

論文 1995年兵庫県南部地震により被災した RC 造学校建築の被害と耐震性能の分析

迫田 文志*1・庄司 志乃*2・前田 匡樹*3・壁谷澤 寿海*4

要旨：1995年兵庫県南部地震により被害を受けた神戸市灘区および東灘区の鉄筋コンクリート造学校建築物の被害概要を把握した上で、この地区における統計を考察した。また、構造図のあるものに対して耐震診断や建物の最大応答層間変位から各建物の耐震性を評価し、被害との関係を検討した。その結果、被害概要では、NS方向地震動の方が大きく、ややNWに傾きがあったことが推測でき、1971年建築基準法施行令改正前の竣工建物被害も目立つ。各建物の耐震性の評価では、被害との関連性を追求し、被害との関係から最大応答層間変位および吸収エネルギーを求め、速度に換算した結果、地域によって地震時等価応答速度がほぼ等しく、被害状況との一致を明確にした。

キーワード：兵庫県南部地震、被害統計、耐震診断、エネルギー吸収、地震時等価応答速度

1. はじめに

1995年1月17日の兵庫県南部地震では、阪神淡路地区を中心に多くの建物が被災した。筆者等は、日本建築学会学校建築委員会耐震性能小委員会の被災度判定WG(RC造)の調査活動の一環として、神戸市東灘区・灘区を中心に被害調査を行った。本研究では、RC造学校建築物の被害調査結果を、建設年代・建物の立地方位・平面タイプごとに分類し、検討した。また、各建物の耐震性を、耐震診断やエネルギー吸収能力の点から詳細に分析し、被害状況との対応を明確にすることを試みた。

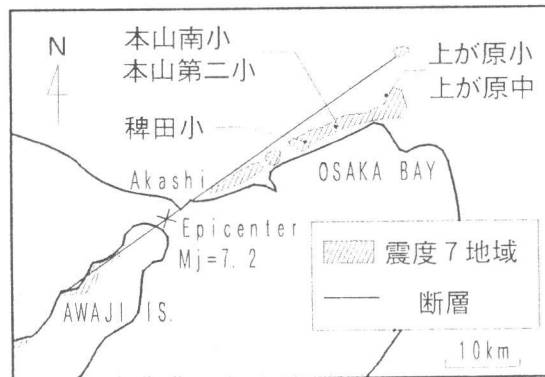


図-1 震度7地域と対象建物

2. 被害概要

2.1 調査対象および方法

調査対象は、神戸市東灘区および灘区における全公立小・中・高等学校および西宮市立上ヶ原小学校と上ヶ原中学校とした(図-1)。調査対象建物のうち、1次・2次耐震診断を行った各建物について概要・D値等を表-1に示す。被害調査は、建築防災協会の被災度区分判定基準[1]によった。損傷度判定の一例として本山第二小学校東館1階平面図を図-2に示す。図-2では、廊下側外構面の柱が教室側に比べて短柱($h_w/D=2.2$)となっているため、そこに被害が集中したと考えられる。損傷割合(D)は28.4、中破の判定である。

2.2 被害統計[2]

①東灘区、灘区における各建物の竣工年代を、1971年の建築基準法施行令改正以前・以降および1981

*1 不動建設(株)、工修(正会員)

*2 大和ハウス工業(株)

*3 横浜国立大学助手 工学部建設学科、工博(正会員)

*4 東京大学教授 地震研究所、工博(正会員)

