

論文

[2163] 鉄筋コンクリートばりの靱性に及ぼす圧縮鉄筋の効果

正会員 矢代 秀雄 (五洋建設技術研究所)

正会員 花井 重孝 (日本大学建築工学科)

正会員 ○師橋 憲貴 (日本大学建築工学科)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物では、地震時のはり・柱のせん断破壊を防ぐとともに、はり端部が曲げモーメントに対して十分な強度と靱性を確保しているようにしなければならない。そのためには、横補強筋によってはり端部の圧縮側コンクリートを拘束するとともに、圧縮鉄筋の座屈による耐荷力の低下を防ぐ必要がある。

鉄筋コンクリートばり (RCばり) の曲げ実験は、2点集中荷重で行われる場合が多い。その場合、複筋ばりで引張鉄筋比が引張鉄筋比以下の場合は、初めに引張鉄筋が降伏しモーメント-たわみ曲線は急に折れ曲がり (部材降伏)、ほとんど水平に近くなるが、その後耐荷力はわずかではあるが上がり最大耐力に達する。それから耐荷力が少し落ちたところで圧縮側の被りコンクリートが圧壊し始める。続いて圧縮鉄筋が座屈すると耐荷力が低下することがあるが、ここで圧縮鉄筋の圧縮応力が座屈によって低下しないようにしておけば、耐荷力の低下は防げる。座屈によって圧縮鉄筋の圧縮応力が低下しないようにする一つの方法として、横補強筋の間隔を圧縮鉄筋の公称直径の6倍にすると良いことが、

既往の一方繰り返し加力したはりの実験的研究 (1982) 及び異形棒鋼の一軸圧縮実験 (1991) でわかっている (図-13) [1][2]。

一方、表-1に国内及び諸外国を含めたはりの横補強筋の間隔に関する規定を示す。諸外国においても、はりの横補強筋の間隔を決定する一つの条件として、軸方向鉄筋径の倍数が使用されていることがわかる。

本研究では、引張鉄筋は一定にし、圧縮鉄筋

表-1 横補強筋の間隔に関する規定

RC補強計算基準[3]	はりの横補強筋の最大間隔 25cm かつ D/2 以下 D: 曲げ材の全せい (D10使用の場合)
RC構造物の終局強度型 耐震設計指針[4]	はりの横補強筋の最大間隔 15cm以下 (ヒンジ領域) 20cm以下 (非ヒンジ領域) (D10使用の場合)
ACI 318-83[5][6] (1983)	曲げ部材の横補強筋の最大間隔は次に示す値を超えてはならない。 (a) d/4 (b) 軸方向鉄筋の最小径の 8倍 (c) 横補強筋の径の24倍 (d) 121n (30.5cm) d: 断面の有効せい
NZS 3101[7][8] (1982)	はりの横補強筋の最大間隔は次に示す値を超えてはならない。 (a) d/4 (b) 軸方向鉄筋の直径の 6倍 (c) 150mm d: はりの有効せい (塑性ヒンジ可能領域内)

表-2 試験体詳細一覧

試験体名	試験体形状					コンクリート強度 $\sigma_c$ kg/cm <sup>2</sup>	主筋				有効 鉄筋比 $r_s$	あばら筋 (試験区間内)					
	断面		せん断 スパン cm	配筋	上端筋		下端筋		配筋	間隔 cm		あばら筋比					
	b cm	D cm			$\sigma_y$ kg/cm <sup>2</sup>		$\Sigma a_s$ cm <sup>2</sup>	A %				$\sigma_y$ kg/cm <sup>2</sup>	$\Sigma a_s$ cm <sup>2</sup>	A %	S %	a %	$\sigma_y$ kg/cm <sup>2</sup>
1306*						325	2-D13	3811	2.54	0.25							
1306*						296					3035		4-D10	7.5	1.27		
1906*						307	2-D19	3711	5.74	0.56				10.0	0.95		
2506*						320	2-D25	3274	10.14	0.99				10.0	0.95		
000P						357	-	-	-	-				15.0	0.63		
023R	30	40	34	6	120	368	2-D13	3449	2.54	0.25	2-D32	15.88	1.56	11.4	0.42		
049P						352								7.8	0.61		
049R						366	2-D19	3686	5.74	0.56				11.4	0.42		
065R						362	2-D25	3661	10.14	0.99	3930			15.0	0.32		3439
102P						350								19.2	0.25		
102R						358	2-D32	3930	15.88	1.56							

