

論文 1995年兵庫県南部地震により被災した明石市立花園小学校校舎の被害に関する検討

武田 啓志*1 前田 匡樹*2 壁谷澤 寿海*3

要旨：1995年兵庫県南部地震で被災した明石市立花園小学校のRC造校舎建物3棟について、被害調査を行い各建物の被災度を把握し、また、耐震診断による構造耐震指標 I_s 値と被害の関係について考察した。さらに、1階より2階の I_s 値が大きいにもかかわらず2階部分に大きな被害を受けた南教室棟について、地震応答解析により建物の地震応答の推定を行い被害の原因について検討した。

キーワード：1995年兵庫県南部地震、学校建築、地震被害、耐震診断、応答解析

1. はじめに

筆者等は、日本建築学会の学校建築委員会耐震性能小委員会・被災度判定WG(RC造)の活動として、1995年兵庫県南部地震による文教施設の被害調査を行った。本研究では、筆者等が被害調査を行った明石市立花園小学校のRC造校舎3棟について、各建物について被害状況を報告し、耐震診断による構造耐震指標 I_s 値と被害の関係について考察した。さらに、2階部分に大きな被害を受けた南教室棟について地震応答解析を行い、被害の原因について検討した。

2. 建物概要および被害状況

2.1 建物の概要

明石市立花園小学校（所在地：兵庫県明石市西明石南町1-10）は、JR西明石駅の南東数百mに位置しており、平坦な敷地に建設されている。図1に示すように、南教室棟、西教室棟、北教室棟および体育館が配置されている。この付近は、地震の震源から約10kmと近いにもかかわらず、周囲の木造住宅の倒壊はほとんどみられず、震度7地域には含まれない。各校舎の概要を表1に、また、南教室棟の立面図を図2に、1階及び2階平面図を図3、図4に、C通りの柱の断面を表2に示す。西教室棟及び北教室棟の平面図を図5、図6にそれぞれ示す。

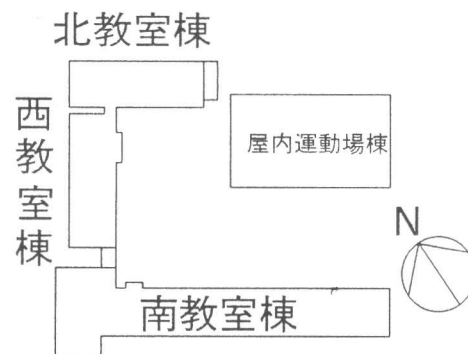


図1 花園小学校配置図

表1 建物概要

棟名称	建築年	階数	構造形式		スパン	基礎	F_c	主筋	帯筋
			桁行方向	張り間方向					
南教室棟	S. 43*	3(一部4)	ラーメン	耐震壁付 ラーメン	2*16	杭	180	SR24**	SR235
西教室棟	S. 55	4	耐震壁付 ラーメン	耐震壁付 ラーメン	2*6	杭	180	SD295	SD295
北教室棟	S. 56	4	耐震壁付 ラーメン	耐震壁付 ラーメン	2*6	杭	210	SD295	SD295

*: S. 44, S. 49増築 **: S. 49増築部はSD295

*1 横浜国立大学工学部建設学科 (正会員)
 *2 横浜国立大学助手 工学部建設学科、博士(工学) (正会員)
 *3 東京大学教授 地震研究所、工博 (正会員)

