

論文 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

小橋 弘樹*¹・中塚 侖*²・大和 真一*³・山本 裕之*⁴

要旨:既製コンクリート杭に用いられる圧縮強度 80MPa 級の高强度コンクリートを中心に、30~80MPa の強度をもつコンクリートと降伏点強度が 400~1300MPa の横補強筋で構成される円筒体コンファインドコンクリートについて、同コンクリートの拘束効果におよぼす諸要因の影響を調べた。その結果、横補強筋の拘束効果は、材料強度やコンクリート肉厚の影響を受けること、ならびに、横補強筋の軸力が、円形中実体の場合と同様の傾向を示すことを明らかにした。更に、高强度の範囲にいたる円形中実体から円筒体のコンファインドコンクリートの圧縮強度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、中空円筒体、高强度材料、応力-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が実験的・解析的に明らかにされ、同設計法の基礎となる形状(中実円形、角形)・横補強筋量・材料強度(コンクリート、鉄筋)に関わらず同コンクリートの強度・変形特性を推定できる算定式等が提案されている^{1)~4)}。しかし、構造部材の形状は様々であり、既製コンクリート杭でみられる中空円筒体については、十分に解明されていないのが現状である。筆者らは、既報⁵⁾で円筒体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により中実体の場合と同様の影響を受けることや円筒部のコンクリート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を明らかにし、更に、普通強度の材料を用いた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・変形特性を連続して推定できる算定式を示している。

本研究は、30~80MPa の強度のコンクリート

と降伏点強度が 400~1300MPa の横補強筋で構成される円筒体コンファインドコンクリートの単調圧縮試験を行い、同コンクリートの応力-ひずみ関係、横補強筋の拘束効果におよぼす材料強度の影響を調べ、更に、圧縮強度の推定式の誘導を試みた。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験は、円筒体コンファインドコンクリートにおける材料強度の影響を明らかにすることが目的であるため、実験変量として、同コンクリートの基本影響要因であるプレーンコンクリート強度 (F_c)、横補強筋降伏点強度 (σ_{sy}) および横補強筋の拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy}$) を取り上げ、横補強筋の拘束応力の分布状態を示す拘束分布指標 ($S/2t$) を一定とした。なお、本研究の目標は、円形中実から円筒体までの強度・変形特性を連続して評価することであるから各要因は、既報⁵⁾に示した円筒体の応力釣り合い仮定から決定される式(1)、式(2)より求めた。

*1 旭化成工業(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 旭化成工業(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

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

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

ここに、

σ_r : 平均拘束応力, P_s : 横補強筋比
 σ_{sy} : 横補強筋降伏点強度, A_s : 横補強筋断面積
 S : 横補強筋のピッチ, t : 円筒体の肉厚

2. 2 試験体概要

計画した試験体の一覧を表-1に示す。試験体は外径×高さがφ200×400mmで、かぶりコンクリートのない円筒体である。

試験体の製作は、遠心成型を行わずに、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。試験体数は、表-1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。

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。なお、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。

2. 3 荷重および測定方法

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⁵⁾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箇所を検長2mmの箔ゲージを貼付した。

3. 実験結果および考察

3. 1 応力-ひずみ関係および破壊状況

図-3は、本実験により得られた圧縮軸応力(σ_c)、軸ひずみ(ϵ_c)、横補強筋ひずみ(ϵ_s)

表-1 計画試験体一覧

試験体名	F ₀ MPa	P _s σ _{sy} MPa		t/D		S/2t	
		σ _{sy} MPa	t mm				
F3Y4T3C3	30	3.5	400	0.28	55	0.3	
F3Y8T3C3			800				
F3Y13T3C3			1300				
F5Y4T3C3	50	3.5	400	0.28	55		
F5Y8T3C3			800				
F5Y13T3C3			1300				
F8Y4T3C3	80	3.5	400	0.15	30		
F8Y8T3C3			800	0.41	81		
F8Y13T3C3			1300	0.15	30		
F8Y4T2C3			800	0.41	81		
F8Y4T4C3				2.0	0.28		55
F8Y8T2C3							
F8Y8T4C3							
F8Y8T3C2			5.5	800	0.28		55
F8Y8T3C5							

D: 試験体外径, H: 試験体高さ (D×H: φ200×400)

F₀: コンクリート圧縮強度, P_sσ_{sy}: 拘束応力指標

σ_{sy}: 横補強筋降伏点強度, t: コンクリート肉厚

S: 横補強筋のピッチ

試験体名表記: F3Y4T3C3

F3: F₀=30MPa Y4: σ_{sy}=400MPa T3: t/D=0.28

C3: P_sσ_{sy}=3.5MPa

表-2 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	SF	SP
F3	60	189	315	799	931	0	3.34
F5	42	175	417	743	941		2.71
F8	33	175	530	689	970		3.71

