

論文 定着延長筋を有する RC 造柱の強度と変形能に及ぼす主筋降伏位置と腰壁の有無の影響

吉沢 克司^{*1}・広瀬 雄三郎^{*1}・加藤 大介^{*2}・中村 友紀子^{*3}

要旨：2007年新潟県中越沖地震で被害を受けたRC造の学校建築において、崩壊形が計算上曲げ降伏型であるにも拘らず、実際にはせん断破壊している柱があった。既往の研究では、その原因を部材途中でカットオフされた主筋(定着延長筋)の存在によるものと考え、その定着延長筋を模擬した柱試験体の静加力実験を行ったが、変形能はあまり低下しなかった。本報告では、定着延長筋の長さ、主筋降伏位置および腰壁の有無に焦点をあてた実験を行った。その結果、定着長さが長く、定着端部が降伏する場合は変形能が低下すること、腰壁の存在は曲げ強度を低下させるが、変形能にはあまり影響しないことがわかった。

キーワード：定着延長筋, 変形能, 腰壁, 中越沖地震

1. はじめに

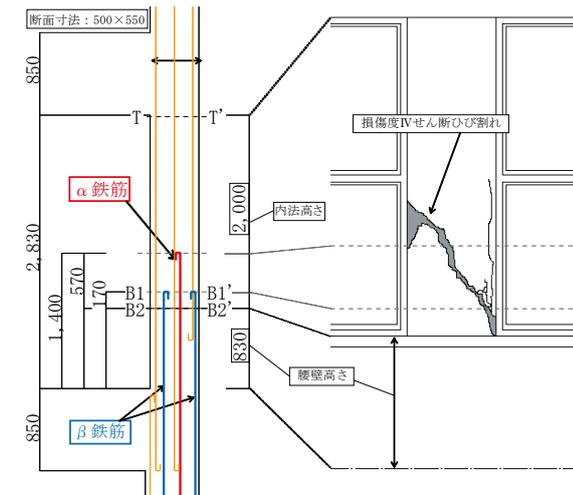
2007年新潟県中越沖地震(以下、中越沖地震)で被害を受けた鉄筋コンクリート造のS小学校において、その柱の崩壊形が耐震診断では曲げ降伏型であるにも拘らず、実際にはせん断破壊している事例があった。文献1)では、1階柱において、強度式の誤差(寸法効果)や諸条件の設定(コンクリート強度・帯筋間隔・鉄筋降伏強度・作用軸力)の違いでも説明可能だが、2階柱においては、それだけでは説明できないことを報告した。

図-1は対象とした2階柱の配筋とせん断破壊の様子を、図-2はアイソメ図と各高さ位置での断面図を示したもので、1階から長さの異なるφ22の鉄筋が当該柱に定着部分として伸びていることを示している(長い鉄筋をα鉄筋、短い鉄筋をβ鉄筋とする)。この鉄筋は当該柱には不要な鉄筋であり、当該柱にとって必要な鉄筋が途中

でカットオフされているものと区別するために、本論文では、この鉄筋を定着延長筋と呼んでいる。

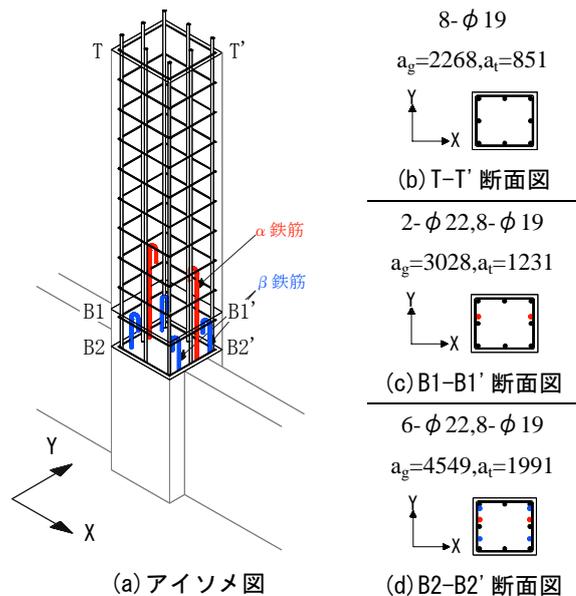
文献1)では、その端部で発生した曲げひび割れが斜めに進展し、このひび割れによりひび割れ面のかみ合い作用が悪化し、せん断伝達力が低下した可能性があるという結論に達している。そこで、文献2)では、α鉄筋のみを模擬した定着延長筋を有する試験体とα鉄筋をβ鉄筋と同じ長さにした定着延長筋を有する試験体を作製し、静加力実験を行ったが、いずれの試験体もひび割れ性状は実現象を模擬できたものの、変形能は定着延長筋のない試験体とほぼ同程度であった。

