

論文

[2004] 横拘束された高強度コンクリートの構成則

正会員 境 有紀 (東京大学地震研究所)

1. はじめに

本研究の目的は、任意の形状の横補強筋によって横拘束された圧縮強度1000kgf/cm²程度までの圧縮コンクリートの構成則をモデル化することである。

曲げ圧縮破壊する鉄筋コンクリート造部材の変形性能を確保するためには、コンクリートを横補強筋によって横拘束することが有効であることが知られている。その変形性能は、横拘束された圧縮コンクリートの構成則から評価するのが有効な方法であるが、拘束コンクリートの構成則は、コンクリート圧縮強度、横補強筋の様々な特性によって変化する。

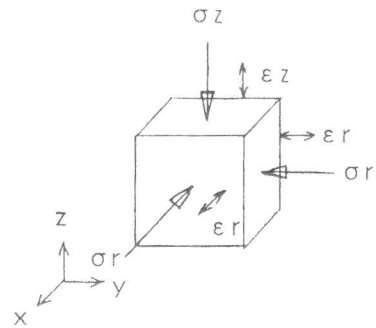
そこで本研究では、円形拘束コンクリートの中心圧縮実験を行ない、その結果を基に、横補強筋の特性、コンクリート圧縮強度の影響を取り入れた形で圧縮コンクリートの構成則のモデル化を行ない、任意の形状をもつ横補強筋の特性を解析的に求めることによってモデルを拡張し、任意の形状をもつ横補強筋によって横拘束されたコンクリートの構成則モデルを提案した。

2. 解析方針

一般に、ある物理現象をモデル化する際に重要なことは、これに影響を与える因子を正確に、かつ過不足なく全てを把握して考慮に入れることである。本研究においては、横拘束されたコンクリートの挙動は、図1に示す4つの物理量で表現されるとした(x方向とy方向が対称の場合に限定し、総称してr方向とした)。そして、横補強筋の横拘束性能を図2に示す横応力度-横歪度関係における剛性(横拘束剛性 E_r と定義)と耐力(横拘束耐力 σ_{ry} と定義)によって表現した。また、コンクリートの横はらみ性状は、コンクリート圧縮強度 σ_B によって変わると考えた。よって、拘束コンクリートの構成則に影響を与える因子を、次の3つとした。

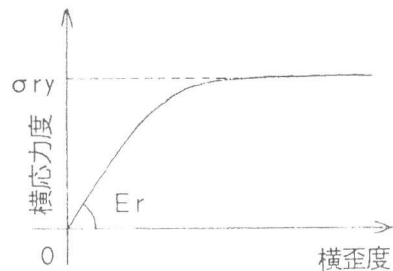
- ① 横補強筋の横拘束剛性 E_r
- ② 横補強筋の横拘束耐力 σ_{ry}
- ③ コンクリート圧縮強度 σ_B

そこで、これら3つをパラメータとした円形拘束コンクリートの中心圧縮実験を行ない、これらの関数として拘束コンクリートの構成則をモデル化する。



ϵ_z : 軸歪度、 σ_z : 軸心力度
 ϵ_r : 横歪度 (= 横補強筋の歪度)
 σ_r : 横心力度 = $2 \alpha A_w \sigma_s / S D$
 $= \alpha p_w \sigma_s (\epsilon_r)$
 p_w : 横補強筋比 (= $2 A_w / S D$)
 α : 横補強筋の離散による低減率 [1]
 $= 1 - S / D (> 0)$
 A_w : 横補強筋の断面積
 σ_s : 横補強筋の応力度
 S : 横補強筋間隔、 D : 試験体せい

図1 拘束コンクリートの挙動を表現する4つの物理量



σ_{ry} : 横拘束耐力 (= $\alpha p_w \sigma_{wy}$)
 E_r : 横拘束剛性 (= $\alpha p_w E_s$)
 σ_{wy} : 横補強筋降伏強度
 E_s : 横補強筋剛性

図2 横補強筋による横応力度-横歪度関係

表1 試験体のパラメータ

σ_B	p_w	$p_w \sigma_{wy}$	r
273	0.31	9.4	2.0
447	0.63	18.8	3.0
1018	1.26	37.7	75.4

