

論文 鉄筋コンクリート建物における構造関係規定の変遷と被災度の関係 —兵庫県南部地震における学校建築の被害を例として—

中村 孝也*1・芳村 学*2

要旨：1995年兵庫県南部地震における鉄筋コンクリート造学校建築の被害は、1960年代頃に建設されたものが非常に多く、その前後の時代に建設されたものでは少なかった。1970年代以降の被害の減少は1971年の建築基準法改正によりせん断補強筋間隔が小さくなったことにより解釈できるが、1950年代以前の建物の被害が小さかったことはそれでは解釈できない。そこで本研究では、柱の主筋比に着目してその説明を試みた。兵庫県南部地震において柱がせん断破壊型の被害を受けた学校建築を対象として検討を行った結果、主筋比が小さいほど被害が大きくなる傾向があること、等が明らかとなった。

キーワード：鉄筋コンクリート建物、建築年、被災度、主筋比、せん断破壊

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震における鉄筋コンクリート造(RC)学校建築の被害について、文献1)にまとめられており、建築年と被災度区分判定結果の損傷指標Dの関係が示されている(図-1)。この損傷指標Dは、地震被害を受けた建物の被災度(大破、中破等)を評価するための指標であり、Dが大きいほど被害が大きいことを示している(兵庫県南部地震では現行よりも古い基準²⁾により実施されている)。なお、図-1では、倒壊建物はD=100、無被害建物はD=0として示されている。この図から、Dは1960年代から70年代にかけて大きくなっており、その前後の年代では小さくなっていることがわかる。1970年代の境目は、1971年に建築基準法における構造関係規定が強化され、RC部材のせん断補強筋間隔が小さくなってせん断破壊が生じにくくなり、耐震性が向上したことにより説明できる。しかし、1950年頃の境目は、その前後でせん断補強筋間隔の規定は変化していないため、被害程度に差がある理由が不明である。わが国のRC建物の黎明期では耐震性が高かったものの、戦中・戦後の

資材不足によって使用する鉄筋の量などが減少したために戦後の建物が脆弱なものになったとも考えられているが、確たることはわからないのが現状である。

そこで本研究では、RC柱における主筋の量に着目し、主筋に関する耐震規定の変遷を通じて学校建築の建築年と被害程度の間を考察する。それによって1950年代以前の建物の被害が小さかったことに対する説明を試みるとともに、主筋量と被災度の関係を考察する。

2. せん断補強筋と主筋に関する耐震規定の変遷

RC柱のせん断補強筋と主筋に関する耐震規定の変遷を、表-1に示す^{3)~10)}。

せん断補強筋については、間隔を1尺(30.3cm)以下とする規定が1918年の警視庁建築取締規則案に初めて現れ、1920年の市街地建築物法施行規則において制定された。それが1971年に建築基準法が改定されて間隔15cm以下となるまで継続した。その後1981年の改訂で再強化され、せん断補強筋比の規定が新設された。これらの耐震規定の強化により耐震性が向上し、図-1に示したような1970年代以降に建設された建物の被害の減少に寄与したことは周知の事実である。

主筋については、柱のコンクリートの断面積に対する主筋の断面積の比(以下、主筋比 P_g と記す)に関する規定が構造関係規定に定められているため、本研究では主筋量の大小を表す指標として主筋比を用いる。なお、同じ主筋量でもコンクリートの断面積、すなわち柱断面サイズが異なれば主筋比が異なることとなるが、学校建築では柱断面サイズが同程度であることが多いため、本研究ではその影響は考慮しないこととする。主筋比 P_g の概念が初めて現れたのは1923年の関東地震を受けて1924年に改正された市街地建築物法施行規則において

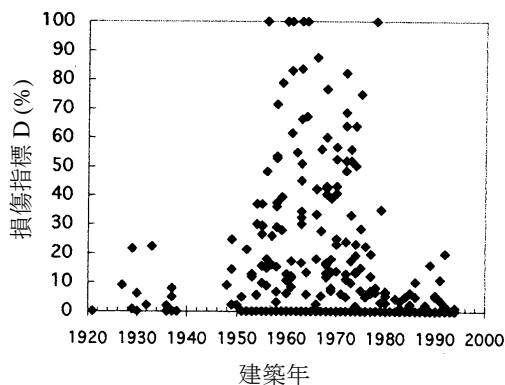


図-1 建築年と損傷指標Dの関係¹⁾
(学校建築, 兵庫県南部地震)