本報告では、主筋の降伏位置に着目し、定着延長筋の長さと腰壁の有無をパラメータとした実験結果を報告し



(a) 柱配筋図(梁間方向) (b) 被害の様子(桁行方向)

図-1 対象とした柱の配筋図と被害の様子



(a) アイソメ図 (b) T-T' 断面図 (c) B1-B1' 断面図 (d) B2-B2' 断面図

図-2 対象とした柱のアイソメ図と断面図

*1 新潟大学大学院自然科学研究科 修士課程 (正会員)

*2 新潟大学工学部建設学科 教授 工博 (正会員)

*3 千葉大学大学院工学系研究科 准教授 (正会員)

表-1 試験体諸元

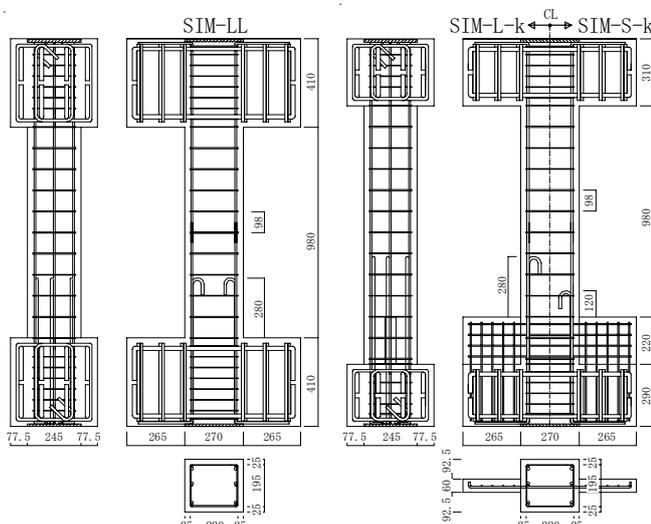
試験体	断面	試験区間長 (内法高さ) [mm]	主筋		帯筋		定着延長筋 長さ [mm]	コンクリート 強度 [N/mm ²]	加力方法		腰壁					
			配筋	配筋	形状	間隔 [mm]			帯筋比 [%]	前載荷 (作用軸力)		後載荷				
2010年度 SIM-0 SIM-S SIM-L	270×245	980	6-φ9	φ4	90° フック	98	0.10	-	0	18.0	曲げせん断加力 (80[kN])	中心軸加力	無 無 無			
														2-φ13	120	280
														2-φ13	280	120
2011年度 SIM-LL SIM-L-k SIM-S-k	270×245	980	6-φ9	φ4	90° フック	98	0.10	6-φ13	280	24.7	曲げせん断加力 (80[kN])	中心軸加力	無 無 有			
														2-φ13	280	120

表-2 鉄筋材料特性(2011年度)

鉄筋	降伏強度 [N/mm ²]	最大強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [N/mm ²]	降伏歪 [μ]
φ4	461	510	2.00	4543
φ9	326	451	1.99	1597
φ13	315	450	2.00	1682

表-3 強度計算値一覧

試験体	曲げひび割れ強度 [kN]		せん断 ひび割れ 強度 [kN]	曲げ強度時せん断力 [kN]		せん断 強度 [kN]	最大 強度 [kN]	破壊モード
	基部	定着延長筋 端部		基部	定着延長筋 端部			
SIM-0	17.9	-	41.6	47.9	-	74.1	47.9	基部曲げ
SIM-S	18.7	20.4	41.6	57.4	54.6	74.1	54.6	定着延長筋端部曲げ
SIM-L	18.7	25.1	41.6	57.4	67.1	74.1	57.4	基部曲げ
SIM-LL	20.0	26.9	47.0	77.1	67.7	79.8	67.7	定着延長筋端部曲げ
SIM-L-k	20.0	26.9	47.0	77.1	67.7	79.8	67.7	定着延長筋端部曲げ
SIM-S-k	20.0	21.9	47.0	77.1	55.1	79.8	55.1	定着延長筋端部曲げ



(a) 開口内法試験体 (b) 腰壁付試験体

図-3 試験体形状と配筋

た。そして、その結果と既報の結果から定着延長筋と腰壁が柱に及ぼす影響を考察した。

2. 既往の実験結果と試験体計画

文献 2)の報告において、定着延長筋を有する試験体 SIM-L(定着延長筋が 280mm, 柱脚が降伏, 腰壁なし)は、定着延長筋端部に発生したひび割れが斜めに進展し、ひび割れ性状は実物を模倣できた。しかし、短い定着延長筋を無視したために柱脚が降伏し、定着延長筋のない SIM-0 と同程度の変形能となった。一方、SIM-S(定着延長筋が 120mm, 定着延長筋端部が降伏, 腰壁なし)は SIM-L 同様、定着延長筋端部から斜めひび割れが発生したが、定着延長筋端部が降伏し、SIM-0 より変形能が多少低下したものの、いわゆる脆性的なせん断破壊とはならなかった。

