

組合せ震度の提案とその適用

清野純史¹・藤江恵悟²・太田 裕³

¹正会員 工博 京都大学助教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-01 京都市左京区吉田本町)

²学生員 山口大学大学院博士前期課程 知能情報システム工学専攻 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

³工博 山口大学教授 知能情報システム工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

現行の計測震度は、体感や周囲の被害状況との相関が大きくなるようにその諸元が決定されているため、対応する周期範囲も限定されている。すなわち、対象とする構造物の周期範囲が広がるに連れて、従来のような短周期に対応する 1 つの特性量に、必要な情報全てを集約することに限界が現れてくる。そこで本研究では、計測震度を中・長周期の構造物にも対応させるため、その算定法を大きく変えることなく拡張する方法論を展開した。また、被害状況との対応といったような従来どおりの工学的な利用のみならず、震源メカニズムの概要を簡便に推定するといったような理学的な見地からの本手法の適用の可能性についても考察を行った。

Key Words: seismic intensity, instrumental seismic intensity, earthquake ground motion, radiation pattern

1. はじめに

1995 年の兵庫県南部地震を契機に、地震情報への取り組みが国レベルで見直され、震度情報が地震災害の防止・軽減のためにいかに重要であるかが改めてクローズアップされた。これに伴い、気象庁の震度階級も 1996 年 4 月から、47 年ぶりに改正されるに至った。これにより、従来の体感震度を計測震度に改め、「震度 7」までの震度を計測機によって速報する体制が整った。さらに、同年 10 月からこの計測震度をより有効な防災情報とすることを目的として、いくつかの変更を行った。改正の骨子は、震度階級を 10 段階に分けたこと、観測点を増加させ、震源情報に加え「震度 3」以上で最大震度とそれよりも一回級下の震度を計測した全ての市町村を速報すること、などである¹⁾。1996 年 10 月 19 日には、宮崎市沖の日向灘に震源を持つ地震で改正後初の「5 弱」、また、1997 年 5 月 13 日には、鹿児島県川内市で「6 弱」も観測され、速報されている。ちなみに、兵庫県南部地震の際の震度 7 の発表は、倒壊家屋等の調査を踏まえて地震発生の日後に行われている。

従来の気象庁震度階は、本来の目的はその場所の地震動の強さを簡単に表す指標として取り入れられたものであり、その指標の根拠となる諸元は、体感や地盤・建物の応答、被害程度などであった。それ

ゆえ、強震観測ネットワーク²⁾が増加され、生の観測情報(記録)が直接得られるようになった今日では、震度の必要性を疑問視する声もないわけではない。しかし、震度が単に人間社会への情報入力としてだけではなく、情報出力としての被害と密接に関わる単一の特性量として広く地震防災活動に利用できる点を考えれば、様々な情報を集約した総合特性量としての震度情報が今後とも必要であることは理解できるはずである。

従来の震度は、体感そのものとか周辺の事物の挙動—以下「体感」と総称—を人間が観測することで決める方式であったため、震度に客観性を持たすべく様々な工夫が為されてきたとは言え、ある周波数帯域(とくに短周期)を強調するような情報となっていることは否めない。したがって、例えば兵庫県南部地震の地盤震動の特性を震度 7 の領域と 1 対 1 で対応させて議論することは、その地域の地盤震動の、ある側面からしか現象を捉えていないことになる。このたび導入された計測震度も、従来の気象庁震度階における体感や、主に低層の建物被害との相関が大きくなるようにその諸元が決定されている。必然、対応する周期範囲も限定されている。このことは、構造物の地震災害という観点からは、各種構造物の被害をこの速報による情報のみから決めることは難しく、例えば高層化・耐震化した建物やライフライン等の土木構造物被害との対応が不十分であ