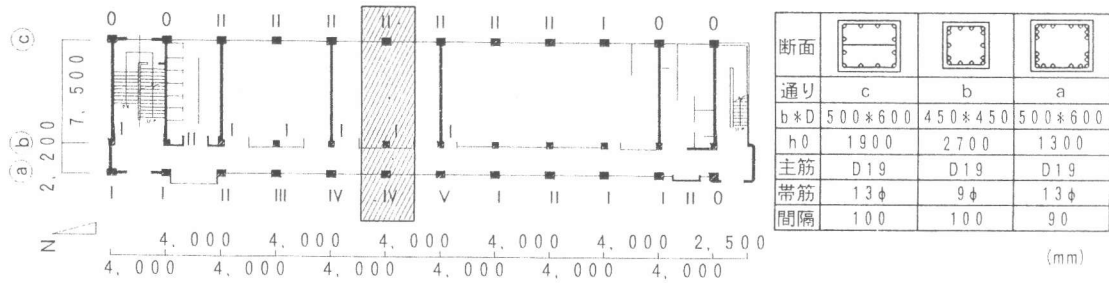


図-2 本山第二小学校1階平面図および柱断面リスト

年の新耐震設計法以前・以降に分類し、各被災度区分ごとの棟数を図-3に示す。ただし、建物が増築されている場合は、初期工事部分の竣工年とした。調査数は、公立小・中・高等学校全26校の全校舎157棟である。被害合計は、上部構造で倒壊5棟および大破4棟、中破25棟、小破23棟、軽微26棟、基礎部分で6棟に被害があり、無被害は68棟である。

倒壊・大破の被害を受けた建物の約9割は、1971年の基準法施行令改正以前に竣工した建物であり、中破以上の判定に関しても、1971年以前竣工建物が約8割を占めた。1975年頃を境に、被災した建物の数が激減し、1981年以後の竣工建物では、せん断破壊したものはなく、14棟が軽微・小破、曲げ破壊による中破が2棟であった。

表-1 建物概要と調査結果

学校名称	棟名称	竣工	スパン	方位	被災度	D	I s1	I s2	V(m/s)
稗田小	北棟	1991	2×15	E25N	中破	10.8	0.58	1.57	0.22
	管理棟	1992	3×10	N25W	中破	19.8	0.25	1.12	0.30
福住小	南校舎	1994	17×10	E25N	無被害	0.0	0.57	0.93	---
	東校舎	1994	2×8	N25W	無被害	0.0	0.83	1.49	---
本山南小	東校舎北	1977	3×10	N20W	小破	7.5	0.38	0.70	0.31
	東校舎南	1977	3×7	N20W	小破	7.5	0.41	0.75	0.31
	北校舎	1977	2×8	E20N	軽微	2.5	0.41	0.97	0.27
福池小	西校舎	1977	3×18	N20W	軽微	2.5	0.24	0.63	0.23
御影小	北棟	1980	2×11	E20N	小破	6.4	0.32	0.89	0.26
	東棟	1980	2×10	N20W	小破	5.3	0.39	0.90	---
魚崎小	北校舎東	1980	2×10	E10N	小破	6.7	0.42	1.15	0.25
本山第一小	西館	1970	1×5	N18W	小破	7.5	0.41	0.57	0.27
	南館	1971	3×8	E18N	軽微	2.5	0.95	1.24	0.34
本山第二小	東館	1975	2×11	N16W	中破	28.4	0.31	0.61	0.31
	灘小	1970	3×8	N20W	大破	56.8	0.36	0.36	0.39
上が原中	北校舎	1972	1×12	N96E	大破	58.9	0.17	0.30	0.29
	西校舎	1972	1×7	N6E	大破	80.1	0.18	0.20	0.32
	中校舎東	1974	1×9	N96E	中破	45.6	0.46	0.89	0.36
	中校舎西	1972	1×9	N96E	倒壊	85.3	0.26	0.48	0.48
	南校舎	1976	1×7	N96E	中破	22.3	0.29	0.64	0.38
上が原小	北館	1958	1×14	N58W	大破	52.9	0.26	0.39	0.32
	南館	1959	1×18	N58W	倒壊	78.9	0.24	0.41	0.40
	東館	1970	2×8	N58W	中破	23.0	0.38	0.52	0.34

