

## 論文

## [2003] 鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動に及ぼす引張鉄筋の局部ひずみの影響

正会員 池田尚治 (横浜国立大学工学部)

正会員 山口隆裕 (横浜国立大学工学部)

正会員○後藤康之 (横浜国立大学大学院)

## 1. はじめに

鉄筋コンクリートはり(以下、RCはり)と記す)の曲げ降伏時の挙動は、そのメカニズムが、詳細には明らかにされていないと言える[1]。すなわち、低鉄筋の場合、降伏耐力の実験値は終局強度理論で計算される降伏時の曲げ耐力より相当に大きくなるが、その理由は明らかにされていない。解析上では、マクロ的にコンクリートに引張強度以降の軟化域を仮定する方法等[2][3]があるが、鉄筋降伏以前を主として対象としており、鉄筋降伏以降の挙動を含めたミクロ的な実際の現象を説明することはできない。

本研究は、現象を実験で把握し、定量的に評価できるようなモデル化を図り、RCはりの曲げ挙動の解明を行うものである。

## 2. 供試体と実験方法

実験は、その目的により、ひびわれ部分周辺の引張鉄筋のひずみ分布を詳細に測定する実験Aシリーズ、低鉄筋RCはりの耐荷挙動を把握する実験Bシリーズ、実験Bシリーズを補足する実験Cシリーズに分けられる。供試体の一覧とそれぞれの供試体の特性を表-1に、形状寸法を図-1(a)~(c)に示す。

Aシリーズの供試体については、引張鉄筋比(以下、鉄筋比と記す)の違いによる鉄筋のひずみ分布特性を把握するために、鉄筋比0.2%の低鉄筋RCはり通常鉄筋比である0.8%のはりを作製した。ひずみゲージを貼付することにより鉄筋とコンクリートの付着状況が変化することを避けるために、引張鉄筋には、D19のねじふし鉄筋を用い、その凹り部に0.2mm長のゲージを貼付した。貼付間隔は、支間中央から両側に10cmの区間では2cmおき、その外側15cmの区間では5cmおきとした。また、ひびわれ位置を支間中央に特定するため、支間中央断面の下側のかぶり部分に0.5mm厚のステンレス板を設置した。スターラップは、せん断支間にコンクリート標準示方書[4]に従い配置したが、曲げ支間には配置していない。

Bシリーズの供試体は、表-1に示すように、低鉄筋である供試体No.7を基準供試体とし、実験の要因を鉄筋比、コンクリートの圧縮強度、かぶりとした。スターラップは、Aシリーズの供試体と同様にせん断支間にのみ配置した。

Cシリーズの供試体は、Bシリーズの実験で考慮されなかった曲げ支間内のスターラップの存在と引張鉄筋の本数の影響について調べるため追加に作製したもので、供試体No.9は、No.7と同形状であり、Bシリーズの供試体との比較のために作製した。供試体No.10は、曲げ支間にもスターラップを配置したもので、供試体No.11は、鉄筋比を0.2%のままとし、引張鉄筋を2本にしたものである。

各供試体に使用したコンクリートおよび鉄筋の力学的特性を表-2に示す。各供試体いずれも電動油圧ジャッキによる対称2点載荷とし、載荷方法は、実験上で降伏荷重と認められる点まで荷重制御で、その後は変位制御で供試体が圧壊するか、またはひびわれ幅の最大値がほぼ10mmに

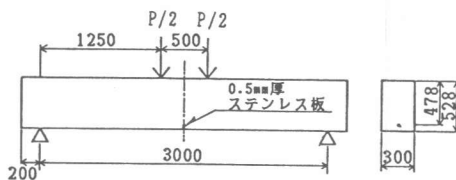
表-1 供試体の一覧

No.	記号 <sup>1)</sup>	引張鉄筋		コンクリート 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	かぶり C (mm)	
		径 <sup>2)</sup> (mm)	本数 鉄筋比 (%)			
1	A-02	D19	1	0.2	470	40
2	A-08		4			
3	B-08-H-2	D10	4	0.8	630	20
4	B-02-L-2		1			
5	B-02-L-5					50
6	B-02-H-1					10
7	B-02-H-2					20
8	B-02-H-5					50
9	C-02-H-2	D10	1	0.2	630	20
10	C-02-H-2-S					
11	C-02-H-2-2		2			

