

論文

[2073] 高強度マルチフープを用いた鉄筋コンクリート柱のせん断破壊性状

正会員○中澤 淳 (川鉄テクノワイヤ)

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

近年、建築物の技術革新には目ざましいものがあり、中でも高層建築の建築棟数の伸びは著しく、その中において鉄筋コンクリート（以後、RCと呼ぶ）構造の超高層集合住宅が各方面で数多く計画され、建設されている。このようなRC部材では、高軸力、高せん断力を受けるため、耐震性能確保のために材料の高強度化を図ると共にせん断補強筋の配筋形状についても検討がなされてきた。その中でも外周筋と副帯筋を組み合わせたせん断補強筋の有効性が指摘されている。

[1] [2] しかしながら、この副帯筋の現場施工は非常に手間がかかる上に高強度の鉄筋を使用する場合には配筋しにくくなる。そこで、外周筋と副帯筋を一体に加工することで、現場施工の効率向上および省力化が期待でき、また、一筆書きに加工することによりフックを少なくすることができ、その結果、せん断補強筋としての構造的な信頼度が向上すると考え、外周筋と副帯筋を一体化し、一筆書きに曲げ加工した帯筋を考案して試作し、これを「マルチフープ」と名付けた。本論ではせん断破壊先行型のRC柱を対象にして13000kgf/cm²級高強度鉄筋を用いた、マルチフープのせん断補強効果を把握するとともに、マルチフープと標準型のせん断補強筋とを比較検討することを主目的とし、補強筋形状およびせん断補強筋比を実験変数としたRC柱12体の実験を行い、これらの実験結果より、実験変数が破壊性状およびせん断耐力におよぼす影響を比較検討する。

2. 実験計画

表1に実験計画を示す。計画した試験体は12体である。実験変数として補強筋形状およびせん断補強筋比の2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4種類の計7種類を選択し、せん断補強筋比は、各補強筋形状に対してピッチを@70mmと@35mmにすることにより変化させた。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）、外周筋と十字に135°フック付きの副帯筋を用いた場合（S1タイプ）および外周筋と135°フック付きの囲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、田の字（S1タイプ）および囲の字（S2タイプ）に「一筆書き」に折り曲げ加工したものと、外周筋とダイヤモンド形（Dタイプ）および八角形（Oタイプ）の副帯筋を「一筆書き」に折り曲げ加工したもので

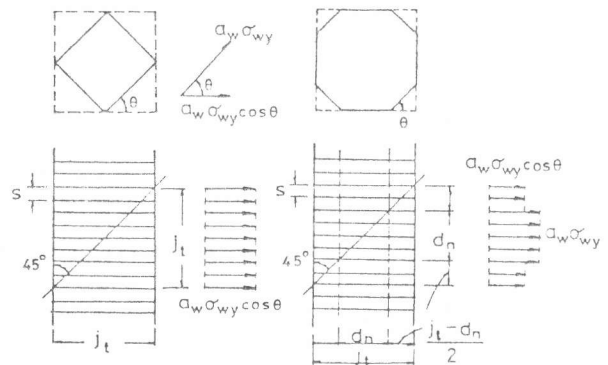
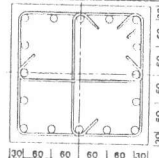
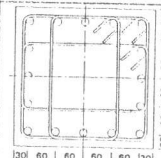
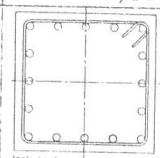
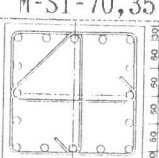
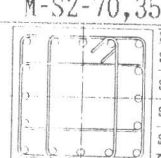
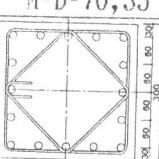
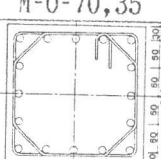