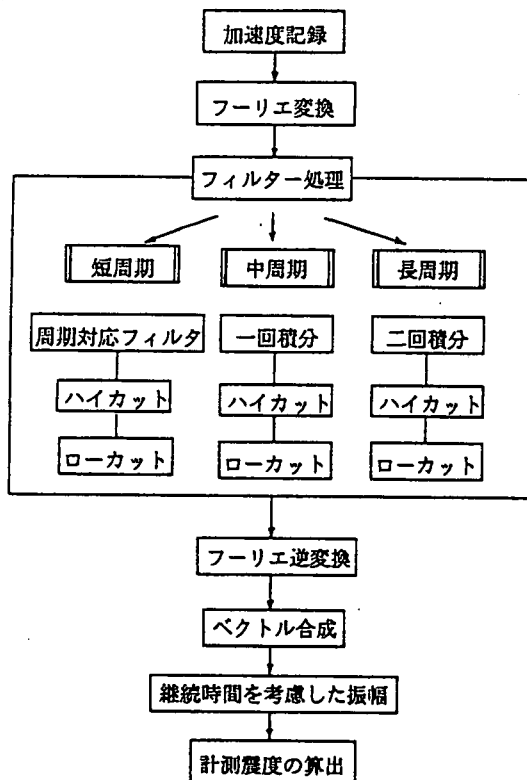


図-1 組合せ震度決定までの手順

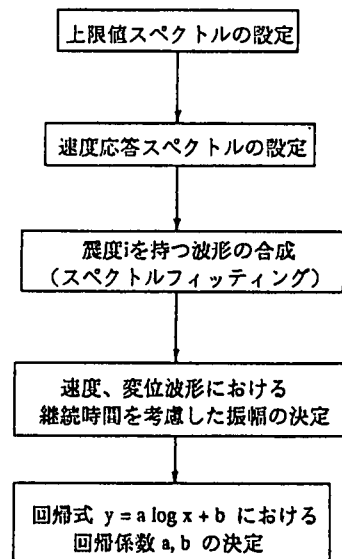
ることを示している。すなわち、対象とする構造物の周期範囲が広がるにつれて、従来の様な短周期に対応する1つの特性量に、必要な情報全てを集約することに限界が現れてくる。ここに、本研究で提案する「組合せ震度」の必要性が生じる。さらに、被害状況との対応などのような従来どおりの工学的な利用のみならず、震源メカニズムの概要を簡便に推定するといったような理学的な見地からの利用も考えられる。

ここでは、計測震度を中・長周期の構造物にも対応させるために、その算定法を大きく変えることなく拡張する方法論を展開する。対象とする地震記録（加速度・速度・変位）や用いるべきフィルター特性についての検討を行い、周期特性（短・中・長）を考慮した新たな震度階である組合せ震度を導入する。また、その組合せ震度の適用についても検討を加える。

2. 計測震度と組合せ震度

計測震度は3成分の加速度記録を用いて以下の手順で算出される^{1),3)}。

まず、各成分の加速度記録をフーリエ変換し、スペクトルを計算する。このスペクトルに、ハイカットフィルター、ローカットフィルターに加え、体感に合致するように周期の影響を考慮した3種類のフ



ここに、 y は加速度、速度、変位から求めた震度 I_a, I_v, I_d 、 x は継続時間を考慮した振幅でそれぞれ a_m, a_v, a_d, a_m の場合は継続時間 t_0 は0.3secと定められている。速度、変位の継続時間は x と y との相関係数が大きくなるように定める。

図-2 中・長周期震度算出の流れ

ィルターをかける。これを逆変換し、フィルター処理された各成分の波形をベクトル合成する。ベクトル合成された波形の絶対値がある継続時間(0.3sec)以上となる最大の a を a_0 とし、この a_0 を用いて計測震度 I_a を算出する。

$$I_a = 2.0 \log(a_0) + K \quad (1)$$

ここに、 I_a は計測震度、 K は周期特性を考慮した定数であり、0.94という値を与える。

従来の気象庁震度は、観測手段の無いサイトにおいて、計測機器に代わるものとして体感から地震動の強さを推定したものである。ほぼ0.1~1秒程度の短周期領域の地震動に対応しており、また通常の建築物の固有周期もこの範囲内に収まることから、建築構造物との相関やそれに付随する人的被害との相関も必然的に高くなる。しかし、高層化・大型化した建物やライフライン、橋梁、貯槽タンクなどの土木構造物の固有周期は十数秒にも及ぶものもあり、従来の震度とそれから類推される被害との関係がなかなか結びつかないものも生じてくる。村松⁴⁾は、このことを早くから指摘し、震度階の定義域を地動の長周期成分に拡張することを試みている。すなわち、周期を考慮した震度階を提案し、加速度、速度、変位記録の最大値と従来の震度階を結び付けて長周期の特殊な被害を論じている。本研究は、この村松の研究を基に、加速度記録を用いた計測震度の算出

