

論文

[2167] 横補強筋形状の異なるコンファインド高強度コンクリートの有効側圧

正会員 畑中重光(三重大学建築学科)

正会員○近藤洋右(三重大学大学院)

正会員 谷川恭雄(名古屋大学建築学科)

1. まえがき

圧縮下のコンクリートの破壊は、強度が高くなるほど脆性的になり、圧縮靱性改善のためには、高強度コンクリートほど大きな横拘束力を要する。筆者らは、これまで各種の横拘束方法によるコンクリートの圧縮靱性の改善効果を、コンクリートに対する3軸圧縮効果の観点から統一的に評価することを目的として、一連の研究を行ってきた[1, 2]。昨年度の研究[3, 4]では、圧縮強度 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ レベルまでのコンクリートに適用可能な3軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみモデルを提案するとともに、円形および角形のフープ筋で横拘束した普通・高強度コンクリートが圧縮破壊していく過程で内部に発生する側圧を定量的に評価した。




本研究では、横補強筋に関する要因として降伏強度および形状を取り上げ、各種横補強筋を用いたコンファインド普通・高強度コンクリートの内部に発生する有効側圧の大きさを提案モデルを用いて評価する。さらに、各種横補強筋の補強効率について考察する。

なお、本研究は、建設省・総プロNewRC・高強度コンクリート分科会の研究の一環として行ったものである。

2. 実験方法

表-1に実験の概要を示す。また、図-1に使用した鋼材の応力-ひずみ曲線を示す。実験要因としては、水セメント比(W/C)、供試体の高さ-辺長比(H/D)、横補強筋の形状、鉄筋の降伏強度(f_y)、および主筋径(d)を取り上げた。供試体は、辺長10cmの正方形断面の角柱体、および直径10cmの円柱体とし、製作には、普通ポルトランドセメント、川砂(5mm未満)、碎石(5~15mm)、シリカフューム($F_c=700, 1000\text{kgf/cm}^2$ シリーズのみ)、高性能AE減水剤、および鉄筋を使用した。設計スランプは20cm、調合強度(F_c)は、400, 700および 1000kgf/cm^2 とした。

表-1 実験概要

断面 (cm)	供試体		横補強筋 ^{*4}			主筋
	H/D	F_c (kgf/cm^2)	S (cm)	形状	f_y (kgf/cm^2)	d ^{*3} (mm)
□10	1	400	2.5		5520	φ3
		700				
φ10	2 ^{*1}	1000	∞		13300	φ4

H/D: 供試体の高さ-辺長(直径)比, F_c : 圧縮強度レベル,
S: ピッチ, f_y : 降伏強度, *1: $F_c=400, 700$ のH/D=2は $f_y=5520$ のみ。
*2: スパイラル筋を使用。 $f_y=5520$ のみ。
*3: dは主筋径。
φ4mm主筋を用いた実験は、アンダーラインを付した要因(横補強筋形状は角形の3種)についてののみ。
*4: φ3mm鉄筋を使用。

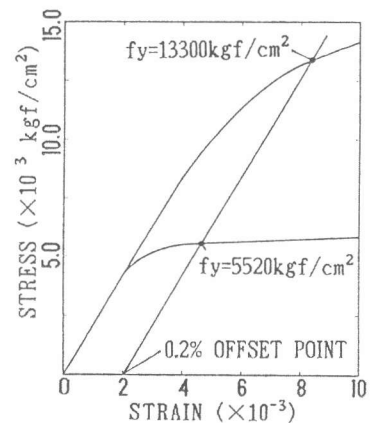


図-1 鉄筋の応力-ひずみ曲線

$F_c=400$ および 700kgf/cm^2 の供試体は、材令1日目にキャッピング、2日目に脱型した。また、 $F_c=1000\text{kgf/cm}^2$ の供試体は、材令1日目に脱型し、1週間水中養生を行った後、供試体端面を研磨した。その後、いずれの場合も養生室内（温度 $27\pm 1^\circ\text{C}$ ，相対湿度 $88\pm 2\%$ ）で空中養生を行った。試験材令は、約50日とし、供試体の個数は、各要因毎に2個とした。