昨年度の試験体は SIM-L は柱脚が降伏、SIM-S は定着延長筋端部が降伏するように設計したため、定着延長筋の長さによる影響を明確に評価できていなかった。また、

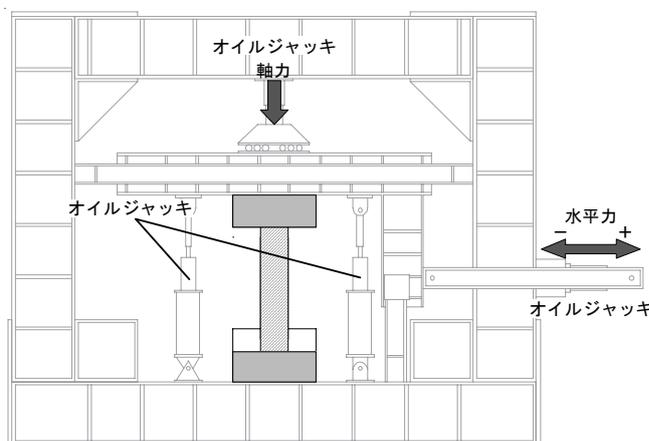


図-4 加力装置

対象の柱には腰壁が設けられており、実験ではその拘束の影響も模擬されていない。

そこで、本年度は降伏位置を定着延長筋端部に統一し、腰壁を有する試験体も計画した。そして、実験結果を考察するとともに昨年度の試験体も含めた各試験体を比較し、降伏位置、及び、腰壁の影響を検討した。

3. 実験概要

3.1 試験体

表-1 に本年度(2011 年度)の試験体諸元を昨年度(2010 年度)の試験体とともに示す。図-3 に本年度作製した試験体の形状と配筋を示す。表-2 に本年度の使用鉄筋の材料特性を、表-3 に各試験体の強度計算値を、それぞれ示す。なお、φ4の降伏点は0.2%オフセット法により求めた。また、せん断強度、曲げ強度時せん断力は文献 3)によった。

試験体は昨年度と同じく実物の約 1/2 縮小モデルとし、主筋と帯筋の配筋も同じである。定着延長筋は昨年度の試験体が α 鉄筋のみを模倣し片側 1-φ13 だったのに対し、今年度は β 鉄筋も考慮し、片側 3-φ13 とした。この

配筋により昨年度はSIM-Lが柱脚の基部の曲げ降伏で最大強度が決まっていたのに対し、今年度は3体とも定着延長筋端部の曲げ降伏で最大強度が決まった(表-3の破壊モード欄参照)。実験パラメータの1つ目はこの定着延長筋の長さであり、SIM-LL, SIM-L-kはSIM-L(α 鉄筋

を模擬)と同じ、SIM-S-kはSIM-S(β 鉄筋を模擬)と同じとした。2つ目は腰壁の有無で、SIM-LLは昨年同様腰壁がなく、他の2体は可撓部分の寸法はSIM-LLと同じだが、柱脚の左右に腰壁を設けている。なお、腰壁は壁厚(60mm)は実物を模擬しているが、その配筋($\phi 6$)と高さ(220mm)は損傷させないことを前提に実物を模擬していない。

表-4 実験結果一覧

発生事象	SIM-LL	SIM-L-k	SIM-S-k
曲げひび割れ発生 部材角 $[(\times 10^{-3})\text{rad}]$ (強度[kN])	1.45 (34.8)	0.816 (25.0)	0.398 (20.1)
斜めひび割れ発生 部材角 $[(\times 10^{-3})\text{rad}]$ (強度[kN])	4.11 (45.8)	2.03 (35.0)	1.22 (29.9)
主筋降伏部材角 $[(\times 10^{-3})\text{rad}]$ (降伏位置[mm])	9.8 (980)	9.34 (980)	9.79 (980)
帯筋降伏部材角 $[(\times 10^{-3})\text{rad}]$ (降伏位置[mm])	13.7 (196)	-	-
正最大耐力[kN]	57.3	47.5	44.1
負最大耐力[kN]	55.9	51.2	46.3
正最大耐力80%低下時 部材角 $[(\times 10^{-3})\text{rad}]$	16.3	18.9	60.0
負最大耐力80%低下時 部材角 $[(\times 10^{-3})\text{rad}]$	15.0	19.3	60.0
残存軸耐力[kN] (軸力比)	219 (0.134)	287 (0.176)	853 (0.522)