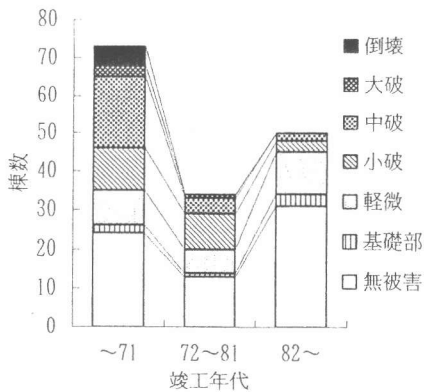


図-3 竣工年代別被害

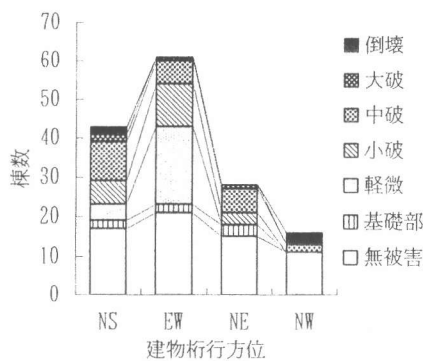


図-4 建物方位別被害

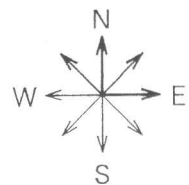


図-5 分類方位

②東灘区および灘区の全公立小・中・高等学校の桁行方向を図-5の4方位に分類し、それぞれの方位に対する被災度ごとの棟数を図-4に示した。倒壊・大破のうち7割以上がNSおよびNW方向を桁行とする建物であり、EW・NE方向では倒壊した建物は0棟、大破が各1棟であり、NS方向の地震動がEW

方向に比べて大きかったものと推定される。また、地震動はNE方向に対してNW方向に傾いていたと考えられ、強震記録の報告[3]と一致する。

③各建物の平面タイプを、一教室に柱4本のAタイプ、6本のBタイプ、8本のCタイプに分類し、被災度ごとの割合を図-6に示す。被害は、延床面積柱率が最も小さいと考えられるAタイプに多く、逆にCタイプでは被害は小さかった。この他にも、学校建築には階段室が耐震壁として作用したこと等から被害が軽微であった建物も多く見られる。

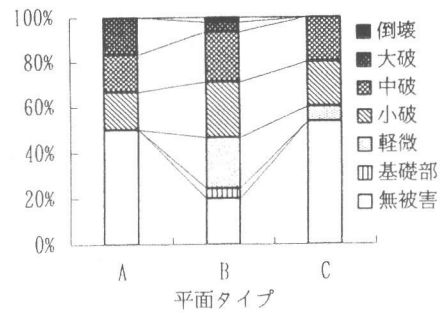


図-6 平面タイプ別被害

3. 耐震性能の評価と検討

3. 1 耐震診断

調査した建物のうち構造図面を入手できた建物について耐震診断を行った[4]。診断は1次診断40棟(灘区・東灘区26棟、西宮市14棟)および2次診断26棟(灘区・東灘区18棟、西宮市8棟)行った。耐震診断ではプログラムSCREEN1.2.3を使用した。

3. 1. 1 構造耐震指標と被害

①耐震診断において、コンクリート強度は設計基準強度、経年指標Tは1次診断では建物年数のみを考慮、2次診断では1.0、また建物の単位重量は $1.2t/m^2$ と仮定した。構造耐震指標値 I_s 等の計算値は表1に示した。1次診断による構造耐震指標(I_s 値)と損傷割合(D値)の関係を図-7に示す。 I_s 値が0.7以上の建物にはほとんど被害がないが、0.3付近では倒壊・大破から軽微まで、かなりのばらつきが見られる。1次診断では、延床面積壁率および柱率から鉛直部材の強度を算出するため、配筋や靱性は考慮されない。従って、多くの建物の I_s 値が小さい値となったのが、被害ばらつきの一要因であろう。他にも桁行方位や地盤、建物形状等の影響が考えられる。

