

論文 腰壁・垂れ壁付 RC 造柱の構造スリットに関する実験的研究

渡部 洋*1・佐藤 公彦*2・洪 杰*3・江波戸 和正*4

要旨：構造スリットを設けた腰壁・垂れ壁付き RC 造柱に関しては一連の実験的研究、及び有限要素解析による検証があるが、本研究で扱う二次壁に対する触れ止め防止の鉄筋を含んだ種々の理由により切り残し部分が存在する場合の構造スリットに関する研究は決して多くなく、既往の構造スリットとの相違点の解明が求められている。そこで、本研究では、その相違点を明らかにするために 4 体の試験体を製作し、静的加力実験を行い、合わせて有限要素解析により検証を行ったので報告する。

キーワード：構造スリット、部分スリット、剛性、破壊モード、靱性

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下 RC と略記)造建築物において、構造上以外の種々の理由で架構に図-1(b)のような腰壁・垂れ壁など二次壁が計画される場合が多くある。この場合、図-1(a)のような独立柱が持つ変形性能を得るために、図-1(c)のようなスリット(以下構造スリットと記す)を柱と二次壁の境界に施す事がある。このような構造スリットを設ける事は、1968 年十勝沖地震で発生した RC 造建築物中の短柱に対するせん断力の集中から起こる脆性的なせん断破壊を避け、曲げ破壊を先行させて、柱の靱性能を改善する事を主目的としている。上記した構造スリットに関して、広沢等^{1),2)}は、腰壁・垂れ壁付き柱に構造スリットを施した試験体に繰り返し水平静加力を行い軸力比の大小、柱と壁の偏心接合、柱の帯筋量、構造スリットの有無等の影響に関して実験的に検討している。また、野口等^{3),4)}は、広沢等の 2004 年の実験における RC 造腰壁・垂れ壁付き柱の試験体を解析対象とした 3 次元有限要素解析を遂行し、同実験の確認及び検討を行っている。

広沢等の研究は、柱と腰壁・垂れ壁の境界全線に互り構造スリット(部分スリット)を施した試験体に対して検討を行ったものであるが、本研究は、写真-1 のように開口部近傍に窓台を有する時に窓台部分を切れずに高さ方向に切り残し(以下残存部と記す)を生じる場合、及び腰壁の転倒防止として、また最低限の補強として開口部に最も近い鉄筋一本(以下防止筋と記す)を含んだ切り残し部分を故意に生じさせた場合に短柱の脆性挙動の改善効果にどのような影響を与えるかを実験的に検討する事を目的とした。また、3 次元有限要素解析により、実験試験体の確認及び検討、さらに全線部分スリットを施したモデルの検証ならびに残存厚をパラメータとした検討を加えた。

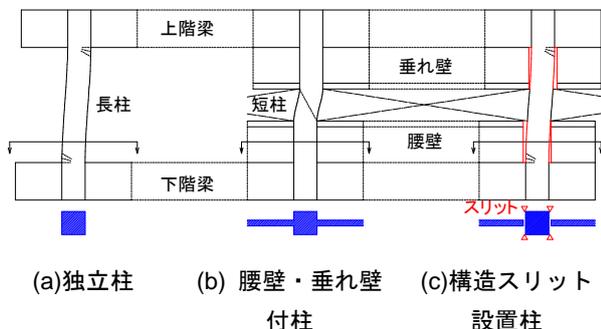


図-1 腰壁・垂れ壁付き柱に対する構造スリット改修



写真-1 窓台付き開口の例

2. 試験体概要

2.1 試験体

試験体詳細ならびに諸元を図-2、表-1 に示す。本研究では、構造スリットを施した 2 体の試験体(図-2(c), (d))は、柱と二次壁の境界線方向に窓台を有する場合、及び二次壁に対する転倒防止及び振れ止め補強を行う場合を考慮して、防止筋を含む残存部(開口部側は長さ 50

*1 関東学院大学 工学部建築学科 准教授 工博 (正会員)

*2 関東学院大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*3 JIP テクノサイエンス株式会社 工博 (正会員)

*4 関東学院大学 工学部建築学科 助教 工博 (正会員)