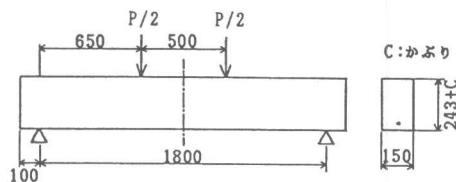
注  
 1) : 記号は (A : Aシリーズ, B : Bシリーズ, C : Cシリーズ)  
 - (08 : 引張鉄筋比0.8%, 02 : 0.2%) - (H :  
 コンクリートの圧縮強度が630kgf/cm<sup>2</sup>, L : 200kgf/cm<sup>2</sup>)  
 - (1, 2, 5 : かぶり (cm)) - (S : 曲げスパンにスター  
 ラップ有り, 2 : 引張鉄筋が2本) を示す。  
 2) : D19の鉄筋はねじよし鉄筋。

表-2 使用材料の力学的特性

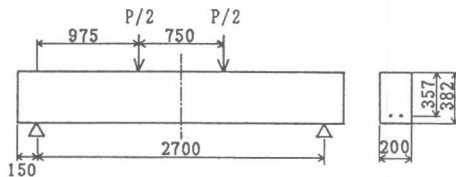
呼び径	規格	鉄筋			適用 供試体 (シリーズ)
		降伏強度	引張強度	ヤング係数	
D19	SD	4060	6140	2.1×10 <sup>5</sup>	A
D10	30	3900	5660	1.95×10 <sup>5</sup>	B, C
		コンクリート			
粗骨材の 最大寸法		圧縮強度	引張強度	ヤング係数	
		(kgf/cm <sup>2</sup> )			
20mm		470	34	3.13×10 <sup>5</sup>	A
13mm		630	38	3.17×10 <sup>5</sup>	B, C
		200	18	1.79×10 <sup>5</sup>	



(a) No. 1, 2



(b) No. 3~10



(c) No. 11

図-1 供試体の形状寸法

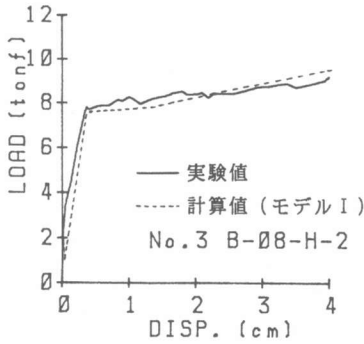
達するまで、単調に増加させる曲げ載荷とした。変位は、供試体の支間中央に変位計を取り付け、その値をX-Yレコーダーにより連続的に測定した。

### 3. 実験結果と考察

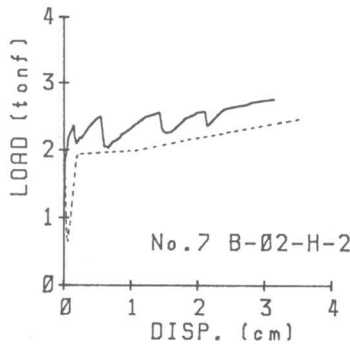
図-2(a)に鉄筋比が0.8%の供試体 No. 3の耐荷挙動を示す。また、図-2(b)には鉄筋比が0.2%の供試体 No. 7の耐荷挙動を示す。これら2体を比較してみると、鉄筋比が0.2%のNo. 7は、かなり特異な挙動を示しており、降伏耐力が計算上の降伏荷重(4.2参照)を大きく上まわり、鉄筋の降伏後は、耐力が大きく変動している[5]。このことは、図-3(a)(b)に示すひびわれ発生状況に大きく関連するもので、耐力の変動は、数少ないひびわれの伸展によって生じている。なお、ひびわれ図は、降伏荷重時付近の状況を示す。