W: 水, C: 普通ポルトランドセメント, S: 細骨材

G: 粗骨材 (最大粒径20mm), SF: シリカヒューム, 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 ₀ MPa		ε ₀ %	スランプ cm
	設計	実測		
F3T3	30	40.3	0.26	18.5
F5T3	50	52.6	0.24	20.0
F8T2	80	70.0	0.24	22.0
F8T3		76.2	0.29	
F8T4		70.4	0.28	

F₀: 無筋試験体の圧縮強度, ε₀: 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 _{sy} MPa		E _s ×10 ⁵ N/mm ²
		設計	実測	
Y4	2.5	400	407.4	1.86
	4.3		420.6	1.85
	5.5		424.7	1.80
Y8	2.0	800	814.9	1.87
	2.3		803.9	1.85
	3.0		809.8	1.82
	3.8		779.7	1.80
	4.5		841.2	1.90
Y13	2.4	1300	1261.5	1.86

φ: 横補強筋径, σ_{sy}: 降伏点強度 E_s: 弾性係数

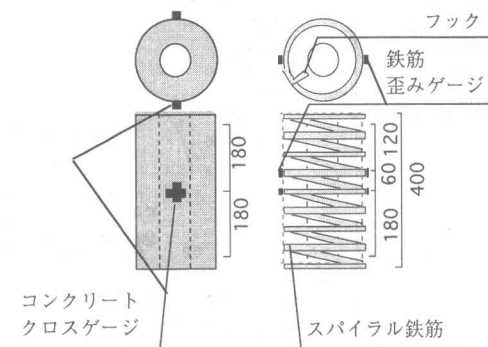


図-1 試験図

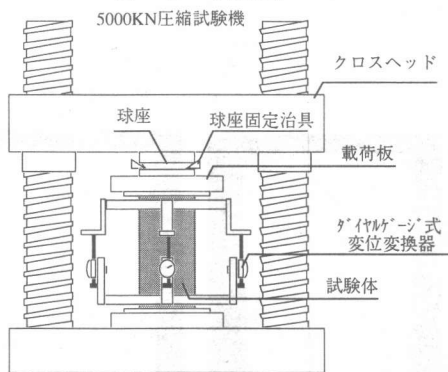
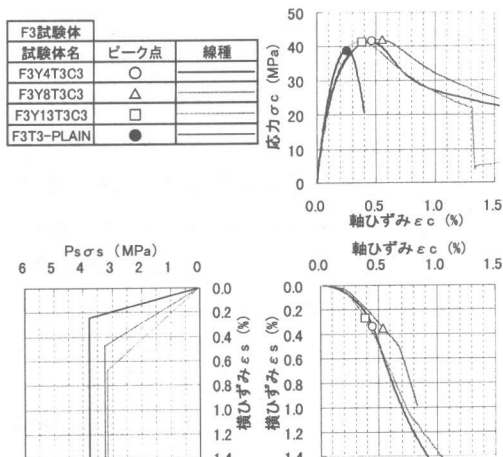


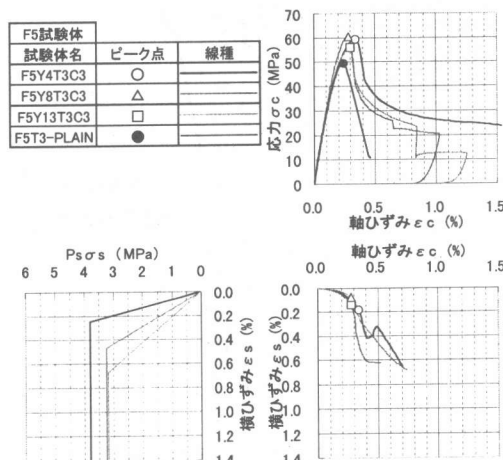
図-2 試験装置

を $\sigma_c - \epsilon_c$ 関係 (右上), $\epsilon_s - \epsilon_c$ 関係 (右下), 更に, 拘束応力指標値 ($P_s \sigma_{sy}$) を降伏値とした $\epsilon_s - P_s \sigma_{sy}$ 関係 (左下) に分けて示したものである。

