

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

PROPOSAL OF THE DESTRUCTIVE POWER INDEX OF STRONG GROUND MOTION FOR PREDICTION OF BUILDING DAMAGE RATIO

境有紀*, 瀨嶺一起**, 神野達夫***

Yuki SAKAI, Kazuki KOKETSU and Tatsuo KANNO

We investigated earthquakes in Japan, where strong ground motion records coincided with building damage data, examining correlation between various indices of seismic destructive power and building damage ratios. We also carried out earthquake response analyses and calculated responses to one-cycle sine-wave inputs. We proposed the average elastic acceleration or velocity response at periods from 1.2 to 1.5 s with a damping factor of 0.05 as an optimum destructive power index of strong ground motion for predicting building damage ratios. The period range is based on the equivalent periods that are calculated for residences with typical elastic periods considering inelastic elongation. We then formulated the vulnerability function using this proposed index and modified the JMA seismic intensity scale for obtaining better correlation with actual building damage.

Keywords : *destructive power indices of strong ground motions, JMA seismic intensity*

building damage ratio, vulnerability function, strong ground motion records, one-cycle sine wave

地震動の破壊力指標、気象庁計測震度、建物被害率、被害関数、強震記録、サイン波 1 波

1. はじめに

震度、地動最大加速度、地動最大速度、スペクトル強度などの地震動の強さを表現する指標は、地震発生直後に被害程度を迅速かつ的確に把握し、一刻も早い対応をするために重要な役割を果たす。1995 年兵庫県南部地震では、その被害の甚大さを迅速に把握できなかったことが被害拡大の一因とも言われ、1996 年には震度は体感によるものから計測震度へと改正がなされた¹⁾。

被害程度を的確に把握するためには、地震動の強さを表現する指標が被害程度と相関をもつ必要があるが、現在、地震発生直後の対応に用いられることが多い気象庁計測震度（以下、計測震度）は、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った。その一方で、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²⁾など、計測震度を被害との相関性から再検討する必要がある。

また、地震動の強さを表現する指標は、被害想定や地震危険度予測地図（ハザードマップ）のように非常に多くの地点で地震動の強さを評価する場合にも必要となる。その場合においても、指標の簡便性ととも、それが被害程度と相関をもつことが重要となる。以上のように、地震動の強さを表現する指標は被害程度と相関をもつべきという観点から、筆者らは「地震動の破壊力指標」という用語

を使用している（以下、この用語を用いる）。

地震動の破壊力指標に関する研究は、古くは大森³⁾、物部⁴⁾によるそれぞれ 1891 年濃尾地震、1923 年関東大震災における木造建物の全壊率と墓石の転倒による推定加速度の関係の検討にまで遡り、それ以降も様々な研究がなされてきた²⁾。しかしながら、被害を受けた地域で数多くの強震記録が得られることがなかったため、建物被害と地震動の破壊力指標のどちらかに解析による推定値を用いざるを得ず、建物被害と地震動の破壊力指標の双方に実際のものを用いて建物被害を予測する地震動の破壊力指標の検討を行うことはできなかったのが実状である。1995 年兵庫県南部地震では大きな被害が生じ、かつ多くの強震記録が観測され、様々な検討がなされたが^{5)~10)}、多くの強震記録で 1 秒程度のパルスが卓越したため、そのスペクトル特性に大きな違いがなかった、ということが問題点として挙げられる。なぜなら、地震動の破壊力指標として何が適切かという検討には、対象とする地震動が多様なものを含むことが条件となるからである。極端な例として、検討する地震動が全て同じスペクトル特性を持っていた場合、地震動の破壊力指標は地震動の振幅のみに依存し、どの指標を用いても建物被害との相関性に差異が生じないことになる。実際に、1995 年兵庫県南部地震のみを用いた検討では、様々な地震動の破壊力指標と建物被害の相関性には、大きな違いがないという結果が得られている⁵⁾。しかしこれは、1995 年兵

* 東京大学地震研究所 助手・工博

Research Assoc., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Eng.

** 東京大学地震研究所 助教授・理博

Assoc. Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Sci.

*** 防災科学技術研究所 特別研究員・博士(工学)

Postdoctoral Research Fellow National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, Dr. Eng.

兵庫県南部地震の強震記録のスペクトル特性に大きな違いがないためと考えられ、これらと異なるスペクトル特性、特に 0.5 秒以下の短周期が卓越した地震動が発生したときの建物被害を的確に推定することはできない。よって、地震動の破壊力指標として何が適切かという検討に、1995 年兵庫県南部地震のみを対象とするのでは不十分と考えられる。

筆者らの一部は、多様なスペクトル特性をもつ地震動が記録された 1999 年台湾集集地震による強震記録および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、建物の弾性周期に対する頻度分布と建物弾性周期の 3 倍程度の周期における地震動の弾性応答値が建物被害と相関が高いことに基づいて、1 秒程度の弾性応答を地震動の破壊力指標として用いることを提案し、その妥当性を示した²⁾。しかしながら、この結果は台湾の建物を対象としたものであり、指標の日本の建物への適用性について検討する必要がある。

そこで、1995 年兵庫県南部地震に日本で発生したその他の地震も加え、それらの強震記録と周辺の建物被害データを用いた検討を行い、建物被害率を予測する地震動の破壊力指標を提案する。そして、その指標と建物被害率の対応関係、即ち被害関数を示し、さらには、提案する地震動の破壊力指標を用いて、震度を建物被害率と相関をもつように表現する。

2. 用いた強震記録と被害データ

検討対象としたのは、表 1 の 23 記録とその周辺の大破以上（木造建物は全壊）の建物の割合（以下、建物被害率）である。「周辺」の範囲は、強震観測点から半径 200m の円を描き、その円にかかる町丁目とした。被害データの出典は謝辞にまとめて記した（謝辞に記したものの以外は筆者自らの調査によるものである^{12)~14)}）。大破以上を対象としたのは、大きな被害が人命の損失に繋がり、地震発生直後の対応にとって重要と考えたからである。対象とした建物種別は低層住宅、全建物の 2 種類である。

