

# 論文 円筒体コンファインドコンクリートの強度特性におよぼす 充填コンクリートの影響

小橋 弘樹\*<sup>1</sup>・中塚 佑\*<sup>2</sup>・大和 真一\*<sup>3</sup>・山本 裕之\*<sup>4</sup>

**要旨:** 円筒体中空部にコンクリートが充填された円筒体コンファインドコンクリートの強度特性におよぼす、充填コンクリート強度、円筒部の肉厚および横補強筋量の影響を調べた。その結果、コンクリートの充填に起因する拘束応力によって、同コンクリートの圧縮耐力は、円筒体コンファインドコンクリート耐力と充填コンクリート耐力との単純累加耐力以上になることを明らかにした。同時に耐力増分におよぼす上記各要因の影響を定量的に評価して、充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力算定式を既往式と関連づけて誘導した。

**キーワード:** コンファインドコンクリート、中空円筒体、充填コンクリート、荷重-ひずみ

## 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から、曲げ靱性設計に必要な同コンクリートの応力-ひずみ特性が実験・解析により広範囲に調べられ、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。<sup>1)~4)</sup>しかし、既製コンクリート杭に代表される中空部を有する円筒体形状については、十分に解明されていないのが現状である。また一方では、兵庫県南部地震以降、基礎構造においても従来の許容応力度法に変わる大地震を想定した耐震設計法の必要性が提案され、杭体の塑性変形性能を用いた基礎構造物の地震応答解析の研究が行われている。それ故、靱性に劣る既製コンクリート杭（PHC杭）の性能改善ならびにその性能を精度良く推定できる設計法の確立は、不可欠な課題となっている。

筆者らは、既報<sup>5) 6)</sup>において、円筒体コンファインドコンクリートの強度・変形特性におよぼすコンクリート肉厚、横補強筋ピッチおよび材料強

度の影響を明らかにし、円形中実から円筒体のコンファインドコンクリートの強度特性を連続して推定できる算定式を示した。

本研究は、充填された円筒体コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係をモデル化するための第1ステップとしてその最大耐力におよぼす充填コンクリートの影響を、充填コンクリートの強度、円筒部肉厚および横補強筋量を変量として実験的に調べ、同コンクリートの圧縮耐力推定式を筆者らによる既往式<sup>1)~6)</sup>と関連づけて誘導することを試みたものである。

## 2. 実験概要

実験で取り上げた要因は、表-1に示すように円筒体コンクリートの強度 ( $F_{o1}$ )、拘束応力指標 ( $P_s \sigma_{sy}$ )、円筒部肉厚 ( $t$ ) および充填コンクリートの強度 ( $F_{o2}$ ) である。試験体は外径×高さが  $\phi 200 \times 400$  mmで、かぶりコンクリートのない円筒体または充填された円筒体である。試験体の製作は、大径と小径の塩び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。横補強筋

\* 1 旭化成 (株) ジオ技術開発部 工修 (正会員)

\* 2 大阪大学大学院助教授 工学研究科建築工学専攻 工博 (正会員)

\* 3 旭化成 (株) ジオ技術開発部部長 工修

\* 4 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻

により補強された試験体数は、表-1に示す各種類につき原則2体とした。無補強の円筒試験体は、各コンクリート強度および径厚比に対してそれぞれ4体製作した。また、充填コンクリートの力学特性は、便宜上、サイズは異なるが円形中実体の標準試験体(φ100×200mm)によるものとし、各充填コンクリートに対しそれぞれ3体製作した。

使用したコンクリートの計画調合および特性を表-2、表-3に示す。横補強筋は、熱処理によって表-4に示す所定の降伏点強度となるようにしたスパイラル筋(巻外径:200mm)を用いた。尚、スパイラル筋の両端部には図-1に示すように抜けだしを防止するフック(長さ:肉厚(t)-10mm)を設けた。

荷重は5000kN圧縮試験機を用いて、図-2に示すような方法で行った。荷重速度は手動調節し、また球座は荷重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、既報と同様に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-1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。

