

計測震度の工学的吟味と組合せ震度導入の意義

清野純史¹・土岐憲三²・白田利之³・太田 裕⁴

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 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³大阪市下水道局建設部 (〒530-8201 大阪市北区梅田1-2-2)

⁴理博 愛知淑徳大学教授 現代社会学研究科 (〒480-1197 愛知県愛知郡長久手町長湊片平9)

現在気象庁によって公表されている計測震度は、地震動の持つ様々な情報を1つの特性量に集約させているため、簡潔性という利点と情報の欠落という問題点の両面を併せもっている。したがって、地震工学・地震防災への有効利用を考える際には地震動の特性を表す他の諸指標との関係を明確にしておく必要がある。本研究では、特に地震被害の出始める震度4以上を与える地震に注目し、種々の物理量と計測震度との関係とともに、計測震度の工学上の適用範囲について応答スペクトルを用いて明らかにした。その上で、計測震度とその特性が反映されている周期よりも長い周期帯域に対して、既に提案している「組合せ震度」を援用し、これを構造物被害や防災情報として活用することの意義について詳しく考察した。

Key Words: *instrumental seismic intensity, peak acceleration, peak velocity, spectral intensity, combined seismic intensity*

1. はじめに

従来の震度が意味するものは、明治中期の導入以降今日に至るまで、いくたびかの変遷を経てはいるものの、それが地震の入力動強さを評価する測度の一つであるという基本の性質は一貫して変わっていない。わが国の「木造住家」等比較的均質な構造物への影響の度合いを観察することで震度を決めていた事実(習慣)があり、この場合、入り口(地震動強さの度合い)と出口(影響・被害の程度)とが1対1に対応していることから、入力としての地震動を表す尺度指標なのか、あるいは出力応答(被害)の度合いを表す意味合いが含まれているものなのかについて混乱があり、これをそのままに最近に至ったことは否めない。しかし、1996年の震度階級の改定による器械観測への移行により、その値の意味するものが厳密に入力の大きさを表す一つの特性値であることが明確に示されたことになる。

地震が発生すると、震度3以上が観測された場合には、数分以内に地震の震央位置やマグニチュードといった情報に加えて各地の震度が気象庁から発表され、テレビやラジオなどを通して広く情報が伝達される。前述のように、1996年以降公表されている震度は、長い歴史を持つ気象庁震度階とは決定法が大きく異なっている。すなわち、前者が体感とか被害等、事物の応答を観察することで決めていた一体感震度と呼称一に対して、後者は名前の通り器

械計測による計測震度であり、地震動を直接観測した値に基づくものである。

ただし、後者は震度に換算する段階で、体感や周囲の状況、地震被害との対応付けを考慮しているため、そこから類推される被害の概略把握に大きく貢献していることもまた事実である。しかし、計測震度は地震動がもつ性質のすべてを反映したものとはいえず、決められた震度に対して、入力動に関係する他の(工学的)特性量がどの程度の幅を持っているのかについてあらかじめ正確に把握しておくことが特に重要となる。

このような計測震度と入力地震動の特性値の関係については既に幾つかの検討がなされている^{1) - 3)}。特に翠川ら¹⁾は、対象とする指標を最大加速度、最大速度のみならず、最大加速度と最大速度の積、単位時間当たりの運動エネルギーの最大値、加速度の全パワー等にまで広げ、それぞれの対応関係を詳細に検討している。また、用いたデータセットには震度2以下のデータの割合が大きかったことから、得られた係数には低震度でのデータが強く反映されている可能性が大きいため、計測震度4以上のデータのみからの回帰式も示している。このように、ある計測震度に対して、最大加速度や応答スペクトル、SI値等の指標がどのような対応関係を持つものなのかを的確に把握しておくことで、地震時の被害推定の一助となることが期待できる。

ただし、震度4なら4、5なら5に対応する入力

波形を個々に見た場合、波形のピーク値等の瞬間量ではなく、例えば応答スペクトルから読み取れる特性量がどの程度異なるのか、また地盤条件を考慮に入れた場合、どの程度その特性を抽出できるのかについての議論はほとんどなされていない。さらに、既存の関係式は、翠川の式を除いて震度4以上に着目したものはなく、そのようなデータを含む地震動を特に選んでいるわけでもない。しかし、震度を基に地震被害を議論する場合には、震度の大きな値を含んだデータベースを作成し、これを基に解析を行なう方が合目的であろう。

そこで本研究では、地震工学・地震防災の分野において震度情報の今後一層の有効活用を図るために、まず地震動の持つ特性を表す種々の物理量と現行の計測震度の関係式を導く。この際、本研究では特に被害との関係に注目しており、この観点から震度4以上の高震度領域における計測震度とその他の特性量との関係に着目する。また、1成分と3成分の記録から求められる算定震度の違い、および計測震度算出の際に用いられる、継続時間を考慮した加速度振幅(以後本論文では「有効加速度」と呼ぶ。定義は2.(1)で詳述)と最大加速度の比較など、工学的に重要と思われる事項の検討を行う。そして、従来の計測震度が対象とする周期範囲を拡張する意味で、計測震度が主に対象としている周期よりも長い周期帯域に対して著者らが既に提案している「組合せ震度」⁴⁾をあらためて提示する。この「組合せ震度」は、対象とする構造物の周期範囲が広がるにつれて、従来のような短周期に対応する1つの特性量(計測震度)に必要な情報全てを集約することに自ずと限界が現れてきたことから、提案されたものである。これにより、近年増加の一途を辿る長周期構造物の実際被害との相関性を明らかにすることで、その意義を考察し、有効性を確認する。

2. 計測震度と地震動の特性値

(1) 計測震度

本論に入る前に、震度の表記法について若干の整理をしておきたい。以下では、計測震度を表す場合には小数点以下1桁(2桁目まで求めた後、2桁目を四捨五入した値)までの実数値、計測震度を震度階級に対応させる場合には、震度5と震度6以外は計測震度の小数点以下1桁を四捨五入した値、震度5と6に対しては、計測震度4.5以上5.0未満は「5弱」、計測震度5.0以上5.5未満は「5強」、計測震度5.5以上6.0未満は「6弱」、計測震度6.0以上6.5未満は「6強」とする。これは報道関係等、一般に使われる表示法でもある。本研究で単に「震度」というときには、計測震度から上記の基準に従って換算した震度階級を表すことにする。ただし、後述の「組合せ震度」については、小数点以下1桁までの算定値の組を「組合せ震度」と呼び、各周期

に対応する震度階級については前述の計測震度の場合に準ずるものとする。

気象庁の震度問題検討委員会によって提案されている計測震度の算出方法は以下の通りである⁵⁾。

$$I = 2 \log(a_0) + K \quad (1)$$

ここに、 I は計測震度(小数点以下2桁目を四捨五入した値とする)、 a_0 は継続時間を考慮した加速度振幅(cm/s^2)、 K はパラメータであり、ここでは0.94という値をとる。

