

[80] 横補強による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究

正会員 六 車 熙 (京都大学工学部)
 正会員 渡 辺 史 夫 (京都大学工学部)
 岩 清 水 隆 (竹中工務店技研)
 正会員 ○光 枝 良 (京都大学大学院)

1 まえがき

コンクリートの圧縮じん性を改善するための1つの有効な方法として、横補強筋によるコンクリートの横拘束がある。既往の研究により、角スパイラルフープを横拘束筋として用いることにより、RC梁、PC梁、又軸力を受ける柱などのコンクリート部材の曲げじん性が大幅に改善され、特に高強度スパイラルフープを用いた場合には、じん性改善効果は著しいものになることが明らかとなっている¹⁾。本研究では、普通強度コンクリートに比べ、最大耐力以後の強度低下が著しく、破壊性状がBrittleになるといわれている高強度コンクリートを高強度スパイラルフープにより横補強することによって圧縮じん性がどれだけ改善されるかを知ることを目的として、高強度スパイラルフープにより横補強した角柱の中心軸圧縮試験を行なった。さらに著者等によって提案されている拘束コンクリートのモデル化応力-ひずみ曲線²⁾を、より広範囲のコンクリートに適合するように本実験データを加えて再整理した。

2 横補強された角柱供試体の軸圧縮試験

2-1 供試体 供試体は図1に示すようなピッチ5cmの高強度スパイラルフープにより横補強された角柱供試体と、無拘束の角柱供試体を用いた。供試体の種類は、コンクリート圧縮強度を設計強度300, 500, 700, 900 kgf/cm²の4種類、フープ筋体積比を0%, 2.13%, 4.26%の3種類、計12種類である。供試体のかぶり厚さは0, 拘束コンクリートコア寸法は14cm×14cmである。各シリーズのコンクリートの配合は表1に示す通りである。コンクリートの打設方向は載荷軸方向と一致させ、打設後2日で脱型し、試験直前まで湿布養生し、林令4週~8週で試験を行なった。横補強筋としてはφ7.4mm異形PC鋼材を使用し、PDシリーズではこの鋼材を2本たばねて使用した。表2, 表3に使用材料の特性を示す。

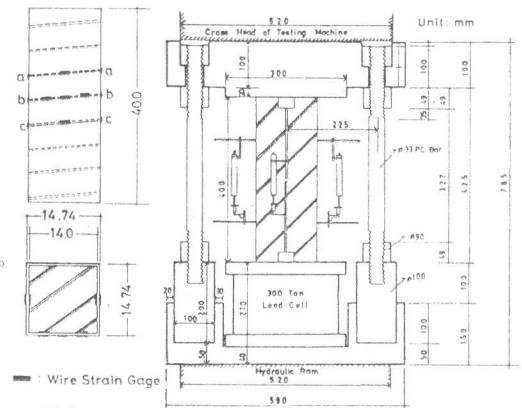


図1 供試体および載荷・測定装置

2-2 載荷および測定方法 図1に示す補剛装置を用いて、300 ton アムスラー型長柱試験機により単調および高応力繰返しを中心軸圧試験を行なった。材軸方向ひずみは、コンクリート中に埋め込んだボルトに取り付けた電気式変位計(ストローク10mm, 検長20mm)と上下の圧盤にマグネットスタンドに取り付けた電気式変位計(ストローク25mm, 検長40cm)により測定した。横補強筋のひずみは、図1に示す位置に貼布したワイヤーストレインゲージ(G. I. = 1mm)により測定した。

2-3 応力-ひずみ関係 図2(a)および図3(a)に各供試体の単調載荷試験より得られた応力-ひずみ曲線を示す。図中△印はフープ筋が最初に降伏した点を示し、○印は矩形応力ブロック係