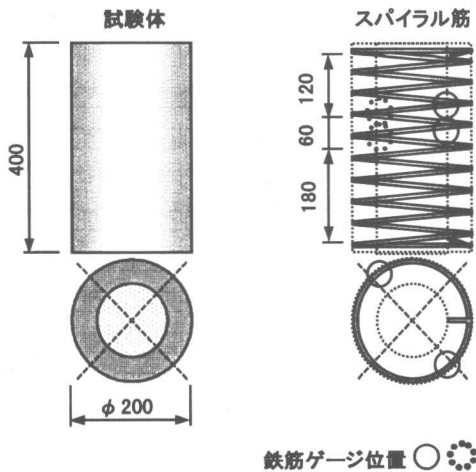


図-1 試験体図

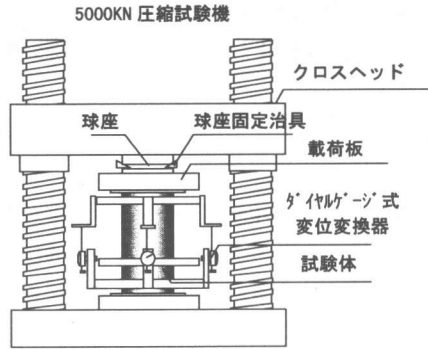


図-2 試験装置

表-1 試験体一覧

試験体名	円筒部				F <sub>o2</sub> MPa
	F <sub>o1</sub> MPa	r/R	P <sub>s</sub> σ <sub>sy</sub> MPa	S/2t	
F3Y5T2C2-F'2	30	0.70	1.5	18	20
F3Y5T3C2-F'2		0.45		33	
F3Y5T4C2-F'2		0.19		49	
F5Y5T2C2-F'2	50	0.70	1.5	18	20
F5Y5T3C2-F'2		0.45		33	
F5Y5T4C2-F'2		0.19		49	
F5Y5T2C2-F'1	50	0.70	1.5	10	20
F5Y5T2C2-F'4				40	
F5Y5T2C2-F'5				50	
F5Y5T2C5-F'2	50	0.70	1.5	18	20
F5Y5T2C8-F'2				4.4	
F5Y5T2C8-F'2				7.8	
F5Y5T2C2	50	0.70	1.5	18	20
F5Y5T3C2		0.45		33	
F5Y5T4C2		0.19		49	
F5Y5T2C5	50	0.70	1.5	18	20
F5Y5T2C8				4.4	
F5Y5T2C8				7.8	
F8Y5T2C2-F'2	80	0.70	1.5	18	20
F8Y5T3C2-F'2		0.45		33	
F8Y5T4C2-F'2		0.19		49	
F8Y5T2C5-F'2	80	0.70	1.5	18	20
F8Y5T2C8-F'2				4.4	
F8Y5T2C8-F'2				7.8	

F<sub>o1</sub>, F<sub>o2</sub>: コンクリート圧縮強度, P<sub>s</sub>σ<sub>sy</sub>: 拘束応力指標

R: 外半径, r: 内半径, S: 横補強筋ピッチ

t: コンクリート肉厚(円筒部肉厚)

試験体名表記例: F3Y5T2C2-F'2

F3: 円筒部 F<sub>o1</sub> (=30MPa), Y5: 横補強筋 σ<sub>sy</sub> (=500MPa)

T2: 円筒部径厚比 t/D (=0.15), C2: 拘束応力 P<sub>s</sub>σ<sub>sy</sub> (=1.5MPa)

F'2: 充填部 F<sub>o2</sub> (=20MPa)

表-2 コンクリートの調合 (単位: kg/m<sup>3</sup>)

試験体 ケース	W/C %	W	C	S	G	B	SP
F3	60	189	315	799	931		3.34
F5	42	175	417	743	941	-	2.71
F8	33	175	530	689	970		3.71
F'1	100	665	665	269	0	46	-
F'2	74	195	264	824	931		2.80
F'4	50	183	366	771	934	-	2.75
F'5	42	175	417	743	941		2.71