図-4(a)は、低鉄筋RCはりにおけるコンクリートの圧縮強度の違いによる耐荷挙動を比較したものである。供試体 No. 4は、コンクリートの圧縮強度が200kgf/cm<sup>2</sup>、No. 7は630kgf/cm<sup>2</sup>であり、コンクリートの圧縮強度が大きいほど、耐力およびその変動幅が大きくなっている。図-4(b)は、かぶりの違いによる耐荷挙動を比較したもので、供試体 No. 6のかぶりは10mm(1φ:φ…鉄筋径)であり、No. 8は50mm(5φ)である。この図より、かぶり大きいほど、耐力が増加し、その変動幅が大きくなっているといえる。このようにコンクリートの圧縮強度やかぶりが増大すると、耐力やその変動幅が増加するのは、コンクリートの引張剛性や鉄筋とコンクリートの付着強度の増加によるものと考えられる。

図-5は、載荷点間のスターラップの有無ならびに引張鉄筋の本数による耐荷挙動を比較した

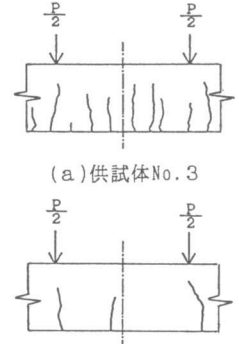


(a) 鉄筋比0.8%の供試体No. 3



(b) 鉄筋比0.2%の供試体No. 7

図-2 荷重-変位曲線



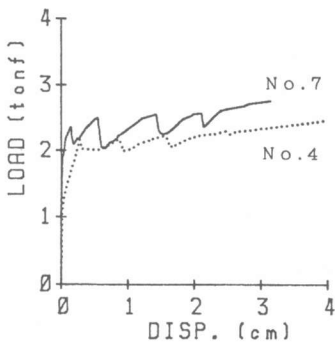
(a) 供試体No. 3

(b) 供試体No. 7

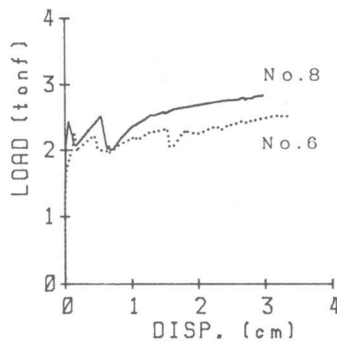
図-3 ひびわれ図

ものである。供試体 No. 9は、Bシリーズの No. 7とまったく同じ諸元の供試体で、コンクリートの打設日が異なることによる耐荷挙動の差を見たものであるが、ほとんど同じ挙動を示し、BシリーズとCシリーズの結果を単純に比較できることが確認できた。供試体 No. 10は、スターラップを載荷点間にも配置したものであり、No. 11は、鉄筋比を変えずに引張鉄筋を2本にしたものである。No. 9 (No. 7) と No. 10を比較してみると、両者の変位曲線は、よく一致しており、載荷点間のスターラップは、耐荷挙動に影響を及ぼさないと考えられる。また、供試体 No. 11の耐荷挙動も、基準供試体 No. 7と同じ傾向を示していることから、引張鉄筋の本数も、耐荷挙動に影響を及ぼさないと考えられる。

図-6 (a)(b)にAシリーズの実験で測定した曲げ区間での引張鉄筋のひずみ分布を示す。この区間内において発生したひびわれの本数は、鉄筋比が 0.2%の供試体 No. 1では、支間中央に1本のみ、鉄筋比が 0.8%の供試体 No. 2では、5~7cmおきに7本であった。供試体 No. 2の場合、荷重の増加にとまぬひびわれも多く発生し、図-6 (b)に示すように、鉄筋のひずみはほぼ均等に増加し、降伏荷重時には曲げ区間で一様に2000 $\mu$ のひずみに達している。これに対し