具体的には、3成分(水平動2成分、上下動1成分)の加速度記録を用いて以下の手順で算出する。

1. フーリエ変換
各成分の加速度記録をフーリエ変換し、フーリエスペクトルを計算する。
2. フィルター処理
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及び、体感に合致するように周期の影響を考慮したフィルターを加え、計3種類のフィルター操作を行う。
3. フーリエ逆変換
フィルター処理したスペクトルに対してフーリエ逆変換を施し、時刻歴波形に戻す。
4. ベクトル合成
1~3の処理を各成分ごとに行い、フィルター処理された各成分の加速度波形をベクトル合成する。
5. 有効加速度の決定
ベクトル合成された波形の絶対値 $|v(t)|$ と、ある加速度レベル a について、

$$W(t, a) = \begin{cases} 1 & (|v(t)| \geq a) \\ 0 & (|v(t)| < a) \end{cases} \quad (2)$$

となる関数 $W(t, a)$ を導入し、以下の積分を行う。

$$\tau(a) = \int W(t, a) dt \quad (3)$$

ただし、積分区間は地震動が継続している時間である。 $\tau(a)$ は $|v(t)|$ が a ($\tau_0 = 0.3$ 秒)以上である時間の合計で、 a についての単調減少関数となる。この τ を継続時間と呼ぶこととする。このとき適当な τ_0 について、 $\tau(a) \geq \tau_0$ を満たす a の最大値を a_0 とする。

(2) 解析に用いたデータ

K-NET(Kyoshin net)は、1995年の兵庫南部地震の後に科学技術庁防災科学技術研究所により全国1000地点に設置された強震計ネットワークである。全国に約25km間隔で同一の性能を持つ加速度型強

表-1 規模別の地震数

| マグニチュード | 地震数 |
|---------|-----|
| 4.1-5.0 | 14 |
| 5.1-6.0 | 13 |
| 6.1-7.0 | 7 |

表-2 震度別の地点数

| 計測震度 | 観測点数 |
|------|------|
| 0 | 7 |
| 1 | 807 |
| 2 | 1260 |
| 3 | 724 |
| 4 | 240 |
| 5弱 | 51 |
| 5強 | 17 |
| 6弱 | 5 |

地震計が設置されており、非常に均質な観測網が形成されている。本研究では、この K-NET の地震記録のうち、1996 年 5 月から 1999 年 9 月までの期間で震度 5 (計測震度 ≥ 4.5) 以上が観測された国内の 34 個の地震を対象として解析を行った。これらの地震をマグニチュードの大きさ別に示したものが表-1 である。地震の規模としてはマグニチュード 7 以下の中・小規模地震が中心である。観測点数は総計 3111 点であり、各地点それぞれに 3 成分の記録が存在する。震度別の地点数を表-2 に示す。震度 4 (計測震度 ≥ 3.5) 以上を記録した観測点が 313 点あることがわかる。

また、観測される地震動は観測点の地盤の影響を強く受けるので、K-NET から得られる当該観測点の地盤データを利用し、道路橋示方書⁶⁾の地盤分類に基づいて I 種、II 種、III 種地盤に分類している。

(3) 入力地震動の特性値と計測震度

本研究では、図-1 に示すように(2)で述べたデータを用いて、地震動を表す代表的な物理量である以下の指標と計測震度の関係を求めた。

- 計測震度と最大加速度の相関
- 計測震度と SI 値の相関
- 計測震度と最大速度の相関
- 計測震度と最大加速度と最大速度の積の相関

また、工学的に利用価値が高いと思われる以下の項目についての関係式も導いた。

- 1 成分と 3 成分の震度算定値の対比
- 最大加速度と有効加速度の関係

ここで、計測震度と各指標 [a)~d)] との関係は最小二乗法によって求めることとし、その関数形としては以下の式を用いた。

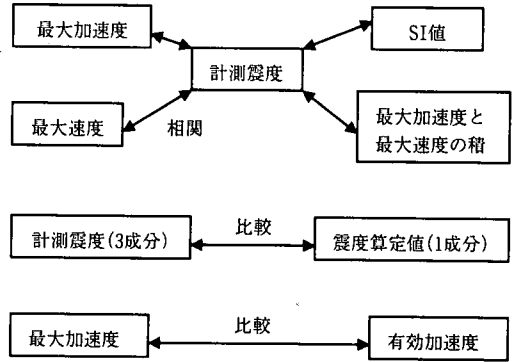


図-1 計測震度と入力地震動の特性量

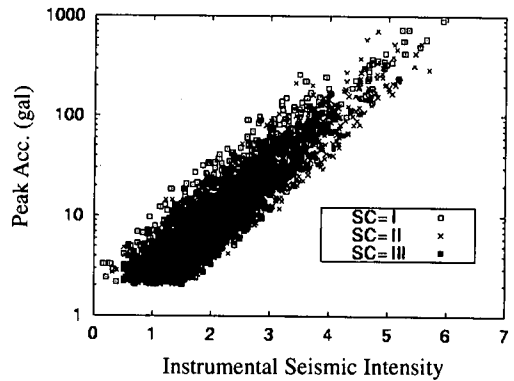


図-2 計測震度と最大加速度の相関

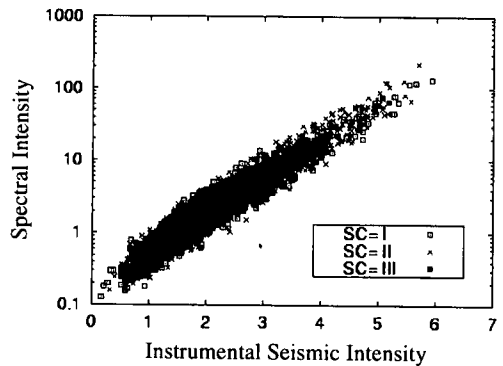


図-3 計測震度とSI値の相関

$$I_j^k = a + b \log(p) \quad (\sigma = \pm \sigma_0) \quad (4)$$

ここに、 I_j^k は計測震度を表す。 j は all または $I \geq 3.5$ であり、all は全ての震度データに対して、

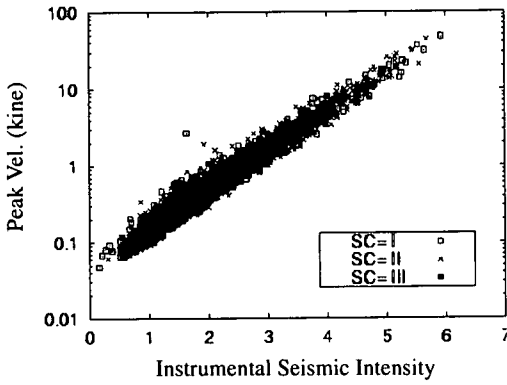


図-4 計測震度と最大速度の相関

また $I \geq 3.5$ は震度 4 以上のデータに対して回帰を行ったものである。k は 0, I, II, III のいずれかであり、0 は地盤種別の違いを考慮しない場合、I, II, III はそれぞれ I 種、II 種、III 種地盤に対応する。 σ_0 は標準偏差である。

また、e), f) に関しては簡単のため以下の関数形を用いる。

$$y = ax + b \quad (\sigma = \pm \sigma_0) \quad (5)$$

ここに x, y はそれぞれが、e) では 1 成分から求めた震度算定値(厳密な意味での「計測震度」ではない)と 3 成分から求めた計測震度、f) では最大加速度と有効加速度に対応する。

a) 計測震度と最大加速度の相関

図-2 に計測震度と 3 成分中で最も大きな値をもつ最大加速度との関係を示す。ただし、本解析で用いたデータに関しては、水平 2 成分のうちいずれかとなっている。また、図中の SC=I, II, III は道路橋示方書による地盤種別を表している。各震度の境界に対応する値は既往の研究^{1)~3)}とほぼ対応しており、また従来の気象庁震度階における最大加速度の対応の目安として用いられていた値とも概ね一致する。