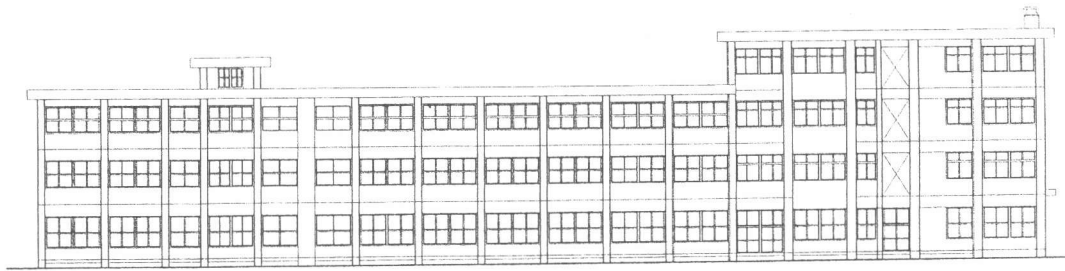


图2 南教室棟北立面图

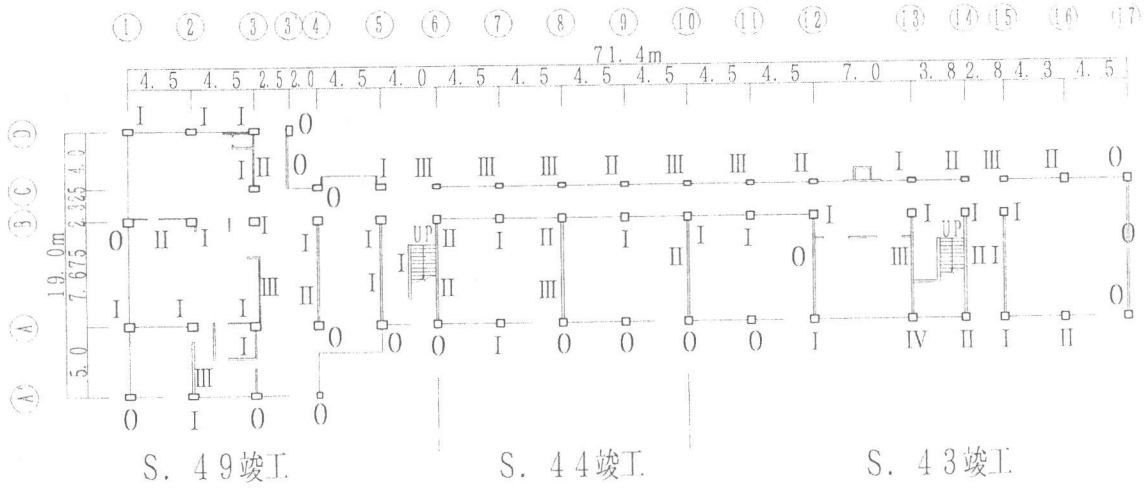


图3 南教室棟1階平面図

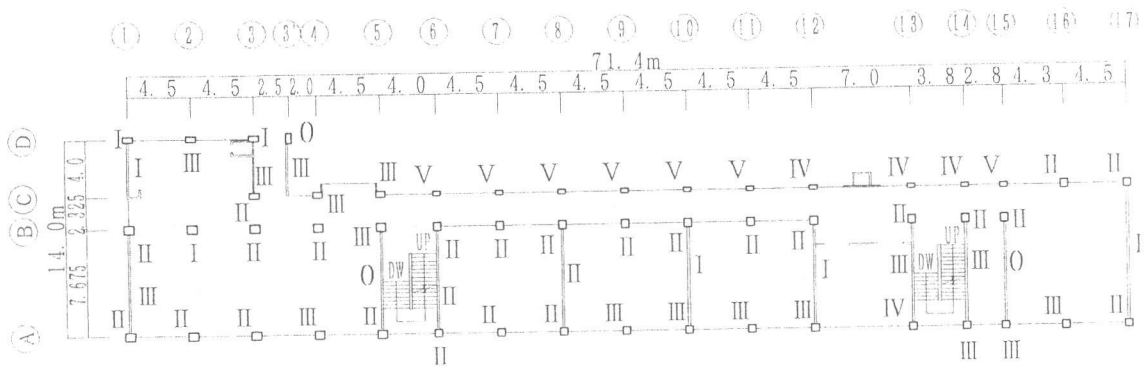


图4 南教室棟2階平面図

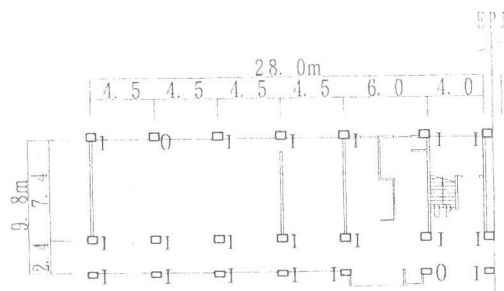


图5 西教室棟1階平面図

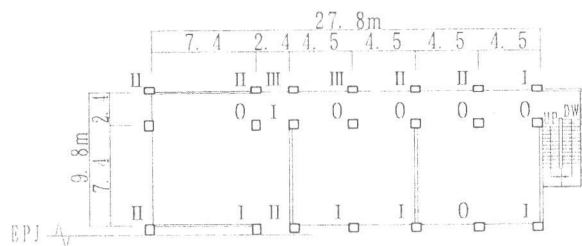


图6 北教室棟1階平面図

表2 南教室棟C通り柱リスト

		C通り3	C通り4~5	C通り6	C通り7~9	C通り10~13	C通り14~15
4F	B×D 主筋 フープ筋 ダイヤ筋	700×400 8-D22 9φ@100 9φ@600	700×400 8-D22 9φ@100 9φ@600	550×300 8-D22 9φ@100 9φ@600			
3F	B×D 主筋 フープ筋 ダイヤ筋	700×400 8-D22 9φ@100 9φ@600	700×400 8-D22 9φ@100 9φ@600	550×300 4-22φ, 4-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 4-22φ, 4-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 4-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 4-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750
2F	B×D 主筋 フープ筋 ダイヤ筋	700×400 8-D22 9φ@100 9φ@600	700×400 10-D22 9φ@100 9φ@600	550×300 4-22φ, 4-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 4-22φ, 4-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 4-22φ, 4-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 6-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750
