

## 論 文

## [2051] 高強度マルチフープを用いた鉄筋コンクリート柱の曲げ変形性能

正会員○中澤 淳（川鉄テクノワイヤ）  
 正会員 三原重郎（川崎製鉄）  
 正会員 益尾 潔（日本建築総合試験所）  
 正会員 南 宏一（福山大学 建築学科）

## 1. はじめに

既報 [1]において、現場施工の効率向上および省力化が期待できる高強度マルチフープ（外周筋と副帯筋を一体化し、一筆書きに曲げ加工した一枚の帯筋）を用いたせん断破壊先行型RC柱の曲げせん断実験を行い、マルチフープは標準フープと同等のせん断耐力を与えるとともに、同等以上の変形性能を確保し得ることが明らかになっている。一方、特に高層建築における下層階の柱では、高軸力を受ける曲げ降伏ヒンジ領域における変形性能を確保することが設計上重要な課題になっている。そこで、本研究では、曲げ降伏先行型のRC柱を対象にして、 $13,000\text{kgf/cm}^2$ 級の高強度鉄筋を用いたマルチフープの曲げ靱性に及ぼす補強効果を把握するとともに、マルチフープ、マルチスパイラルおよび標準型のせん断補強筋による補強効果を比較検討することを目的として、補強筋形状、せん断補強筋比、軸力比および主筋量の異なるRC柱14体の実験を行った。本論では、これらの実験結果により、高強度マルチフープを用いたRC柱の曲げ変形性能に及ぼす、各実験変数の影響について比較検討する。また、終局強度型耐震設計指針のA法（以後、指針式と呼ぶ）[2]および益尾らが提案している提案式[3]による限界部材角の実験値と計算値を比較し、それらの評価法の有効性についても併せて検討する。

## 2. 実験計画

表1に実験計画を示す。計画した試験体は14体である。実験変数として補強筋形状、せん断補強筋比、軸力比および主筋量の4種類とした。補強筋形状は、標準フープが3種類、マルチフープが3種類、マルチスパイラルが1種類の計7種類を選択し、せん断補強筋比はピッチを@70mmと@35mmにすることにより変化させた。また、軸力比は0.3および0.6の2種類を、主筋量は主筋径をD16とD19の2種類である。ここで選択した標準フープとしては、135°フック付きの外周のみの場合（Eタイプ）、Eタイプをスパイラル状にした場合（ESタイプ）および外周筋と135°フック付きの団の字の副帯筋を用いた場合（S2タイプ）である。また、マルチフープとしては、団の字（S2タイプ）、外周筋とダイヤ形（Dタイプ）および八角形（Oタイプ）の副帯筋を一筆書き的に一枚のみ曲げ加工した場合である。

表1. 実験計画

試験体名	補強筋形状	せん断補強筋量 p_w (%)	軸力比 n	主筋量 p_g (%)	
(1) N-ES-35-3	スパイラル	2-5φ @35 (0.38)	0.3	16-D13 (2.26)	
(2) N-E-35-3	標準				
(3) M-S2-70-3	マルチフープ		0.3		
(4) M-S2-70-6			0.6		
(5) M-S2-35-3			0.3		
(6) M-S2-35-6			0.6		
(7) N-S2-35-3			0.3		
(8) N-S2-35-6	標準		0.6		
(9) M-S2S-35-3	0.3				
(10) M-S2S-35-6	マルチスパイラル		0.6		
(11) M-D-35-3	マルチフープ	2+D-5φ @35 (0.65)	0.3	16-D16 (3.54)	
(12) M-O-35-3	マルチフープ				
(13) M-S2-70-3L	マルチフープ	4-5φ @70 (0.38)	0.3	16-D16 (3.54)	
(14) M-S2-35-3L	マルチフープ	4-5φ @35 (0.76)			

