

計測震度階と感覚補正振動加速度レベルの関係

樋口裕介¹・三神厚²・澤田勉³

¹徳島大学大学院工学研究科博士前期課程（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2丁目1番地）

E-mail:h11a29@yahoo.co.jp

²徳島大学工学部助手（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2丁目1番地）

E-mail:amikami@ce.tokushima-u.ac.jp

³徳島大学工学部教授（〒770-8506 徳島県徳島市南常三島2丁目1番地）

E-mail:sawada@ce.tokushima-u.ac.jp

地震による被害と密接な関係を持つ震度階の基準は国によって異なる。1996年以降、日本では計測震度を使用されているが、最近発生した地震についての検討から、計測震度階で高震度を示した場所の被害は、以前の気象庁震度における同震度の基準に比べて比較的小さく、それゆえ、震度と実被害の不整合性が指摘されている。本研究では、環境振動工学の分野で、人体感覚に基づいて振動を客観的に評価する指標として用いられている感覚補正振動加速度レベル（振動レベル）を用いて、この計測震度の問題が顕著に表れている4つの地震記録（兵庫県南部地震、鳥取県西部地震、芸予地震および三陸南地震）の解析を行い、計測震度の示す値が実被害と良く整合しないという問題について検討を加えた。

Key Words : *instrumental seismic intensity , vibration level , earthquake ground motions*

1. はじめに

地震発生後には、気象庁などの機関から、マグニチュードや地震モーメント、震度階などが提供される。このうちマグニチュードや地震モーメントは、地震の大きさや規模を示す値であり、国際的な基準をもつ万国共通の尺度である。他方、震度階は、地震による揺れや被害と密接な関係をもつ量であるが、マグニチュードや地震モーメントと違い、国により使用する基準が異なっている。代表的なものとして、欧米で用いられている改正メルカリ震度階、ロシアおよび東欧の MSK 震度階、日本の気象庁震度階などが挙げられる。

日本で用いられている気象庁震度階は、1995 年以前は体感や被害等、事物の応答を観察することで決定されていた（体感震度と呼称されていた）が、1996 年以降、速報性を重視した器械観測に基づく計測震度が用いられるようになった（ただし、この計測震度においても、計算段階で「体感」を考慮しているため、その影響は反映されている）。しかし、2000 年鳥取県西部地震や、2001 年芸予地震など、最近観測された震度 6 強ないし 6 弱の揺れを発生さ

せた地震による被害が、1995 年以前に使用されていた気象庁震度 6 の基準、すなわち「家屋の倒壊は 30% 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」や、計測震度に基づく地震被害早期評価システム・EES（Early Estimation System）の推計結果に比べ、比較的小さなものであったことなどから、「実際の被害に比べて、震度が大きすぎる」などの震度と実被害の不整合性を指摘する声も出てきている。そのため、「体感」をより反映させた計測結果との関係を調べることは興味深いことである。

ところで、振動の強さを表す別の指標として、環境振動工学の分野で使用されている感覚補正振動加速度レベル（以下、振動レベルと呼ぶ）がある。これは、人体感覚に基づいて振動を客観的に評価するもので、国際的な基準をもった万国共通の値である。本研究では、この振動レベルに着目し、現行の計測震度と「体感」との関係について議論する。ここでは、特に近年発生したいくつかの地震についての計測震度による評価と振動レベルによる評価を併せて行い、両者の関係を比較検討する。

表-1 オクターブバンド

中心周波数(Hz) (f_0)	遮断周波数(Hz) ($f_1 \sim f_2$)
0.25	0.175 ~ 0.35
0.5	0.35 ~ 0.7
1	0.7 ~ 1.4
2	1.4 ~ 2.8
4	2.8 ~ 5.6
8	5.6 ~ 11.2
16	11.2 ~ 22.4
32	22.4 ~ 44.8

表-2 振動感覚補正值

中心周波数 (Hz)	補正值 C_R (dB)	
	水平成分	鉛直成分
0.25	3	-7.5
0.5	3	-7
1	3	-6
2	2	-3
4	-3	0
8	-9	-1
16	-15	-6
32	-21	-12