図1. ダイヤ、八角形の副帯筋 (pw) の定義

表1. 実験計画および断面形状の詳細

試験体名	N-S1-70	N-S2-70	N-E-70,35
断面形状			
タイプ	S1タイプ	S2タイプ	Eタイプ
p_w (%)	0.286	0.381	0.191, 0.381
配筋	5φ-@70	5φ-@70	5φ-@70,35
試験体名	M-S1-70,35	M-S2-70,35	
断面形状			
タイプ	S1タイプ	S2タイプ	
p_w (%)	0.286, 0.572	0.381, 0.762	
配筋	5φ-@70,35	5φ-@70,35	
試験体名	M-D-70,35	M-O-70,35	
断面形状			
タイプ	Dタイプ	Oタイプ	
p_w (%)	0.325, 0.650	0.353, 0.706	
配筋	5φ-@70,35	5φ-@70,35	

【共通因子】
 $H=750\text{cm}$
 $B \times D=30 \times 30\text{cm}$
 $p_g=3.54\%$
 (16-D16)
 $n=N/(BDFc)=0.29$
 $N=90.5\text{tf}$
 【余長】
 $135^\circ \rightarrow 8d=40\text{mm}$
 $90^\circ \rightarrow 12d=50\text{mm}$
 【折曲げ内直径】
 $5d=25\text{mm}$
 【コンクリート試験結果】
 $F_c=342\text{kgf/cm}^2$
 $E_c=2.26 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$
 $\sigma_t=30.9\text{kgf/cm}^2$

表2. 鉄筋の機械的性質

鉄筋名	降伏応力度 (kgf/cm ²)	引張り強度 (kgf/cm ²)	伸び (%)
RB5.0 ¹⁾	14350 ²⁾	14770	10.9
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

ある。表1に試験体断面の詳細を示す。なお、柱長さ： $H=750\text{cm}$ 、断面寸法： $30 \times 30\text{cm}$ 、主筋量： $p_g=3.54\%$ (16-D16)および軸力比： $n=N/(BDFc)=0.29$ などは共通とした。

表2に鋼材の機械的性質を示す。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-D16 (SD40)を用いた。また、使用コンクリートの圧縮強度は： $F_c=324\text{kgf/cm}^2$ である。

ここで、せん断補強筋比： p_w は、従来、($p_w = a_w / B \cdot s$)によって定義される。この p_w は、45°方向の斜めひび割れと交わる

せん断補強筋が引張降伏し、トラス機構の形成を仮定することにより、せん断補強筋の負担せん断力と関係づけられる。この考え方に基づくと、ダイヤ形および八角形の副帯筋のせん断補強筋比は、式(1)、(2)のように定義される。(図1)

$$p_w = a_w / B \cdot s \cdot \cos \theta \quad \text{----- (1)}$$

$$p_w = a_w / (B \cdot s) \{dn / jt + (1 - dn / jt)\} \cos \theta \quad \text{----- (2)}$$

ここで、 a_w :一組のせん断補強筋の断面積 B :柱の幅 s :せん断補強筋の間隔
 jt :主筋間距離 θ :柱断面軸となす角度 (45°)

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、せん断力を加えることにより行った。

3. 実験結果および考察

図2に各試験体の履歴曲線を示す。縦軸は作用せん断力 Q (tf)を、横軸は部材角 R ($\times 10^{-3}$ rad.)を、一点鎖線は $P-\delta$ 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およびせん断補強筋のひずみ推移状況を示す。写真2に代表的な試験体の最大耐力時および最終破壊時のひび割れ状況を示す。なお、各試験体の最大耐力実験値、その時のせん断補強筋の平均ひずみから求めた負担せん断力値および計算値は表3に示している。表中に示した平均ひずみ度は

