

論文 円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性

小橋 弘樹*¹・中塚 佑*²・大和 真一*³

要旨：既製コンクリート杭などの構造部材でみられる中空円筒形のコンファインドコンクリートの強度・変形特性が、横補強筋の拘束応力の大きさやピッチおよび円筒部のコンクリート肉厚などの諸要因によって、どのような影響を受けるかを調べた。その結果、同特性はコンファインドコンクリートの基本要因によって、中実体の場合と同様の影響を受けること、ならびに肉厚の増大によって各特性が向上する傾向のあることなどが明らかになった。さらに、円形中実体から中空円筒体のコンファインドコンクリートの強度・変形特性を連続して推定できる算定式を誘導した。

キーワード：コンファインドコンクリート、応力-ひずみ、中空円筒、コンクリート杭

1. はじめに

コンファインドコンクリートはその粘り強さによって、コンクリート構造部材の曲げ靱性改善に非常に有効であることが、実験的・解析的に示されている。それ故、曲げ靱性設計に必要な同コンクリートの応力-ひずみ特性が広範囲に調べられ、形状（中実円形、角形）、横補強筋量ならびに材料強度（コンクリート、鉄筋）に関わらずその強度・変形特性を推定できる算定式が提案されている。^{1), 2)}しかし、コンクリート構造部材の一つである遠心力成形杭などでみられる中空円筒形の同コンクリートの強度・変形特性は殆ど調べられていないのが現状である。

本研究は、円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性を既往の研究³⁾で示された同コンクリートの基本変量である、拘束応力指標、拘束応力分布指標を変量とした実験から調べ、その結果と中実円形に対する既往の推定式とから、中実円形から円筒コンファインドコンクリートの強度・変形を連続して推定できる算定式の誘導を試みたものである。

2. 研究方法

2.1 実験計画

本研究の目的は、中実から円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性を連続して推定する算定式の誘導であるため、同コンクリートの基本影響要因である拘束応力指標および拘束応力分布指標を円筒体では以下のように仮定した。すなわち、図-1に示すように、前者については肉厚部での平均拘束応力を式(1)で、また後者は中実体における横補強筋間隔比(S/D)との連続性から(S/2t, 0<t≤D/2)で評価することとした。従って、円筒体での横補強筋比(P_s)は、式(2)で与えられる。

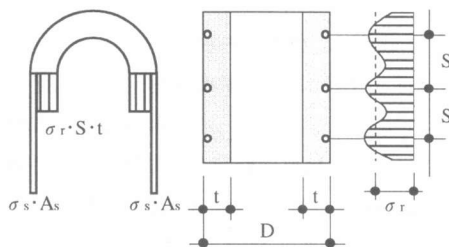


図-1 各指標の定義

*1 旭化成工業(株) ジオ技術開発部 工修 (正会員)

*2 大阪大学助教授 工学部建築工学科 工博 (正会員)

*3 旭化成工業(株) ジオ技術開発部部長 工修

2.2 試験体概要

試験体一覧を表一に示す。取り上げた実験要因は、肉厚（径厚比）(t, t/D), 拘束応力分布指標 (S/D, S/2t) および平均拘束応力である拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy}$) である。

$$\sigma_r = P_s \sigma_{sy} \quad (1)$$

$$P_s = 2A_s / 2tS \quad (2)$$

ここに、 σ_r : 平均拘束応力, P_s : 横補強筋比
 σ_{sy} : 横補強筋降伏強度, A_s : 横補強筋断面積
 S : 横補強筋のピッチ, t : コンクリート肉厚

試験体は外径×高さがφ200×400 mmで、かぶりコンクリートのない円筒体である。径厚比および横補強筋量などはPHC杭^{4) 5)}での値を参考にして決定した。

試験体の製作は、遠心成型を行わずに、写真一に示す半割りにした一対の大径の塩ビ管と小径の塩ビ管を二重管構造にした型枠にコンクリートを打設し、その後、所定の強度が得られるまで室温で気中養生とした。試験体数は、表一に示す各種類につき原則2体とし、補強筋のないプレーンコンクリートの試験体は、各径厚比に対してそれぞれ3体製作した。

