# 論文 鉄筋コンクリート柱の曲げ変形性能に及ぼす帯筋端部加工形状の影響

仁科 誠治\*1・大野 義照\*2・岸本 一蔵\*3・中川 隆夫\*4

要旨:帯筋端部加工形状(折り曲げ角度,余長,加工方法)がRC柱の曲げ変形性状に与える影響 を明らかにするため、フック型及び溶接閉鎖型の帯筋(丸鋼・異形鉄筋)を用いたRC柱試験体の 曲げせん断正負交番繰り返し試験及び中心圧縮試験を行った。その結果、余長4dの90°フック帯 筋の試験体と余長6dの135°フックの試験体とでは部材角1/50を越えると変形性能に差が生じ、 帯筋が異形鉄筋で135°フック、余長6dの試験体では溶接閉鎖型帯筋を配した試験体と同等の限 界部材角及び荷重-変形関係を得られた。

キーワード:帯筋,折り曲げ角度,余長,フック,鉄筋コンクリート柱

### 1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震において、大きな被害 を受けた鉄筋コンクリート(以下RCと略記)造建 物の柱部材の帯筋端部形状は折り曲げ角度が90度 で余長が4d程度(以下90-4dのように略記)であっ た(JASS5・鉄筋コンクリート工事<sup>1)</sup>において帯筋 の末端部は135-6d以上と明記されている)。一方今 般の建築基準法の改正により、建物の構造設計は 性能設計へ移行しつつあり、変形能力を期待する 建物も設計されるようになった。柱部材の変形性 能に与える横補強筋量や軸力比の影響については

既に検討されている<sup>2)~6)</sup>が,横補強筋 の端部形状がコンクリートの拘束効果, ひいては部材の変形能力に与える影響 についてはいまだ十分に解明されてい るとは言い難い。

そこで,地震被害の原因解明,既存 建物の耐震診断ならびに,今後の靭性 設計を目標とした配筋方法の資料を 得る目的で,帯筋端部加工形状(余長, 折り曲げ角度,加工方法)が RC 柱の 曲げ破壊性状に及ぼす影響を,RC 柱 試験体の曲げせん断正負交番漸増繰 り返し載荷試験を行って調べた。また, 帯筋端部加工形状の柱試験体の曲げ圧縮領域の挙動への影響を調べるために中心圧縮試験も併せて行った。

# 2. 中心圧縮試験

## 2.1. 実験概要

試験体一覧及び試験体形状・寸法をそれぞれ表 -1及び図-1に示す。実験のパラメータは、帯筋 端部加工形状(90-4d, 135-6d, 135-8d, 135-10d, 溶接閉鎖型),帯筋鋼材種(丸鋼φ6,異型鉄筋 D6)及び主筋の配筋状態(4-D13, 8-D13)である。

試験体名			十故	コンクリート			
	帯筋径	端部加工形状	p <sub>w</sub> [%]	$\sigma_{wv}[N/\text{mm}^2]$	$p_w$ , $\sigma_{wv}[\text{N/mm}^2]$	土肋	$\sigma_{\rm B}[\rm N/mm^2]$
M4-φ90-4d		90-4d					
M4- \ 135-6d	φ6	135-6d	0.448	337	1.51	4-D13	
M4- φ Weld		溶接閉鎖型					
M4-D90-4d		90-4d				σy=	
M4-D135-6d		135-6d				366[N/mm <sup>2</sup> ]	
M4-D135-8d	D6	135-8d	0.512	370	1.89		
M4-D135-10d		135-10d				pg=0.82[%]	
M4-DWeld		溶接閉鎖型					
M.R.4		-					
M8-φ90-4d		90-4d					36.9
M8- \ 135-6d	φ6	135-6d	0.448	337	1.51	8-D13	
M8- φ Weld		溶接閉鎖型					
M8-D90-4d		90-4d				σy=	
M8-D135-6d		135-6d				366[N/mm <sup>2</sup> ]	
M8-D135-8d	D6	135-8d	0.512	370	1.89		
M8-D135-10d		135-10d				pg=1.63[%]	
M8-DWeld		溶接閉鎖型					
M.R.8							
Plain Concrete			主筋なし				