*1 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域助教 博士(工学) (正会員)

*2 首都大学東京大学院 都市環境科学研究科建築学域教授 工博 (正会員)

表-1 柱のせん断補強筋と主筋に関する規定の変遷

	第0期	第I期	第II期	第III期					
年	1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000
せん断補強筋	間隔30cm以下				間隔15cm以下 (端部10cm)		せん断補強筋比 $P_w \geq 0.2\%$		
	1920 市街地建築物法施行規則公布				1971 建築基準法改定		1981 建築基準法改定		
主筋	P_g は1.25%以上				P_g は0.8%以上				
	1924 市街地建築物法施行規則改訂				1950 建築基準法 公布				
RC規準	P_g は0.8%以上4%以下						現在： P_g は0.8%以上		
	1933 RC規準(案)						ただし、コンクリート断面積が大の場合は低減可能		

であり、その値を 1.25% (1/80) 以上にするように制定された。その後、1950 年に建築基準法が公布された際に、その最低値が 1.25% から 0.8% に引き下げられている。これが図-1 において 1950 年代以降の建物の被害が大きかったことと関連しており、 P_g が被害程度の大小に影響している可能性がある。そこで本論では主として P_g に着目して考察する。なお、1933 年に刊行された日本建築学会の鉄筋コンクリート構造計算規準（以下、RC 規準）では、 P_g について「0.8%以上 4%以下となすべし」と記述されており、1933 年から 1950 年の間にどちらが優先されていたかは定かではない。

建築年代については、一般的に、1971 年と 1981 年を境として第 I 期、第 II 期、第 III 期と区分され、被害程度との関係が議論されることが多い。しかしこれでは前述のように 1950 年代以前の被害程度の小さい時代を区分できないため、本論では 1950 年の建築基準法の公布を境とし、それ以前を第 0 期と呼んで区分する(表-1)。

3. 主筋比が柱の破壊性状に与える影響

筆者らは、過去の実験でせん断破壊型 RC 柱の崩壊を含む破壊性状に対して、主筋比 P_g が大きく影響することを示した^{11),12)}。 P_g のみが異なり、他の因子はすべて同じとした試験体について、計 3 組の実験を行い、すべて同様の傾向が得られた。以下では、それらのうちの試験体 C16 と C13 の例を示す¹²⁾。実験パラメータである P_g は C16 で 2.65% (12-D16)、C13 で 1.69% (12-D13) とした。共通因子は以下の通りである。外形寸法は、柱断面 300×300mm、内法高さ 900mm とした。軸力は一定で、軸力比を 0.2 とした。せん断補強筋 P_w は第 I 期の柱を想定して 0.11% (2-D6@200) とした。

実験では柱が軸力保持能力を喪失して崩壊するまで加力した。水平力-水平変形関係を図-2 に示す。水平変形は部材角で示す。両試験体ともせん断破壊し、C16 は正方向への押し切り時に崩壊し、C13 は繰り返し载荷の途中で崩壊した。最大耐力後の荷重低下の度合いは、 P_g の小さい C13 の方が大きかった。

例として、部材角-1%のときの破壊状況を、C16 について写真-1 (a)に、C13 について写真-1 (b)にそれぞれ示す。最大耐力に対するそのときの耐力の比は、C16 で 0.61、C13 で 0.25 であり、C13 の方が耐力低下の度合いが大きかった。写真-1 で比較すると、同じ部材角でも C13 のほうがせん断ひび割れの幅が大きく、被害調査の際には被災度が大きいと判断されると考えられる。

崩壊変形（崩壊するまでに経験した最大の水平変形）については、C16 が 5.61%、C13 が 1.28%であり、主筋比 P_g が小さいほうが崩壊変形が小さく、より脆弱であるといえる。