W: 水, C: 円筒部は普通セメント 充填部は早強セメント

S: 細骨材 G: 粗骨材 (最大粒径 20mm), B: ベントナイト,

SP: 高性能減水剤

表-3 コンクリートの特性

試験体ケース	F <sub>c</sub> MPa		ε <sub>c</sub> %	スランブ cm	
	設計	実測			
無補強円筒体	F3T2	30	39.8	0.22	18
	F3T3		42.7	0.23	
	F3T4		39.7	0.19	
	F5T2	50	44.8	0.20	20
	F5T3		50.4	0.22	
	F5T4		50.5	0.22	
F8T2	80	83.6	0.26	20	
F8T3		78.5	0.27		
F8T4		76.7	0.28		
標準試験体	F'1	10	13.1	0.21	-
	F'2	20	27.5	0.25	22
	F'4	40	67.8	0.27	18
	F'5	50	78.2	0.27	18

F<sub>c</sub>: 圧縮強度, ε<sub>c</sub>: 圧縮強度時のひずみ

表-4 横補強筋の特性

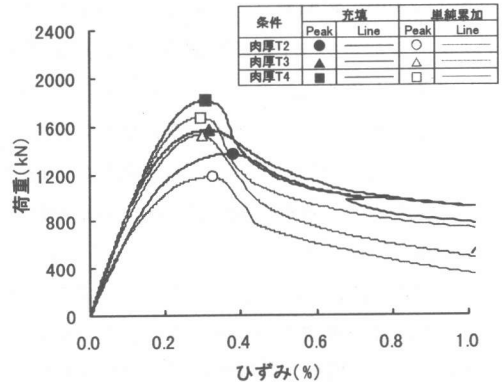
試験体 ケース	φ mm	σ <sub>sy</sub> MPa		E <sub>s</sub> ×10 <sup>5</sup> N/mm <sup>2</sup>
		設計	実測	
Y5	2.6	500	583	1.94
	3.5		588	2.01
	4.4		573	1.98
	4.5		621	2.19
	6.0		628	2.04

φ: 横補強筋径, σ<sub>sy</sub>: 降伏点強度, E<sub>s</sub>: 弾性係数

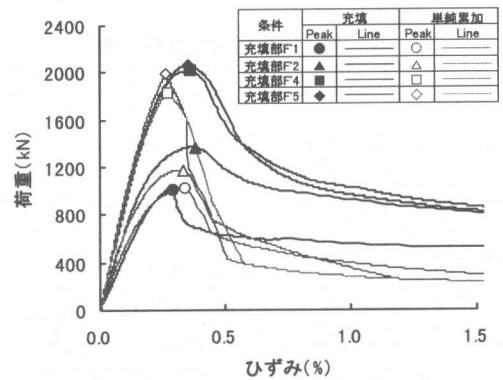
### 3. 実験結果および考察

図-3は、円筒部のコンクリート強度が50MPaの試験体（試験体ケース F5）について、以下に示す2種類の荷重-ひずみ関係を比較したものである。①実験で得られた充填された円筒体コンファインドコンクリートのP-ε関係（以下①という。）、②円筒体コンファインドコンクリートのP-ε関係に充填コンクリートの標準試験体による単軸圧縮試験結果に基づいて計算した充填部コンクリートのP-ε関係を単純に累加したP-ε関係（以下②という。）である。

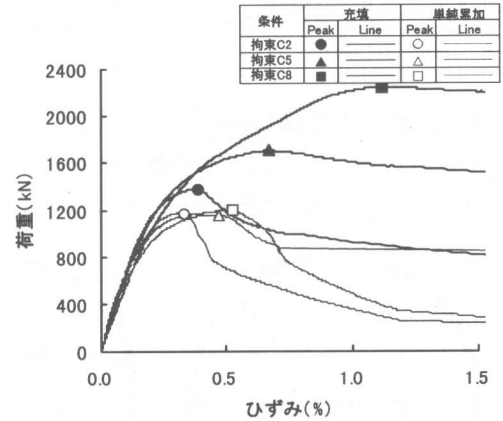
同図 (a) は、肉厚が異なる試験体を比較したものである。①と②の圧縮耐力の差は、肉厚が薄いときの方が、大きい傾向にある。同図 (b) は、充填部コンクリート強度が異なる試験体を比較したものである。低強度 (10MPa) のコンクリートを充填した試験体では、①と②の耐力差がほとんどないが、充填コンクリート強度が大きいと耐力差は大きくなっている。但し、充填コンクリート強度が、円筒部の強度を実測値 (67.8, 78.2MPa) で上回っている試験体 F'4 と F'5 との耐力差は、僅かであることなどがわかる。同図 (c) は、拘束



