片側袖壁付き RC 柱における壁板の損傷軽減に関する研究 論文

木原 智美*1・鈴木 卓*2・倉本 真*3・倉本 洋*4

要旨:本研究は、袖壁付き RC 柱の損傷軽減を目的として、壁筋の定着状態および壁板スリットの有無を変 数とした静的載荷実験および FEM 解析を実施した。その結果,壁板に定着しないメッシュ筋を配した試験体 は在来配筋のものに比べて壁板に生じたひび割れの総伝播長さが短く、コンクリートの剥離を軽減できるこ とおよび壁板上下の端部にスリットを設けることにより壁板の損傷をさらに軽減できることを示した。 キーワード:袖壁付き RC 柱,静的載荷実験,FEM 解析,ひび割れ面積,剥離面積

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 造建物において、地震後に主 要構造部材の使用性には問題が無いにもかかわらず、袖 壁が大きく損傷したことで建物の取り壊しや大規模な修 復が必要となるケースが多く発生している。2011年の東 日本大震災においても袖壁の損傷が問題となった事例が 報告されている(例えば写真-1))。

上記のような問題の解決策として、炭素繊維シートの 巻き付けにより袖壁の性能を向上させる方法や構造スリ ットによって柱と袖壁を分離する方法などが挙げられる。 本研究では、主に後者に着目し、袖壁および周辺架構の 間の鉄筋の定着を最小限としながら一体的に施工し、か つ袖壁に伝達される応力が高くなると想定される箇所に 局所的なスリットを設けることにより, 袖壁の損傷軽減 を可能とする工法の開発を目的としている。

本論では、壁筋の種別と定着状態およびスリットの取 り付け状況を変数とした片側袖壁付き RC 柱の静的載荷 実験を実施し,その履歴特性および損傷状況を検討する。 また、三次元 FEM 解析の結果から当該部材の応力伝達 機構を検討する。



2. 実験概要

2.1 試験体計画

試験体は実大の約2/3スケールとして,4体作成した。 図-1 に試験体の形状および配筋詳細,図-2 に試験体 断面の形状および表-1に試験体諸元をそれぞれ示す。 試験体断面は柱が 400×400mm および壁板が 80×500mm であり、柱高さは1,600mmである。

実験変数は、壁筋の種類と定着状態および壁板のスリ ットの配置状態である。試験体 No.1 は壁筋に異形鉄筋 D6 を用いた在来配筋とし, 試験体 No.2 から No.4 は壁筋 にメッシュ筋を用い、柱および上下スタブへの定着を省 略した。また、試験体 No.3 は壁板および下スタブとの境 界にスリットを設け,試験体 No.4 は壁板および上下スタ ブとの境界の端部に半分のみスリットを設けた。

試験体 No.2 から No.4 に用いたメッシュ筋は、ダブル 配筋の φ2.6 の鉄線を 40mm 間隔で配し、試験体 No.1 の 壁筋比と概ね対応させた。また、試験体 No.2 から No.4 では、振れ止め筋として壁板の鉛直方向および水平方向 にそれぞれ 4-D6 を配筋した。

2.2 材料特性

コンクリートは目標圧縮強度を 30N/mm²とし,鉄筋に はD19 (SD345), D10 (SD295A) およびD6 (SD295A) を用いた。表-2 にコンクリートの材料特性を,表-3 に鉄筋の材料特性をそれぞれ示す。

2.3 載荷方法

図-3に載荷装置を示す。試験体は載荷フレームに PC 鋼棒で固定し、載荷フレームに取り付けた2台の鉛直オ イルジャッキ(各 2,000kN)によって一定軸力 1,000kN (柱軸力比で 0.2 相当)を作用させた後,反力壁に取り 付けた水平オイルジャッキ(2,000kN)によって正負逆 対称曲げせん断載荷を行った。水平力載荷は柱上下端の 相対水平変位δを柱内法高さ h=1,600mm で除した層間 変形角 R=δ/h による変位制御とした。

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 大学院生 (学生会員) *2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 助教 博士(工学) (正会員) *3 元大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 大学院生 (学生会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士(工学) (正会員)



載荷プログラムは R=0.25×10⁻²rad.を 1 サイクル行い, その後, R=0.50, 0.75, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0 および 4.0×10⁻² rad.を 2 サイクルずつ行った。

3. 実験結果

3.1 破壊性状およびせん断カー変形角関係

図-4 にせん断カー変形角関係を、図-5 に R=0.75× 10⁻²rad.終了時の破壊性状をそれぞれ示す。また、図-4 には最大耐力点、柱主筋降伏点、壁縦・横筋降伏点およ び平面保持を仮定した断面解析により算出した曲げ終局 強度計算値を併せて示している。