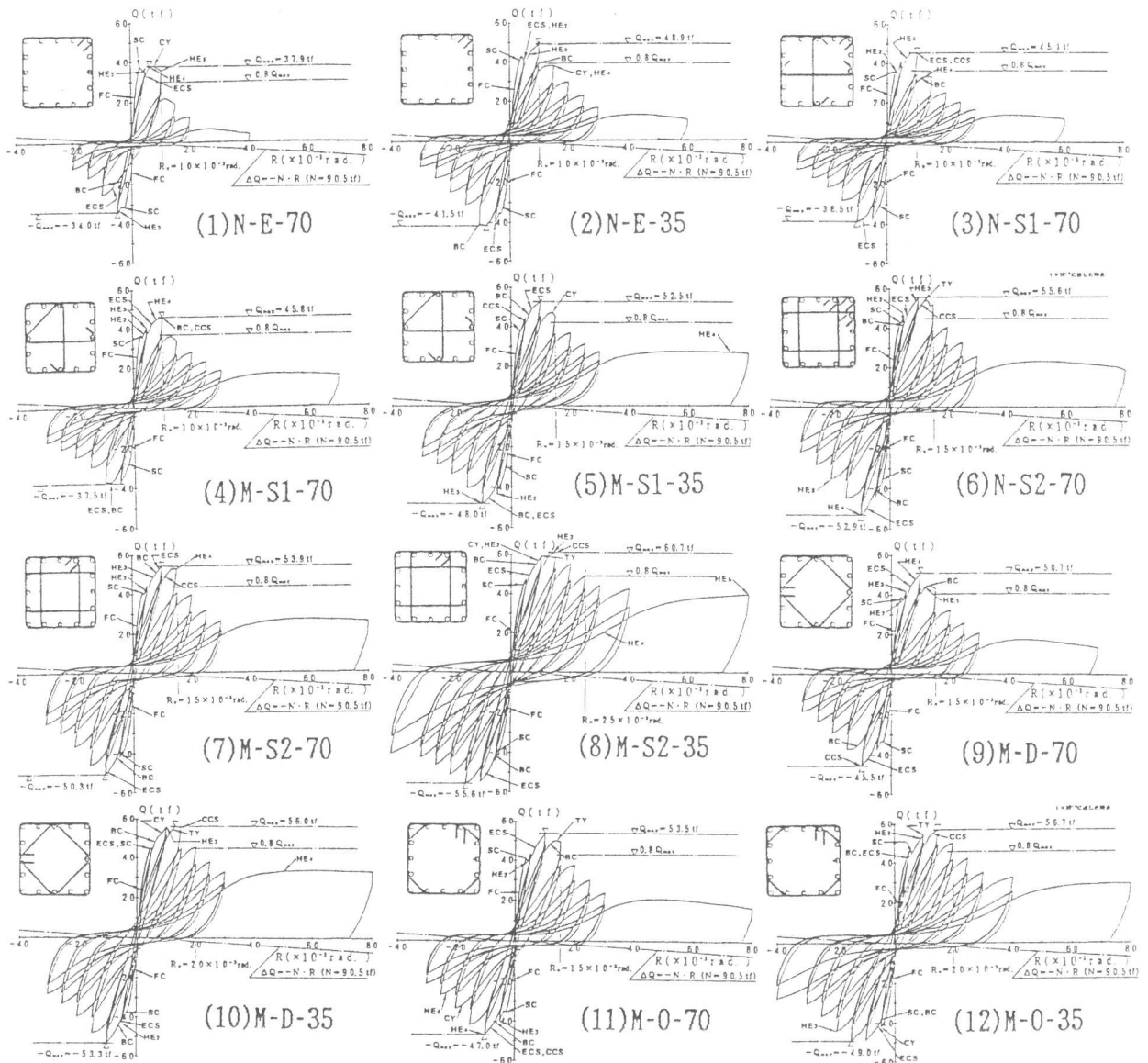


図2. 履歴曲線

【記号の定義】

- Q_{max} : 最大耐力
- FC : 曲げひび割れ発生点
- SC : 斜めひび割れ発生点
- BC : 主筋に沿う付着ひび割れ発生点
- FCS : 端部コンクリートの圧壊
- TY : 主筋に沿うひずみが 2×10^{-3} に達した点
- HE_i : せん断補強筋のひずみが $i \times 10^{-3}$ に達した点