σ_B : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm²)
 p_w : 横補強筋比 (%)
 σ_{wy} : 横補強筋降伏強度 (kgf/cm²)
 r : 横補強筋径 (mm)

3. 円形拘束コンクリートの中心圧縮実験

3.1 試験体 試験体は、直径10cm、高さ20cmの円形ピースで、横方向を円形スパイラルで補強し、かぶりコンクリートのないものとした。試験体のパラメータを表1に示す。また、プレーンコンクリートの軸応力度-軸歪度

関係を得るために、プレーンの試験体を各コンクリート圧縮強度ごとに3本ずつ用意した。

3.2 加力および測定 加力は単調軸方向荷重とし、ピーク点以降の下り勾配を得るために高剛性試験機[2]を用いた。試験体にかかる軸力、加力ヘッド間の変位、

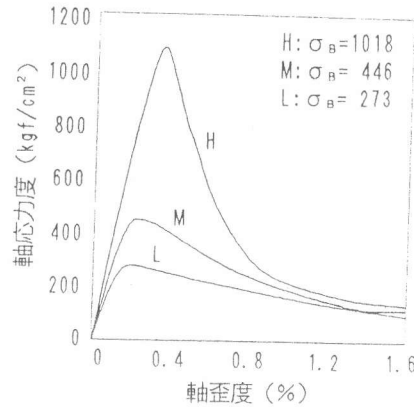


図3 プレーンコンクリートの軸応力度-軸歪度関係

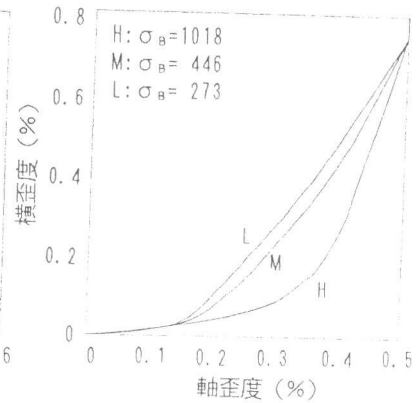
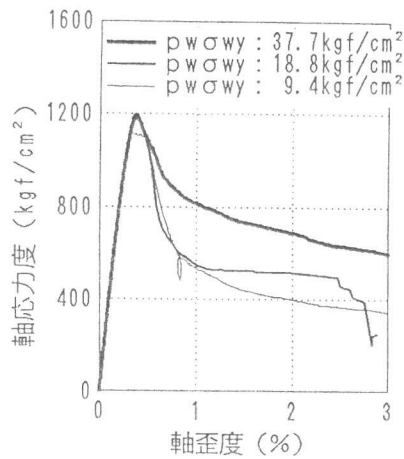
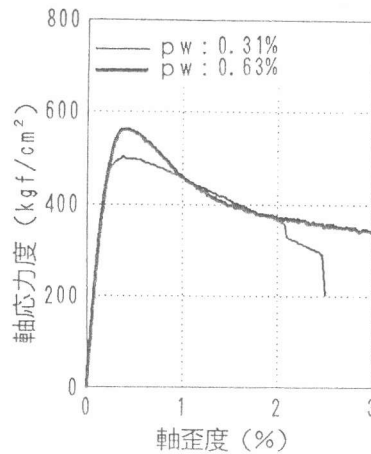