1F	B×D 主筋 フープ筋 ダイヤ筋	700×400 8-D22 9φ@100 9φ@600	700×400 14-D22 9φ@100 9φ@600	550×300 6-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 6-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 6-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 10-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750
1F	B×D 主筋 フープ筋 ダイヤ筋	700×400 8-D22 9φ@100 9φ@600	700×400 14-D22 9φ@100 9φ@600	550×300 8-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 8-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 8-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750	550×300 10-22φ, 2-16φ 9φ@250 9φ@750

2.2 被害概要

被災度区分の判定は被災度判定基準[1]によった。各建物の柱の損傷度をそれぞれの平面図に記入した。

(1)南教室棟〔大破〕 南教室棟は、鉄筋コンクリート造4階建てで、西側1階には給食室が配置されており、やや複雑な平面形状をしている。また、この給食室周りには雑壁が多い。被害は2階が最も著しく被災度区分判定の結果、被災度は大破であった。教室部分の廊下外構面（C通り）の柱（C5～C15）はA通り、B通りと比較して腰壁により短柱（1階 $h_0/D=4.0$ 、2階以上 $h_0/D=3.4$ 、 h_0 は柱の内法高さ）となっており、2階C通りの柱は8割以上が柱脚部分で桁行方向にせん断破壊（損傷度V）し、主筋が座屈したのも見られた（写真1）。1階及び3階では、C通りの柱でせん断ひび割れが生じた柱も見られたが、2階と比較すると被害は軽微であった（損傷度Ⅲ以下）。

