

論文 角形コンファインドコンクリートの応力-ひずみ特性に及ぼす寸法・辺長比の影響

小坪 幸恵^{*1}・中塚 信^{*2}

要旨：高さと短辺長さの比および断面の辺長比（長辺/短辺）がそれぞれ異なる，角形プレーンコンクリートならびにコンファインドコンクリートについて単軸圧縮試験を行い，それら要因が圧縮強度，同強度時ひずみおよび応力下降勾配に及ぼす影響を実験的に調べた。また，その実験結果に基づいて，高さ・短辺長さ比，辺長比が異なるコンクリートの圧縮強度，同強度時ひずみおよび応力下降勾配を求める推定式を誘導し，その適合性を検討した。

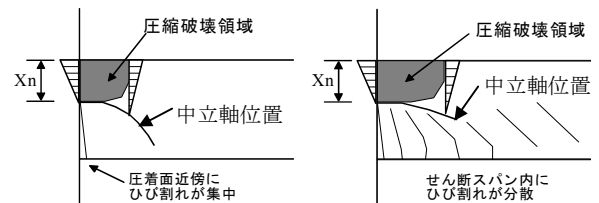
キーワード：曲げ圧縮部，高さ・短辺長さ比，断面の辺長比，圧縮強度，応力-ひずみ特性

1. はじめに

コンクリート系曲げ部材において，その圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性は，部材の荷重-変形関係と損傷度とを関連づけて評価する性能評価型設計法に不可欠な知見である。一方，応力-ひずみ特性は，横補強筋の拘束効果，曲げ圧縮ひずみ勾配，せん断応力，載荷速度，ひずみ測定検長などの影響を受ける。さらに最近の研究によれば，曲げ圧縮破壊領域の形状・寸法の影響も示唆されている^{1),2)}。すなわち，たとえば付着の良い異形鉄筋を用いたプレストレスト鉄筋コンクリート梁では曲げ・せん断ひび割れは図-1に示すように分散して生じるので，材軸方向の中立軸位置の変化は小さいが，付着の良くないP C丸鋼棒を用いた圧着型P C梁では，圧着面での曲げひび割れのみが発生・進展するため，中立軸は材軸方向に大きく変化して，クリティカル断面での中立軸深さ(X_n)に対する圧縮破壊領域長さの比が小さくなる³⁾ため，梁の(潜在的)圧縮破壊領域の力学特性に及ぼす周辺拘束状況の影響も推測される。また，とくに拘束コンクリート部分では梁幅に対する中立軸深さ(X_n)の比が横補強筋の拘束効果におよぼす影響も考えられる。

本研究は，(潜在的)圧縮破壊領域の形状・寸

法が，曲げ圧縮部コンクリートの応力-ひずみ特性に影響をおよぼすと考える研究の第1段階として，試験体の短辺長さと高さの比および断面の辺長比が異なるプレーンおよびコンファインドコンクリートの単軸圧縮応力下での強度・変形特性を調べたものである。



(a)丸形P C鋼棒圧着型梁 (b)一体型P R C梁
図-1 ひび割れ状況と圧縮破壊領域の模式図

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は断面の短辺長さ a が 200mm で，異なる辺長比（以下 b/a と略す）および高さ・短辺長さ比（以下 h/a と略す）をもつプレーンおよびコンファインドコンクリートの角形試験体である。表-1に試験体一覧を示すが，取り上げた要因は h/a (1, 1.5, 2, 3) および b/a (1, 1.5, 2) である。なお，横補強筋比として $P_{sa}=0.94\%$ ， 0.42% を採用したが，後述の3.3強度変形推定式の誘導には前者の試験体を用い，後者の試験体は検証用とした。