\*: 原典論文[1]中の試験体

の径を変化させ、加力方法を一方向繰り返し加力及び正負繰り返し加力とした時の耐荷力を比較検討したものである。なお、座屈により圧縮鉄筋の圧縮応力が低下しないように、横補強筋の間隔は圧縮鉄筋の径の6倍にした。

2. 実験計画

試験体は7体計画し、試験体の形状は  $b \times d = 30\text{cm} \times 40\text{cm}$ ,  $d = 34\text{cm}$ ,  $d_c = d_t = 6\text{cm}$  として、純曲げ区間を140cm、せん断スパンを120cmとした。引張鉄筋には2-D32(SD295A)を使用し、圧縮鉄筋を配筋しないもの及び圧縮鉄筋に2-D13, 2-D19, 2-D25, 2-D32(SD295A)を配筋して、複筋比 $\gamma$ を約0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0と5種類に変化させた。また横補強筋にはD10(SD295A)を使用した。各々の試験体の純曲げ区間内の横補強筋間隔は圧縮鉄筋の公称直径の6倍とし、圧縮鉄筋にD13を使用した場合7.8cm, D19の場合11.4cm, D25の場合15.0cm, D32の場合19.2cmとした。圧縮鉄筋を配

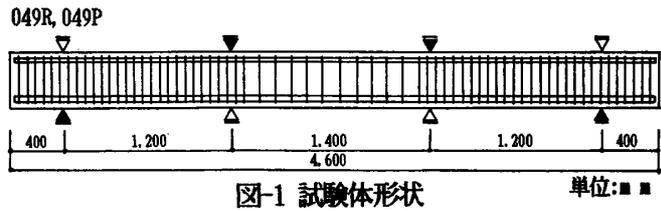


図-1 試験体形状

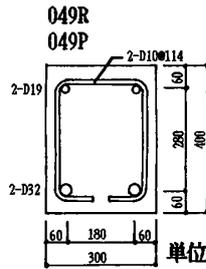


図-2 断面形状

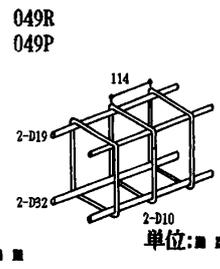


図-3 横補強筋

例)  
 加力方法  
 R: 正負繰り返し加力  
 P: 一方向繰り返し加力  
 圧縮鉄筋の径  
 0: なし  
 3: D13  
 9: D19  
 5: D25  
 2: D32  
 複筋比  
 00:  $\gamma = 0$   
 02:  $\gamma = 0.16 \pm 0.2$   
 04:  $\gamma = 0.36 \pm 0.4$   
 06:  $\gamma = 0.64 \pm 0.6$   
 10:  $\gamma = 1.0$

表-3 断面計画一覧

複筋比 $\gamma$	0.00	0.16	0.36	0.64	1.00
有効複筋比 $\gamma_e$	0.00	0.14	0.34	0.59	1.00
正負繰り返し加力					
試験体名		023R	049R	065R	102R
一方向繰り返し加力					
試験体名	000P		049P		102P