使用したコンクリートの調合および特性を表二、表三に示す。横補強筋としては、熱処理によって所定の降伏点強度となるようにした、表四に示す7種類のスパイラル筋（巻外径：200 mm）を用いた。なお、スパイラル筋の両端部には図二に示すようなフック（長さ：肉厚 t - 10 mm）を設けた。

2.3 载荷および測定方法

载荷は5000kN圧縮試験機を用いて、図三に示すような方法で行った。载荷速度は手動調節し、また、球座は载荷荷重の偏心を取り除いた後に固定した。試験体の軸ひずみは、360mm区間を測定検長として、ストローク50mmのダイヤルゲージ式変位変換器を用いて測定した。また横補強筋局部のひずみ状態を測定するため、図二に示すように試験体のほぼ中央部の4箇所に検長2mmの箔ゲージを貼付した。

表一 試験体一覧

試験体名	t/D		S/2t	$P_s \sigma_{sy}$ MPa	F_c MPa	D×H mm
	t mm					
T2S2C3	0.15	30	0.14	3	50	200 × 400
T2S5C3			0.25			
T2S7C3			0.37			
T2S5C2			0.25	2		
T2S5C5				5		
T3S2C3	0.28	55	0.14	3		
T3S5C3			0.25			
T3S7C3			0.37			
T3S5C2			0.25	2		
T3S5C5				5		
T4S2C3	0.41	81	0.14	3		
T4S5C3			0.25			
T4S7C3			0.37			

H: 試験体の高さ

試験体名: T2S2C3

T2: t/D = 0.15, S2: S/2t = 0.14, C3: $P_s \sigma_{sy} = 3\text{MPa}$

表二 コンクリートの調合（単位: kg/m³）

試験体ケース	W/C %	W	C	S	G	SP %
T2	48	192	400	797	969	1
T3						
T4						

W: 水

C: 普通ポルトランドセメント

S: 細骨材（静岡県稲子山産砕砂）

G: 粗骨材（栃木県栗山産6号砕石）

注: 試験体肉厚を考慮

SP: 高性能減水剤（ナフタレン系）

表三 コンクリートの特性

試験体ケース	F_c MPa	スランブ cm	F_o MPa	ϵ_o %
T2	50	20.7	52	0.274
T3		20.1	55	0.269
T4		20.8	52	0.262

F_c : 設計圧縮強度, F_o : 圧縮強度

ϵ_o : 圧縮強度時のひずみ

表四 横補強鉄筋の力学特性

鉄筋径φ mm	設計 σ_{sy} MPa	実測 σ_{sy} MPa	E_s ×10 ⁵ N/mm ²
2.0	300	430	1.75
2.7		453	1.89
3.3		451	1.81
5.0		420	2.05
6.0		412	2.08
7.0		421	2.06
9.0		404	2.13