表1 コンクリート配合表

	W/C (%)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Gravel (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)
PH5-3	51.8	342.9	746.5	1105.5	—
PH5-5	37.0	600	518	1208	10.8
PH5-7	31.0	600	492	1149	10.8
PH5-9	27.0	600	511	1193	10.8
PS-5	40.0	588.2	588.2	882.3	10.6
PS-7	35.0	606.3	606.3	909.5	10.9
PS-9	30.0	625.7	625.7	933.6	11.3
PD-9	30.0	625.7	625.7	938.6	11.3

表2 鋼材の性質

Nominal diameter (mm)	Nominal sectional area (cm ²)	Yield stress (kgf/cm ²)	Elastic modulus (kgf/cm ²)
7.4	0.4	13900	2096000

*Yield stress is 0.2% off-set stress

数 $k_1 k_3$ が最大となる時のひずみ(曲げ圧縮限界ひずみと定義)に達する点を示している。

各シリーズの応力-ひずみ曲線を比較すると、PH5-3B, PH5-5B, PS5-5Cでは、十分なじん性改善が見られる。しかし圧縮強度 600 kgf/cm² 以上の高強度コンクリートを使用したPH5-7A, PH5-9A, PS5-7A, PS5-9Aでは、ピーク荷重後急激な耐力の低下を示し、圧縮限界ひずみも小さく、じん性改善の程度は十分でない。これは高強度コンクリートほど、単位セメント量が多く、内部がガラス状になっているため、これだけの横拘束では内部に起こったクラックの進展をおさえられないためと考えられる。これに対し、フープ筋体積比をPHシリーズ, PSシリーズの倍としたPD5-9Aでは、ピーク荷重後も耐力の低下はほとんどなく、十分なじん性改善が見られる。

表3 実験結果

	φ10x20cm cylinder f _c '	measured		calculated		measured		calculated		Hoop yield		Cc (x10 ⁻³)
		σ _{cm}	ε _{cm}	σ _{cm}	ε _{cm}	σ _{cu}	ε _{cu}	σ _{cu}	ε _{cu}	σ _y	ε _y	
PH5-3B	349	---	---	450	5.55	---	---	383	12.20	470	15.56	5.93
PH5-5B	468	604	6.25	569	6.46	526	12.10	476	11.75	595	7.88	4.33
PH5-7A	644	773	3.75	745	5.91	626	8.0	604	9.82	550	6.74	3.26
PH5-7B	680	737	3.23	781	5.75	599	7.9	629	9.50	---	---	3.04
PH5-9A		795	3.99			658	7.5			720	6.25	
PH5-9B	786	2.65	640	5.3	776	4.40	3.04					
PS5-5C	445	591	7.50	449	5.75	491	14.8	415	10.79	546	11.94	4.76
PS5-5E		588	7.64			495	14.5			563	10.42	
PS5-7A	609	673	4.46	659	5.04	524	10.7	522	8.14	633	6.16	3.60
PS5-7B		648	4.98			504	8.9			575	7.90	
PS5-9A	892	803	3.78	843	5.11	644	6.9	643	7.31	743	5.87	2.59
PS5-9B		806	4.12			618	6.5			586	6.80	
PD5-9A	862	965	6.20	950	5.85	835	35.5	769	11.06	886	8.70	5.34
PD5-9B		945	5.61			804	28.3			866	10.80	
PS0-5	445	414	2.74	---	---	---	---	---	---	---	---	---
PS0-7	609	571	2.75	---	---	407	3.6	---	---	---	---	---
PS0-9	892	759	3.20	---	---	---	---	---	---	---	---	---
PD0-9	862	773	2.62	---	---	---	---	---	---	---	---	---

図4に高応力繰返し載荷試験より得られた応力-ひずみ曲線を示す。図中破線は同種類の供試体の単調載荷試験より得られた応力-ひずみ曲線をスケルトンとして示したものである。図4より高応力繰返し荷重の下でも単調載荷時と同様の事が言える。

2-4 横拘束筋のひずみ 図5に各供試体の最も破壊が進んでいるとみられる部分のフープ筋辺中央部ひずみと軸方向ひずみの関係を示す。各シリーズの外側フープ筋ひずみを比較すると、コンクリート強度が高くなるほどひずみの進み方が速くなっていることがわかる。また応力-ひずみ曲線と比較すると、応力がピークに達した後、軸方向引張力と曲げによりフープ筋が降伏することによって拘束効果が低減し、供試体は崩壊へむかうことがわかる。