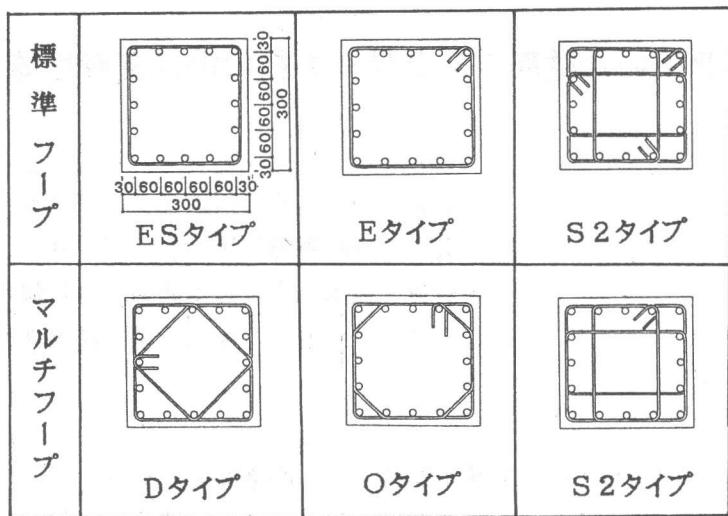


図1. 試験体の断面構成

表2. 鋼材の機械的性質

鉄筋名	降伏応力度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張り強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	伸び (%)
RB5.0 <sup>1)</sup>	14350 <sup>2)</sup>	14770	10.9
D13	4270	6070	23.4
D16	4320	6610	21.0

1) PC鋼棒「リバーボン」を使用

2) 降伏応力度は0.2%永久伸びに対する応力

表3. コンクリートの試験結果

試験体No.	圧縮強度 F <sub>c</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	歪み度 $\varepsilon_{co}$ ( $\times 10^{-3}$ )	ヤング係数 E <sub>c</sub> ( $\times 10^5$ )
No.1 ~ No.6	391	2.29	2.59
No.7 ~ No.10	397	2.23	2.77
No.11~No.14	405	2.23	2.80

さらに、マルチスパイラルとしては囲の字(S2タイプ)のマルチフープを柱頭から柱脚まで連続的に曲げ加工した場合(S2Sタイプ)である。なお、主筋として16-D13を用いた試験体では、曲げ降伏後、材端部に塑性ヒンジを形成し、限界変形に至る崩壊性状を想定している。これに対して、16-D16を用いた試験体では、主筋に沿う付着割裂が厳しい条件のもとにおける変形性能を調べることを意図している。図1に試験体の断面構成を示す。なお、柱長さ: H=120cm および断面寸法:B×D=30×30cmは共通にした。表2に鋼材の機械的性質を、表3にコンクリートの圧縮試験結果を示す。せん断補強筋には、異形PC鋼棒「リバーボン」5.0φを実験変数の条件に従って配筋し、主筋には16-D13および16-D16を用いた。ここで、ダイヤ形および八角形の副帯筋のせん断補強筋比は、既報[1]により算出した。実験は、建研式加力装置を用いて、変位制御による正負漸増繰り返し逆対称曲げ、せん断耐力を加えることにより行なった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 破壊性状

図2に、各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は作用せん断耐力Q(t<sub>f</sub>)を、横軸は部材角R( $\times 10^{-3}$  rad.)を、一点鎖線はP-δ効果による付加モーメントの影響を表す。図中の記号は、ひび割れ発生点と主筋およびせん断補強筋のひずみ推移状況を示す。各試験体とともに曲げひび割れが発生した後、材端部に斜めひび割れが発生し、主筋の圧縮および引張り降伏に伴って材端部コンクリートの圧壊に伴って最大耐力に達し、曲げ圧縮破壊の様相を呈した。最大耐力後は、材端部主筋が座屈し、最終的には座屈部が繰り返し疲労に因って破断し、破壊に至った。但し、補強筋形状が外周筋のみのEおよびESタイプと主筋がD16を用いた4体は破断には至らず、付着ひび割れに大きく支配される破壊性状を示した。また、軸力比n=0.6の各試験体は、曲げ降伏後、材端部ヒンジ領域内のせん断補強筋が降伏に至っており、これは高軸力を受ける曲げ降伏柱において、材端部ヒンジ領域内のせん断補強がコアコンクリートを有効に拘束しているものと考えられる。表4に各試験体の最大耐力実験値および各耐力計算値を示している。各試験体とも、最大耐力実験値は終局曲げ耐力計算値に良く一致している。また、A法[2]によるせん断耐力よりも曲げ耐力の方が下回っており、計算上も曲げ降伏が先行することが予測される。

