

正会員 六車 熙 (京大) 渡辺 史夫 (京大) ○田中 仁史 (京大)

1. はじめに

RCまたはPC部材の曲げ破壊時の靱性改良の1つの有効な方法として、フープ筋によるコンクリートの横拘束がある。筆者らはすでに円形または角形スパイラルフープで横拘束したコンクリート円柱および角柱の中心軸圧試験を多数行ない^{*1)}、従来使用されている普通鋼フープ ($f_y = 2400 \sim 4000 \text{ kgf/cm}^2$) では、その降伏が荷重の比較的早い時点でおこり横拘束による圧縮靱性改善効果が急激に劣化すること、また、従来横拘束効果が小さいとされる角形フープにおいても高強度フープを使用すれば、コンクリートの圧縮靱性改善が大幅に可能であることなどを示した。しかし、中心軸圧試験結果は、そのまま曲げ部材に適用することはできない。本研究は、高強度フープで横拘束したコンクリート梁の曲げ試験を行ない、曲げ圧縮を受けるコンクリートの高強度フープによる圧縮靱性改善効果を定量的に考察し、合わせて中心軸圧試験から得られるコンクリートの横拘束効果との違いについて比較検討を行なったものである。

2. 中心軸圧試験

2-1 供試体および荷重, 測定方法 高強度角形フープによるコンクリートの曲げ圧縮靱性改善効果の基本特性を得る為、図1に示す高強度および普通鋼フープで横拘束した $19.4 \times 19.4 \times 40 \text{ cm}$ の角柱供試体を用いて中心軸圧試験を行なった。セメントは、小野田早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材は、最大粒径 20 mm 、粗粒率 6.76 の山砂利、細骨材は、最大粒径 5 mm 、粗粒率 3.34 の川砂を用いた。コンクリートは、重量配合比 $C : S : G = 1 : 2.34 : 3.05$ 、水セメント比 $= 0.6$ である。角形スパイラルフープには、

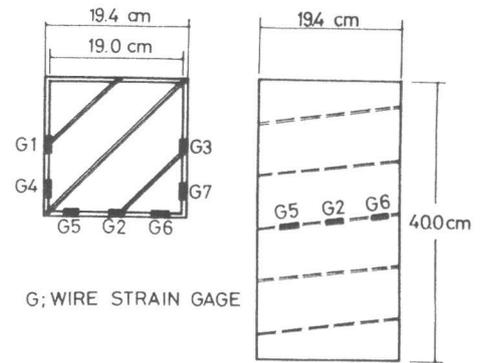


図1. 供試体 (中心軸圧)

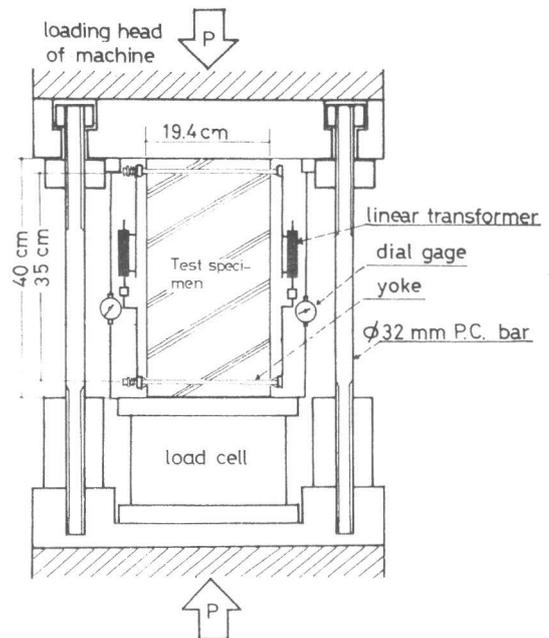


図2. 荷重および測定装置 (中心軸圧)

表1. 供試体および実験結果一覧 (中心軸圧試験)