表-1 中心圧縮試験体一覧

\*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 (正会員)
\*2 大阪大学教授 工学研究科建築工学専攻 工博(正会員)
\*3 大阪大学学内講師 工学研究科建築工学専攻 博士(工学)(正会員)
\*4 大阪大学助手 工学研究科建築工学専攻 (正会員)



帯筋端部形状の影響を明確にするために、フック はすべて同じ位置(図-1において A の位置)に 配置した。載荷は5MN 万能試験機を用いて単調増 加で行った。

#### 2.2. 実験結果

# 2.2.1 破壊性状

図-2 に載荷終了後の破壊状況を示す。すべての 試験体において軸ひずみ3。5%程度まで載荷した。



M8-D90-6d

M8-D135-6d M8-DWeld

図-2 最終破壊状況

破壊性状への帯筋鋼材種の影響は、特に見られな かった。帯筋端部加工形状が 90-4d の試験体は主 筋の配筋方法に関わりなく最終的にフックが完全 に外側へ開いた。また、主筋を8本配筋した場合 (以下 M8 と略記), 90-4d の試験体は非フック側 の2辺において中間主筋位置で帯筋が屈曲してい たが、フック側の2辺では屈曲していなかった。 他の端部形状の試験体では、すべて帯筋の 4 辺全 部において中間主筋位置で屈曲していた。このこ とから、帯筋端部が90°フックでは帯筋による中 間主筋の座屈防止効果は極めて小さいと言える。 M8 の場合,帯筋端部形状が 90-4d 及び 135-6d で は両者ともに中間主筋の座屈によりフックが完全 に外側へ開いた。一方, M4の場合では、帯筋端部 形状が 90-4d の試験体においてフックは外側へ開 いたが、他の端部形状ではフックは開かなかった。

# 2.2.2 荷重 P-軸ひずみ ε v 関係

図-3 に荷重-軸方向ひずみ関係を示す。最大 荷重に対して帯筋端部加工形状及び鋼材種の影響 はほとんど見られなかった。

最大荷重以降の耐力低下は,帯筋端部形状が 90-4d の試験体が,他の端部加工形状の試験体に比 べて、主筋の配筋種別及び帯筋鋼材種の違いに関 係なく最も急激であった。これは, 90-4d の端部形 状フックの定着力が低いために、コアコンクリー トの柱面外方向への膨張に対する抵抗及び主筋の



図-3 荷重P-軸方向ひずみ ε v関係

座屈に対する拘束が他の端部加工形状に比べ劣っ ていることによると考えられる。

また、135°フックを持つ試験体において、余長 を 6d から 8d, 10d と長くしても荷重一軸ひずみ関 係に影響はほとんどなかった。

## 2.2.3 軸ひずみ $\varepsilon_v$ -帯筋ひずみ $\varepsilon_w$ 関係

図-4 に荷重一軸ひずみ関係と軸ひずみ一帯筋 ひずみ関係を対応させたグラフを示す。ひずみゲ ージをフック側 (図-1中a) と非フック側 (図-1中b)の2ヶ所に貼付し、ひずみの挙動からフッ クの滑りを判定しようとするものである。

帯筋が D90-4d の試験体では、軸ひずみの増加に ともない、非フック側bの位置の帯筋ひずみは増 加しているが、フック側 a の位置の帯筋ひずみは

2500 P[kN] HTY

\MCY

0.5

2000

1500

1000

500 v[%] 0

0.2

0.4

0.6

0.8

2000

1500

1000

500

0.2

0.4

0.6

0.8

1.0 εw [%] MRB: 主筋の座屈

**Ι**ε<sub>v</sub>[%] 0

2.0

ック側

1.0**L**εw [%]

2500 [P[kN] HTY

MCY

0.5

2.0

MRB 0.85Pmax

1.0

フック側

0.85Pmax

1.0

FE:フックの外側への開き出し

MRB

1.5

M8-D90-4d

1.5

M8-D135-6d

フック側

2.0

٤ <sub>wy</sub>

ε, [%]

2.0

ε ",

2500 [P[kN] HTY

MRB

MCY

<u>0.85Pma</u>x

M8- $\phi$  90-4d

フック側

0.85Pmax

1.0

 $\frac{10}{1.0} l_{\varepsilon_{\rm w}}$  [%]

MCY:主筋の圧縮降伏 HTY:帯筋の引張降伏

MRB

R1.5

帯筋降伏時ひずみとい

FE

2000

1500

1000

500

0.2

0.4

0.6

0.8

2000

1500

1000

500

0

0.2

0.4

0.6

1.0<sup>L</sup> & w [%]