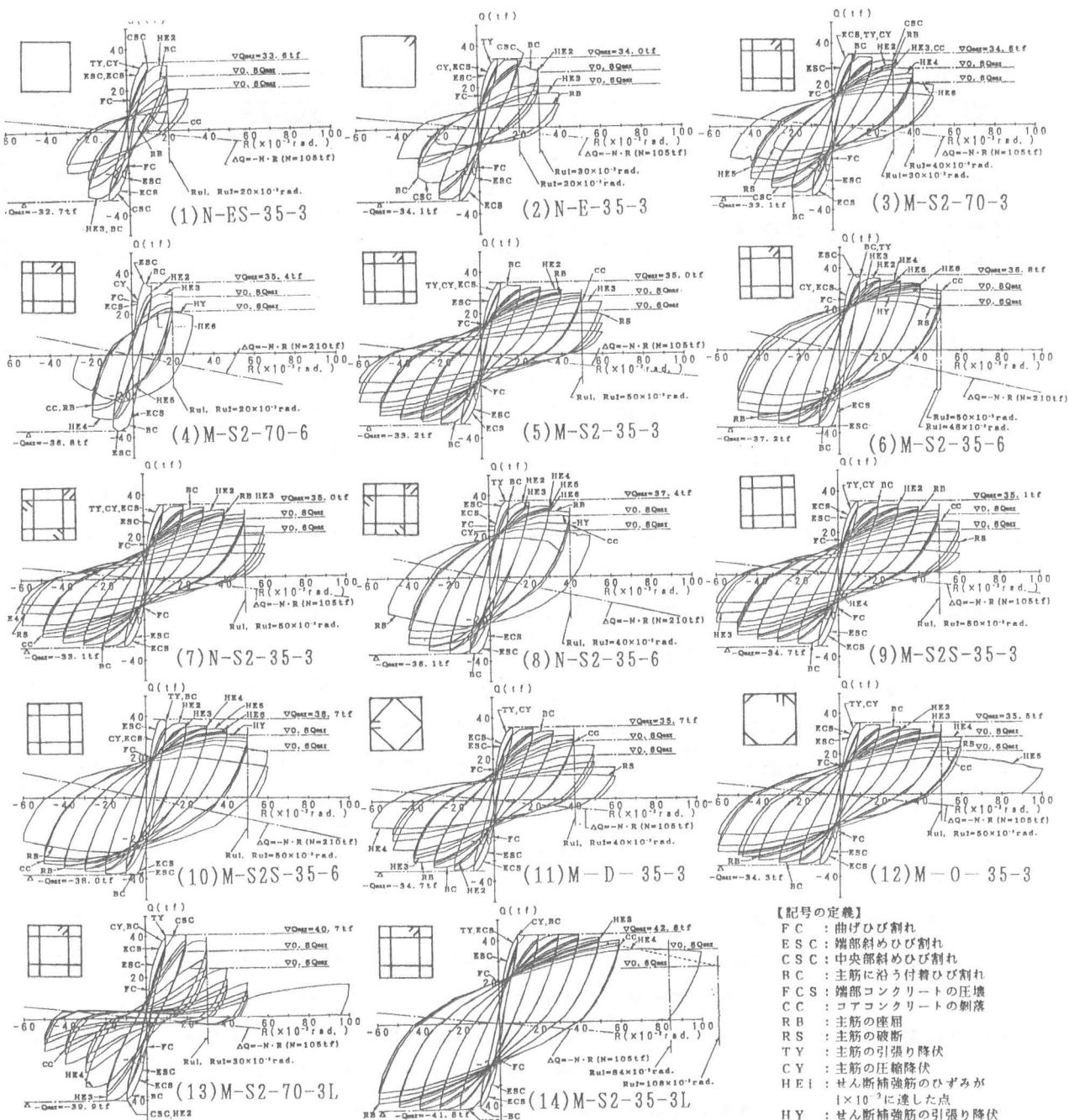


図2. 各試験体の履歴曲線

### 3.2 補強効果の比較検討

図3(a)～(e)に実験変数による履歴包絡線示す。

#### (a) 標準フープとマルチフープとの比較

軸力比  $n=0.3$  であるマルチフープ、標準フープおよびマルチスパイラルを用いた試験体(No.5)、(No.7)および(No.9)では、材端部の主筋の座屈とコンクリートの損傷により、限界部材角が決っているものと考えられ、各試験体の荷重-変形性状はほぼ相等しい。また、軸力比  $n=0.6$  の高軸力下の試験体では、標準フープ、マルチフープおよびマルチスパイラルを用いた試験体の順で変形性能が向上している。すなわち、せん断補強筋量が比較的多く、曲げ降伏が先行するRC柱で高軸力を受ける場合は、材端部ヒンジ領域におけるコアコンクリートの拘束程度によって、変形性能が左右されると考えられ、このコアコンクリートの拘束程度が、標準フープ、マルチフープおよびマルチスパイラルの順で大きくなつた為と考えられる。