各試験体の柱の損傷状況に大きな差は見られず,柱頭 および柱脚において曲げせん断ひび割れの発生が確認さ れた。袖壁の損傷に着目すると,すべての試験体ともに 0.25×10²rad.のサイクルにおいてせん断ひび割れが発生 し,その後せん断ひび割れの進展および拡幅が確認され たが,試験体 No.2, No.3 および No.4 では柱および壁板 の境界付近のひび割れの拡幅が認められた。また, 試験 体 No.3 の正載荷側を除くすべての試験体では袖壁端コ ンクリートの圧壊の後に最大耐力に達したが, 試験体 No.3 の正載荷側では袖壁端コンクリートの圧壊は生じ なかった。

履歴特性に着目すると,試験体 No.2 の最大耐力および ひび割れ後の剛性は試験体 No.1 と比べて低く,壁筋の定 着を省略した影響が認められる。試験体 No.3 の正載荷側 は本論に示す試験体の中で最大耐力および初期剛性が最 も低くなり,壁脚にスリットを設けたことにより概ね柱 単体として曲げモーメントに抵抗したものと考えられる。 一方,負載荷側は試験体 No.2 と比べて最大耐力がやや低 い値を示すものの,ひび割れ後の剛性が同程度となり, 壁脚に設けたスリットの影響は認められない。これは, 試験体 No.2 および No.3 において負載荷時に上部では柱 と壁が,脚部では柱のみが曲げモーメントに抵抗するた めと考えられる。壁上下の端部にスリットを設けた試験 体 No.4 は試験体 No.2 と比べて壁上下端部のコンクリー トの断面積がスリットによって小さくなり、最大耐力お



よび初期剛性が低い結果となった。 3.2 袖壁付き柱の損傷評価

図-6 に負載荷1サイクル目の除荷時における壁板の 残留ひび割れ面積およびコンクリートの剥離面積の推移 を示す。ひび割れ面積は,残留ひび割れ幅に当該ひび割 れの長さを乗じたものとした。ひび割れ幅は2/3 スケー ル試験体を考慮して 0.15mm 未満,0.7mm 未満,0.7mm 以上の3段階(実スケールにおいて0.2mm 未満,1.0mm 未満,1.0mm 以上に相当)に分けて集計した。なお,ひ び割れ幅はクラックスケールを用いて測定し,ひび割れ 長さおよび剥離面積は各サイクル除荷時に撮影した写真 をCADデータとして取り込み集計した。

試験体 No.1 は変形角の増大に伴う壁板のひび割れ面 積および剥離面積の増加が顕著であり、全試験体の中で 損傷進行度合いが最も大きいことが認められた。壁筋の 定着を省略した試験体 No.2 の剥離面積は、0.75×10⁻²rad. まで試験体 No.1 のものと同程度の値となり,その後のサ イクルにおいて試験体 No.1 と比べて小さくなっている。 また,試験体 No.2 のひび割れ面積は試験体 No.1 と比べ て大幅に減少している。壁脚にスリットを設けた試験体 No.3 は試験体 No.2 と比べて,剥離面積の減少が見られ るものの,0.7mm 以上のひび割れ面積の増加が生じてい る。壁上下の端部にスリットを設けた試験体 No.4 は,他 の試験体と同様に壁板と柱の境界付近のひび割れが顕著 となるものの,ひび割れ面積および剥離面積の増加が軽 減されており,全試験体の中で最も損傷が少ない結果と なった。

4. FEM 解析

4.1 解析概要

図-7 に試験体 No.2 を例とした要素分割図を示す。試験体は面外方向について対称であるため、試験体の面外



方向の片側のみをモデル化した。境界条件は、下スタブ 底面における節点を完全固定とし、試験体切断面におけ る節点の面外方向変位を固定した。さらに、上スタブの すべての節点の鉛直方向変位量を同一とすることで、実 験と同様の逆対称加力とした。解析では、上スタブの上 端に強制変位を与えた。また、軸力はスタブ上端に一定 軸力を与えた。なお、解析は不釣合い力の収束計算が不 安定となった時点で終了した。鉄筋およびコンクリート の材料特性は表-2 および表-3 の値を用いた。解析に は市販の非線形 FEM 解析ソフト「FINAL」を用いた。

4.2 材料構成則

コンクリートは六面体要素に置換し、帯筋および壁筋 は埋め込み鉄筋として要素内に層状に置換した。なお, 壁筋は、試験体 No.1 では D6 を、その他の試験体ではメ ッシュ筋を使用しているものの、実験では両者に明確な 差異がみられなかったことから、本解析モデルでは同一 のモデルとした。ひび割れは分散ひび割れモデルを用い た。応力-ひずみ関係は修正 Ahmad モデルを採用し、三 軸応力下の破壊条件はOttosenの4パラメータモデル(畑 中らの係数)2)を用いた。ひび割れ発生後の圧縮特性の 劣化は長沼の提案式 3に従った。テンションスティフニ ング特性は長沼・山口のモデル 4を用いた。コンクリー トの履歴特性は長沼・大久保モデル 5を用いた。また, ひび割れ後のせん断伝達特性は長沼の提案モデル %に従 った。なお、実験では、載荷開始前に初期ひび割れの発 生が確認されたことから、文献 7)を参考にコンクリート のひび割れ強度を式(1)の半分の値に低減した。