計測震度以外の指標は全て水平 2 成分のベクトル和を対象とした。計測震度はその計算に 3 成分（水平 2 成分と上下）必要だが、水平 2 成分しか記録されていないもの（表 1 で I_M の値に*がついている）は、水平 2 成分のみを用いた値とした。ただし 3 成分記録されたものを用いて水平 2 成分と 3 成分による計測震度の値を比較すると、例えば、NTT、MTY について 2 成分のみの場合がそれぞれ 6.07、5.82、3 成分用いた場合がそれぞれ 6.12、5.83 となり、上下動の影響はごくわずかった。

いくつかの強震記録について減衰定数 5% の弾性加速度応答スペクトル（ベクトル和）を図 1 に示す。前節で述べたように、1995 年兵庫県南部地震は、それ以外の強震記録とスペクトル特性が大きく異なり、いずれの記録も 1 秒程度が卓越している。従って、地震動の破壊力指標の妥当性を検討するには、1995 年兵庫県南部地震の強震記録のみを用いたのでは不十分で、それ以外の強震記録も加える必要があることがわかる。

表 1 用いた強震記録と周辺の建物被害率

ID	地震	地点	PGA	PGV	SI	I_M	d1	d2
TKT	1995 年兵庫県南部	JR 鷹取	742.7	161.9	412.0	6.48*	59.4	34.9
FKI	1995 年兵庫県南部	豊谷	834.0	139.8	376.7	6.49*	20.2	15.3
NTT	1995 年兵庫県南部	NTT 神戸	331.3	91.2	196.1	5.83	16.1	6.1
TKZ	1995 年兵庫県南部	JR 宝塚	690.4	91.7	234.7	6.15	7.2	6.2
MTY	1995 年兵庫県南部	本山第一小	794.0	86.7	228.8	6.12	6.5	5.3
KMA	1995 年兵庫県南部	神戸 JMA	847.9	96.6	305.3	6.43	3.2	2.5
AMK	1995 年兵庫県南部	尼崎高架橋	340.7	57.9	160.7	5.69	2.4	2.2
AMT	1995 年兵庫県南部	尼崎竹谷小	551.0	60.2	142.2	5.70	1.7	1.2
AMH	1995 年兵庫県南部	尼崎港	473.2	64.8	160.1	5.74	0.0	0.0
SGK	1995 年兵庫県南部	関電総合技研	555.9	64.2	180.0	5.95	0.8	0.7
RKI	1995 年兵庫県南部	六甲アイランド	368.0	79.8	164.5	5.70	0.0	0.0
SOS	1995 年兵庫県南部	JR 新大阪	253.0	41.5	105.4	5.42	0.0	0.0
OSK	1995 年兵庫県南部	大阪 JMA	83.1	19.5	43.4	4.54	0.0	0.0
HCH	1994 年三陸はるか沖	八戸市庁舎	433.7	49.2	146.5	5.82	1.9	3.1
SKM	2000 年鳥取県西部	境港測候所	762.6	88.3	211.8	6.01	1.1	1.4
YNG	2000 年鳥取県西部	K-NET 米子	435.6	54.1	163.9	5.82	0.0	0.0
KSR	1993 年釧路沖	釧路 JMA	752.3	45.8	149.3	5.95*	0.0	0.0
OTB	1993 年北海道南西沖余震	乙部小	1615.6	58.3	159.7	6.15	0.0	0.0
ONO	2001 年芸予	K-NET 大野	450.4	32.6	101.9	5.63	0.0	0.0
TYO	2001 年芸予	K-NET 東予	509.3	33.4	102.9	5.57	0.0	0.0
MHR	2001 年芸予	K-NET 三原	641.6	11.8	41.1	4.98	0.0	0.0
MJ1	1997 年鹿児島県北西部 3/26	K-NET 宮之城	542.8	37.7	95.9	5.53	0.0	0.0
MJ2	1997 年鹿児島県北西部 5/13	K-NET 宮之城	978.0	47.5	139.8	5.92	0.0	0.0

PGA: 地動最大加速度 (cm/s^2), PGV: 地動最大速度 (cm/s), SI: スペクトル強度 (cm), I_M : 計測震度 (*がついたものは水平 2 成分による値), d1: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合(%), d2: 観測地点周辺における大破・全壊以上の建物の割合(%), 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なので、建物被害率は 2 分の 1 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¹¹⁾。

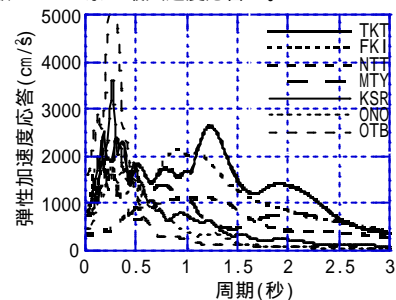


図 1 弾性加速度応答スペクトル（ベクトル和、減衰定数 5%）

3. 地震動の破壊力指標の検討

地震動の破壊力指標として何が適切かについて、建物被害率との相関性から検討した。まず、既往の地震動の破壊力指標と建物被害率との関係を低層住宅、全建物の場合についてそれぞれ図 2 に示す。なお、計測震度は地動最大加速度に対して対数の関係があるので、横軸に計測震度の指数をとっており、対応する計測震度の値は図中に示してある。

地動最大加速度はほとんど相関がない。地動最大速度、スペクトル強度にはある程度の相関が見られるが、これは長周期あるいはやや長周期にパワーをもった地震動（例えば 1999 年台湾集集地震の石岡の記録など）が含まれていないためである。このような地震動が発生すると、地動最大速度は大きくなるが、多くの建物の周期（厳密には塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期）が属する周期帯域にパワーがなければ、建物被害は大きくならないため、地動最大速度では被害を適切に予測することはできない。このことは 1999 年台湾集集地震による解析で示されている²⁾。

このような地震動が日本で発生するかどうかであるが、関東平野などの堆積盆地でやや長周期が卓越した地震動が発生する可能性は多くの研究者によって指摘されている（例えば¹⁵⁾¹⁶⁾）。そのような地震動が発生したときに地動最大速度では建物被害を的確に予測できない可能性がある。