地盤種別の違いを考慮せずに、全てのデータを用いて計測震度と最大加速度 $|a_{\max}|$ の回帰式を求めたものが式(6)である。また、地震被害は震度 4 を超えると次第に顕著になり、防災上特に重要な指標となる。このことに鑑み、震度が 4 (計測震度 ≥ 3.5) 以上のデータのみを用いて回帰を行ったものが式(7)である。

$$I_{all}^0 = 0.36 + 1.74 \log(|a_{\max}|) \quad (\sigma = 0.38) \quad (6)$$

$$I_{I \geq 3.5}^0 = 1.50 + 1.30 \log(|a_{\max}|) \quad (\sigma = 0.31) \quad (7)$$

式(7)の標準偏差は 0.31 であり、式(6)よりばらつき

きは小さくなっている。各地盤種別ごとの回帰式は、他の特性値の結果と合わせて本章後半の表-3 に示した。表-3 より、全ての震度データを用いて求めた回帰式 $I_{all}^I, I_{all}^{II}, I_{all}^{III}$ は、同一の計測震度では硬質の I 種地盤の I_{all}^I が最も大きな加速度を示し、II 種、III 種と順次小さくなっていく。また、震度 4 以上のデータから求めた回帰式 $I_{I \geq 3.5}^I, I_{I \geq 3.5}^{II}, I_{I \geq 3.5}^{III}$ もほぼ同様の傾向を示すが、震度 6 弱を越えるあたりで I 種地盤と II 種地盤に対応する値の逆転が起こるがその差は顕著ではない。

b) 計測震度と SI 値の相関

計測震度と SI 値との相関を図-3 に示す。a) と同様に $I_{all}^0, I_{I \geq 3.5}^0$ に関する回帰式を求めたものがそれぞれ式(8), (9)である。

$$I_{all}^0 = 1.55 + 1.79 \log(SI) \quad (\sigma = 0.28) \quad (8)$$

$$I_{I \geq 3.5}^0 = 2.07 + 1.55 \log(SI) \quad (\sigma = 0.25) \quad (9)$$

この場合も、 I_{all}^0 より $I_{I \geq 3.5}^0$ の方がばらつきが小さくなっている。地盤種別ごとの回帰式は表-3 に示してあるが、a) の最大加速度の場合と比較すると、全ての地盤種別で標準偏差の値が小さくなっている。これは、加速度は単発的に大きな値をとる場合があるのに対して、SI 値は 0.1 秒から 2.5 秒の範囲での平均的な速度応答値を表す指標であることに起因する。全ての震度階級データを用いて求めた回帰式から、同一の計測震度における地盤種別ごとの SI 値の違いは小さく、また震度 4 以上のものから求めた場合は I 種地盤の値が最も小さくなる。これは、SI 値の対象固有周期帯が 0.1 秒から 2.5 秒であるため、一般的に I 種地盤に比べて相対的に軟らかく、スペクトル形状がより広帯域になる II 種地盤、III 種地盤の影響が反映され易い形の指標となっているためと考えられる。

c) 計測震度と最大速度の相関

図-4 に計測震度と 3 成分の中で最も大きな値をもつ最大速度 $|v_{\max}|$ との関係を示す。震度 5 と 6 の境界に対応する値は約 40kine であり、既往の研究³⁾と整合している。a) と同様に地盤種別を考慮しない場合に $I_{all}^0, I_{I \geq 3.5}^0$ に対する回帰式を求めたものがそれぞれ式(10), (11)である。

$$I_{all}^0 = 2.57 + 1.87 \log(|v_{\max}|) \quad (\sigma = 0.20) \quad (10)$$

$$I_{I \geq 3.5}^0 = 2.76 + 1.76 \log(|v_{\max}|) \quad (\sigma = 0.18) \quad (11)$$

回帰直線に対するデータのばらつきは最大加速度に対するものよりも 0.1 以上小さくなっていることが

わかる。また表-3 より、全ての震度のデータを用いて回帰した場合、最大加速度の場合とは逆に、同一の計測震度においては、地盤種別が I 種の場合が最も大きく、その後 II 種、III 種と続いている。ただし、震度 4 以上に対しては、II 種地盤が他の種別に比べてやや大きな値をとっている。

d) 計測震度と最大加速度と最大速度の積の相関

計測震度を求める際に用いるフィルターの短周期側の減衰率は体感に沿うように設定されており、このフィルターの特性は、加速度と速度のちょうど中間に位置している。そこで、加速度と速度の中間的な性質をもつ指標に対しても考察を行うため、翠川ら¹⁾にならい地震記録の最大加速度と最大速度の積の関係を求めた(図-5)。ただし、それぞれの最大加速度、最大速度の値は、3 成分中の最大値を用いているが、ここで扱ったデータでは結果的に水平 2 成分のうちの一つとなっている。a)と同様、地盤種別を考慮しないときの、全ての震度、及び震度 4 以上のデータを用いて求めた回帰式を式(12)、(13)に示す。

$$I_{all}^0 = 1.37 + 0.97 \log(a_{max} \| v_{max}) \quad (\sigma = 0.19) \quad (12)$$

$$I_{I23.5}^0 = 1.66 + 0.88 \log(a_{max} \| v_{max}) \quad (\sigma = 0.18) \quad (13)$$

a)~d)の4つの指標の中でばらつきが最も小さいか、もしくはc)に近ことがわかる。また、表-3 より、全てのデータを用いて回帰した場合、同一の計測震度では III 種が最も大きく、最大加速度と同じ傾向を示す。

以上、地盤種別ごとの回帰式をまとめたものが表-3である。

さて、以下は e) 1 成分と 3 成分の算定震度の対比と f) 継続時間を考慮した加速度と最大加速度の関係である。e)に関しては、ベクトル合成を行わない1成分の加速度記録から便宜的に計測震度を求めることが良く行われるが、この妥当性の検討を行ったものである。f)は最大加速度のみが与えられた場合、それが平均的に見てどの程度の a_0 (有効加速度)に相当するのかを検討したものである。

e) 1 成分と 3 成分の震度算定値の対比

ここでは水平 2 成分、上下 1 成分の計 3 成分から求められる計測震度と、3 成分の中で最大加速度を記録した記録 1 成分から求められる震度算定値との比較を行った。なお、1 成分による震度の算定は 2. (1)で説明したアルゴリズムのうち、手順「4.ベクトル合成」の部分省くことで簡単に求められる。両者の関係を示したものが図-6 であり、また、地盤種別を考慮しない全ての震度データを用いて回帰を行った結果が次式である。