$\sigma_{cr} = 0.313 \sqrt{\sigma_B}$

本論に示す試験体では、袖壁、柱および上下スタブの それぞれの間に離散ひび割れ要素を仮定し、各試験体の 壁筋の定着状態の影響を考慮した。離散ひび割れ要素は、 各試験体の柱と上下スタブの間および壁筋の定着のある

試験体 No.1 の壁板と上下スタブおよび柱の境界では剛



とし、それ以外ではコンクリート要素間の離散挙動を考 慮した。すなわち、鉄筋の定着のない要素では、圧縮側 を剛とし、引張側のひび割れ後の応力を0とした。また、 ひび割れ面のせん断応力ーすべり関係はバイリニアモデ ルを仮定し、最大せん断応力は Mattock のせん断摩擦式 ⁸⁾を参考に 2.8N/mm²とし、その時のすべり量は 0.05mm とした(図-8参照)。このとき、摩擦係数を1.0と仮定 し、面外圧縮力の作用によるせん断応力の増大を考慮し た。主筋および振止め筋はトラス要素に置換した。鉄筋 の応力ーひずみ関係は修正 Menegotto-Pinto モデル⁹⁾を採 用した。また、コンクリートおよび鉄筋の節点を別々に 定義し、接合要素を挿入することによって付着応力ーす べり関係をモデル化した。付着応力ーすべり関係は Naganuma らのモデル¹⁰⁾を仮定し、最大付着応力は靱性 指針¹¹⁾により算定した(図-9)。

5. 解析結果

5.1 実験結果との比較

図-10 に各試験体の実験値と解析値のせん断カー変 形角関係の比較を示す。各試験体ともに解析結果の初期 剛性は実験結果と概ね一致している。また,試験体 No.1, No.3 および No.4 の正載荷側の解析結果は実験結果と比 べてひび割れ後の剛性をやや過大評価するものの,各試 験体の最大耐力は実験結果とほぼ一致している。

図-11 に R=0.50×10⁻² rad.における解析結果および実 験結果の柱のひずみ分布を示す。ひずみの値は,実験で は柱主筋に貼り付けたひずみゲージの計測値を,解析で はひずみゲージ貼り付け位置とほぼ一致する位置のトラ ス要素の結果を示している。解析結果の各計測位置のひ ずみは実験結果とほぼ一致している。

以上のことから,本論に示す解析モデルは,ひび割れ 後の剛性をやや高めに評価するものの,総じて実験結果 と対応しているものと判断できる。

5.2 損傷状況および変形状況

図-12に各試験体のR=0.50×10⁻²rad.のサイクルにおけ る部材表面のひび割れ図を示す。同図は試験体の変形お よび要素のひび割れ幅をそれぞれ 10 倍に拡大して表示 している。

試験体 No.1 では,実験結果と同様に圧縮を受ける壁脚

(1)



の端部および壁と柱の境界付近の損傷の進展が顕著である。

壁筋の定着を省略している試験体 No.2 は,実験結果と 比べて壁板と柱の境界付近の損傷を過小評価しているも のの,解析結果では境界において鉛直ずれが生じている。 これは,図-6 に示すひび割れ面積の増加傾向と対応し ており,試験体 No.2 は試験体 No.1 と比べて壁板の損傷 が軽減されていることを示している。

試験体 No.3 の正載荷側では, 壁脚のスリットの影響に より柱および壁の境界の開きが大きく, 図-6 に示すコ ンクリートのひび割れ面積が試験体 No.2 のものと比べ て大きくなった原因と考えられる。また, 負載荷側では, 正載荷においてみられた壁板および柱の開きはなくなり, 試験体 No.2 と同様に袖壁端コンクリートの圧壊が認め られる。

試験体 No.4 では, 試験体 No.2 と同様に柱および壁の 境界においてずれの発生およびスリットを設けた壁脚コ ンクリートの圧壊が認められるものの,実験結果と同様 に壁板コンクリートの損傷は試験体 No.2 と比べて軽減