供試体	使用 フープ筋			最大耐力時		応力ブロック係数 $k_1 \cdot k_3$ 最大時			フープ降伏開始時 コンクリート歪 (%)
	ピッチ s (cm)	体積比 ρ_w (%)	降伏強度 f_y (kg/cm ²)	コンクリート応力 (kg/cm ²)	コンクリート歪 (%)	コンクリート応力 (kg/cm ²)	コンクリート歪 (%)	$k_1 \cdot k_3$	
PH 5	5	2.69	10000	460	0.93	407	1.80	1.18	0.80
PM 5	5	2.61	3550	402	0.43	337	0.89	0.98	0.45
PH 10	10	1.35	10000	359	0.40	303	0.86	0.88	0.79
PM 10	10	1.31	3550	332	0.40	277	0.75	0.80	0.30
PH 15	15	0.90	10000	328	0.24	263	0.48	0.76	降伏せず
PM 15	15	0.87	3550	337	0.35	271	0.58	0.79	0.54
PP				347	0.25	267	0.39	0.77	

φ 9.2 mm 高強度鋼 ($f_y = 10000 \text{ kgf/cm}^2$) および φ 8.9 mm 普通鋼 ($f_y = 3550 \text{ kgf/cm}^2$) を用いた。試験時 (材令 3 ~ 4 週) のコンクリート圧縮強度は、 346 kgf/cm^2 、同引張強度は 29.1 kgf/cm^2 。 載荷および測定は、図 2 に示す装置を用い、コンクリートの歪軟化域を含む応力-歪曲線を実測した。 供試体コンクリート圧縮歪は、差動トランスを用い検長 35 cm で測定し、フープ筋歪は、ワイヤストレインゲージ (ゲージ長 6 mm) により測定した。

2-2 実験結果および考察 実験結果一覧を表 1 に示す。 本研究においては、中心軸圧試験より得られた応力-歪曲線が曲げ材コンクリート断面にも適用できるものとして、その応力ブロック係数 k_1, k_3 を計算した。 さらに k_1, k_3 最大時コンクリート歪をコンクリート圧縮限界歪 (Available limit strain; $\epsilon_{k_1, k_3, m}$) と定義し、その値をコンクリート圧縮靱性改善効果の評価指標とした。 図 3 に各供試体のコンクリート応力-歪曲線を示す。 フープ筋ピッチ 15 cm の PH 15、PM 15 供試体については、フープ筋の降伏強度の違いによる拘束効果の差はうかがわれないが、同ピッチ 5 cm の PH 5、PM 5 供試体においては、耐力、靱性とも高強度フープを使用した PH 5 供試体が普通鋼フープの PM 5 供試体に比べて大きく増大している。

図 4 に PH 5、PM 5 供試体の応力-歪曲線をフープ筋拘束応力と合わせて示す。 高強度フープの場合、コンクリート圧縮歪の増大につれて、コンクリート歪約 1% まで拘束応力は直線的に増大し、コンクリートを弾性拘束するが、普通鋼フープの場合には、コンクリート歪 0.45% でフープ筋が降伏を始め、拘束応力はほぼ一定値となり、拘束剛性が大きく低下していくことになる。 その結果、圧縮限界歪は前者が約 1.8% にまで達し、後者の約 2 倍となっている。 このことから、フープ筋による十分なコンクリート圧縮靱性改善には、コンクリートをその限界歪まで弾性拘束する高強度フープの使用が必須条件であると言える。 図 5 に既往の実験から得られたデータと合わせて、フープ筋体積比 (ρ_w) - コンクリート圧縮限界歪 ($\epsilon_{k_1, k_3, m}$) 関係をフープ筋強度別に示す。 図から明らかな様にフープ筋体積比が 1% を起えるとフープ筋強度の差による圧縮靱性改善効果の差が現われ始め、 $\rho_w = 3\%$ の場合には、フープ筋降伏強度 $f_y = 1950, 5280, 10000 \text{ kgf/cm}^2$ に対する圧縮限界歪の比は約 1 : 1.4 : 3.0 となっている。 即ち、従来その拘