$$I_{all}^{(3)} = 1.00 I_{all}^{(1)} + 0.19 \quad (\sigma = 0.11) \quad (14)$$

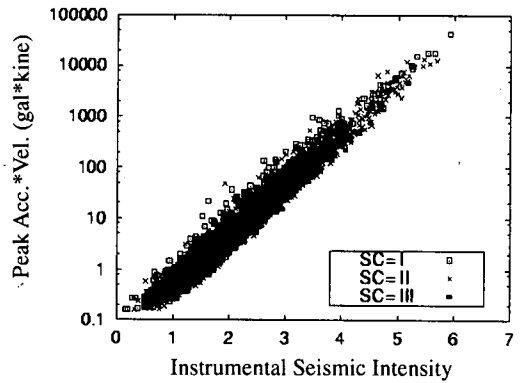


図-5 計測震度と最大加速度と最大速度の積の相関

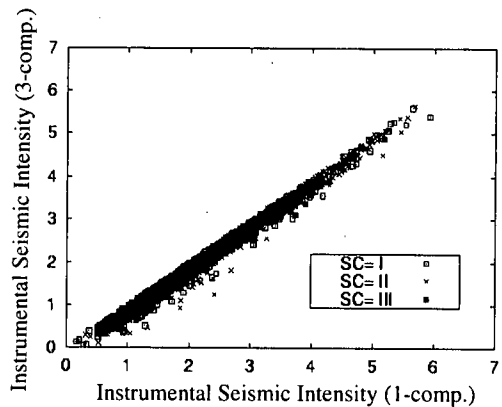


図-6 1成分と3成分の計測震度の比較

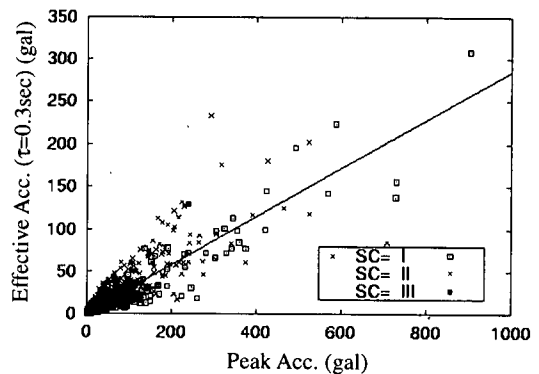


図-7 最大加速度と有効加速度の比較

ここに、 $I_{all}^{(1)}$ 、 $I_{all}^{(3)}$ はそれぞれ 1 成分、3 成分の加速度記録から得られた震度算定値を表す。

標準偏差は 0.11 と小さく、3 成分から求められ

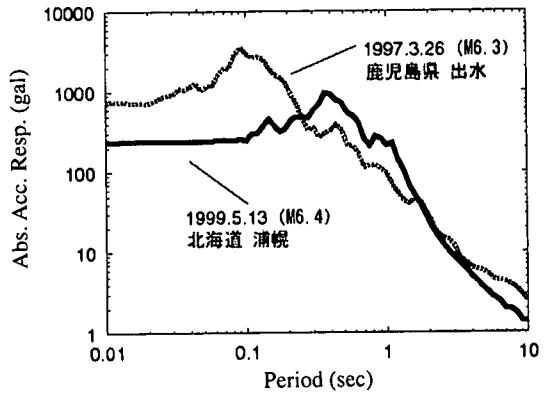
表-3 特性値と回帰式

| Parameter (p) | 計測震度 | a | b | σ |
|-------------------------|------------------------|------|------|----------|
| $ a_{\max} $ | I_{all}^I | 0.28 | 1.64 | 0.38 |
| | I_{all}^{II} | 0.41 | 2.78 | 0.33 |
| | I_{all}^{III} | 0.56 | 1.84 | 0.26 |
| | $I_{I \geq 3.5}^I$ | 0.71 | 1.56 | 0.30 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{II}$ | 1.56 | 1.29 | 0.30 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{III}$ | 1.24 | 1.53 | 0.18 |
| SI | I_{all}^I | 1.58 | 1.80 | 0.28 |
| | I_{all}^{II} | 1.54 | 1.79 | 0.27 |
| | I_{all}^{III} | 1.39 | 1.93 | 0.22 |
| | $I_{I \geq 3.5}^I$ | 1.87 | 1.77 | 0.22 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{II}$ | 2.16 | 1.46 | 0.24 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{III}$ | 1.98 | 1.57 | 0.19 |
| $ v_{\max} $ | I_{all}^I | 2.55 | 1.85 | 0.20 |
| | I_{all}^{II} | 2.58 | 1.87 | 0.20 |
| | I_{all}^{III} | 2.56 | 1.93 | 0.16 |
| | $I_{I \geq 3.5}^I$ | 2.68 | 1.87 | 0.20 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{II}$ | 2.80 | 1.69 | 0.17 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{III}$ | 2.66 | 1.86 | 0.13 |
| $ a_{\max} v_{\max} $ | I_{all}^I | 1.30 | 0.94 | 0.19 |
| | I_{all}^{II} | 1.42 | 0.97 | 0.16 |
| | I_{all}^{III} | 1.49 | 0.99 | 0.14 |
| | $I_{I \geq 3.5}^I$ | 1.35 | 0.95 | 0.19 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{II}$ | 1.68 | 0.88 | 0.17 |
| | $I_{I \geq 3.5}^{III}$ | 1.68 | 0.92 | 0.12 |

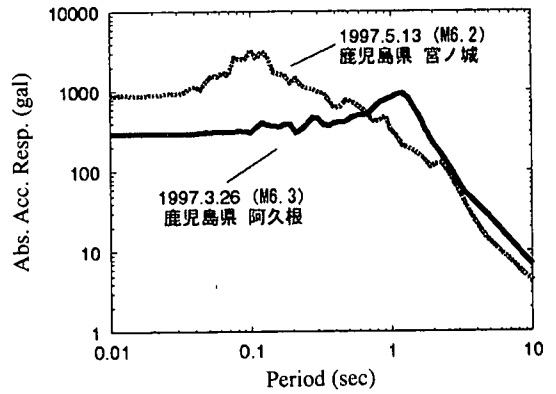
る計測震度と最大加速度をもつ1成分から求められる震度算定値が良い対応を示していることがわかる。また、回帰直線の傾きが1であることから、平均的に見て1成分から求めた算定値に約0.2を加えれば良いことがわかる。この結果より、最大加速度値をもつ1成分の記録から震度算定値を求めても計測震度の概略値としては十分であることがわかる。

f) 最大加速度と有効加速度の関係

わが国における震度と加速度の関係式は、次式で与えられる河角の式⁵⁾が基本となっている(計測震度用アルゴリズム構築の出発モデルでもある)。



(a) 加速度応答スペクトルの比較(5強)



(b) 加速度応答スペクトルの比較(6弱)