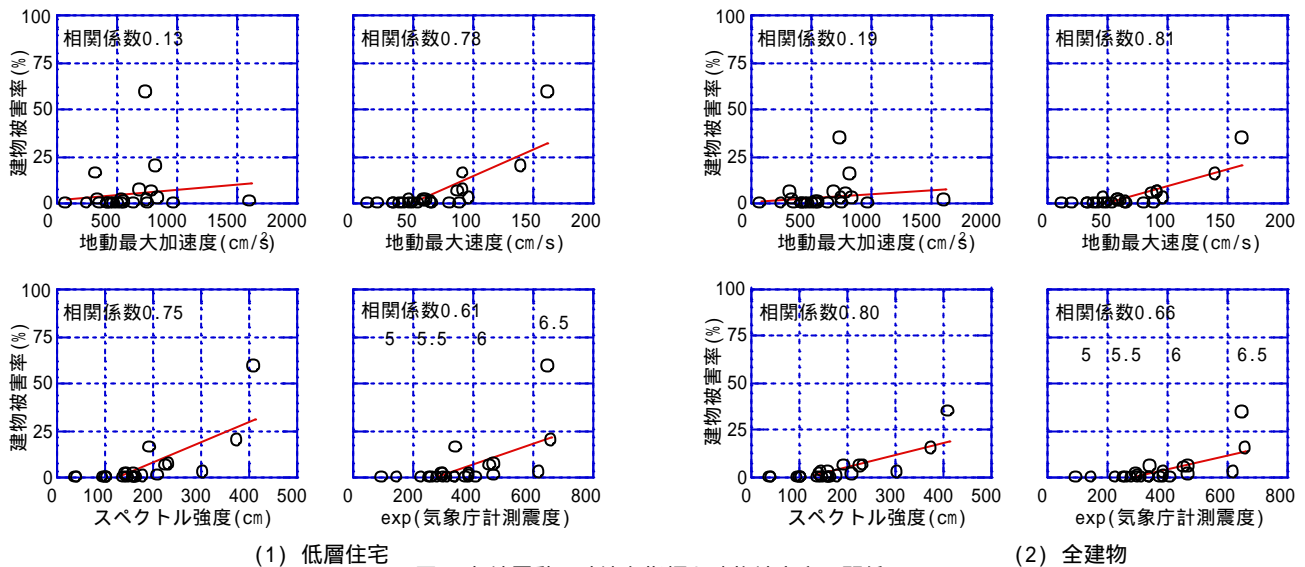


図2 各地震動の破壊力指標と建物被害率の関係

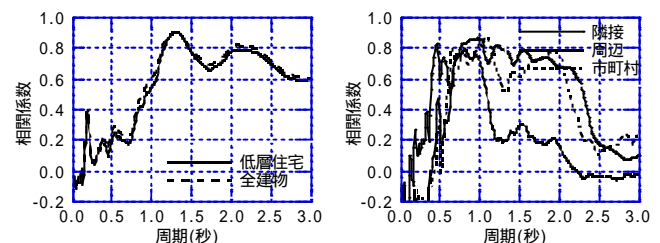
計測震度もやや相関があるが、計測震度の6.0～6.5（震度6強）の範囲に、(1)全く被害がないものから甚大な被害をもたらしたものと含まれる、(2)被害が生じた1995年兵庫県南部地震の地点（例えばNTT, AMK, AMT）より計測震度が大きい建物被害率0の地点（例えばOTB, KSR, MJ2）が存在する、(3)建物被害率が大きく異なるTKT, FKI, KMA（低層住宅でそれぞれ59.4, 20.2, 3.2%）の値がいずれも6.5程度でほぼ同じなど、精度は充分とは言えない。

建物被害を1つの地震動の破壊力指標で予測するには、地震動のスペクトルを周期軸でどう重み付けするか、ということが問題になる。地動最大加速度は短周期、地動最大速度は長周期に比重があり、スペクトル強度は0.1～2.5秒という広範囲、計測震度には独自のフィルターがある。その一方で、建物被害は地震動の性質のみから決まるのではなく、建物の性質にも依存することは言うまでもない。よって、建物被害を1つの指標で的確に予測するには、建物の性質を反映させ、建物頻度が高い周期帯（厳密には塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期）のスペクトルに重みをつければよい。

そこで1999年台湾集集地震の強震記録と被害データを用いた解析²⁾と同様に、横軸に減衰定数5%の弾性速度応答スペクトル（ただしここでは水平2成分ベクトル和）の弾性周期、縦軸にその周期における弾性速度応答と建物被害率の相関係数をとって図3(1)に示す。比較のため1999年台湾集集地震による結果（図3(2)）も併せて示す。1999年台湾集集地震で隣接、周辺、市町村とは、被害データの対象範囲の違いである。図3は端的に言えば、弾性応答スペクトルのどの周期の値が建物被害率と相関が高いかを示すものである。

今回の解析結果は、1999年台湾集集地震による結果と非常に類似

している。即ち、相関係数は建物の弾性周期（低層木造住宅で0.3～0.4秒程度²⁾、鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物で0.2～0.5秒程度：図4²⁾）では非常に小さく、その4倍程度の、塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期で大きくなっていて、建物被害がその等価周期における弾性応答のみによってほぼ決まる²⁾ことがここでも確認される。このことは建物の周期として降伏周期、限界点周期（想定する限界点の割線周期）が重要である^{例えは17)}こととも対応している。つまり、地震動の破壊力指標を考える上で考慮すべき周期帯は、建物の等価周期であるとともに、建物の弾性周期の周期帯を排除することが重要であることがわかる。