σ_{sy} : 横補強筋降伏強度, E_s : 弾性係数

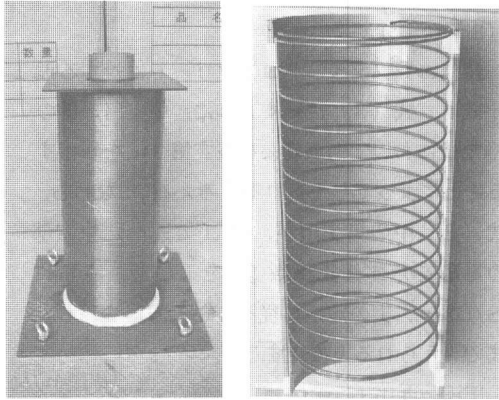


写真-1 型枠

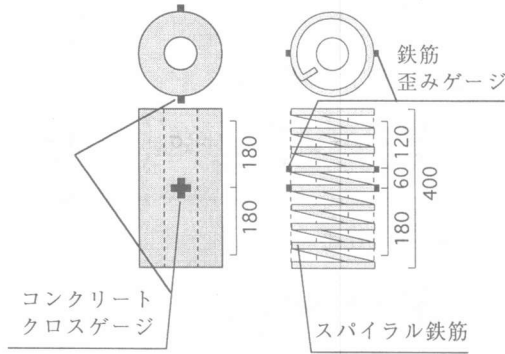


図-2 試験体図

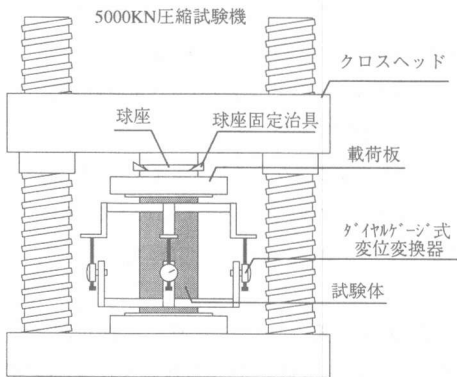


図-3 試験装置

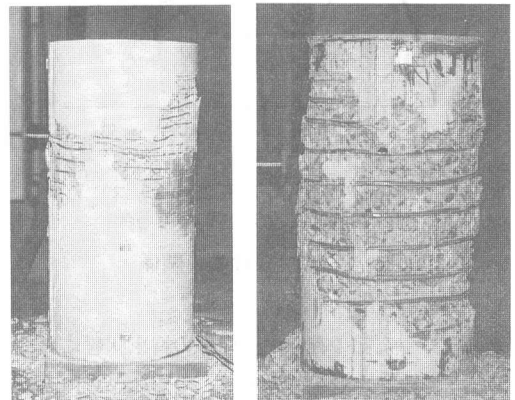
3. 実験結果および考察

3.1 破壊状況および応力-ひずみ関係

横補強筋の拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy}$) およびピッチが試験体の破壊状況におよぼす影響は中実

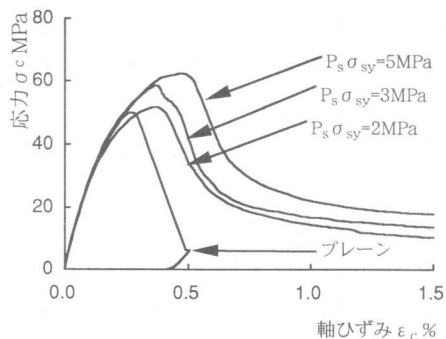
体の場合とほぼ同様であったが、肉厚(t)が異なるときには若干相違した。すなわち、写真-2に示すように肉厚が小さくなるにつれて破壊領域が狭くなる傾向がみられた。

次に図-4は、本実験で得られた各試験体の応力-ひずみ関係の例である。同図(a)は、肉厚 (t)および横補強筋ピッチ(S)が同じで拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy}$) のみが異なる試験体の結果を比較したものである。同図から $P_s \sigma_{sy}$ 増大によって円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性の改善されることが分かる。同図(b)は、 $P_s \sigma_{sy}$ および $S/2t$ が同じで、肉厚(t)が異なるときの結果であるが、肉厚が大なる場合ほど良好な強度・変形特性が示されている。同図(c)は、 $P_s \sigma_{sy}$ および t が同じで補強筋ピッチ(S)が違う場合の例である。 S が粗くなるほど強度・変形特性の改善度は悪くなっている。以上に述べた $P_s \sigma_{sy}$ および S の影響は、円筒中実体において得られたそれと一致しており、円筒体の強度・変形特性が中実体のそれらと関連づけて評価できることが示唆される。一方、円筒体では、(1) 肉厚部外面で拘束応力は存在するが中空内面からの拘束応力は存在しない、(2) 同じ横補強筋ピッチの場合でも肉厚との比 ($S/2t$ $0 < t \leq D/2$) によって拘束応力分布状態は異なることなどが考えられる。