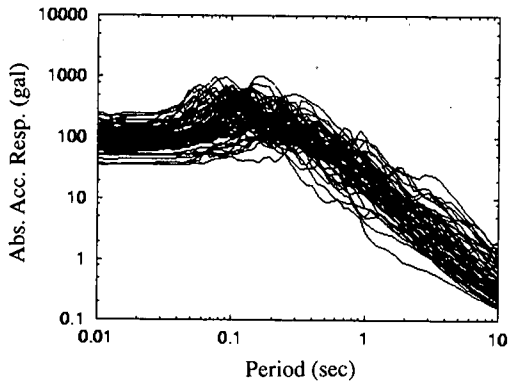
図-8 同一震度を持つ記録の加速度応答スペクトル

$$I = 2 \log(a) + 0.7 \quad (15)$$

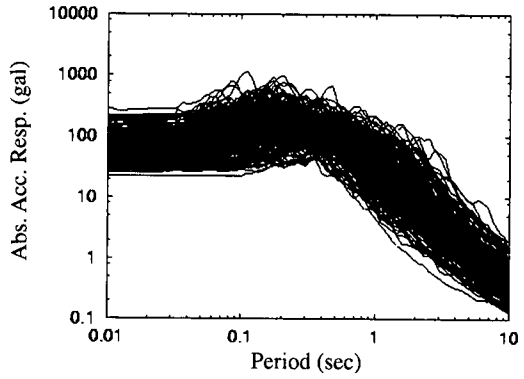
ここに、 I は震度(四捨五入して整数値とする)、 a は最大加速度(gal)を表すが、前述のように計測震度は小数点以下1桁の実数値であり、また算出の際に用いる加速度は有効加速度 a_0 である。ここでは、与えられた波形の最大加速度に対して、有効加速度がどの程度の値として評価されているのかを調べた。図-7はこの関係を地盤種別ごとに記号を変えて示したものであり、全震度データに対する回帰式を表したものが次式である。

$$a_0 = 0.28 |a_{\max}| + 1.49 \quad (\sigma = 8.06) \quad (16)$$

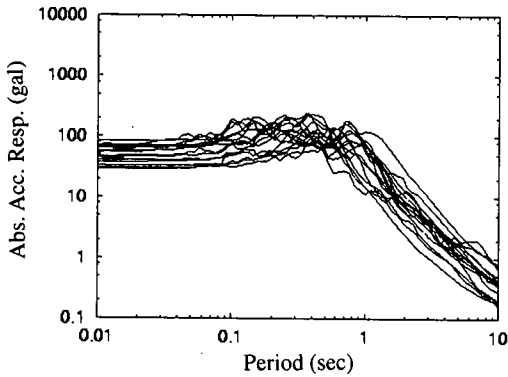
地盤種別ごとの傾向は明確ではなく、また回帰直線からのばらつきも大きいとはいえ、回帰式の傾きか



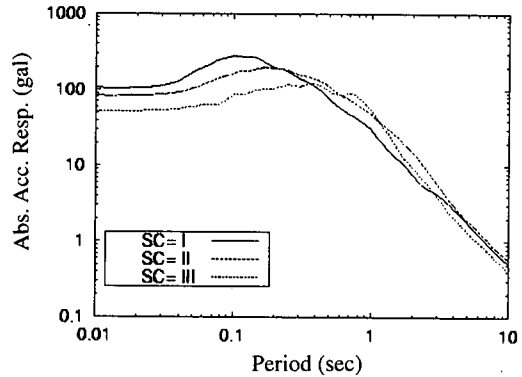
(a) I種地盤



(b) II種地盤



(c) III種地盤



(d) 平均絶対加速度応答スペクトル (震度階級4)

図-9 同一震度を持つ記録の地盤種別ごとの加速度応答スペクトル

ら有効加速度は最大加速度の 1/3~1/4 の値になっていることがわかる。

以上より、計測震度と地震動強さの各指標との関係からは、翠川ら¹⁾も指摘しているように、最大加速度と最大速度の積のような、加速度と速度との中間的な指標が計測震度と相関が高いこと、また、1成分の記録から求めた震度算定値も有効に利用できること等がわかった。

3. 応答スペクトルによる計測震度の検討

震度で見ると同じ値を示す波形でも応答スペクトル値で見ると大きく異なる。ここでは、その違いに着目し、地盤種別ごとに平均的なスペクトルを求めることで関係する周期帯に着目し、その特徴をまとめる。また、その自然の延長として、組合せ震度を導入し、活用することの必要性を考える。ここで解析したものは、(1)同一の震度を持つ記録の加速度応答スペクトル、及び(2)同一の震度を持つ記録の

地盤種別ごとの加速度応答スペクトルである。

(1) 同一の震度を持つ記録の加速度応答スペクトル

まず、震度 5 強を観測した地震動として 1999 年 5 月 13 日の北海道の地震(M6.4, 観測点: 浦幌), および 1997 年 3 月 26 日の鹿児島県の地震(M6.3, 観測点: 出水)の 2 つの地震を比較する。計測震度は双方とも 5.2 であり、小数点以下まで一致している。両者とも震度 5 強の地震である。図-8(a)より、計測震度はほぼ同じ値であるのに対して、加速度応答スペクトルが大きく異なっている。これは主に地盤種別の違いに起因すると考えられる。ちなみに浦幌は III 種地盤で、出水は I 種地盤と判定されており、スペクトルのピークは III 種地盤の方が長周期側に生じている。

図-8(b)は 1997 年の 3 月 26 日と 5 月 13 日の鹿児島県の地震であり、それぞれ M6.3(観測点: 阿久根), M6.2(観測点: 宮ノ城)の地震であり、両者の計測震度はそれぞれ 5.7 と 5.9 である。この場合も、計測震度はほぼ同じ値であるのに対して、加速度応

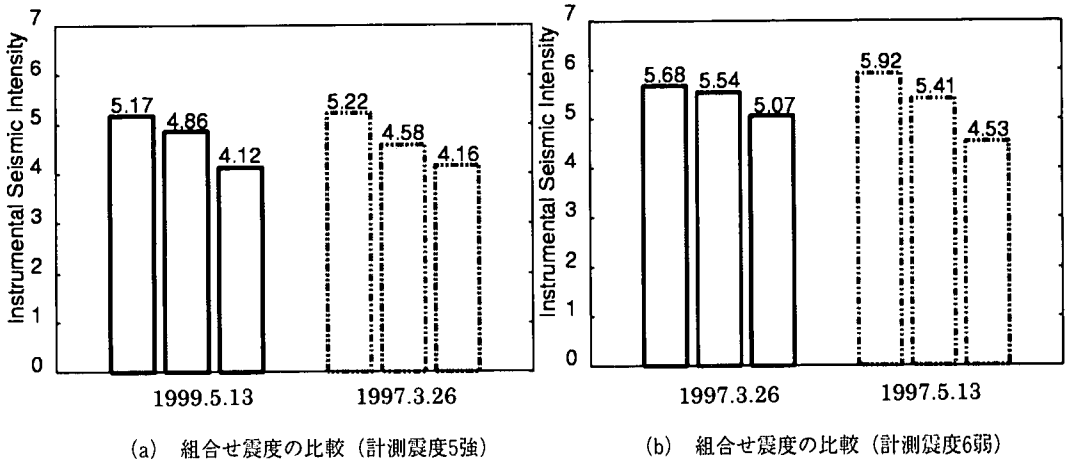


図-10 同一の震度階級を持つ記録の組合せ震度の例

答スペクトルが大きく異なっていることがわかる。

(2) 同一の震度を持つ記録の地盤種別ごとの加速度応答スペクトル

以下に示す絶対加速度応答スペクトルは、同一地点で得られた地震記録 3 成分のうちの最大加速度を持つ記録から求めたものであり、減衰率を 5%として算出した。例として震度階級 4 の場合を地盤種別に分類した結果を図-9(a)~(c)に示す。地盤種別で分類すると、それぞれの種別において応答スペクトルが最大となる周期に違いが見られる。地盤種別が I から III になるにしたがってピークとなる周期が長周期側に移り、またピーク値も小さくなる。地盤種別 I ではどの震度においても 0.1 秒付近に、地盤種別 II では 0.1~0.3 秒付近に、地盤種別 III では 0.2 秒~0.4 秒付近にピークが現れている。その傾向を明確に示すため、各震度階級ごとに平均をとったものが、図-9(d)である。