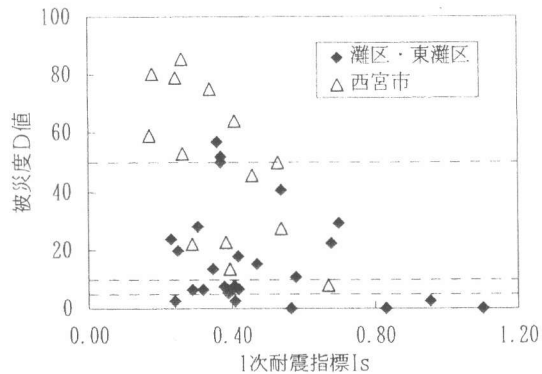


図-7 1次構造耐震指標と被災度

②2次診断による構造耐震指標(I_s 値)と被災割合(D値)との関係を図-8に示す。2次診断では、1次診断の I_s 値が同程度であった建物で被害が小さいものは I_s 値が上昇し、 I_s 値とD値の間

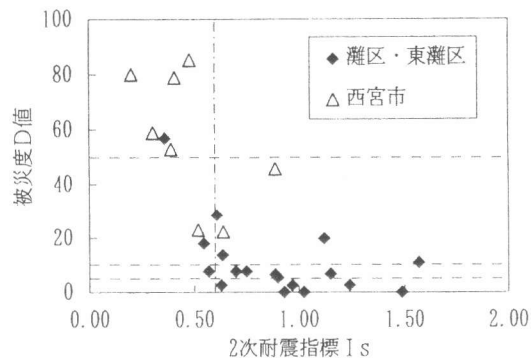


図-8 2次構造耐震指標と被災度

にある程度の相関関係が認められる。 I_s 値0.5程度を上回るもので、大破・倒壊の建物はなく、また、中破のものも少なくなり、過去の地震被害で報告されている中破程度の被害(ただし、被災度の判定基準が異なることに注意を要する)を生じる上限の I_s 値0.6とほぼ対応する[4]。

3. 1. 2 被害と E_0 指標

2次診断による I_s 値と被害との関係では、 I_s 値が高い建物ほど、損傷割合Dが低くなる相関関係が認められた。しかし、稗田小学校管理棟のように高い I_s 値1.12に対してD値19.8(中破)となる建物

も見られる。そこで、同程度の I_s 値の建物を比較し、2次診断を行う過程で算出される強度指標 C と靱性指標 F との積である保有性能基本指標 E_0 について検討した。比較を行った4校舎について図9から図12に示す。図9の本山第二小東館では、累積強度指標 C_T は0.38であった。これに対し、同程度の E_0 指標である本山南小東校舎北棟(図10)の C_T 指標は0.55であるため、後者の被害の方が小さかったと考えられる。また、稗田小管理棟(図11)の C_T 指標が0.31と低いのに対し、 E_0 指標が同程度の本山南小北校舎(図12)の C_T 指標は0.6と高く、被害状況に差が生じたのだろう。本山第二小と稗田小では、被災度が前者の方が高いのに対し、 C_T 指標は後者の方が低く、被害と対応していないように思えるが、