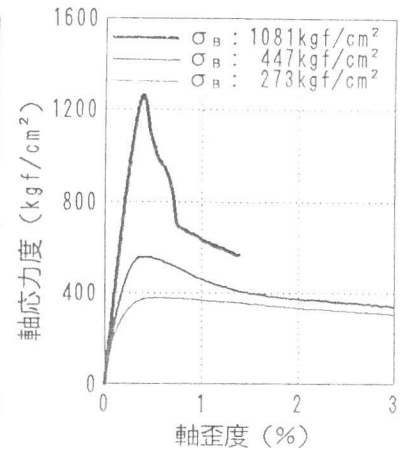
図4 プレーンコンクリートの横歪度-軸歪度関係



(1) $p_w\sigma_w$ の影響
 $p_w: 0.31\%$
 $\sigma_B: 1081\text{kgf/cm}^2$

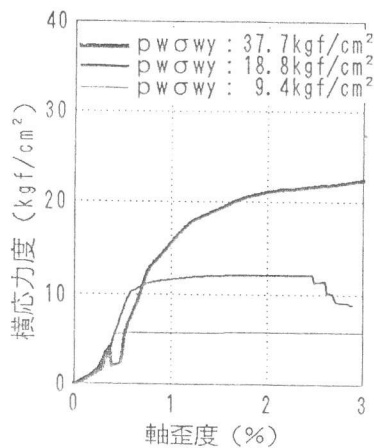


(2) p_w の影響
 $p_w\sigma_w: 18.8\text{kgf/cm}^2$
 $\sigma_B: 447\text{kgf/cm}^2$

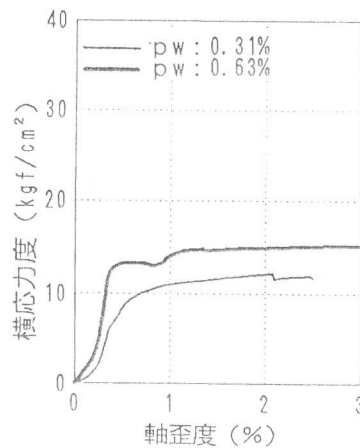


(3) σ_B の影響
 $p_w: 0.63\%$
 $p_w\sigma_w: 18.8\text{kgf/cm}^2$

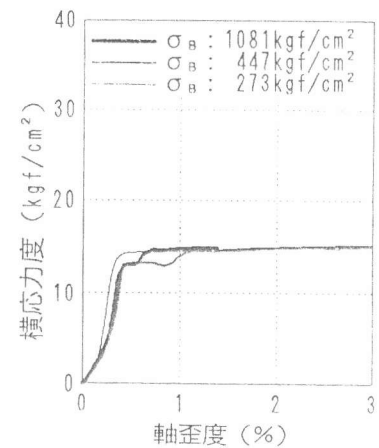
図5 円形拘束コンクリートの軸応力度-軸歪度関係



(1) $p_w\sigma_w$ の影響
 $p_w: 0.31\%$
 $\sigma_B: 1081\text{kgf/cm}^2$



(2) p_w の影響
 $p_w\sigma_w: 18.8\text{kgf/cm}^2$
 $\sigma_B: 447\text{kgf/cm}^2$



(3) σ_B の影響
 $p_w: 0.63\%$
 $p_w\sigma_w: 18.8\text{kgf/cm}^2$

図6 円形拘束コンクリートの横応力度-軸歪度関係

中央部分のスパイラルの歪を測定した。

3.3 実験結果 測定値を基に、加力開始時の加力ヘッドと試験体のなじみによる滑り、破壊の不均等性[3]を補正(部材せいに等しいとする破壊領域を想定し、最大耐力後は破壊領域外では除荷されるとした)して、破壊領域内の軸応力度-軸歪度関係を求めた。プレーンコンクリートの軸応力度-軸歪度関係を図3に、横歪度-軸歪度関係を図4に示す。コンクリート圧縮強度が大きいほどピーク点以降の下り勾配が急になる(図3)。また、同じ軸歪度で比較すると、コンクリート圧縮強度が大きいほど横歪度が小さい(図4)。拘束コンクリートの軸応力度-軸歪度関係を図5に、横補強筋に貼った歪ゲージの値に基づいて求めた横応力度-軸歪度関係を図6に示す。 p_w (横拘束剛性に対応)、 $p_w \sigma_{wy}$ (横拘束耐力に対応)、コンクリート圧縮強度 σ_n のいずれも軸応力度-軸歪度関係に影響し、これは p_w 、 $p_w \sigma_{wy}$ が大きいほど、 σ_n が小さいほど同じ軸歪度での横応力度が大きくなっている(図6)ことが原因であることがわかる。

