

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、鈎合鉄筋比は約 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²⁾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)

表-1 供試体概要

No.	せん断 スパン a(mm)	せん断 スパン比 a/d	等曲げ 区間 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	主鉄筋	主鉄筋 降伏強度 (N/mm ²)	引張 鉄筋比 (%)	中立軸 (mm)	等曲げ 区間内の スターラップ
B16-2A	850	5.667	500	35.4	3.1	2D16	362	1.765	39	無し
B16-2B				34.7	3.3				40	
B16-2C				36.2	3.1				38	
B13-2				31.8	2.9	2D13	361	1.126	28	
B10-2A				34.7	2.8	2D10	358	0.634	14	
B10-2B				37.1	3.1				13	
BS10-2				38.9	3.4				26	有り

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 荷重方法および測定方法

供試体の荷重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 点荷重を行った。荷重は手動でジャッキ制御した単調漸増荷重（荷重速度：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 $E=4.80\text{GPa}$ 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-

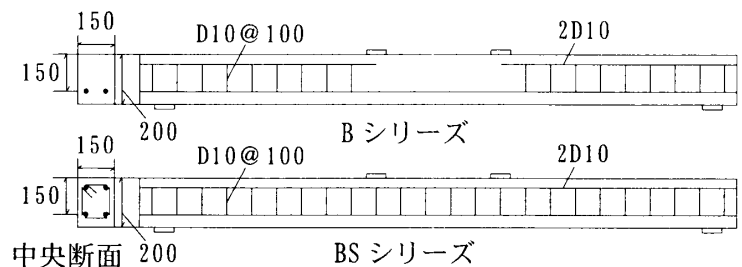


図-1 供試体配筋状況

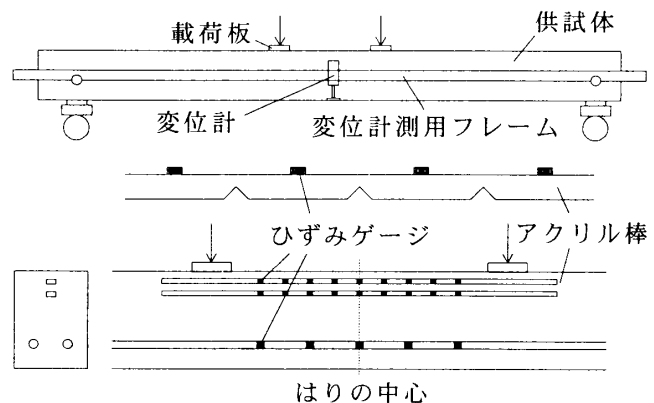


図-2 荷重方法および測定方法

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

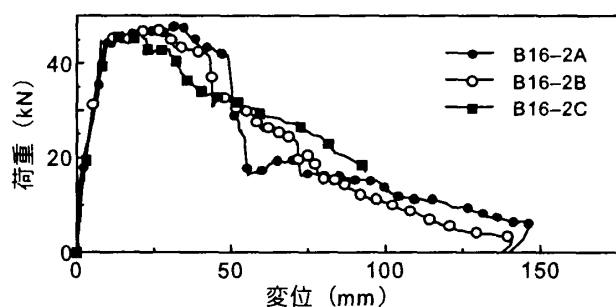


図-3 荷重-変位関係
(B16-2A, B, C)

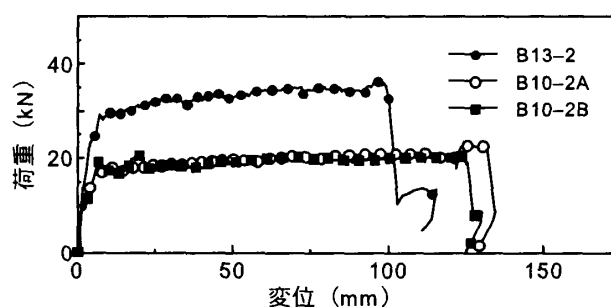
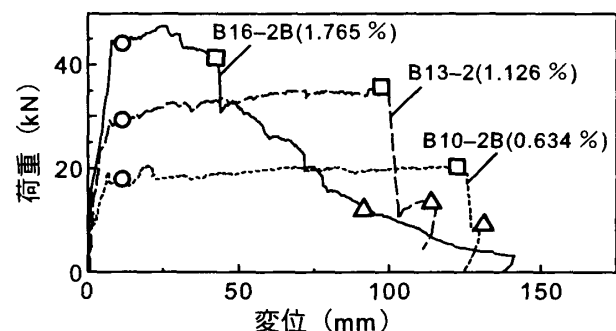