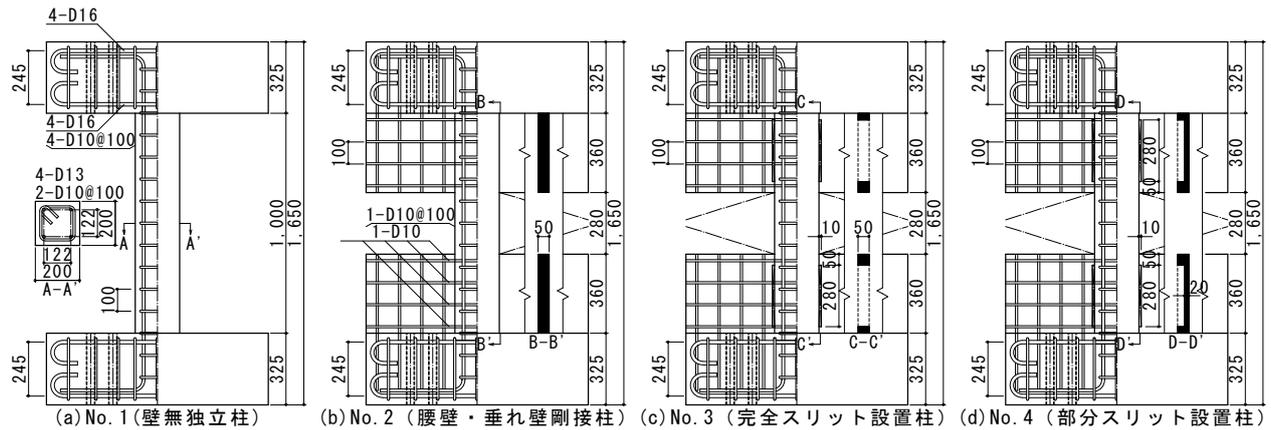


図-2 試験体詳細

表-1 試験体諸元

No.	柱		腰壁・垂れ壁			スリット			コンクリートの機械的性質			
	p_t [%]	p_w [%]	高さ [mm]	厚さ [mm]	p_s [%]	長さ [mm]	深さ [mm]	幅 [mm]	材令 [日]	σ_B [N/mm ²]	cE [kN/mm ²]	$c\sigma_t$ [N/mm ²]
1	0.79	0.71	360	50	—	—	—	—	38	35.9	29.4	3.2
2					—	—	—	40	36.8	30.7	3.5	
3					280	50	10	40	36.8	30.7	3.5	
4					280	30	—	42	36.4	32.4	2.7	

p_t : 引張鉄筋比, p_w : せん断補強筋比, p_s : 壁筋比, σ_B : 圧縮強度, cE : ヤング係数, $c\sigma_t$: 引張強度

表-2 鉄筋の機械的性質

呼径	sE [kN/mm ²]	σ_y [N/mm ²]	σ_u [N/mm ²]	ϵ_y [μ]	ϵ_u [%]
D10	179	346	476	1929	19.9
D13	183	344	495	1887	21.0
D16	183	342	497	1871	20.5