载荷には、200tfアクチュエータ型試験機を使用し、軸方向ひずみが、 20×10^{-3} に至るまで、一定ひずみ速度（毎分約 1×10^{-3} ）で継続的に圧縮载荷した。また、 $H/D=1$ の供試体の場合、载荷端面には2枚のポリプロピレンシートにシリコングリスを塗布した減摩パッドを挿入した。 $H/D=2$ の供試体では、試験体内部に破壊領域をバランス良く生じさせるため、摩擦をきらずに载荷を行った。

軸方向のひずみを測定するため、供試体の上下端から0.5cmの位置に、ボルトによって鋼製枠を固定した（すなわち、軸ひずみの検長は $(H-1.0)$ cmである）。 $H/D=1$ の供試体の場合、応力上昇域は鋼製枠に取り付けた一対の変位計で、下降域は、鋼製枠を外した後、载荷板間に取り付けた一対の変位計でそれぞれ測定した。 $H/D=2$ の場合は、一貫して鋼製枠に取り付けた一対の変位計で測定した。

3. 実験結果とその考察

3.1 応力-ひずみモデル

応力-ひずみ曲線の実測結果を用いて、横補強筋による側圧を評価するには、当該コンクリートの3軸圧縮時の応力-ひずみ曲線が必要となる。図-2は、本実験と同時に作成した供試体を用いて行った3軸圧縮実験結果（実線）を示したものである。実験方法は既報[3]と同じであるため、ここでは説明を割愛する。側圧は、コンクリート外周部の鋼管によって与えられる受働型側圧であるが、供試体高さ方向のいずれの部位においても、鋼管はピーク応力点以前に降伏していることを確かめている。

図中の破線は、既提案の応力-ひずみモデル[3]による計算値を示したものである。但し、当該コンクリートの性状を的確に表すため、1軸圧縮時の応力-ひずみ関係に関わる入力データは実験値に合わせ込んである。図によれば、提案モデルを用いて、 100kgf/cm^2 までの高側圧を受ける高強度コンクリートの応力-ひずみ関係を比較的良く推定できることが分かる。

図-3は、提案モデルを用いて得られる $F_c=700\text{kgf/cm}^2$ シリーズの応力-ひずみ曲線群である。

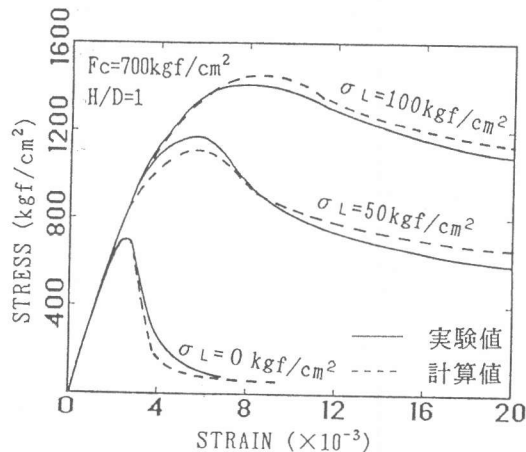


図-2 3軸圧縮時の応力-ひずみ曲線の実験値と計算値の比較

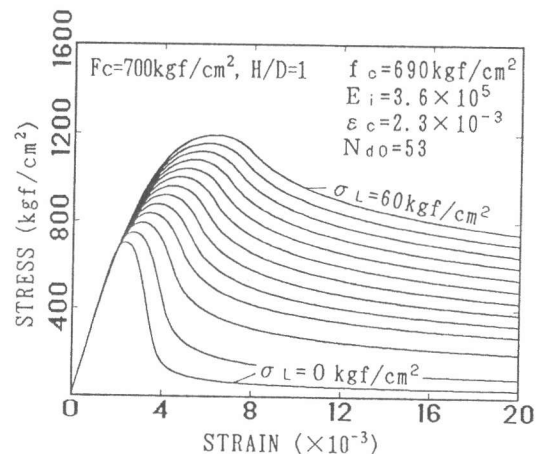


図-3 提案モデルによる3軸圧縮時の応力-ひずみ曲線

以下、このようにして得られた推定曲線を用いて実験値の評価を行う。

3.2 応力-ひずみ曲線および等価側圧曲線

図-4~6に、得られた応力-ひずみ曲線とそれに対応する等価側圧の変動（等価側圧曲線）を示す。ここで、等価側圧($E\sigma_L$)とは、コンファインドコンクリートの圧縮靱性と同等な圧縮靱性を得るために要する能働かつ一様な側圧の大きさを表し、応力-ひずみ曲線の実験値と推定値（図-3）を比較することによって得られる。