2500**[**P[kN]<sub>HTY</sub>

MCY

0.5

増加が一定或いは減少しており、フックの滑りが 確認できた。一方、帯筋が異形鉄筋で 135°フッ クの試験体においても、a、b 両位置での帯筋ひず みの進行に差は見られた。しかし, 90-4d において フックの滑りが発生した時点での軸ひずみにおい て, 位置 a での帯筋ひずみが増加しなくなるほど のものはなかった。

M8-  $\phi$  135-6d の試験体において、フック側と非 フック側の帯筋ひずみに差が生じ、フックが滑る 兆候が現れるとフック側ひずみはほとんど進行し なくなっている。一方, M8-D135-6d では鉄筋に付 着能力があるためフックの滑りの兆候が見られた 後も帯筋ひずみは緩やかであるが増加し続けた。 M8-D135の場合,余長を8d, 10dとしても6dと同 様の帯筋ひずみの増加傾向を示した。

# 3. 曲げせん断試験

#### 3.1 実験概要

試験体一覧及び試験体形状をそれぞれ表-2及 び図ー5に示す。パラメータは中心圧縮試験と同じ





NO 学時/ナイ					审肋		~ **	コンクリート	
NO.	武 映 1 平 名	種別	端部形状	p <sub>w</sub> [%]	$\sigma$ wy[N/mm <sup>2</sup> ]	$p_w \cdot \sigma_{wy} [N/mm^2]$	土肋	$\sigma_{\rm B}[{\rm N/mm}^2]$	
1	φ 90-4d		90-4d				8-D13		
2	φ 135-6d	φ6	135-6d	0.448	337	1.51			
3	$\phi$ Weld		溶接閉鎖型				σsy=		
4	D90-4d		90-4d				366[N/mm <sup>2</sup> ]	37.0	
5	D135-6d		135-6d					51.9	
6	D135-8d	D6	135-8d	0.512	370	1.89	pg=1.63[%]		
7	D135-10d		135-10d						<del></del>
8	DWeld		溶接閉鎖型						図一6 載荷装置

で、帯筋端部加工形状と鋼材種である。フックも 同様に同じ位置に配置した。図ー6に載荷装置を示 す。載荷は建研式加力方式によって行い、部材角 R=1/200, 1/100, 1/50, 1/30, 1/20の各部材角にお いて3回ずつ正負交番繰り返しを行った。設定した 軸力(軸力比0.3)を保持できなくなった時点(こ の時を終局時とする)で実験を終了した。帯筋量 は現行の設計規準で定まる程度の量とし、帯筋間 隔は全試験体とも50 mm、シアスパン比は2.0である。

### 3.2 実験結果

# 3.2.1 終局時サイクル数・限界部材角・最大耐 カ

実験結果一覧を表-3に示す。本報では部材の靭 性を評価する方法として限界部材角による評価方 法<sup>7)</sup>を用い,以下に示す代表的な3つの限界部材角 について検討を行い,表-3に示した。

0.8Q点: P-δ効果を含めた荷重-変形関係の 第1サイクル包絡線において,荷重が最大耐力の 80%に低下した点及びその部材角

0.8Q'点,0.95Q'点: P-δ効果を除去した荷重-変
形関係の第1サイクル包絡線において、荷重が最
大耐力の80%、95%に低下した点及びその部材
角

なお,後掲の図-9及び図-10のせん断力Q-水 平変位δ<sub>b</sub>関係には,0.8Q点が記されている。

表-3より,帯筋端部加工形状の最大耐力への影響は見られない。限界部材角に関しては、 NO.8 (DWeld)が他の試験体に比べ優れており、他の端部形状では差はほとんどなかった。