2. 計測震度と振動レベル

ここではまず、加速度記録から計測震度および振動レベルを算出する方法について述べる。

(1) 計測震度について¹⁾

計測震度は、速報性を重視し、器械により計測されるものである。これは、3成分（水平2成分と鉛直成分）の加速度記録それぞれに対しフィルタ処理を行い、以下の式を用いることで算出される。

$$I = 2 \log(a_0) + 0.94 \quad (1)$$

ここで、 I は計測震度、 a_0 は継続時間を考慮した振幅である。この計測震度の算出法は、本来、体感と一致するとともに、高震度で建物被害との相関が高くなるように考えられてはいるものの、フィルタの特性上、短周期帯域の地震波を強調するような情報となっていることは否めない。なお、この震度階は0~7の数字で表されるが、被害の幅の大きくなる震度5および6がさらに強弱の2段階に分けられているため、10段階の指標となっている。

(2) 振動レベルの算出方法²⁾

振動レベルとは、人体に感じる振動の大きさ、つまり振動の感覚的大きさを表したものであり、建設工事による振動や工場の大型機械による振動のように我々の生活環境にかかわる振動を扱う際に用いられているものである。

振動レベルを求める際には、振動の物理的大きさを表す振動加速度レベルを、人体の感覚に合わせて補正しなければならない。なぜなら、人体の振動感覚は、その振動の周波数や方向によって大きく変わるからである。実際の振動は色々な周波数からなっているが、環境振動問題においては、周波数を考える場合、通常周波数バンドを使用する。すなわち、対象とする周波数範囲のある周波数帯域に分けて考える。ここでは、人体の感覚が物理量に比例する対数的性質を持っている(Wever-Fechnerの法則)ということから、オクターブバンドを使用している。このオクターブバンドとは、周波数帯域の高い方の周

波数（高域遮断周波数） f_2 Hz が、低い方の周波数（低域遮断周波数） f_1 Hz の2倍になるような、2つの周波数の範囲である。そして、これらの周波数帯域を、次式で求められる中心周波数 f_0 Hz で代表して表す。

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2} \quad (2)$$

表-1には、各オクターブバンドの中心周波数と遮断周波数を示す。ただし、環境振動工学では、1Hz以上の周波数を対象とするが、地震工学では1Hz以下の周波数成分も重要になることから、本研究では0.5Hzおよび0.25Hzも考慮する。

人体の鉛直振動に対する振動感覚は周波数4~8Hzに対する感度が最も良好で、これより周波数が高く、また低くなるにつれて感度は低下する。これに対して、水平振動に対する振動感覚は、周波数1.6Hz以下の時に対する感度が最もよく、これより周波数が高くなるにつれて感度は低下する。環境振動の分野ではもともと鉛直振動を対象としているため、鉛直振動の周波数4Hzの時の感度を基準にとると、他の周波数に対する感度は表-2に示すようになる。本来、環境振動工学では中心周波数が1Hz以下の成分の補正值は定義されていないが、地震工学では重要となるので、本研究では、表-2に示すような値を設定した。これらの値は、1Hz以上の周波数領域の補正值を外挿したものである。この表の値を、振動感覚補正值(C_R)という。

水平2成分と鉛直成分からなる加速度記録について、各成分の振動レベルを算出するには、まず、各成分の加速度記録をフーリエ変換して、時間領域のデータを周波数領域のデータに変換し、フーリエスペクトルを求める。求めたスペクトルに、表-1に示した8つの中心周波数を持つバンドパスフィルタをかけて処理し、各周波数成分に分解した後、それぞれを逆フーリエ変換して時間領域の成分波を求める。さらに、この加速度振幅の振動加速度実効値 A_m/s^2 を求め、各周波数成分の振動加速度レベル L_a を次式より算出する。

$$L_a = 20 \log \frac{A}{A_0} \quad (\text{dB}) \quad (3)$$

ここで、振動加速度実効値とは、一定の大きさの加速度と同じエネルギーを持つ振動加速度の大きさを意味し、これは、振動加速度を2乗したものを1周期で平均し、平方根をとることで求められる。また $A_0 \text{ m/s}^2$ は基準値であり、 $A_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ が用いられる。

この振動加速度レベルを用いると、人体にようやく感じられるくらいの弱い振動の振動加速度レベルはおおよそ 55dB である。この人体が感じるか感じないかの境目にあたる値を、人体の振動感覚閾値という。