3.2 加力方法

図-4に加力装置を示す。载荷は前载荷として通常の曲げせん断加力実験を行い、その後、後载荷として残存軸耐力実験を行った。

曲げせん断加力実験では、水平力は試験体の可撓部分の高さの中央に与え、左右のオイルジャッキによりL型鉄骨フレームの水平を保ち、試験体の上下で逆対称変形になるようにした。定軸力は80kNとし、正負交播繰り返し水平载荷を行った。载荷履歴は、部材角が4/200radまでは1/200radずつ増加させ、8/200radまでは2/200radずつ増加させた。それ以降は4/200radずつ増加させ、各部材角につき正負それぞれ2サイクルずつ行い、軸力負

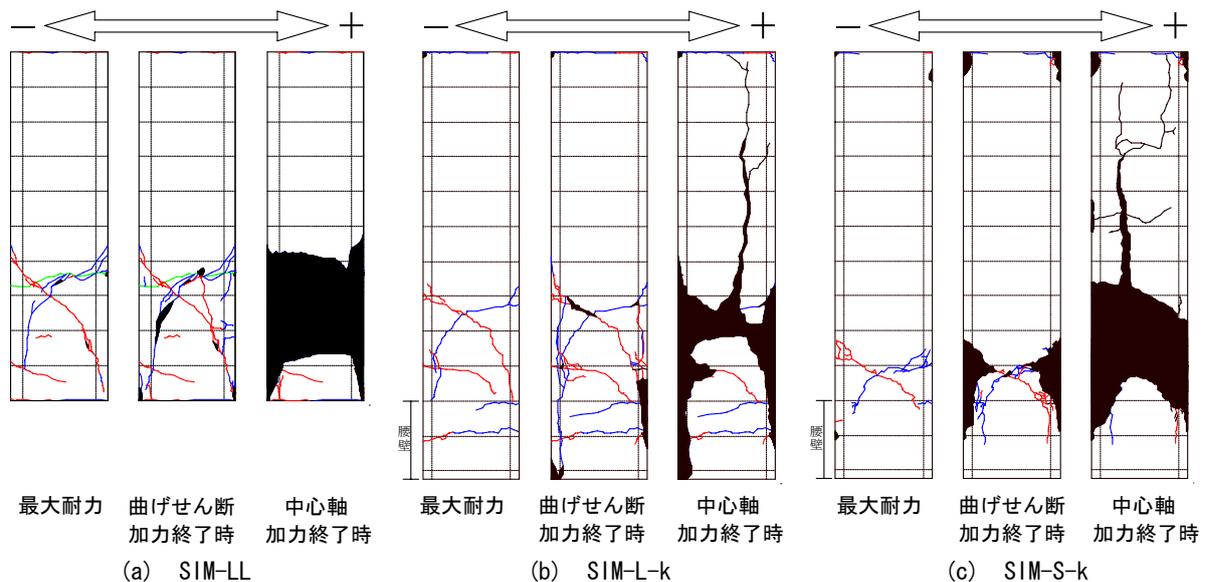


図-5 ひび割れ図

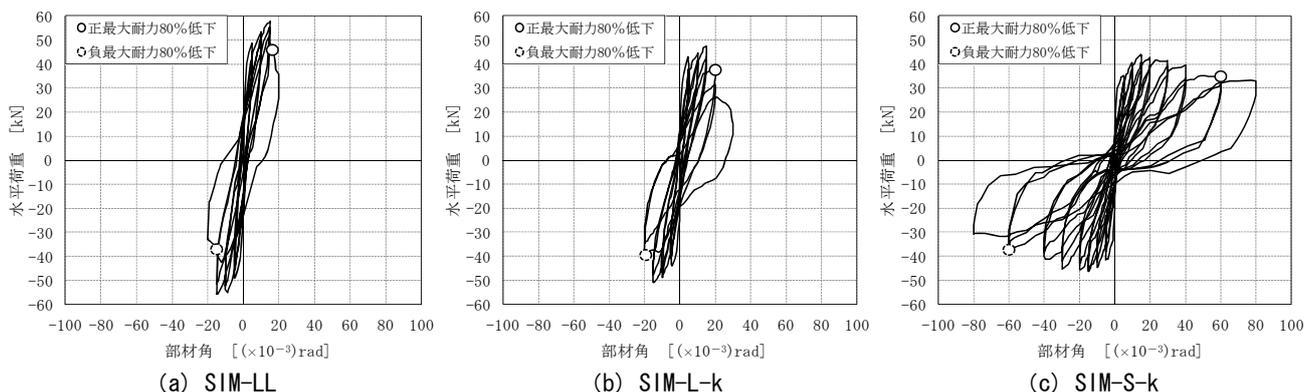


図-6 荷重-部材角関係

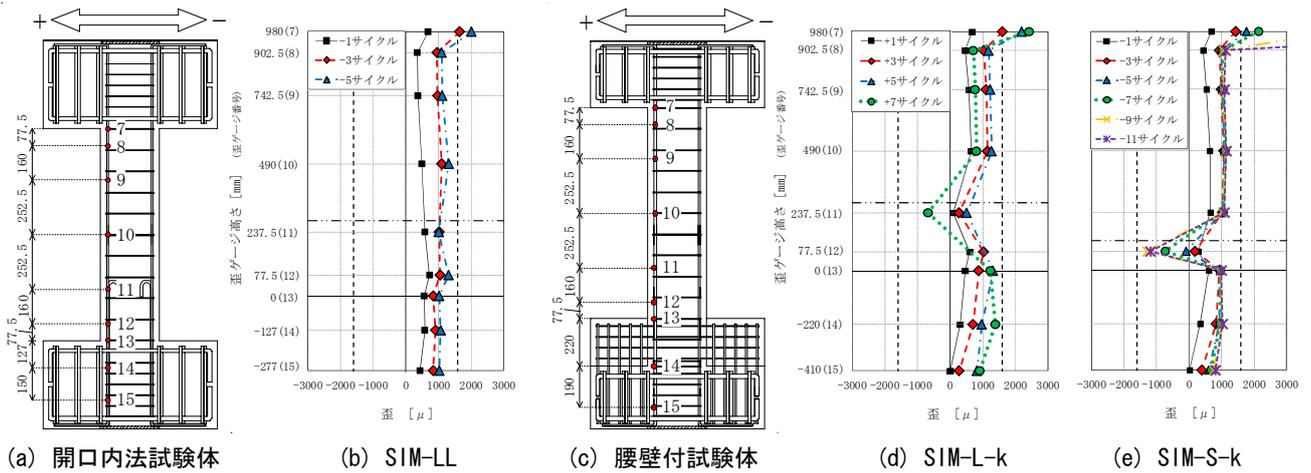


図-7 歪ゲージ位置と歪分布

担能力喪失まで、または、16/200radまで行った。

前載荷終了後、後載荷として残存軸耐力を確認するために中心軸加力を行った。その際、水平変位を 0mm に戻し、変位を拘束した状態で軸加力を行った。

4. 曲げせん断加力の実験結果

4.1 荷重-変形関係

表-4 に本年度の実験結果一覧表を示す。ここで、ひび割れは目視観察により最初に確認した時点を示し、発生していない事象はハイフンで示した。鉄筋の降伏位置は柱脚を基準とした高さである。図-5 に最大耐力時、曲げせん断加力終了時、中心軸加力終了時の柱部分のひび割れ図を示す。線はひび割れを、塗り潰されている部分はコンクリートの剥落を表している。