(1) 1995年兵庫県南部地震その他 (2) 1999年台湾集集地震²⁾
図3 弾性速度応答の周期と建物被害率の相関係数の関係

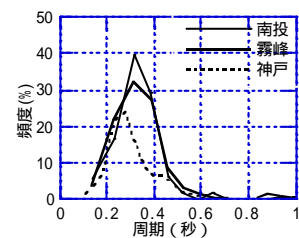


図4 台湾と日本のRC造建物の頻度分布

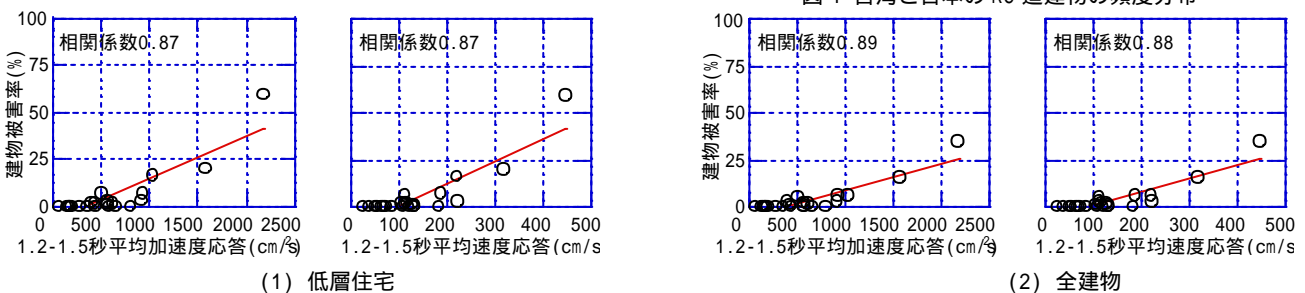


図5 1.2～1.5秒平均弾性応答と建物被害率の関係

ただし図 3 を見ると、今回の解析で相関係数が最も高くなったのは 1.2 ~ 1.5 秒程度、範囲を広げると 1 ~ 2 秒程度で、1999 年台湾集集地震による解析の 1 秒前後よりやや長くなった。台湾における建物の弾性周期の頻度分布は日本の RC 造および木造建物とほぼ同じであることから（図 4）日本の建物の等価周期は台湾の建物よりやや長く、靱性能に優れていることがわかる。また、建物種別（低層住宅、全建物）による違いはほとんど見られない。これは、まず建物の多くが低層住宅であること、そして低層住宅以外の大部分を占める RC 造建物の頻度分布（図 4）も大部分が中低層で、低層住宅の弾性周期（0.3 ~ 0.4 秒程度）周辺（0.2 ~ 0.5 秒程度）に集中する（例えば 0.5 秒に対応する階数は 10 階程度となる²⁾）ためと考えられる。

ここで、1.2 ~ 1.5 秒の平均弾性加速度、速度応答（いずれも減衰定数 5%、水平 2 成分ベクトル和）と建物被害率の関係を図 5 に示す。両者の間には非常に強い相関関係があり、その相関係数は既往の地震動の破壊力指標で最も相関が良かった地動最大速度より更に大きな値になっている。また、建物被害率として大破以上を対象としているので、ある一定の指標の値（弾性速度応答の場合は 100cm/s 程度）までは被害が生じず、それを越えると被害が生じる、という実際の被害の発生状況とも対応する結果になっている。

以上から、水平 2 成分ベクトル和による減衰定数 5% の 1.2 ~ 1.5 秒の平均弾性加速度あるいは速度応答（以下、それぞれ等価周期加速度応答 A_e 、等価周期速度応答 V_e 、あるいはまとめて等価周期応答）を地震動の破壊力指標として用いることを提案する。この指標は、50 行程度の応答解析プログラムが必要となり、地動最大加速度、地動最大速度ほど簡便なものではないが、スペクトル強度と同程度、計測震度より遙かに簡単に計算することができる。

4. 応答解析による確認

前節（3 節）で、建物被害がその弾性周期の 4 倍程度の等価周期における弾性応答のみによってほぼ決まり、建物弾性周期における弾性応答とは無関係であることから、等価周期における弾性応答を地震動の破壊力指標として提案した。本節では限られたパラメタを用いた簡単な応答解析を行い、前節（3 節）と同様な結果が応答解析でも再現できるかについて確認する。また応答解析と実際の被害レベル、あるいは等価周期と限界点周期の対応性についての検討も行う。

簡単のため一自由度系を用い、弾性周期は 0.35 秒（低層住宅、RC 造建物の弾性周期のほぼ平均値）に固定した。復元力特性は Takeda モデル¹⁸⁾を用い（図 6）、除荷剛性低下指数は 0.5 とした。減衰は瞬間剛性に比例するものとして減衰定数は 5%、柱脚は固定、数値積分には線形加速度法を用いた。

まず表 1 の強震記録を対象として地震応答解析を行った。入力地震動には水平 2 成分のベクトル和が最大となる方向を用いた。建物被害率に対応するものとして、ある一定の塑性率を越えると被害が生じると考え、ある一定の塑性率（以下、許容塑性率 μ ）以下に収まるための必要ベースシア係数（以下、必要耐力）を求めた。許容塑性率 μ は 2, 4, 6, 8 と変化させる。

図 3 に対応するもの、即ち横軸に減衰定数 5% の弾性速度応答 V_e

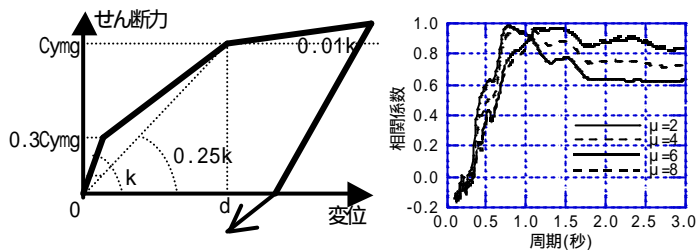


図 6 履歴モデルのスケルトンカーブ
 C_y : ベースシア係数 m : 質量 g : 重力加速度,
 k : 弾性剛性, d_y : 降伏変位

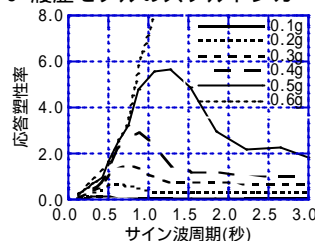


図 8 サイン波 1 波が入力したときのサイン波の周期と応答塑性率の関係

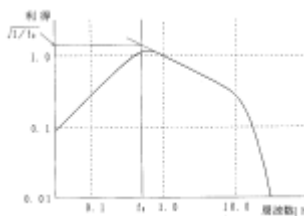


図 10 計測震度のフィルタ特性¹⁾

図 7 弾性速度応答スペクトルにおける弾性周期とその周期における弾性速度応答あるいは地震応答解析による必要耐力との相関係数の関係（系の弾性周期が 0.35 秒の場合）