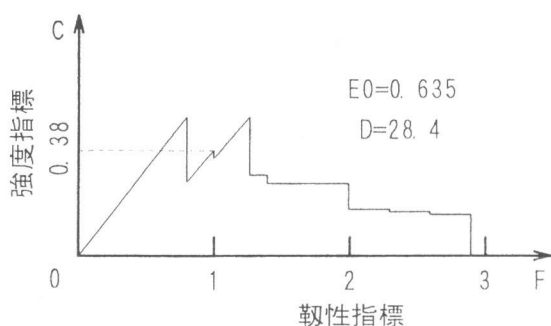


図-9 本山第二小学校東館C-F関係

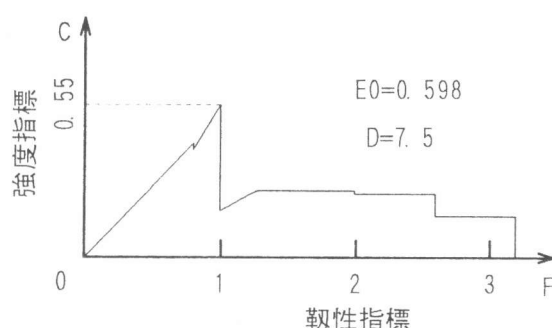


図-10 本山南小学校東校舎北棟C-F関係

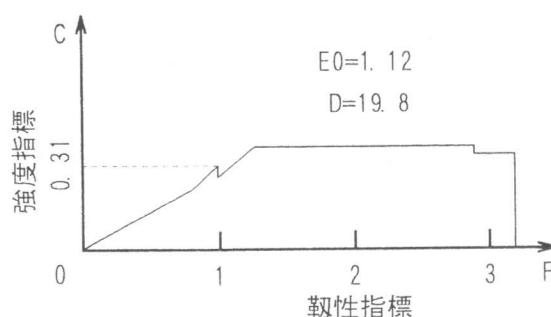


図-11 稗田小学校管理棟C-F関係

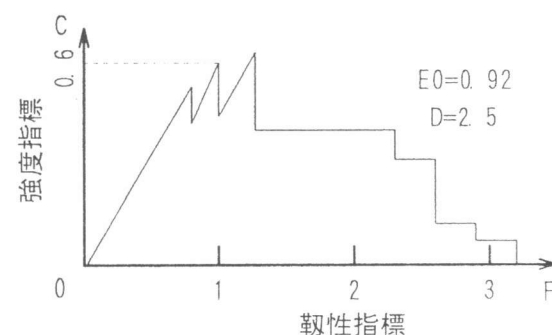


図-12 本山南小学校北校舎C-F関係

本山第二小のせん断曲げ混在型に対して、稗田小ではほとんどの柱が曲げ型であり、累積強度指標は小さいが変形能力があるため、多少の曲げひび割れで済み、被害が前者よりも小さかったものと考えられる。本山第二小は低強度型のせん断曲げ混在タイプ、稗田小は低強度型の曲げタイプ、本山南小東校舎北棟は高強度型のせん断曲げ混在タイプ、本山南小北校舎は高強度型の曲げタイプというように分類できる。つまり、被害との関係は、累積強度指標 C_T による初期の強度指標と、建物の変形能力を評価した E_0 指標の双方から説明される。4棟の各 C_T 指標と E_0 指標の関係を図-13に示す。ここで、 C_T と E_0 を結ぶ直線の長さを各建物の保有する全耐震性能だと考えれば、点線で示した $E_0=0.55$ 程度において被害が分類され、本山第二小学校において最も被害が大きかったことが説明できる。

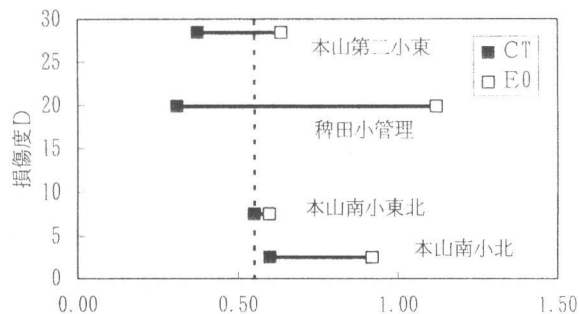


図-13 C_T 指標と E_0 指標

4棟の各 C_T 指標と E_0 指標の関係を図-13に示す。ここで、 C_T と E_0 を結ぶ直線の長さを各建物の保有する全耐震性能だと考えれば、点線で示した $E_0=0.55$ 程度において被害が分類され、本山第二小学校において最も被害が大きかったことが説明できる。

3. 2 地震時等価応答速度

市之瀬等は、学校建築RC造WGが調査した建物について、層せん断力-層間変位の関係を1次診断結果に基づく簡単なモデルで仮定し、建物の吸収エネルギー量の推定を行なっている[5]。ここでは、各建物について実際の柱の形状・配筋・内法高さ h_0 ・損傷度等を用いて、層せん断力-層間変位関係を求め、市之瀬等と同様の方法で地震時に建物が吸収したエネルギーの推定を試みた。