柱中央部に貼付けたゲージ一点とその点を基準に柱長さ方向上下部に貼付けた二点の合計三点での平均値とした。各試験体ともに曲げひび割れが発生したのち、柱頭および柱脚部の隅角部に斜張力ひび割れが発生し、斜張力ひび割れの進展および端部コンクリートの圧壊を伴って、最大耐力に達し、せん断圧縮破壊の様相を呈した。ただし、N-E-70は斜張力ひび割れに大きく支配される破壊性状を示した。最大耐力後は付着ひび割れの発生後、コンクリートの剝落が進展し破壊に至った。なお、最大耐力時の部材角はせん断補強筋量によって異なった。

3-1. 標準フープにおける補強筋形状の影響

同一補強筋ピッチであるN-E-70、N-S1-70およびN-S2-70の3体では、外周筋のみの試験体に副帯筋を1本、2本と加えることによって、最大耐力は上昇し、最大耐力以後の耐力低下を抑えている。また、同補強筋量である外周筋のみのN-E-35と副帯筋を配筋したN-S2-70のせん断力一部

材角関係 (図3 (a)) を比較すると、副帯筋を配筋したN-S2-70の方が最大耐力は上回り、最大耐力以後の耐力低下が抑えられている。すなわち、同一補強筋量であれば外周筋のみ密に配筋するよりも副帯筋を併用することが耐力および変形性能を向上させるのに有効であると考えられる。また、最大耐力以後、両試験体共に隅角部の主筋に沿う付着ひび割れが発生したが、

副帯筋を併用したN-S2-70は外周筋のみに密に配筋したN-E-35よりも、主筋に沿う付着ひび割れの拡幅が抑えられた。このように副帯筋を併用することにより、付着ひび割れの進展を抑える効果が期待できる。

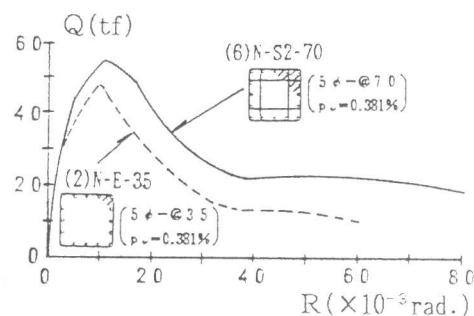
3-2. 標準フープとマルチフープの比較

標準フープとマルチフープのS1タイプとS2タイプのせん断力-変位関係 (図3 (b)) を比較すると、両タイプの最大耐力はほぼ相等しく差は認められない。また、S2タイプの履歴包絡線と平均ひずみの推移の関係 (図4) を比較すると、外周筋、副帯筋ともほぼ同様な値を示した。しかしながら、最大耐力以後、主筋に沿う付着ひび割れおよびコンクリートの剥落に伴い、標準フープを用いた試験体では外周筋のフックが抜け出し始め、ついには部材角 $R=65 \times 10^{-3}$ rad.付近で、補強筋のフックがコアコンクリートの外へ弾けた。これに対してマルチフープを用いた試験体では、フックの抜け出しが見られず、標準フープより変形性能に優れた。このことは、マルチフープが「一筆書き」に加工しているためフックが一枚所となり、かつ、フックの位置は断面隅角部を避けているためフックの抜け出しがなかったためと考えられる。