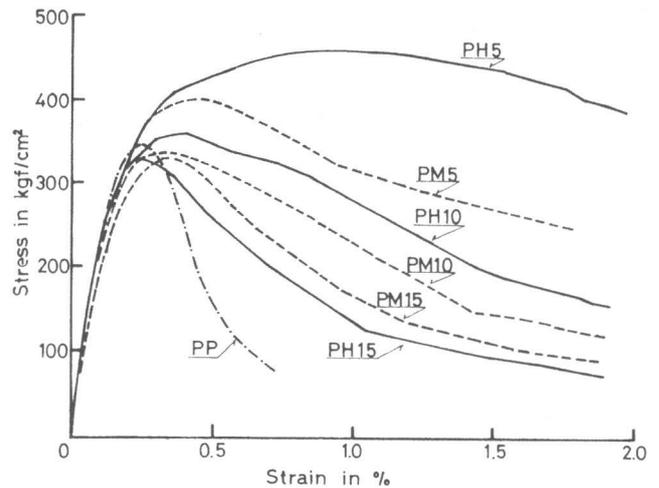


図 3. コンクリート応力-歪曲線 (中心軸圧)

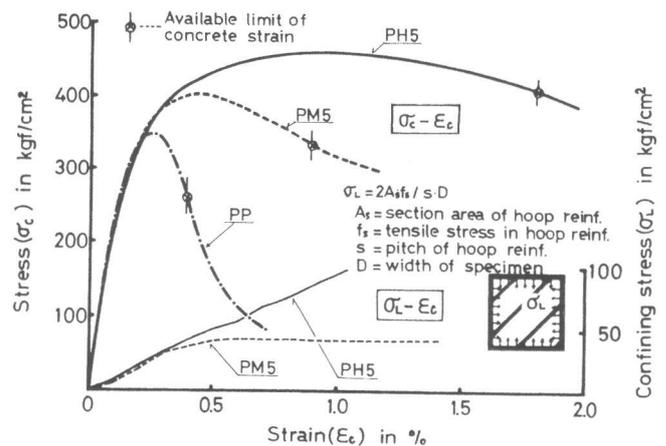


図 4. コンクリート応力-歪曲線とフープ筋拘束応力

(Square Column Specimen)

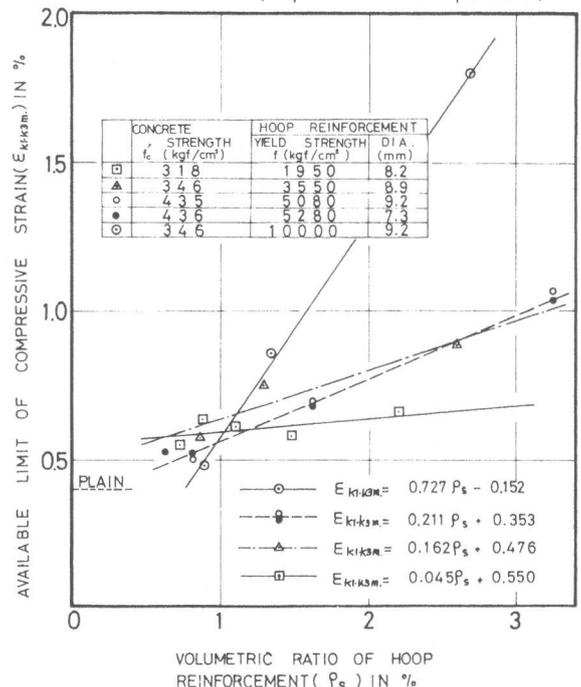


図 5. コンクリート圧縮限界歪とフープ筋強度

束効果が小さいとされる角形フープにおいても、その降伏強度を 10000 kgf/cm^2 にすれば大きくコンクリート圧縮靱性を改善し得ることが明らかである。

3. 曲げ試験

3-1 供試体および载荷，測定方法

図6に示す高強度および普通鋼フープで横拘束したコンクリート梁供試体を用いて、曲げ試験を行なった。引張主筋には、 $3-\phi 17 \text{ mm}$ PC鋼棒 ($p_t = 2\%$, $f_y = 11900 \text{ kgf/cm}^2$) を用い、コンクリートが圧縮破壊に至るまで主筋の降伏が起らない様にした。