(a) コンクリート圧縮強度の違いによる比較



(b) かぶりの違いによる比較

図-4 荷重-変位曲線

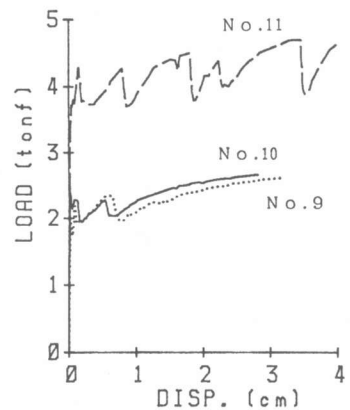
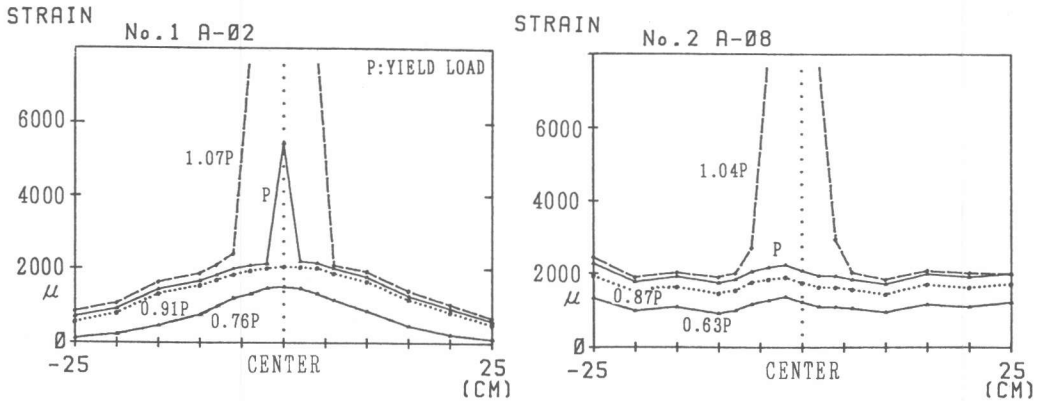


図-5 荷重-変位曲線

(スターラップの有無および主筋本数による比較)



(a)鉄筋比0.2%の供試体No.1

(b)鉄筋比0.8%の供試体No.2

図-6 Aシリーズにおける引張鉄筋のひずみ分布図

て、低鉄筋である供試体 No. 1 の場合は、図-6 (a) に示すように、ひびわれ付近での鉄筋のひずみが大きく、ひびわれ部が降伏点に達しても、載荷点下では  $700\mu$  にしか達していない。また、さらに荷重を増加させると、ひびわれ断面での鉄筋のひずみが急増して降伏ひずみを大きく越えることが示され、この部分が一気にひずみ硬化にまで達するのである。

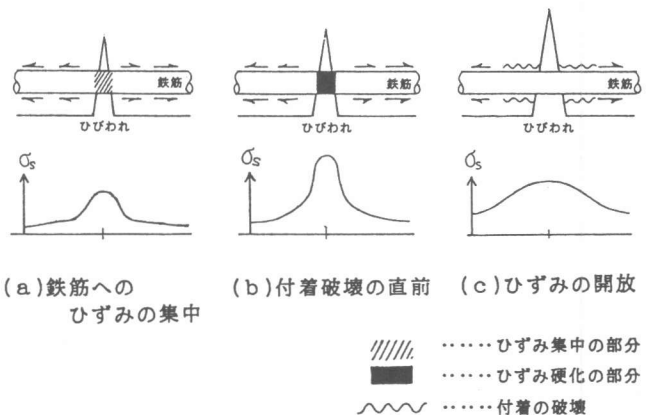
以上のA~Cシリーズの実験結果をまとめると、低鉄筋RCはりのひびわれ部分を図-7 (a) ~ (c) のように模式化することができる。供試体にひびわれが発生した後、載荷にともない、ひびわれ部では鉄筋に引張ひずみが集中し、図-7 (a) に示すように、局部的にひずみが増加する。その後、図-7 (b) に示すように、鉄筋は局部的に降伏し、さらにひずみ硬化域まで達する。鉄筋がひずみ硬化することにより耐荷力が増加し、その後、図-7 (c) のように、ひびわれ近傍での鉄筋とコンクリートの付着が破壊され、ひびわれが伸展する。これによりひびわれ部分に集中していた引張ひずみが開放されて、耐荷力が急激に減少する。このメカニズムの繰り返しにより、耐荷力の増加とその変動が説明づけられる。引張鉄筋がある程度存在すると、ひびわれの分散性がよいため引張鉄筋のひずみ分布は一様になり、前述のようなメカニズムは起こりにくい。したがって、耐荷力の増加とその変動がほとんど現れないことも説明される。