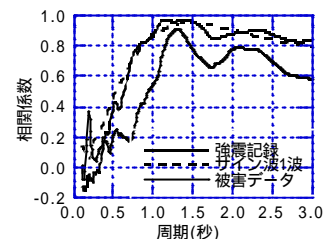


図 9 弾性速度応答スペクトルにおける弾性周期とその周期における弾性速度応答あるいは応答解析による必要耐力（ $\mu=6$ 、系の弾性周期が 0.35 秒の場合）被害データによる建物被害率の相関係数の関係

ベクトルの弾性周期、縦軸にその周期における弾性速度応答と必要耐力の相関係数をとって図 7 に示す。地震応答解析においても図 3 と同様に、相関係数は建物の弾性周期の 0.35 秒では非常に小さく、その 2 ~ 4 倍程度（何倍かは許容塑性率の大きさによる）の等価周期で大きくなり、系の弾塑性応答が建物等価周期における弾性応答のみによってほぼ決まることが確認される。また図 3 と比較すると、最も相関係数が高い周期は $\mu=6$ の場合がほぼ図 3 に対応しており、大破・全壊に対応する許容塑性率は、およそ 6 と非常に大きくなった。ただ塑性率 6 に対応する変形角は、降伏変形角を 1/200 とすると 3% となり、RC 建物の大破に対応する 3%²⁾ と同じ値となる。また図 6 より、等価周期 1.2 ~ 1.5 秒（0.35 秒の 4 倍）に対応する塑性率は 4 なので、等価周期は $\mu=6$ に対応する限界点周期よりやや短い程度であることがわかる。

一自由度系を用いた簡単な地震応答解析によって、図 3 とほぼ同様の結果が再現されたが、実際の地震動に対する弾塑性地震応答は複雑で、最大応答が発生するまでの過程は明確ではない。そこで非常に単純な場合として、入力をサイン波 1 波とした応答解析を行った。サイン波としたのは、入力のパワーをある周期に集中させるためであり、1 波としたのは、最大応答が発生する過程を単純にするためである。サイン波の周期は 0.1 ~ 3.0 秒、振幅を 0.1 ~ 0.6g (g : 重力加速度) と変化させる。簡単のため系のベースシア係数は 0.5 と固定し、応答塑性率を求める。用いた復元力特性モデル、解析仮定などは、表 1 の強震記録を入力した場合と同じである。

サイン波の周期と応答塑性率の関係を図 8 に示す。振幅を徐々に大きくしていくと、応答塑性率も大きくなっていくが、応答塑性率が大きくなるサイン波の周期も長くなっていくことがわかる。そし

て振幅が 0.5g の場合において、系の弾性周期 0.35 秒の約 4 倍（1.4 秒程度）のサイン波 1 波で応答塑性率は 6 程度となるのに対し、建物の弾性周期と同じ 0.35 秒のサイン波 1 波の応答塑性率は、振幅 0.6g でも 1 以下である。

サイン波 1 波を入力したときの図 3 に対応する関係（弾性速度応答スペクトルの弾性周期と、その周期における弾性速度応答と許容塑性率が 6 の場合の必要耐力との相関係数の関係）を、強震記録を入力した場合、実際の被害データを用いた場合（図 3）と比較して図 9 に示す。サイン波 1 波を入力した結果は、強震記録を入力した場合や実際の被害データを用いた場合（相関係数が全体にやや小さいのは、実際の建物の耐震性能にばらつきがあるためと考えられる）と同様の結果になっている。

以上のように、系の等価周期に集中してパワーをもち、かつ 1 パルスだけのサイン波が、系の大きな弾塑性応答をもたらすことから、弾性応答によってまず周期が伸びて、その後に伸びた周期、即ち等価周期で応答して大きな応答に至るのではなく、直接等価周期で応答して大きな弾塑性応答を引き起こすことが確認される。このことは、1995 年兵庫県南部地震において 1 秒程度のパルスによって、弾性周期 0.3 秒程度の木造建物が大きな被害を受けたこととも対応している。従って、地震動の破壊力指標を考える場合、等価周期を考えるだけでは不十分で、地震動の建物弾性周期の周期帯を排除する必要があることが応答解析でも確認される。

ここで計測震度のフィルタ特性¹⁾を引用して図 10 に示す。計測震度のフィルタは、1 秒よりやや長い周期にピークがあり、建物の等価周期が考慮されていることがわかるが、建物の弾性周期付近（3Hz 程度）が排除されておらず、このことが実際の被害との相関が低い一因と考えられる。

5. 建物被害率の推定式の作成

ここでは 3 節で提案した等価周期応答から建物被害率を求める式、即ち被害関数の定式化を行う。関数形は、よく用いられる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）とした。なお、等価周期加速度応答と等価周期速度応答は、その建物被害率との相関性にほとんど差がないので、これ以降は等価周期速度応答のみを対象として検討を行う。表 1 の 23 記録から建物被害率 0 を除いた 11 点について（対数正規分布には建物被害率 0 の点が理論的に存在しないため）、等価周期速度応答と建物被害率（低層住宅および全建物）の関係を図 11 に示す。このようにして求めた近似式、即ち被害関数を以下に示す。

$$D = (-8.78 + 3.24 \cdot \log(V_e)) \quad (\text{低層住宅}) \quad (1)$$

$$D = (-6.99 + 2.37 \cdot \log(V_e)) \quad (\text{全建物}) \quad (2)$$

ここで、D: 建物被害率(%), V_e : 等価周期速度応答(cm/s), (x): 標準正規分布の累積確率である。

図 11 の相関係数は、図 5 のそれよりわずかに小さくなっているがこれは、縦横軸のとりかたが違う、あるいは建物被害率 0 の点を除いたために対数正規分布を用いることにより相関が悪くなっているわけではない。上記の建物被害率の推定式と実際のデータの対応を建物被害率 0 のものも含めて、図 12 に示す。実際のデータを精度良く推定できていることがわかる。