終局時サイクル数(終局時の部材角,及び()内 に示すその部材角における繰り返し回数で表す) については,丸鋼の場合では,90°フックと135°

-							
NO.	計時は々	最大	、耐力	限界部材角Ru[×10 <sup>-3</sup> rad]			終局時
	武贵冲石	Qmax[kN]	R[×10 <sup>-3</sup> rad]	0.8Q	0.95Q'	0.8Q'	サイクル数
1	\$\$ 90-4d	204.0	9.72	26.9	19.2	-	-1/30(1)
2	φ135-6d	211.3	9.91	24.5	17.6	-	-1/30(1)
3	$\phi$ Weld	203.0	9.15	25.2	18.0	-	-1/30(2)
4	D90-4d	204.5	9.21	24.8	17.3	33.0	-1/30(1)
5	D135-6d	205.0	9.12	23.7	17.6	31.2	+1/30(3)
6	D135-8d	208.4	9.68	23.7	17.3	31.4	-1/30(3)
7	D135-10d	206.4	10.11	25.8	18.7	-	+1/30(2)
8	DWeld	201.0	9.83	29.4	23.5	-	+1/20(1)

表-3 実験結果一覧

フックとでは差はなかった。異形鉄筋の場合,フ ック型では折り曲げ角度 90°より 135°の方が終 局時の部材角における繰り返し回数で優れていた。 また,135°フックは余長を 6d から 8d へと長く しても,終局時の部材角は 1/30 と変わらなかった。 また,終局に至るその部材角での繰り返し回数は 余長 6d では正方向 3 回目まで軸力を保持した程度 であった。

フック型と溶接閉鎖型の比較では,溶接閉鎖型 の方が,丸鋼では終局時部材角は等しいが繰り返 し回数が増加し,異形鉄筋では終局時部材角が大 きくなった。

# 3.2.2 破壊性状及びせん断力Q-水平変位 δh関 係

図-7に最終破壊状況,図-8に最終帯筋端部状況,図-9及び図-10にせん断カー水平変位関係を示す。全試験体において,部材角R=1/200の正方向第1サイクル(以後R=+1/200(1)のように略記)で曲げひび割れが発生し,R=+1/100(1)で曲げせん断ひび割れに進展した。R=+1/50(1)で圧懐・付着割裂ひび割れが生じ,R=+1/30(1)でかぶりコンクリートが剥落し,付着割裂ひび割れが進行した。

本実験の破壊パターンは2種類に分類される。1 つ目のパターンは、圧縮部の中間主筋が座屈し、



帯筋のフックが外れるかもしくは滑りが生じて急 激に耐力が低下するパターンで、それにあたるの 

(D90-4d) である。2つ目は、 圧縮部の中間主筋に 座屈が生じても帯筋のフックが外側へ開くことな く帯筋は主筋及びコアコンクリートを拘束し続け, コアコンクリートの損傷に伴い、軸力が保持でき ず終局にいたるパターンで、この場合、1つ目のパ ターンに比べ、急激な耐力低下は見られない。こ のパターンにあたるのが、NO.3 ( $\phi$  Weld), NO.5 (D135-6d), NO.6 (D135-8d) 及びNO.8 (DWeld) である。前者のパターンにおいて、部材角1/50まで なら溶接閉鎖型と同程度の荷重-変形関係であっ た。

NO.7 (D135-10d) は、R=+1/30(1)でせん断ひび 割れが発生し、R=+1/30(2)のピーク直前で、ヒンジ 領域外の柱中央部の中間主筋で座屈が生じ終局に

MCY: 主筋の圧縮降伏

MTY: 主筋の引張隆伊

φ90-4d

- 1/50 - 1/100

 $\phi$  135–6d  $^{250}$ 

200

150 M

100

50

250

200

150 M

王 前の 引張降伏 :帯筋の 引張降伏 限界部 材角

250 T Q[kN]

-100

-150

-200

Q[kN]

-100

-150

-200

**T** Q[kN]

10

1/100 1/50

-100

-150

-200

1/100 1/50

20

1/100 1/50

\_Ru

200

150

100

HTY

Ru

- 30 -20

HTY

- 30 - 20

- 1/30 - 1/50 - 1/100

¢Weld

- 20

- 1/50 - 1/100

- 1/30

NO. 2

NO. 3

40

- 1/30

NO. 1

-40

至り,他と異なる破 壊性状となった(こ のためNO.7は比較 対象から除外する)。 90°フック型帯筋  $\mathcal{O}$ NO.1 ( $\phi$  90-4d) 及びNO.2 (D90-4d) は,中心圧縮試験の 結果でも述べたよ うに, 圧縮部の中間 主筋で座屈が生じ, フックが外側に開 き,両者ほぼ同じ挙 動を示し終局に至 った。