なおプレストレスカは導入していない。コンクリートの使用材料、配合設計および使用フープ筋は、前述の中心軸圧試験と同じである。試験時（材令3～4週）コンクリート圧縮強度は 292 kgf/cm^2 、同引張強度は 25.5 kgf/cm^2 であった。载荷および測定は、図7に示す装置を用いて行なった。供試体中央試験域のコンクリート圧縮歪および引張歪は、歪測定用 Yoke にとり付けた差動トランス（検長60cm）を用いて測定した。主筋およびフープ筋歪は、ワイヤストレーンゲージ（ゲージ長6mm）で測定した。

3-2 実験結果およびその考察 図8に、各供試体の荷重（P）-中央たわみ（ δ ）曲線を示す。フープ筋ピッチ10cmのBH10, BM10供試体においては、フープ筋強度の違いによる差はあまりみられないが、同ピッチ5cmのBH5, BM5供試体においては、高強度フープで横拘束したBH5供試体が普通鋼フープ供試体BM5に比べ、少なくとも耐力が大きく上昇している

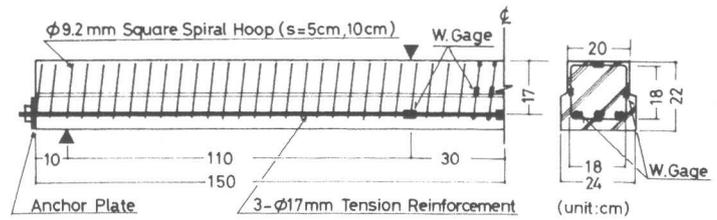


図6. 供試体（曲げ試験）

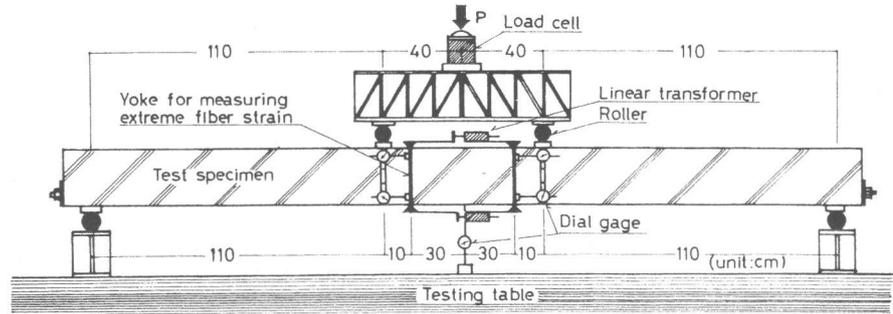


図7. 载荷および測定装置（曲げ試験）

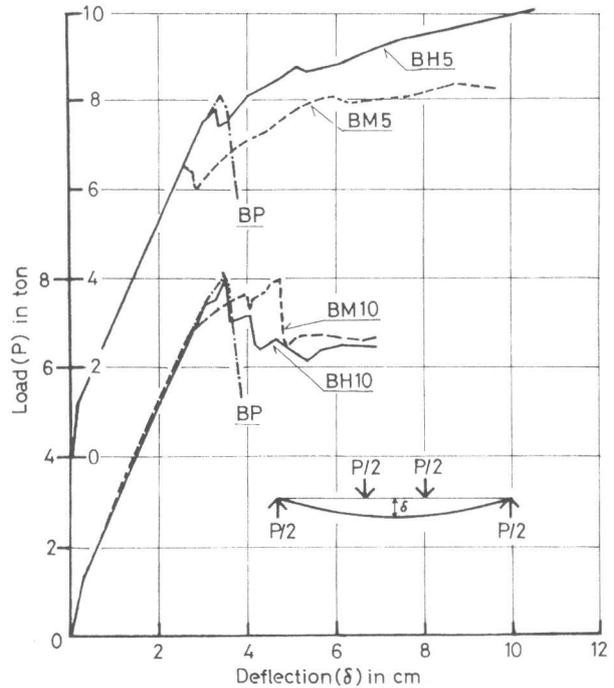


図8. 荷重-中央たわみ曲線

表2. 供試体および実験結果一覧（曲げ試験）

供試体	使用フープ筋			最大耐力時				応力ブロック係数 k_1, k_3 最大時				
	ピッチ s(cm)	体積比 $\rho_w(\%)$	降伏強度 $f_y(\text{kg/cm}^2)$	モーメント (t·m)	中央たわみ (cm)	曲率 ($\times 10^{-4} \text{ 1/cm}$)	コンクリート歪 (%)	モーメント (t·m)	中央たわみ (cm)	曲率 ($\times 10^{-4} \text{ 1/cm}$)	コンクリート歪 (%)	$k_1 \cdot k_3$
BH5	5	2.69	10000	5.5以上	10.6以上	35.8以上	3.1以上	5.2	8.3	26.2	2.0	0.87
BM5	5	2.61	3550	4.6	8.8	29.9	2.6	4.4	5.7	17.4	1.2	0.80
BH10	10	1.35	10000	4.4	3.6	3.6	0.5	3.9	4.0	7.2	0.5	0.69
BM10	10	1.31	3550	4.4	4.8	7.2	0.9	3.7	5.5	12.1	1.4	0.49