(a) 肉厚が異なる場合



(b) 充填コンクリート強度が異なる試験体



(c) 拘束応力が異なる試験体

図-3 荷重-ひずみ関係

応力が異なる試験体を比較したものである。拘束応力が異なる試験体を比較したものである。拘束応力が増すほど②から①への耐力増分は大きく、また、応力下降勾配も緩やかとなっている。

表-5は、充填された円筒体コンファインドコ

ンクリートの圧縮耐力 ( $P_{cp}$ ) および円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力 ( $P_{cfl}$ ) と充填コンクリートの圧縮耐力 ( $P_{o2}$ ) の和から円筒体コンファインドコンクリートの中空部にコンクリートを充填することによって生じる圧縮耐力の増分 ( $\Delta P_{cp}$ ) を求め、各種試験体についての平均値をまとめたものである。

同表によれば、 $\Delta P_{cp}$ は、1) 肉厚が薄くなるほど大きく、2) 充填コンクリートの強度が高いほど大きく、3) 横補強筋の拘束応力指標 ( $P_s \sigma_{sy}$ ) が増すほど大きくなる傾向が認められた。

表-5 圧縮耐力増分の一覧

試験体名	①	②	③	①-(②+③)
	$P_{cf}$ kN	$P_{cfl}'$ kN	$P_{o2}$ kN	$\Delta P_{cf}$ kN
F5Y5T2C2-F'2	1,330	811	423	96
F5Y5T3C2-F'2	1,625	1,383	175	67
F5Y5T4C2-F'2	1,700	1,643	31	26
F5Y5T2C2-F'1	1,021	811	202	8
F5Y5T2C2-F'4	1,986		1,064	111
F5Y5T2C2-F'5	2,109		1,170	128
F5Y5T2C5-F'2	1,702	933	423	346
F5Y5T2C8-F'2	2,174	1,106		645

$P_{cf}$ : 充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力

$P_{cfl}'$ : 円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力

$P_{o2}$ : 充填コンクリートの圧縮耐力 ( $=F_o \times A_{o2}$ )

$F_o$ : 表-3 標準試験体の強度より、 $A_{o2}$ : 充填部の断面積

$\Delta P_{cf}$ : 圧縮耐力の増分

#### 4. 圧縮耐力推定式の誘導

筆者らは、円形中実および円筒体コンファインドコンクリートの拘束機構を図-4 (a), (b) に

(a) 円形中実の場合

$$\sigma_{ra} = \frac{2A_h}{DS} \sigma_{sy} = P_s \sigma_{sy} \quad (1)$$

(b) 円筒体の場合

$$\sigma_{rb} = \frac{2A_h}{2tS} \sigma_{sy} = P_s' \sigma_{sy} \quad (2)$$

ここで、

$D (=2R)$ : 外径、 $t (=R-r)$ : 肉厚

$A_h$ : 横補強筋断面積、 $S$ : 横補強筋ピッチ

$P_s, P_s'$ : 横補強筋比、 $\sigma_{sy}$ : 横補強筋降伏点強度

$\sigma_{ra}$ : 円形中実の平均拘束応力

$\sigma_{rb}$ : 円筒体の平均拘束応力

示すモデルで、それぞれの平均拘束応力 ( $\sigma_{ra}$ ,  $\sigma_{rb}$ ) を式 (1), 式 (2) として考え、強度・変形特性の推定式を誘導してきた。