#### 4. 解析

##### 4.1 解析手法

低鉄筋RCはりの耐荷挙動を解析するために、実験結果を参考にしてひびわれ部での鉄筋へのひずみ集中を考慮したモデルを用いることとした。計算手法は、断面を一次的にファイバーモデル化した簡便な方法を採用した。

解析モデルは、図-8 に示すように、供試体の支間中央にひびわれを想定した長さ  $\Delta l = 2$



(a)鉄筋へのひずみの集中

(b)付着破壊の直前

(c)ひずみの開放

図-7 ひびわれ部での鉄筋へのひずみの集中と開放のメカニズム

cmの区間を考え、この区間のコンクリートは、引張強度を零としたものである（以下、モデルIIと記す）。計算で用いた材料の力学的特性は、材料試験により得られた値を用いている。ただし、コンクリートの力学的特性は、図-9の実線で示した応力-ひずみ関係を用いている。解析の対象とした供試体は、鉄筋比が0.2%の供試体 No.7、コンクリートの圧縮強度が No.7の約1/3である No.4、鉄筋比が0.8%の No.3とした。なお、供試体 No.7は、低鉄筋でコンクリート強度が高いため、ひびわれ発生荷重の方が鉄筋の降伏荷重より大きくなっている。

#### 4.2 解析結果

図-10(a)~(c)に実験値とモデルIIによる計算値の比較を示す。さらに、前述の $\Delta l$ の区間を用いずに、はり全体が一樣な断面特性を持つモデル（以下、モデルIと記す）として計算を行った結果と図-9に示すようなコンクリートの引張のひずみ軟化域を考慮した計算結果も図中に示してある。

図-10(a)に示すように、鉄筋比0.8%の供試体 No.3における解析結果では、モデルIIを用いた値とモデルIによる値とがほとんど一致しており、また実験値ともよく一致している。

図-10の(b)(c)は、それぞれ鉄筋比が0.2%の供試体 No.7と No.4の場合であり、モデルIの計算結果では、ひびわれ発生後、断面での力のつりあいをコンクリートの軟化域を無視して計算を行ったため、計算上荷重が低下している。また、コンクリートのひずみ軟化域を考慮したモデル（モデルIsとする）による計算では、初期のひびわれ発生後の剛性は改良されているが、鉄筋の降伏後の耐荷力の増加を十分に表すことができず、モデルIとともに実験時の耐荷力の変動の下端付近を示している。これに

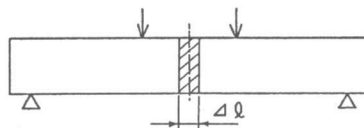


図-8  
解析モデル（モデルII）図

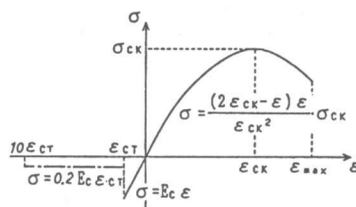
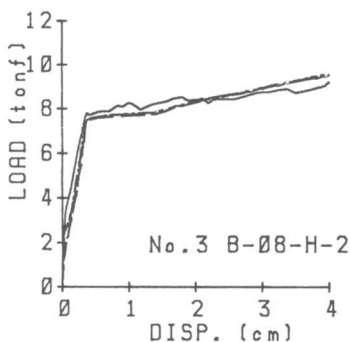
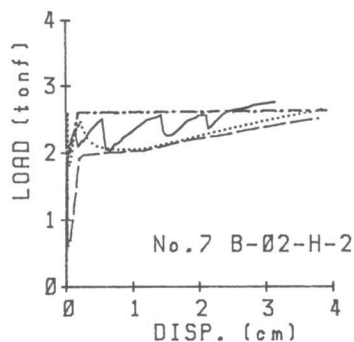