sE : 鉄筋のヤング係数, σ_y : 降伏点, σ_u : 引張強度, ϵ_y : 鉄筋の降伏ひずみ度, ϵ_u : 伸び

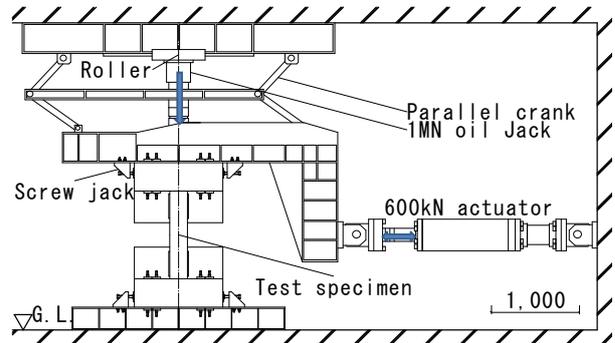


図-3 加力装置図

mm, 上下梁側は 30mm)を設定している。また、同 2 体の試験体は、図-2(c)のように柱と二次壁の境界線に沿って残存部を除き壁の厚さ方向を完全に切り抜く試験体(以下完全スリット試験体と記す)と、図-2(d)のように残存部を除き厚さ方向に一定量の切り残し(以下残存厚と記す)を存在させた試験体(以下部分スリット試験体と記す)である。さらに、前述の試験体 2 体に対する比較のために独立柱と構造スリットを施さない腰壁・垂れ壁付き試験体を製作しており、合計 4 体である。また、試験体の寸法は荷重装置の関係で実大スケールの約 1/3 とし、柱断面: 200mm×200mm, 梁断面: 450mm×325mm で各試験体に共通とした。ここで、梁は柱より先に破壊しないように設計している。また、独立柱の内法高さは 1000mm, 腰壁・垂れ壁付き柱の内法高さは 280mm, 梁を含む試験体の全体高さは 1650mm である。

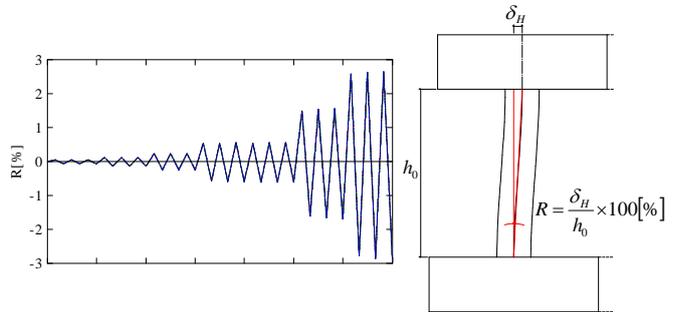


図-4 加力サイクル

図-5 柱の部材角定義

柱主筋の配筋は 4-D13 とし、壁縦筋の梁への埋め込み定着長さは 140mm とした。構造スリット位置の壁横筋は、No.2 は全ての横筋を保持し柱に貫通させ、No.3 は開口部近傍の一本を残し後の全てを切断、No.4 は開口部近傍の一本を残し後の全ての鉄筋を断面半分まで切り落と

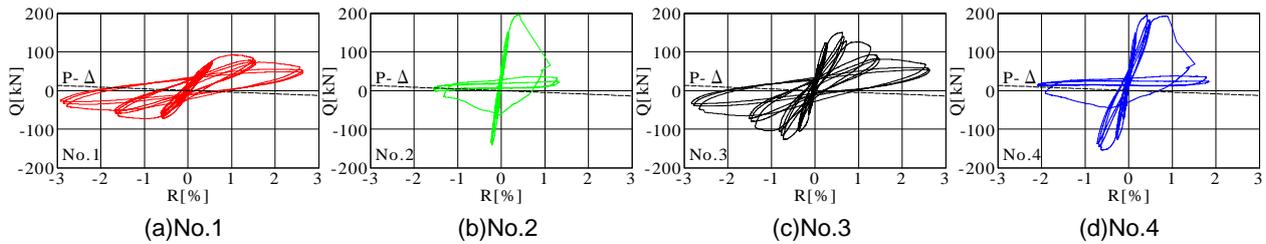


図-6 水平荷重一部材角関係

している。コンクリートは設計基準強度を F_c21 とし、鉄筋 SD295A を採用している。鉄筋の機械的性質を表 2 に示す。

2.2 加力及び測定方法

加力装置を図-3 に示す。鉛直方向の加力は柱軸力比 0.3 の一定軸力となるように制御した。また、水平方向の加力は 600kN アクチュエータのストローク変位に基づく変位漸増正負交番繰り返し载荷とした(図-4)。なお、実際に柱の経験した部材角 (R) は図-5 により求めている。