(1) コンクリート強度の影響

図-4(a)および(b)は、それぞれコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線および等価側圧曲線に及ぼすコンクリート強度の影響を示したものである。図(a)によれば、横補強筋形状が円形、角形いずれの場合もコンクリート強度の増大とともにコンファインドコンクリートの破壊性状は脆性的となっており、その程度は円形横補強筋に比べ、角形横補強筋を用いた場合に著しい。図(b)によれば、角形横補強筋の等価側圧の値は、円形横補強筋の1/2以下であり、コンクリート強度に拘らず類似した値となる。但し、ひずみの進行に伴う等価側圧の変動は、コンクリート強度によって異なり、 $F_c=400$ シリーズでは側圧の発現が高強度コンクリートに比べて遅延している。

(2) 横補強筋形状の影響

図-5(a)および(b)は、それぞれ $F_c=700$ シリーズのコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線および等価側圧曲線に及ぼす横補強筋形状の影響を示したものである。図-5およ

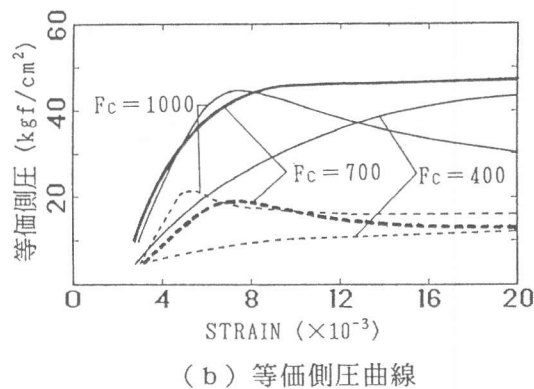
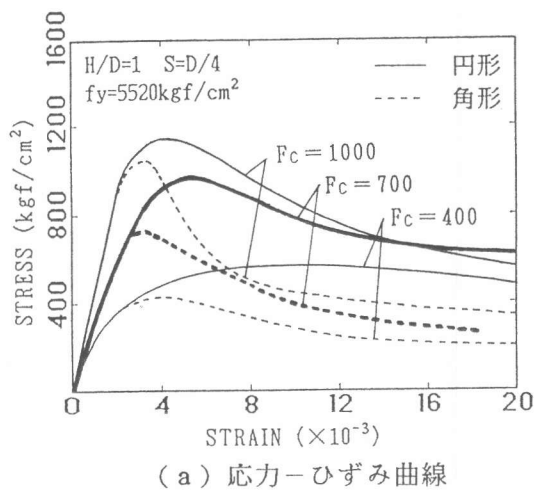


図-4 コンクリート強度の影響

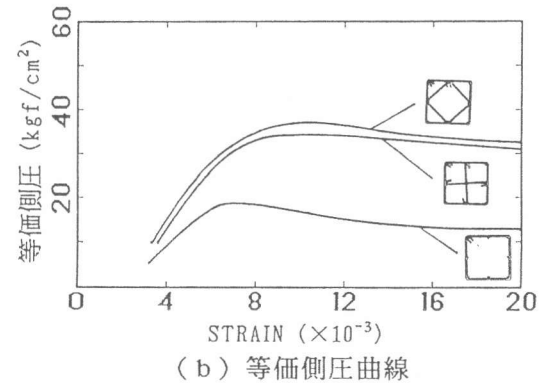
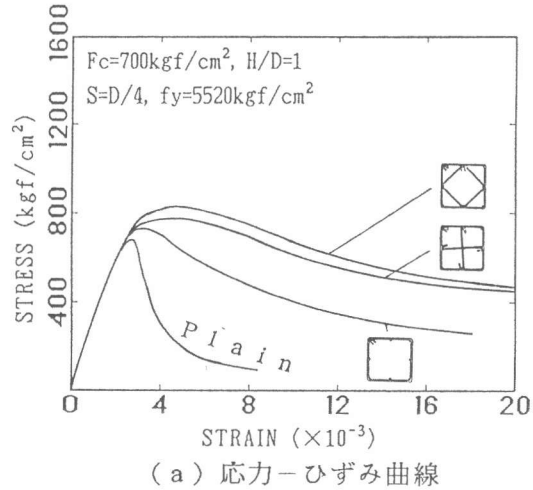