#### 【記号の定義】

- F C : 曲げひび割れ
- E S C : 端部斜めひび割れ
- C S C : 中央部斜めひび割れ
- R C : 主筋に沿う付着ひび割れ
- F C S : 端部コンクリートの圧壊
- C C : コアコンクリートの剥落
- R B : 主筋の座屈
- R S : 主筋の破断
- T Y : 主筋の引張り降伏
- C Y : 主筋の圧縮降伏
- H E i : せん断補強筋のひずみが  $\times 10^{-3}$  に達した点
- H Y : せん断補強筋の引張り降伏

### (b) 補強筋形状の影響

同一補強筋( $P_w=0.38\%$ )とした口の字のスパイラル筋と、 $135^\circ$  フックを有する標準フープを用いた試験体(No.1)および(No.2)では、曲げ降伏後、部材中央における付着割裂ひび割れの進展により破壊に至ったのに対し、囲の字形マルチフープを用いた試験体(No.3)では、最大耐力後、部材中央における付着割裂ひび割れは発生しているものの、それほど進展せず、口の字に比べ変形性能が向上している。これは、外周のみに密に配筋するよりも、副帯筋を使用した方が付着強度が増大し、付着ひび割れの進展を抑えるものと考えられる。

表4. 最大耐力実験値および各耐力計算値

単位:  $Q(t_f)$ 、 $R(\times 10^{-3} \text{ rad.})$

試験体名	実験結果 最大耐力 $Q_{max}$ 正 (負) $R_{max}$ 正 (負)	曲げ耐力 計算値 $Q_{fu}(t_f)$ (* 1)	せん断耐力計算値		限界部材角 ( $\times 10^{-3} \text{ rad.}$ )			
			荒川min式 $Q_{au}(t_f)$ (* 2)	A法 $QAu(t_f)$ (* 3)	実験値 $R_u$		計算値 <sup>-4</sup>	
					指針式	提案式		
(1) N-ES-35-3	33.6 (32.7)	10.3 (10.1)	31.4 (1.08)	24.0 (0.77)	54.2 (1.74)	20	15.2 (1.32)	14.8 (1.35)
(2) N-E-35-3	34.0 (31.4)	10.1 (10.1)	31.4 (1.09)	24.0 (0.77)	54.2 (1.74)	30	15.2 (1.97)	14.8 (2.03)
(3) M-S2-70-3	34.6 (33.1)	10.1 (9.9)	31.4 (1.10)	24.0 (0.77)	54.2 (1.74)	30	15.2 (1.97)	27.4 (1.09)
(4) M-S2-70-6	35.4 (36.8)	6.2 (6.2)	34.1 (1.08)	24.0 (0.81)	54.2 (1.74)	20	16.2 (1.23)	19.6 (1.02)
(5) N-S2-35-3	35.0 (33.2)	10.1 (10.1)	31.4 (1.11)	29.8 (0.96)	68.9 (2.22)	50	36.5 (1.37)	43.9 (1.14)
(6) N-S2-35-6	36.8 (37.2)	6.9 (6.6)	34.1 (1.09)	29.8 (1.00)	68.9 (2.23)	48	37.2 (1.29)	31.7 (1.51)
(7) M-S2-35-3	35.0 (33.1)	10.2 (10.0)	31.4 (1.11)	29.9 (0.96)	69.6 (2.22)	50	36.4 (1.37)	43.7 (1.14)
(8) M-S2-35-6	37.4 (36.1)	10.2 (8.1)	34.1 (1.08)	29.9 (0.99)	69.6 (2.30)	40	37.5 (1.07)	31.5 (1.27)
(9) M-S2S-35-3	35.1 (34.7)	10.1 (10.1)	31.4 (1.11)	29.9 (0.96)	69.6 (2.22)	50	36.4 (1.37)	43.7 (1.14)
(10) M-S2S-35-6	38.7 (38.0)	8.0 (10.1)	34.1 (1.12)	29.9 (0.99)	69.6 (2.30)	50	37.5 (1.33)	31.5 (1.59)
(11) M-D-35-3	35.7 (34.7)	10.2 (10.1)	31.4 (1.13)	28.6 (0.91)	68.0 (2.16)	40	36.3 (1.10)	33.0 (1.21)
(12) M-O-35-3	35.5 (34.3)	10.3 (10.1)	31.4 (1.12)	29.3 (0.98)	69.4 (2.20)	50	36.3 (1.38)	41.7 (1.20)
(13) M-S2-70-3L	40.7 (39.9)	16.3 (20.1)	39.2 (1.04)	25.4 (0.65)	56.0 (1.44)	30	10.2 (2.94)	27.2 (1.10)
(14) M-S2-35-3L	42.6 (44.8)	20.1 (20.1)	39.2 (1.09)	31.2 (0.80)	70.5 (1.18)	84	29.2 (2.88)	44.4 (1.89)