3. 実験結果

3.1 水平荷重一部材角関係

実験で得られた各試験体の水平荷重一部材角関係を図-6 に示す。破線は軸力による $P-\Delta$ 効果の影響分を示す。

3.2 破壊性状

各試験体の最終破壊状況を図-7 に示す。No.1 は上下階梁と柱の境界部に曲げひび割れが生じ、No.3 はスリット端部に曲げ破壊と壁のひび割れが生じ、最終的に柱の曲げ破壊に至った。No.2 は柱中央にせん断ひび割れが生じ、最大荷重を迎えた後はせん断破壊により急激な耐力低下が生じ実験を終了した。同様に No.4 もせん断破壊が生じたが、No.2 とは異なり壁にせん断ひび割れが生じた。ここで、壁筋量が少ない既往の実験⁵⁾で見られた上下階梁と壁の境界部のひび割れは認められなかった。文献⁵⁾と比較すると、壁の形状は同じであっても、壁筋が増え、壁筋による引張・せん断抵抗が増大したと考えられる。No.1, 3 は柱の上下 2 箇所に損傷が分散する曲げ破壊の破壊性状を、No.2, 4 は中央 1 箇所に損傷が集中するせん断破壊を示した。また、柱と二次壁の接合面の増大に伴い、柱の破壊性状は曲げ型から脆弱なせん断型の破壊に変化した。

3.3 実験結果一覧

実験結果の一覧を表-3 に示す。No.1 は曲げ破壊、No.2 はせん断破壊するものとして設計された。ここでの破壊モードは、修正荒川式、並びに終局強度型設計指針の柱のせん断終局耐力評価に基づいて判定した。また、部分スリットを有する柱の可撓長さは、スリット長さを壁厚に対する残厚の比で低減した値をクリアスパンに単純累

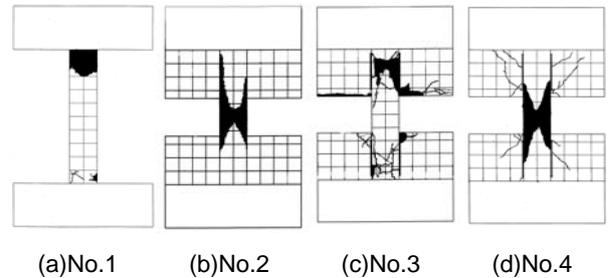


図-7 最終破壊状況

表-3 実験結果一覧

No.	k_{exp} [kN/mm]	k_{cal} [kN/mm]	Q_{max} [kN]	Q_{su} [kN]	V_{su} [kN]	Q_{fu} [kN]	Q_{su}/Q_{fu}	V_{su}/Q_{fu}	F.M.
1	24	43	92	119	133	82	1.46	1.63	曲げ
2	166	415	197	190	163	297	0.64	0.55	せん断
3	103	—	150	126	163	99	1.28	1.65	曲げ
4	163	—	194	138	162	134	1.03	1.21	曲げ

k_{exp} : 実験の初期剛性, k_{cal} : 計算上の初期剛性, Q_{max} : 最大せん断力実験値, Q_{su} : 修正荒川 mean 式に基づく柱の終局せん断耐力の計算値, V_{su} : 終局強度型設計指針式に基づく柱の終局せん断耐力の計算値⁶⁾, Q_{fu} : 多段配筋柱の終局曲げ耐力の計算値⁷⁾, F.M.: 破壊モード

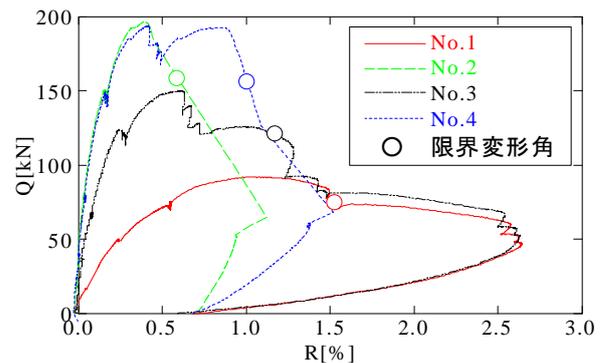


図-8 水平荷重一部材角関係の包絡線

加して求めた。

初期剛性、最大荷重は柱と二次壁の接合面が一番大きい No.2 が最大で、次いで No.4, No.3 の順に小さくなっている。また、実験による初期剛性は、柱部材の曲げ変形とせん断変形の和とした計算上の初期剛性よりも小さな値となった。

3.4 包絡線

各試験体の水平荷重一部材角関係の包絡線を図-8 に

示す。包絡線上で最大荷重から80%に低下した部材角(限界変形角)は、柱と二次壁の接合面の増大に伴い、小さくなった。

4. 既往の部分スリット設置柱の耐力評価式による検討

表-4に既往の残存部ならびに防止筋を有していない部分スリット設置柱を対象とした耐力評価式により、本研究のNo.4の実験結果の検討を試みる。ここでは、文献1),8),9)に示される柱の有効高さ h_{0e} の評価に基づくせん断耐力ならびに曲げ耐力を比較している。