最後に、表-2 に示される補正値を加える（感覚補正）ことにより、各周波数成分の振動レベル L が次式のように求められる。

$$L = L_a + C_R \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

水平 2 成分と鉛直 1 成分の計 3 成分を合成した場合の振動レベルを算出するには、成分ごとの振動レベルを求めたときと同様に、加速度記録のフーリエ変換、バンドパスフィルタリングおよび逆フーリエ変換を行った後、水平、鉛直成分それぞれの周波数成分ごとに人体感覚による補正を加える。ここでは、振動レベル L と振動加速度レベル L_a の関係（式（4））を用いて、感覚補正前の加速度振幅 A から補正後の加速度振幅 A' を求めておく。

$$A' = A \times 10^{C_R/20} \quad (5)$$

そして、周波数成分ごとに 3 成分をベクトル合成した後、加速度実効値を求め、各周波数成分の振動レベルを算出する。なお、図-1 は、この手順をまとめたものである。

以上の手順で得られた振動レベルは、周波数バンドごとの振動レベル、すなわちバンドレベルの値である。これに対して、オーバーオール振動レベルは、バンドレベルをすべて加えることで、全体の振動レベルを表すものである。ただし、環境振動問題においては、振動レベルや振動加速度レベルなど dB で表される量を加算する場合、通常に加算ではなく、以下に述べるパワー和が用いられる。

一般に、周波数の異なる n 個の振動加速度レベル L_1, L_2, \dots, L_n (dB) があるとき、振動レベルは振動加速度レベルに補正値を加えることで得られるので、振動感覚補正値を C_n で表すとオーバーオール振動レベルは次式より得られる。²⁾

$$L = 10 \log \left(10^{(L_1+C_1)/10} + \dots + 10^{(L_n+C_n)/10} \right) \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

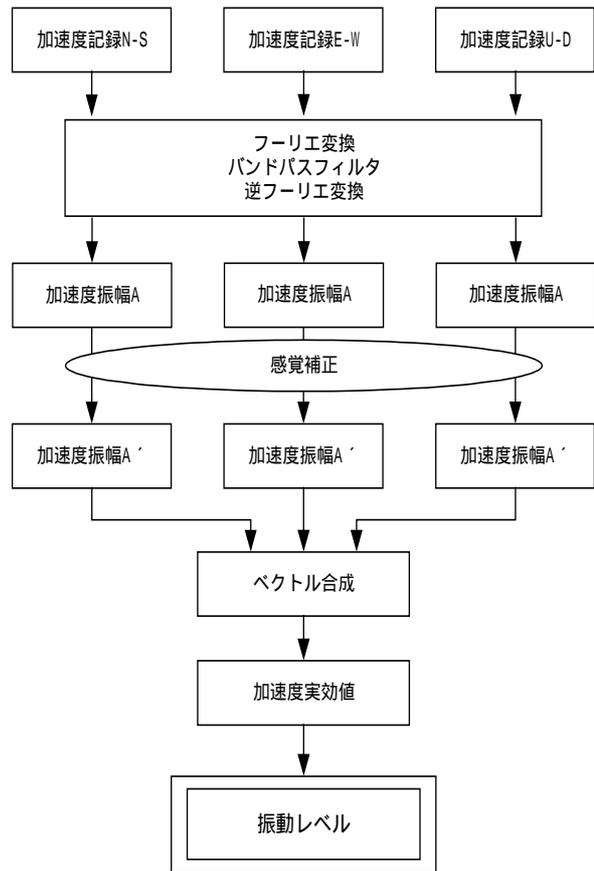


図-1 成分合成時の振動レベル算出手順

表-3 解析に用いた実地震記録

兵庫県南部地震	強震動アレー観測データベース ³⁾ 収録の鉛直アレー記録, 67地点
鳥取県西部地震	232地点 ⁴⁾
芸予地震	222地点 ⁴⁾
三陸南地震	378地点 ⁴⁾

本研究では 8 つの周波数レベルを使用するので、(6) 式において $n = 8$ とすればよい。

3. 解析結果および考察

以上で述べた計測震度および振動レベルの算出法を実地震記録に適用し、計測震度と振動レベルをそれぞれ求め、得られたデータより、計測震度と振動レベルの関係に考察を加える。解析に用いた実地震記録は表-3 に示すような 4 つの地震、すなわち、1995 年兵庫県南部地震、2000 年鳥取県西部地震、2001 年芸予地震、および 2003 年三陸南地震の際に多数の地点で得られた観測記録である。

