

論文 せん断力を受けるコンファインドコンクリートの強度・変形特性

夏目 晃宏^{*3}・荒木 秀夫^{*1}・椛山 健二^{*2}・板倉 三奈子^{*3}

要旨：せん断力を受けるコンファインドコンクリートの強度・変形特性を解明するために、鉄筋コンクリート小型試験体の静的載荷実験を行った。その結果、コンファインドコンクリートの最大鉛直応力および最大鉛直応力時のひずみは、せん断力に応じて低下し、横補強筋量によっても影響を受けることを明らかにした。さらに、その影響を定量的に評価するため実験結果の回帰分析を行い、最大鉛直応力および最大鉛直応力時ひずみの低下率を作用するせん断応力と横補強筋量の関数として定式化し提案した。

キーワード：コンファインドコンクリート、せん断力、横補強筋、静的載荷実験

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材において引張鉄筋降伏後、入力されるせん断力はほぼ一定となるが、その後も変形を増大させると、コンクリートの圧縮部分が圧縮破壊または圧縮せん断破壊して急激な耐力低下に結びつく場合がある。これには部材断面の中立軸深さの減少やせん断力の大きさ等が影響していると考えられる。一方、一軸圧縮状態におけるこれまでのコンファインドコンクリートに関する研究^{1)~4)}では破壊条件式、構成則および強度推定式が提案されているが、圧縮力と同時にせん断力を受けるコンファインドコンクリートの強度・変形特性についてはこれまであまり言及されていない。そこで、筆者等はこれまで鉄筋コンクリート小型試験体を用いた圧縮せん断実験を行い、せん断力がコンファインドコンクリートの強度・変形特性ならびに鉛直応力-ひずみ関係に及ぼす影響について検討を加えてきた^{5),6)}。本論文では横補強筋量が鉛直応力-ひずみ関係等に与える影響について検討し、これまでの結果と総合して定性的、定量的に解明することを目的としている。

2. 実験概要

2.1 載荷経路

本研究において採用した載荷経路を図-1に示す。なお、同図中の破壊限界線は、コンクリートの破壊条件を Mohr の破壊条件として得られる楕円である^{7),8)}。Aは一軸圧縮試験、BおよびCは圧縮せん断試験における載荷経路である。

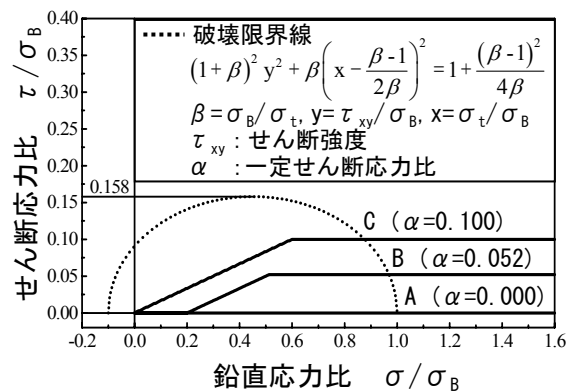


図-1 載荷経路

圧縮せん断試験においては、試験体に曲げひび割れを発生させない ($\tau < \sigma/6$) ように、鉛直応力比 σ/σ_B とせん断応力比 τ/σ_B の比例関係を保って増加させた。一定せん断応力比 (図中、 α) に達すると、鉛直応力比 σ/σ_B のみ上昇するようにした。これは、鉄筋コンクリート部材における主筋降伏後の圧縮部コンクリートを模擬

*1 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻助教授 工博 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻助手 博(工) (正会員)

*3 広島大学大学院 工学研究科社会環境システム専攻 (正会員)

するためである。載荷方法は図-2に示す逆対称加力とした。

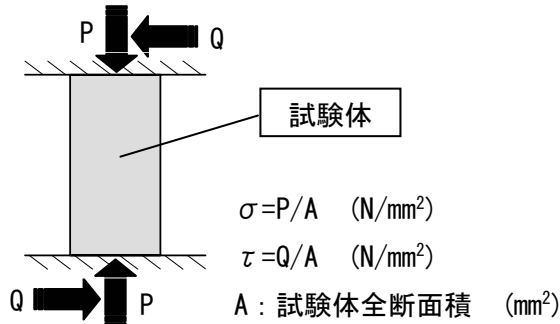


図-2 載荷方法

2.2 試験体

表-1に試験体一覧，図-3に試験体形状および配筋をそれぞれ示す。試験体は9体とし，

載荷経路と横補強筋量を実験変数とした。試験体名中の A, B, C の記号が図-1に示した載荷経路を表す。横補強筋として D6 および D10 を使用し，横補強筋間隔は 50mm および 35mm としており，補強筋量は体積比 $p_b=1.58, 2.26, 3.42\%$ の3種類である。試験体外形は $200 \times 200 \times 400\text{mm}$ ，コンクリートの設計基準強度は 27N/mm^2 で全試験体とも共通である。コンクリート中の粗骨材の最大粒径は 15mm としている。また，4-D6 の縦筋は横補強筋の位置決めを目的としたものであり，構造的には考慮しないものとした。本実験に使用した材料の力学的特性をコンクリートについては表-2-1に，鉄筋については表-2-2にそれぞれ示す。