本研究においても、既往式<sup>1)~6)</sup>と連続性のある推定式を導くため、同図 (c) に示すモデルを仮定した。すなわち、充填された円筒体コンファインドコンクリートでは、充填部は一様な拘束応力  $\sigma_{r2}$  を、円筒部は一様な拘束応力  $\sigma_{r1}$  と  $\sigma_{r2}$  を受けるものとし、3章で調べた同コンクリートの圧縮耐力の増分 ( $\Delta P_{cp}$ ) は、充填部および円筒部に作用する  $\sigma_{r2}$  による耐力増加に起因すると考えた。

$\sigma_{r2}$  はコンクリートの力学的性質である圧縮応力下における横膨張特性および充填コンクリートの横膨張に対する拘束剛性、すなわち、円筒部肉厚  $t$  ならびに拘束応力指標  $P_s \sigma_{sy}$  に関係すると推測されるので、 $\sigma_{r2}$  による円筒部の強度増分比は、

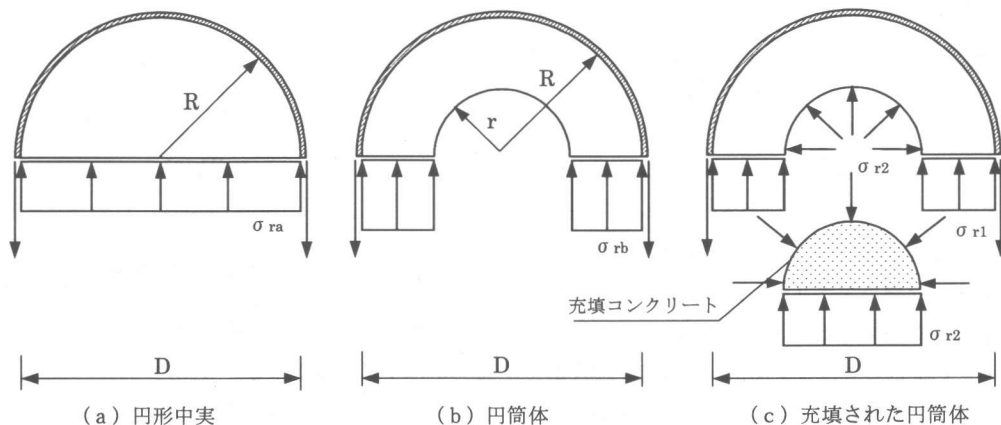


図-4 拘束応力機構のモデル

$\xi_t \xi_F P_s \sigma_{sy} (1.0 - 1.24 S/2t)$  で表されると仮定すると、円筒部のコンクリートの圧縮強度比は式(3)で与えられる。尚、係数  $\xi_t, \xi_F$  は肉厚および充填コンクリート強度の影響を表す。一方、充填部のコンクリートの圧縮強度比は式(4)で与えられるので、充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力は式(5)で与えられる。尚、充填部に対する  $S/D$  の効果は零としている。

従って、充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力のうち、 $\sigma_{r2}$  に起因する耐力の増分 ( $\Delta P_{cf}$ ) は、式(3)、式(4)から式(10)で与えられる。

次に、係数  $\xi_t, \xi_F$  について検討する。

図-5は、肉厚だけが異なる試験体について、 $\Delta P_{cf}$  を縦軸に、 $r/R$  を横軸にとり整理したものである。同図より、 $\Delta P_{cf}$  と  $r/R$  の間には線形関係が認められ、肉厚の影響を表す係数  $\xi_t$  は式(11)で与えられると考えた。