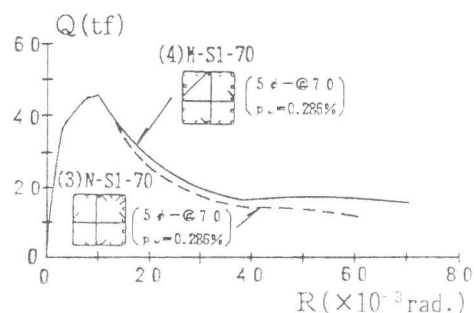
3-3. 副帯筋形状の比較

マルチフープのS1とS2タイプおよびDとOタイプのせん断力-変位関係 (図3 (c)) を比較すると、補強筋ピッチが同じであるが、2章で定義したせん断補強筋比の差に応じて、最大耐力および耐力低下の割合が変化している。

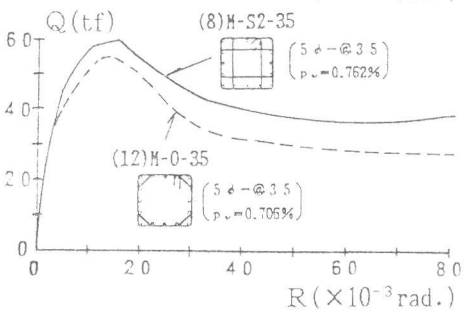
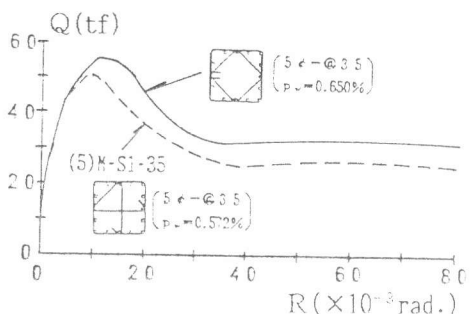
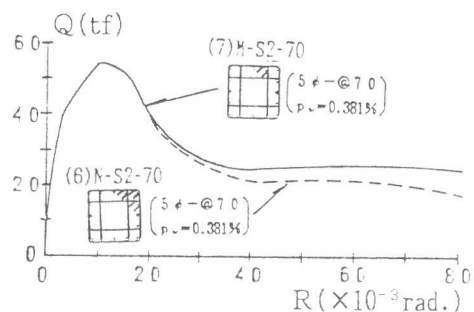
同一補強筋形状のもとでせん断補強筋比を比較した場合、S1、S2、DおよびOの各タイプとも、せん断補強筋比の増加に従い、最大耐力は上昇している (図5参照)。最大耐力以後は、写真2のひび割れ状況



(a) 補強筋形状の比較



(b) 標準とマルチフープの比較



(c) 副帯筋形状の比較

図3. 履歴包絡線

表3. 実験結果および計算結果

単位: Q(tf), R($\times 10^{-3}$ rad.)