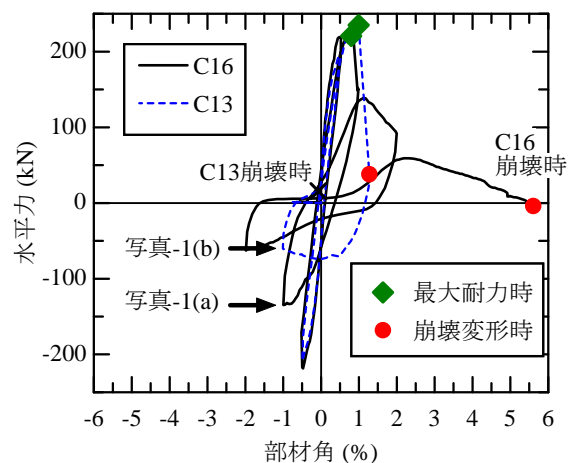


図-2 水平力-水平変形関係

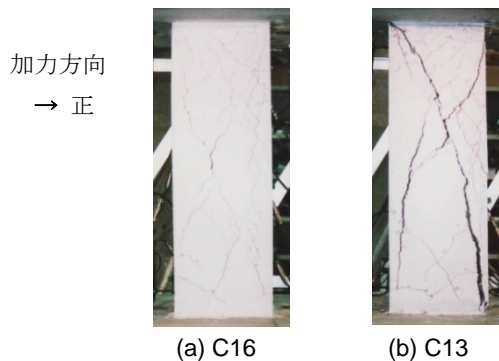


写真-1 部材角-1%時の破壊状況

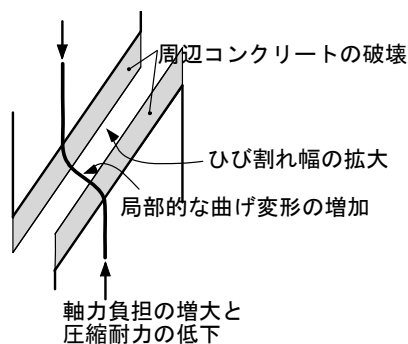


図-3 せん断ひび割れ面付近の挙動¹³⁾

このように主筋比 P_g は柱の破壊性状に大きく影響するのであるが、これは、図-3 に示すように、せん断破壊面のコンクリートの破壊の進行に伴って、その位置において主筋が負担する軸力が増大するため、主筋量が少ない方が軸力保持の面で不利になることに起因する¹³⁾。

4. 被害状況と主筋比、せん断補強筋比の関係

4.1 検討建物の抽出

文献 1)には、図-1 に示した学校校舎の被害建物のうち、柱断面などの詳細な情報が記載されているものがある。その中から、検討対象建物を以下の 1), 2)に示す条件で抽出した。ここで、ほとんどの建物で張間方向よりも桁行方向の被害が大きかったため、検討対象は桁行方向のみとした。なお、学校建築の桁行方向では採光を確保する等の理由により耐震壁を配置することが少ないため、本研究では耐震壁の影響は考慮しないこととした。

- 1)柱断面寸法、主筋の径と本数、せん断補強筋の径と本数と間隔、の情報が記載されており、主筋比 P_g とせん断補強筋比 P_w が算出可能である。
- 2)地震時にせん断破壊あるいはせん断ひび割れが生じた柱を対象とする。曲げ破壊あるいは曲げひび割れのみが生じた柱は除外する。