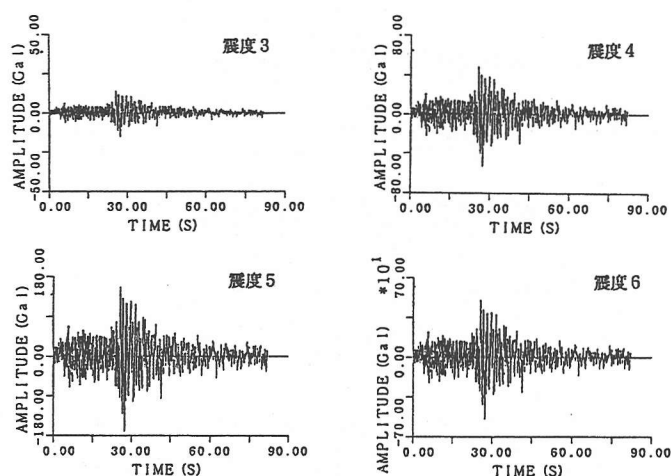


図-3 スペクトルフィッティングにより得られた各震度に対応する波形の一例（福井観測波）

法から大きく逸脱せず、かつ簡便な形で速度・変位波形から中・長周期に対応する震度を算定できる式を提案する。便宜上、ここではそれぞれの震度を短・中・長周期震度と呼び、さらにこの3つ一組の震度階を「組合せ震度」と呼ぶことにする。

図-1はこの組合せ震度の算出法を示したものである。短周期震度の算出は計測震度の算出方法と同じである。図-2は中・長周期震度を求めるための、式(1)（計測震度算出式または短周期震度算出式）に対応する算出式を求めるフローである。まず、短周期領域では8~25gal(震度3)、25~80gal(震度4)、80~250gal(震度5)、250~400gal(震度6)、400gal~(震度7)というような対数法則に則った最大加速度と震度階の関係式がある。したがって、短・中・長周期を区分する境界の周期さえ決定すれば、中・長周期に対応する上限値スペクトルを設定できる。ここでは、この境界周期として村松による0.8secと6.3secを用いた。さらに、この形状と応答スペクトルの形状には良い対応関係がある⁴⁾ので、震度

ごとにその倍率を決定し、ターゲットとする速度応答スペクトルを決定した。倍率は、兵庫県南部地震の際に得られた12の気象官署（神戸、彦根、大阪、鳥取、津、舞鶴、岡山、福井、松山、飯田、名古屋、潮岬）における実観測波形を用い、震度I(I=3,4,5,6)に対応する上限値スペクトルの整数倍(1~10倍)の応答スペクトルを作成し、これにフィットさせた波形から算出した計測震度(短周期震度)がIと一致するように最適な倍率を定めた。図-3は福井での波形を基にした一例である。こうして得られた合成波を積分、フィルタリング⁵⁾して速度波形、変位波形を求め、継続時間(0.3sec:計測震度と整合を取るため)を考慮した振幅 v_0 、 d_0 を決定して以下のように回帰式を求めた。

$$\text{短周期震度} : I_a = 2.00 \log(a_0) + 0.94$$

$$\text{中周期震度} : I_v = 1.91 \log(v_0) + 2.50 \quad (2)$$

$$\text{長周期震度} : I_d = 1.94 \log(d_0) + 3.20$$

3. 組合せ震度の適用

兵庫県南部地震の際に12の気象官署で観測された加速度記録3成分を用い、上述の手順に従って組合せ震度を求めたものが図-4である。短周期震度では各地点のばらつきが大きい、中・長周期震度になるにつれて全体的に均された形状を示すようになる。これは、周期が長くなるにつれてローカルなサイト特性が排除されるためであろう。これらの震度を空間分布として地図上に示したものが図-5(a),(b),(c)である。短周期震度ではその分布が円状になっているが、周期が長くなるにつれて象限状に移って行くように見える。すなわ