これより、I 種地盤であれば応答スペクトルが最大となる周期が短周期側に現れ、II 種、III 種となるにしたがって長周期側へ移っていくことが分かる。また、ピーク値も I 種、II 種、III 種となるにしたがって小さくなる傾向が現れている。このように、同一の震度階級でもスペクトル特性が大きく異なっていることが間々ある。しかし、このような傾向は現行の計測震度では判断することができない。計測震度では、2.で述べたような短周期側を強調するフィルターがかかるため、求められた震度算定値とスペクトルから予想される地震動特性との乖離は、中・長周期が卓越する場合にも当然現れてくる。換言すれば、被害状況と震度との対応関係が大きくズレる場合が考えられる。新たに導入された計測震度は、体感や周辺の被害状況などを人間が観測することによって決められる従来の気象庁震度階に平均的

に一致するようにしたものであり、ある周期帯(特に短周期)を強調するような指標となっている。したがって、対象とする構造物の周期帯が広がるにつれて、短周期に対応する一つの特性量である計測震度に、地震工学ないしは防災工学上必要な情報の全てを集約することに無理が生じてくる。そこで、現行の計測震度の算出方法から逸脱せず、対象とする周期帯を長周期側へ拡張した形で、著者らが定義した組合せ震度⁴⁾を活用することが重要となってくる。以下ではこの組合せ震度をを用いた解析を行う。

4. 組合せ震度による検討

(1) 組合せ震度の概略

まず、著者らの提唱する組合せ震度⁴⁾について概略を述べる。

周知のように、従来の震度は体感そのものとか周辺の事物の挙動や周辺の被害状況などを人間が観測することで決める方式であったため、震度決定に客観性を持たすべく様々な工夫が試されてきたとは言え、上述のようにある周波数帯域(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。本研究で議論する計測震度も、基本的には従来の気象庁震度階との連続性が保てるようにアルゴリズムが決定されている。このことから、対応する周期範囲も限定されている。これは、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が難しいことを示唆している。特に、近年増加の著しい高層化・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、必要な情報の

全てを集約することには限界が現れてくる。ここに、「組合せ震度」の意義が存在する。もちろん、4つ5つという具合に組合せを増やしたり、周期ごとに震度を設定すればよいとの考えもあるが、数を多くするならわざわざ「震度」という簡便な統一指標を設定するまでもなく、波形自体や応答スペクトルを利用すれば事は済む。

組合せ震度は以下の内容を持つ。短周期震度に関しては、先で述べた現行の計測震度の算定法を用いる。組合せ震度では、地震動を短周期帯、中周期帯、長周期帯に分割し、それぞれについて震度を定義する。中周期震度は各成分波の加速度記録をフーリエ変換し、積分操作を行って速度を求め、フィルター処理を行う。その後、バンドパスされたスペクトルを逆変換し、震度算定のための継続時間を考慮した振幅を求めて、以下の算定式から組合せ震度を決定する。

$$\begin{aligned}
 I_s &= 2.00 \cdot \log(a_0) + 0.94 : \text{短周期震度} \\
 I_m &= 1.91 \cdot \log(v_0) + 2.50 : \text{中周期震度} \\
 I_l &= 1.94 \cdot \log(d_0) + 3.20 : \text{長周期震度}
 \end{aligned}
 \quad (17)$$

フィルター処理としては短周期を求める際に用いた周期対応フィルターは通さず、ハイカット、ローカットのみを用いている。ハイカットは通過領域15Hz以下、遮断帯域20Hz以上、また、ローカットは遮断帯域0.04Hz以下、通過帯域0.05Hzのチェビシェフフィルター⁷⁾を用いている。長周期に関しては、フィルター処理された速度波形をさらに積分した変位波形を用い、中周期震度を求める手順と同じ作業を行う。短周期と中周期、中周期と長周期の境界周期はそれぞれ0.8秒と6.3秒としている⁴⁾。

(2) 同一の震度を持つ記録の組合せ震度

以上の手順にしたがって、3.の応答スペクトルによる検討で用いたものと同じ地震記録を用いて組合せ震度を比較する。前述のように両者とも震度5強の地震である。それぞれの組合せ震度を求めたものが図-10(a)である。短周期震度ではほぼ同一の値を示しているが、中周期震度になる震度値の逆転が生じている。これは、1997年の鹿児島県の地震では、応答スペクトルのピークを与える周期が0.1秒あたりにあるのに対して、1999年の北海道の地震では、これより長周期側の0.4秒程度の所にあり、またこれよりも周期の長い2~3秒の周期成分も相対的に多く含まれているためである。ただし、これよりさらに長周期側の成分は1997年の鹿児島県の地震の方が大きいため、長周期震度において再度の逆転が生じている。

同様に、震度が6弱の場合を示したものが図-10(b)である。これも前述のように計測震度はそれぞれ5.7と5.9であり、両者とも震度6弱の地震である。この場合も、短周期震度では5月の地震の方

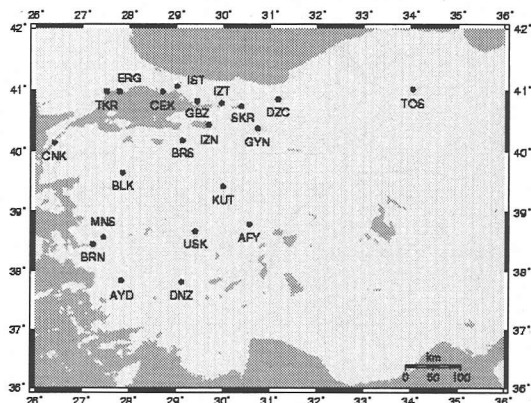


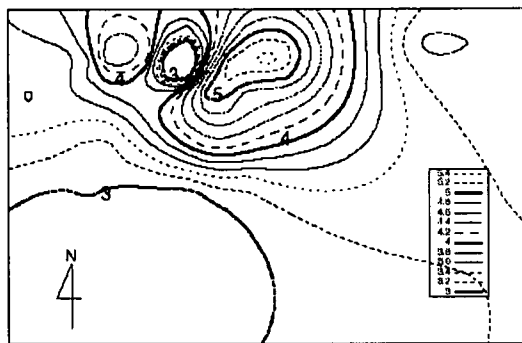
図-11 トルコ・コジャエリ地震の際の観測点の位置

が大きな値を示すのに対して、中・長周期震度では3月の地震の方が大きくなっており震度の逆転が生じている。これは、図-8(b)からわかるように、5月の地震では卓越周期が1秒以上の周期成分が相対的に大きくなっているためである。したがって、計測震度としては3月の方が小さく現れるため、現行の計測震度では構造物被害は3月の地震の方が小さいと判断される可能性が大きい。固有周期が長い構造物が存在する場合には、3月の地震の方が大きな被害が生じる可能性もある。