\* 1 :  $Q_{max}/Q_{fu}$       \* 2 :  $Q_{au}/Q_{fu}$       \* 3 :  $QB_u/Q_{fu}$

\* 4 : ( ) 内の数値は、実験値/計算値を示す。

### (c) せん断補強筋比の影響

せん断補強筋比  $P_w$  を  $0.38\%$  と  $0.76\%$  として、軸力比を  $n=0.3$  および  $0.6$  とした囲の字形マルチフープを用いた試験体では、せん断補強筋比  $P_w$  が多くなるほど、また、軸力比  $n$  が小さくなるほど、それぞれ変形性能が向上している。なお、 $n=0.6$  で、 $P_w$  が  $0.38$  の試験体(No.4)では変形性能が著しく低下している。これは、最大耐力時に部材中央において、中段筋に沿ってひび割れが進展するとともに材端部ヒンジ領域の補強筋が降伏した為と考えられる。

### (d) 副帯筋形状の影響

囲の字形、ダイヤ形および八角形マルチフープを用いた試験体(No.6)、(No.11)および(No.12)では、各試験体とも、材端部における主筋の座屈と、副帯筋で囲まれたコアコンクリート以外の剥落および損傷の著しくなり破壊に至っており、変形性能はダイヤ形、囲の字形および八角形マルチフープを用いた試験体の順に向かっている。これは、ダイヤ形の場合、囲の字形および八角形マルチフープの場合に比べ、せん断補強筋比が少なく、かつ、座屈拘束を受けている主筋の本数が少ないと起因している。また、同数の主筋を拘束している八角形と囲の字形マルチフープの場合、八角形マルチフープがせん断補強筋比が少ないにもかかわらず、変形性能が向上している。これは、八角形副帯筋で囲まれたコアコンクリートの面積が、囲の字形副帯筋に比べて  $\sqrt{2}$  倍になっていることに起因している。すなわち、本実験で用いた八角形副帯筋は円形に近い形状になっていることから円形とほぼ同様な拘束効果があると推測される。

