論文 曲げ破壊する RC はりの変形性状に関する実験

岡田 琢之^{*1}・斉藤 成彦^{*2}・檜貝 勇^{*3}

要旨:RC 部材の終局時に至る変形挙動を精度良く評価するためには,ポストピーク挙動に 対する各種要因の影響を把握し,終局時に至るまでの破壊挙動を明らかにすることが非常に 重要となる。そこで本研究では,鉄筋比の異なる RC はりの曲げ試験を行い,耐力が十分に 低下するまでの挙動を追跡することで,鉄筋降伏以後の変形性状や破壊挙動について詳細な 考察を行った。

キーワード:曲げ引張破壊,変形性状,圧縮破壊領域,ポストピーク挙動

1. はじめに

性能照査型設計への移行に伴い, RC 部材を 合理的・経済的に設計するためには,最大耐力 後,荷重が十分に低下し,破壊に至るまでのポ ストピーク挙動を十分に把握しておく必要があ る。しかしながら, RC 構造の耐力低下のメカ ニズムは十分に解明されているとは言い難い。

RC 部材のポストピーク挙動に関する解析的 研究は,近年,精力的に行われているが,最大 耐力後の軟化挙動と,破壊の局所化現象の再現 は,困難を極めている。実験においても,ポス トピーク挙動は,載荷装置の剛性や,載荷速度 などの様々な要因の影響を受けるので,詳細な 検討を行うためには,更なる実験データの蓄積 が必要である。

著者ら¹⁾は,曲げ圧縮破壊するコンクリート の柱部材における圧縮破壊領域および破壊領域 内の挙動を実験的に検討し,曲げ圧縮破壊する 部材では,鉄筋降伏前に圧縮縁コンクリートの 圧壊が始まり,徐々に荷重が低下する挙動を示 すこと,従って,解析では,圧縮側コンクリー トの構成モデルが,耐力低下挙動の評価に対し て重要となることを明らかにした。一方,主鉄 筋の降伏を伴う曲げ引張破壊する RC はりでも, 鉄筋降伏後の最終的な耐力低下は,コンクリー トの圧壊に起因するものと考えられる。

本研究では,曲げ引張破壊する RC はりの破 壊試験を行い,鉄筋降伏後,耐力低下を生じる までの変形性能,および最終的な耐力低下挙動 (ポストピーク挙動)の追跡を試みた。また, 部材任意断面高さでの軸方向ひずみ分布を測定 することにより,コンクリートの圧縮破壊が鉄 筋降伏後の変形性状に及ぼす影響について,詳 細な検討を行った。

- 2. 実験概要
- 2.1 供試体概要

表 - 1ならびに図 - 1に,実験を行った RC はり供試体の形状および材料諸元の概要を示す。 本実験では,曲げ引張破壊する RC はりを対象 とし,引張鉄筋比を 1.765%,1.126%,0.634% と変化させた。なお,釣合鉄筋比は約 4%であ る。供試体の等曲げ区間には,スターラップお よび圧縮鉄筋を配置せず,耐力低下に及ぼすコ ンクリートの圧縮破壊の影響について検討を行 った。また,比較のため,等曲げ区間にスター ラップおよび圧縮鉄筋を配置した供試体につい ても試験を行った。既往の研究 ¹⁾より,コンク リートの圧縮破壊領域は 300mm 程度であると 予測されるため,等曲げ区間長は 500mm とし

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)
*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 博(工) (正会員)
*3 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

せん断 等曲げ 圧縮強度 引張強度 主鉄筋 引張 等曲げ せん断 主鉄筋 中立軸 No. スパン スパン比 区間 降伏強度 区間内の 鉄筋比 スターラップ a/d (mm) (N/mm^2) (N/mm^2) (N/mm^2) (%) a(mm) (mm) B16-2A 39 35.4 3.1 B16-2B 34.7 3.3 2D16 362 1.765 40 B16-2C 38 36.2 3.1 無し B13 - 2850 5.667 500 2D13 31.8 2.9 361 1.126 28 B10-2A 14 34.7 2.8 358 0.634 B10-2B 2D10 13 37.1 3.1 3.4 BS10-2有り 26 38.9