図-9  
解析に用いたコンクリートの  
応力-ひずみ曲線



(a) 供試体 No. 3



(b) 供試体 No. 7

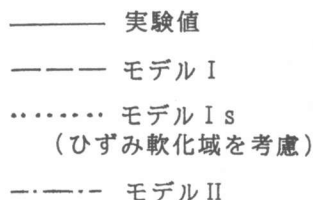
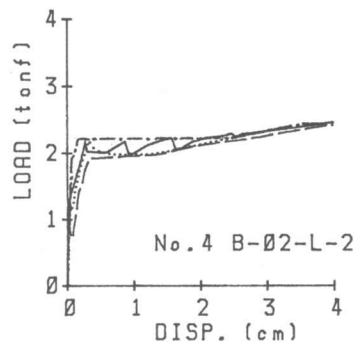


図-10  
実験値と計算値の比較



(c) 供試体 No. 4

対して、モデルⅡでは、 $\Delta Q$ の区間以外のコンクリートの引張ひずみを供試体 No. 7では  $140 \times 10^{-6}$ 、No. 4では  $250 \times 10^{-6}$ とすることにより、 $\Delta Q$ の区間における鉄筋へのひずみの集中および鉄筋のひずみ硬化が考慮され、図-10(b)(c)に示すように、耐荷力の変動の上端付近を表すことができる。また、コンクリートの引張強度が零の要素の長さ $\Delta Q$ は、鉄筋降伏後の耐荷力の増加時における傾きと関係があり、 $\Delta Q$ が大きいと鉄筋の伸びが大きくなり、変位が増加することから、傾きが小さくなる傾向がある。このことは、ひびわれ周辺の付着の破壊が進行するにつれて耐荷力の増加時の剛性が小さくなる実験値と対応するものである。

以上のことから、モデルⅠおよびモデルⅡを用いることにより、簡便な一次元的な計算手法で低鉄筋RCはりの曲げ変位曲線の上端と下端を表現することができた。

## 5. 結 論

本研究の実験および解析より得られた結果を総合的に検討して得た結論は、次のとおりである。

- 1) 低鉄筋RCはりの場合、降伏時の耐荷力が、通常のファイバーモデルで求める値を大幅に上まわり、かつ、耐荷力がひびわれの伸展により大きく変動することが、実験によって認められた。
- 2) 耐荷力の変動の幅は、引張鉄筋比が同じ場合、コンクリート強度とかぶりの大きさに影響を受ける。
- 3) 降伏耐力の増大の理由は、ひびわれ部の鉄筋へのひずみの集中により、鉄筋に局部的なひずみ硬化が生じることによるものであることが明らかにされた。
- 4) 耐荷力が変動するメカニズムを、ひびわれ部の鉄筋のひずみ硬化とその周辺の付着の破壊の繰り返しにより説明することができた。
- 5) 耐荷力が増加するときの剛性の傾きは、ひびわれの幅および付着破壊の程度に影響を受ける。
- 6) ひびわれ付近の小区間( $\Delta Q$ )を引張強度零のコンクリートとするモデルを用いることにより、低鉄筋RCはりにおける耐荷力の増加を計算によって表すことができた。また、耐荷力の変動の下限値は、通常のファイバーモデルで求められる値とほぼ一致することが示された。

## [謝 辞]

本研究の実施に当たり、森下豊技官の多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

## [参考文献]

- [1] 池田、山口、後藤：引張鉄筋の局部ひずみを考慮した鉄筋コンクリートはりの耐荷挙動、土木学会第43回年次学術講演会講演概要集 第5部、1988、pp.646-647
- [2] 志村、佐伯、藤田：剛性効果を考慮した鉄筋コンクリート曲げ部材の材料モデルについて、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集 第5部、1987、pp.212-213
- [3] 島、玉井：RC要素の引張剛性モデルに基づくはりの曲げモーメント-曲率関係の計算、土木学会第42回年次学術講演会講演概要集 第5部、1987、pp.208-209
- [4] 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）設計編
- [5] 岩瀬、六郷、小柳：RCはりの曲げ破壊性状におよぼす付着の影響、土木学会第40回年次学術講演会講演概要集 第5部、1985、pp.463-464