図-6 に荷重-部材角関係を示す。縦軸は水平荷重、横軸は水平変位を試験区間長で除した部材角である。なお、変形能は最大耐力 80% 低下時変形角で評価する。図-7 に柱脚を基準とした歪ゲージ位置とその番号を示した図と、負側の奇数サイクルピーク時における同一主筋の軸方向の歪分布を示す。点線は主筋降伏歪、二点鎖線は定着延長筋端部位置を示している。なお、歪ゲージの剥離等により測定できていないサイクルは除外した。

結果を見ると、3 体とも定着延長筋端部から斜めひび

割れが発生しており、ひび割れ性状は図-1 に示した実現象を再現できた。SIM-LL は斜めひび割れが横切る位置 (196mm) の帯筋が降伏し、その後、急激な耐力低下を起こした。SIM-L-k は帯筋が降伏しない点で SIM-LL と異なるものの、急激な耐力低下を起こし、SIM-LL と近い結果となった。SIM-S-k は長い定着延長筋を有する試験体と異なり、急激な耐力低下を起こさず、変形能は低下しなかった。主筋の歪については、主筋が丸鋼であるためコンクリートとの付着が不十分で引張状態となっているが、腰壁付試験体は定着延長筋端部付近で乱れている。これは、端部位置に発生したひび割れに沿ったせん断変形に伴うせん断力に抵抗したためと考えられる。SIM-LL についても+5 サイクルで端部付近の歪が圧縮方向に変動していることから、その後のサイクルで測定できていたなら、腰壁付試験体と同様の推移をすると予想できる。残存軸耐力については、SIM-LL、SIM-L-k は SIM-S-k に比べ大幅に低下した。これは、SIM-LL、SIM-L-k は軸加力により斜めひび割れにずれが生じたが、SIM-S-k は斜めひび割れの角度がなだらかなためにずれが生じにくいためと考えられる。

