

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

INVESTIGATION ON INDICES OF REPRESENTING DESTRUCTIVE POWER OF STRONG GROUND MOTIONS TO ESTIMATE DAMAGE TO BUILDINGS BASED ON THE 1999 CHI-CHI EARTHQUAKE, TAIWAN

境有紀*, 吉岡伸悟**, 瀧藤一起***, 壁谷澤寿海****

Yuki SAKAI, Shingo YOSHIOKA, Kazuki KOKETSU and Toshimi KABEYASAWA

Indices of representing destructive power of strong ground motions to estimate damage to buildings were investigated using strong ground motions recorded in the 1999 Chi-Chi, Taiwan Earthquake and the results of damage investigation. Correlation between indices of representing destructive power of strong ground motions and three building damage ratio index were examined. Damage to buildings cannot be estimated sufficiently by indices of representing destructive power of strong ground motions such as peak ground acceleration, peak ground velocity, spectrum intensity and JMA seismic intensity. The elastic response around 0.8-1.2 sec which can estimate damage to buildings more adequately was proposed.

Keywords : the 1999 Chi-Chi earthquake, indices of representing destructive power of strong ground motions,

JMA Seismic Intensity, damage ratio of buildings, single-degree-of-freedom system

1999 年台湾集集地震、地震動の破壊力指標、気象庁計測震度、建物被害率、一自由度系

1. はじめに

1999 年 9 月 21 日に発生したローカルマグニチュード 7.3、表面波マグニチュード 7.7 の台湾集集地震は、甚大な人的被害、構造物被害をもたらした。2500 人以上の方々が亡くなり、5 万棟以上の建物が全壊した¹⁾。その一方で、広範囲に渡り強震記録が数多く観測され²⁾、その多くは鉄筋コンクリート（以下 RC）造学校建物から数 m あるいは数 10 m 離れた自由地表面で記録されており、被害の大きさ、記録された地震動の性質も様々で、建物被害と地震動の性質の関係を検討するための非常に有用かつ貴重な資料が提供された。

1995 年兵庫県南部地震の例を見れば明らかなように、地震災害を少しでも軽減するには、地震直後に被害状況を迅速かつ正確に予測し、すばやい対応をすることが重要で、そのためには建物被害率を迅速かつ正確に予測する地震動の破壊力指標が必要となる。

建物被害と地震動の性質の関係を検討し、建物被害率と地動最大加速度、地動最大速度、震度などの地震動の破壊力指標の関係を検討したものに限定しても、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、それ以降例えば宮野⁵⁾、岡田・錦末⁶⁾によるものなど、現在に至るまで様々な被害関数が提案されてきた⁷⁾。最近のものでは、林・宮腰ら⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾、長谷川・翠川ら¹¹⁾、村尾・山崎¹²⁾による 1995 年兵庫県南部地震を対象

とした検討が記憶に新しい。これらは実際の建物被害の調査結果を緻密に分析し、大きな成果をあげてきたが、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、震度、地動最大加速度、地動最大速度などの地震動の破壊力の指標に、解析による推定値あるいは、推定地震動によるものを用いるを得なかった。

実際の強震記録を用いた検討も様々なものがなされてきた。最大地震応答と地震動の破壊力指標の関係を検討したものには、長橋・小林¹³⁾、関・西川¹⁴⁾¹⁵⁾によるものなどがあり、加藤・秋山¹⁶⁾は、入力エネルギーに着目した検討を行い、桑村¹⁷⁾は地震動の継続時間を考慮に入れた指標、鈴木・浅野¹⁸⁾は累積塑性応答スペクトルの積分値を提案している。筆者の 1 人¹⁹⁾も瞬間入力エネルギーに着目した検討を行っている。しかし、これらは実際の地震による建物群の被害というよりは、弾塑性地震応答の推定を目的としている。

以上のようにこれまでは、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ており、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。

筆者の 1 人も大きな地動最大加速度を記録しながら建物被害が小さかった 1962 年広尾沖地震、1993 年釧路沖地震、1993 年 8 月 8 日の北海道南西沖地震の最大余震（乙部町において地動最大加速度 1.6g を記録²⁰⁾）あるいは 1994 年ノースリッジ地震、1995 年兵庫県南部地震を対象として、地震動の性質と

* 東京大学地震研究所 助手・工博

** 東京大学大学院工学系研究科 大学院生（現在、竹中工務局）

*** 東京大学地震研究所 助教授・理博

**** 東京大学地震研究所 教授・工博

Research Assoc., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Eng. Graduate Student, School of Engineering, The University of Tokyo Assoc. Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Sci. Prof., Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, Dr. Eng.

建物被害の関係について検討を行ってきたが^{21)~24)}、1つの地震で得られた強震記録の数には限りがあり、また異なる国で得られた強震記録は、建物の性質も異なるなど、建物被害を単純に比較することは難しく、定量的な結論を得るには至らなかった。

近年、その強震観測網の整備により、特に1994年ノースリッジ地震以降、国内外で数多くの強震記録が得られるようにはなってきたが、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率と地震動の破壊力指標の関係を定量的に検討するには、強震観測点の周辺に多くの建物が存在し、かつ、その被害の大きさが甚大なものから軽微なものまで多岐に渡り、得られた強震記録も様々な性質をもっていることも必要で、これらの条件を全て満たしたものはなかった。

1999年台湾集集地震は、被害を受けた地域で数多くの強震記録が得られ、観測点周辺には、RC建物为数多く存在し、建物被害と地震動の双方で、実際のデータが得られた。被害の大きさ、記録された地震動の性質も様々で、建物被害率と地震動の破壊力指標の関係を建物被害と地震動の双方で実際のデータを用いて定量的に検討することのできる初めてのケースと言える。

地震災害軽減の観点から、建物被害率を迅速かつ正確に予測する地震動の破壊力指標が重要で、多くの研究が精力的に行われたことは先に述べた通りで、地動最大加速度に代わって地動最大速度が地震動の破壊力指標として用いられることが多くなり、1996年には震度階級の改訂が行われて計測震度となった²⁵⁾。しかしながら、2000年の新島・神津島近海を震源とする地震と鳥取県西部地震において震度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、あるいは今回の1999年台湾集集地震で298cm/secもの地動最大速度を記録した地点で、甚大とは言えない被害程度であったなど、建物被害率を予測する地震動の破壊力指標の再検討が必要であると考えられる。

そこで本研究では、1999年台湾集集地震で得られた強震記録と調査した実際の建物被害を用いて、人命の損失に深く関わる、大きな被害を受けた建物の比率に対応するもの（以下建物被災度）を対象とし、これをより迅速かつ正確に予測できる地震動の破壊力指標について検討する。