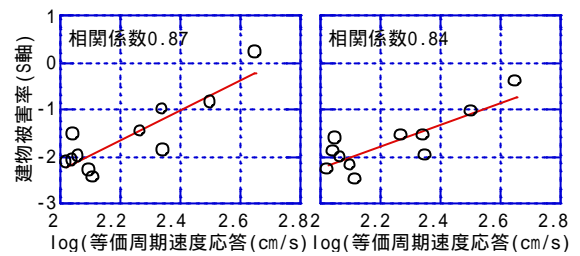


図 11 建物被害率 0 の点を除いた減衰定数 5% の等価周期速度応答と建物被害率の関係

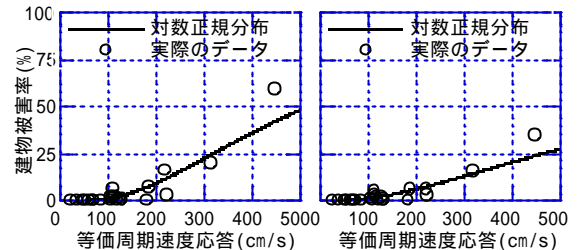


図 12 建物被害率の推定値と実際のデータの対応

6. 計測震度の修正の試み

最後に、建物被害率と相関の高い等価周期速度応答を用いて、計測震度を建物被害率と相関をもつように修正することを試みた。具体的には、等価周期速度応答の被害関数と同様に、震度についても被害関数を求め、建物被害率を介して、震度を等価周期速度応答で表現する。なおここで、単に「震度」というときは、本来的には被害と相関があるべきと考えられる、計測震度が導入される以前の震度階を想定している。また震度は 5 強、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考える。つまり、本来の震度を正確に「計測」できるような計測震度を提案することが目的となる。

まず等価周期速度応答と同様に、標準正規分布の累積確率（以下、正規分布）を用いて計測震度の被害関数を求めた。計測震度は地動最大加速度に対して対数の関係があるので、対数正規分布ではなく正規分布を用いた。なお対象とする建物被害率は、震度が主として家屋の被害を対象としていることから¹⁾、低層住宅を対象とする。また、建物被害と関係づけて定義すべき範囲として震度 5 以上を対象とする。

表 1 の 23 記録から建物被害率 0 を除いた 11 点について、計測震度と建物被害率（低層住宅の全壊率）の関係を図 13 に示す。このようにして求めた近似式、即ち低層住宅の全壊率を対象とした計測震度の被害関数を以下に示す。

$$D = (-10.71 + 1.50 \cdot I_M) \quad (3)$$

ここで I_M は計測震度である。

上記の建物被害率の推定式と実際のデータの対応を建物被害率 0 のものも含めて、図 14 に示す。等価周期速度応答（図 11, 12）と比較すると建物被害率との相関が低く、例えば震度 7 の定義（家屋の倒壊率 30%）¹⁾と比べると、震度 7 の下限値 6.5 で 20.6%と、建物被害率を小さめに評価することがわかる。これは同じ建物被害率に対して、計測震度は大きめに見積られることを意味している。

計測震度は被害などの出力ではなく、地震動の入力を表したものであるが¹⁾、本来震度は 5 以上の範囲では建物被害と関係づけて定

義すべきものと考え、本来の震度の被害関数について検討した。計測震度ではなく、本来の震度の被害関数を検討したものには、岡田・高井¹⁹⁾によるものがある。提案された被害尺度と正規分布を用いた被害関数を引用して図 15、16 に示す。

提案された被害尺度 Damage Grade の D4 における被害関数を見ると、自治体統計（改訂）の全壊以上に対応し、震度 7 の下限の震度 6.5 における被害率も 26.8% とほぼ震度 7 の定義の 30% に近い値になっている。この D4 の被害関数を震度 6.5 において震度 7 の定義の被害率 30% になるように正規分布の標準偏差はそのままにして平均を修正すると式(4)が得られる。

$$D = (-12.03 + 1.77 \cdot I) \quad (4)$$

ここで I は震度である。

また、震度と低層住宅の全壊率の関係を検討したものには藤本・翠川²⁰⁾によるものもある。これは、計測震度にアンケート震度も加えて、低層住宅全壊率との関係を検討したもので、震度 5.5、6.0 でそれぞれ低層住宅全壊率が 1%、8% に対応している。

図 14 の計測震度の被害関数、岡田・高井による Damage Grade D4 の被害関数（岡田・高井）、D4 の被害関数を震度 6.5 において被害率 30% になるように平均を修正した式(4)（修正岡田・高井）と藤本・翠川による結果を併せて図 17 に示す。修正岡田・高井は、藤本・翠川による結果ともよく対応していることがわかる。よって岡田・高井による Damage Grade D4 を修正した式(4)を震度の被害関数として用いることとする。

最後に、震度を等価周期速度応答で表現する。まず、式(4)を I について解いて式(5)を得る。

$$I = (-1(D) + 12.03) / 1.77 \quad (5)$$

ここで $-1(x)$ は (x) の逆関数である。次に、式(5)に式(1)を代入すると式(6)のように等価周期速度応答 V_e を用いて、震度 I が表現できる。

$$\begin{aligned} I &= (-1((-8.78 + 3.24 \cdot \log(V_e)) + 12.03) / 1.77 \\ &= (-8.78 + 3.24 \cdot \log(V_e) + 12.03) / 1.77 \\ &= 1.84 + 1.83 \cdot \log(V_e) \end{aligned} \quad (6)$$

式(6)から求めた震度（以下、修正計測震度 MI_M ）と建物被害率の関係、および式(4)による被害関数を図 18 に示す。図 18 は 図 12(1)の横軸を修正計測震度読み替えたものに相当し、図 14 と比べて建物被害率との相関が改善されているのがわかる。また、過去の様々な強震記録について、計測震度 I_M と式(6)による修正計測震度 MI_M の値を比較して表 2 に示す。