表 - 1 供試体概要

た。表中の中立軸は,曲げ耐力時の算 定値である。コンクリートには,早強 ポルトランドセメントを使用し,粗骨 材は最大寸法 20mm の砕石を用いた。

2.2 載荷方法および測定方法

供試体の載荷方法ならびに測定方 法を図 - 2 に示す。供試体は単純はり とし,幅 80mm,高さ 30mmの鋼支圧 板を介して2点載荷を行った。載荷は 手動でジャッキ制御した単調漸増載荷 (載荷速度:4.0mm/min)とし,最大 耐力後,耐力が十分に低下するまで計 測を行った。はり断面幅中心に断面上 部より 30mm,60mmの高さで,弾性 係数 E=4.80GPa である異型に加工した 幅 10mm 高さ5mmのアクリル棒に, 50mmの間隔でひずみゲージを貼り付

けたものをコンクリート内部に配置して,コン クリートの局所ひずみを計測した。アクリル棒 による計測は,既往の研究によりその妥当性が 示されている¹⁾²⁾。主鉄筋にも,100mm 間隔で ひずみゲージを貼り付け,鉄筋のひずみ分布を 計測した。なお,ひずみゲージには塑性域ゲー ジを使用した。

3. 鉄筋比が変形性状に及ぼす影響

3.1 荷重 - 変位関係

図 - 3 に,鉄筋比が最大(鉄筋比1.765%)の 供試体 B16 - 2A, B16 - 2B, B16 - 2Cの荷重-







変位関係を示す。3 体とも,鉄筋降伏後,変位 が 30mm 前後に達するまで耐力を保持し,その 後,等曲げ区間内のコンクリートの圧壊が始ま ると,破壊の進行とともに,徐々に荷重が低下 している。耐力低下時における軟化曲線が,3 体で若干異なり,一部急激な耐力低下を示すも のが見られた。

図 - 4 に B13 - 2(鉄筋比 1.126%) B10 - 2A, B10 - 2B(鉄筋比 0.634%)の荷重 - 変位関係を 示す。いずれの供試体も,鉄筋降伏後,かなり の変位まで最大耐力を保持しているが,等曲げ 区間内のコンクリートの圧壊が生じると,急激



に荷重が低下している。

図 - 5 に鉄筋比の異なる三つの供試体 B16 -2B (鉄筋比 1.765%), B13 - 2 (1.126%), B10 - 2B(0.634%)の荷重 - 変位曲線を比較したも のを示す。また,図-6に実験終了後のひび割 れ状況を示す。鉄筋比の違いによって,鉄筋降 伏後の耐力を保持できる変形の大きさ,および その後の耐力低下挙動が大きく異なることがわ かる。鉄筋比の大きい B16 - 2B は ,鉄筋降伏後 , 比較的早い段階で等曲げ区間のコンクリートが 圧壊を始め,荷重は低下し始めた。この時,圧 壊は断面上部より徐々に断面下部に向かって進 行するため,荷重は比較的緩やかに低下した。 これは,曲げ圧縮破壊する RC はりの耐力低下 挙動に類似している。ひび割れ状況(図-6)か らも,等曲げ区間内のコンクリートの圧縮破壊 が,断面上部から下部に向かって広い範囲に渡 って進行していることがわかる。また,下部に 斜め方向のひび割れが発生し,X字状に破壊し ている。一方,鉄筋比の比較的小さい B13 - 2、 B10 - 2B では, 主鉄筋降伏後, かなりの変位ま



図 - 6 実験終了後のひび割れ状況 (B16-2B,B13-2,B10-2B)