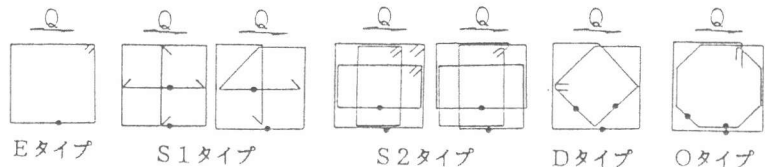
試験体名	実験結果						計算結果					
	最大耐力		平均ひずみ度 ϵ_{wi} ($\times 10^{-3}$) (負担せん断力 Q_{wi} (tf))				曲げ耐力	荒川min式	修正南式	A法	B法	付着強度
	Q_{max} 正 (負)	R_{max} 正 (負)	ϵ_e (Q_e)	$\epsilon_s, \epsilon_{oh}$ (Q_s, Q_{oh})	$\epsilon_d, \epsilon_{ot}$ (Q_d, Q_{ot})	ΣQ_{wi}	Q_{fu} (tf)	Q_{au} (tf)	Q_{mu} (tf)	Q_{Au} (tf)	Q_{Bu} (tf)	τ_{bu} (kgf/cm^2)
(1)N-E-70	37.9 (34.0)	6.5 (5.0)	2.53 (6.9)	—	—	(6.9)	58.6 (0.65)	23.2 (1.64)	37.4 (1.01)	32.1 (1.18)	34.9 (1.09)	32.7 (0.83)
(2)N-E-35	48.9 (41.5)	10.1 (8.2)	3.18 (17.4)	—	—	(17.4)	58.6 (0.83)	27.1 (1.80)	45.1 (1.08)	48.5 (1.01)	43.8 (1.12)	36.7 (0.80)
(3)N-S1-70	45.1 (38.5)	10.2 (10.1)	2.75 (7.5)	3.48 (4.8)	—	(12.3)	58.6 (0.77)	25.3 (1.78)	41.2 (1.09)	40.3 (1.12)	39.3 (1.15)	34.7 (0.75)
(4)M-S1-70	45.8 (37.5)	10.1 (5.0)	3.88 (10.6)	3.39 (4.7)	—	(15.3)	58.6 (0.78)	25.3 (1.81)	41.1 (1.11)	40.3 (1.14)	39.3 (1.17)	34.7 (0.75)
(5)M-S1-35	52.5 (48.0)	10.0 (10.1)	2.62 (14.4)	2.39 (6.5)	—	(20.9)	58.6 (0.90)	30.1 (1.74)	52.8 (0.99)	57.9 (0.91)	52.7 (1.00)	40.8 (0.89)
(6)N-S2-70	55.6 (52.9)	10.0 (10.0)	2.12 (5.8)	3.13 (8.6)	—	(14.4)	58.6 (0.95)	27.1 (2.05)	45.1 (1.23)	48.5 (1.15)	43.8 (1.27)	36.7 (0.80)
(7)M-S2-70	53.9 (50.3)	10.0 (10.0)	2.36 (6.5)	3.33 (8.9)	—	(15.3)	58.6 (0.92)	27.1 (1.99)	45.1 (1.20)	48.5 (1.11)	43.8 (1.23)	36.7 (0.80)
(8)M-S2-35	60.7 (55.6)	15.1 (15.1)	1.76 (9.7)	3.15 (17.3)	—	(26.9)	58.6 (1.04)	32.7 (1.86)	60.5 (1.00)	62.5 (0.97)	61.5 (0.99)	44.8 (0.97)
(9)M-D-70	50.7 (45.5)	10.1 (10.1)	3.60 (9.9)	—	1.18 (3.5)	(13.4)	58.6 (0.87)	26.1 (1.95)	42.8 (1.18)	43.7 (1.16)	41.1 (1.23)	35.6 (0.77)
(10)M-D-35	56.0 (53.3)	13.1 (10.1)	2.92 (16.0)	—	1.73 (6.7)	(22.7)	58.6 (0.96)	31.2 (1.79)	55.9 (1.00)	60.1 (0.93)	56.3 (0.99)	42.4 (0.92)
(11)M-O-70	53.5 (47.0)	10.1 (10.1)	3.16 (8.7)	3.40 (4.7)	2.24 (2.1)	(15.5)	58.6 (0.91)	26.6 (2.01)	43.9 (1.22)	46.1 (1.16)	42.4 (1.26)	36.1 (0.78)
(12)M-O-35	56.7 (49.0)	15.0 (15.2)	2.15 (11.8)	2.55 (7.0)	1.92 (3.7)	(22.5)	58.6 (0.97)	32.0 (1.77)	58.2 (0.97)	61.4 (0.92)	59.0 (0.96)	43.6 (0.95)

(1) Q_{max}/Q_{fu} , (2) Q_{max}/Q_{au} , (3) Q_{max}/Q_{mu} , (4) Q_{max}/Q_{Au} , (5) Q_{max}/Q_{Bu} , (6) $\tau_{bu}/\text{MIN}(\tau_t, \tau_f)^{1/2}$