BP				4.5	3.5	3.1	0.25	4.4	3.4	3.0	0.23	0.70

ことがわかる。即ち、BM 供試体では中央たわみ $\delta = 6$ cm あたりから荷重 P が一定となるのに対し、BH 5 供試体では試験終了時 ($\delta = 11$ cm) まで荷重 P が増加し続け、前者の約 1.2 倍にまで達した。また、両者の変形能力について考察する為、図 9 に荷重 (P) - 圧縮縁コンクリート歪 (ϵ_c) 関係を示した。図中に前述の定義に従ってコンクリート圧縮限界歪を示したが、高強度フープで横拘束した BH 5 供試体のそれが約 2% であるのに対し、普通鋼フープ供試体の BM 5 では約 1.2% で、変形能力においても前者の優位性が明らかとなった。なお、コンクリート応力ブロック係数 $k_1 k_3$ は、主筋歪から計算される引張合力および Yoke で測定した中立軸深さを用いて計算した。また、図 9 には、フープ筋歪 (フープ筋断面、内および外側で測定) およびその歪値から計算したフープ筋引張力を示す。高強度フープにおける引張力は、コンクリート圧縮縁歪が 1.5% あたりまで大きく伸びるのに対し、

普通鋼フープでは、コンクリート圧縮縁歪が 0.8% あたりからフープ筋が曲げ降伏を始め、同引張力が下降し始める。即ち、曲げ試験においても、高強度フープによってコンクリートを弾性拘束することにより、大きくその圧縮靱性を改善できることが明らかと言える。中心軸圧試験の場合に比べ、曲げ試験ではコンクリート断面に歪勾配がある為、ポアソン歪により起こされるフープ筋拘束効果は減少するものと考えられる。図 10 に BH 5 供試体のモーメント (M) - 曲率 (ϕ) 曲線を示す。図中、破線および一点鎖線で示した曲線は、Yoke で測定したコンクリート歪分布に、図中に示す中心軸圧、偏心軸圧試験による応力-歪曲線を適用して計算した $M-\phi$ 理論値である。各 $M-\phi$ 曲線を比較すると、断面の歪勾配の大きいもの程、フープ筋の拘束効果が減少することがわかる。この傾向は、普通鋼フープの場合についても同じである。

以上より次のことが結論される。曲げ試験より得られるフープ筋拘束効果は、中心軸圧試験から得られるもの比べて小さくなるが、フープ筋に高強度鋼を用いコンクリートを弾性拘束すれば、十分なコンクリートの曲げ圧縮靱性改善が可能となる。本実験からは、曲げ部材においても、その十分な変形能力を期待するには降伏強度 $6000 \sim 8000 \text{ kgf/cm}^2$ 以上のフープ筋の使用が必要と言える。