2. 建物被害の概要および建物被災度

まず1999年台湾集集地震に対する、建物被害調査の概要および、地震動の破壊力指標との対応の検討を行う建物被災度について述べる。

被害調査は、強震観測点の敷地内にある建物（主として学校校舎、以下隣接建物）とその周辺部について行った。調査地域は被害の大きかった台中縣、

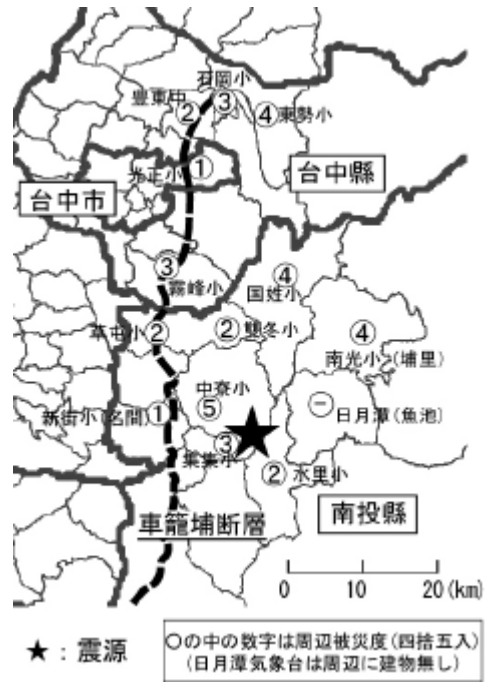


図1 調査地点の位置

表1 調査地点、強震計番号および調査結果

地域	場所	強震計番号	調査建物(隣接建物)名称	被害ランク	周辺被災度	市町村被災度
車籠埔断層の北端	台中縣石岡郷	068	石岡国民小学校	3 3 4 2	2.9	-
	台中縣東勢鎮	-	東勢国民小学校	0.X.X.X	(3.8)	-
	台中縣豐原市	102	豐原国民中学校	0.0.0.3	2.1	4.5
	台中縣台中市	052	光正国民小学校	2.0	1.4	-
震源の北西	台中縣霧峰郷	065	霧峰国民小学校	0.2.0.X	3.2	26.4
	南投縣草屯鎮	075	草屯国民小学校	1.1.0.0	1.8	8.3
	南投縣草屯鎮	071	雙冬国民小学校	0.3.0	1.7	8.3
	南投縣埔里鎮	074	南光国民小学校	0.X.X.X	3.9	19.6
震源の北東	南投縣國姓郷	072	國姓国民小学校	3.X.0	4.0	18.0
	南投縣魚池郷	084	日月潭气象台	4	-	-
	南投縣集集鎮	-	集集国民小学校	X.0.0	(2.8)	-
	南投縣竹山郷	-	中寮国民小学校	5.5.5.0	(5.0)	-
震源付近	南投縣水里郷	078	水里国民小学校	X.X.X.X	2.4	9.0
	南投縣名間郷	129	新莊国民小学校	1.0	1.0	3.2

被害ランク：0:無被害、1:軽微、2:小破、3:中破、4:大破、5:崩壊、X:取り壊し中あるいは済み。白抜き数字は、部材断面法等のデータ収集を行ったことを示す。周辺被災度で()のものは強震記録がないため解析段階から除いた。

表2 周辺被災度の定義

5	大破以上の被害建物が30%以上
4	大破以上の被害建物が10%以上30%未満
3	大破以上の被害建物が3%以上10%未満
2	大破以上の被害建物が3%未満、中破以上の被害建物が存在
1	大破以上の被害建物が見あたらないが、軽微でも被害建物が存在
0	被害建物が見あたらない



写真1 石岡国民小学校3階建校舎南からの全景



写真2 1階北側からの近景



写真3 せん断破壊した1階柱のクローズアップ

南投縣とし、隣接建物については、被害調査に加えて、部材断面寸法、スパン、階高、配筋等のデータを収集した。調査地点の位置を図1に、調査建物、強震計番号を表1に示す。調査地点は全部で14点で、調査した隣接建物の棟数は33であるが、強震記録が得られて、なおかつ、部材断面寸法等のデータを収集できた建物は13棟である。隣接建物の被害は被害ランク²⁶⁾(無被害、軽微、小破、中破、大破、崩壊)に従って判定を行った(表1)。

台湾の建物はその大半がRC造であり、アメリカのUBCを参考にした耐震規準により耐震設計されている²⁷⁾。部材断面はやや細い(日本で50cm角程度の柱が30~40cm角程度)こと、耐震壁の代わりに煉瓦壁が用いられることが多い以外は、日本のRC造建物に近いと言える。例として、石岡国民小学校3階建校舎の全景、近景、被害を受けた1階柱をそれぞれ写真1, 2, 3に示す。

建物の被害調査は隣接建物に加えてその周辺部も併せて行い、表2に従って周辺被災度の判定を行った。対象範囲は隣接建物とその敷地の周辺部としたが、「周辺」の定義は厳密なものではない。そこで、この周辺被災度をできるだけ客観的なものとするため、被害調査に行った研究者を対象にアンケート調査を行った。アンケートは表2にできるだけ対応するように表3のように定義して行った。被害は揺動によるものを対象とし、断層の直上の断層のずれや地盤の崩壊による被害は除外、判定は2と3の間なら2.5という回答も可、範囲の目安として500m四方とした。筆者らを含め延べ13人の判定結果が得られた。アンケートに回答いただいた方々の氏名等は末尾の謝辞に記してある。その結果(各調査地点、各周辺被災度(0.5~5.0)の回答数とその平均および筆者らの判定値)を表4に示す。調査地点によって回答数の合計が一致しないのは、一部の調査地点のみ回答が得られた場合があるためである。多少ばらつきはあるが、平均値は筆者らの表2の定義による判定結果とほぼ対応するものとなった。

ただしこの周辺被災度は、筆者らの判定は表2のような被害率に基づくものだが、アンケート調査は表3のように厳密な定義に基づくものではなく、上で述べたように「周辺」の定義も明確なものではない。また、対象範囲の設定に関しては、地震計位置の近くに狭めると地震動の同一性は増すが、対象となる建物の数が足りずに被害が少数の例外的なものに左右される可能性がある一方、広くすれば対象建物の数は増えるが地震動の同一性が下がってしまうなど、一意的に決めてしまうことは難しい。そこで建物被災度を、周辺被災度も含めてその範囲を変えて、次の3つのものを考えた。

- (1) 隣接被災度：地震計設置敷地内にある隣接建物(主として学校校舎)の被害ランク²⁶⁾に対応する変形角に個別の建物耐力を乗じたもの
- (2) 周辺被災度：表2あるいはそれを基に表3で定義され、地震計周辺部の建物群(隣接建物を含む)を対象としたアンケート調査による平均値
- (3) 市町村被災度：地震計設置してある市町村(台湾では市鎮郷)の被害統計¹⁾に基づく全壊建物の比率(%)

隣接被災度は、1つの調査地点あたりの棟数が少ないので、個別の建物耐力の違いによる被害の違いを無くすように建物耐力を考慮に入れた。隣接被災度の対象となる隣接建物は、その多くが学校校舎であり、桁行方向が純フレーム、梁間方向が2あるいは3スパンおきに煉瓦壁がはいった壁フレーム構造で、一教室を単位として桁行方向に均等フレームとなっている。そして被害は、耐力の低い桁行方向における腰壁垂壁がついて短柱化した柱のせん断破壊というケースが非常に多く、今回の調査でも被害を受けた全ての建物がそのような被害形態であった。よって隣接被災度の対象とした隣接建物は部材断面寸法等のデータが得られ、かつ強震記録が公開された13棟の桁行方向とした(表5)。