で最大耐力を保持し,ある時点で等曲げ区間の コンクリートが断面上部の狭い範囲で剥離し, 急激な荷重低下を示した。曲げひび割れが断面 上部まで発達しており,圧壊は下縁に向かって 進行していないことがわかる。以上の結果より, 鉄筋比の増加に伴い,最大耐力は大きくなるが, 逆に降伏後の耐力を保持する区間は小さくなり, 耐力低下も緩やかになるといえる。

土木学会「コンクリート構造物の非線形解析 技術研究委員会(322 委員会)」では,供試体 B16 - 2A および B10 - 2A について,非線形有 限要素法によるパラメータ解析が実施された³。 その解析による荷重 - 変位関係で実験と違いが 生じたのは,耐力低下の挙動であった。鉄筋降 伏荷重および,降伏後,大きく変形を起こす挙 動については,比較的良く評価されているが, 耐力低下を起こすときの変位や低下勾配等を精 度良く再現するには至らなかった。つまり,は り部材解析の精度向上には,耐力低下を引き起 こす圧縮縁コンクリートの破壊挙動をより正確 に把握することが重要となる。



図-7 コンクリートおよび鉄筋のひずみ分布

3.2 ひずみ分布による破壊挙動の比較

等曲げ区間のコンクリートにおける圧縮破壊 の進展状況を,ひずみ分布より考察する。図 - 7 は,図 - 5 中に示した各記号時点で,等曲げ区 間において,断面上部より 30mm,60mm の各 位置で計測したコンクリートのひずみならびに 主鉄筋のひずみの分布を示したものである。こ こで,コンクリートのひずみはアクリル棒に貼 り付けたゲージにより計測された局所ひずみで ある。

鉄筋比が最大の B16 - 2B では,耐力が低下し 始める 時において,30mm の位置で,圧縮ひ ずみが大きく増加し,断面上部より圧壊が始ま っていることがわかる。その後,耐力がかなり 低下した 時においては,60mm 位置で圧縮ひ ずみが著しく増大しており,破壊領域が下方に 拡大していることがわかる。なお,30mm 位置 ではひずみが減少しているが,これはコンクリ ートの圧壊がかなり進行したため,アクリル棒 とコンクリートとの付着がなくなり,コンクリ ートの変形に追随できなくなったためと考えら れる。

鉄筋比が最小の B10 - 2B では,耐力が急激に 低下する直前の 時において,30mm の位置で は,部分的に圧縮ひずみが増大しているが, 60mm 位置では主に引張を受けている。その後, 耐力が急激に低下した後の 時において, 30mm の位置では,一部の区間で圧縮ひずみが 増大しており,ここで,断面上部のコンクリー トが圧壊したため,耐力低下が起きたと考えら



(B10-2B, BS10-2)

れる。また,60mm 位置では,依然として主に 引張を受けている。また,B13-2では,B16-2BとB10-2Bの中間の挙動を示した。

鉄筋比の大きい B16 - 2B のように,中立軸位 置が低く,断面内で圧縮力に抵抗する領域が広 い場合には,上縁でコンクリートの圧壊が生じ ても,圧縮力に抵抗する領域が断面下縁に徐々 に移行し,耐力低下が比較的緩やかに起こった と考えられる。逆に,鉄筋比の小さい供試体で は,中立軸位置が高く圧縮力に抵抗する領域が 狭いため,断面上縁で圧壊が生じると,圧縮力 を受け持つ断面が直ちに消失し,急激な耐力低 下を引き起こしたものと考えられる。また,耐 力低下後の 点で荷重を再び保持するのは,上 部コンクリートの消失後,ひび割れが閉じて接 触し,圧縮力に抵抗するようになったためであ る。以上のことから,中立軸位置の違いにより,



断面内で圧縮を受ける領域が異なると,耐力低 下時の挙動も大きく変化することが確認された。

既往の一軸円柱圧縮試験の研究⁴⁾によれば, 直径 100mm の円柱供試体における圧縮破壊領 域長さは約 250mm と定義されている。本実験 での部材中立軸高さは 15~40mm で,直径 100mmに比べ小さいが,30mm位置のひずみ分 布で見た部材軸方向の圧縮破壊領域長さは,ど の供試体においても円柱供試体の結果と近い値 を示している。