修正計測震度は、短周期が卓越して計測震度が大きくなった記録で、いずれも計測震度より 0.5～1.0 程度小さくなっている。特にベクトル和でそれぞれ 2.0g、1.6g もの大加速度を記録した 1994 年 Northridge 地震の Tarzana、1993 年北海道西南部地震余震の乙部小の記録は、それぞれ震度 7 6 弱、6 強 5 強と大幅に小さくなり実際の被害と対応するようになっている。計測震度では、震度 6 弱にもかかわらず周りに大破・全壊以上の被害建物がなかった 2001 年芸予地震の K-NET 大野、1997 年 5 月 13 日鹿児島県北西部地震の K-NET 宮之城がいずれも震度 6 弱 5 強となり、周辺の家屋全壊率が 1% 程度だった 2000 年鳥取県西部地震の境港候所も 6 強 6 弱となっている。その一方で、大きな被害をもたらした 1995 年兵庫県南部地震の JR 鷹取、葺合の値は、ほぼ同じかむしろ大きめになっている、

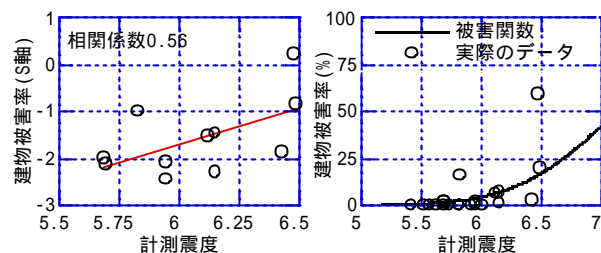


図 13 建物被害率 0 の点を除いた 図 14 計測震度による被害関数と計測震度と建物被害率の関係 実際のデータとの対応

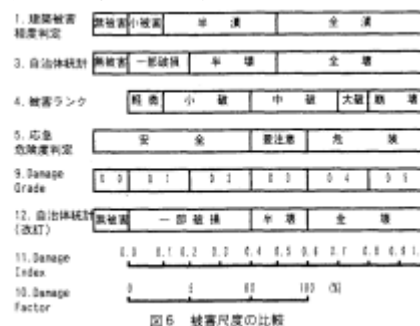


図 15 岡田・高井¹⁹⁾による被害尺度の比較

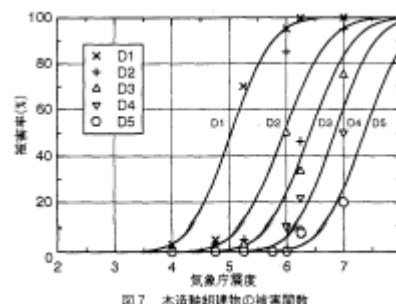


図 16 岡田・高井¹⁹⁾による被害関数

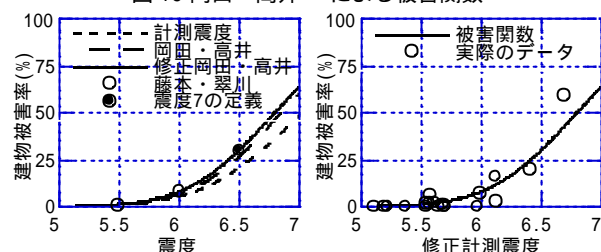


図 17 震度の被害関数の比較 図 18 修正計測震度による被害関数と実際のデータとの対応

実際の被害と対応するように修正がなされている。この修正計測震度は、1.2～1.5 秒における弾性速度応答の非常に簡単な関数（式(6)）となっていて、高震度では周期 1 秒以上に重みづけすべきという岡田の指摘²¹⁾とも対応する結果となっている。

7. まとめ

1995 年兵庫県南部地震など日本で発生した地震に対して、それらの強震記録と周辺の建物被害データを用いて、建物被害率を予測することを目的とした地震動の破壊力指標について建物被害率との相関性から検討し、水平 2 成分ベクトル和による減衰定数 5% の 1.2～1.5 秒の平均弾性加速度あるいは速度応答を、建物被害率を予測する地震動の破壊力指標として提案した。この指標が実際の被害と相関をもつことは、建物の弾性周期分布は 0.2～0.5 秒に集中している

こと、建物被害は塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期における弾性応答のみによってほぼ決まり、弾性周期における弾性応答とは無関係であることから説明できた。

この指標から低層住宅、全建物の建物被害率を求める被害関数の定式化を行い、震度5以上を対象として、震度を提案する指標の関数として表現した。その結果、実際の被害と相関をもつように、即ち、本来の震度に対応するように、計測震度を修正することができた。修正計測震度は、建物被害率と相関をもつように作成されたが、等価周期速度応答の関数となっており、その値は計測震度と同様、入力のみから決まるものとなっている。

提案する指標あるいは修正計測震度は、建物被害率、即ち、頻度の高い建物（主として低層住宅、中低層 RC 建物）を対象としているので、高層、超高層建物、免震建物、原子炉建屋などの頻度分布からはずれずる建物の被害を予測するには、個別に解析を行う必要があるのは言うまでもない。また、本解析で用いた強震記録および被害データの半数は 1995 年兵庫県南部地震のものであり、低層木造住宅の耐震性能が地方や建設年代によって大きく異なることなどを考えると、今後更にデータを蓄積していく必要があるだろう。

謝辞

強震記録は、1999 年台湾集集地震を台湾交通部中央気象局²²⁾、1995 年兵庫県南部地震を震災予防協会²³⁾、JR 総合技術研究所²⁴⁾、大阪ガス、NTT ファシリティーズ、積水ハウス²⁵⁾、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²⁶⁾、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 年鳥取県西部地震を気象庁および防災科学技術研究所より、1997 年鹿児島県北西部地震、2001 年芸予地震を防災科学技術研究所より提供を受けました。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²⁷⁾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²⁸⁾、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いただきました²⁹⁾。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³⁰⁾。慶應義塾大学北川良和先生、東京電力植竹富一、九州大学矢葺亘、東京工業大学盛川仁、藤本一雄各氏にも貴重な情報をいただきました。

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。また、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 2 既往の強震記録の計測震度、修正計測震度および地震動の破壊力指標