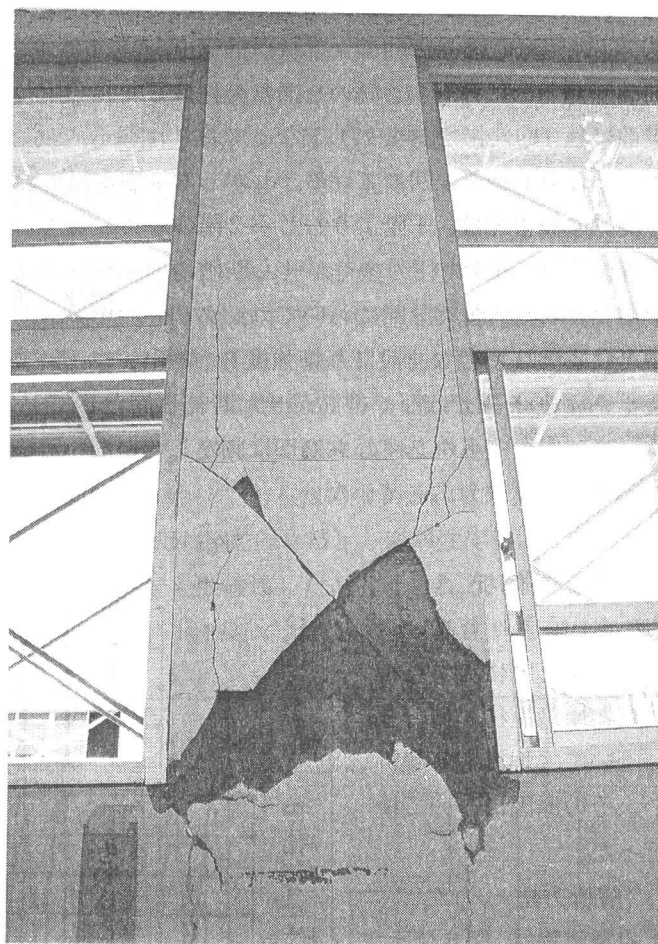


写真1 南教室棟2階C通りの柱（損傷度V）

(2)西教室棟〔軽微〕 他の校舎に比べて被害は少なく、柱の損傷度はI程度であり、その他トイレ周囲の雑壁にせん断ひび割れが見られた程度であった。

(3)北教室棟〔中破〕 被害は比較的軽微であるが、廊下外構面（C通り）の柱は大きなせん断ひび割れ（損傷度Ⅲ）の生じたものが2本あった。張り間方向の耐力壁にもせん断ひび割れが生じた。

3. 耐震診断

各建物について、耐震2次診断[2]を行った。耐震診断を行なう際には、コンクリート強度は設計基準強度 F_c とし、各層の重量は 1.2 t/m^2 、経年指標 $T=1.0$ と仮定した。診断結果の一覧を表3に示す。南教室棟桁行き方向の I_s 値は、1階で0.36、2階で0.43と西教室棟及び北教室棟に比べて著しく小さいために、南教室棟が他の2棟と比較して大きな被害を受けたと考えられる。最も被害を受けた南教室棟について、耐震診断により得られた強度指標 C —靱性指標 F の関係を図7に示す。

南教室棟では、1階から4階の順に曲げ柱が多くなり、4階ではほとんど全ての柱が曲げ柱である。1階では C 通りの柱の大部分が計算上せん断柱であるのに対し、2階の C 通りの柱は計算上曲げ柱(靱性指標 $F=1.27$)となっており、2階の I_s 値が1階を上回っている。しかしながら、実際の被害では、1階よりむしろ2階の被害が深刻で C 通りの柱の多くがせん断破壊(損傷度 V)した。耐震診断においてコンクリ

ート強度に実強度ではなく設計基準強度 F_c を用いていること、また、柱の帯筋の端部が 90° 折り曲げで余長もあまり十分ではなく帯筋がせん断補強筋として十分に機能していない可能性があることなどから、柱の破壊モードを必ずしも適切に判定していない可能性もあるが、実際の被害状況と耐震診断の結果と必ずしも良く対応していない。