①柱の復元力特性

簡略化のため、図1本山第二小学校1階平面図に示した斜線領域を各建物の代表的なスパンとして取り出した。それぞれの柱部材の曲げひび割れ強度は式(1)[6]、降伏強度は式(2)[4]、および、せん断強度は指針式[7]により算定し、図-14および図-15のように復元力特性をモデル化した。曲げ柱は、降伏後に指針のせん断強度式に従い耐力低下、せん断柱も指針のせん断強度式により耐力低下させた。降伏変形 δ_y は、菅野式による。

$$M_c = 1.8\sqrt{F_c} \times Z_0 + \frac{ND}{6} \quad (1)$$

$$M_u = 0.8a_1\sigma_y D + 0.5ND(1-\eta) \quad (\eta < 0.4) \quad (2)$$

$$= 0.8a_1\sigma_y D + 0.12bD^2 F_c \quad (\eta > 0.4)$$

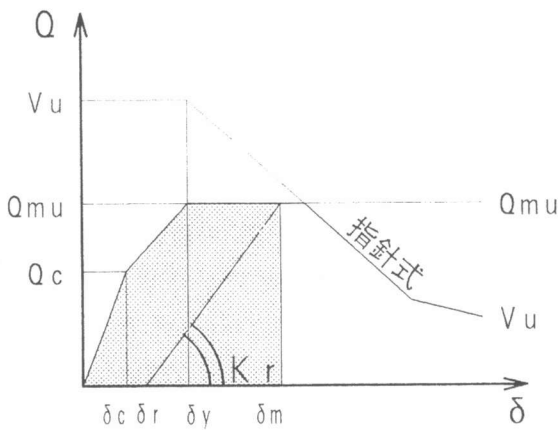


図-14 曲げ柱の復元力特性モデル

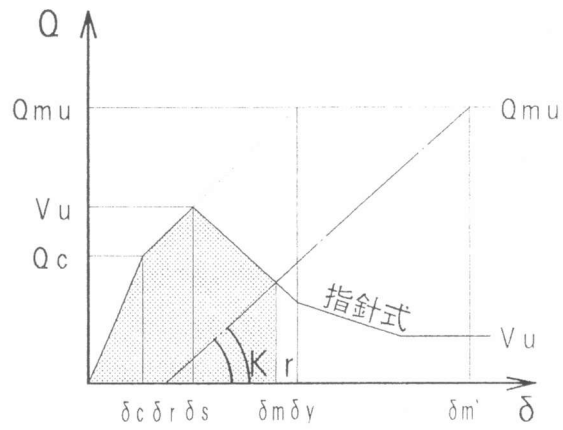


図-15 せん断柱の復元力特性モデル

②残留変位 δ_r および最大応答層間変位 δ_m

各柱部材の残留変形角は、図-16および表-2により推定し、対象とした柱と同じ h_0 および断面グループの損傷度により定まる変形角の平均を、残留変形角とした。次に、推定残留変形角を柱の内法高さ h_0 により、それぞれの残留変位とした。最大変位 δ_m と残留変位 δ_r の関係を定める除荷時剛性 K_r は、市之瀬と同様に武田モデルにより式(3)とした[8]。ここで、 $\alpha=0.5$ として各柱の最大応答変位を計算し、その平均値を、建物1階の最大応答層間変位 δ_m とした(図-14・図-15)。

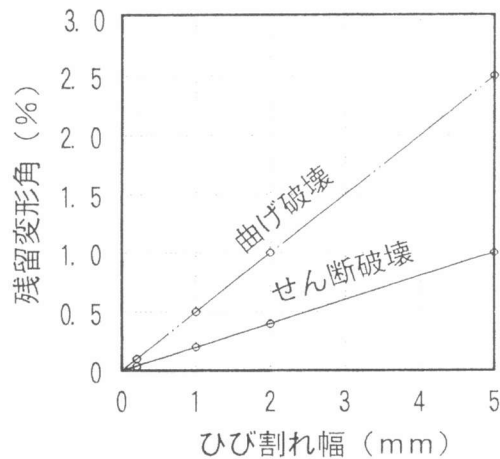


図-16 ひび割れ幅と推定残留変形角[5]

$$K_r = \frac{(Q_c + Q_{mu})}{(\delta_c + \delta_y)} \left| \frac{\delta_m}{\delta_y} \right|^{-\alpha} \quad (3)$$