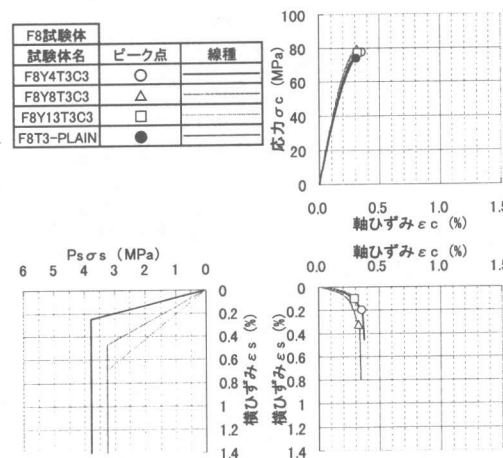
同図 (a) ~ (c) は, 各圧縮強度 (F_c) において拘束応力指標 ($P_s \sigma_{sy}$) および肉厚 (t) が同じで, 横補強筋降伏点強度 (σ_{sy}) が異なる場合の結果を比較したものである。同図 (a) に示す 30MPa 級のコンクリートの場合, 横補強筋は, 降伏点 400MPa 級の試験体 (F3Y4T3C3) のみが, 圧縮強度 (F_{cf}) 時まで降伏点に達し, 他の試験体は未降伏である。同図 (b) は, コンクリートが 50MPa 級の結果である。各試験体ともに, ϵ_s は F_{cf} 点までに降伏点に達していない。また, $\epsilon_s - \epsilon_c$ 関係に見られるように, 横補強筋比 (P_s) の違い, 言い換えれば, 横補強筋径の大小は, F_{cf} 点で未降伏の場合, 圧縮強度時の軸ひずみ (ϵ_{cf}) にあまり影響していない。この理由の一つとして, 肉厚の小さいことが後述



(a) 降伏点強度の影響 (F3 試験体)



(b) 降伏点強度の影響 (F5 試験体)

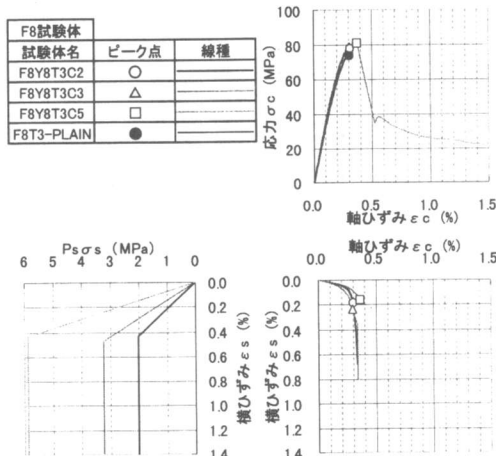


(c) 降伏点強度の影響 (F8 試験体)

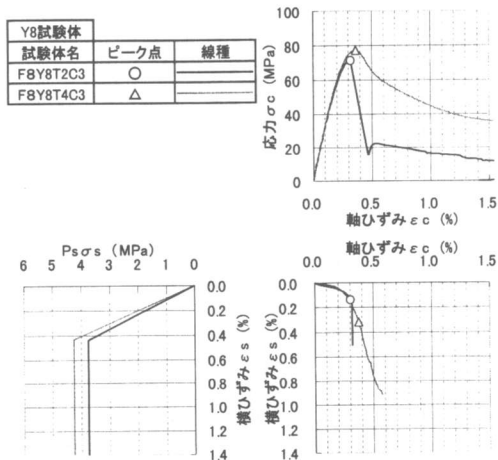
図-3 圧縮軸力-軸ひずみ-横補強筋ひずみ関係

の同図 (g) および文献 (3) から推測される。80MPa 級の高強度コンクリートは、同図 (c) に示すように、50MPa 級と同様に F_{cf} 点で横補強筋は降伏しておらず、更に、高強度の横補強筋 (1300MPa) と組み合わせた試験体 (F8Y13T3C3) においては、終局時でも降伏点に達していない。

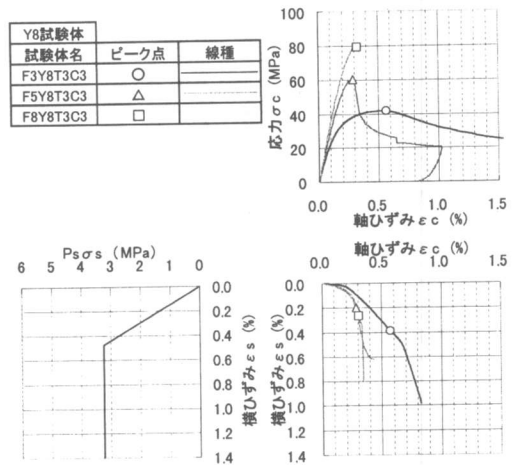
同図 (e) は、コンクリート強度の影響を調べるため、他の要因が同じ試験体を比較した結果である。円形中実体で得られた結果³⁾と同様に、横補強筋が同じ場合でも、コンクリート強度が高いと F_{cf} 点での ϵ_s は小さく横補強筋の降伏が