図-5 横補強筋形状の影響
($F_c=700\text{kgf/cm}^2$ シリーズ)

び $F_c=400$, 1000 シリーズの実験結果によれば、コンファインドコンクリートの圧縮靱性の大きさは、コンクリート強度に拘らず横補強筋形状が \boxtimes , \boxplus , \square の順である。但し、横補強筋体積比がこの順に大きいため、横補強筋の効果を定量的に評価するには、次節で取り扱う補強効率を比較する必要がある。

(3) 横補強筋の降伏強度の影響

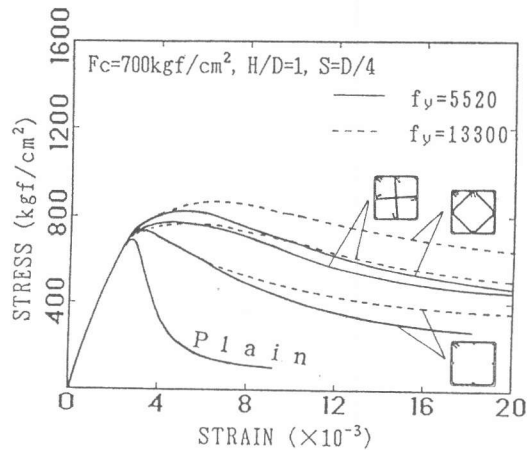
図-6 (a) および (b) は、それぞれ $F_c=700$ シリーズのコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線および等価側圧曲線に及ぼす横補強筋の降伏強度の影響を示したものである。図-6 および $F_c=400$, 1000 シリーズの実験結果によれば、一般に、横補強筋の降伏強度が高いほど圧縮靱性が大きい、その差はほぼピーク応力点以後顕著になる。

3.3 鋼材の補強効率

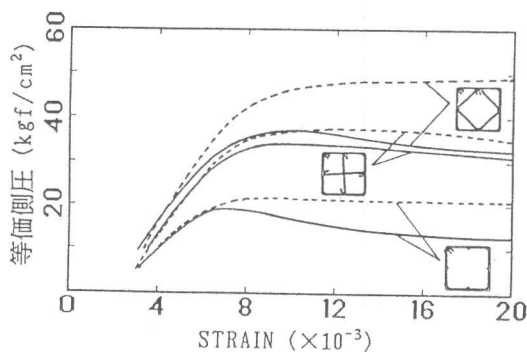
(1) 補強効率の定義

各種形状の横補強筋の補強効率を知るために、3.2 節で得られた等価側圧曲線から応力下降域における等価側圧の平均値 (σ_{LY} , 平均等価側圧と呼ぶ) を求めた。ここでは、鋼材の補強効率 (R) を下式のように定義する。

$$R = \frac{\sigma_{L^*}}{\sigma_{LY}} \quad \text{ここに、} \sigma_{LY} : \text{鋼材降伏時の計算側圧} \quad (1)$$



(a) 応力-ひずみ曲線



(b) 等価側圧曲線

図-6 横補強筋の降伏強度の影響

($F_c=700\text{kgf/cm}^2$ シリーズ)