表-1 試験体一覧

試験体名	横補強筋				入力せん断力	
	間隔 S (mm)	長さ D (mm)	面積比 p_w (%)	体積比 p_b (%)	載荷経路	一定せん断応力比 α
D6A50	50	162	0.79	1.58	A	0.000
D6B50	50	162	0.79	1.58	B	0.052
D6C50	50	162	0.79	1.58	C	0.100
D6A35	35	162	1.13	2.26	A	0.000
D6B35	35	162	1.13	2.26	B	0.052
D6C35	35	162	1.13	2.26	C	0.100
D10A50	50	166	1.71	3.42	A	0.000
D10B50	50	166	1.71	3.42	B	0.052
D10C50	50	166	1.71	3.42	C	0.100

表-2-1 コンクリートの力学的特性

試験体名	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	引張強度 σ_t (N/mm^2)	ヤング係数 E_c (N/mm^2)
D6A50	28.7	2.81	2.15×10^4
D6B50	23.6	2.27	1.81×10^4
D6C50	24.7	2.75	2.20×10^4
D6A35	29.4	2.59	2.20×10^4
D6B35	20.9	2.09	1.98×10^4
D6C35	21.7	2.14	2.04×10^4
D10A50	29.1	2.95	2.23×10^4
D10B50	24.6	2.02	1.83×10^4
D10C50	29.8	2.15	2.15×10^4

$$p_w (\%) = \frac{2a_w}{DS} \times 100$$

p_w : 横補強筋面積比
S : 横補強筋の間隔
 a_w : 横補強筋断面積

$$p_b (\%) = \frac{a_w L}{D^2 S} \times 100$$

p_b : 横補強筋体積比
D : 横補強筋の一边の長さ
L : 横補強筋の全長 (= 4D)

表-2-2 鉄筋の力学的特性

使用鉄筋	降伏強度 σ_{sy} (N/mm^2)	引張強度 σ_{su} (N/mm^2)	ヤング係数 E_s (N/mm^2)
D6	313	450	1.54×10^5
D10	369	520	1.73×10^5

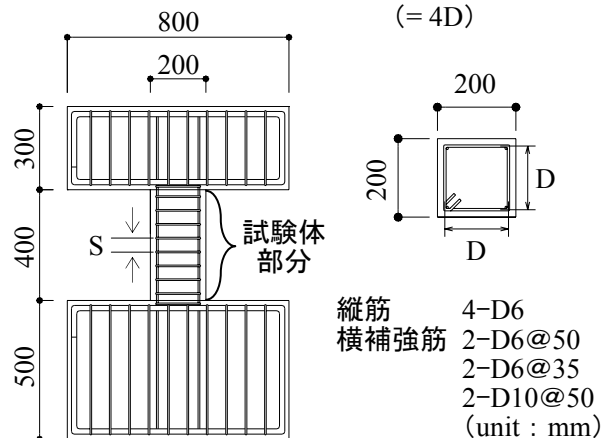


図-3 試験体形状および配筋

3. 実験結果および考察

3.1 応力-ひずみ関係

鉛直応力比(σ/σ')-鉛直ひずみ比($\varepsilon/\varepsilon_B$)-せん断剛性(G)関係について図-4に示す。縦軸の鉛直応力は、縦筋の荷重負担分が微小であると考え、鉛直荷重を試験体全断面積で除して算出し、それを式(1)に示す補正圧縮強度 σ' で除して基準化した。横軸は鉛直ひずみを円柱テストピース($\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$)の圧縮強度時の鉛直ひずみ ε_B で除して基準化した。

$$\sigma' = 0.812 \cdot \sigma_B \quad (1)$$

式(1)中の σ_B は円柱テストピースの圧縮強度であり、筆者等が行った既往の研究⁶⁾から、無筋角柱試験体($200 \times 200 \times 400\text{mm}$)の圧縮試験結果を用いて、0.812を算出した。せん断剛性 G は試験体に取り付けた変位計により測定した変位からせん断ひずみ γ を求め、式(2)により算出した。なお、図中の丸印は、最大鉛直応力時の値を示している。