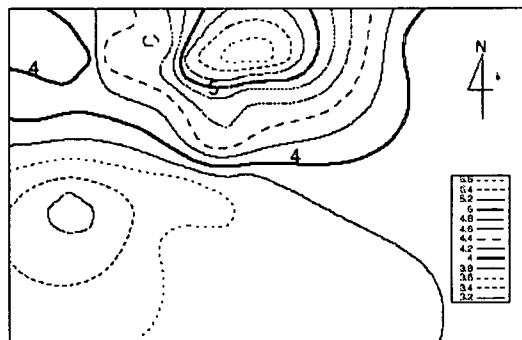
(3) 組合せ震度の空間分布

1999年8月17日に起こったトルコ・コジャエリ地震(Mw7.4)の際に観測された21地点(図-11)の加速度3成分記録を用いて、組合せ震度を算出した。トルコにおいて観測された記録から組合せ震度を空間分布として示したものが図-12(a)~(c)である。ただし、対象とした領域を20×25のメッシュに分割し、各地点で算出された値を満たすように、Kriging法⁸⁾を用いて格子点の値を求め、これをもとにコンターを描いたものである。これを見ると、前章までに解析を行った地震と比較して中、長周期震度の値が大きくなっていることがわかる。これは、コジャエリ地震の卓越周期が長周期側にあるためである。

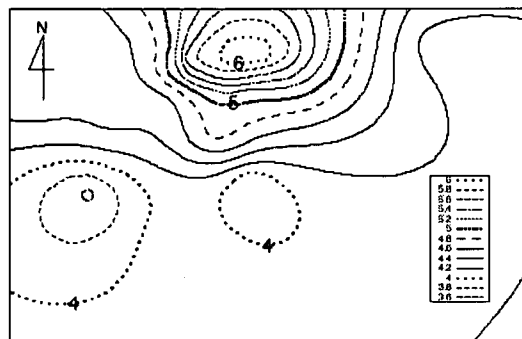
図-12(a)を見ると、短周期震度では震度分布が震源やその近傍で孤立した円形の分布がいくつか存在することがわかる。しかし、中、長周期震度となるにしたがって方位によって変化する振幅分布、いわゆるクローバー型の象限状に変化する分布形状が現れてくる。点震源のS波の振幅方位分布を断層のライン上で重ね合わせると、破壊の進行方向に大きな振幅をもつ分布形状が期待できるが、(c)にも横ずれ断層から期待されるS波の振幅分布に近い形が現れており、震源のメカニズムの概略を捉えることができる。



(a) 短周期



(b) 中周期



(c) 長周期

図-12 1999年トルコ・コジャエリ地震における
組合せ震度の分布

(4) 組合せ震度と被害との対応

イズミットにおいて産業施設等の被害が報告されており、トルコ石油精製会社のイズミット製油所において、石油タンクの火災が報告されている⁹⁾。タンクの被災については、内径 100メートル級の大型タンクや小型のタンクは火災が発生せず、内径約 25m 程度のタンクに火災が発生した。ここでは、まずタンクの内径 D と液高 H をパラメータとした内容液の

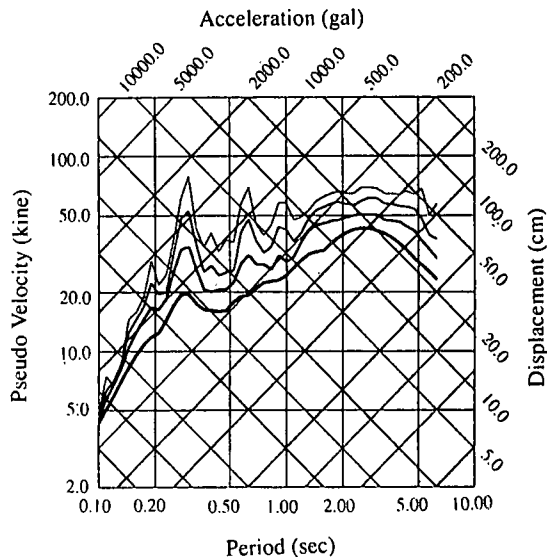


図-13 3重応答スペクトル (イズミットEW成分)

一次スロッシング周期 T (s)を、以下の高圧ガス設備等耐震設計基準における平底円筒タンクの液面振動の算定式¹⁰⁾を用いて計算する。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3.682g} \coth\left(\frac{3.682H}{D}\right)} \quad (18)$$

これによれば、直径 20~30m のタンクにおいて液高が十分にある場合にはほぼ 4.7 秒から 5.9 秒にスロッシングの卓越周期が現れることになる。

この製油所に近いイズミットにおいて観測された時刻歴波形の EW 成分の 3 重応答スペクトルを求めたものが図-13 である ($h=2, 5, 10, 20\%$)。この応答スペクトルからも、通常地震動に比べ数秒以上の中周期成分が多く含まれていることがわかる。この地点での短周期震度は 5.1 であるが、中周期震度は 5.6 と大きくなっている。このように短周期震度以外の震度と被害との関係についての知見を蓄積することで、イズミットにおいてこのようなタンクのスロッシングが起こり得ることが組合せ震度を活用することで初めて明瞭に説明できることになる。

表-4(a)~(c)は、1983年の日本海中部地震、1995年の兵庫県南部地震、1997年の鹿児島県北西部地震に対して、観測記録を基に短・中・長周期の組合せ震度を算出し、その各震度の空間分布と被害分布を同一平面上にプロットして相互に比較する¹¹⁾ことにより、代表的な土木構造物に被害の生じた組合せ震度の閾値を示したものである。道路、道路橋の被害に関しては、本論文では地震直後の被害の概略把握を主な目的としているため、物理的被害が生じたかどうか、物理的被害が生じているなら機能的

表-4(a) 短周期震度と被害の関係

| 対象土木構造物 | 日本海中部地震 | 兵庫県南部地震 | 鹿児島県北西部地震 |
|---------|-------------|----------------------------|-----------|
| 道路(小) | 4.0 | | 5.0 |
| 道路(大) | 4.3 | 4.8 | 5.3 |
| 道路橋(小) | 4.0 | 4.8 | 5.1 |
| 道路橋(大) | 4.3 | 5.2 | 5.3 |
| 港湾 | 5.2 | 5.0 | 5.0 |
| 上水道 | | 4.8 | 5.2 |
| 下水道 | | 4.7 | |
| ガス | 5.2 | 4.5 | 5.2 |
| 電力 | 4.3 (被害) | 4.5 (停電) 4.8 (被害) | |

表-4(b) 中周期震度と被害の関係

| 対象土木構造物 | 日本海中部地震 | 兵庫県南部地震 | 鹿児島県北西部地震 |
|---------|-------------|----------------------------|-----------|
| 道路(小) | 4.1 | | 4.6 |
| 道路(大) | 4.7 | 4.4 | 4.8 |
| 道路橋(小) | 4.2 | 4.4 | 4.6 |
| 道路橋(大) | 5.3 | 5.0 | 4.8 |
| 港湾 | 5.0 | 4.5 | 4.6 |
| 上水道 | 4.3 | 4.5 | 4.6 |
| 下水道 | | 4.4 | |
| ガス | | 4.3 | 4.6 |
| 電力 | 4.5 (被害) | 4.3 (停電) 4.4 (被害) | |