*1 住友林業（正会員）

*2 大阪大学大学院 工学研究科 建築工学専攻 助教授・工博（正会員）

表－１ 試験体一覧

h/a	b/a	1			1.5			2		
		試験体名	Psa(%)	Psb(%)	試験体名	Psa(%)	Psb(%)	試験体名	Psa(%)	Psb(%)
1 (0.94)	F3B2H2	—	0	0	F3B3H3	—	0	F3B4H4	—	0
		φ6	0.94	0.94		φ6	0.94		φ6	0.94
1.5 (1.39)	F3B2H3	—	0	0	F3B3H3	—	0	F3B4H4	—	0
		φ4	0.42	0.42		φ6	0.94		φ6	0.94
2 (1.99)	F3B2H4	—	0	0	F3B3H4	—	0	F3B4H4	—	0
		φ4	0.42	0.42		φ6	0.94		φ6	0.94
3 (2.89,2.74)	F3B3H6	—	0	0	F3B3H6	—	0	F3B4H6	—	0
		φ6	0.94	0.94		φ6	0.94		φ6	0.94

()内はh/aの実際値を示す

試験体名：F；コンクリート計画強度（×10Mpa），B；長辺寸法（×100mm），H；試験体高さ（×100mm）

Psa, Psb：短辺、長辺方向の鉄筋比（％）＝ $2a_s/as$, $2a_s/bs$ （ a_s , s ：横補強筋の断面積とピッチ）

2.2 使用材料

試験体に用いたコンクリートは、表－２の調合をもつ計画強度が30Mpaのものである。横補強筋には、直径が4mmで降伏強度が460Mpaのものと、6mmで517Mpaの丸鋼を使用し、配筋ピッチは30mmとした。

表－２ コンクリートの調合(kg/m³)

W/C(%)	W	C	S	G	AD
50	192	384	734	949	4.07

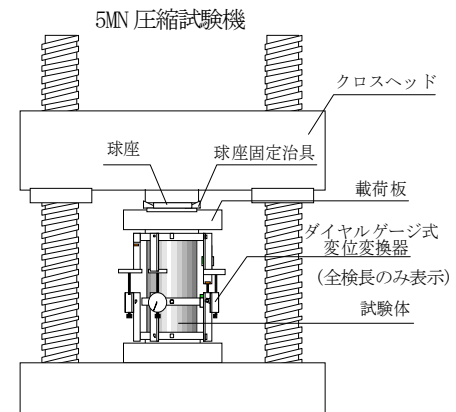
W：水，C：セメント，S：細骨材，G：粗骨材，AD：混和材

2.3 試験体製作

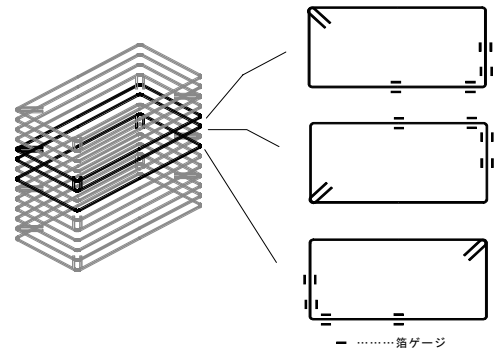
試験体は打設後3日で脱型，14日まで湿布養生後，試験日（材齢31日～41日）まで実験室内で気乾養生した。

2.4 荷重および測定方法

荷重および測定方法を図－２に示す。荷重は5MN圧縮試験機で行った。試験体軸ひずみは、試験体の上下端からそれぞれ20mm入った中央区間を全検長，ならびに上端から20～290mm区間を短検長として，相対する辺の対称位置に取り付けた4対（計8個）のダイヤルゲージ式変位変換器で測定した。なお，試験体長が300mm以下の試験体では全検長による測定のみを行い，補足的に試験体荷重板間の変位測定も行った。また試験体中央部付近における横補強筋の隅角部近傍および中央位置の断面に作用する曲げモーメントと軸力を調べる目的⁴⁾で，図－３に示す位置に検長2mmの箔ひずみゲージを貼付した。