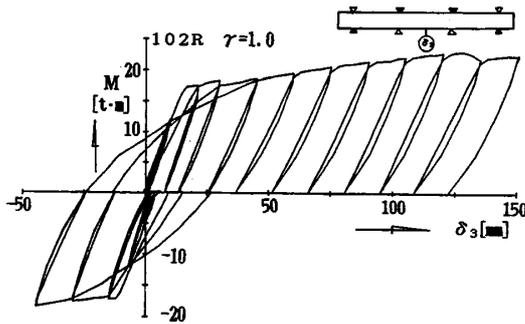


図-4 モーメント-たわみ曲線

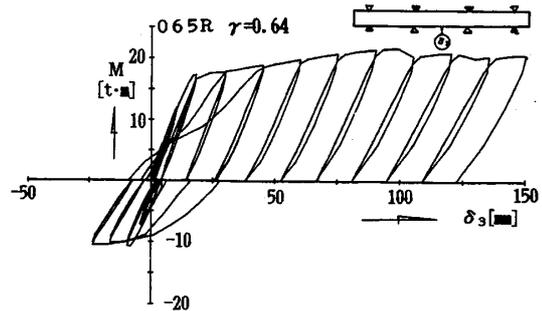


図-5 モーメント-たわみ曲線

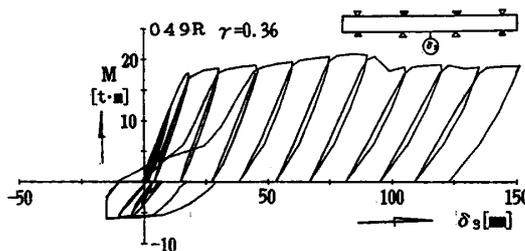


図-6 モーメント-たわみ曲線

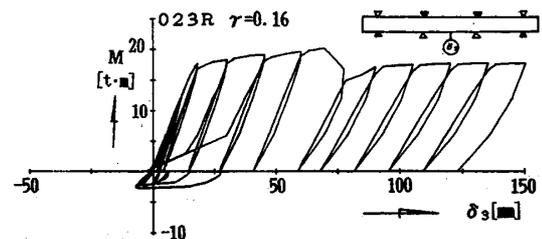


図-7 モーメント-たわみ曲線

筋しない試験体の横補強筋間隔は、圧縮鉄筋に D19を使用した試験体に準じた。複筋比 $\gamma$ =約0.4, 1.0の試験体については、加力方法による比較を行うため同一形状の試験体を2体ずつ計画した。

### 3. 加力方法及び測定方法

加力は2点集中一方向繰り返し加力と正負繰り返し加力とした。一方向繰り返し加力の繰り返し方法は、引張鉄筋が降伏しモーメント-たわみ曲線が急に折れ曲がる部材降伏時までは荷重により制御し、はりの曲げ終局強度の略算値 $M_u$ の1/3, 2/3, 3/3で2回行った。また、部材降伏時以降は、試験区間中央における変位により制御し、部材降伏時の変位 $\delta y$ の倍数で繰り返しを行い、 $3\delta y$ までは2回ずつ、それ以降は1回ずつ $10\delta y$ になるまで行った。正負繰り返し加力の繰り返し方法は部材降伏後 $3\delta y$ まで、正方向、負方向ともそれぞれ行い、 $3\delta y$ 以降は正方向のみの繰り返しとした。

### 4. 実験結果

実験結果一覧を表-4に、各試験体のモーメント-たわみ曲線を図-4~10に示す。また、各試験体を比較したモーメント-たわみ曲線（正側の包絡線）を図-12, 14~16に示す。

#### 4.1. 有効複筋比による影響

図-11は、既発表論文 [1]中の試験体のモーメント-たわみ曲線の包絡線である。試験体(1306, 1906, 2506)の形状、配筋は、本実験の複筋比 $\gamma$ =約0.2, 0.4, 0.6の試験体と同一である。図-11と図-12を比較すると、部材降伏時以降のモーメントの値に差がみられている。鉄筋の降伏応力度を考慮した有効複筋比( $\gamma_e = \Sigma a_c \cdot \sigma_y / \Sigma a_t \cdot \sigma_y$ )は、既発表論文 [1]中の試験体(1306, 1906, 2506)の場合それぞれ、0.20, 0.44, 0.67であるが、本実験の試験体(023R, 049R, 065R)の場合、0.14, 0.34, 0.59となっている。最大耐力後、圧縮側の被りコンクリートが圧縮破壊してから耐荷力は低下するが、その割合は有効複筋比の小さい試験体の方が大きいことがわかった。

#### 4.2. 圧縮鉄筋量による影響（正負繰り返し加力の場合）

図-12は正負繰り返し加力を行った試験体の正側のモーメント-たわみ曲線の包絡線である。この図より各試験体とも圧縮側のコンクリートが圧縮破壊を起こすまでの耐荷力は、ほぼ同様の傾向を示していることがわかる。圧縮鉄筋に D13, D19, D25, D32を用いた試験体の圧縮破壊発生時