次章以降、以上の結果と文献 2) で報告した SIM-0、SIM-S、SIM-L の実験結果から定着延長筋と腰壁が柱に及ぼす影響を考察する。

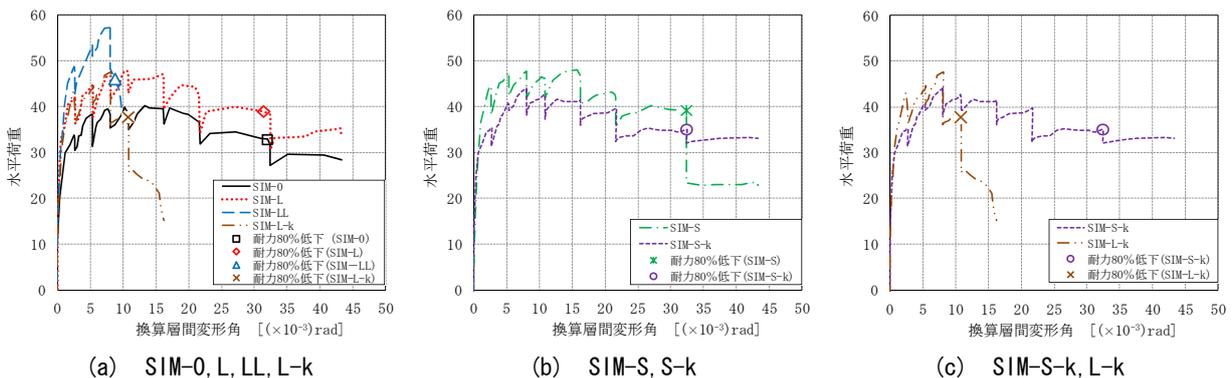


図-8 強度と変形能の比較

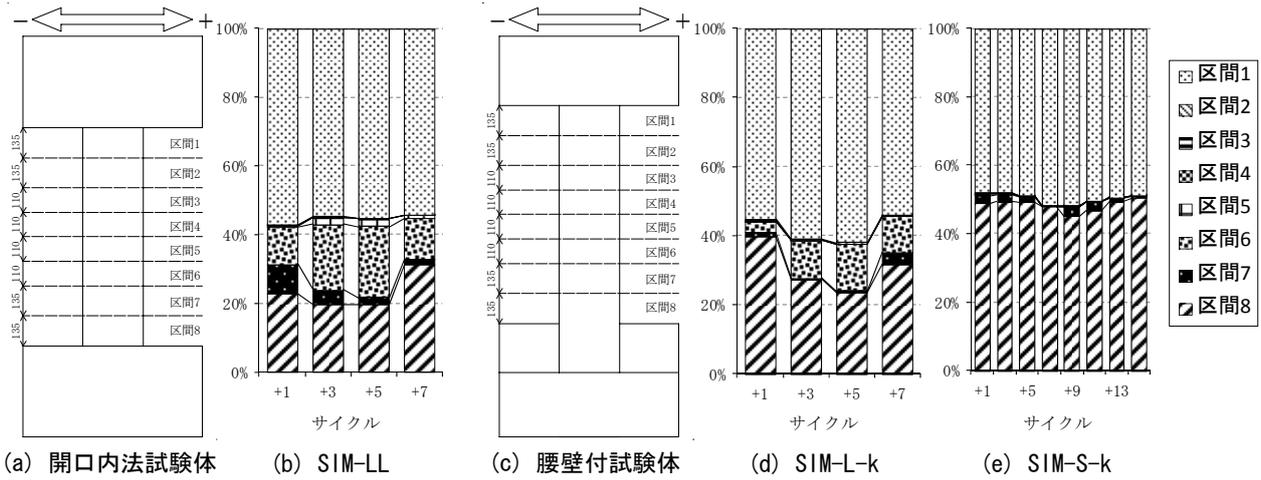


図-9 測定区間と曲げ変形割合

5. 曲げせん断加力実験の結果の考察

5.1 強度と変形能

図-8 には、正方向の変形能が小さいことが多いので、正方向の荷重-層間変形角関係の包絡線を各試験体と比較した図を示す。縦軸は水平荷重を、横軸は式(1)により S 小学校の層間変形角に換算した値である。

$$R_{story} = (h_0/H) \cdot R_{mem} = (2/3.7) \cdot R_{mem} \quad (1)$$

ここで、 h_0 は内法高さ、 H は層の高さ、 R_{mem} は部材角、 R_{story} は換算層間変形角、である。

図-9 に曲げ変形成分を測定するために試験体の軸方向で 8 区間に分割した測定区間と、正側の奇数サイクルピーク時の各区間の曲げ変形割合を示す。なお、コンクリートの剥落等により測定できていないサイクルは除外した。