図－２ 荷重および測定方法



図－３ 箔ひずみゲージ貼付例

3. 実験結果および考察

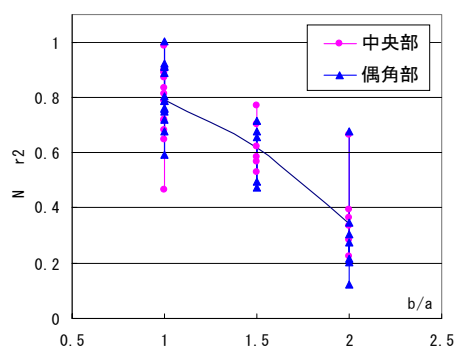
3.1 応力－ひずみ特性

図－４(a)，(b)はh/aおよびb/aが応力－ひずみ曲線におよぼす影響を調べるため，b/aが1(正方形断面)のプレーンおよびコンファインドコンクリートにおいて，h/aの異なる試験体の応力－ひずみ曲線を示したものである。いずれの図においても，h/aが小さい場合ほど，圧縮強度およびそのときのひずみは大きく，応力

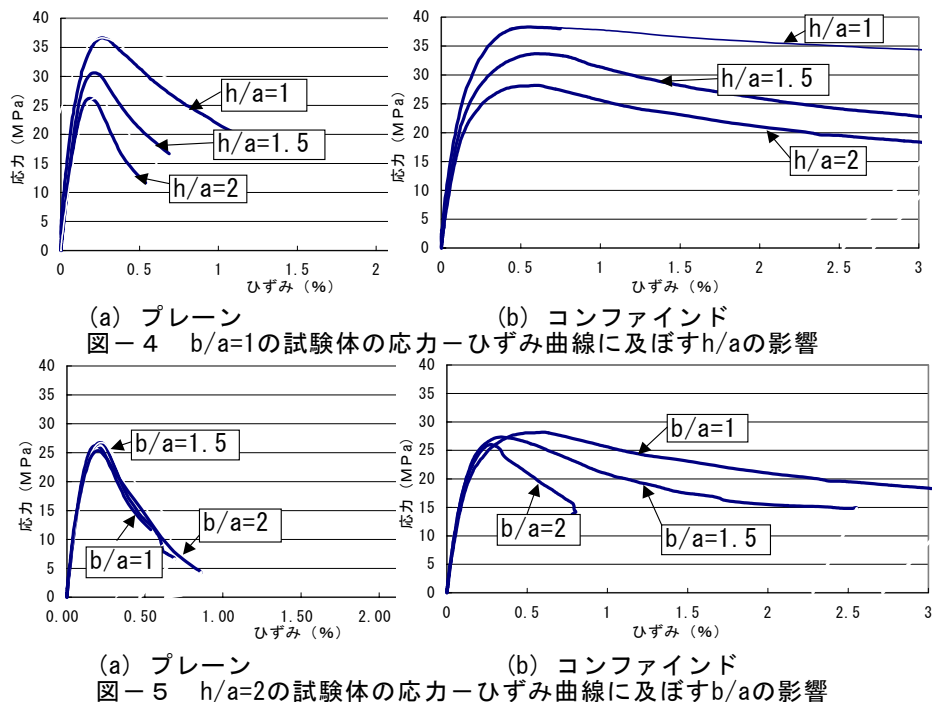
下降勾配は緩やかになる傾向がみられた。これは、 h/a が小さいほど、端面拘束の影響が試験体全長におよぶためと考えられる。

図－5 (a), (b)は、 h/a が2である試験体の応力－ひずみ曲線におよぼす b/a の影響を調べた図である。同図によればプレーンコンクリートの場合、応力－ひずみ曲線におよぼす b/a の影響はみられない。

これに対し、コンファインドコンクリートの場合、 b/a が小さいときの方が圧縮強度は若干増加し、また、そのときのひずみは顕著に増大した。この原因として、拘束効果によるひずみ増分の程度は、圧縮強度増分のそれよりも顕著であること⁵⁾、また同じ太さとピッチをもつ横補強筋の拘束力は長辺長さが長いほど小さくなる考えられる。すなわち図－6は縦軸に、各試験体の圧縮強度時における拘束力と直接対応する横補強筋短辺の作用軸力を、横軸に b/a をとって示したものであるが、作用軸力は b/a の増加に対して減少する傾向を示している。