表-4 実験結果一覧

試験体名	部材降伏時				最大耐力		圧縮後の耐力	
	正側		負側		正側		正側	
	$M_y$ [t·m]	$\delta y$ [mm]	$-M_y$ [t·m]	$-\delta y$ [mm]	$M_{max}$ [t·m]	$\delta_{max}$ [mm]	$M_{uc}$ [t·m]	$\delta_{uc}$ [mm]
000P	18.0	18.4	—	—	20.2	63.1	16.5	81.2
023R	17.6	18.1	-2.3	-4.2	19.9	63.2	17.2	90.1
049P	17.4	18.1	—	—	19.9	72.2	18.1	87.3
049R	17.8	18.1	-5.4	-7.6	21.0	84.1	19.0	120.1
065R	17.2	18.1	-10.6	-9.5	21.8	99.2	20.5	150.4
102P	17.4	20.0	—	—	20.0	69.2	19.7	75.1
102R	17.4	21.9	-17.1	-14.5	23.2	129.2	22.6	147.0

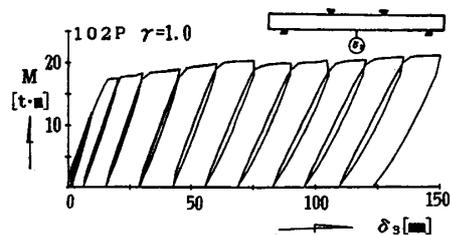


図-8 モーメント-たわみ曲線

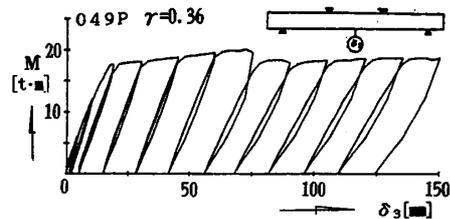


図-9 モーメント-たわみ曲線

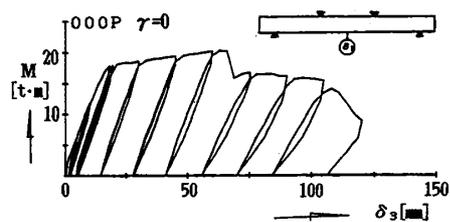


図-10 モーメント-たわみ曲線

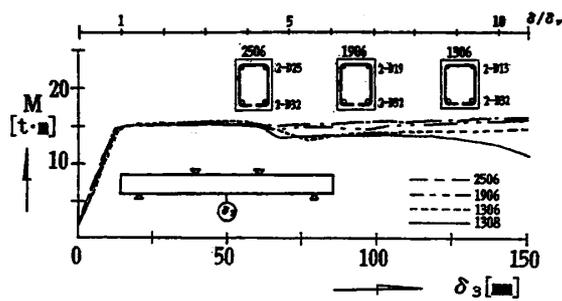


図-11 モーメント-たわみ曲線

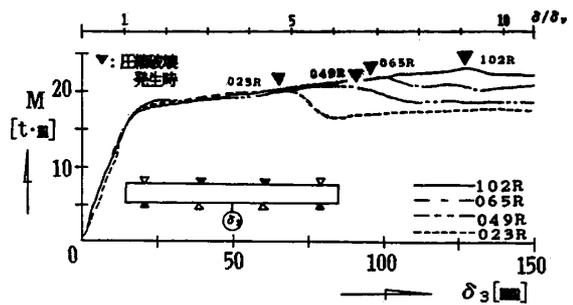
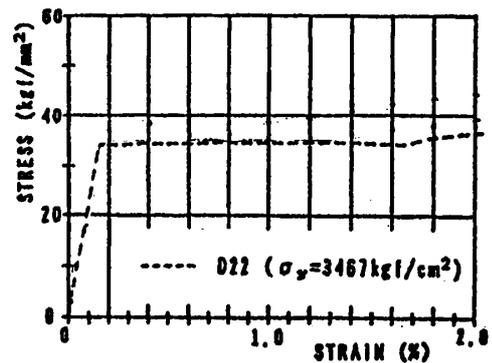