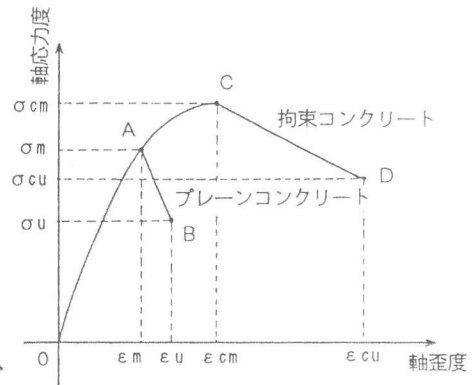
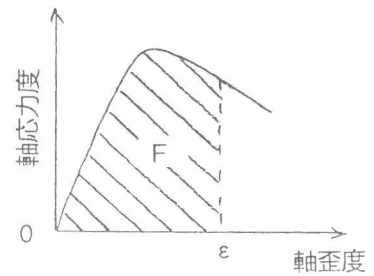


図7 プレーンコンクリートと拘束コンクリートの軸応力度-軸歪度曲線



平均軸応力度 = F / ϵ

図8 圧縮コンクリートの平均軸応力度

4. 圧縮コンクリートの構成則のモデル化

4.1 モデル化の方針

横補強筋による拘束効果は、横補強筋による横応力度に依存すると考え、以下に示す方針に従って行なった(図7)。

- ① プレーンコンクリートの中心圧縮実験に基づき、プレーンコンクリートのピーク点(点A)、終局点(点B、圧縮コンクリートの平均軸応力度(図8)が最大となる点と定義する[4])をコンクリート圧縮強度の関数として表現する。
- ② 円形拘束コンクリートの中心圧縮実験結果に基づき、拘束コンクリートのピーク点

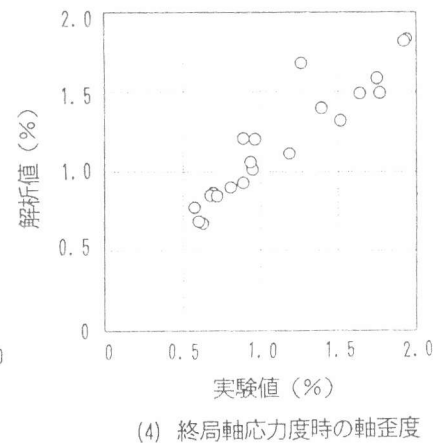
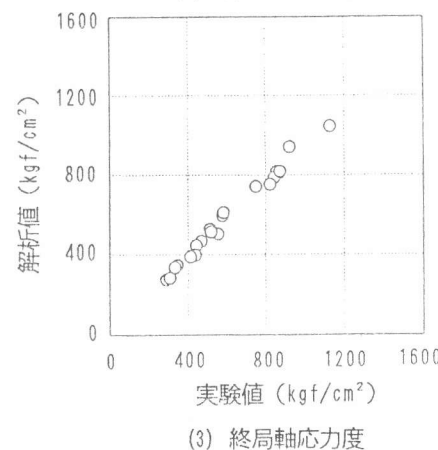
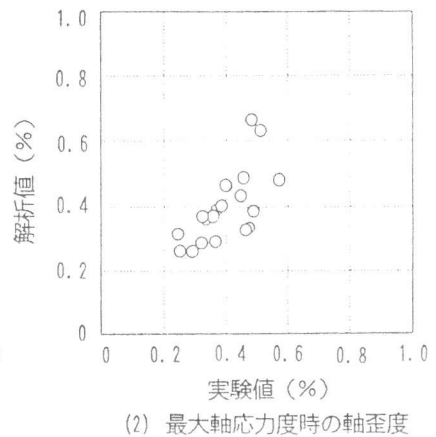
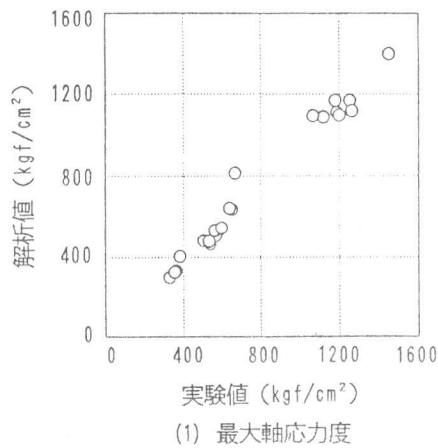