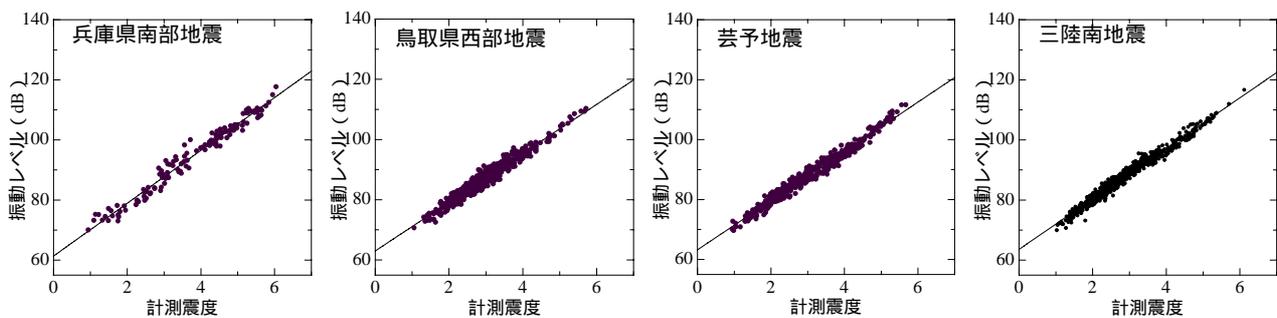


図-2 水平成分の計測震度と振動レベルの関係

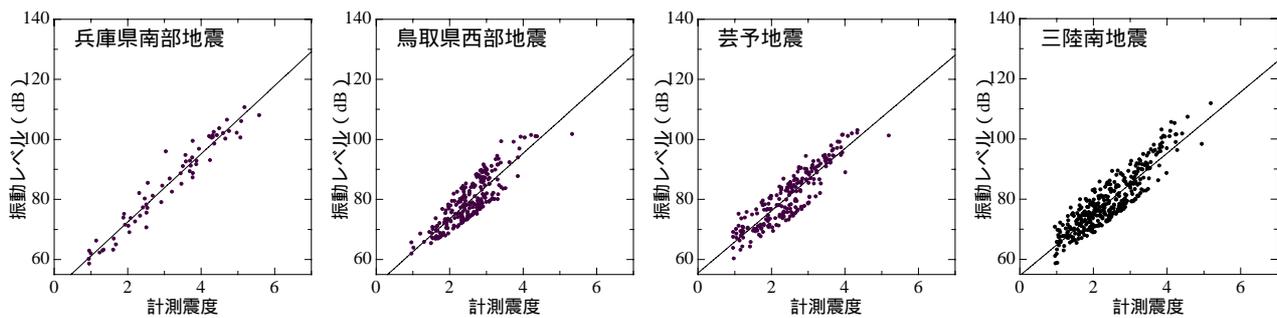


図-3 鉛直成分の計測震度と振動レベルの関係

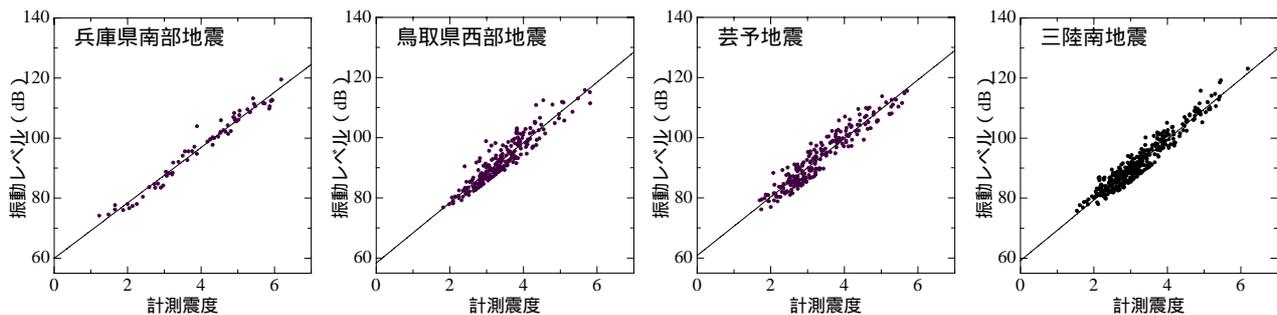


図-4 3成分合成時の計測震度と振動レベルの関係

(1) 計測震度とオーバーオール振動レベルの比較

図-2～図-4は、上述の4つの地震における観測記録の水平2成分、鉛直成分および3成分合成時の計測震度と振動レベルの関係を示したものである。なお、このときの振動レベルは、先に述べたオーバーオール振動レベルである。これらの図を見ると、各成分の関係図において、同じ震度であっても振動レベルが地震によって変わってくるなど、若干の違いは見られるものの、合成時の関係図には、地震による違いはあまり見られない。すなわち、計測震度とオーバーオール振動レベルともに人体感覚を反映した値であるため、両者の関係には地震による明確な違いが現れなかった。

(2) 計測震度とバンドレベルの関係

そこで、さらに詳細な比較を行うために、計測震度とバンドレベルとの関係を調べた。図-5は、周波数バンドごとに計測震度と振動レベルの関係を示したものである。ここで、図の左上の数字はそれぞれの周波数帯の中心周波数、図の色違いの点は地震別

の解析結果を、図上の線は回帰直線をそれぞれ示したものである。この図より以下のことがわかる。すなわち、同震度における各地震の振動レベルを比較すると、中心周波数が1Hz以下(中長周期に相当)の周波数帯で、全体的に兵庫県南部地震の値が他の3つの地震の値より大きくなっている。逆に、中心周波数4Hz以上(短周期に相当)の周波数帯では、兵庫県南部地震の値が他の3つの値より小さくなっている。このことから、兵庫県南部地震の地震波がRC・高層建物などの被害に関わる周期帯に、鳥取・芸予および三陸南の3地震の地震波が人体によく感じられる短周期帯に、それぞれ片寄った加速度の強度分布を持つことが推察される。そしてこのような地震動の特性の違いが、短周期帯を強調してしまう計測震度の値では差があまり無いにもかかわらず、地震によってその被害に大きな違いが現れてくる一因となっているのではないかと考えられる。