(1) 降伏位置による影響

昨年度の試験体 SIM-L は、短い定着延長筋を無視したために柱脚が降伏し、柱脚のひび割れが広がったため、変形能は低下しなかった。これに対し、SIM-LL は短い定着延長筋を考慮し（試験体としては長さを統一した）、

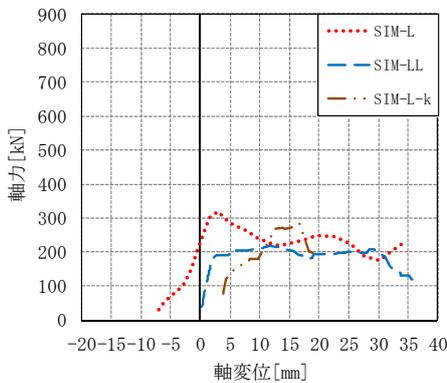
定着延長筋端部を降伏するよう設計したため、図-9 (b) に示すように試験区間の下半分の割合が区間 8 だけでなく、区間 6 でも大きい。すなわち、柱脚の曲げひび割れは SIM-L ほど広がらず(文献 2) 参照)、定着延長筋端部に発生した斜めひび割れが広がった。その結果、斜めひび割れ面のかみ合い作用の悪化が早くなり、変形能は SIM-L に比べ低下したと考えられる。

(2) 腰壁の有無による影響

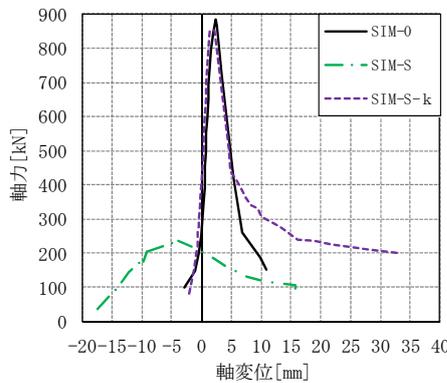
基礎が剛の SIM-LL に対し、腰壁を設けた SIM-L-k は曲げ強度が低下した。これは、腰壁がとりついたことにより、柱脚の圧縮コンクリートストラットの合力位置が柱中心方向に移動、すなわち、柱の可撓長さが長くなることと同様の効果があったと考えられる。また、曲げ強度は低下したが、腰壁がついたことによる基礎反力の抵抗力の低下が変形能の低下を引き起こすことはなく、変形能は SIM-LL とほぼ同程度であった。

SIM-S と SIM-S-k についても SIM-LL と SIM-L-k と同様の関係が得られた。すなわち、基礎が剛の昨年度の試験体 SIM-S に対し、腰壁を設けた SIM-S-k は曲げ強度が低下した。また、変形能は SIM-S と同程度であった。

以上はいずれも柱脚が降伏しない場合であるが、柱脚



(a) SIM-L, LL, L-k



(b) SIM-0, S, S-k

図-10 軸力-軸変形関係

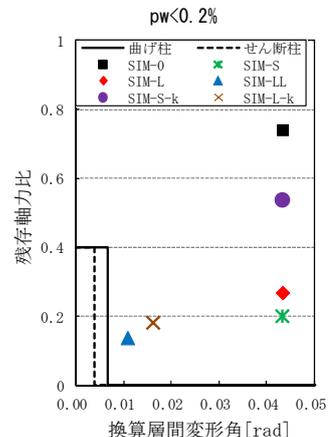


図-11 耐震診断基準と実験結果比較

が降伏する場合も曲げ強度が低下し、変形能は変化しない、といった同様の影響があると想像できる。ただし、軸力が大きくなるとコンクリートの拘束力が小さくなる腰壁付きの場合、変形能は悪化する可能性がある。

(3) 定着延長筋の長さによる影響

定着延長筋の長い SIM-L-k に対し、定着延長筋の短い SIM-S-k は変形能が低下しなかった。実験結果では、定着延長筋の長さの違いにより、SIM-L-k の曲げひび割れが斜め 45 度に進展したが、SIM-S-k の曲げひび割れが進展した角度はなだらかであった(約 25 度)。それにより、SIM-L-k に比べ SIM-S-k はひび割れ面のかみ合い作用の悪化速度が遅く、ひび割れ面のずれが生じにくいと考えられ、その結果、変形能は低下しなかったと推察される。