本研究で取り上げたNo.4においては、柱せいの1/3を柱の有効高さ h_{0e} に考慮したとき、実験値とよく対応する結果が得られた。ここで、文献5)において報告したスリットの形状は同等だが壁筋量の少ないモデル($p_s=0.11\%$)においても同様に検討を行うと、文献9)の方法で柱の有効高さ h_{0e} を評価したとき、最もよい対応を示した。既往の評価式は残存部を有する部分スリット柱においてもある程度耐力を評価できることがわかる。

また、スリットの形状そのものは同等であっても、二次壁の補強筋が多くなると、柱の有効高さ h_{0e} が短くなることが示唆される。

表-4 既往の耐力評価式による検討結果

No.	Q_{max} [kN]	Q_{su1} [kN]	Q_{su2} [kN]	Q_{su3} [kN]	Q_{fu1} [kN]	Q_{fu2} [kN]	Q_{fu3} [kN]
4	194	187	157	164	199	134	149
4 ⁵⁾	144	192	162	169	198	162	148

Q_{su1} : 文献1)による h_{0e} 評価に基づくせん断耐力, Q_{su2} : 文献8)による h_{0e} 評価に基づくせん断耐力, Q_{su3} : 文献9)による h_{0e} 評価に基づくせん断耐力, Q_{fu1} : 文献1)による h_{0e} 評価に基づく終局曲げ耐力, Q_{fu2} : 文献8)による h_{0e} 評価に基づく終局曲げ耐力, Q_{fu3} : 文献9)による h_{0e} 評価に基づく終局曲げ耐力

5.3 次元有限要素解析による検証

5.1 解析概要

2章で遂行された試験体(No.1~No.4)計4体に対して、3次元非線形有限要素解析を行い検討した。また、既往の研究に見られる境界全線に部分スリットを施したモデルの検証を同有限要素解析により行い、さらに、残存部に防止筋一本を存在させたモデルに対して、残存厚をパラメータにとったケーススタディを行い適切な残存厚の検討を行った。なお、解析には汎用有限要素プログラムDIANA9.4.4¹⁰⁾を使用した。

5.2 解析モデル

コンクリートはアイソパラメトリック8節点ソリッド

要素を用い、構成則には直交異方性弾性モデルを使用した。コンクリートの等価応力-歪み関係を図-9に示す。

圧縮には Nakamura の圧縮破壊エネルギーに基づく Feenstra の放物曲線モデルを採用した。破壊規準は4パラメータ Hsieh-Ting-Chen 破壊曲面、ひび割れは回転ひび割れモデルを用い、引張強度に達しひび割れ後の引張軟化にはひび割れ幅による引張破壊エネルギーに基づく Hordijk のモデルを採用した。さらに圧縮強度、ヤング係数は圧縮試験結果に従った。

鉄筋は軸方向剛性のみを考慮した線材要素を用いた。また、鉄筋の応力ひずみ関係はバイリニアとし、ヤング係数および降伏点は引張試験結果に従った。鉄筋・コンクリート間は完全付着と仮定した。