4. 地震応答解析

I_s 値が1階よりも高いにもかかわらず2階に大きな被害を受けた南教室棟の桁行き方向について、地震応答解析を行い、その原因について検討を行った。

4.1 解析方法

解析対象建物は、図8に示すように柱及び梁を線材に置換した骨組みにモデル化した。剛域は腰壁等の雑壁を考慮して設定し、床の水平剛性は無限大と仮定した。柱および梁は両端に曲げバネを持つ線材に置換し、曲げバネの復元力特性には

表3 耐震診断結果一覧

		桁行き方向			張り間方向		
		S_D	E_0	I_s	S_D	E_0	I_s
南教室棟	4階	0.74	0.79	0.58	0.74	1.16	0.86
	3階	0.93	0.70	0.65	0.93	1.55	1.44
	2階	0.93	0.47	0.43	0.93	1.12	1.03
	1階	0.93	0.39	0.36	0.93	1.05	0.98
西教室棟	1階	1.00	0.72	0.72	1.00	1.45	1.45
北教室棟	1階	1.00	1.41	1.41	1.00	1.73	1.73

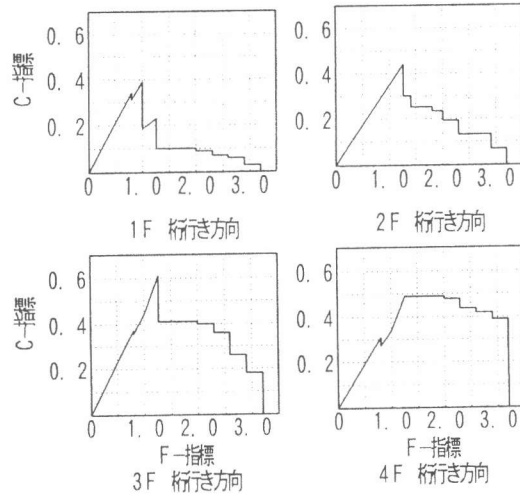


図7 南教室棟の強度指標 C —靱性指標 F 関係

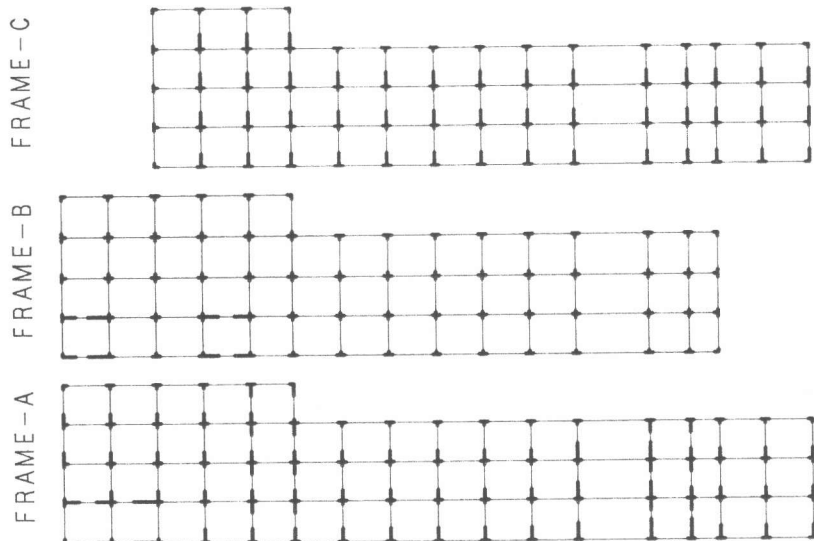


図8 解析モデル

Takeda モデル[3]を使用した。部材の剛性、耐力は構造設計資料の断面と配筋に基づき算出し、梁ではスラブおよび腰壁を、柱では袖壁を考慮した。また、梁には著しい被害が見られなかったもので、曲げひび割れ強度のみ考慮し、降伏強度を無限大に設定した。ひび割れ強度、降伏強度、降伏点剛性低下率は建築学会の RC 基準[4]に従い算定した。耐震診断で、せん断柱と判定された柱の降伏強度は、