* 1) $\tau_f = db \cdot \Delta \sigma \cdot 0.8 / (4 \cdot H)$ 注) 各せん断耐力の算定は $j_t = 24\text{cm}(5-D16)$ として求めた。

【記号の定義】

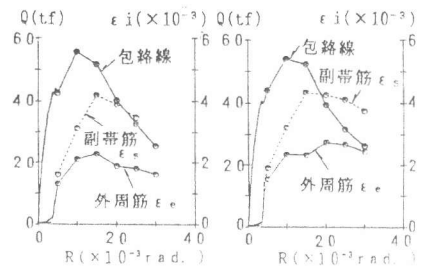
せん断補強筋	ϵ_{wi}	Q_{wi}	
外周筋	ϵ_e	Q_e	
副帯筋	ϵ_s	Q_s	
ダイヤ筋	ϵ_d	Q_d	
八角形	平行部	ϵ_{oh}	Q_{oh}
	斜め部	ϵ_{ot}	Q_{ot}



に示すように、せん断補強筋比が大きい試験体はひび割れの進展が抑制されている。なお、せん断補強筋量が多いM-0-35のみ理論上の曲げ耐力に達している。

4. 耐力の検討

表3に各試験体の荒川min式 [3]、修正南式 [4]、A、B法 [5] および付着強度 [5] の計算結果と実験値との比率を示している。せん断補強筋の材料強度としては、PC鋼棒リバーボンの降伏点の規格値 $13000\text{kgf}/\text{cm}^2$ を用いることにした。また、修正南式およびA、B法では、コンクリート強度 F_c によって算定用材料強度に $400\sqrt{F_c}$ および $25F_c$ の上限を与えている。したがって、修正南式では $7397\text{kgf}/\text{cm}^2$ をA、B法では $8550\text{kgf}/\text{cm}^2$ を用いた。図5に各せん断耐力方式とせん断補強筋比 $p_w\%$ の関係を示している。図中の白ぬき印は標準フープを黒ぬり印はマルチフープの実験値を表し、○印はEタイプ、△▲印はS1タイプ、□■印はS2タイプ、◆印はDタイプおよび●印はOタイプの実験値をそれぞれ表す。実験値は補強筋比 p_w が増えるに



(6)N-S2-70 (7)M-S2-70
図4. 包絡線と平均ひずみ推移

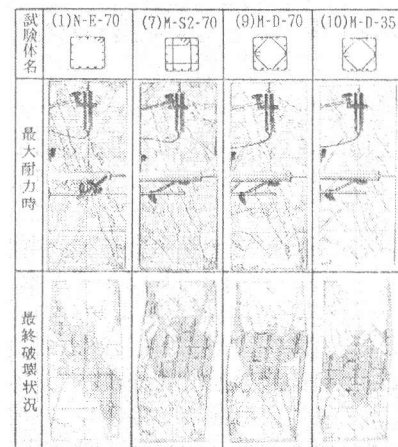


写真2. ひび割れ状況

従い、上昇傾向が認められDタイプおよびOタイプの実験値も同様な傾向が認められることから、せん断補強筋比 p_w の計算方法は2章の考え方で評価出来るものと考えられる。また、荒川min式の実験値/計算値の値は1.64~2.01であり安全側の値を示した。一方、修正南式、A法およびB法の値は0.97~1.23、0.91~1.16および0.96~1.27の範囲にあり、3式ともS2タイプの試験体を除けば本実験値に関してはバラツキが少なく良い精度を示した。しかしながら、S2タイプの値は同補強筋量のEタイプより明かに上回り、4式による場合とも、実験値/計算値の値は最も大きくなった。図6に荒川min式およびB法の $Q_{max}/Q_{fu}-Q_{su}/Q_f$ 関係を示す。図中の●印は本実験値を、○印は13000kgf/cm²級のせん断補強筋「リバーボン」を用いたRC柱の既往の実験値 [6] を表す。同図より、本実験値は、既往の実験値と同等以上の安全率であることが認められた。