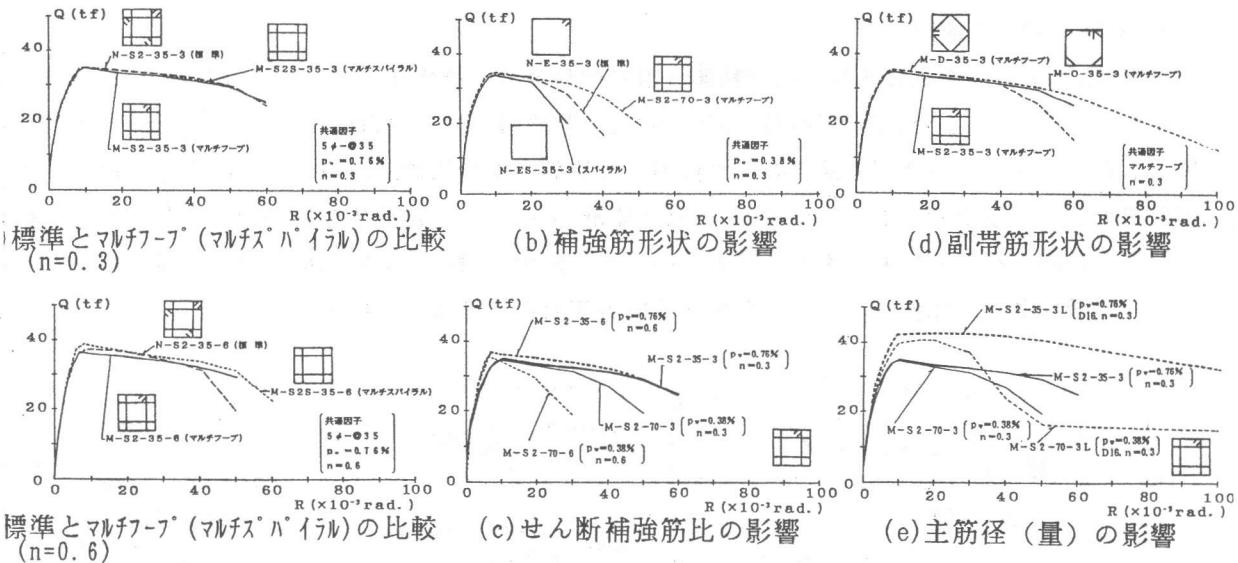


図 3. 履歴包絡線による実験変数の比較

#### (e) 主筋径 (量) の影響

同一軸力比とし、せん断補強筋比  $P_w$  を 0.38% と 0.76% とした囲の字形マルチフープを用いて、主筋に D13 および D16 を用いた試験体では、 $P_w$  の少ない場合、付着強度の条件が厳しい D16 を用いた試験体は、最大耐力以後、付着ひび割れの拡幅により破壊に至り、D13 を用いた試験体に比べて変形性能が劣っている。これに対して、 $P_w$  の多い場合、D16 を用いた試験体では付着ひびわれの進展が抑えられており、D13 を用いた場合に比べて変形性能が優れている。すなわち、せん断補強筋量を増やし、付着破壊が起こらないようになっている場合、主筋径を太くしたことで、主筋の座屈が抑えられ、変形性能が向上すると考えられる。

### 3.3 せん断補強筋の歪み性状

図 4 は柱中心から柱脚部におけるせん断補強筋の歪み推移状況を示したものであり、その一例として軸力比が  $n=0.6$  でマルチスパイラルの試験体 (No.10) を示す。各試験体において部材角  $R=20 \times 10^3 \text{ rad}$  以降加力方向および直行方向とも外周筋に比べ、副帯筋の歪み度が大きくなる傾向が認められ、最終的には加力方向に関係なく副帯筋の歪みが降伏していることが認められた。特に軸力比が  $n=0.6$  でマルチフープおよびマルチスパイラルを用いた試験体が顕著であった。これは、材端部ヒンジ領域におけるコアコンクリートおよび主筋の座屈の拘束に対して、副帯筋が有効に働いていると考えられ、かつ、連続的に曲げ加工していることで補強効果を充分に発揮しているものと考えられる。