図9 実験値と解析値の比較

(点C)、終局点(点D、圧縮コンクリートの平均軸応力度が最大となる点)を、それぞれプレーンコンクリートのピーク点、終局点とコンクリート圧縮強度、それぞれの点における横応力度の関数として表現する。

③ 横応力度-横歪度関係を横補強筋の横拘束剛性、横拘束耐力、コンクリート圧縮強度の関数として表現し、②で定めた関係と連立させて、拘束コンクリートのピーク点、終局点を定める。

④ 原点、プレーンコンクリートのピーク点(点A)、終局点(点B)を結んでプレーンコンクリートの構成則モデル、原点、プレーンコンクリートのピーク点(点A)、拘束コンクリートのピーク点(点C)、終局点(点D)を結んで円形拘束コンクリートの構成則モデルとする。

⑤ 角形拘束コンクリートの横拘束剛性を解析的に求めることによって、円形拘束コンクリートの構成則を角形拘束コンクリートに拡張する。

4.2 プレーンコンクリート(①) ピーク点の軸歪度

ϵ_m 、終局時の軸応力度 σ_u 、軸歪度 ϵ_u を表2のように表現した。初期剛性 E_c は、友沢らの提案式[5]とした。

4.3 円形拘束コンクリート(②、③) ピーク点の軸応力度 σ_{cm} 、軸歪度 ϵ_{cm} 、終局点の軸応力度 σ_{cu} 、軸歪度 ϵ_{cu} を表3のように横応力度の関数として表現した。そして、図6で示された横応力度-軸歪度関係をコンクリート圧縮強度、横拘束剛性、横拘束耐力の関数として表4のように表現した。表3と表4で表わされる関係を連立して解けば、円形拘束コンクリートのピーク点、終局点が決まる。このようにして求めた実験値と解析値を比較して図9に示す。軸応力度に比べると軸歪度はややばらつきが見られるが、軸応力度のばらつきが小さければ、軸歪度のばらつきは、構成則モデルを用いた軸力の算定の際に大きな誤差を与えないことを考えると、工学的に十分な精度の再現性をもつと判断される。

4.4 構成則の表示式(④) 圧縮コンクリートの構成則の表示式は、六車らによる[7]ものを用いた(表5)。円形拘束コンクリートの軸応力度-軸歪度関係(図5)を提案する構成則モデルで図10に示す。提案モデルは終局点までの表示となっている。よい対応が見られる。

4.5 角形拘束コンクリートへの拡張(⑤)

角形拘束コンクリートは、コンクリートの横はらみに対して横補強筋の各辺が曲げ

表2 プレーンコンクリートの諸特性値

$E_c = 9200 \sigma_B^{0.3} w_c^2$	…(1)
$\epsilon_m = 2.0 \times 10^{-6} \sigma_B + 0.0012$	…(2)
$\sigma_u = 2.1 \sigma_B^{0.83}$	…(3)
$\epsilon_u = 0.005$	…(4)
E_c : 初期剛性(kgf/cm ²)	
w_c : 気乾単位容積重量(ton/m ³)	
σ_B : 圧縮強度(kgf/cm ²)	
ϵ_m : 最大軸応力度時の軸歪度	
σ_u : 終局軸応力度(kgf/cm ²)	
ϵ_u : 終局軸歪度	

表3 拘束コンクリートの諸特性値

$\sigma_{cm} = (1 + 20 \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_B})^{0.6} \sigma_B$	…(5)
$\epsilon_{cm} = (1 + 25 \frac{\sigma_{rm}}{\sigma_B}) \epsilon_m$	…(6)
$\sigma_{cu} = (1 + 20 \frac{\sigma_{ru}}{\sigma_B})^{0.6} \sigma_u$	…(7)
$\epsilon_{cu} = (1 + 40 \frac{\sigma_{ru}}{\sigma_B}) \epsilon_u$	…(8)
σ_{cm} : 最大軸応力度(kgf/cm ²)	
ϵ_{cm} : 最大軸応力度時の軸歪度	
σ_{cu} : 終局軸応力度(kgf/cm ²)	
ϵ_{cu} : 終局軸歪度	
σ_{rm} : 最大軸応力度時の横応力度(kgf/cm ²)	
σ_{ru} : 終局軸応力度時の横応力度(kgf/cm ²)	

