で市販されている PC で 1 記録あたり 0.3 秒程度である。また、式(4)(7)(3)による 0.1-1 秒、0.5-1 秒、1-2 秒震度は、震度という同じ指標でそれぞれの周期帯における地震動の強さを表現したもので、0.1-1 秒震度が大きければ人は強い揺れだと感じる、1-2 秒震度が大きければ建物の大きな被害が生じる、というように個別に用いることもできる。

提案する算定法による震度を、表 2, 3 の中からいくつかを例として、また低震度のもの、海外の記録、地震応答解析でよく使われる記録など表 2, 3 以外のものも加え、現行の計測震度と比較して表 4 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建物の大きな被害がなかった記録は、提案する算定法ではいずれも 5 強以下となった(表 4 で I_p の左に*)。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、葺合などの値は、計測震度と同程度またはそれ以上となっている。また、全壊建物は無いが半壊建物は存在するケースでは、いずれも震度 5 となって表 1 と対応し（表 4 で I_p の左に+）、震度 4 以下の低震度では、人体感覚と室内物品の動きに対応した計測震度とほぼ同じになっている。以上のことから提案する震度算定法は、高震度で全壊、中震度で半壊という実際の建物被害を的確に再現し、低震度では現行の計測震度とほぼ対応したものになっていて、低震度から高震度までを震度という 1 つの指標で表現することができるものになっている。

6. まとめ

震度の高低により対象、即ち、地震動の周期帯を変化させた震度算定法を提案した。提案した算定法によって求めた震度は、低震度では人体感覚と室内物品の動き、中震度では建物の中小被害、高震度では建物の大きな被害と対応している。

本論文では、既に検討を行った⁹⁾ 建物の大きな被害、人体感覚と室内物品の動きにそれぞれ対応した 1~2 秒、0.1~1 秒という周期帯に加えて、中震度の決定に必要な建物の中小被害に対応する周期帯について検討した。その結果、建物の中小被害は 0.5~1 秒における速度応答と最も相関が高い、という結果が得られた。そこで、0.1~1 秒、0.5~1 秒、1~2 秒という周期帯の速度応答を用いて、それぞれ低、中、高震度を想定した震度算定式を導き、これらを組み合わせ、それぞれの周期帯によって算定した震度が大きく異なることがあっても震度の不連続が生じない震度算定のアルゴリズムを提案した。提案した震度算定法は、人間が感じるかどうか、といった非常に小さな揺れから、建物が倒壊するという非常に大きな揺れまで、非常に広い範囲の地震動強さをカバーするものとなっている。

謝辞

強震記録は、台湾交通部中央気象局¹⁷⁾、震災予防協会¹⁸⁾、鉄道総合技術研究所¹⁹⁾、大阪ガス、NTT ファシリティーズ、積水ハウス²⁰⁾、関西地震観測研究協議会²¹⁾、気象庁、建築研究所、防災科学技術研究所、広島県より提供を受けました。建物被害データは、文献¹⁰⁾と文献¹⁶⁾のものを使用させていただきました。これ以外の被害データ収集の際、秋田県立大学鈴木有先生、八戸市役所、愛媛大学森伸一郎先生²²⁾、米子市役所、飛鳥建設技術研究所三輪滋、沼田淳紀両氏にご協力いただきました。自ら被害調査に赴いてデータ収集を行った際には、現地の方々は、被災されているにもかかわらず、快く様々なデータを提供していただきました。

大都市大震災軽減化特別プロジェクト（大大特）のテーマⅠ「地震動（強い揺れ）の予測」から研究費の援助を受けました。防災科学技術研究所の藤原広行、功刀卓両氏、東濃地震科学研究所太田裕先生、東京工業大学翠川三郎先生には、貴重なご意見をいただきました。気象庁計測震度を求めるプログラムは、文献¹⁾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。査読者のコメントにより論文を改善することができました。