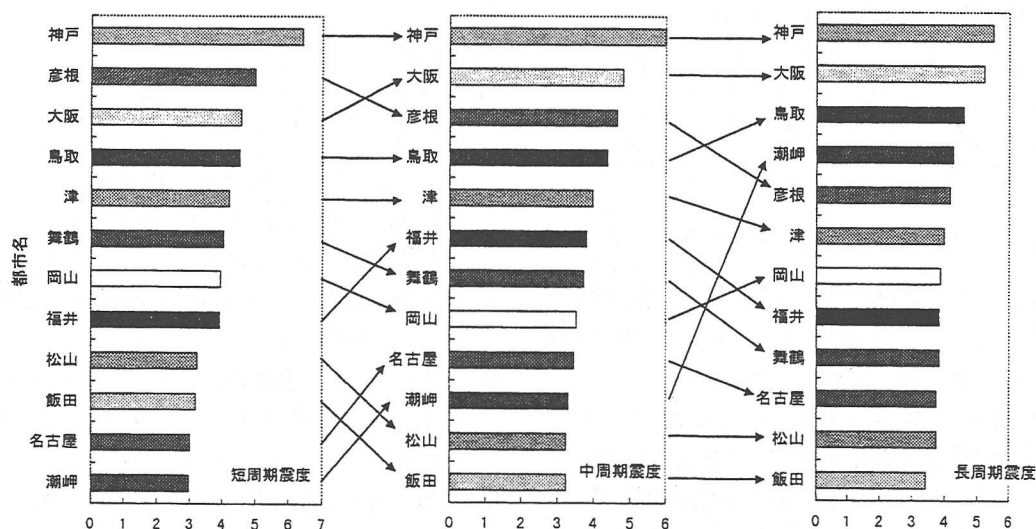
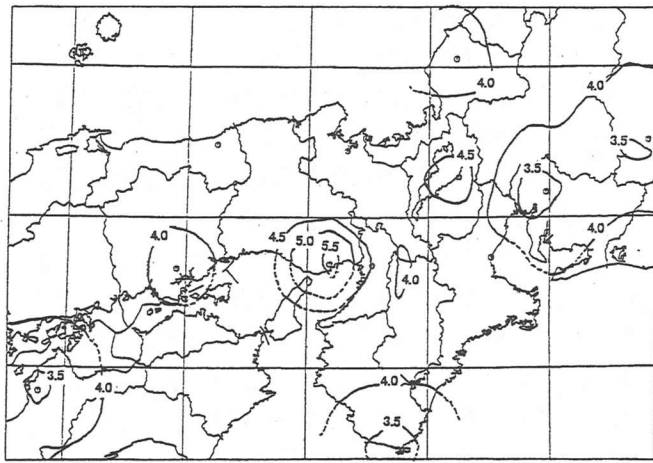
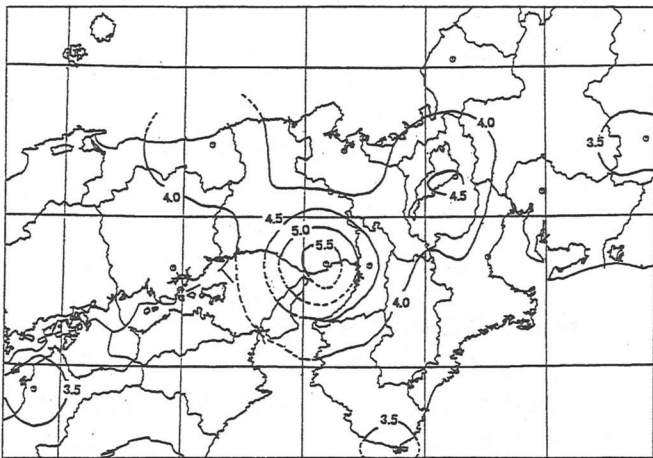