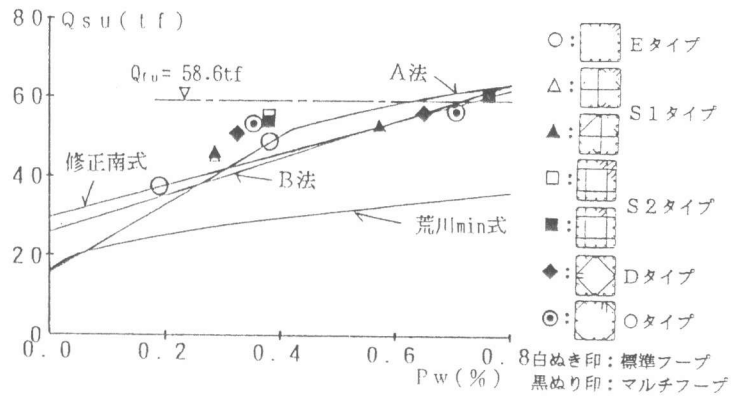


図5. せん断耐力とせん断補強筋比の関係

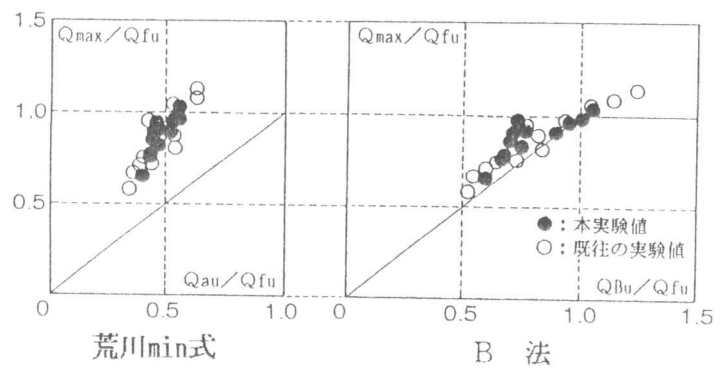


図6. $Q_{max}/Q_{fu}-Q_{su}/Q_f$ の関係

5. 結論

- (1) マルチフープは標準フープと同等の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。
- (2) 同一補強筋量の場合、外周筋のみ密に配筋するよりもS2タイプの副帯筋を併用する方が耐力および変形性能を向上させることができる。
- (3) ダイヤ形および八角形副帯筋をもつ場合のせん断補強筋比 p_w は、2章の定義で評価出来る。
- (4) 副帯筋を併用することにより、付着割裂ひび割れの進展を抑制することができる。
- (5) マルチフープを使用した柱の終局せん断耐力は、既往の実験値と同等の安全率を確保できる。

【参考文献】

[1] S.A.Sheikh, S.M.Uzumeri: Strength and Ductility of Tied Concrete Columns, ASCE, ST.Vol.106, No5, May, 1980, pp.1079-1102.
 [2] 吉岡研三、岡田恒男、武田寿一: 鉄筋コンクリート柱の変形性能向上に関する研究、第一報、主筋配置・せん断補強筋形状の影響について、日本建築学会論文報告集、第279号、昭和54年5月、pp.53-63 [3] 荒川卓: 鉄筋コンクリートばりの許容せん断応力度とせん断補強について(実験結果による再検討)、コンクリートジャーナル、Vol.8, No7, July, 1970, pp.11-20.
 [4] 倉本洋、南宏一: 塑性理論を応用した鉄筋コンクリート部材の実用せん断設計式、日本建築学会構造系論文報告集、第417号、1990年11月、pp.31-45.
 [5] 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
 [6] 塚本尚由、中澤淳、倉本洋、南宏一: 13000キロ級の高強度せん断補強筋を用いたRC柱の終局せん断耐力、コンクリート工学年次論文報告集、第12巻、第2号、1990年6月、pp.369-374.