図-12 モーメント-たわみ曲線

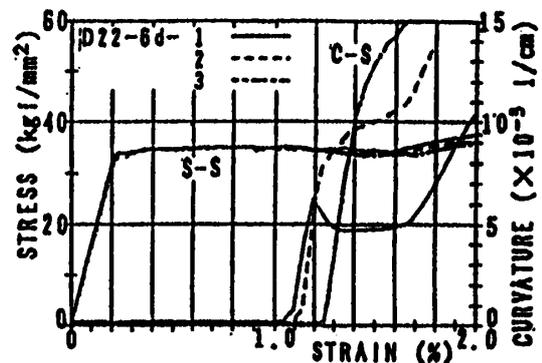
のたわみは、それぞれ約  $5\delta_y$ ,  $6.5\delta_y$ ,  $7\delta_y$ ,  $9\delta_y$  付近となっており、複筋比の小さい試験体ほど圧縮側のコンクリートの圧縮破壊の開始時期が早く、また耐荷力の低下する割合も大きくなっている。圧縮破壊後の耐荷力は、各試験体とも  $10\delta_y$  を越えるまでほぼ一定の値を維持し続けていた。

図-11 における試験体1308は、横補強筋の間隔を圧縮鉄筋の公称直径の8倍で配筋した試験体である。この試験体の場合、約  $8.5\delta_y$  付近で圧縮鉄筋の座屈によるものと思われる耐荷力の低下がみられている [1]。これに対し、図-12 においては各試験体とも、このような耐荷力の低下は生じていない。

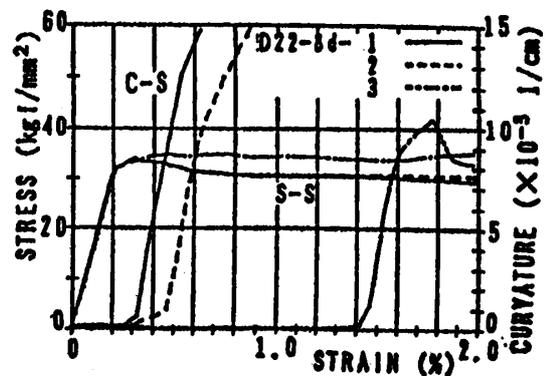
図-13 は文献 [2] 中の異形棒鋼 (D22) の引張試験における応力-ひずみ曲線と一軸圧縮実験における応力-ひずみ曲線 (S-S) 及び曲率-ひずみ曲線 (C-S) である。拘束長さを異形棒鋼の公称直径 (d) の6倍にした  $6d$  の試験片は、引張試験における応力-ひずみ曲線と一軸圧縮実験における応力-ひずみ曲線はほぼ同様の傾向を示している。また曲率-ひずみ曲線は各試験片とも、ひずみ約1.0%付近から曲率の増加がみられている。一方  $8d$  の試験片では、引張試験における応力-ひずみ曲線と一軸圧縮実験における応力-ひずみ曲線がほぼ同様の傾向を示す試験片と引張試験における応力-ひずみ曲線よりも圧縮応力の低下する試験片がみられている。また曲率-ひずみ曲線は、圧縮応力の低下する試験片では、ひずみ約0.2%付近から曲率の増加がみられている。このことを本実験のはり内の圧



a) 引張実験



b) 6d (圧縮実験)



c) 8d (圧縮実験)

図-13 異形棒鋼 (D22) の引張及び一軸圧縮 (両端固定) 実験

縮鉄筋に当てはめて考えると、圧縮鉄筋は横補強筋によって6dの間隔で拘束されているので、圧縮鉄筋自体の曲率の増加は発生していることが予測できるが、座屈による圧縮応力の低下は生じていないものと思われる。