次に、図-6は式(10)を変形し、 $\xi_t$  を  $r/R$  に置き換えて得られた式(12)に、すべての試験

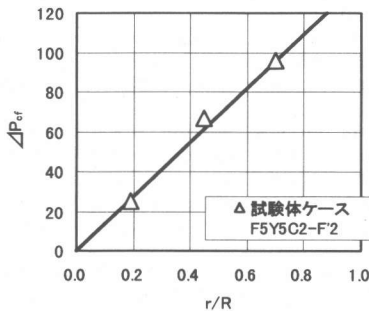


図-5  $\Delta P_{cf} - r/R$  関係

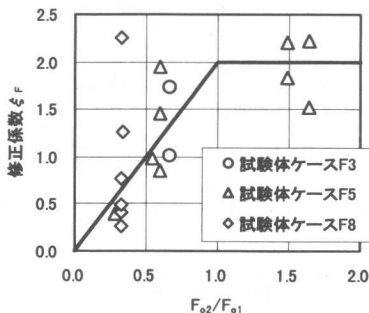


図-6  $\xi_F - F_{o2}/F_{o1}$  関係

体 (F3, F5, F8 ケース) の要因値および実験値を代入して求めた係数  $\xi_F$  を、充填部と円筒部の強度比 ( $F_{o2}/F_{o1}$ ) を横軸にとって示したものである。同図によれば、 $\xi_F$  は  $F_{o2}/F_{o1}$  が 1 以下の範囲では  $F_{o2}/F_{o1}$  の増加に対し増加する傾向が見られるが、1 以上ではほぼ一定の値を示す傾向が見られた。

それ故、 $\xi_F - F_{o2}/F_{o1}$  関係を式(13)、式(14)で与えられることとした。

以上をまとめると、充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力式として式(5)は、式(3)、式(4)および係数、式(11)、式(13)式(14)から得られる。

(a) 円筒部の圧縮強度比

$$\frac{F_{cf1}}{F_{o1}} = 1.0 + 4.41 \kappa_{F1} (1 + \xi_t \xi_F) \left( \frac{P_s \sigma_{sy}}{F_{o1}} \right) \left( 1.0 - 1.24 \frac{S}{2t} \right)$$

$$\text{但し } (1 - 1.24 \frac{S}{2t} \geq 0) \quad (3)$$

(b) 充填部の圧縮強度比

$$\frac{F_{cf2}}{F_{o2}} = 1.0 + 4.41 \kappa_{F2} \xi_t \xi_F \left( \frac{P_s \sigma_{sy}}{F_{o2}} \right) \quad (4)$$

(c) 充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力

$$P_{cf} = F_{cf1} \cdot A_{c1} + F_{cf2} \cdot A_{c2} \quad (5)$$

$$\kappa_F = (1 - e^{-A_{F1}(100P_s)}) \quad (6)$$

$$A_{F1} = \frac{1}{(\sigma_{sy} / 200 - A_{F2})^2} + A_{F2} \quad (7)$$

$$A_{F2} = 2.0 \quad (F_o \leq 60) \quad (8)$$

$$A_{F2} = -F_o / 30 + 4 \quad (60 < F_o < 120) \quad (9)$$

$$\Delta P_{cf} = P_{cf} - (P_{cf1} + P_{o2})$$

$$= 4.41 P_s \sigma_{sy} \cdot \xi_t \cdot \xi_F \left\{ \kappa_{F1} (1 - 1.24 \frac{S}{2t}) \cdot A_{c1} + \kappa_{F2} \cdot A_{c2} \right\} \quad (10)$$

$$\xi_t = \frac{r}{R} \quad (11)$$

$$\xi_F = \frac{\Delta P_{cf}}{4.41 P_s \sigma_{sy} \cdot \frac{r}{R} \left\{ \kappa_{F1} (1 - 1.24 \frac{S}{2t}) \cdot A_{c1} + \kappa_{F2} \cdot A_{c2} \right\}} \quad (12)$$

$$\xi_F = 2.0 \frac{F_{o2}}{F_{o1}} \quad \left( \frac{F_{o2}}{F_{o1}} \leq 1 \right) \quad (13)$$