図-4 荷重-変位関係
(B13-2, B10-2A, B)



注) 括弧内の数字は引張鉄筋比

図-5 荷重-変位関係
(B16-2B, B13-2, B10-2B)

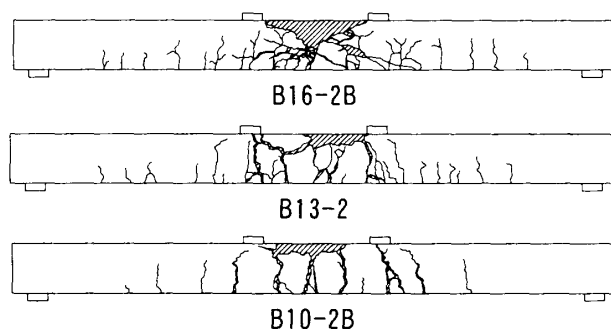


図-6 実験終了後のひび割れ状況
(B16-2B, B13-2, B10-2B)

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、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

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。

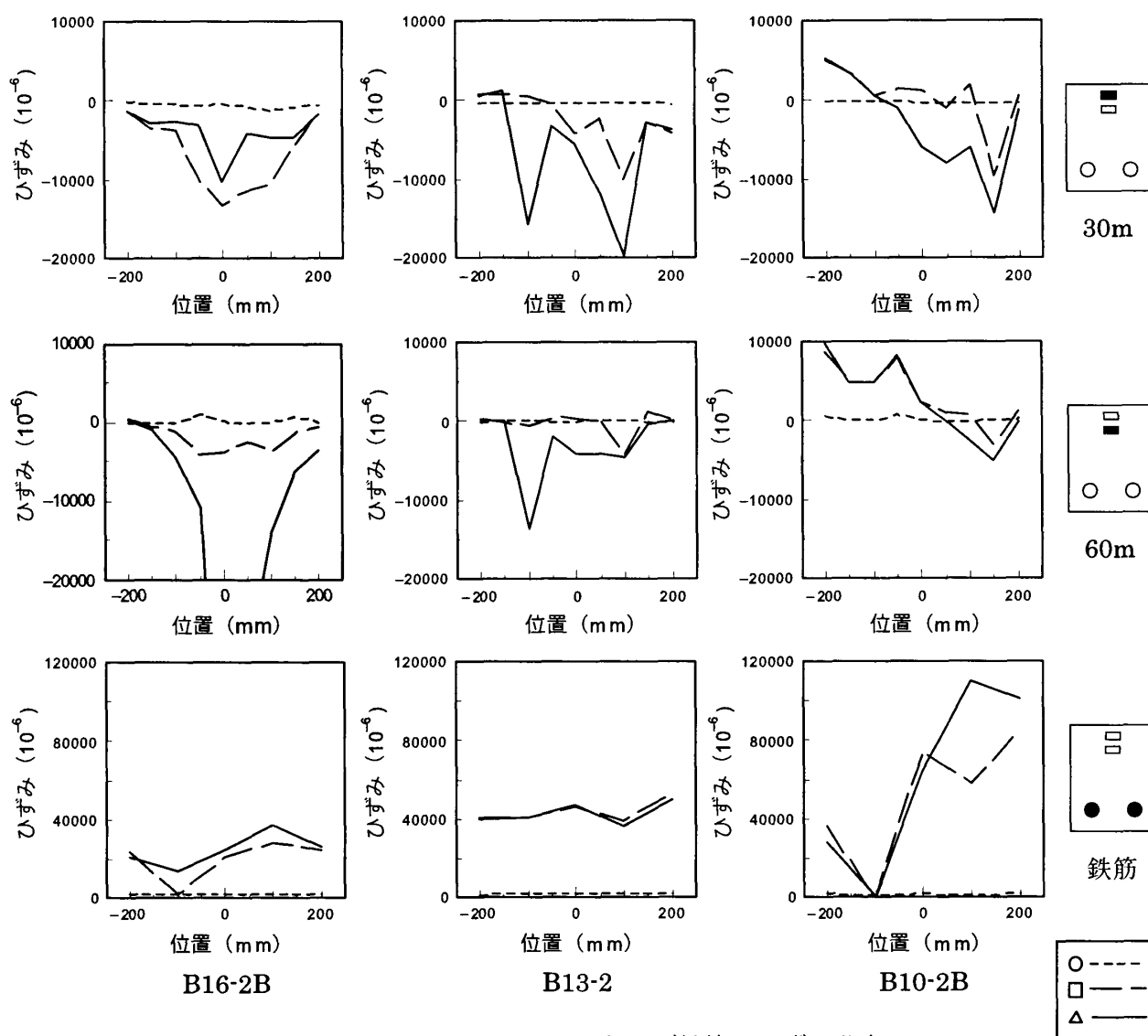


図-7 コンクリートおよび鉄筋のひずみ分布