4. 3. 圧縮鉄筋量による影響（一方向繰り返し加力の場合）

図-14 は一方向繰り返し加力を行った試験体のモーメント-たわみ曲線の包絡線である。この図より各試験体とも正負繰り返し加力を行った試験体と同様に、圧縮側のコンクリートが圧縮破壊を起こすまでの耐荷力は、ほぼ同じ傾向を示していることがわかる。圧縮鉄筋を配筋していない試験体及び圧縮鉄筋に D19, D32を用いた試験体の圧縮破壊発生時のたわみは、それぞれ約  $4.5\delta_y$  及び  $5\delta_y$  付近となっており、圧縮鉄筋を配筋していない試験体の圧縮破壊の時期は早く、また耐荷力も低下し続けている。圧縮破壊後の耐荷力は、圧縮鉄筋に D19, D32用いた試験体は  $10\delta_y$  を越えるまでほぼ一定の値を維持し続けており、一方向繰り返し加力の場合においても、圧縮鉄筋の座屈による極端な耐荷力の低下はみられなかった。

4. 4. 加力方法による影響

図-15, 16は、配筋状態が同じで加力方法の

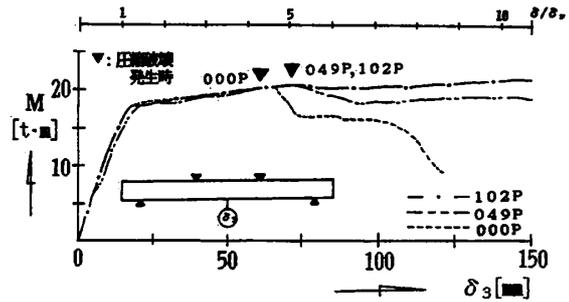


図-14 モーメント-たわみ曲線

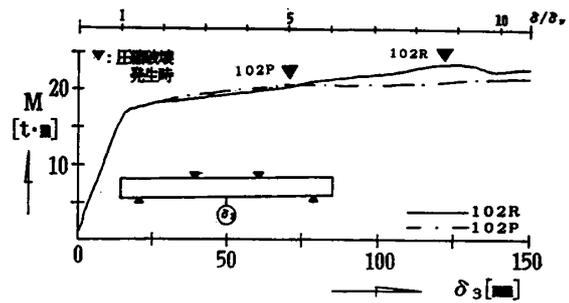


図-15 モーメント-たわみ曲線

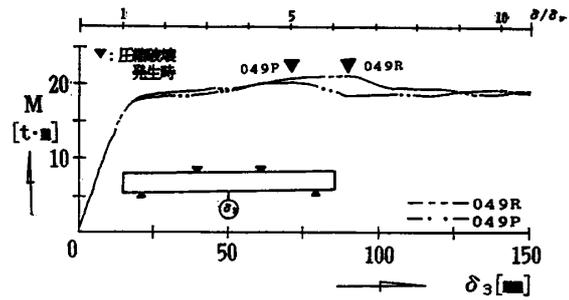


図-16 モーメント-たわみ曲線

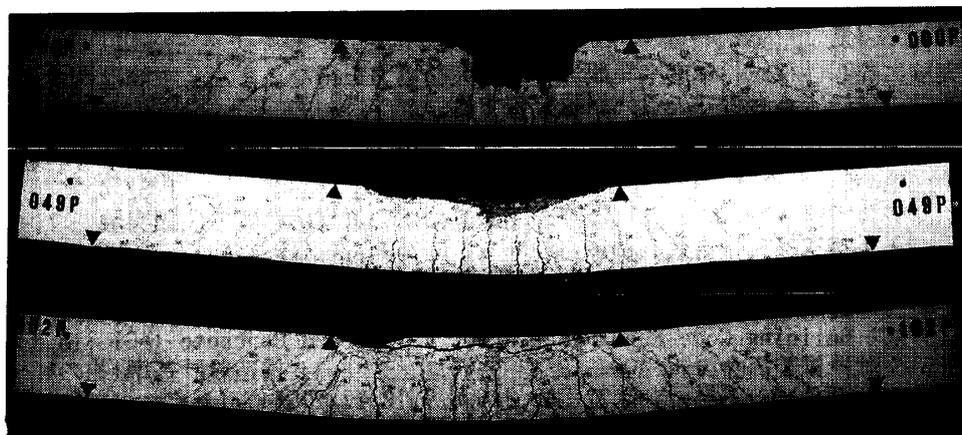


写真-1 試験区間の最終破壊状況（一方向繰り返し加力）

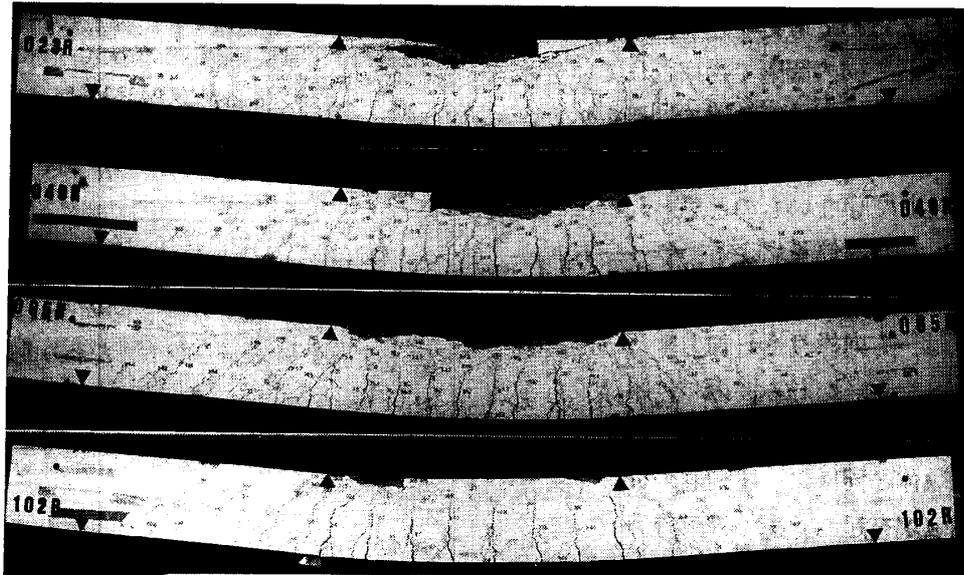


写真-2 試験区間の最終破壊状況（正負繰り返し加力）

異なる試験体を比較したモーメント-たわみ曲線の包絡線である。この図より、圧縮側のコンクリートが圧縮破壊を起こすまでの耐荷力は、加力方法の違いによる差はあまりみられていない。しかし、圧縮破壊の発生は、正負繰り返し加力の場合の方が一方向繰り返し加力の場合に対し、部材の変形がより進行してから起こっている。このことは、正負繰り返し加力を行った試験体では、正負繰り返し荷重下のコンクリートのひびわれの開閉挙動において、一度発生したひび割れが再び完全に閉合し圧縮破壊に至るまでの間に、部材の変形の方が先行したためと思われる。また、圧縮破壊後の耐荷力は、加力方法が異なってもほぼ同じ値となった。