表3 アンケート調査に用いた周辺被災度

被災度	被災状況	目安となる倒壊率
5	壊滅的被害。多くの建物が大破、倒壊	30
4	至る所に大破、倒壊の被害度の大きい建物が存在。場所によっては、大半の建物が大破、倒壊	10
3	所々に大破、倒壊の被害度の大きい建物が存在。2と4の間	3
2	数多いが、大破、倒壊の被害度の大きい建物が存在。小破程度のひび割れのある建物に至る所が存在	1
1	大破、倒壊の被害度の大きい建物はないが、小破程度の、ひび割れのある建物が存在	0
0	被害は見あたらない	0

表4 周辺被災度のアンケート調査結果と筆者らによる判定

調査地点	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	平均	筆者ら
石岡国民小学校			1	1		8		1			29	3
東勢国民小学校				1			2	5		1	38	4
豊東国民中学校		1		6		2					21	2
光正国民小学校		4		3							14	2
霧峰国民小学校						9		2			32	3
草屯国民小学校		1	1	7							18	2
雙冬国民小学校		2		5							17	2
南光国民小学校							1	8			39	4
國姓国民小学校								7			40	4
集集国民小学校				4		2	1	2			28	2
中寮国民小学校										9	50	5
水里国民小学校				5	1	1	1				24	2
新街国民小学校	1	10									10	1

表5 隣接建物の諸元および応答解析結果

隣接建物名	階数	被害 ランク	R	ϕ_c	ϕ_y	隣接 被災度	周期 (秒)	強震 記録	μ
石岡国民小学校A棟	3	3	1.5	1.05	0.76	1.14	0.37	068EW	1.17
" B棟	2	3	1.5	0.70	0.69	1.04	0.30	068EW	1.49
" C棟	2	4	3.0	0.70	0.39	1.17	0.41	068NS	1.86
" D棟	1	2	0.8	0.70	0.65	0.52	0.24	068NS	0.62
光正国民小学校A棟	2	2	0.8	1.05	0.79	0.63	0.40	052NS	0.88
霧峰国民小学校B棟	2	2	0.8	1.05	0.76	0.61	0.16	065EW	1.23
草屯国民小学校A棟	2	1	0.4	1.05	0.37	0.15	0.35	075EW	0.78
雙冬国民小学校A棟	1	2	0.8	1.05	1.88	1.50	0.17	071EW	0.42
" B棟	2	0	0	1.35	1.40	(0)*	0.17	071NS	0.83
南光国民小学校D棟	2	0	0	1.35	1.19	(0)*	0.22	074EW	0.92
國姓国民小学校B棟	3	3	1.5	1.35	0.72	1.08	0.39	072EW	1.38
日月潭安泰台	2	4	3.0	1.05	0.98	2.94	0.44	084LG	1.90
新街国民小学校A棟	2	1	0.4	1.05	0.74	0.30	0.38	129EW	0.79

被害ランク: 0:無被害、1:軽微、2:小破、3:中破、4:大破、5:崩壊、R:被害ランクに対応する変形角(%), ϕ_c : 柱の終局せん断応力度(MPa), ϕ_y : 建物耐力(ベースシア係数)、隣接被災度 $R \cdot \phi_y$ 、 μ : 一自由度系の最大応答変位率、強震記録の084LGは、084NSと084EWから求めた桁行方向の地震動、*: 無被害で建物耐力の影響を考慮できないため、地震動の破壊力指標の検定対象から除いた。

建物耐力(ベースシア係数)は調査した部材断面寸法、スパン、階高を基に、柱率、壁率から簡便に算定する式(1)²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾から求めた。

$$C = \frac{t_c A_c + t_w A_w}{w \sum A_f} \quad (1)$$

ここで ϕ_c : 柱の終局せん断応力度(kgf/cm²)、 A_c : 1階柱の断面積の合計(cm²)、 w : 壁の終局せん断応力度(kgf/cm²)、 A_w : 1階壁の断面積の合計(cm²)、 w : 単位面積当たりの建物重量(kg/m², 1000kg/m²と仮定³¹⁾)、

A_f : 1階以上の延べ床面積(m²)である。

柱の終局せん断応力度 ϕ_c は、次のような方法により建物建設年によって変化させた。柱の終局せん断応力度 ϕ_c は、RC規準³²⁾で短期許容せん断応力度がコンクリート設計基準強度 $F_c < 21 \text{ MPa}$ では $F_c/20$ で与えられていることから、 F_c に比例するものとした。そして志賀による検討²⁸⁾で使われた $\phi_c = 1.2 \text{ MPa}$ が、検討が行われた1968年十勝沖地震以前の $F_c = 18 \text{ MPa}$ ³³⁾に対応しているものとし、 $\phi_c = F_c/15$ と仮定した。 F_c は、建物の建設年によって明らかに違いが見られたが、実測結果が得られなかったので次のような方法で求めた。まず、1982年から1996年の間に建てられた建物については、築後平均5年程度の建物に対して行われたシュミットハンマー試験結果³⁴⁾を基に15.8MPaとした。これに台湾の耐震設計基準の変遷²⁷⁾の影響を考慮し、建物建設年に応じて次のように変化させた。

表6 強震記録の諸元

ID	地点名 (強震番号)	方向	PGA	PGV	SI	JMASI	V(1.0)
068NS	石岡国民小学校 (068)	NS	361.6	297.5	161.0	6.04	71.6
068EW	"	EW	520.5	263.9	177.9		109.1
102NS	豊東国民中学校 (102)	NS	167.0	73.3	118.2	5.69	87.3
102EW	"	EW	298.0	89.5	143.8		85.6
052NS	光正国民小学校 (052)	NS	428.1	206.4	262.1	6.28	143.6
052EW	"	EW	350.2	179.1	206.3		117.3
065NS	霧峰国民小学校 (065)	NS	563.0	89.1	194.1	6.05	181.5
065EW	"	EW	774.5	132.5	186.7		167.3
075NS	早中国民小学校 (075)	NS	256.5	37.0	61.1	5.51	56.7
075EW	"	EW	325.6	116.0	104.6		50.7
071NS	雙冬国民小学校 (071)	NS	638.5	83.3	139.4	5.91	119.5
071EW	"	EW	520.6	110.4	136.6		125.6
074NS	南光国民小学校 (074)	NS	361.5	50.1	133.7	6.04	117.4
074EW	"	EW	585.9	68.9	204.7		219.3
072NS	國姓国民小学校 (072)	NS	367.3	68.1	135.3	5.85	140.8
072EW	"	EW	463.9	85.1	154.2		172.9
084NS	日月潭気象台 (084)	NS	423.9	47.3	134.3	6.47	137.6
084EW	"	EW	981.4	129.9	392.4		424.9
078NS	水里国民小学校 (078)	NS	298.4	35.1	81.9	5.63	46.8
078EW	"	EW	436.8	43.6	111.5		93.8
129NS	新街国民小学校 (129)	NS	605.3	53.5	111.4	5.98	86.0
129EW	"	EW	973.4	65.3	153.8		94.1