表-2 検討対象建物（学校建築，計 24 棟，桁行方向，兵庫県南部地震）

建物番号	住所	建築年 ¹⁾	階数 (最大被災階)	主筋比 P_g (%) ²⁾	せん断補強筋比 P_w (%) ²⁾	損傷指標 D (%) ²⁾	被災度 ³⁾
1	西宮市	1958	3 (1)	0.82	0.15	52.9	大破
2	西宮市	1958	3 (1)	0.82	0.15	100	倒壊
3	西宮市	1972	4 (1)	1.29	0.53	82.1	大破
4	西宮市	1976	4 (1)	1.29	0.53	22.3	中破
5	西宮市	1970	5 (1)	1.72	0.13	42.9	中破
6	芦屋市	1958	4 (1)	1.57	0.13	36.0	中破
7	神戸市東灘区	1933	3 (1)	2.43	0.13	22.4	中破
8	神戸市東灘区	1975	3 (1)	1.15	0.59	28.4	中破
9	神戸市東灘区	1960	4 (1)	1.27	0.11	100	倒壊
10	神戸市東灘区	1950	4 (1)	1.40	0.10	13.5	中破
11	神戸市東灘区	1969	4 (1)	1.40	0.10	17.9	大破
12	神戸市東灘区	1963	4 (1)	0.83	0.13	100	倒壊
13	神戸市東灘区	1970	4 (2)	1.50	0.093	40.6	中破
14	神戸市灘区	1970	3 (1)	0.97	0.11	56.8	大破
15	神戸市灘区	1961	3 (1)	0.75	0.16	100	倒壊
16	神戸市灘区	1954	3 (1)	1.93	0.11	36.1	中破
17	神戸市灘区	1956	3 (1)	1.26	0.15	18.1	中破
18	神戸市長田区	1958	4 (1)	0.84	0.12	100	倒壊
19	明石市	1968	3 (2)	1.41	0.17	53.9	大破
20	明石市	1981	4 (1)	1.23	0.32	16.8	中破
21	淡路市	1963	4 (1)	2.96	0.10	14.4	中破
22	淡路市	1967	3 (1)	2.00	0.10	0	軽微
23	淡路市	1967	3 (1)	1.43	0.10	26.5	中破
24	淡路市	1967	3 (1)	1.91	0.096	100	倒壊

1)増築されている場合は最も古い部分の建築年。2)最大被災階の値。3)調査者の判断による。

検討対象建物は計 24 棟となった。検討対象建物の一覧を表-2 に示す。建物はすべて震度 6 以上の強震が生じた地域に位置していた。なお、増築されていた建物における建築年は、最も古い部分のものを示した。

建物階数は地上 3 階または 4 階である。最大被災階は概ね 1 階であるが、建物 13 と建物 19 は 2 階となっている。この原因として、前者では 2 階に大空間の部屋があるため 1 階よりも壁量が少なかったこと¹⁾、後者では柱の内法高さが 2 階のほうが 1 階よりも小さいためせん断破壊が生じやすかったこと¹⁴⁾、が挙げられている。一般的には中間層が大きな被害を受けるのは 10 階建程度の中層建物であるとされているが、3、4 階建程度の低層建物においても注意が必要であるといえる。

被災度の判定は、原則として文献 2) に従い、損傷指標 D の値から、軽微 ($D \leq 5$)、小破 ($5 < D \leq 10$)、中破 ($10 < D \leq 50$)、大破 ($D > 50$)、倒壊 ($D_s = 50$) に分類されて

いるが、調査者の工学的判断により修正されているものもある。

これらの建物について、建築年と損傷指標 D の関係を図-4 に示す。なお、被害が少ないため D 値が算定されていない建物は被災度に関わらず $D=0$ として示した。建築年代の内訳は、第 0 期が 1 棟、第 I 期が 19 棟、第 II 期が 4 棟、第 III 期が 0 棟である。第 0 期の建物 7 については、文献 15) によれば、敷地周辺では 30% を超える木造建物の倒壊、ピロティ形式集合住宅の倒壊等、多くの甚大な被害が見られ、震度 7 相当の揺れに見舞われたとされている。しかし、損傷指標 D は 22.4 と小さく、被災度は中破と判定されるものの全体的に柱の被害は軽微で、耐震壁、梁の被害が大きいとされており、比較的耐震性の高い建物であったといえる（耐震壁や梁の影響については今後の検討課題である）。

図-4 に示した建物について、主筋比 P_g とせん断補強筋比 P_w を算出した（表-2）。なお、 P_g については、法規上の定義はコンクリートの断面積に対する主筋の断面積の比であるが、本論では柱断面積に対する主筋の断面積の比として計算した。 P_w については、前述の通り検討対象が桁行方向であるため、桁行方向の値のみを算出した。柱は通常、各階に断面寸法、配筋等が異なる数種類があるが、 P_g と P_w は、被害が最大であった階の柱のうち最も数が多いものを代表柱として求めた。ただし、建物 7 については最も数が多い柱が矩形でなく正確な断面寸法が不明であったため、2 番目に数が多い矩形の柱について算出した（最も数が多い柱の P_g も概算値として算出し、結果を後の 4.3 節に併せて示す）。