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2)$$

図-4から、せん断力を載荷しない荷経路Aの試験体に比べ、せん断力を載荷した荷経路B、Cの試験体は、最大鉛直応力比が小さくなる事が分かる。また、横補強筋体積比 $p_b=1.58\%$ の

試験体においては、最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比が顕著に小さくなるが、 $p_b=2.26, 3.42\%$ の試験体においては、わずかな低下に留まっている。横補強筋量で比較すると、いずれの荷経路の場合も横補強筋体積比 $p_b=2.26\%$ の試験体のほうが、 $p_b=3.42\%$ の試験体より最大鉛直応力比が若干ながら大きくなっている。これは、 $p_b=2.26\%$ の試験体の横補強筋間隔が密であるため、拘束応力の一様性が高くなるためであると考えられる。また、横補強筋量の拘束効果には上限があると推測される。せん断剛性については、ある時点から急激に低下し、最大鉛直応力比に近づくると、その下降勾配は緩やかになる。なお、横補強筋体積比 $p_b=1.58\%$ における荷経路Bの試験体については、変位計の不具合により、データが得られなかったため、せん断剛性を示していない。

3.2 最大鉛直応力

図-5に各試験体が最大鉛直応力に達した時の応力状態および破壊限界線を示す。縦軸、横軸はそれぞれ鉛直応力 σ 、せん断応力 τ を補正圧縮強度 σ' で除して基準化した。せん断力を載荷しない一軸圧縮の場合、鉛直応力比は1.1~1.5程度になるが、せん断応力比が大きくなるほど、鉛直応力比は小さくなっている。これにより、

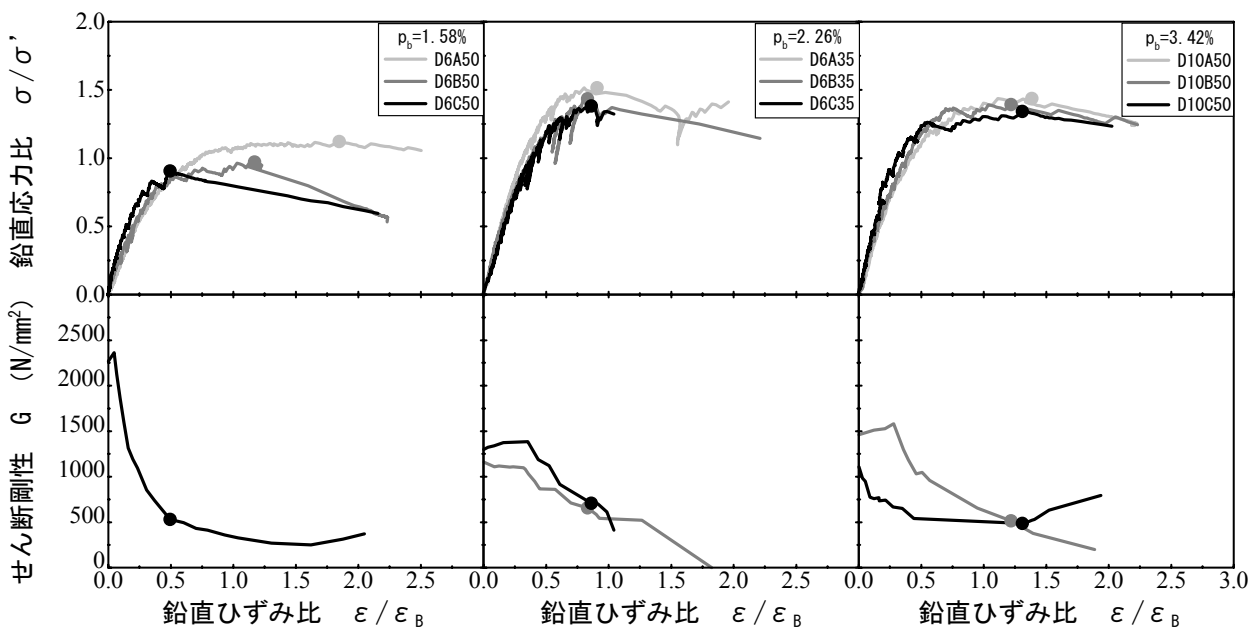


図-4 鉛直応力比(σ/σ')-鉛直ひずみ比($\varepsilon/\varepsilon_B$)-せん断剛性(G)関係

試験体の最大鉛直応力はせん断応力により低下し、その低下率は入力するせん断力の大きさに依存すると推測される。また、図-4でも示したように横補強筋体積比に応じてその効果は大きくなるだけでなく横補強筋量の拘束効果には限界があることが推察される。