PGA: 地動最大加速度 (cm/sec²)、PGV: 地動最大速度 (cm/sec)、
SI: スペクトル強度 (cm)、JMASI: 気象庁計測震度、
V(1.0): 減衰定数 5% 1 秒速度応答 (cm/sec)

台湾では、1974年に設計用スペクトルでベースシア係数が与えられるようになってから1982年と1997年の2回、大きな耐震設計基準の変更が行われている。設計用スペクトルは、いずれも本解析の対象建物に所属する周期では一定値で与えられており、その値はRC造の場合、台中縣、南投縣の地域係数、学校建物の用途係数を採用すると、1982年以前は0.1、1982年から1996年は0.15、1997年以降は0.192となる。よって、1982年以前の建物の F_c を $15.8 \times 0.10 / 0.15 = 10.5 \text{ MPa}$ 、1997年以降の建物の F_c を $15.8 \times 0.192 / 0.15 = 20.2 \text{ MPa}$ とした。コンクリートの剛性は F_c を基にRC規準³²⁾の式から求めた。

壁がある場合は、その材料(煉瓦、モルタル)特性が不明なので、開口が全くない場合にのみ終局せん断応力度 σ_w をプリズム試験体の実験結果³⁵⁾からコンクリートと同様、圧縮強度の1/15 ($5.58 / 15 = 0.372 \text{ MPa}$)として算入した。このようにして設定した各建物の、式(1)から求めた建物耐力 C_y (ベースシア係数)を表5に示してある。

被害ランクに対応する変形角は、軽微、小破、中破、大破がそれぞれ部材損傷度、 \dots ³⁶⁾に対応するものとし³⁷⁾、部材実験³⁸⁾における部材角と損傷度の対応³⁹⁾から、軽微: 0.4%、小破: 0.8%、中破: 1.5%、大破: 3%とした。

なお、隣接被災度において雙冬国民小学校B棟、南光国民小学校D棟の2棟は無被害で、建物耐力の影響を考慮できないため、周辺被災度において、日月潭気象台は周辺に建物がないため、市町村被災度において、石岡国民小学校は、石岡郷の建物被害の多くに振動ではなく断層のずれによるものが含まれ、光正国民小学校は、台中市の中心からはずれていて、台中市全体の地震動を代表するとは考えにくく、日月潭気象台も、1000mを超える山の頂上にあって魚池郷全体を代表する地震動とは考えにくいので、これらの点を解析対象からはずした。

隣接被災度を表5に、周辺被災度を表1および図1に、市町村被災度を表1に示してある。3つの建物被災度のいずれも被害の大きさが甚大なものから無被害、軽微なものまで多岐に渡っていることがわかる。

3. 1999年台湾集集地震による強震記録の概要

1章でも述べたように、建物被災度と地震動の破壊力指標の関係を検討するには、対象とする地震動が多様なものを含む必要がある。なぜなら、極端

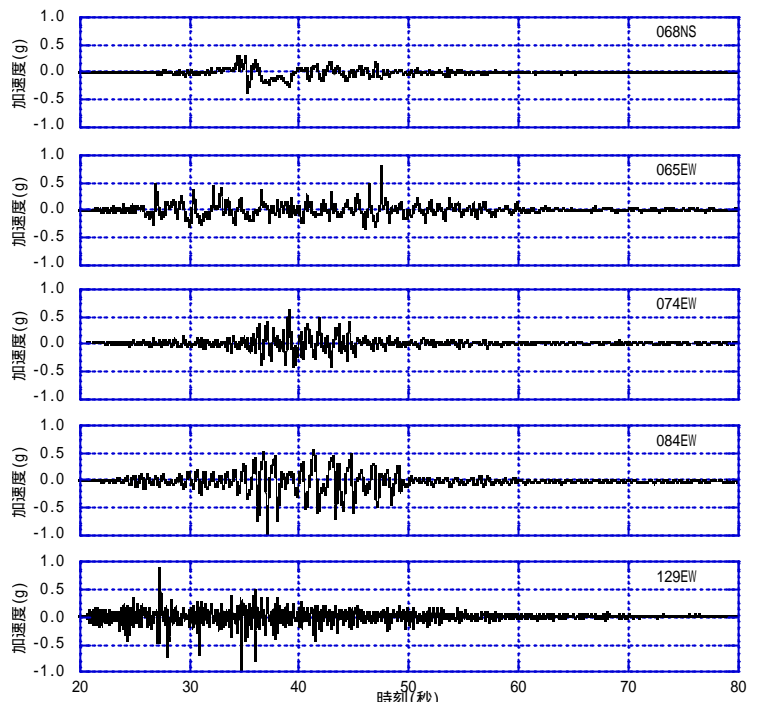


図2 加速度波形

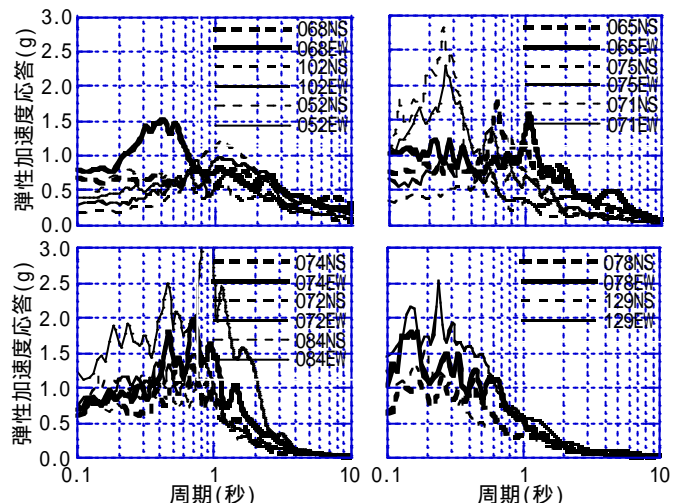


図3 弾性加速度スペクトル(減衰定数5%)

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もっていけば、地震応答は振幅のみに依存し、建物被害と地震動の破壊力指標の相関性に差異が生じないからである。よってここでは、1999年台湾集集地震で得られた強震記録を概観し、これらが多様な地震動を含むかどうかを確認する。

強震記録の諸元を表6に、加速度波形の例を図2に、弾性加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を図3に示す。なお、今回被害調査を行った地点で最も被害が大きかった中寮の中寮国民小学校、震源に最も近い集集国民小学校、中寮に次ぎ、埔里、國姓と並んで被害が大きかった東勢の東勢国民小学校の3点は、1999年12月に公開された強震記録²⁾には含まれていなかった。

提供された加速度記録には、微小ながらノイズが含まれていることが指摘されており⁴⁰⁾、建物の地震応答解析結果に影響を及ぼす程度ではないものの、地動最大速度を求める際に必要な加速度記録の積分においては大きな影響を及ぼす。そこで、速度波形の基線が0になるように記録の補正を行った⁴¹⁾。表6における地動最大速度(PGV)の値は、補正して求めたものである。