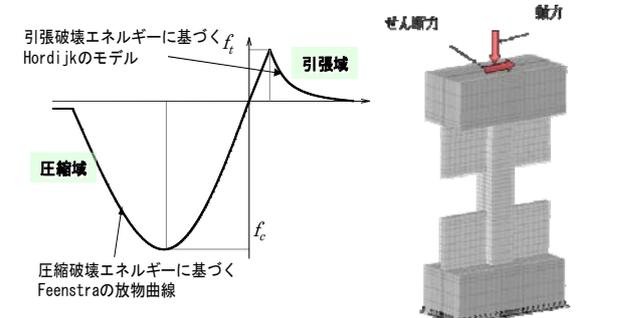


図-9 コンクリートの等価応力-歪み関係

図-10 要素分割および境界条件

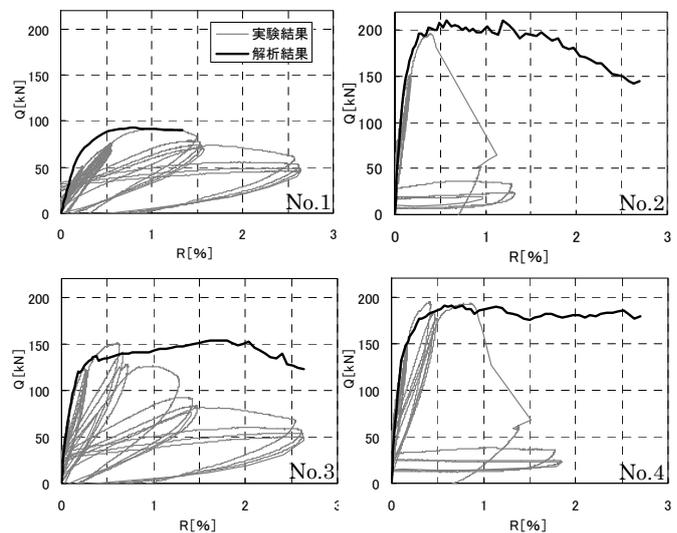


図-11 水平荷重-部材角関係

5.3 要素分割

図-10に要素分割および境界条件を試験体 No.2 を例として示す。下階梁の下面を完全拘束し、上階梁の上面には、実験と同様な軸力を荷重制御で与えた後、変位制御による水平荷重を単調に載荷した。

5.4 解析結果

解析結果から得られた水平荷重 Q -部材角 R 関係と実

験結果の比較を図-11に示す。試験体 No.1 において解析値の初期剛性が実験値より大きい、他の試験体では解析での初期剛性および $Q-R$ 関係は、実験値の最大耐力まではおおむね実験結果とよい対応を示している。また、部材角に対する対応は早期にせん断破壊を起こした試験体 No.2 を除き、部材角 0.6% までは解析が実験を追従できていると判断した。しかし試験体 No.2 に関しても他の試験体との比較上、部材角 0.6% までを実験との対応範囲としている。

図-12 に最大耐力近傍の部材角(R)=0.6% 時における試験体中央断面の最小主応力コンターを示す。No.1 の応力コンター図では上下梁と柱の付け根付近で圧縮応力が最も高く現れ、付け根コンクリートの曲げ圧縮破壊により最大耐力に達したと考えられる。完全スリットの No.3 は腰壁・垂れ壁の影響が小さく、No.1 の独立柱に近い圧縮応力の伝達機構を形成していると考えられる。

腰壁・垂れ壁付柱 No.2 の応力コンター図では、腰壁・垂れ壁が上下階梁と接する断面のほぼ全断面にわたって左側上部から右側下部への対角方向上で圧縮応力を伝達しているため、腰壁・垂れ壁の抵抗が最大耐力へ大きく寄与していると考えられる。部分スリットの No.4 も腰壁・垂れ壁の影響が No.2 より緩和されていると考えられる。また、No.2, No.4 の柱の内法高さ中央で応力を伝達しない赤色のコンター領域が表れている。文献 11 を参考