図－6 圧縮強度時における横補強筋短辺の作用軸力



図－4 $b/a=1$ の試験体の応力－ひずみ曲線に及ぼす h/a の影響

図－5 $h/a=2$ の試験体の応力－ひずみ曲線に及ぼす b/a の影響

3.2 強度・変形特性

図－7 (a)～(c)はそれぞれ、プレーンコンクリートおよびコンファインドコンクリートの圧縮強度、同強度時ひずみ、応力下降勾配を縦軸に、 h/a を横軸に、 b/a をパラメータとして示したものである。なお本項および次項では $P_{sa}=0.94\%$ の試験体結果について考察している。

(1) 圧縮強度

図 (a)によれば、いずれのコンクリートの場合でも h/a の増加によって圧縮強度は顕著に減少するが、 b/a の影響は大きくない。

(2) 圧縮強度時ひずみ

図 (b)の圧縮強度時ひずみは、プレーンコンクリートの場合、 h/a の増加に対し小さくなるが、 b/a の違いによる差は殆ど認められない。コンファインドコンクリートの場合は、前述の拘束効果の減少という理由から b/a が大きいものほどひずみは小さくなる。一方、 h/a の違いによる変化はあまり認められなかった。

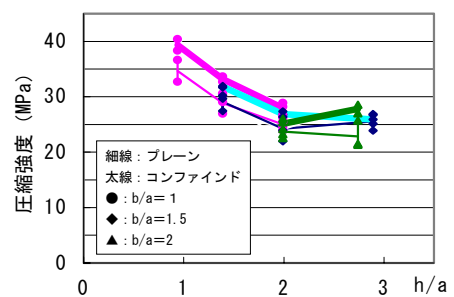
(3) 応力下降勾配

図 (c)によれば、いずれのコンクリートの場合でも h/a が大きいほど、応力下降勾配は急になるが、その影響度はプレーンコンクリートの方が顕著である。 b/a の影響は、圧縮強度および

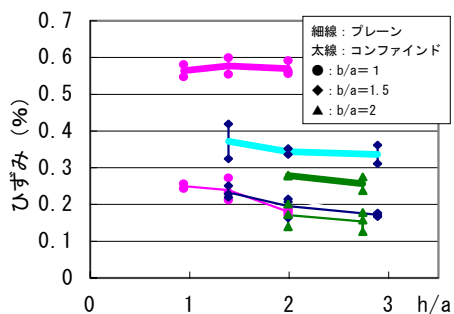
そのときのひずみの場合と同様、顕著でなかった。なお、応力下降勾配は既往の研究⁴⁾ ⁵⁾に従い、圧縮強度時ひずみの2倍の区間における平均勾配とした。

3.3 強度・変形特性推定式

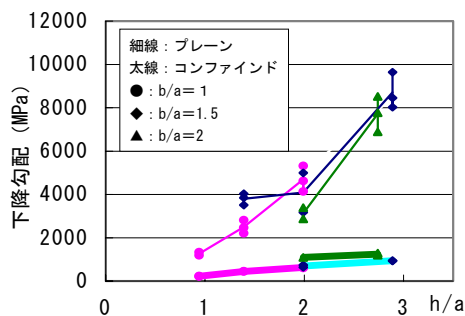
プレーンおよびコンファインドコンクリートの強度・変形特性は、幅(直径)高さ比が2の円形および正方形断面を有する試験体について明らかにされている場合が多い⁵⁾。したがって、本論でも各種試験体の強度・変形推定式において h/a および b/a の影響を h/a が2で、 b/a が1の試験体(基準試験体)に対する係数として評価するため、基準試験体の特性値(圧縮強度 F_b 、ひずみ ε_b 、下降勾配 E_b)に関する比について考察する。なお、下付き文字の o はプレーン、 cf はコンファインドを意味する。