NO.2 ( \ \ 135-6d) は,90°フック型の 帯筋を持つ試験体 とほぼ同じ荷重-変形関係を示し, 急 激な耐力低下を起 こした。中心圧縮試 験の結果ではφ

135-6dの帯筋を持つ試験体はD135-6dとほぼ同様の 挙動を示していたが、曲げせん断試験では荷重-変形関係に大きな差が出た。この理由として、曲 げせん断試験では、中心圧縮試験では発生しない せん断力が存在するため、帯筋端部がより厳しい 状況にさらされ、付着の有無が荷重一変形関係に 影響したことが考えられる。なお最終破壊状況で は、NO.2及びNO.5はフックが緩んでいるのが確認 されたが、NO.6はフックが緩むことなく定着して



いた。

# 3.2.3 帯筋ひずみ *ε* w-部材角R関係

図-11に柱端部から250mmの位置の帯筋ひずみ -部材角関係を示す。これも中心圧縮試験と同様 の方法でフックの滑りを判定しようとするもので ある。

丸鋼フック型のNO.1及びNO.2において, 非フッ ク側に比べ, フック側のひずみの増加が乏しく, R=1/200と初期の載荷階からひずみ差が生じてお りフックが滑っていることがわかる。

NO.4では, R=1/100まではほとんどひずみの差は 見られず, R=1/30の載荷階に入って, 非フック側 で急激なひずみの増加が見られたのに対し, フッ ク側ではあまり見られなかった。これよりフック が滑っていることがわかる。

NO.5及びNO.6では非フック側のひずみとフッ ク側のひずみがほぼ同じ挙動を示しており,フッ クが滑っていないことが確認できる。

# 4 まとめ

柱の中心圧縮試験及び軸力比を 0.3 とした柱の 曲げせん断試験から得られた知見をまとめると以 下のようになる。



- 帯筋が丸鋼の場合,端部形状を折り曲げ角 度 90°余長 4d にした場合と折り曲げ角度
   135°余長 6d とした場合で変形性能(終局時 サイクル数,限界部材角)に差はなかった。
- 2) 帯筋端部 90°フックの場合、鋼材種に関係なく部材角 1/50 程度までなら溶接閉鎖型と同程度の耐力を期待できる。しかし、部材角 1/30まで達すると帯筋のコアコンクリートに対する拘束力が低下し急激な耐力低下が生じた。
- 3) 帯筋が異形鉄筋で端部が 135°フック余長 6dの試験体の場合,粘りある破壊モードであ り,溶接閉鎖型と比べても限界部材角,終局 時サイクル数及び繰り返しによる耐力低下が 少し劣る程度であった。
- 4) 帯筋が異形鉄筋で 135°フックの場合,余 長を 8d としても 6d の時に比べ限界部材角及 び終局時部材角に差はなかった。また,その 終局時部材角において終局に至るまでの繰り 返し回数が余長 8d の方がやや大きい程度で あった。

### 謝辞

本研究はコンファインド研究会,高周波熱錬(株)なら びに大学院生立松伸博氏(現前田建設(株))の援助と協 力により行ったものである。記して謝意を表す。

#### 参考文献

1) 日本建築学会:建築工事標準仕様書JASS5・鉄 筋コンクリート工事, 1997.1

 2) 石川,木村,東端:帯筋端部のフック形状を変 数とした柱の中心圧縮試験,日本建築学会大会学術 梗概集(近畿),構造(その4),pp.43-44,1996.9
 3) 益尾,平井,尾谷:鉄筋コンクリート柱の圧縮 変形性状に及ぼす帯筋端部フック形状の影響に関 する実験,日本建築学会近畿支部研究報告集,pp.273 -276,1997.7

4) 立松,大野:鉄筋コンクリート柱の曲げ破壊性 状に及ぼす帯筋端部形状の影響,コンクリート工学 年次論文集,Vol.23,NO.3, pp.241-246, 2001

5) 立松,大野:帯筋端部の余長及び折り曲げ角度 が定着力におよぼす影響,日本建築学会近畿支部研 究報告集, pp.401-404, 2001.6

 6) 宮本、大野、森:鉄筋コンクリート柱部材の靭 性と横補強筋量について「塑性域の繰り返し劣化性 状」に関するシンポジウム、pp.343-348, 1998.8
 7) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造 物の靱性とその評価方法に関するコロキウム, 1988