地震	地点	I _m	MI _w	d1	PGA	PGV	SI	V _g
1995 年兵庫県南部	JR 鷹取	6.48	6.69	59.4	742.7	161.9	412.0	447.6
1995 年兵庫県南部	真合	6.49	6.41	20.2	970.9	88.9	376.7	316.6
1995 年兵庫県南部	NTT 神戸	5.83	6.12	16.1	331.3	91.2	196.1	219.6
1995 年兵庫県南部	本山第一小	6.12	5.58	6.5	794.0	86.7	228.8	110.9
1995 年兵庫県南部	神戸 JMA	6.43	6.13	3.2	847.9	96.6	305.3	222.0
1994 年 Northridge	Sylmar	6.20	5.98	-	836.0	128.8	290.3	183.0
1994 年 Northridge	Tarzana	6.54	5.87	-	1965.2	114.1	301.3	160.3
1993 年釧路沖	釧路 JMA	5.95	5.55	0.0	752.3	45.8	149.3	106.9
1993 年北海道南西沖余震	乙部小	6.15	5.11	0.0	1615.6	58.3	159.7	61.1
1994 年三陸はるか沖地震	八戸市庁舎	5.82	5.57	1.9	433.7	49.2	146.5	110.0
1997 年鹿児島県北西部 5/13	K-NET 宮之城	5.92	5.20	0.0	978.0	47.5	139.8	68.3
1999 年台湾集集地震	埔里	6.04	6.15	-	608.4	73.1	218.0	226.9
1999 年台湾集集地震	石岡	6.03	5.89	-	530.9	242.3	206.6	163.7
1999 年台湾集集地震	新街	5.98	5.58	-	992.6	59.4	161.7	110.3
2000 年新島・神津島近海	神津島金長	5.78	5.19	-	468.4	45.3	127.5	67.4
2000 年鳥取県西部	境港測候所	6.01	5.68	1.1	762.6	88.3	211.8	125.0
2001 年芸予	K-NET 大野	5.63	5.22	0.0	450.4	32.6	101.9	70.7
1940 年 Imperial Valley	El-Centro	5.43	5.11	-	346.3	47.4	104.6	61.4
1952 年 Arvin-Tahachapi	Taft	4.96	4.77	-	215.3	20.6	58.7	39.9
1968 年十勝沖	八戸港湾	5.28	5.37	-	224.8	34.4	96.3	84.6
1978 年宮城県沖	東北大学	5.55	5.59	-	301.6	46.2	121.6	112.6

I_m: 計測震度, MI_w: 式(4) (修正岡田・高井)を用いた V_g による修正計測震度, d1: 観測地点周辺における大破・全壊以上の低層住宅の割合(%), PGA: 地動最大速度 (cm/s²), PGV: 地動最大速度 (cm/s), SI: スペクトル強度 (cm), V_g: 減衰定数 5% の 1.2 ~ 1.5 秒平均速度応答 (cm/s), 計測震度で*は、水平 2 成分による値, PGV は、周期 15 秒、減衰定数 70.7% の系の最大速度応答¹⁾。

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) 境有紀, 吉岡伸悟, 藤織一起, 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, 2001.11.
- 3) 大森房吉: 明治 24 年 10 月 28 日濃尾大地震調査第 2 回報告, 震災予防調査会報告, 第 32 号, pp.67-88, 1900.
- 4) 物部長穂: 土木工事震害調査報告, 震災予防調査会報告, 第 100 号, 丁, pp.7-17, 1926.
- 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) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫, 川瀬博: 1995 年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定, 日本建築学会構造系論文集, 第 494 号, pp.59-66, 1997.4.
- 7) 林康裕, 宮腰淳一, 田村和夫: 1995 年兵庫県南部地震の建物被害に基づく最大地動速度分布に関する考察, 日本建築学会構造系論文集, 第 502 号, pp.61-48, 1997.12.
- 8) 林康裕, 宮腰淳一, 田才晃, 大野義昭: 1995 年兵庫県南部地震における RC 造建物群の耐震性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 528 号, pp.135-142, 2000.2.
- 9) 長谷川浩一, 翠川三郎, 松岡昌志: 地域メッシュ統計を利用した広域での木造建物群の被害予測 - その 2 建築年代別木造建築物の被害関数の作成と震害予測例 -, 日本建築学会構造系論文集, 第 505 号, pp.53-59, 1998.3.
- 10) 村尾修, 山崎文雄: 自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数, 日本建築学会構造系論文集, 第 527 号, pp.189-196, 2000.1.
- 11) 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.
- 12) 境有紀, 田才晃, 隈沢文俊, 柏崎隆志: 1993 年釧路沖地震による建築物の被害, 地震研究所彙報, 第 68 冊, pp.243-291, 1993.
- 13) 工藤一嘉, 坂上実, 高橋正義, 笹谷努, 斎藤誠治, 南雲秀樹: 1993 年北海道南西沖地震系列の強震観測 - 8 月 8 日, M6.5 の地震による 1.6g の強震記録 -, 地震工学振興会ニュース, No.133, pp.18-20, 1993.11.
- 14) 境有紀, 藤井賢志: 2001 年芸予地震被害調査速報および強震記録, 地震工学振興会ニュース, No.178, pp.1-7, 2001.5.
- 15) Zama, S.: Characteristics of long-period ground motion in Tokyo Bay Area, Japan, Proc. 10th World Conference Earthquake Engineering, pp.593-598, 1992.
- 16) Koketsu, K. and M. Kikuchi: Propagation of Seismic Ground Motion in the Kanto Basin, Japan, Science, 288, pp.1237-1239, 2000.
- 17) 改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準改修設計指針適用の手引, p.44, 日本建築防災協会, 1990.
- 18) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.ST5, pp.2557-2573, 1970.
- 19) 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.
- 20) 藤本一雄, 翠川三郎: 被害分布から推定した 1995 年兵庫県南部地震の震度分布, 日本建築学会構造系論文集, No.523, p.71-78, 1999.9.
- 21) 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.
- 22) 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.
- 23) 震災予防協会: 強震動アレー観測, No.3, 1998.3.
- 24) 中村豊, 上平文昭, 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.
- 25) 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.
- 26) 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.
- 27) 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.
- 28) 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.
- 29) 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タ震度, 第 36 回地震工学研究発表会講演集, pp.2127-2128, 2001.6.
- 30) 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.