3 拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線のモデル化

図6にモデル化したコンクリートの応力-ひずみ曲線を示す。曲線OABCは、ブレンコンクリートの応力-ひずみ曲線を表わしており、O~Aは初期弾性係数がE_iである2次曲線とし、コンクリート強度f_c'以後のひず

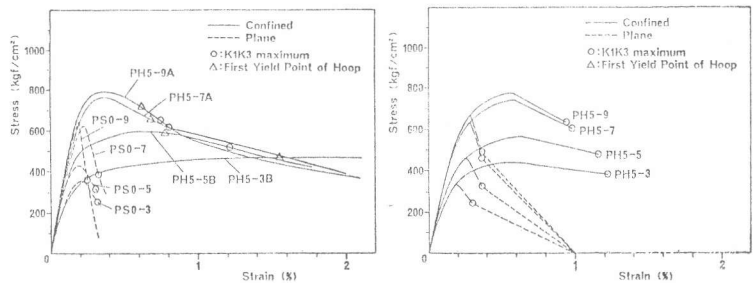


図2 (a) 応力-ひずみ曲線(実験) (b) (解析)

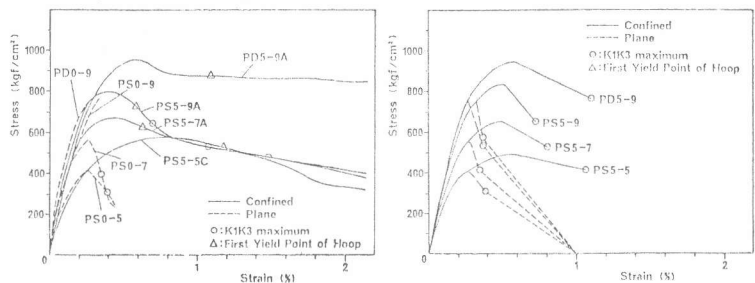


図3 (a) 応力-ひずみ曲線(実験) (b) (解析)

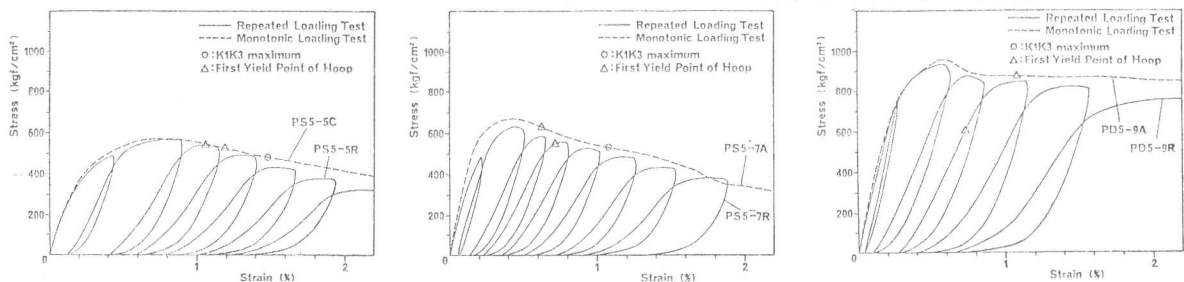


図4 応力-ひずみ曲線

み軟化域はABおよびBCの2本の折線とした。点Bは矩形応力ブロック係数 k_1, k_3 が最大となる時のひずみ(曲げ圧縮限界ひずみと定義)に達する点, 点Cはひずみ1%の横軸上の点である。曲線OADEは, 拘束されたコンクリートの応力-ひずみ曲線を表わしており, O~Aはプレーンコンクリートと同じとし, A~Dは点Dに頂点をもつ2次曲線, D~Eは直線とした。E点は拘束コンクリートの曲げ圧縮限界ひずみ(k_1, k_3 が最大となる点)に対応している。