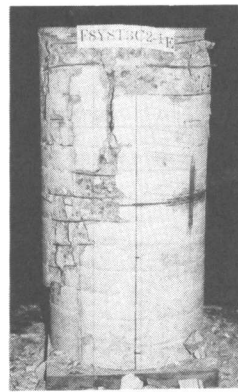
(f) 拘束応力指標の影響



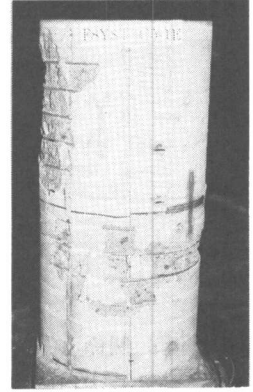
(g) コンクリート肉厚の影響



(e) コンクリート強度の影響

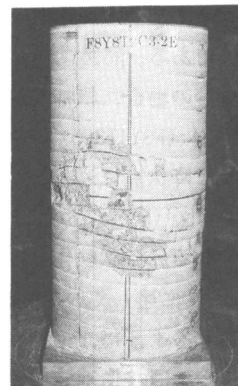


試験体 F8Y8T3C2

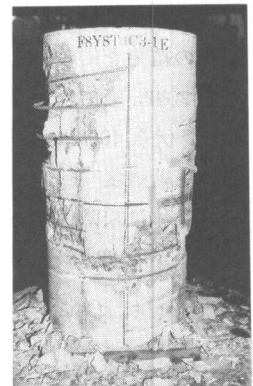


試験体 F8Y8T3C5

(a) 拘束応力指標の影響



試験体 F8Y8T2C3



試験体 F8Y8T4C3

(b) コンクリート肉厚の影響

図-3 圧縮軸応力-軸ひずみ-横補強筋ひずみ関係

写真-1 破壊性状

起こりにくいことがわかる。

同図 (f) は、弾性的な応力—ひずみ関係を示す 80MPa 級の高強度コンクリートにおける拘束応力指標の影響を調べた結果である。 $P_s \sigma_{sy}$ の増大は僅かであるが、円形中実体の場合と同様にコンクリートの横変形をより有効に拘束し、 ϵ_c に対する ϵ_s の増加を抑制している。写真—1 (a) は、 $P_s \sigma_{sy}$ の増大により破壊形態が改善されている状況を示したものである。

同図 (g) は 80MPa 級の高強度コンクリートにおけるコンクリート肉厚の影響を調べた結果である。肉厚 (t) が大きい場合の方が、 F_{cf} 点における横補強筋ひずみは大きく、拘束効果が肉厚の影響を受けることがわかる。また、同写真 (b) に示すように、普通コンクリートの円筒体と同様に、肉厚が薄くなると破壊領域が狭くなる傾向が見られた。

3. 2 横補強筋の作用軸方向力

本項では、コンファインドコンクリートの拘束応力と直接関係する横補強筋の軸方向力について考察する。

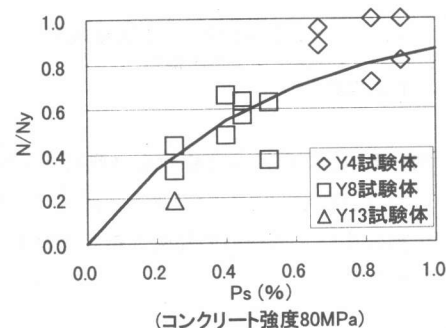
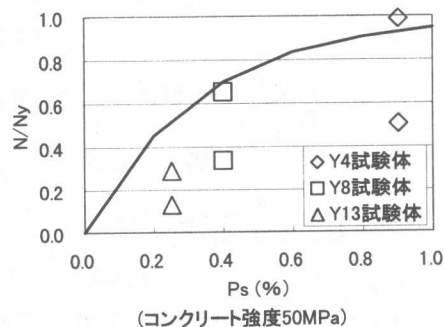
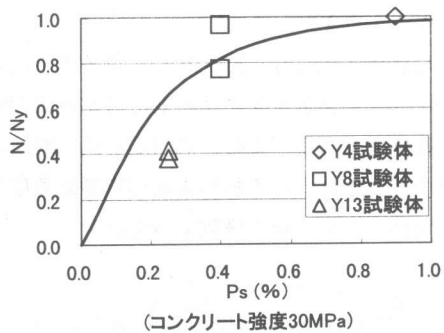
図—4 は、 F_{cf} 点での横補強筋の軸力 (N) と降伏軸力 (N_y) の比を縦軸に、横補強筋比 (P_s) を横軸にとり実験結果を例示したものである。なお、降伏軸力は表—4 から、横補強筋の軸力は図—1 に示した 4 箇所横補強筋ひずみの平均値より求めた。また、同図中の実線は既往の研究³⁾から推定された $N/N_y - P_s$ 関係を示す。