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

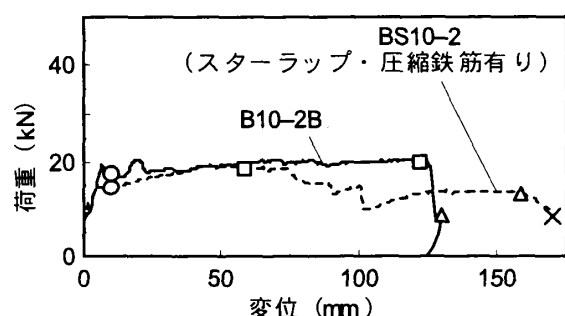


図-8 荷重-変位関係
(B10-2B, BS10-2)

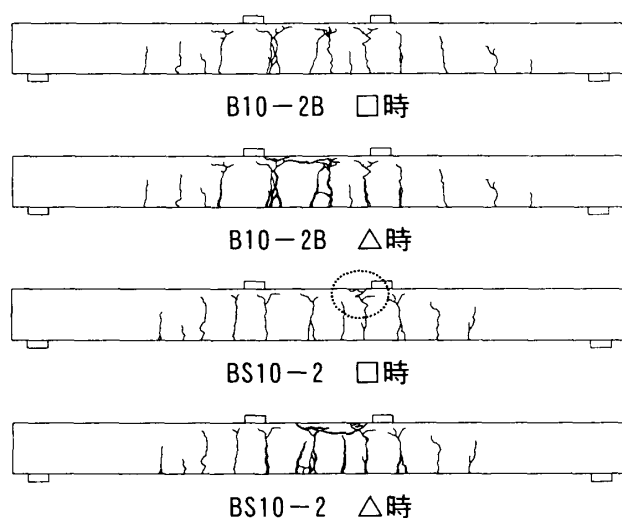


図-9 ひび割れ状況
(B10-2B, BS10-2)

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、

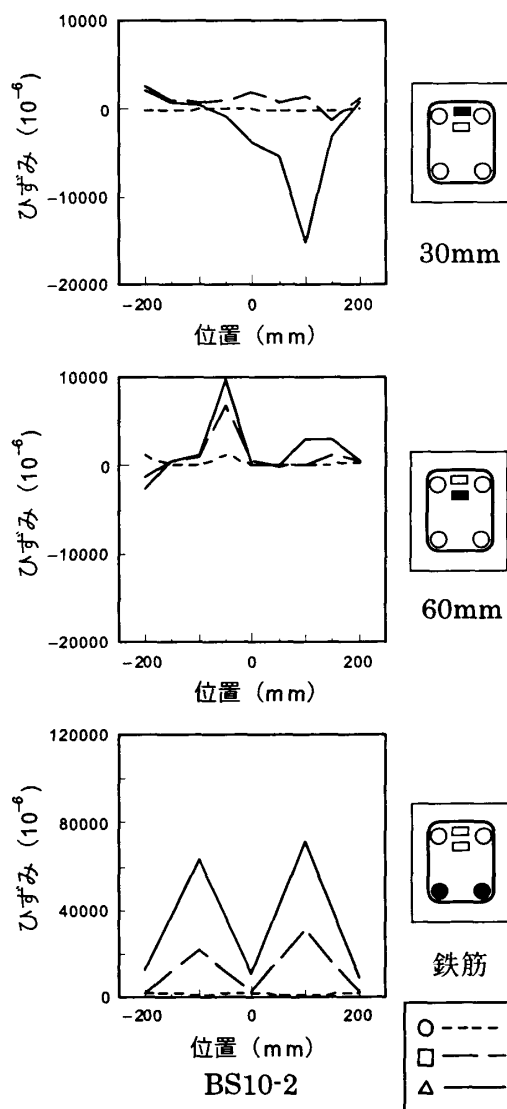


図-10 コンクリートおよび鉄筋のひずみ分布 (BS10-2)

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
- 2) 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