3-1 プレーンコンクリートの応力-ひずみ関係

$$\sigma_c = E_1 \epsilon_c + f'_c \left(\frac{\epsilon_c - \epsilon_m}{\epsilon_m} \right)^2 \quad (\epsilon_c < \epsilon_m) \quad (1)$$

$$\sigma_c = \left(\frac{\sigma_u - f'_c}{\epsilon_u - \epsilon_m} \right) (\epsilon_c - \epsilon_m) + f'_c \quad (\epsilon_m \leq \epsilon_c \leq 0.01) \quad (2)$$

σ_c : 圧縮応力 ϵ_c : 圧縮ひずみ E_1 : 初期弾性係数
 f'_c : プレーンコンクリート圧縮強度 ϵ_m : f'_c 時ひずみ
 ϵ_u : 曲げ圧縮限界ひずみ σ_u : ϵ_u 時応力
 建築学会規準により E_1 は次のように定めた。

$$E_1 = 210000 \sqrt{f'_c / 200} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (3)$$

また ϵ_m, ϵ_u の値はコンクリート特性を表わす係数 k_m を用いて定めた。ここで k_m は実験結果の分析より以下のように定義した。

$$k_m = \left(\frac{f'_c}{550} \right) \left(\frac{c}{500} \right)^2 \left(\frac{w}{200} \right) \quad (4)$$

c : 単位セメント量 w : 単位水量

図7, 8は, 圧縮強度 $150 \sim 950 \text{ kgf/cm}^2$, 単位セメント量 $250 \sim 700 \text{ kg/m}^3$ 単位水量 $150 \sim 260 \text{ kg/m}^3$ という特性分布を持つ $\phi 10 \times 20 \text{ cm}$ の円柱供試体について著者等が行なった圧縮試験から得られた ϵ_m, ϵ_u の値を k_m に対してプロットしたものである。各図より $\epsilon_m, \epsilon_u / \epsilon_m$ の値は k_m とバイリニアな関係にあると言えるので, 各値を以下のように定めた。

$$\epsilon_m = 0.804 k_m + 1.665 \quad (\%) \quad (k_m < 1.5) \quad (5)$$

$$\epsilon_m = 2.871 \quad (\%) \quad (k_m \geq 1.5)$$

$$\epsilon_u / \epsilon_m = -0.265 k_m + 1.711 \quad (k_m < 1.5) \quad (6)$$

$$\epsilon_u / \epsilon_m = 1.314 \quad (k_m \geq 1.5)$$

D~E間の任意点における平均応力 σ_{av} は次式で表わされる。

$$\sigma_{av} = \frac{1}{\epsilon_c} \left\{ S + \frac{\sigma_u - f'_c}{\epsilon_u - \epsilon_m} \cdot \frac{(\epsilon_c - \epsilon_m)^2}{2} + f'_c (\epsilon_c - \epsilon_m) \right\} \quad (7)$$

ϵ_u の定義より, E点では $\partial \sigma_{av} / \partial \epsilon_c = 0$ ($\epsilon_c = \epsilon_u$) となり, σ_u は次式で与えられる。

$$\sigma_u = \frac{2(S - f'_c \epsilon_m)}{\epsilon_u + \epsilon_m} + f'_c \quad (8)$$

S: ピーク荷重までのプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線が囲む面積

3-2 拘束コンクリートの応力-ひずみ関係 $\epsilon_c < \epsilon_m$ では, プレーンコンクリートと同様で(1)式となる。

$$\sigma_c = \frac{(f'_c - \sigma_{cm})}{(\epsilon_m - \epsilon_{cm})^2} (\epsilon_c - \epsilon_{cm})^2 + \sigma_{cm} \quad (\epsilon_m \leq \epsilon_c \leq \epsilon_{cm}) \quad (9)$$

$$\sigma_c = \frac{(\sigma_{cm} - \sigma_{cm})}{(\epsilon_{cm} - \epsilon_{cm})} (\epsilon_c - \epsilon_{cm}) + \sigma_{cm} \quad (\epsilon_{cm} < \epsilon_c) \quad (10)$$