(3) 振動スペクトル図

最後に、バンドレベルの適用性を確認する意味で、

● 兵庫県南部地震 ● 鳥取県西部地震 ● 芸予地震 ● 三陸南地震

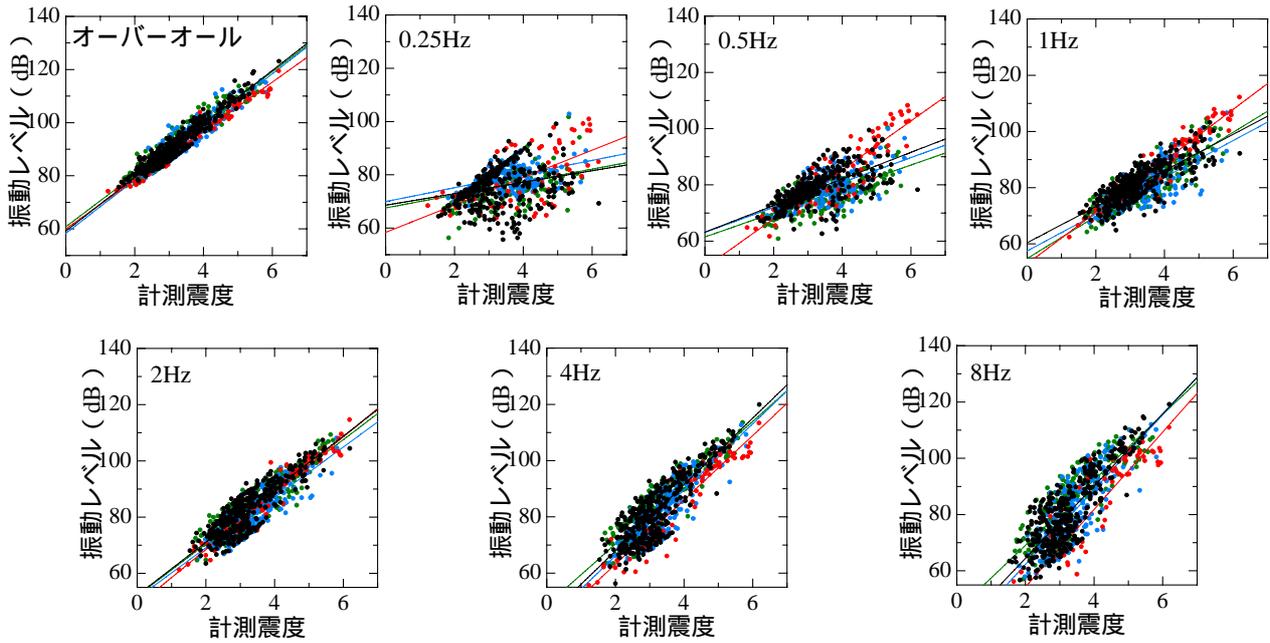


図-5 周波数バンドごとの計測震度と振動レベルの関係

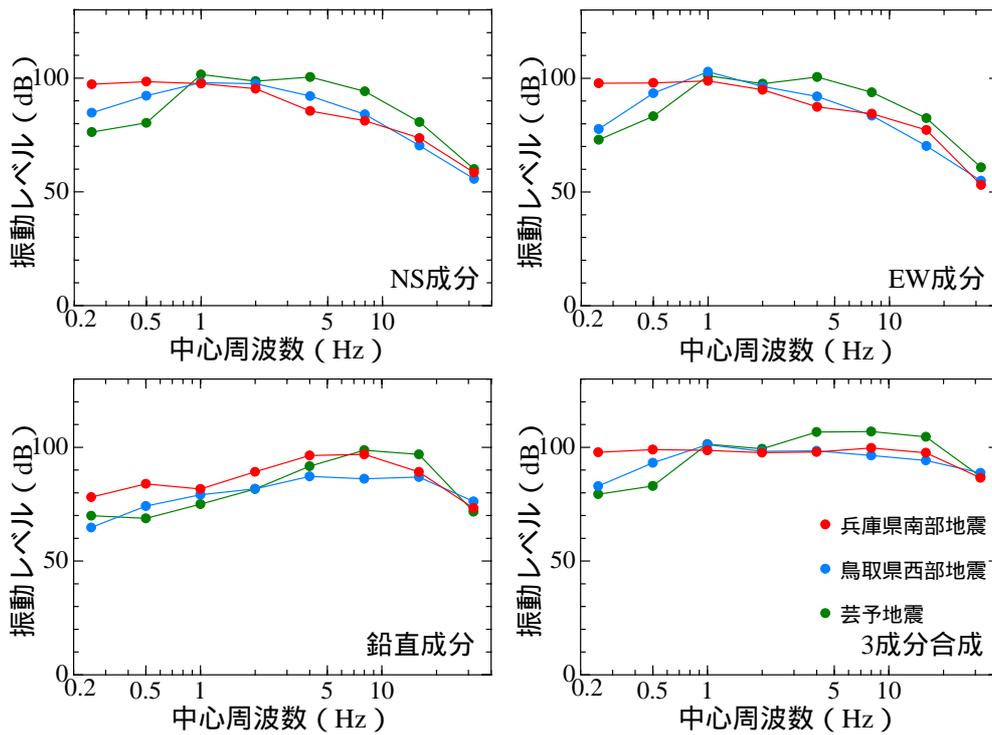


図-6 振動スペクトル図

図-6のような振動スペクトル図を作成して比較する。これは横軸に中心周波数、縦軸にバンドごとの振動レベルをとって表したもので、これにより、その振動の周波数特性が分かる。ここでは、各地震における観測記録の中から震央距離、地盤種別がほぼ同じ地点を選び、その地点の記録を使用している。ただし、三陸南地震については、この条件に該当する観測地点が無かったため、比較対象から除外した。こ

の図から、先に述べた各地震の違い、すなわち、兵庫県南部地震が 1Hz 以下の低振動数成分を多く含み、他の 2つの地震が 4Hz 以上の高振動数成分を多く含むことが確認できる。またそれ以外に、全体的に見て、同じ内陸直下型の地震である兵庫県南部地震と鳥取県西部地震のスペクトル特性が 1Hz 以上の周波数領域で類似していること、被害の特に大きかった兵庫県南部地震において、中心周波数 1Hz