表-4(c) 長周期震度と被害の関係

| 対象土木構造物 | 日本海中部地震 | 兵庫県南部地震 | 鹿児島県北西部地震 |
|---------|-------------|----------------------------|-----------|
| 道路(小) | 4.2 | | 4.2 |
| 道路(大) | 4.8 | 4.0 | 4.3 |
| 道路橋(小) | 4.3 | 4.2 | 4.3 |
| 道路橋(大) | 5.3 | 5.3 | 4.3 |
| 港湾 | 5.0 | 4.5 | 4.2 |
| 上水道 | 4.6 | 4.1 | 4.3 |
| 下水道 | | 4.0 | |
| ガス | 5.1 | 3.9 | 4.3 |
| 電力 | 4.7 (被害) | 3.9 (停電) 4.0 (被害) | |

表-5 組合せ震度と土木構造物被害

| 対象土木構造物 | 組合せ震度 | 震度値 | 階級震度 |
|---------|-------|-------|------|
| 道路(小) | 中周期 | 4.5以上 | 5弱 |
| 道路(大) | 中周期 | 5.0以上 | 5強 |
| 道路橋(小) | 中周期 | 4.5以上 | 5弱 |
| 道路橋(大) | 中周期 | 5.0以上 | 5強 |
| 港湾 | 短周期 | 5.0以上 | 5強 |
| 上水道 | 中周期 | 4.5以上 | 5弱 |
| ガス | 中周期 | 4.5以上 | 5弱 |
| 電力 | 中周期 | 4.5以上 | 5弱 |
| タンク(中型) | 中周期 | 5.5以上 | 6弱 |

に大丈夫かどうか(通行可能かどうか)を判断の基準とした。すなわち、物理被害があっても通行可能を小被害、物理的被害があり、かつ通行不可となったものを大被害とした。これより、例えば道路なら道路被害が生じた組合せ震度の中で、3つの地震相互のばらつきができるだけ少ない震度を選び、その平均的な値に近い震度値で、かつ階級震度に対応する値を閾値として定義した。こうすれば、土木構造物ごとに被害の状況を的確に表す震度を設定できるので、地震が起こった場合にはその震度を参照することで対象土木構造物に被害が生じている可能性が高いかどうかの概略的な判断が可能である。

表-4(a)~(c)を基に、被害の状況と良い対応を持つ震度とその値をまとめたものが表-5である。

5. 結論

本研究では、地震被害の出始める震度4以上に着目し、地震動強度を表す種々の物理量と計測震度との関係を明らかにするとともに、計測震度が対象としている周期よりも長い周期帯域に対して組合せ震度を適用し、実際の被害との相関を明らかにすることで、その有効性を提示した。本研究で行ったこと、及び得られた知見は以下の通りである。

(1) 計測震度と最大加速度、SI値、最大速度、最大加速度と最大速度の積についての関係式を、被害との相関の高い震度4以上のデータのみを用いたものを含めて地盤種別ごとに提示した。

(2) 水平動2成分と上下動1成分から得られる計測震度と3成分中で最大加速度をもつ1成分から求められる震度算定値との比較を行った。最大加速度を持つ1成分の記録から求めた震度でも、3成分の記録を用いることとして定義された計測震度の概略値として十分利用できる。

(3) 同一の震度階級を持つ記録の絶対加速度応答スペクトルを地盤種別ごとに求めた。その結果、地盤種別により、スペクトルの特性が大きく異なっていることが認められた。このような傾向は現行の計測

震度からは判断することができず、被害と震度とが乖離していく可能性がある。

(4)同一の震度階級を持つ記録の組合せ震度を求めた。震度に反映される周期の違いにより、逆転が起こる場合があるため、現行の計測震度では一般的に被害が相対的に小さいと判断される場合でも、中周期、長周期震度が大きい場合には、固有周期が長い土木構造物等には大きな被害が生じる可能性がある。(5)トルコ・コジャエリ地震に対して組合せ震度を求めた結果、短周期に比べて相対的に中周期、長周期震度が大きくなっていることが分かった。また、それぞれの震度においてその空間分布を求めたところ、長周期震度の空間分布に点震源モデルを重ね合わせると横ずれ断層から期待されるS波点震源の振幅分布の近い形が現れていた。

(6)トルコ・コジャエリ地震のイズミットにおけるスロッシングによる石油タンクの被害を含め、国内の3つの被害地震から組合せ震度と被害との関係を定義することにより、対象土木構造物とその構造物に被害が生じる組合せ震度値の関係をまとめた。

ただし、この組合せ震度と被害との関係については本研究で用いたデータで十分であるとは言い難く、今後のデータの蓄積を待つとともに、さらに多くの強震記録や構造物被害を調査し、高層建物や長大橋梁などの大規模構造物、近年特に普及の目覚ましい免震構造物に対しても適用範囲を拡張する必要がある。

謝辞：本研究では、科学技術庁防災科学技術研究所、Kyoshin Net (K-NET)の地震記録を利用させていただきました。また、山口大学理工学研究科の三浦房紀教授には有意義なご討議とご助言をいただきました。元山口大学理工学研究科大学院生の藤江恵悟君には組合せ震度と被害との関連の整理をしていただきました。3重応答スペクトルの描画は岐阜大学工

学部・杉戸研究室のプログラムを利用させていただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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, 地域安全学論文集, 第1号, 1999.
- 2) 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.
- 3) 金刺靖一, 金子史夫: 計測震度と物理量の関係について, 応用地質技術年報, 兵庫県南部地震特集号, pp.85-96, 1997.
- 4) 清野純史, 藤江恵悟, 太田 裕: 組合せ震度の提案・定式化とその応用, 土木学会論文集, 第612号, pp.143-151, 1999.
- 5) 気象庁監修: 震度を知る-基礎知識と活用-, ぎょうせい, 1996.
- 6) (社)日本道路協会: 道路橋示方暫・同解説V, 1996.
- 7) 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巻台4号, 1978.
- 8) Kiyono, J. and Suzuki, M.: Conditional Simulation of Stochastic Waves by Using Kalman Filter and Kriging Technique, Proc. of the 11th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.1620, 1996.
- 9) Earthquake Engineering Committee, JSCE: THE 1999 KOCAELI EARTHQUAKE, TURKEY, -Investigation into Damage to Civil Engineering Structure-, December 1999.
- 10) 通産省: 通産省告示143号, 1997.
- 11) 藤江恵悟: 強震記録DBの整備とそれを用いた組合せ震度の提案, 平成11年度山口大学理工学研究科修士論文, 1999.

(2000.9.13 受付)

ENGINEERING CHARACTERIZATION OF INSTRUMENTAL SEISMIC INTENSITY AND IMPORTANCE OF INTRODUCING MULTI-VALUED SEISMIC INTENSITY

Junji KIYONO, Kenzo TOKI, Toshiyuki USUDA and Yutaka OHTA

In Japan the way of determining seismic intensity by JMA (Japan Meteorological Agency) changed from perceptual to instrumental in 1996, immediately after the Kobe earthquake. This new instrumental seismic intensity is known as a useful measure to estimate the earthquake ground motion. We here examine the relations between seismic intensities and various quantities of earthquake observation records such as peak acceleration, peak velocity, spectral intensity, etc., focusing especially on the seismic intensity range equal to or higher than 4 on the JMA scale. The response spectral characteristics of two records with the same seismic intensity are compared. The peak values of the spectrum and predominant periods are found different and this evidence facilitates the necessity of introducing a combined seismic intensity, that is, of modifying from a single-valued one to a three-valued seismic intensity, especially at making clear the difference of damage to structures with shorter and longer natural periods.