同図によれば F_{cf} 点での $N/N_y - P_s$ 関係は、 P_s が大なるほど N/N_y 値は増加し、その傾向は、コンクリート強度が小なるほど P_s が小さい領域から N/N_y は大であることがわかる。また、 P_s が大なるほど N/N_y 値は大きくなり、横補強筋が良好に機能していることを示している。

次に、既往の研究³⁾による推定式、式 (3) より求めた推定曲線は本実験結果をほぼ近似していることがわかる。

$$N/N_y = 1 - e^{-A(100P_s)} \quad (3)$$

$$A = 210/F_0 - 1 \quad (4)$$



図—4 圧縮強度軸力比—横補強筋比の関係

4. 圧縮強度の推定

本項では、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・変形特性の一要因である圧縮強度を連続して推定できる算定式の誘導を試みた。

3節によれば、高強度材料を組み合わせた円筒体コンファインドコンクリートの横補強筋の拘束機構およびその効果は、円形中実体と類似の傾向を示すことがわかった。従って、既報で示した円筒体の強度・変形特性推定式に材料強度の影響を加味することで、円形中実から円筒体コンファインドコンクリートの圧縮強度は推

定できると考えた。

すなわち、式(5)は、新たに提案する円筒体コンファインドコンクリートに対する圧縮強度比推定式である。また、式(6)は、既往の研究で提案されている材料強度の影響を考慮した円筒体に対する修正係数である。

$$\frac{F_{cf}}{F_o} = 1.0 + 4.41\zeta_F \left(\frac{P_s \sigma_{sy}}{F_o} \right) \left(1.0 - 1.24 \frac{S}{2t} \right) \quad (5)$$

$$\zeta_F = 2.0 \frac{t}{D} (1 - e^{-A_{F1}(100R_t)}) \quad (6)$$

(0 < t ≤ D/2)

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

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

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

ここに、

F_{cf} : コンファインドコンクリート圧縮強度

F_o : プレーンコンクリート圧縮強度

ζ_F : 修正係数

図-5は、縦軸に本実験値を横軸に式(5)による計算値に示したものである。同図によれば、圧縮強度は、±15%の範囲で推定されることがわかる。

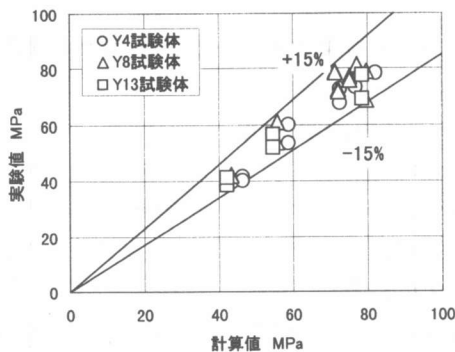


図-5 実験値と計算値の適合性

5. まとめ

既製コンクリート杭に用いられる80MPa級の高強度コンクリートを中心に、普通強度から高強度の材料で構成される円筒体コンファインド

コンクリートの圧縮試験を行い、横補強筋の拘束効果におよぼす材料強度の影響を調べた。更に、強度・変形特性の一要因である圧縮強度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) 円筒体コンファインドコンクリートにおける横補強筋の拘束効果は、材料強度およびコンクリート肉厚の影響を受ける。すなわち、材料強度が高いほど、肉厚が薄い場合ほど、圧縮強度(F_{cf})点の横補強筋ひずみは小さい傾向がみられた。(図-3参照)

(2) 圧縮強度(F_{cf})点における横補強筋軸力比(N/N_y)は、円形中実体コンファインドコンクリートの場合と同様、横補強筋比(P_s)が大なるほど増加する。また、コンクリート強度が小なるほど P_s が小さい領域から大きい N/N_y 値を示した。(図-4参照)

(3) 前述の(2)で示した結果から、材料強度の影響を加味した円筒体コンファインドコンクリートの圧縮強度比推定式を誘導し、同式が同コンクリートの圧縮強度を±15%の範囲で推定することを示した。(図-5参照)

謝辞

本研究に対し、高周波熱錬株式会社、千島エスオーシー株式会社ならびに大阪大学建築工学科の学生の皆様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一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