している。

5.3 最小主応力分布

図-13 に各試験体の 0.50×10⁻²rad.のサイクルにおける 最小主応力分布を示す。同図は解析モデルの面外方向の 試験体中心のものを示している。

試験体 No.1 では, 柱頭から壁脚にかけて圧縮ストラットの形成が認められ, 壁脚の広範囲に高い圧縮応力が生じている。

試験体 No.2 では, 壁板と柱の境界付近および壁脚の中 央付近の応力は試験体 No.1 のものと比べて低くなって いる。これは, 図-12 の損傷状況に示すように, 壁筋の 定着を省略した試験体 No.2 において柱および壁の境界 に生じたずれに起因するものであり, ひび割れ後の剛性 および最大耐力が試験体 No.1 と比べて低くなった一因 だと推察される。また, 試験体 No.2 の実験結果および解 析結果では最終的に壁脚の圧縮側端部コンクリートの圧 壊によって最大耐力に達していることから, 0.75×10⁻²rad. 程度までの変形角では壁筋の定着を省略することによっ て壁板のひび割れの進展は軽減できると考えられる。



試験体 No.3 の正載荷側では, 壁脚のスリットにより壁 板への応力伝達が制限され, 柱のみに圧縮ストラットが 生じている。一方, 負載荷では, 柱脚から壁頂および柱 頭にかけてそれぞれ圧縮ストラットの形成が確認され, 試験体 No.2 のものと同様の傾向を示している。すなわち, 壁脚にスリットを設けたとしても, スリットを設けてい ない壁板上部が圧縮を受ける場合は壁板から柱への応力 伝達により壁端部コンクリートの損傷が進行し, 図-6 に示すようにコンクリートの剥離面積の進行が生じる。

試験体 No.4 では, 試験体 No.2 と同様に柱頭からスリ ット端部および柱脚にかけて圧縮ストラットが形成され ている。しかし, 脚部の壁端に設けたスリットにより壁 板に形成されるストラットの応力は試験体 No.2 のもの と比べて小さくなり, 図-6 のひび割れ面積および剥離 面積の推移に示したように全試験体の中で最も損傷が軽 減される結果となったものと推察される。

6. まとめ

本研究では、片側袖壁付き RC 柱の静的載荷実験およ び三次元 FEM 解析を行い、当該部材の構造性能および 応力伝達機構を検討した。本論で得られた知見を以下に 示す。

- 在来配筋を施した片側袖壁付きRC柱では壁脚の広 範囲に高い圧縮応力が生じ,壁板のせん断ひび割れ およびコンクリートの剥離が顕著となる。
- 2) 壁筋の定着を省略すると、柱および壁の境界にずれ が生じることにより在来配筋のものと比べて柱か ら壁に伝達される応力が低くなり、壁板に生じるひ び割れを軽減することができる。
- 3) 壁筋の定着を省略し、さらに壁脚のみにスリットを 設けた場合でも、スリットを設けていない壁上部の 損傷を軽減することが出来ない。また、壁脚が圧縮 側となるとき、柱と壁板の境界の開きが顕著となり、 ひび割れ面積が増加する。
- 4) 壁筋の定着を省略し、さらに壁上下の端部にスリットを設けることによって、壁板に形成されるストラットの応力がスリットを設けていないものよりも

小さくなり,壁板におけるひび割れ面積および剥離 面積を軽減することができる。

謝辞

本研究は,東亜建設工業との共同研究である。また, 試験体に用いたメッシュ筋は小岩金網株式会社から提供 して頂いた。関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 日本建築学会:2011 年東北地方太平洋沖地震災害調 査速報,pp.439-456,2011.7
- 長沼一洋:三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひず み関係,日本建築学会構造系論文集,第 474 号, pp.163-170,1995.8
- 長沼一洋:鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解 析手法に関する研究(その1),日本建築学会構造系 論文報告集,第421号,pp.39-48,1991.3
- 4) 長沼一洋、山口恒雄:面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化、日本建築学会大会学術講演梗概集,構造Ⅱ,pp.649-650,1990.10
- 5) 長沼一洋,大久保雅章:繰返し応力下における鉄筋 コンクリート板の解析モデル,日本建築学会構造系 論文集,第536号, pp.135-142, 2000.10
- 6) 長沼一洋:鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解 析手法に関する研究(その1),日本建築学会構造系 論文報告集,第421号,pp.39-48,1991.3
- 7) 井本勝慶,米澤健次,加藤朝郎,川里健:1/4PCCV の耐圧限界挙動に関するラウンドロビン解析,コン クリート工学, Vol.41, No.1, pp.153-157, 2003.1
- 8) 日本建築学会:壁式プレキャスト構造の鉛直接合部 の挙動と設計法, 1989.4
- Ciampi, V, et al. : Analytical Model for Concrete Anchorages of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82/23, Univ. of California, Berkeley, 1982.11
- 10) Naganuma, K., et. al., : Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, 2004.8
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造物の靭性保証 型耐震設計指針(案)・同解説, pp.255, 1997