表4 横応力度の評価

$\sigma_r = 0.7 E_r (\epsilon_z - \epsilon_{zs})$	…(9)
E_r : 横拘束剛性(= $\alpha p w E_s$)	
ただし、 $\sigma_r < \sigma_{ry}$ (= $\alpha p w \sigma_{wy}$)	
$\alpha = 1 - \frac{S}{D}$	…(10)
ただし、 $\alpha < 0$ の時は、 $\alpha = 0$	
$\epsilon_{zs} = 1 \times 10^{-6} \sigma_B + 0.001$	…(11)

表5 圧縮コンクリートの構成則モデル

(1) プレーンコンクリート	
$0 < \epsilon_z \leq \epsilon_m$	$\sigma_z = E_c \epsilon_z + \frac{\sigma_B - E_c \epsilon_m}{\epsilon_m^2} \epsilon_z^2$ …(15)
$\epsilon_m < \epsilon_z \leq \epsilon_u$	$\sigma_z = \frac{\sigma_B - \sigma_u}{\epsilon_m - \epsilon_u} (\epsilon_z - \epsilon_m) + \sigma_B$ …(16)
(2) 拘束コンクリート	
$0 < \epsilon_z \leq \epsilon_m$ (プレーンコンクリートと同じ)	$\sigma_z = E_c \epsilon_z + \frac{\sigma_B - E_c \epsilon_m}{\epsilon_m^2} \epsilon_z^2$ …(17)
$\epsilon_m < \epsilon_z \leq \epsilon_{cm}$	$\sigma_z = \frac{\sigma_B - \sigma_{cm}}{(\epsilon_m - \epsilon_{cm})^2} (\epsilon_z - \epsilon_{cm})^2 + \sigma_{cm}$ …(18)
$\epsilon_{cm} < \epsilon_z \leq \epsilon_{cu}$	$\sigma_z = \frac{\sigma_{cm} - \sigma_{cu}}{\epsilon_{cm} - \epsilon_{cu}} (\epsilon_z - \epsilon_{cm}) + \sigma_{cm}$ …(19)
ϵ_z : 軸歪度、 σ_z : 軸応力度	

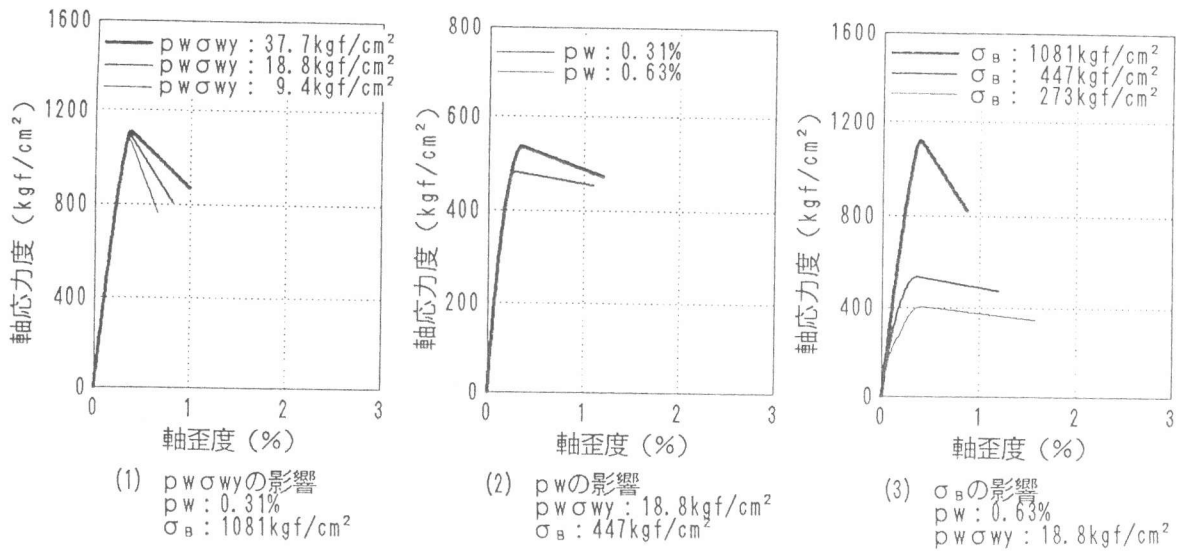


図10 提案モデルによる円形拘束コンクリートの軸応力-軸歪度関係

によって抵抗するため、円形拘束コンクリートに比べて横拘束剛性が小さい。そこで、簡単な力学モデルによって角形横補強筋の横拘束剛性を評価し、円形拘束コンクリートの構成則を角形拘束コンクリートに拡張する。