(a) 圧縮強度



(b) 圧縮強度時ひずみ



(c) 応力下降勾配

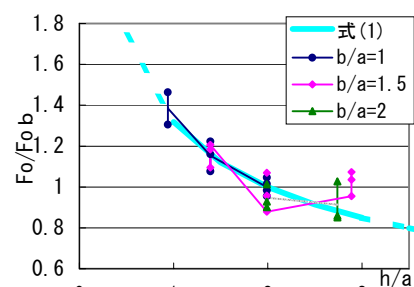
図－7 強度・変形特性の実験結果

(1) 圧縮強度比

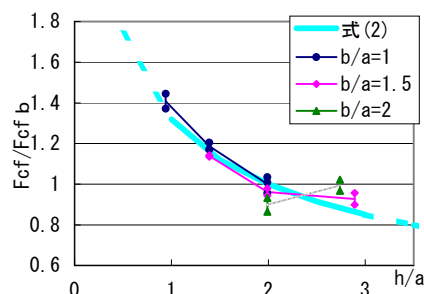
図－8 (a), (b)に圧縮強度比の結果を示す。プレーンおよびコンファインドのいずれのコンクリートの場合でも、同比は h/a の増加に伴い、ほぼ同様な指数関数に従って減少する傾向がみられる。それ故、圧縮強度比の推定式は、 $h/a=2$ で1となる式(1)および式(2)で表すこととした。

$$\frac{F_o}{F_{ob}} = \left(\frac{2}{h/a} \right)^{0.4} \quad (1)$$

$$\frac{F_{cf}}{F_{cfb}} = \left(\frac{2}{h/a} \right)^{0.4} \quad (2)$$



(a) プレーンコンクリート



(b) コンファインドコンクリート

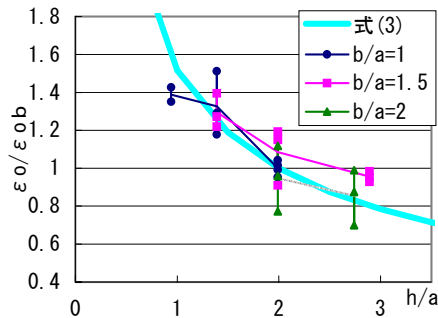
図－8 圧縮強度比

(2) 圧縮強度時ひずみ比

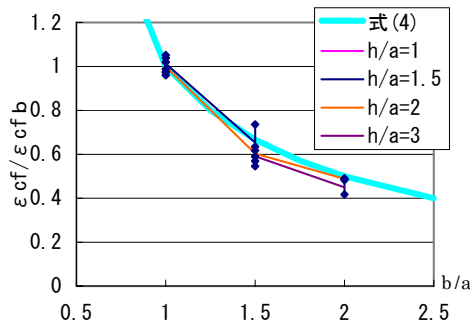
プレーンコンクリートの圧縮強度時ひずみは3.2で述べたように b/a の影響を受けないため、ひずみ比は図－9 (a)に示すように、 h/a の指数関数である式(3)で表されるとした。一方、コンファインドコンクリートでは h/a よりも b/a の影響が顕著であったので、 b/a を横軸にとって、圧縮強度時ひずみ比を整理したものが図－9 (b)である。同比は b/a に反比例して減少する傾向を示す。それ故、圧縮強度時ひずみ比の推定式として式(4)を得た。

$$\frac{\mathcal{E}_0}{\mathcal{E}_{0b}} = \left(\frac{2}{h/a} \right)^{0.6} \quad (3)$$