表-2 柱の損傷度と残留変形角[5]

柱の 損傷度	ひび割れ幅 (mm)	残留変形角	
		せん断破壊	曲げ破壊
O	0	0	0
I	<0.2	0.2/1000	0.5/1000
II	<1.0	1.2/1000	3/1000
III	<2.0	3/1000	7.5/1000
IV	<5.0	7/1000	17.5/1000
V	≥5.0	10/1000	25/1000

③推定吸収エネルギー

各柱の最大応答変位を平均したものを建物の1階最大応答層間変位とし、その変形による吸収エネルギーをEとして図-14、図-15の面積を式(4)より求めた。吸収エネルギーは、各建物の比較のため式(5)により速度Vに変換した。粘性減衰の影響は無視した。

$$E = fQd\delta \quad (4)$$

$$v = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (5)$$

表-3 各建物の最大応答層間変形と応答速度結果

	教室側外構面			廊下中通り			廊下側外構面			平均値 δm(mm)	速度 (m/s)	被害 D値
	Rr(%)	δr	δm	Rr(%)	δr	δm	Rr(%)	δr	δm			
稗田小学校管理棟	0.356	7.1	10.7	0.225	6.5	14.7	—	—	—	12.7	0.30	19.8
本山第二小学校東館	0.300	5.7	9.0	0.050	1.4	8.1	0.410	5.3	7.4	8.2	0.31	28.4
本山南小学校東校舎北	0.300	5.3	9.1	0.050	1.4	6.6	—	—	—	7.9	0.31	7.5
本山南小学校北館	0.050	0.9	3.2	0.050	1.4	9.5	0.050	0.6	1.7	4.8	0.27	2.5

前述の4校舎について各柱部材の残留変位・最大応答変位、各部材の平均

である1階の最大応答層間変位計算値を表-3に示す。応答速度の計算結果は表-1に示した。これらの結果には、ばらつきがあるものの、同じ地域で見れば被災度によらず応答速度はほぼ一定であり、同程度のエネルギー吸収をしたと考えられる。

4. まとめ

兵庫県南部地震により被災した神戸市灘区および東灘区を中心に被害を統計し被害状況を検討した。また、耐震診断や強度指標、靱性指標および吸収エネルギーの算出により、建物の耐震性と被害の関係を検討した。その結果、被害の違いを建物の耐震性能という点から説明することができ、それぞれの建物は、同じ地域では被害程度によらず、ほぼ等しい応答速度となっていることが分かった。

今後、更に詳細な耐震性能の分析と共に、損傷割合の算出方法の検討やより正確な残留変位の推定が必要であろう。

[謝辞] 被害調査を行うにあたり、文部省文教施設部技術課から資料の提供を受けた。兵庫県、神戸市、および西宮市の教育委員会より構造図面を始めとする資料の提供を受けた。本研究は、上記の被災度判定WGによる調査結果を使用させて頂いた。吸収エネルギーの推定に関して名古屋工業大学市之瀬敏勝助教授のご指導を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- [1] 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(RC造編)」、1991.2
- [2] 日本建築学会 学校建築委員会耐震性能小委員会；「文教施設の耐震性能等に関する調査研究報告書」、1995.3
- [3] 日本建築学会 構造委員会 振動運営委員会 地盤振動小委員会；「1995年兵庫県南部地震で試された地盤振動研究」、第23回地盤振動シンポジウム(1995)、1995.10
- [4] 日本建築防災協会；「改訂版既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説」、1990.12
- [5] 市之瀬 敏勝, 石川 小百合, 前田 匡樹, 壁谷澤 寿海；「学校建築の被災状況から見た兵庫県南部地震の応答速度」、日本建築学会東海支部研究会、1996.2
- [6] 日本建築学会；「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」、1992.2
- [7] 日本建築学会；「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」、1990.11
- [8] 梅村 魁著；「鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法・続(中層編)」、技報堂出版、1982.12