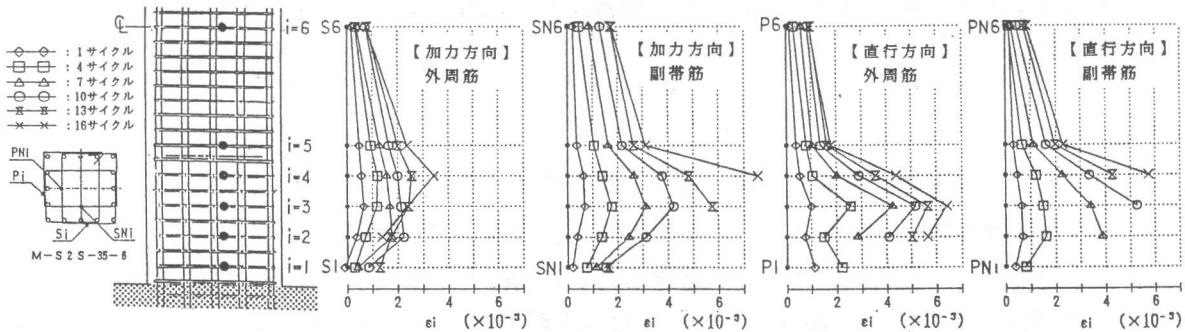


図 4. せん断補強筋の歪み推移状況

### 3.4 限界部材角の検討

指針式 および提案式による、各試験体の限界部材角の実験値( $R_u$ )<sub>test</sub>と計算値( $R_u$ )<sub>cal</sub>を表4に示している。ここで、限界部材角 $R_u$ は一回目の包絡線で最大耐力の80%に低下した時点の部材角とした。図5に指針式(A法) および提案式計算値と実験値の関係を示す。指針式の場合、本実験値に対して安全側になっているが、高主筋量(D16)である試験体(No.13)および(No.14)については過小評価になっている。また、提案式の場合、限界部材角の実験値に対する計算値の比が1～2の範囲にあり、比較的ばらつきが少なく限界部材角を評価している。

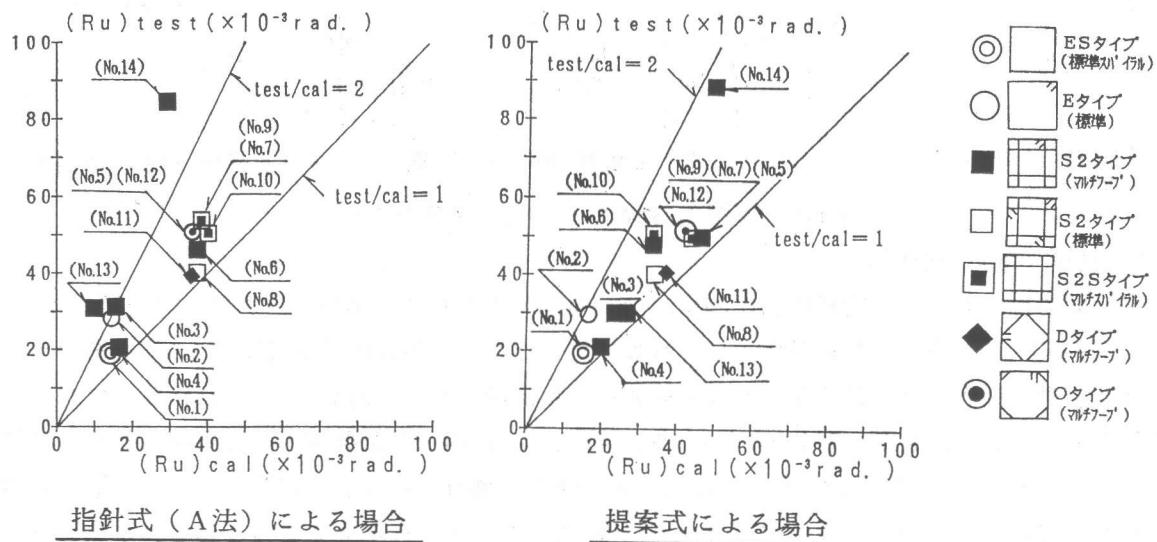


図5. 実験値( $R_u$ )<sub>test</sub>－計算値( $R_u$ )<sub>cal</sub>の関係

### 4. 結論

- (1) 軸力が大きい場合、団の字形で標準ループ、マルチループおよびマルチスパイラルの補強形状の順で変形性能が向上した。これは、補強筋を連続的に加工する程、高軸力時の韌性に及ぼす補強効果があると言える。
- (2) 八角形マルチループは団の字形マルチループに比べ、変形性能が向上した。これは、副帯筋が拘束しているコアコンクリートの範囲が大きいことによると考えられる。また、八角形は円形とほぼ同様な拘束効果があると推測される。
- (3) 外周のみに密に配筋するよりも、副帯筋を使用したほうが、曲げ降伏後の付着割裂を抑制することができる。
- (4) 指針式(A法)では、限界部材角に対して安全側になっているが、高主筋量である試験体については過小評価する傾向がある。また、提案式では比較的ばらつきが少なく限界部材角を評価している。

### 5. 参考文献

- [1] 中澤淳、三原重郎、益尾潔、南 宏一：高強度マルチループを用いた鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状、コンクリート工学年次論文報告集、1991年6月、pp445-450
- [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990年11月
- [3] 益尾 潔：曲げ降伏型鉄筋コンクリート柱の変形性能向上に関する研究、日本建築学会、近畿支部報告集、平成3年5月、pp49-52