各位に心より感謝申し上げます。

表 4 提案する算定法による震度と現行の計測震度

地震	地点	I_J	I_L	I_M	I_H	I_p	C	D_M	D_H
1995 年兵庫県南部	JR 鷹取	6.48	6.10	5.77	6.63	6.63	1	81.0	59.4
"	葺合	6.49*	6.15*	5.89	6.40	6.40	1	57.6	20.2
"	NTT 神戸	5.83	5.57	5.35	5.94	5.87	2	65.5	16.1
"	JR 宝塚	6.15	6.09	5.68	5.92	5.89	2	36.1	7.2
"	本山第一小	6.12	5.87	5.58	5.74	5.65	2	48.9	6.5
"	神戸 JMA	6.43	6.40	6.15	6.09	6.09	1	58.6	3.2
1994 年三陸はるか沖	八戸市庁舎	5.82	5.79	5.55	5.38	5.55	5	-	1.9
1993 年釧路沖	釧路 JMA	5.95*	5.96*	5.47	5.35	*5.47	5	-	0.0
1993 年北海道南西沖余震	乙部小	6.15	5.99	5.10	4.93	*5.10	5	-	0.0
2001 年芸予	K-NET 大野	5.63	5.76	5.29	4.82	*5.29	5	-	0.0
"	K-NET 東予	5.57	5.62	5.15	4.74	*5.15	5	0.0	0.0
"	K-NET 三原	4.98	4.81	4.08	3.92	4.81	3	0.0	0.0
1997 年鹿児島県北西部 3/26	K-NET 宮之城	5.53	5.51	5.11	4.72	*5.11	5	-	0.0
1997 年鹿児島県北西部 5/13	K-NET 宮之城	5.92	5.87	5.39	4.94	*5.39	5	-	0.0
2000 年鳥取県西部	境港測候所	6.01	5.86	5.48	5.92	5.85	2	13.0	1.1
"	KiK-net 伯太	5.76	5.62	4.87	4.87	+4.87	5	11.4	0.0
"	JMA 米子	5.15	5.22	4.80	4.59	+5.03	4	1.3	0.0
"	K-NET 米子	5.82	5.57	5.19	5.76	+5.49	2	2.9	0.0
2003 年三陸南(5/26)	K-NET 赤穂	4.00	4.05	3.55	3.59	4.05	3	-	-
"	K-NET 尻屋	2.35	2.48	1.83	1.46	2.48	3	-	-
"	K-NET 下屋地	2.99	2.93	2.48	2.68	2.93	3	-	-
1994 年 Northridge	Sylmar	6.20	6.14	5.75	5.95	5.92	2	-	-
"	Tarzana	6.54	6.50	6.06	5.81	5.90	2	-	-
1999 年台湾集集	埔里	6.04	6.06	5.84	6.03	6.03	1	-	-
"	石岡	6.03	5.66	5.29	5.86	5.69	2	-	-
"	新街	5.98	5.91	5.39	5.39	5.39	5	-	-
2000 年新潟・神津島	神津島金長	5.78	5.74	5.39	4.93	5.39	5	-	-
1940 年 Imperial Valley	El-Centro	5.43*	5.46*	5.13	4.94	5.16	4	-	-
1952 年 Arvin-Tahachapi	Taft	4.96*	4.96*	4.53	4.49	4.96	3	-	-
1968 年十勝沖	八戸港湾	5.28*	5.31*	4.97	5.06	5.10	4	-	-
1978 年宮城県沖	東北大学	5.55*	5.51*	5.22	4.59	5.22	5	-	-

I_J : 計測震度 (*がついたものは水平 2 成分による値), I_L , I_M , I_H : それぞれ 0.1-1 秒震度, 0.5-1 秒震度, 1-2 秒震度, I_p : 提案算定法による震度, C: 本文および図 8 中の Case 番号, D_M : 全半壊率(%), D_H : 全壊率(%).

参考文献

- 1) 気象庁: 震度を知る 基礎知識とその活用. ぎょうせい, 1996.
- 2) 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, pp.13-19, 2001.
- 3) 岡田成幸, 錦末洋史: 震度による地震被害系統評価のためのバリエラビリティ関数群の構成, 地震 2, 第 44 巻, 93-108, 1991.
- 4) 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.
- 5) 三輪俊輔, 米川善晴: 正弦振動の評価法振動の評価法 1), 日本音響学会誌, 27, pp.11-20, 1971a.
- 6) 三輪俊輔, 米川善晴: 正弦振動の評価法振動の評価法 3), 日本音響学会誌, 27, pp.33-39, 1971b.
- 7) 翠川三郎, 福岡知久: 気象庁震度階と地震動強さの物理量との関係, 地震 2, 第 41 巻, 223-233, 1988.
- 8) 境有紀, 綿織一起, 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, 85-91, 2002.
- 9) 境有紀, 神野達夫, 綿織一起: 建物被害と人体感覚を考慮した震度算定方法の提案, 第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM, 2002.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 渡部丹, 大橋雄二, 長谷部廣行: 高層建築物の耐震設計用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.
- 13) 童華南, 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.
- 14) 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.
- 15) 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カリ震度の関係, 地震 2, 53, 1, pp.89-93, 2000.
- 16) 翠川三郎, 藤本一雄: 計測震度と住家被害率の関係 - 罹災調査結果を用いた検討 -, 日本地震工学学会論文集, 第 2 巻, 第 2 号, 15-22, 2002.
- 17) Lee, W. H. K., Shin T. C., Kuo K. W. and Chen K.C.: CWB free-field strong-motion data from the 921 Chi-Chi Earthquake, Vol.1, Digital acceleration files on CD-ROM, 1999.
- 18) 震災予防協会: 強震動アレー観測 No.3, 1998.3.
- 19) 中村豊, 上本文昭, 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.
- 20) 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(地震と地震動について), 1996.12.
- 21) 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.
- 22) 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 回地震工学研究発表会講演集, pp. 2127-2128, 2001.6.