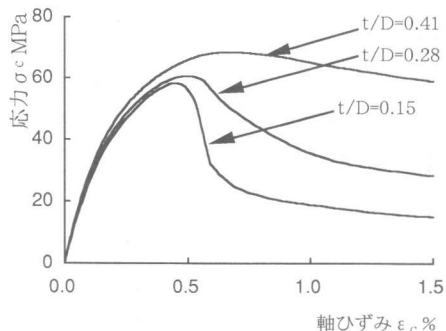
左写真 $t/D=0.15$; 薄肉 右写真 $t/D=0.41$; 厚肉

写真-2 破壊性状



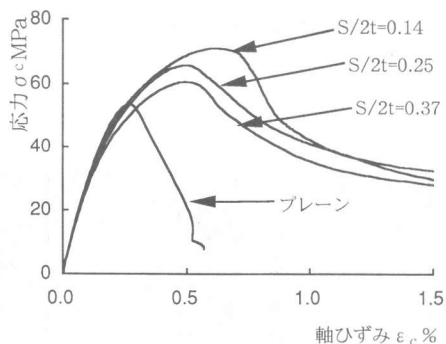
($t/D=0.15, S/2t=0.25$ のケース)

(a) $P_s \sigma_{sy}$ が異なる場合



($P_s \sigma_{sy}=3\text{MPa}, S/2t=0.25$ のケース)

(b) 肉厚が異なる場合



($P_s \sigma_{sy}=3\text{MPa}, t/D=0.28$ のケース)

(c) 補強筋ピッチが異なる場合

図-4 応力-ひずみ関係

それ故、中空部の存在が肉厚部の拘束状態におよぼす影響を定量化できれば、中実体から円筒体まで連続的に評価し得る推定式が導けると思われる。以下に各特性の定量的評価を試みる。

3.2 強度・変形特性

(1) 圧縮強度

円筒コンファインドコンクリートに対する推定式は、式(3)に示すように、中実円形体の推定式において拘束効果を表す第2項を修正することによって与えられると考える。すなわち、式(3)中の第2項が、3.1で述べた中空部の影響を示す修正係数 ζ_F を乗じた、さらに(S/D)を2.1の記述に従って($S/2t$)に変更した式で与えられると仮定する。

圧縮強度比

$$\frac{F_{cf}}{F_0} = 1.0 + 4.41 \cdot \zeta_F \left(\frac{P_s \sigma_{sy}}{F_0} \right) \left(1.0 - 1.24 \frac{S}{2t} \right) \quad (3)$$

圧縮強度時ひずみ比

$$\frac{\epsilon_{cf}}{\epsilon_0} = 1.0 + \zeta_\epsilon \left(\frac{10}{F_0} \right)^2 \cdot 9.8 P_s \sigma_{sy} \left(1.0 - 1.1 \frac{S}{2t} \right) \quad (4)$$

平均下降勾配比

$$\frac{E_{cf}}{E_0} = 1.0 + \zeta_\theta \alpha_\theta \left\{ \left(\frac{S}{2t} \right)^2 - 4 \right\} \quad (5)$$

$$\text{ここに、} \quad \alpha_\theta = 0.25 \left(1.0 - \frac{\gamma_\theta}{1.02 P_s \sigma_{sy} + \gamma_\theta} \right)$$

$$\gamma_\theta = 3.93 \times 10^{-3} F_0^2$$

F_{cf} : コンファインドコンクリート圧縮強度

F_0 : プレーンコンクリート圧縮強度

ϵ_{cf} : コンファインドコンクリート圧縮強度時のひずみ

ϵ_0 : プレーンコンクリート圧縮強度時のひずみ

E_{cf} : コンファインドコンクリートの下降勾配

E_0 : プレーンコンクリートの下降勾配

図-5(a)は、式(3)を変形して得られる式(6)に、各要因値および実験値を代入して得られる各試験体の ζ_F を縦軸に、 t/D を横軸にとって示したものである。同図によれば、パラツキは大きいものの、 ζ_F は t/D の増大によって大きくなる傾向がみられる。それ故、両者の関係を $t/D=0.5$ (中実体)における値、1.0を考慮して、直線式で一次近似すると同図中の実