角形フープの一辺を取り出し、図11に示すような、端部にばねをもつ梁に左右対称な荷重と直交方向のフープにかかる荷重による引張軸力が作用した状態にモデル化する。フープを丸鋼とすると、フープ中央部のはらみ δ は、弾性範囲では一般に表6の式(12)で与えられる。簡単のため、 δ_s が材軸方向にそのまま寄与するとすると、フープが材軸に直交する方向にたわむことによる円形横補強筋に対するフープの材軸方向の伸びの割増率 ξ は式(13)となる。即ち、フープの横拘束剛性は、円形横補強筋の $1/\xi$ ($=\gamma$:角形横補強筋の横拘束剛性の低減率)となる。ここで、式(13)の係数 k は、フープ隅角部の固定度(端部のばねの剛性)とフープ筋に沿ったコンクリートの横はらみ力の分布に依存する。そこで k を円形フープと角形フープの横はらみ性状について検討した鈴木ら[6]の実験結果($l=20\text{cm}$ 、 $r=9\text{mm}$ の時、 $\gamma=0.7$)を基

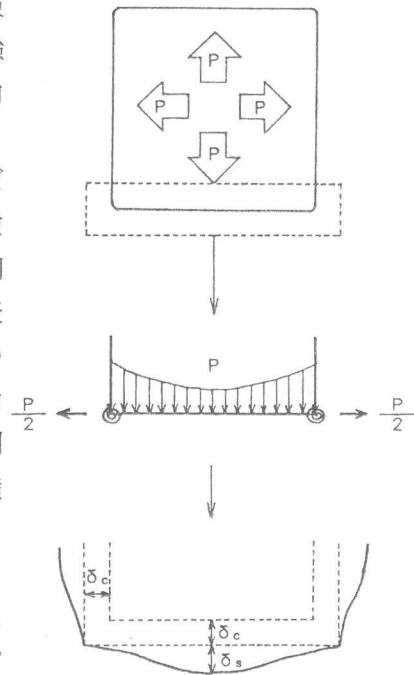


図11 角形フープのモデル化

表6 角形フープの横拘束剛性の評価

$\delta = \delta_c + \delta_s = \frac{P l}{\pi E s r^2} + \frac{64 P l^3}{\pi k E s r^4} \dots (12)$
δ : フープのはらみ δ_c : フープの材軸方向伸びによるはらみ δ_s : フープの材軸直交方向のたわみによるはらみ P : フープ一辺にかかる力、 l : フープ一辺の長さ $E s$: フープの弾性剛性、 r : フープ断面の直径
$\xi = \frac{\delta_c + \delta_s}{\delta_c} = 1 + \frac{64}{k} \left[\frac{l}{r} \right]^2 \dots (13)$
$\gamma = \frac{1}{1 + \frac{1}{1150} \left[\frac{l}{r} \right]^2} \dots (14)$
ξ : 角形横補強筋の伸びの割増率 γ : 角形横補強筋の横拘束剛性の低減率

に計算し、 $k \approx 73700$ という値を得た。よって、式(13)より γ は、式(14)で与えられる。

中子のある角形横補強筋は、中子によりフープのスパン l が短く区切られると考えた。よって、中子のある角形横補強筋の γ は、式(14)の l を中子によって区切られた長さに置き換えれば求められる。

よって、円形拘束コンクリートの構成則を角形拘束コンクリートに拡張するに

は、式(9)における横拘束剛性 E_r を γ 倍すればよい。

コンクリート圧縮強度が 1000 kgf/cm^2 で横補強筋強度、横補強筋間隔、中子の有無をパラメータとして別途行なった角柱の中心圧縮実験[4]の軸応力度-軸歪度関係と提案モデルを比較して図12に示す。提案モデルは終局点までの表示となっている。いずれも良く適合している。