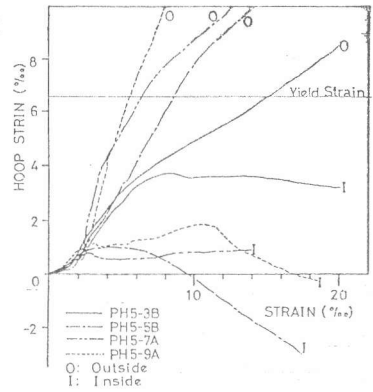


図5 横拘束筋ひずみ

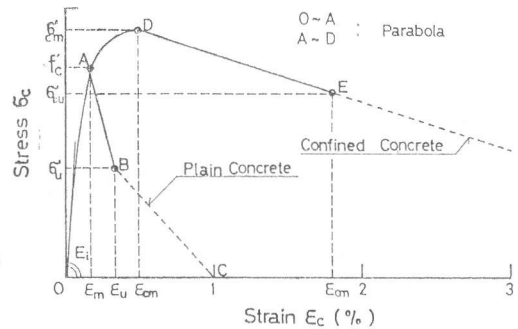


図6 モデル化応力-ひずみ曲線

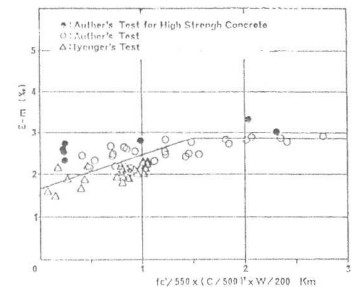


図7 $\epsilon_m - k_m$ 関係

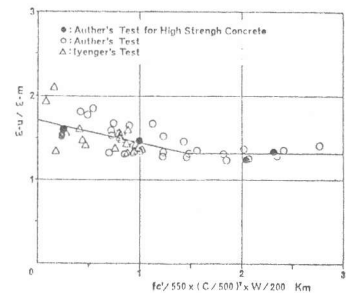


図8 $\epsilon_u / \epsilon_m - k_m$ 関係

σ_{cm} : 拘束コンクリート圧縮強度

ϵ_{cu} : 拘束コンクリート曲げ圧縮限界ひずみ

ϵ_{cm} : σ_{cm} 時ひずみ ϵ_{cu} : σ_{cu} 時応力

σ_{cm} , ϵ_{cm} , ϵ_{cu} の値は, 横拘束効果を表わす拘束係数 C_c ²⁾ を用いて, プレーンコンクリートに対する値を基準値として以下のごとくに得られる。

$$C_c = \rho_s \frac{\sqrt{f_y}}{f_c} \left(1 - 0.5 \frac{S}{W} \right) \quad (11)$$

ρ_s : 横拘束筋の体積比 f_y : 横拘束筋降伏強度 (kgf/cm²) W : 拘束コア断面最小寸法 (cm)

S : 横拘束筋の間隔 (cm)

図9～11は, 著者等が前述の角柱供試体について行なった拘束コンクリートの圧縮試験から得られた σ_{cm} , ϵ_{cm} , ϵ_{cu} の値を拘束係数 C_c に対してプロットしたものである。プレーンコンクリートに対する値の基準値として, 各図の(a)では角柱試験から得られた値を, (b)ではシリンダー解析値を用いている。各図より σ_{cm}/f'_c , ϵ_{cm}/ϵ_m および ϵ_{cu}/ϵ_u の値は拘束係数 C_c と線型な関係にあるといえるので, 各値を最小2乗法により以下のように定めた。

1) f'_c , ϵ_m , ϵ_u に角柱試験から得られた値を用いる時

$$\sigma_{cm} = (1 + 43 C_c) f'_c \quad (12)$$

$$\epsilon_{cm} = (1 + 231 C_c) \epsilon_m \quad (13)$$

$$\epsilon_{cu} = (1 + 361 C_c) \epsilon_u \quad (14)$$

σ_{cu} の値は, S_c を $OAD\epsilon_{cm}O$ の面積とすると

$$\sigma_{cu} = \frac{2(S_c - \sigma_{cm} \epsilon_{cm})}{\epsilon_{cm} + \epsilon_{cu}} + \sigma_{cm} \quad (18)$$