表-2 横補強筋量と計算側圧

S (cm)	f_y (kgf/cm ²)	形状	P_V (%)	σ_{LY} (kgf/cm ²)
2.5	5520	\square	1.13	31.2
		\boxplus	1.70	46.8
		\boxtimes	1.93	53.3
	13300	\circ	1.13	31.2
		\square	1.13	75.2
		\boxplus	1.70	112.8
		\boxtimes	1.93	128.3
		\circ	1.13	75.2

S: 横補強筋ピッチ, f_y : 横補強筋の降伏強度, P_V : 横補強筋体積比, σ_{LY} : 鋼材降伏時の計算側圧

式(1)中の σ_{LY} の値は、すべての横補強筋が円柱体外周に一様に巻かれているものと仮定して求めた鋼材降伏時の計算側圧である(すなわち、理想的な3軸圧縮状態を想定)。したがって、横補強筋形状、ピッチに拘らず、 σ_{LY} の値は、次式によって求められ、表-2中に示した値になる。

$$\sigma_{LY} = P_s f_y = \frac{1}{2} P_v f_y \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 P_s :横補強筋の断面積比、 f_y :横補強筋の降伏強度、 P_v :横補強筋の体積比

(2) 各種横補強筋の補強効率

ここでは、高さ-辺長(または直径)比が $H/D=1$ の供試体の実験データを用いて各種の横補強筋の補強効率を調べる。これは、既報[4]で報告したように、 $H/D=1$ の供試体では、破壊が供試体全体でほぼ均等に生じ、横補強筋の拘束効果を抽出するうえで適していると考えたからである。また、横補強筋のピッチは、すべて $D/4$ (D :断面の辺長または直径)であり、拘束力の離散性の影響はほぼ無視できる[4]。

図-7は、降伏強度 $f_y=5520\text{kgf/cm}^2$ の横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの平均等価側圧を示したものである。なお、図中には、横補強筋の体積比 P_v から式(1)および式(2)を用いて計算される補強効率と等価側圧の関係(1点鎖線)も示してある。図によれば、鋼材の補強効率 R の大きさは、横補強筋形状が○、(⊗田)、□の順であり、○形では、 $R=1.0$ 、⊗および田形では $R=0.6\sim 0.7$ 、□形では $R=0.4\sim 0.5$ となっている。さらに、コンクリート強度が鋼材の補強効率に及ぼす影響はほとんど見られない。

図-8は、降伏強度 $f_y=13300\text{kgf/cm}^2$ の横補強筋を用いた場合の平均等価側圧を示したものである。図によれば、鋼材の補強効率 R は、図-7に示した $f_y=5520\text{kgf/cm}^2$ シリーズに比べ、全体的に半減している。すなわち、横補強筋形状が○形では、 $R=0.55$ 、⊗および□形では $R=0.3\sim 0.35$ 、□形では $R=0.25\sim 0.3$ となっている。このことから、高強度の横補強筋を用いても、その降伏強度に見合うだけの横拘束効果を期待することはできないことが分かる。この主な理由とし

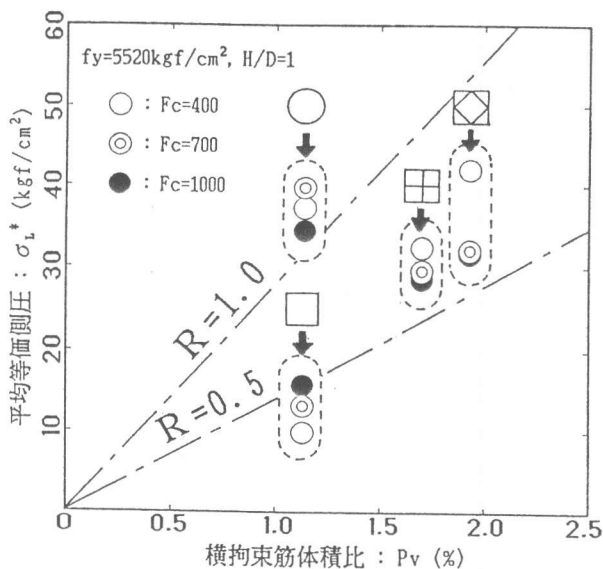


図-7 横補強筋の平均等価側圧
($f_y=5520\text{kgf/cm}^2$ シリーズ)