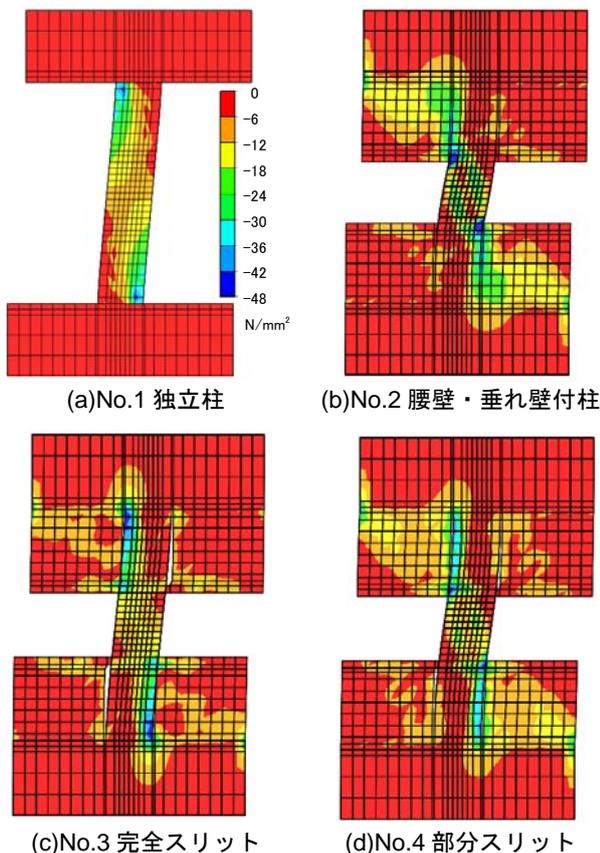


図-12 最小主応力コンター図(実試験体モデル)

にして、本解析では No.2, No.4 の内法高さ中央の要素において、最大耐力前の部材角 0.3% 時に圧縮主ひずみが圧縮強度時ひずみ度 2000μ を超え、圧壊したと判断した。すなわち、最大耐力時において圧縮ストラットのコンクリートが既に圧壊が生じたため、その周辺のコンクリートによって応力を伝達していると考えられる。

5.5 境界全線部分スリットモデルならびに残存厚の検討

本実験で用いられた腰壁・垂れ壁付柱に対し、既往の実験で用いられたように柱と二次壁の境界全線に互り部分スリット(残存厚 20mm)を施した試験体モデルに対する解析結果の最小主応力コンター(部材角 0.6% 時)が図-13 である。この結果は野口等の研究^{3),4)}の解析結果と同様の傾向を示し、脆性的挙動が改善された曲げ型破壊モードとなっている。

また、図-14 は防止筋 1 本を含む残存部(本実験と同じサイズ)で、防止筋以外の鉄筋は切断した場合の部分スリット試験体モデルに対し、残存厚 20mm, 10mm, 5mm と減少させていった解析結果の最小主応力コンター(部材角 0.6% 時)である。図-14(a)の 20mm では防止筋を含む残存部の影響が現れ、柱内法部分は圧縮ストラットのコンクリートで圧壊が生じる結果となっている。しかし、図-14(b)の残存厚 10mm から(c)の 5mm では圧縮ストラットの応力が周辺に分歧せずに伝達しているので、

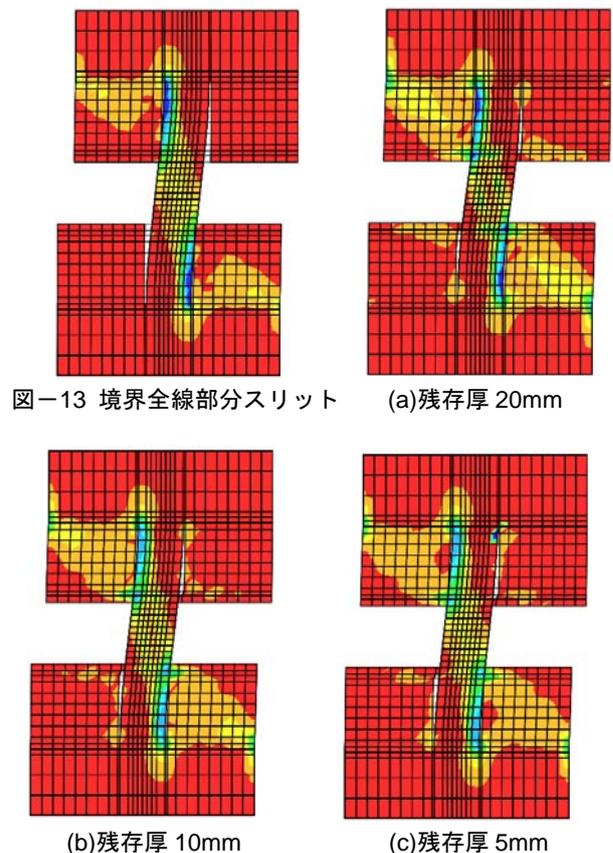


図-13 境界全線部分スリット

図-14 最小主応力コンター図(ケーススタディー)

柱の靱性能に対する改善の兆しが見られると推測される。なお、これらの推測は実験により確認する事が必要である。さらに、その解析結果の水平荷重 Q —部材角 R 関係を図-15 に示す。