- 4. スターラップ、圧縮鉄筋の影響
- 4.1 荷重 変位関係

図-8に,等曲げ区間内のスターラップ,圧

縮鉄筋の有無に対する荷重 - 変位曲線を示す。 また,図 - 9 に,図 - 8 中における , の時点 でのひび割れ状況を示す。図によると,降伏荷 重にそれほど違いはないが,スターラップを用 いた BS10 - 2 において,鉄筋降伏後,変位が 50mm を超えた辺りから若干の耐力低下が見ら れる。これは,等曲げ区間内の断面上部に,一 部コンクリートの圧壊が生じたためである(破 線の丸印内)。しかし,圧壊の程度は小さく,そ の後も耐力を保持し続け,結局,スターラップ のないものより大きな変形性能を示した。最終 的にコンクリートの圧壊が進行する前に,主鉄 筋が破断して耐力を失った。

4.2 ひずみ分布による破壊挙動の検討

図 - 8 中の記号時点における BS10 - 2 のひず み分布を図 - 10 示す。ここで,断面上部より 30mm,60mmの位置は,ともにスターラップの 内側である。また,30mmの位置は圧縮鉄筋よ り上側である。

スターラップ, 圧縮鉄筋を用いた BS10-2で は,耐力が低下し始める 時において,断面上 部より30mmの位置で,わずかではあるが圧縮 ひずみが生じている部分が見られる。これより, この付近より圧壊が始まり,耐力がわずかに低 下し始めたものと考えられる。一方,60mm 位 置においては引張を受けている。破断する直前 の 時においても,30mm 位置では圧縮ひずみ が大きく増加しているのに対し,60mm 位置で は圧縮ひずみは生じていない。

BS10-2 で耐力を保持できる変形性能が向上 した要因として,スターラップによる拘束効果 と,圧縮鉄筋による圧縮力の負担が挙げられる。 スターラップと圧縮鉄筋による耐荷メカニズム に関しては,今後検討が必要である。

4. 結論

RC はりの曲げ試験を行い,ポストピーク領 域における変形性状,破壊性状について実験的 に検討した結果,以下のような結論を得た。

- (1)曲げ引張破壊する RC はりは,鉄筋比により,鉄筋降伏後の耐力低下挙動が大きく異なる。鉄筋比が大きい場合,鉄筋降伏後、耐力を保持する変形性能は小さい。また,断面上部から下部へ向かいコンクリートの圧壊が徐々に進行するため,耐力は比較的緩やかに低下する。一方,鉄筋比が小さい場合,鉄筋降伏後,かなりの変位まで耐力を保持するが,断面上部の狭い範囲でコンクリートの圧壊が生じると,急激に耐力は低下する。
- (2)等曲げ区間にスターラップ,圧縮鉄筋を 配置した供試体は,耐力を保持する変形 性能が大きくなったが,スターラップに よる拘束効果と圧縮鉄筋による圧縮力の 負担が,RC はりの変形性状と破壊挙動 にどのような影響を与えるかについては, 更なる検討が必要である。

参考文献

- 1) 立松 博,中村 光,檜貝 勇:柱基部 におけるコンクリートの圧縮破壊領域に 関する実験的研究,コンクリート工学年 次論文集,Vol.19,No.2,pp.897-902,1997
- T. Lertsrisakurat , and J. Niwa et al. : Experimental study on parameters in localization of concrete subjected to compression. , JSCE , No.669/v-50 , pp.309-321 , 2001
- 3) 土木学会コンクリート技術シリーズ 50: コンクリート構造物の非線形解析技術研 究小委員会成果報告書,pp.166-234,2003
- 4) 平野貴規,中村 光,斉藤成彦,檜貝 勇:一軸圧縮力を受ける拘束コンクリートの破壊性状の推定,コンクリート工学 年次論文集,Vol.24,No.2,pp.145-150, 2002