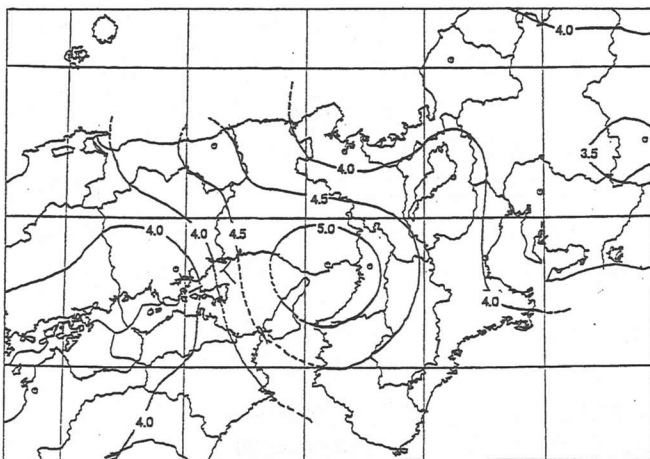
図-4 1995年兵庫県南部地震における各観測点ごとの組合せ震度の比較と変遷



(a) 短周期震度



(b) 中周期震度



(c) 長周期震度

図-5 短・中・長周期震度の空間分布

ち、横ずれ断層から期待される S 波の振幅分布に近い形が現れており、震源のメカニズムの概略を捉えることもできそうである。

図-6 は震度 6 が観測された 3 つの地震、すなわち、1993 年釧路沖地震(釧路)、1994 年三陸はるか沖地震(八戸)、1995 年兵庫県南部地震(神戸)の組合せ震度を示したものである。短周期では釧

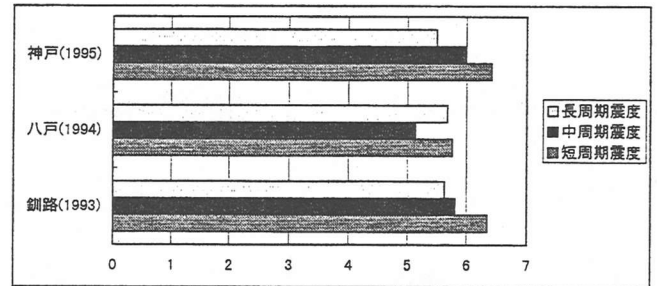


図-6 震度 6 が観測された 3 つの地震に対する組合せ震度の比較

路と神戸が震度 6 強、八戸では震度 6 弱であるにもかかわらず、長周期ではその大小関係が逆転しており、単一の震度では表現し得ない地震の姿が浮かび上がってきている。これは図-4 の兵庫県南部地震の組合せ震度にも見受けられる。

4. まとめ

本研究では、平成 8 年に実施された震度階級の改訂に伴い、入力を表わす震度に対してその対象とする周期帯を更に長周期側に延ばすことを試み、新たに中周期、長周期震度を加えた組合せ震度を提案した。この震度と被害との関係については今後の課題であるが、短周期震度については従来のような低層住宅、一般構造物、中周期震度については高層、超高層建物、長周期震度については長大構造物や大型液体貯蔵タンクのスロッシング、エレベーターの管制ケーブル等を対象として被害との関連を明らかにすれば、今まで以上に地震被害の推定に役立つであろう。

謝辞：観測記録の入手にあたっては、気象庁地震津波監視課の関田氏にお世話になりました。ここに記して感謝の意を表する次第であります。

参考文献

- 1) 気象庁監修：震度を知る－基礎知識とその活用－、ぎょうせい、平成 8 年 9 月。
- 2) National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention: Kyosin Net, Science and Technology Agency, 1995.
- 3) 震度問題検討会：震度問題検討会検討結果最終報告、平成 7 年 11 月。
- 4) 村松郁榮：既存震度階の適用限界吟味と改善への試み、文部省科学研究費自然災害特別研究計画研究成果(研究代表者：太田 裕)、昭和 62 年 3 月。
- 5) 斎藤正徳：漸化式デジタル・フィルターの自動設計、物理探鉱、第 31 巻第 4 号、昭和 53 年 8 月。