6. 残存軸耐力実験の結果と考察

図-10 に軸力-軸変形関係を各試験体で比較した図を示す。縦軸は軸力、横軸は軸変形である。なお、前載荷開始時における軸変形を 0mm とし、圧縮側を正としている。すなわち、試験体は前載荷終了時(後載荷開始時)には試験体が伸びた状態であることが分かる。

(1) 降伏位置による影響

柱脚が降伏する SIM-L に対し、定着延長筋端部が降伏する SIM-LL は残存軸耐力が低下した。これは、曲げせん断加力時に斜めひび割れのひび割れ幅が広がり、ひび割れ面のかみ合い作用が大幅に悪化し、ずれが生じやすいためと考えられる。

(2) 腰壁の有無による影響

腰壁を設けない SIM-LL に対し、腰壁を設けた SIM-L-k は残存軸耐力が上昇した。これは、斜めひび割れが腰壁のとりついている区間(図-5(b)の腰壁接合区間)にまで進展しており、中心軸加力時の斜めひび割れ面のずれに対し、腰壁が抵抗力として働いたためと考えられる。

腰壁を設けない SIM-S に対し、腰壁を設けた SIM-S-k は残存軸耐力が上昇した。SIM-S は曲げせん断加力時、基礎まで到達していた斜めひび割れ全体が広がっており、ひび割れ面のかみ合い作用は悪化していたと考えられる。一方、SIM-S-k は SIM-L-k 同様、斜めひび割れが腰壁のとりついている区間(図-5(c)の腰壁接合区間)にまで進展しており、曲げせん断加力時にはその進展したひび割れは腰壁の抵抗力の影響によりひび割れ全体では広がらず、ひび割れ発生源とその交点までのひび割れが広がっていた。さらに、斜めひび割れ角度がなだらかであることも影響し、ひび割れ面のずれが生じにくく、結果、SIM-S-k は残存軸耐力が大幅に上昇したと考えられる。

最後に耐震診断基準における残存軸耐力の評価法を検討する。図-11 に耐震診断基準と実験結果の比較を示す。縦軸は残存軸力比、横軸は換算層間変形角であり、

診断基準で期待して良い残存軸力比を曲げ破壊とせん断破別($pw < 0.2\%$)に示してある。変形能が悪く、残存軸力比も低い SIM-LL, SIM-L-k においても安全側となっていることが分かる。

7. 結論

- (1) 定着延長筋端部が降伏する場合で、なおかつ、そこに入る曲げひび割れが斜め 45 度程度で進展する場合、変形能が低下した。これは、ひび割れ面の滑り摩擦抵抗が低下したためと考えられる。
- (2) 腰壁で拘束される場合、曲げ強度は低下した。これは圧縮コンクリートストラットの合力位置が柱中心方向に移動したためと考えられる。変形能は腰壁のない場合とそれほど変わらない。
- (3) 残存軸耐力は定着延長筋の存在そのものにより、変形能の大小に拘らず、大きく低下する。ただし、定着延長筋が短く、かつ、腰壁がある場合、低下しない可能性がある。
- (4) 以上の実験結果より、中越沖地震で被災した S 小学校の 2 階柱は、定着延長筋端部からの斜めひび割れにより変形能が決定したと考えられる。耐震診断では変形能力のある曲げ降伏型と評価されているが、腰壁と定着延長筋の影響により、強度と変形能は診断による性能を発揮していないと考えられる。

8. 今後

今後の課題として、定着延長筋による強度と変形能の定量的評価法の提案、および、評価モデルを用いた S 小学校の地震応答解析による被害の理解、が挙げられる。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金：基盤研究(C)「実際の配筋を考慮した地震被害を説明しうる RC 造柱の変形能の評価法の検討(研究代表者：中村友紀子)」による。

参考文献

- 1) 長橋鉄雄, 佐藤祐次, 加藤大介, 中村友紀子: 中越沖地震で被害を受けた RC 造学校建物の柱の崩壊形に及ぼすカットオフされた主筋の影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.32, No.2, pp.1105-1110, 2010
- 2) 吉沢克司, 広瀬祐三郎, 長橋鉄雄, 加藤大介: 中越沖地震で被害を受けたカットオフ主筋を有する RC 造柱の静加力実験, コンクリート工学年次論文集 Vol.33, No.2, pp.1099-1104, 2011
- 3) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物耐震診断基準・同解説 2005