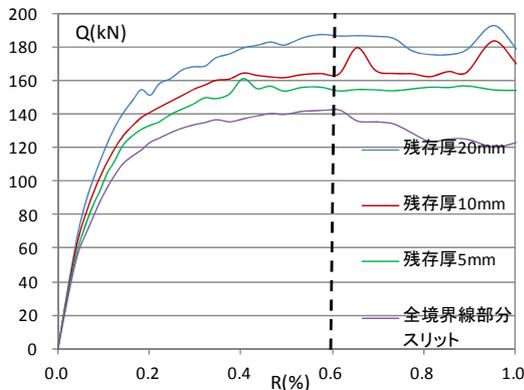


図-15 水平荷重 Q —部材角 R 関係

6. まとめ

- 1) 実験結果より試験体 No.3(完全スリット)は防止筋 1 本を含む残存部が存在していても柱の脆性挙動の改善となる事が分かった。
- 2) 本研究のような防止筋を含む残存厚のある腰壁・垂れ壁付柱は、既往の柱の有効高さの評価 h_{oe} でもある程度、終局強度を評価できる。しかし、破壊モードまで評価する事は難しく、正確な柱の有効高さを与える h_{oe} の設定に関しては今後の検討課題である。
- 3) 試験体 No.4(部分スリット)は試験体 No.2(腰壁・垂れ壁付柱)に比べ変形能力の改善が見られたが、その防止筋 1 本を含む残存部の影響で壁厚の 2/5 の残存厚ではせん断型の破壊モードとなった。3 次元有限要素解析結果の最小主応力コンター図においても、短柱部の中央部で圧縮応力を伝達できなくなる部分が生じ、圧縮ストラットの分岐が起こり、その周辺のコンクリートにより応力を伝達する状態となっており、これは実験の破壊状況に対応していると考えられる。
- 4) 1/3 スケールの試験体において、3 次元有限要素解析により、残存部に防止筋を含んだ部分スリットモデルに対して二次壁の残存厚を 20mm, 10mm, 5mm と変数にとり解析を行った。その結果、壁の残存厚が 10mm~5mm で短柱中央部の圧縮ストラットが周辺に分岐せずに柱の靱性能に改善の兆しが見られる結果となった。ただし、この結果は実験により確認する事が必要である。

謝辞

この研究に関して関東学院大学名誉教授の精木紀男先生に助言を頂いたのでここに記して深謝いたします。また、株式会社東京鉄鋼からは鉄筋をご提供いただきました。

た。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 澤口祐樹, 瀧澤正明, 小室達也, 広沢雅也: 偏心接合を有する RC 造腰壁・垂れ壁付柱の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.229-234, 2004.7
- 2) 瀧澤正明, 澤口祐樹, 小室達也, 広沢雅也: 大変形下における RC 造腰壁・垂れ壁付柱の耐震性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.235-240, 2004.7
- 3) 孫宏晨, 細野清子, 柏崎隆志, 野口博: RC 造腰壁・垂壁付き短柱の耐震性能改善に関する解析的研究(その 1: 解析概要および解析結果の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.297-298, 2009.8
- 4) 細野清子, 孫宏晨, 柏崎隆志, 野口博: RC 造腰壁・垂壁付き短中の耐震性能改善に関する解析的研究(その 2: 解析結果の検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.299-300, 2009.8
- 5) 渡部洋, Chailerd Preecha, 佐野ゆかり, 江波戸和正, 精木紀男: 鉄筋コンクリート造柱の曲げせん断性状に及ぼす構造スリットの影響, その 1 壁筋が少ないモデルの実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.153-154, 2011.8
- 6) 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
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート終局強度設計資料, 1987.9
- 8) (社)建築研究振興協会, 構造調査コンサルティング協会: 既存建築物の耐震診断・耐震補強設計マニュアル 2003 年版, 2003.8
- 9) 日本建築学会: 阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計, 1998.10
- 10) TNO DIANA: DIANA Finite Element Analysis, User's Manual Release 9.4.4, 2012
- 11) 洪 杰, 柏崎隆志, 野口博: 3 次元 FEM 解析による RC 造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.2, 2009.7