以下のスペクトル振幅が他の2つの地震のものより大きくなっていること、なども確認できる。このような各地震の特性の違いが、それぞれの地震の被害に影響を与えていることは、組合せ震度⁵⁾などの既往の研究⁶⁾⁷⁾⁸⁾によりすでに明らかになっていることであるが、本研究では、地震工学の分野であり用いられない振動レベルによってそれを評価することができた。

4. 結論

本研究では、環境振動工学で使用されている振動レベルを用いて、現行の計測震度階が被害程度と整合しないという問題点に対して検討を行った。検討に当たっては、同じ規模の地震でありながら、その被害に大きな差が生じた地震、すなわち1995年兵庫県南部地震、2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震および2003年5月三陸南地震の記録を用いた。本研究の内容を要約すると、次のようになる。

- (1) 計測震度とオーバーオール振動レベルとの関係を検討した結果、両者の間に線形関係が見られた。また、地震ごとに両者の関係を比較検討した結果、兵庫県南部地震とその他の地震とで、あまり明確な差は見られなかった。すなわち、オーバーオール振動レベルと計測震度の関係には地震による顕著な差が無いことがわかった。
- (2) 計測震度とバンドレベルごとの振動レベルの関係図を作成し、各地震について比較検討を行ったところ、兵庫県南部地震は建物被害との関係が深い中・長周期帯で、また、鳥取県西部、芸予および三陸南地震は、人体によく感じられる短周期帯でそれぞれ振動レベルが大きくなることが分かった。このことが、計測震度階と被害程度との不整合性の原因の一つではないかと推察した。
- (3) 上述のバンドレベルの適用性を確認する意味で、振動スペクトル図を作成した。その際、地震ごとに震央距離、地盤種別がほぼ同程度の地点を選び、その地点の観測記録より振動スペクトル図を求め比較した。その結果、各

地震の振動スペクトルの形状が地震によりかなり異なることを確認した。特に、被害が大きかった兵庫県南部地震では、中心周波数1Hz以下の周期帯のスペクトル振幅が大きかったことがわかった。

本研究で行った検討において、バンドレベルを用いることでスペクトル的に地震動特性の違いを表現することができ、このことが実被害と計測震度の不整合性の原因の一つであろうという推測もできた。しかし、オーバーオール振動レベルを用いた検討では、被害との関連を表すことはできなかった。今後の方向性として、欧米で用いられている震度の評価、計測震度に代わる新しい震度概念の考案、などが考えられるが、これらについてはさらなる検討が必要である。

謝辞：本研究では、解析を行う際に震災予防協会発行の強震動アレー観測記録および防災科学技術研究所のK-Netを使用した。関係各位に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：震度を知る - 知識とその活用 - , (株)ぎょうせい, 1996.
- 2) 中野：環境振動, 技術書院, 1996.
- 3) 震災予防協会：強震動アレー観測データベース, .3, 1996.
- 4) 防災科学技術研究所：K-Net, <http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net/>.
- 5) 清野他：組合せ震度の提案・定式化とその応用について, 土木学会論文集, .612/I-46, pp.143-151, 1999.
- 6) TAKEMIYA, H. and ADAM, M.: Seismic wave amplification due to topography and geology in Kobe during Hyogo-ken Nanbu earthquake, J. of Structural Mechanics and Earthquake Engineering, Vol.14, No.2, 129S-138S, 1997.
- 7) 日本建築学会災害委員会, 日本建築学会災害調査WG: 2003年5月26日宮城県沖の地震および2003年7月26日宮城県北部の地震被害調査速報, 2003.
- 8) 池田孝, 加藤研一, 武村雅之: 2001年芸予地震の高振動数成分の励起特性, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.119-124, 2002.

(2003. 6. 30 受付)

THE RELATIONSHIP BETWEEN VIBRATION LEVEL AND INSTRUMENTAL SEISMIC INTENSITY

This study deals with the relationship between the instrumental seismic intensity and the vibration level for earthquake ground motions. JMA seismic intensity level has been used to represent the intensity level of earthquake ground motions in Japan which has close relation with the damage by earthquakes, while the vibration level is used to evaluate the intensity of environmental vibration. In this study, we investigate the relationship between the JMA seismic intensity and the vibration level (both overall and band level) by using observation records which were obtained from 4 earthquakes in Japan (1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, 2000 Tottori-ken Seibu earthquake, 2001 Geiyo earthquake, 2003 Sanriku Minami earthquake).