図2(b), 図3(b)に上に提案した方法で求めた, 応力-ひずみ曲線の計算値を示した。実験曲線と計算曲線はよく一致している。ただし計算曲線はすべて, 応力ブロック係数 $k_1 k_3$ が最大の点を限界として描かれている。

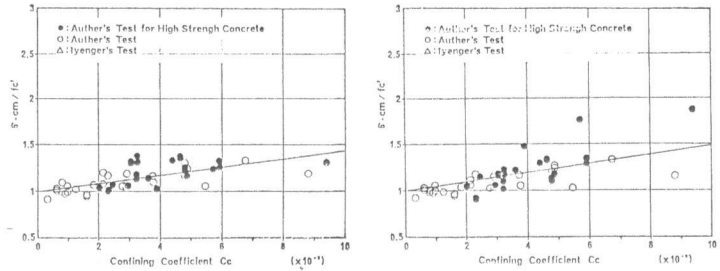
4 結論

コンクリート圧縮強度が 600 kgf/cm² を超す高強度コンクリートの圧縮じん性を改善するためには, 本研究で使ったピッチ 5 cm, 体積比 2.13% の高強度フープ筋では不十分である。しかしフープ筋の体積比を 4.26% とすると圧縮強度 900 kgf/cm² の超高強度コンクリートでも十分にじん性が改善される。

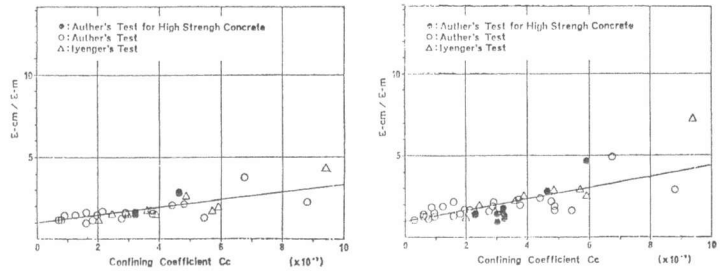
また実験結果と解析結果が比較的よく一致したことにより, 係数 k_m に基づいたプレーンコンクリートの応力-ひずみ曲線モデルと, 拘束係数 C_c に基づいた拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線モデルの妥当性が示された。

参考文献

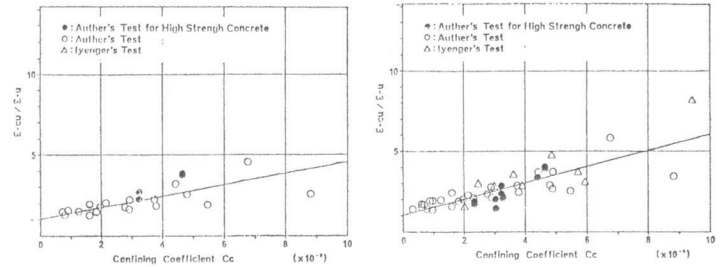
- 1) H.Muguruma, F.Watanabe et al., 'Effect of Confinement by High Yield Strength Hoop Reinforcement upon The Compressive Ductility of Concrete', Proc. of 22th Japan Congress on Materials Research, KYOTO, JAPAN, 1979, pp. 377~382
- 2) 六車・渡辺・勝田・田中, '横拘束コンクリートの応力-ひずみ曲線のモデル化', セメント技術年報, 昭55年, pp. 429~432



(a) 図9 $\sigma_{cm}/f'_c - C_c$ (拘束係数) 関係 (b)



(a) 図10 $\epsilon_{cm}/\epsilon_m - C_c$ (拘束係数) 関係 (b)



(a) 図11 $\epsilon_{cu}/\epsilon_u - C_c$ (拘束係数) 関係 (b)