[参考文献] 1) 六車他; 「コンクリートの曲げ圧縮靱性改善に関する研究」第 24 回構造工学シンポ, 梗概集 pp.109 ~ 116(1978. 2. 10)

2) F.E. Richart et al.; "The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression" Univ. of Illinois Engineering E.S. Bulletin No. 190. (1929,4)

3) 六車他; 「高強度鉄筋によるコンクリートの横補強効果について」日本建築学会大会梗概集 pp.1691 ~ 1692(1978. 9)

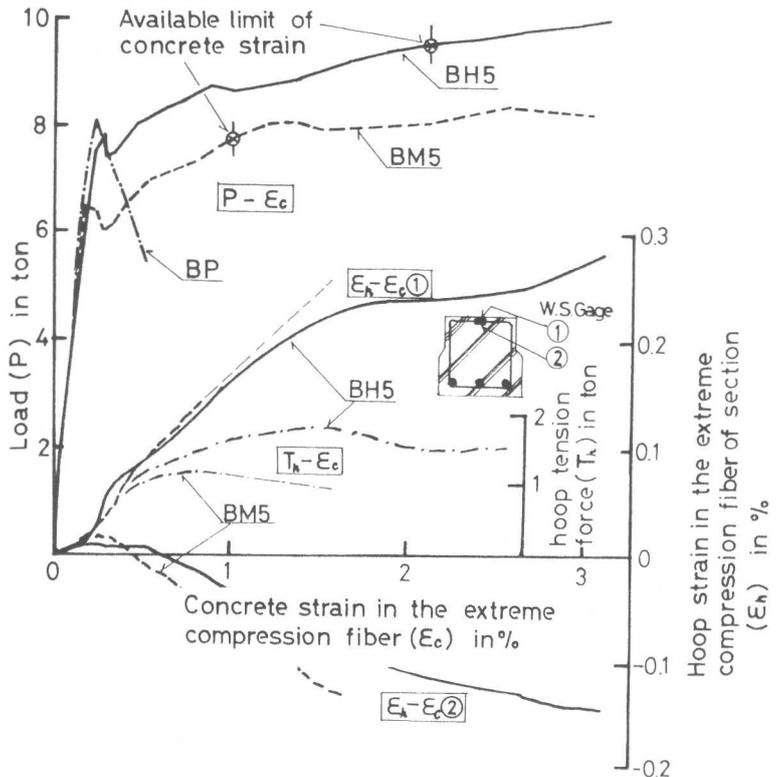


図 9. コンクリート圧縮縁歪とフープ筋歪 (引張力) 関係

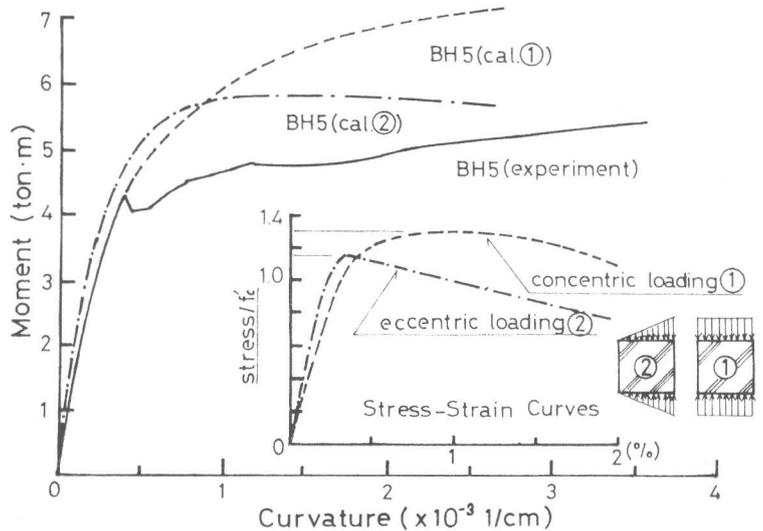


図 10. モーメント-曲率関係