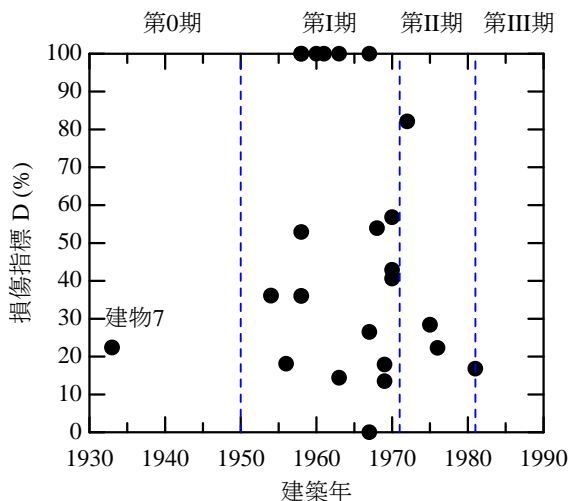


図-4 建築年と損傷指標 D の関係
(学校建築、計 24 棟、桁行方向、兵庫県南部地震)

4.2 せん断補強筋比 P_w の影響

図-4 に示した建物について、建築年とせん断補強筋比 P_w の関係を図-5 に示す。当然であるが第 II 期と第

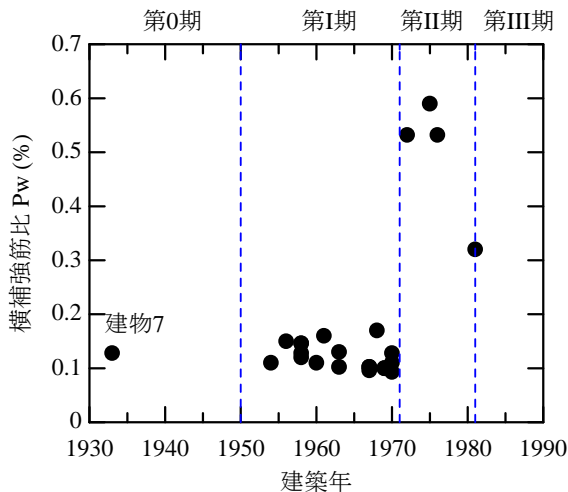


図-5 建築年とせん断補強筋比 P_w の関係

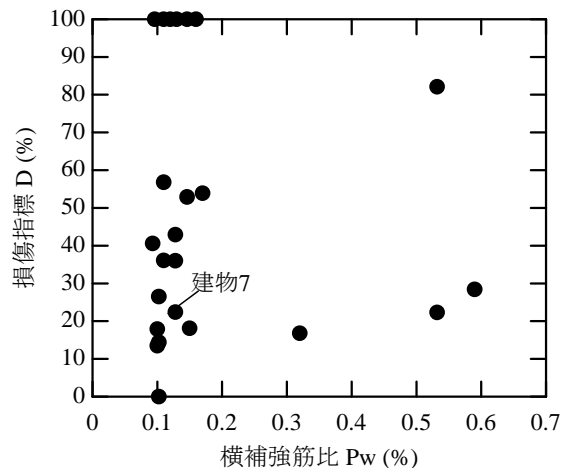


図-6 せん断補強筋比 P_w と損傷指標 D の関係

III期ではPwが大きい傾向がある。第0期と第I期ではPwにほとんど差はなく、すべての建物でPwが0.2%以下となっており、Pwでは図-4に示した第0期と第I期の被害程度の違いを説明することができない。

せん断補強筋比Pwと損傷指標Dの関係を図-6に示す。明確な傾向は認められないが、当然ながらPwが小さくなるほどDが大きくなる傾向がある。ただし、Pwが0.2%以下の建物でもDは0%から100%までばらつきが大きく、一概にPwが小さい建物の被害が大きいとはいえない。例えば第0期の建物7はPwが小さいのにも関わらず被害が小さく、被害程度の大小には別の要因も作用していると考えられる。そこで次節で主筋の影響を考察する。

4.3 主筋比Pgの影響

図-4に示した建物について、建築年と主筋比Pgの関係を図-7に示す。第2章で述べたように、第0期の建物7のPgは2.43%と比較的大きな値となっている。なお、これは4.1節で前述したように建物内で2番目に数が多い柱の値であるが、最も数が多い柱のPgを概算で求めると2.15%であり、これも比較的大きな値であった。これは第0期ではPgを1.25%以上にするという規定が存在したことが関係していると考えられる。ただし、建物固有の設計上の理由による影響も考えられるため、この1棟のみでは第0期の建物全体の傾向はつかめないことに注意が必要である。一方、第I期と第II期ではPgが概ね1%以下の小さな値となる建物が多く存在しているが、これは1950年に主筋比の規定が緩和されたことにより主筋量を減らす建物が出現したことを示している。