5. まとめ

円形拘束コンクリートの中心圧縮実験を行ない、その結果を基に、横補強筋の横拘束性能を、横拘束剛性と横拘束耐力により評価し、コンクリート圧縮強度の違いによる横はらみ性状の違いの影響を取り入れた形で拘束コンクリートの構成則のモデル化を行なった。そして任意の形状をもつ横補強筋の横拘束剛性を解析的に求めることによってモデルを拡張し、任意の形状をもつ横補強筋によって横拘束された圧縮コンクリートの構成則モデルを提案した。

謝辞

円形拘束コンクリートの中心圧縮実験を行なうに当たって、コンクリート打ちの際、東京大学工学部建築学科材料研究室の友沢史紀教授、野口貴文助手、小野山貫造氏に、加力の際、フジタ工業技術研究所の田中清氏、寺岡勝氏、神田亨氏、佐々木聡氏、また全般にわたり、東京大学工学部建築学科青山・小谷研究室の方々にお世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Sundara Raja Iyengar, K. T., Parakash Desayi and Nagi Reddy, K.: Stress-Strain Characteristics of Concrete Confined in Steel Binders, Magazine of Concrete Research, Vol. 22, No. 72, 1970
- [2] 神田亨、山田茂: セメント量、混和剤添加量を抑えた高強度コンクリートの物性、コンクリート工学年次論文報告集第11巻第1号、1989
- [3] 加藤大介、羽廣重夫: 鉄筋コンクリート造角柱試験体の軸方向圧縮実験の評価に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、1989
- [4] 小谷俊介、境有紀、青山博之: 曲げ圧縮破壊する高強度コンクリートを用いたRC柱の変形性能、コンクリート工学年次論文報告集第13巻第2号、1991、投稿中
- [5] 友沢史紀、野口貴文、小野山貫造: 高強度・超高強度コンクリートの基礎的力学特性に関する調査、日本建築学会大会学術講演梗概集A材料施工、1990
- [6] 鈴木計夫、中塚侖、菅田昌宏: 角形補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性、コンクリート工学年次論文報告集第11巻第2号、1989

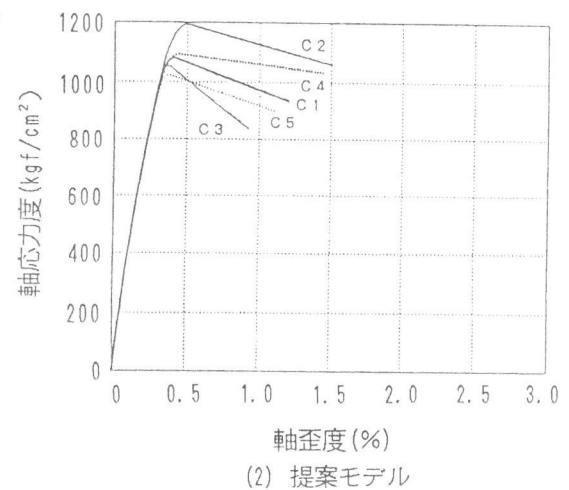
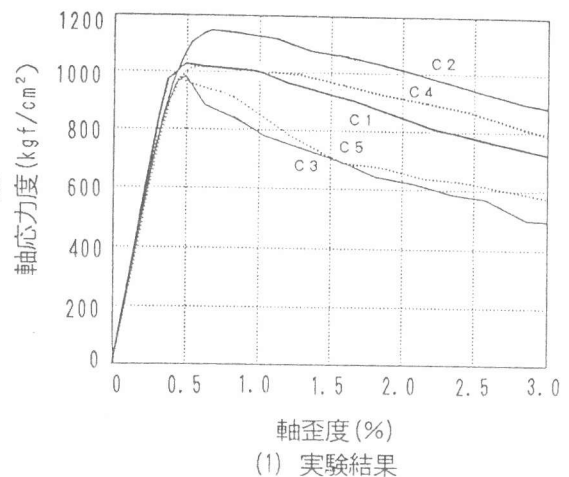


図12 角柱の中心圧縮実験結果と提案モデル