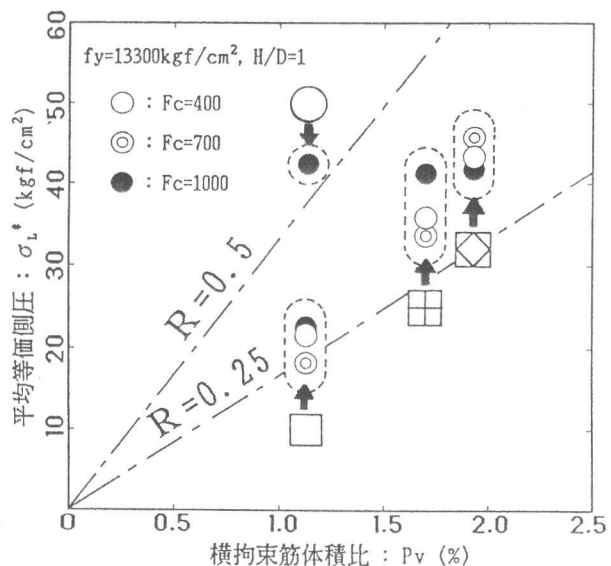


図-8 横補強筋の平均等価側圧
($f_y=13300\text{kgf/cm}^2$ シリーズ)

て、コンクリートの破壊の進展、すなわちコンクリートの損傷が進展して後に側圧が加えられても、損傷が小さい段階ほど供試体の耐荷力は回復しないこと[5]が挙げられる。

なお、以上の補強効率 R の値は、既に報告した $F_c=300\text{kgf/cm}^2$ シリーズの結果[2]とほぼ同様であることを付記しておく。

4. まとめ

1) 各種横補強筋の補強効率(式(1)で算定)としておよそ以下の値が得られた。

形状	$f_y=5520\text{kgf/cm}^2$	$f_y=13300\text{kgf/cm}^2$
○	1.0	0.55
⊗	0.6~0.7	0.3~0.35
⊕	0.6~0.7	0.3~0.35
□	0.4~0.5	0.25~0.3

これらの値は、 $F_c=300\sim 1000\text{kgf/cm}^2$ の範囲であれば、コンクリート強度によってさほど変動しないといえる。

2) 本研究で得られた補強効率 R と既報[4]で得られた横補強筋ピッチによる等価側圧の低減係数 β の積 $\beta \cdot R$ を用いて、任意のピッチで配置された各種横補強筋の等価側圧がほぼ推定できるものと考えられる。

[謝辞] 本研究に際し、ご助力を得た愛知工業大学・小池狭千朗助教授、津田聡史君(前田建設)、および三重大学・畑中研究室の諸氏、並びに高性能A E減水剤を提供して頂いた竹本油脂(株)に深謝致します。また、本研究費の一部は、平成2年度大倉和親記念財団研究助成金によったことを付記する。

[参考文献]

- [1] Y. Kosaka, Y. Tanigawa, and S. Hatanaka : Plastic Deformational Behavior of Axially Loaded Concrete under Low Lateral Pressure -An Evaluation Method for Compressive Toughness of Laterally Confined Concretes (Part 1)-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第377号, pp. 27-40, 1987. 7.
- [2] 小阪義夫、谷川恭雄、畑中重光 : 構成モデルに基づく各種横拘束コンクリートの圧縮靱性の統一評価, コンクリート工学年次講演会論文集, 第8巻, pp. 365-368, 1986.
- [3] 畑中重光、服部宏己、近藤洋右、谷川恭雄 : 3軸圧縮下の普通・高強度コンクリートの応力-ひずみモデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 31-36, 1991.
- [4] 畑中重光、服部宏己、近藤洋右、谷川恭雄 : コンファインド高強度コンクリートの有効側圧と応力-ひずみ関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 13, No. 2, pp. 37-42, 1991.
- [5] 小阪義夫、谷川恭雄、畑中重光、 : 低側圧3軸圧縮下のコンクリートの塑性変形挙動, 第6回コンクリート工学年次講演会論文集, pp. 257-260, 1984.