表6の地動最大加速度(PGA)を見ると、全11点のうち068, 065, 071, 074, 084, 129の6点で 500 cm/sec^2 を越え、中でも084(日月潭)、129(新街)の2点はとも

ペクトルでは、その部分が 0.2 秒より短周期に移動してしまい、0.2 ~ 0.5 秒での値はさほどでもない。そしてこれらのことは実際の被害ともほぼ対応している。従って、塑性化による伸びを考えた周期（以下等価周期）を用いれば、弾性応答スペクトルから建物被害を予想できると考えられ、そのためには等価周期、即ち弾性周期の何倍程度の周期を想定すればいいのかを検討することが必要となる。

5. 建物被災度と地震動の破壊力指標の対応

ここでは、被害調査および被害統計から求めた隣接被災度、周辺被災度、市町村被災度の3つの建物被災度と実際に観測された強震記録を用いて、建物被災度を予測する地震動の破壊力指標について検討する。

まず、地動最大加速度(PGA)等の既往の地震動の破壊力指標と建物被災度との対応について見てみる。地動最大加速度(PGA)、地動最大速度(PGV)、スペクトル強度(SI)、気象庁計測震度(JMASI)と3つの建物被災度の関係について図8に示す(3つ建物被災度によって検討対象が異なることに注意。例えば084は隣接被災度でのみ検討対象となっており、市町村被災度で068, 052は検討対象から削除されているなど)。各観測点における各指標の値は表6に、建物被災度の値は表1, 5に示してある。なおSIは、水平2成分の大きい方とし、JMASIは、PGAに対して対数の関係があるので、縦軸にその指数を取り、対応するJMASIの値は図の右縦軸内側に示してある。

地動最大加速度と地動最大速度は、いずれの建物被災度についてもあまり相関がよくない。スペクトル強度と気象庁計測震度は、隣接被災度と市町村被災度の場合はやや相関があるように見えるが、隣接被災度との相関は084(日月潭を除く)とあまりなく、気象庁計測震度では、周辺被災度で6.0程度でも被害が小さい所(052(光正)、129(新街))がある一方、大きな被害が出た065(霧峰)、074(埔里)、072(國姓)も6.0前後となっているなど、既往の地震動の破壊力指標は、建物被災度とあまり相関がよくない。

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。PGAは短周期、PGVは長周期に比重があり、SIは、0.1~2.5秒という広範囲、気象庁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ものではなく、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にスペクトルを重みづけすることである。

そこで弾性応答スペクトルから地震動の破壊力指標を導くことを考える。台湾のRC建物の頻度分布(図7)を見ると、弾性周期0.2~0.5秒に集中しているが、4章で述べたように、塑性化による周期の伸びを考慮した等価周期を求める必要がある。

そこで、建物被災度と弾性応答スペクトルの相関関係から等価周期を求めるを試みる。減衰定数5%の弾性速度応答(水平2成分の大きい方の値、以下同じ)と建物被災度の間の相関係数を、横軸に弾性速度スペクトルの周期をとって図9に示す(弾性加速度、変位スペクトルについても同様の検討をしたが大きな差は見られなかった)。3つの建物被災度によってやや違いはあるが、全体的な傾向は似ており、弾性周期の3倍程度の0.8~1.2秒程度で高い相関係数となる一方、弾性周期0.2~0.5秒における相関係数は低く、建物被害はその弾性周期ではなく、等価周期における弾性応答によって決まることがわかる。よって、弾性周期の3倍程度を等価周期とすれば、弾性ス

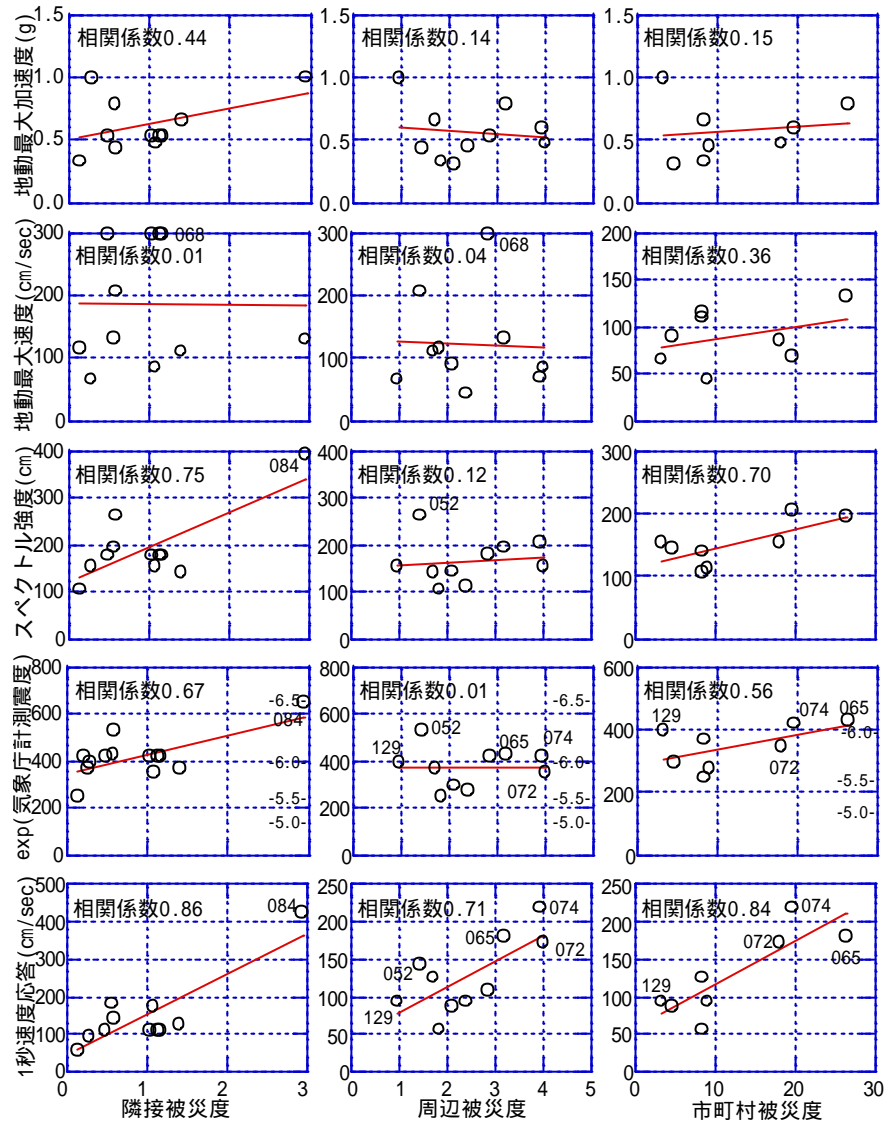


図8 地震動の破壊力指標と建物被災度の関係(図中の3桁の数字は強震計番号(表6))