せん断応力がせん断強度を上回ることがないように曲げ降伏強度を低減した。各層の重量は耐震診断と同様に 1.2t/m^2 と仮定した。解析には弾塑性地震応答解析プログラム DANDY を使用した[5]。

地震応答解析に使用した地震波は、図 9 に示す神戸気象台強震記録の EW 成分とした。解析には、大振幅部分の含まれる原記録の 30 秒から 40 秒の 10 秒間とし、この付近の被害状況から地震動は気象台付近よりかなり小さめであると考え、原記録の加速度を 0.5 倍して建物基礎に入力した。

4.2 解析結果の検討

応答解析により得られた各階の応答水平変位の時刻歴を図 10 に、また、各層の最大応答層間変位を図 11 に示す。最大応答層間変形は 2 層で 15mm 程度と他の層の 1.5~2 倍程度と大きく、2 層に大きな層間変形が生じた。図 12 に C フレームの各柱の最大応答塑性率を記入し、曲げ降伏した部分には記号 O を付して示した。2 階部分の C 通りの柱の多くは柱頭柱脚に降伏ヒンジが発生し、A、B フレーム及び C フレーム 1 階にはあまり降伏ヒンジは発生していない。2 階で C 通りの柱にのみ、降伏ヒンジが発生しているのは、C フレームの柱が他のフレームの柱より短柱であるためである。2 階 C 通りでせん断破壊した柱は、耐震診断で算定される終局塑性率 $\mu = 1$ (靱性指標 $F = 1.27$) と変形性能に乏しく、解析結果による柱の最大応答塑性率 1.16~1.52 程度であり、せん断破壊したと考えられる。また解析結果で、2 階の最大層間変位および柱の最大応答塑性率が 1 階と比較して大きいのは、C フレームの柱の内法高