$$\frac{\mathcal{E}_{cf}}{\mathcal{E}_{cfb}} = \frac{1}{b/a} \quad (4)$$



(a) プレーンコンクリート



(b) コンファインドコンクリート

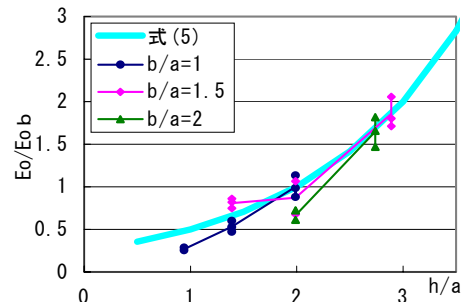
図－ 9 圧縮強度時ひずみ比

(3) 応力下降勾配比

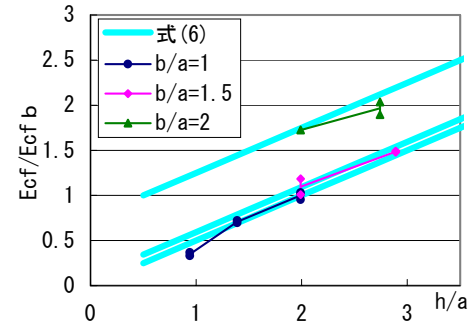
図－ 10 に応力下降勾配比についての結果を示す。図 (a) のプレーンコンクリートの場合、同比におよぼす b/a の影響は明確でなく、 h/a の増加とともに指数関数的に増加する傾向がみられた。したがって、応力下降勾配比の推定式を式 (5) と定めた。コンファインドコンクリートの場合、図－ 10 (b) から分かるように、同比は h/a に比例すると同時に、3.2 で述べた横補強筋の軸力性状と関係する b/a の影響も受けている。それ故、応力下降勾配比は式 (6) で推定できるとした。

$$\frac{E_0}{E_{0b}} = 2^{\left(\frac{h/a-2}{2}\right)} \quad (5)$$

$$\frac{E_{cf}}{E_{cfb}} = \frac{1}{2} \left(\frac{h/a}{b/a} \right) + \frac{3}{4} \left(\frac{b/a}{h/a} - 1 \right)^3 \quad (6)$$



(a) プレーンコンクリート

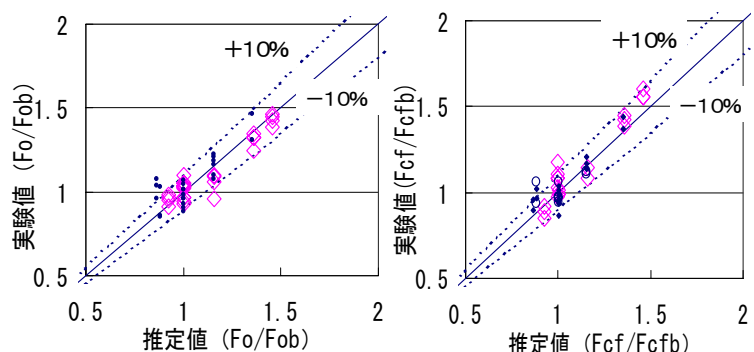


(b) コンファインドコンクリート

図－ 10 応力下降勾配比

4. 推定式の適合性

図－ 11, 12 に、誘導推定式の適合性の検討を示す。同図中には◇印で $F_0=31\text{MPa}$ で P_{sa} が 0.42% の試験体による既往の実験値²⁾を、・印で推定式の誘導に用いた $\phi 6\text{mm}$ の本実験結果を、ならびに○印で検証用の $\phi 4\text{mm}$ 試験体の結果を示す。これらの図によれば、圧縮強度比はプレーン、コンファインドコンクリートのいずれの場合でも、 $\pm 10\%$ の範囲で精度良く推定できていることがわかる。圧縮強度時ひずみ比および応力下降勾配比については、ばらつきは大きいが実験値の下限は推定値の 70% 程度でほぼ評価できると考えられる。