クトルから建物被災度を的確に予測できると考えられる。この3倍程度という値は4章の一自由度系で大破(応答塑性率2、図5(2)参照)における周期の伸び($1/\sqrt{0.2/2}$ 3.16倍)にほぼ対応している。

スペクトル強度のように弾性スペクトルを基に式(3)で与えられる量 I を考え、式(3)における積分範囲を変えたときの建物被災度との相関についても調べた。減衰定数は5%とした(スペクトル強度と同じ20%とした場合も検討したが、結果に大きな差は見られなかった)。

$$I = \int_{T_S}^T S(T) dT \quad (3)$$

ここで、 $S(T)$: 弾性加速度、速度、変位スペクトル、 T : 周期(秒)である。

T_S によって線を変え、 T_E を横軸にとり、 I と建物被災度の相関係数を周辺被災度と弾性速度スペクトルの場合について図10に示す。弾性周期(0.2~0.5秒)付近あるいは、弾性周期から等価周期まで積分したものより、 T_S, T_E とも等価周期付近の場合の相関係数が大きくなっており、建物被害が等価周期付近の弾性応答で決まることが確認される。

以上のことから、建物被害は建物の弾性周期における地震動の成分によってまず周期が伸び、それから伸びた等価周期における成分によって生じるのではなく、直接、建物の等価周期の地震動の成分によって生じることがわかる。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

て、弾性周期 0.5 秒以下の木造建物が大きな被害を受けたこと（このことは解析的にも再現されている²³⁾²⁴⁾⁴⁴⁾）や、サイン波 1 波のように周波数特性が極端な場合でも建物の弾性周期のサイン波より、建物の等価周期のサイン波が大きな地震応答をもたらすという結果⁴⁵⁾⁴⁶⁾と対応している。

例として 1 秒速度応答（水平 2 成分の大きい方とした）と建物被災度の関係を図 8 に示してある。両者は既往の地震動の破壊力より、よい対応を示している。よって、0.8～1.2 秒程度の弾性応答を地震動の破壊力指標として用いられ、建物被災度をよりの確に予測できる。この指標は弾性応答スペクトルから簡単に読みとることができ、震災後の迅速な対応に有効と考えられる。

等価周期を具体的に何秒程度の値を採用するかは、厳密にはその国の建物事情、即ち、建物の周期に対する頻度分布、等価周期の弾性周期からの伸び率に依存する。即ち、ここで提案した地震動の破壊力指標は、台湾の建物被害を基にしており、台湾の RC 造建物は日本のそれに近いが、断面がやや細いなど全く同じではない。

1995 年兵庫県南部地震の際の日本建築学会近畿支部による震度 7 における初動調査⁴⁷⁾に基づく神戸の RC 建物の弾性周期に対する頻度分布を図 7 に示してある。階数と周期の関係は、よく使われる式

$$T = 0.02H \quad (H: \text{建物の軒高(m)}) \quad (4)$$

は、低層建物の周期を実際より短く評価するので、実在 RC 造建物のデータ⁴⁸⁾を基に求めた式⁴⁹⁾

$$T = 0.055H^{0.65} \quad (H: \text{建物の軒高(m)}) \quad (5)$$

を用い、階高は 3m と仮定した。

日本の建物が断面が太く剛性が高い反面、高層の建物の頻度が高いため（例えば 0.5 秒に対応する階数は台湾が 5～6 階、日本が 10 階程度となる）周期に対する頻度分布は日本の場合の方が裾野が広がっているものの、頻度の高い周期帯は、結果的に台湾の RC 建物とほぼ同じになっている。図 7 を基に、台湾と神戸の RC 造建物の周期の平均を求めると、それぞれ 0.33 秒、0.32 秒とほぼ等しくなった。

次に、日本での RC 造建物の建物全体に占める割合は、台湾よりは少なく、例えば、ほぼ悉皆調査に近い形で実施された日本建築学会兵庫県南部地震被害調査 WG による調査⁵⁰⁾によれば、木造 RC 造、鉄骨造がそれぞれ約 52%、30%、17%となっている。しかし、木造建物の多くが一戸建てであるのに対して、RC 造は集合住宅、オフィスビルなどが多く、棟数から判断されるより人的被害の大きさに結びつくことを勘案すると、RC 造の占める割合は大きくなる。

また、全体の約半数を占める木造建物については、木造建物に大きな被害をもたらした 1995 年兵庫県南部地震以降、精力的に振動実験等がなされており、それらをまとめたものもあるが⁵¹⁾、既存建物のデータは少ない。数は少ないが、中治、鈴木らによる 2 階建在来構法木造建物の常時微動測定結果⁵²⁾によれば、弾性周期の平均は 0.31 秒と日本および台湾の RC 造建物の平均とほぼ同じであり、また、昭和 59 年の国土庁の地震被害想定調査⁵³⁾によれば、弾性周期の平均値は 0.3～0.4 秒程度とこれもほぼ同じである。

等価周期の弾性周期からの伸び率については、靱性能は日本の建物は台湾のそれより大きいと考えられるが、台湾の RC 建物の降伏点における周期の伸びは日本の RC 建物より大きく（4 章で自由度系の降伏点剛性の弾性剛性に対する比は静的フレーム解析から 0.2 とかなり小さくなった⁴¹⁾）、両者は相殺する関係にあるが、更なる検討が必要である。

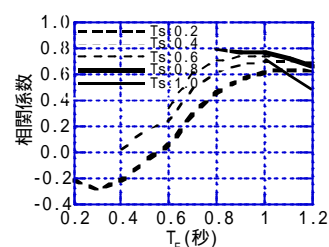
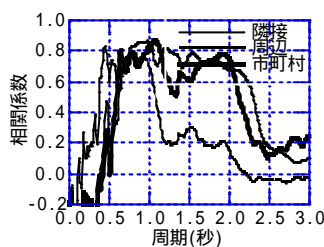


図 9 弾性速度応答の周期と建物被災度の相関係数の関係
図 10 弾性速度スペクトルの積分範囲 (T_s～T_E) と周辺被災度の相関係数

表 7 過去の強震記録における既往の地震動の破壊力指標と 0.8～1.2 秒の減衰定数 5% 弾性速度応答

地震	地点	成分	PGA	PGV	SI	JMA SI	V(0.8)	V(1.0)	V(1.2)
1995 年兵庫県南部	豊台	NS	0.82	130.4	359.0	6.49*	208.3	289.7	319.5
1999 年台湾集集	埔里	EW	0.58	68.9	204.7	6.04	158.9	219.3	144.5
1994 年 Northridge	Sylmar	NS	0.84	125.7	277.5	6.20	156.0	158.9	164.3
1993 年 釧路中	釧路 JMA	EW	0.73	33.1	115.4	5.95*	81.7	60.6	63.7
2000 年新島・神津島近海	神津島金長	EW	0.47	38.9	100.4	5.78	99.6	74.2	59.5
2000 年鳥取県西部	境港	EW	0.76	84.7	198.0	6.01	98.6	86.7	87.9
1940 年 Imperial Valley	El-Centro	NS	0.35	34.8	93.1	5.43	65.9	90.0	64.4
1968 年 十勝中	八戸港湾	EW	0.19	33.9	88.9	5.28	72.4	85.0	89.5
1978 年宮城県中	東北大学	NS	0.26	41.0	117.1	5.55	71.0	149.3	131.8