線で示す式(9)を得た。

$$\zeta_F = \frac{(F_{cf} - F_o)}{4.41 \cdot P_s \sigma_{sy} \left(1 - 1.24 \frac{S}{2t}\right)} \quad (6)$$

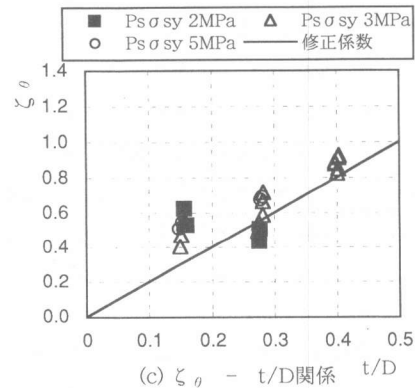
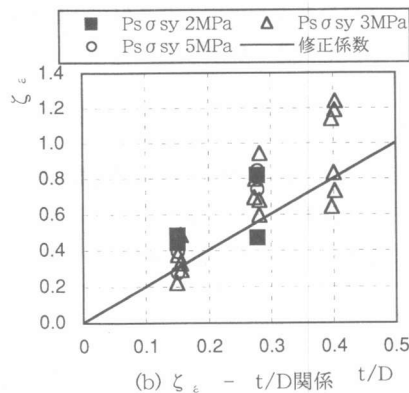
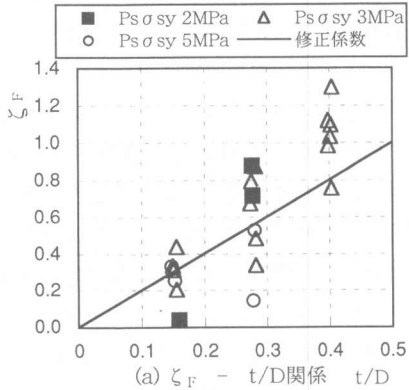


図-5 各修正係数と径厚比の関係

(2) 圧縮強度時ひずみ

圧縮強度時ひずみに対する推定式, 式(4)

を ζ_F のときと同様に变形し, 式(7)で表される圧縮強度時ひずみに対する修正係数 ζ_ε におよぼす t/D の影響を調べた。結果を図-5(b)に示す。 ζ_F と同様, ζ_ε においても t/D の増大による増加傾向がみられるので, 中実体を表す $t/D=0.5$ で1.0となる一次近似を行うと式(10)を得た。

$$\zeta_\varepsilon = \frac{\left(\frac{F_o}{10}\right)^2 \left(\frac{\varepsilon_{cf} - 1.0}{\varepsilon_o}\right)}{9.8 P_s \sigma_{sy} \left(1 - 1.1 \frac{S}{2t}\right)} \quad (7)$$

(3) 平均下降勾配比

図-5(c)は, ζ_F および ζ_ε と同様, 応力-ひずみ関係における応力下降域の勾配比に対する修正係数 ζ_θ (式(8))におよぼす t/D の影響を示したものである。前2者の場合と同様, t/D に対する増加傾向がみられるので, 中実体を表す $t/D=0.5$ で1.0となる直線式で近似し, 式(11)の $\zeta_\theta - t/D$ 関係を得た。

$$\zeta_\theta = \frac{\frac{E_{cf} - 1}{E_o}}{\alpha_\theta \left\{ \left(\frac{S}{2t}\right)^2 - 4 \right\}} \quad (8)$$

以上で求めた各修正係数, 式(9)~(11)を式(3)~(5)の各特性値式に適用すれば, 円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性推定式が得られる。

$$\text{圧縮強度比: } \zeta_F = 2.0 \frac{t}{D} \quad (9)$$

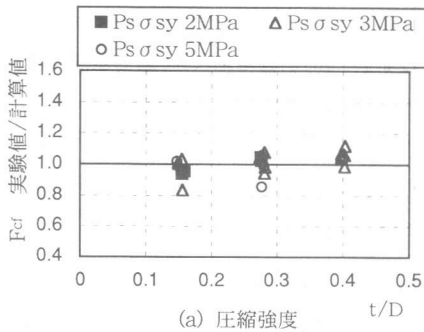
$$\text{圧縮強度時ひずみ比: } \zeta_\varepsilon = 2.0 \frac{t}{D} \quad (10)$$