主筋比Pgと損傷指標Dの関係を図-8に示す。Pgが小さいほどDが大きくなる傾向がある。これは第3章で述べたように、Pgが小さいほど荷重低下の度合いが大きくなり、かつ変形能力が低下するため、被害が大きくな

りやすいためであると考えられる。また、第3章で述べたように同じ変形が生じた場合でもPgが小さいほどせん断ひび割れの幅が大きくなる傾向があるため、目視による調査時において柱の被災度が大きいと判断されたことも考えられる。ただし、Pgが0.8%程度の小さな値でもDが小さい建物もあり、Pgが小さければ必ずDが大きくなるわけではないことに注意が必要である。ここで、図-8より、第0期の建物7は損傷指標Dが小さく、Pgが比較的大きかったことが影響しているものと考えられる。第0期の検討対象建物が1棟のみという少ない数ではあるが、Pgは被害程度と関係があり、第0期と第I期の被害程度の違い(図-4)をPgの大小により説明できる可能性がある。なお、建物24は主筋比が1.93%と比較的大きな値のにも関わらず損傷指標Dが100%となって倒壊と判定されているが、この建物では地盤沈下が生じており、その影響で被害が拡大したと考えられる。Pgが最大(2.96%)である建物21については、せん断補強筋比Pwが0.10%と小さいにも関わらず損傷指標Dは14.4という小さな値となっており(表-2参照)、Pgが大きいことによって被害が小さく抑えられた可能性が考えられる。

5. 戦時中と戦後のRC規準設計例の比較

RC建物の構造設計を実施する際の重要な参考図書となってきた過去のRC規準を例にとり、鉄筋量の変遷について若干の考察を加える。

RC規準に示された設計例について、戦時中の1935年版⁸⁾と戦後の1958年版⁹⁾を比較した(表-3)。ここで、設計例の建物用途はいずれも事務所ビルであり、1935年版は地上4階建て、1958年版は地下1階、地上3階建てである。なるべく同条件の柱を比較するため、軸力比が同程度であると推察される、上から3層目の柱を比較し

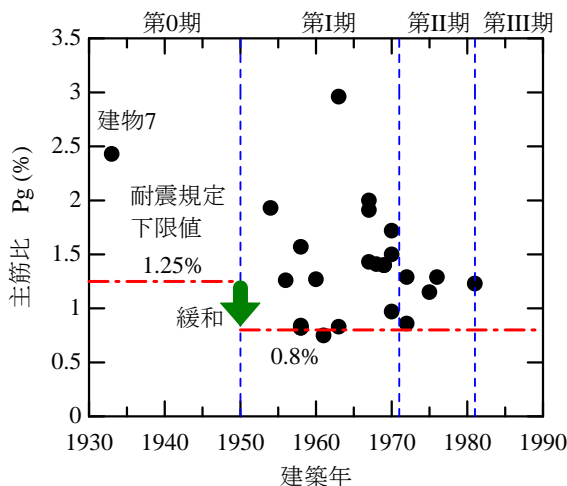


図-7 建築年と主筋比Pgの関係

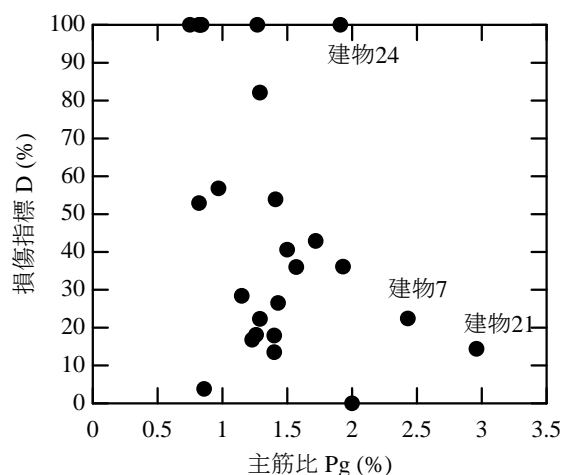
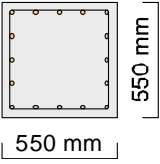
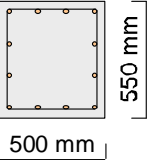