PGA: 地震動最大加速度 (g), PGV: 地震動最大速度 (cm/sec), SI: スペクトル強度 (cm), JMA SI: 気象庁計測震度 (*: 水平 2 成分による値), V(?): ? 秒における減衰定数 5% 弾性速度応答 (cm/sec), 2000 年新島・神津島近海地震の神津島金長の記録は 7 月 1 日のもの。

このように、ここで提案した指標は対象とする建物の弾性周期に対する頻度分布と等価周期の弾性周期からの伸び率の 2 つの要因によって変化するが、言い換えれば、この 2 つの要因さえわかれば、台湾の場合に限らず、等価周期における弾性速度スペクトルの値から建物被害を的確に予想できる可能性を示唆している。

ただしこの地震動の破壊力指標は、あくまである一定の広さの地域における建物群の被害率を対象としており、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。鉄骨造のように最大応答ではなく、累積応答で損傷が決まる構造に対しても同様である。

参考までにいくつかの過去の強震記録について、既往の地震動の破壊力指標と比較して 0.8, 1.0, 1.2 秒の減衰定数 5% 弾性速度応答を表 7 に示す。この指標は、豊台（1995 年兵庫県南部地震）は非常に大きな値になっているのに対し、震度 6 を記録しながら被害がさほどでもなかった 1993 年 釧路中地震、2000 年新島・神津島近海を震源とする地震あるいは鳥取県西部地震の記録はいずれも小さな値になっており、Sylmar（1994 年 Northridge 地震）と埔里（1999 年台湾集集地震）は、その中間的な値になるなど、既往の地震動の破壊力指標より実際の被害と対応している。

ここで提案した指標は、建物の弾性周期に対する頻度分布と等価周期の概念から予想するに難しくなく、また用いた建物被災度もやや緻密さに欠けることは否めないが、地震動の破壊力指標と建物被害の相関性を、共に推定値ではなく、実際のものを用いて検討したことに意義があると考えている。

6. まとめ

1999 年台湾集集地震で観測された強震記録と被害調査に基づく建物被害データを用いて、建物被害を予測する地震動の破壊力指標について検討した。

建物被害として、人命の損失に深く関わる、大きな被害を受けた建物の比率に対応するものを対象とし、その対象範囲の広さを変えて 3 つの建物被災度、即ち、強震観測点の敷地内建物の被害ランク²⁶⁾に基づくもの（隣接被災度）、周辺建物群の大破率に基づく被災度（周辺被災度）、地震計が設置してある市町村の被害統計¹⁾に基づく全製建物の比率（市町村被災度）を用いた。

隣接被災度は対象建物数が少ないので、個別の建物耐力を考慮に入れた。

建物耐力は式(1)による簡便な方法を用いたが、この方法で求めた耐力を基に一自由度系地震応答解析を行って、式(1)による耐力算定の有効性を示した。

まず、3つの建物被災度と地動最大加速度、地動最大速度、スペクトル強度、気象庁計測震度の既注の地震動の破壊力指標の相関を調べた結果、これらの指標では建物被災度を十分に予測することができなかった。

そこで、RC建物の弾性周期に対する頻度分布が0.2~0.5秒に集中していること、建物が被害を受けるときに周期が伸びる(等価周期)ことから、建物被災度と建物の弾性周期を変えた時の弾性地震応答の相関について調べた。

その結果、弾性周期(0.2~0.5秒程度)あるいは、弾性周期から等価周期(弾性周期の3倍程度)まで積分したものより、等価周期における弾性応答が建物被災度と相関が高く、0.8秒~1.2秒程度の弾性応答を用いれば、既注のものよりの確に建物被害を予測できることがわかった。

この指標は、対象とする建物の弾性周期に対する頻度分布と等価周期の弾性周期からの伸び率の2つの要因によって変化するが、言い換えれば、この2つの要因さえわかれば、台湾の場合に限らず、等価周期における弾性応答スペクトルの値から建物被害を的確に予想できる可能性を示唆している。日本の建物についてこの2つの要因を調べると、頻度分布はほぼ同じであったが、周期の伸び率は更なる検討が必要である。