$$\text{平均下降勾配比: } \zeta_\theta = 2.0 \frac{t}{D} \quad (11)$$

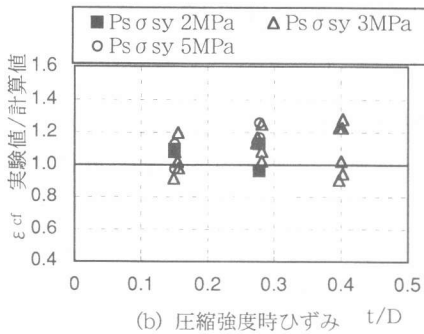
肉厚 $t: 0 < t \leq D/2$ (中実体)

4. 推定式の適合性

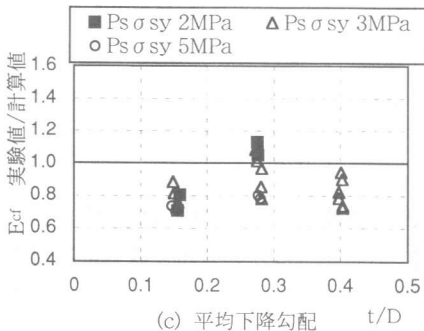
図-6は, 各特性値について実験値と推定値とを比較したものである。同図(a)によれば, 圧縮強度はほぼ $\pm 15\%$ で, 圧縮強度時ひずみは図(b)より $\pm 20\%$ で, さらに図(c)から応力



(a) 圧縮強度



(b) 圧縮強度時ひずみ



(c) 平均下降勾配

図一六 実験値/推定値と径厚比の関係

下降域勾配比は約±20%の範囲で推定されることが分かる。

5. まとめ

既製コンクリート杭でみられる寸法比、横補強筋量等を参考にした円筒コンファインドコンクリートの単調圧縮載荷試験を行い、同コンクリートの応力-ひずみ特性におよぼす横補強筋の量とピッチ、および円筒部の肉厚（径厚比）などの影響を調べた。さらに、円形中実体から円筒体までの強度・変形特性を連続して推定で

きる算定式の誘導を試みた。コンクリート強度一定の条件による限られた範囲の実験結果であるが以下のような知見を得た。

(1) 円筒コンファインドコンクリートでは、円筒部肉厚が厚い程、また中実体の場合と同様に横補強筋の量が大きい程、ピッチが細かい程、良好な強度・変形特性を示す（図一四参照）。

(2) 円筒部での平均拘束応力、（横補強筋のピッチ/肉厚）および（肉厚/試験体外径）などで横補強筋の拘束効果を評価することによって、円形中実体から円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性を連続して推定できる算定式を誘導した（式（3）～（5）参照）。

(3) 誘導算定式によれば、圧縮強度はほぼ±15%で、圧縮強度時ひずみは±20%で、さらに応力下降域勾配比は約±20%で推定できることを示した（図一六参照）。

【謝辞】

本研究に対し、塚田義明君（旭化成建材（株））および三苦毅光君（大阪大学卒論生）の多大なご助力を得た。記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 中塚 俊：コンクリートの応力度-ひずみ度特性とコンクリート曲げ部材の終局域特性に関する基礎的研究，大阪大学学位論文，1991.1
- 2) 中塚 俊，阪井由尚，中川裕史：コンファインドコンクリートの強度・変形特性推定式（コンファインドコンクリートの強度・変形特性に関する研究-その2-），日本建築学会構造系論文集，1998.3
- 3) 鈴木計夫，中塚 俊，吉田晴彦：円形横補強筋を用いたコンファインドコンクリートの強度および変形特性，材料，1985.1
- 4) 大岩 健治郎，津田 和義：既製コンクリート杭の M-φ 関係と PHC 杭のせん断耐力，橋梁と基礎 2月号，1998.2
- 5) 成田 信之ほか：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編，(社)日本道路協会，1996.12