## 5. まとめ

RCばりの純曲げ実験において、本実験の程度の繰り返しの範囲内では、正負繰り返し加力しても横補強筋の間隔を圧縮鉄筋の径の6倍に配筋すれば、複筋比が小さくても圧縮鉄筋の座屈による極端な耐荷力の低下はみられず靱性を維持することができた。なお、圧縮破壊の発生は、正負繰り返し加力の場合の方が一方向繰り返し加力の場合に対し、部材の変形がより進行してから起こることがわかった。

**謝辞** 本実験に際し、平成3年度卒業研究生の多大な協力を得た。また、主筋は株式会社伊藤製鉄所の寄付によるものでここに謝意を表する。

- 参考文献**
- 1) 矢代秀雄・清水庸介: 曲げを受けるはりの圧縮鉄筋の補強効果に関する実験的研究、第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、pp349-352、1982.4
  - 2) 矢代秀雄・清水庸介: RCばりの圧縮側に用いる異形棒鋼の圧縮実験、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.2、pp269-274、1991.6
  - 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、1988
  - 4) 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
  - 5) ACI: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)
  - 6) 文献抄録委員会・訳: ACI 318-83 鉄筋コンクリート構造設計基準(その1.~6.)、コンクリート工学、Vol.22、No.5,6,8,9,10,12、1984
  - 7) Standards Association of New Zealand: Code of Practice for the Design of Concrete Structures, NZS 3101, Wellington, 1982
  - 8) R. PARK: Ductile Design Approach for Moment Resisting Reinforced Concrete Frames、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.10、No.1、pp1-21、1988.6