謝辞

被害調査は、筆頭および第3著者が集集大地震東京都調査団の一員として行ったものです。調査団長の東京都宮崎務氏をはじめとする調査団の方々には大変お世話になりました。被害調査の際、現地の方々は、被災されていたにもかかわらず、快く対応していただき、様々な資料も提供していただきました。工学院大学久田嘉章氏、日本設計周東修平氏には、調査地点の選定に有用な情報となる日本建築学会災害委員会被害調査団による調査結果を提供していただきました。周辺被災度のアンケート調査は、京都大学田中仁史、河野進(霧峰における全数調査結果⁴⁾の提供)、工学院大学久田嘉章、東京工業大学山田哲、佐藤工業末富岩雄、電力中央研究所芝良昭、運輸省港湾技術研究所野津厚、筑波大学庄司学、日本設計周東修平、清水建設宮腰亨一、九州大学矢重亘の各氏に回答していただきました。強震記録は、1999年台湾集集地震を台湾交通部中央気象局²⁾、1995年兵庫県南部地震を大阪ガス、1993年釧路沖地震を建築研究所、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より提供を受けました。南投縣南投市および台中縣霧峰郷におけるRC造建物の頻度分布は、前者を東京工業大学山田哲氏に、後者を京都大学田中仁史、河野進の各氏に提供していただきました。東京大学野口貴文氏にはシュミットハンマー測定値、東京大学生産技術研究所中埜良昭氏には、台湾の建物重量に関する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²⁵⁾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。一自由度系応答解析プログラムはSDF⁵⁴⁾を部分的に使用しました。関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 東京都：1999年台湾大地震東京都調査団報告書、p.4, pp.40-42, 2000年3月。
- 2) 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.
- 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年。
- 4) 物部長徳：土木工事震害調査報告、震災予防調査会報告、第100号, pp.7-17, 1926年。
- 5) 宮野道雄：墓石・木造建物被害等による震度に関する若干の検討、土木学会論文報告集、第319号, pp.33-42, 1982年3月。
- 6) 岡田成幸、御米洋史：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、第2輯、第44巻, pp.93-108, 1991年。
- 7) 御米洋史：地震動特性と建物被害の関係、地震動の特性と建築物の被害 - 経験と予測 -, 日本建築学会災害委員会, pp.3-8, 1989年9月。
- 8) 林康裕、宮腰亨一、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年4月。
- 9) 林康裕、宮腰亨一、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年12月。
 - 10) 林康裕、宮腰亨一、田村和夫、大野義照：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第528号, pp.135-142, 2000年2月。
 - 11) 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震害予測 - 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年3月。
 - 12) 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年1月。
 - 13) 長橋純男、小林啓美：地震動の強さを評価する簡便な尺度としての地震動最大振幅、日本建築学会論文報告集、第181号, pp.15-22, 昭和46年3月。
 - 14) 関宗夫、西川孝夫：弾塑性応答計算に用いる地震動の強さの評価に関する検討(その6)、日本建築学会学術講演梗概集、B構造1, pp.663-664, 1986年。
 - 15) 西川孝夫：建築構造物に対する入力地震動の破壊力に関する研究、平成2年度科学研究費補助金一般研究(B)・研究成果報告書, pp.3-7, 平成3年3月。
 - 16) 加藤勉、秋山宏：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷、日本建築学会論文報告集、第235号, pp.9-18, 昭和50年9月。
 - 17) 桑村仁：構造物に対する地震動強さの尺度、構造工学論文集、日本建築学会、Vol.33B, pp.49-56, 1987年3月。
 - 18) 鈴木三四郎、浅野幸一郎：1質点履歴系に関する強震地動の破壊力尺度の検討、日本建築学会構造系論文報告集、第403号, pp.87-95, 1989年9月。
 - 19) 中村友紀子、壁谷澤寿海：瞬間エネルギーを用いた等価線形化法による弾塑性応答変形の推定、第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.2573-2578, 1998年11月。
 - 20) 工藤一嘉、坂上実、高橋正義、笹谷秀、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 -, 日本地震学会講演予稿集 No.2, p.26, 1993年。
 - 21) 境有紀、田村和夫、南忠夫、1993年釧路沖地震の地震動の性質と鉄筋コンクリート造建物の被害の関係、コンクリート工学年次論文報告集、第16巻第2号, pp.1307-1312, 1994年。
 - 22) 境有紀、田村和夫、南忠夫、大加速度地震動の破壊力、第9回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1603-1608, 1994年。
 - 23) 境有紀、南忠夫、1995年兵庫県南部地震による地震動の破壊力、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2構造, pp.199-200, 1996年。
 - 24) Minami, T. and Sakai, Y., Extremely Large Potential Destructiveness of the Ground Motions Measured in the 1995 Kobe Earthquake in Japan, Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM, 1996.
 - 25) 気象庁：震度を知る 基礎知識とその活用、ぎょうせい, p.10, p.26, 1996年。
 - 26) 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告, pp.142, 1980年。
 - 27) 周東修平、舩使川原正臣、広沢雅也：日台比較 構造、日経アーキテクチュア No.651, 緊急特派報告台湾集集大地震, pp.142-145, 1999年。
 - 28) 志賀敏男：構造物の振動、大学講座建築学構造編2、共立出版, pp.257-264, 1976年。
 - 29) 日本建築センター：建築物の構造規定 - 建築基準法施行令第3章の解説と運用 - 1997版, p.8, 1997年。
 - 30) 小野瀬順一：鉄筋コンクリート造建物の耐力分布と被害分布、第6回日本地震工学シンポジウム講演集, pp.2081-2088, 1982年。
 - 31) 日本建築学会：1999年台湾・集集地震災害調査報告および応急復旧技術資料、第1編 鉄筋コンクリート造学校舎の応急復旧技術資料, p.95, 2000年11月。
 - 32) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説 - 許容応力度設計法 -, p.6, 1999年。
 - 33) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準付解説, p.61, 1977年。
 - 34) 日本建築学会災害委員会被害調査団：1999年9月21日台湾大地震被害調査速報会資料, p.28, pp.72-73, p.77, 1999年。
 - 35) 隈澤文俊：柱組組構造壁の弾塑性挙動(その1：静的繰り返し加力実験、日本建築学会学術講演梗概集 C-2 構造, pp.1111-1112, 1998年。
 - 36) 日本建築防災協会：震災建築物等の被災度判定基準および復旧技術指針(鉄筋コンクリート造編), 1991年。
 - 37) 日本建築学会：1995年兵庫県南部地震鉄筋コンクリート造建築物の被害調査報告書、第1編 学校建築, p.8, 1997年。
 - 38) 文野正裕、幸村信行、前田匡樹、壁谷澤寿海：軸方向変形拘束を受けるRC梁部材の挙動に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.21, No.3, pp.517-522, 1999年。
 - 39) 文野正裕、前田匡樹、長田正至：部材の残余耐震性能に基づいた震災RC造建物の被災度評価法に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No.3, pp.1447-1452, 2000年。
 - 40) Boore D.M.: Effect of baseline corrections on response spectra for two recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake, Open-file report 99-545, Version 1.0, 1999.
 - 41) 境有紀、過大な地震力を受ける建物の応答と破壊力の指標、第28回地盤振動シンポジウム「震源近傍の地震動と設計用入力地震動」- トルコ・コジャエリ地震、台湾・集集地震の経験と踏まえて, pp.97-108, 2000年。
 - 42) Takeda, T., Sozen, M.A. and Nielsen, N.N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal, Structural Division, ASCE, Vol.96, No.5, pp.2557-2573, 1970.
 - 43) 田中仁史、樋口真由子、河野進他：鉄筋コンクリート造建築物の修復費用に基づく地震被災度判定基準の提案と費用の算定、日本建築学会学術講演梗概集 C-2 構造, pp.891-894, 2000年。
 - 44) 林康裕、川瀬博：1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価、日本建築学会構造系論文集、第481号, pp.37-46, 1996年3月。
 - 45) 境有紀：地震動の破壊力 - どういう性質の地震動が大きな被害をもたらすか -, 大加速度(速度)強震動の成因解明と強震動 - 地震被害との相互連関性に関する研究、平成8-10年度東京大学地震研究所特定共同研究(B)報告書, 1999年。
 - 46) Sakai, Y., Minami, T. and Kabeyasawa, T., Simplification of strong ground motion considering inelastic responses of structures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29, No.6, pp.823-846, 2000.
 - 47) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告 建築編-I 鉄筋コンクリート造建築物, pp.76-86, 1997年7月。
 - 48) 日本建築学会：建築物の耐震設計資料, pp.276-278, 1981年。
 - 49) 梅村恒、境有紀、南忠夫：地盤と建物の相互作用の効果と地震応答スペクトルの関係、第2回都市直下型地震災害総合シンポジウム論文集, pp.249-252, 1997年。
 - 50) 建設省建築研究所：平成7年兵庫県南部地震被害調査中間報告書, p.71, 1995年8月。
 - 51) 岩井哲：木造在来構法軸組建物の動的特性の定量化、第4回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.235-236, 1999年。
 - 52) 中治弘行、鈴木祥之、岩井哲、北原昭男：在来構法木造建物の振動計測と水平力載荷実験 - その2 振動計測の結果及び荷重 - 変位関係に関する考察、日本建築学会学術講演梗概集 C-1 構造, pp.117-118, 1996年。
 - 53) 三菱総合研究所：東京における地震被害の想定に関する調査研究 建築物分科会報告書, p.14, 1989年。
 - 54) Otani S., Hysteresis Models of reinforced concrete for earthquake response analysis, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol. XXXVI, No.2, pp.407-441, 1981.