$$\xi_F = 2.0 \quad (1 < \frac{F_{o2}}{F_{o1}}) \quad (14)$$

ここで、

$F_{cf1}$  : 充填された円筒体コンファインドコンクリートの円筒部の圧縮強度

$F_{cf2}$  : 充填された円筒体コンファインドコンクリートの充填部の圧縮強度

$F_{o1}$  : 無補強円筒部体コンクリートの圧縮強度

$F_{o2}$  : 充填コンクリートの圧縮強度

$\sigma_{r1}, \sigma_{r2}$  : 拘束応力

$P_s \sigma_{sy}$  : 拘束応力指標,  $P_s$  : 横補強筋比

$D$  : 外径,  $R$  : 外半径,  $r$  : 内半径,  $t$  : 肉厚

$A_h$  : 横補強筋断面積,  $S$  : 横補強筋ピッチ

$\kappa_{F1}, \kappa_{F2}$  : 修正係数 式 (6) 参照

$\Delta P_{cf}$  : 圧縮耐力の増分

$P_{cf}$  : 充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力

$P_{cf1}'$  : 円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力

$P_{o2}$  : 充填コンクリートの圧縮耐力

$A_{c1}$  : 円筒部の断面積,  $A_{c2}$  : 充填部の断面積

$\xi_F$  : 充填コンクリートの影響を表す係数

## 5. 推定式の適合性

図-7は、充填された円筒体コンファインドコンクリートの耐力の実験値と計算値を比較したものである。同図より、計算値は±10%程度の精度で実験値を推定していることがわかる。

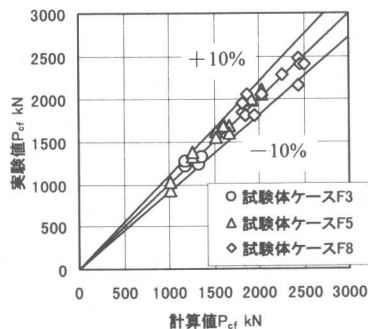


図-7 実験値と計算値の適合性

## 6. まとめ

円筒体コンファインドコンクリートの中空部に低強度から高強度のコンクリートを充填した試験

体の圧縮試験を行い、同コンクリートの荷重-ひずみ関係および充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力におよぼす充填コンクリートの影響を調べ、同耐力推定式の誘導を試みた。本研究で得られた主な知見は、以下の通りである。

1) 充填された円筒体コンファインドコンクリートの圧縮耐力と円筒体コンファインドコンクリート耐力および充填コンクリート耐力の単純累加から得られる推定耐力との差は、円筒体の肉厚が薄いほど、充填コンクリート強度が高いほど、横補強筋量が多いほど大きい。

2) 1) で得られた耐力増分におよぼす円筒部の肉厚および充填コンクリート強度の影響を定量化することによって、10%程度の精度で実験値を推定できる圧縮耐力算定式を誘導した。

## 謝 辞

本研究に対して、田嶋光子さん(大阪大学卒論生)、高周波熱錬株式会社、ならびに千島エスオーシー株式会社から多大なご助力を得た。記して、謝意を表します。

## [参考文献]

- 1) 中塚 信: 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 信, 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) 中塚 信, 阪井由尚, 中川裕史, 鈴木計夫: 高強度材料による円形コンファインドコンクリートの強度・変形特性, 日本建築学会構造系論文集, 1996.5
- 4) 鈴木計夫, 中塚 信, 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
- 5) 小橋 弘樹, 中塚 信, 大和 真一: 円筒コンファインドコンクリートの強度・変形特性, 日本コンクリート工学年次論文集, 1999.7
- 6) 小橋 弘樹, 中塚 信, 大和 真一, 山本裕之: 円筒体コンファインドコンクリートの強度・変形特性におよぼす材料強度の影響, 日本コンクリート工学年次論文集, 2000.7

## [追記]

既報<sup>6)</sup>では、円形中実から円筒体まで連続して算定できる円形コンファインドコンクリートの圧縮強度推定式を、式(参1)として示したが、修正係数 $\zeta_F$ と横補強筋比 $P_s'$ は、式(参2)の通り展開できることから、同コンクリートの圧縮強度推定式は、式(参3)で表現できる。

$$\frac{F_{cf}}{F_o} = 1.0 + 4.41\kappa_F \zeta_F \left( \frac{P_s' \sigma_{sy}}{F_o} \right) \left( 1.0 - 1.24 \frac{S}{2t} \right) \quad (参1)$$

$$\zeta_F \cdot P_s' = 2 \frac{t}{D} \cdot \frac{2A_h}{2tS} = \frac{2A_h}{DS} = P_s \quad (参2)$$

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