図-8 主筋比Pgと損傷指標Dの関係

表-3 RC 規準における設計例の比較^{8),9)}

	1935 年版	1958 年版
代表柱断面図		
主筋比 Pg	1.50% (16-19φ)	1.24% (12-19φ)
せん断補強筋比 Pw	0.12% (2-9 φ @200)	0.097% (2-9 φ @240)

た（1935 年版は地上 2 階，1958 年版は地上 1 階）。対象階の柱のうち，代表的な柱の主筋比 P_g とせん断補強筋比 P_w （桁行方向）を表-3 に示す。これより， P_g と P_w は共に戦後である 1958 年版のほうが小さく，戦後の建物では鉄筋量を減らす傾向にあったことが推察される。この理由のひとつとして戦中・戦後の資材不足により，材料を節約する合理的な設計が指向されることが考えられる。ただし，特に P_g については耐震壁の違いによる柱の負担応力の違い等も影響するため，一概に材料節約のみが原因とは言い切れないことに注意が必要である。

6. まとめ

兵庫県南部地震で被災した RC 造学校建築を対象として，建築年代と被災程度との関係を，主として構造関係規定の変遷に着目して考察した。柱にせん断破壊型の被害が生じた建物について，柱の主筋比 P_g およびせん断補強筋比 P_w を算定し，被害程度との関係を検証した。限られた範囲内の検討であるが，以下の知見が得られた。

- (1) 主筋比 P_g が小さいほど損傷指標 D が大きくなり，被害が大きくなる傾向がある。
- (2) 主筋比 P_g に関する規定は，1950 年の建築基準法公布時に，それ以前の P_g を 1.25% (1/80) 以上とする規定から，0.8%以上とするように緩和された。このことにより P_g を小さくする傾向が生じ，続く 1960 年代に建設された建物の被害が大きくなった可能性がある。

ただし，当然ながら建物の耐震性は主筋比やせん断補強筋比だけではなく，部材の断面寸法や耐震壁等の様々な因子に左右されるため，今後はそれらの影響を含めた考察が必要と考えている。

参考文献

- 1) 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 II 編 学校建築，1997.3
- 2) 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
- 3) 大橋雄二：日本建築構造基準変遷史，日本建築センター，1993
- 4) 石川孝重，平田京子：東京市建築條例学会案から市街地建築物法施行規則に至る立案過程とその特徴－構造関連規定の成立過程に関する研究－，日本建築学会構造系論文報告集，No.406，1989.12
- 5) 日本工友協会編：市街地建築物法規，三英社，1921
- 6) 建設省住宅局建築指導課編：最新建築関係法令集，警眼社，1950
- 7) 建築学会：コンクリート及鉄筋コンクリート標準仕様書・鉄筋コンクリート構造計算規準，1933
- 8) 建築学会：コンクリート及鉄筋コンクリート標準仕様書・鉄筋コンクリート構造計算規準解説書，1935
- 9) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 改訂版，1958
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説－許容応力度設計法－，1999
- 11) 中村孝也，芳村 学，大和征良：せん断破壊型鉄筋コンクリート短柱の軸力保持限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.561，pp.193-199，2002.11
- 12) 金 紅日，芳村 学，中村孝也：せん断破壊型 RC 柱の崩壊に対する直交壁の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，2005.6
- 13) 高稲宜和，芳村 学，中村孝也：鉄筋コンクリート柱の崩壊変形に関する研究，日本建築学会構造系論文集，No.573，pp.153-160，2003.11
- 14) 武田啓志，前田匡樹，壁谷澤寿海：1995 年兵庫県南部地震により被災した文教施設の被害調査報告 その 17 明石市立花園小学校校舎の被害と耐震性能に関する研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.375-376，1996.9
- 15) 大久保孝雄，青田晃治，前田匡樹，壁谷澤寿海：1995 年兵庫県南部地震により被災した文教施設の被害調査報告 その 2 神戸市立本山第二小学校，日本建築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.859-860，1995.8