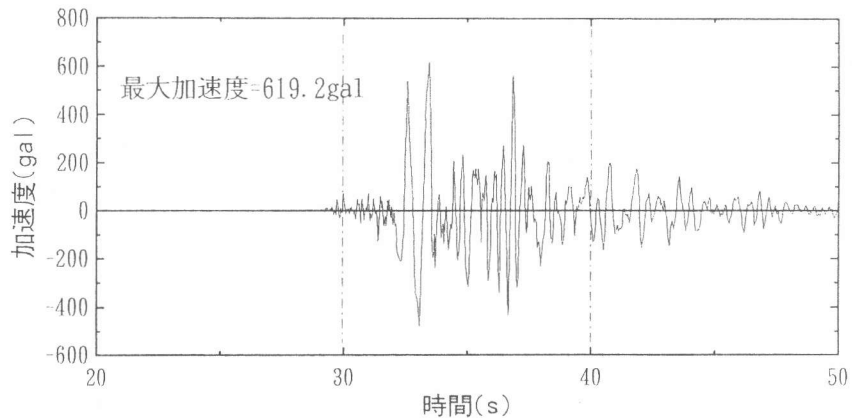


図 9 神戸気象台の地震記録 EW 成分

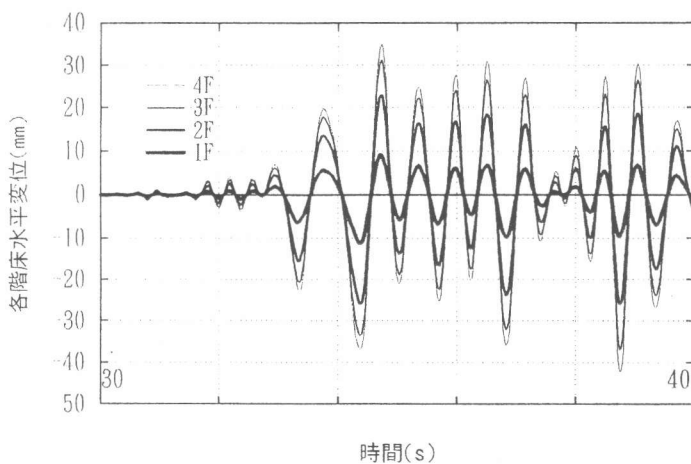


図 10 各階の応答変位の時刻歴

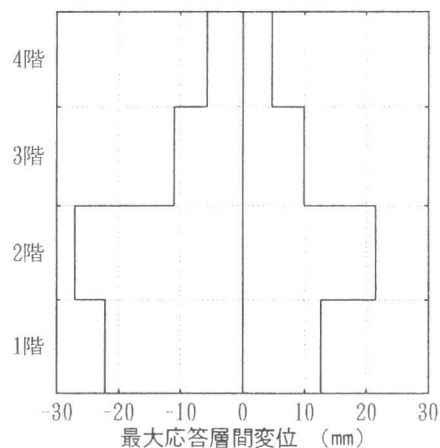


図 11 各層の最大応答層間変位

0.21	0.60	0.61	0.41																
0.08	0.23	0.22	0.37																
0.34	0.76	0.75	0.95	0.94	0.92	0.92	1.03	1.03	0.83	1.08	1.23	1.07	0.95	0.29					
0.21	0.56	0.60	0.69	0.51	0.53	0.52	0.58	0.58	0.40	0.60	0.72	0.68	0.76	0.68					
0.45	1.30	1.21	1.55	1.42	1.38	1.38	1.41	1.32	1.04	1.27	1.52	1.47	0.90	0.76					
0.44	1.21	1.09	1.49	1.21	1.26	1.26	1.26	1.23	0.97	1.16	1.44	1.38	0.76	0.49					
0.08	0.41	0.58	0.73	0.63	0.35	0.65	0.65	0.70	0.56	0.65	0.62	0.70	0.42	0.29					
0.23	0.96	1.21	0.84	0.87	0.88	0.88	0.88	0.83	0.82	0.90	1.21	0.99	0.79	0.91					

図 12 C通りフレームの最大応答塑性率 (○は降伏した部分)

さ h_0 が 1 階で 220cm であるのに対し 2 階では 190cm と短いために同程度の層間変形に対して大きな部材角が生じ 2 階に先に降伏ヒンジが発生し塑性変形が生じること、また、1 階には給食室付近を中心に雑壁が多く配されていることなどによると考えられる。1 階の C フレームの柱の最大応答塑性率は 0.35 ~ 0.90 程度で、実際の被害状況（損傷度 III 程度）と比較的一致する。以上から、本解析により、実際の被害状況と比較的一致する結果を得ることができた。

5. まとめ

本研究では、1995 年兵庫県南部地震で被災した明石市立花園小学校の RC 造校舎建物 3 棟について被害調査を行い各建物の被災度を把握し、また、耐震診断による構造耐震指標 I_s 値と被害の関係について検討した。さらに 1 階より 2 階の I_s 値が大きいかかわらず 2 階部分に大きな被害を受けた南教室棟について、地震応答解析により建物の地震応答の推定を行い被害状況と比較的一致する結果を得た。

謝辞

本研究は、上記の被災度判定WGによる調査結果の一部であり、被害調査を行う際には文部省文教施設部技術課から関連資料の提供を受け、明石市教育委員会からは調査への協力および構造図面の提供を受けた。ここに記して謝意を表するとともに、被災地の復興を祈念する。

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（鉄筋コンクリート造編）」、1991
- [2] 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規準同解説」、1990
- [3] Takeda, T., M. A. Sozen AND N. N. Nielsen; Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquakes, Proceedings, ASCE, Vol. 96, No. ST12, pp. 2557-2573, 1970
- [4] 日本建築学会：「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説」、日本建築学会、1992.2
- [5] 壁谷澤寿海：「鉄筋コンクリート壁フレーム構造の終局耐震設計法」、東京大学学位論文、1985