(a) プレーンコンクリート (b) コンファインドコンクリート

図－ 11 圧縮強度比の適合性

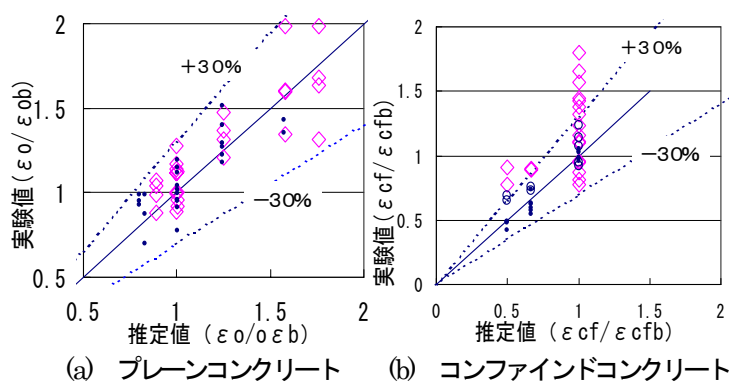


図-12 圧縮強度時ひずみ比の適合性

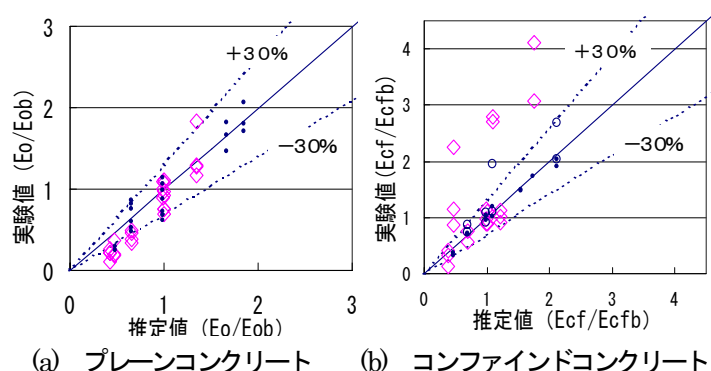


図-13 応力下降勾配比の適合性

5. まとめ

コンクリート曲げ部材の圧縮部コンクリートに適用する応力-ひずみ関係に関する基礎研究として、高さ・短辺長さの比および辺長比（長辺/短辺）がそれぞれ異なる、角形プレーンコンクリートおよびコンファインドコンクリートの単軸圧縮試験を行い、以下の結果を得た。

- (1) プレーンコンクリートの応力-ひずみ特性には、断面の辺長比の影響は殆どみられないのに対し、高さ・短辺長さ比の影響が顕著で、同比の減少によって、圧縮強度、そのときのひずみは増大し、下降勾配は緩やかとなった。
- (2) コンファインドコンクリートでは、圧縮強度が高さ・短辺長さ比によって顕著な影響を受けた。これに対し同強度時ひずみは、辺長比が大きい場合ほど小さくなった。これは拘束応力と関係する横補強筋軸力が辺長比の大きい場合程小さくなるためである。応力下降勾配には両比の影響がみられた。

(3) (1)および(2)の結果において、高さ・短辺長さ比が2で、辺長比が1の試験体($a \times b \times h = 200 \times 200 \times 400$ 試験体)の特性値に対する比として、各種試験体の強度・変形特性推定式(1)～(6)式を誘導した。

(4) 既往の実験結果による適合性検討から、推定式は実用的にほぼ十分な精度を有することを示した。

【謝辞】本研究に対し本学卒業生 中川 明德氏(現 NTT ファシリティーズ)、大西 広明氏(現大学院生)、高周波熱錬(株)ならびにタイコー(株)から多大なご助力を受けた。また、本研究費の一部は、平成13年度日本学術振興会科学研究費(課題番号13650630 代表研究者:中塚 佑)によった。記して謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 阿波野昌幸, 中塚 佑, 中川 明德: 圧着PC梁の部材性能のマクロモデルによる推定(その1, その2), 日本建築学会大会学術公演梗概集 C-2, pp. 933-936, 2001. 9
- 2) 中川 明德, 中塚 佑ほか: 幅と高さ比が異なるプレーンおよびコンファインドコンクリートの強度・変形特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, pp. 15-16, 2002. 8
- 3) 中塚 佑, 阿波野 昌幸: 接合形式(圧着型・一体型)とPC鋼材種(丸形, 異型)の異なる片持PC梁の耐荷・変形機構と力学性能に関する実験的考察, コンクリート工学論文集, 第11巻3号, pp. 97-110, 2000. 9
- 4) 中塚 佑, 他4名: コンファインドコンクリートにおける角形横補強筋の拘束機構, 日本建築学会構造系論文集, 第492号, pp. 61-68, 1997. 2
- 5) 中塚 佑, 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, 日本建築学会構造系論文集, 505号, pp. 93-99, 1998. 3