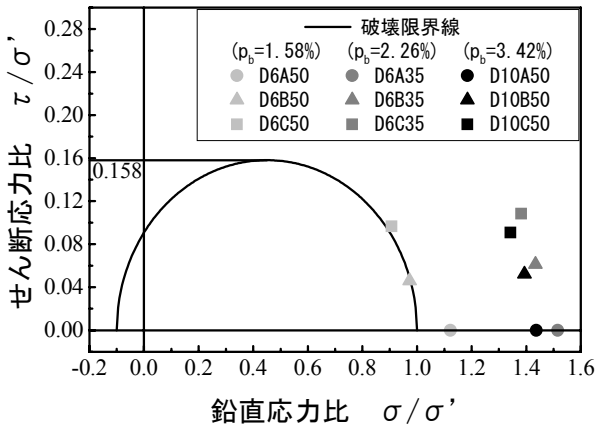


図-5 最大鉛直応力時の応力状態

4. 最大鉛直応力、ひずみの低下率の提案

4.1 せん断力による低下率

せん断力と最大鉛直応力の関係を図-6に、最大鉛直応力時の鉛直ひずみの関係を図-7に示す。図-6の縦軸は、各試験体の最大鉛直応力比 σ_0/σ' を同配筋の載荷経路 A である試験体の最大鉛直応力比 $(\sigma_0/\sigma')_A$ で除して基準化した値、図-7の縦軸は、各試験体の最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比 $\varepsilon_0/\varepsilon_B$ を同配筋の載荷経路 A である試験体の最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比 $(\varepsilon_0/\varepsilon_B)_A$ で除して基準化した値である。また、横軸は共に、各試験体の最大鉛直応力時のせん断

断応力比 τ_0/σ' を破壊限界線の最大せん断応力比 $(\tau/\sigma_B)_{\max}=0.158$ で除して基準化した値である。入力されるせん断力が増加すると、最大鉛直応力については曲線的に、最大鉛直応力時の鉛直ひずみについては直線的に低下する傾向にある。そこで、最小自乗法により、回帰曲線および回帰直線を求め、これをせん断力による最大鉛直応力の低下率 k_1 および最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率 k_2 として、式(3)~(8)に示す。なお、回帰曲線については、プレーンコンクリートの破壊限界線に準じて楕円であるとした。

$p_b=1.58\%$ の場合

$$k_1=0.0450+0.550\sqrt{1-\frac{\tau'^2}{(0.766)^2}} \quad (3)$$

$$k_2=1-1.207\tau' \quad (4)$$

$p_b=2.26\%$ の場合

$$k_1=0.450+0.550\sqrt{1-\frac{\tau'^2}{(1.208)^2}} \quad (5)$$

$$k_2=1-0.108\tau' \quad (6)$$

$p_b=3.42\%$ の場合

$$k_1=0.450+0.550\sqrt{1-\frac{\tau'^2}{(1.184)^2}} \quad (7)$$

$$k_2=1-0.162\tau' \quad (8)$$

ただし、

$$\tau' = \frac{\tau_0/\sigma'}{(\tau/\sigma_B)_{\max}} \quad (9)$$

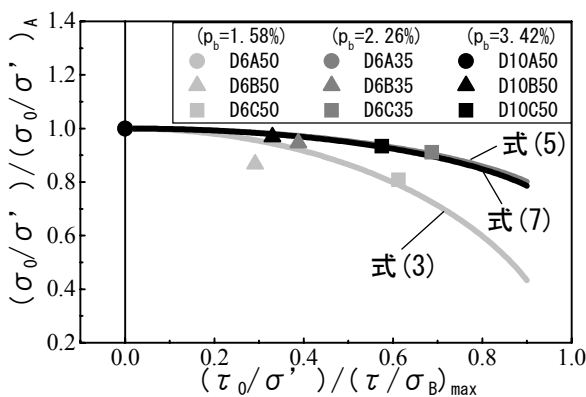


図-6 最大鉛直応力の低下

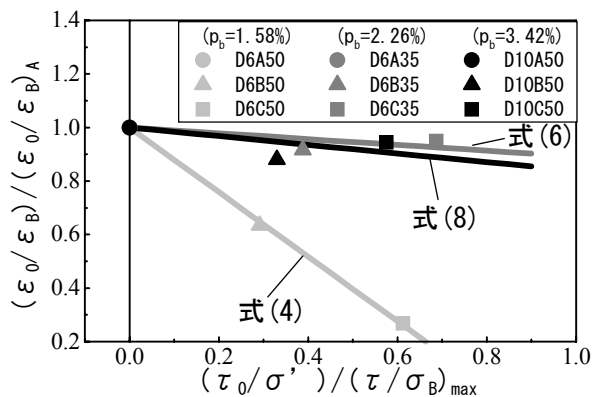


図-7 最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下

4.2 横補強筋量による影響

4.1において求めた、せん断力による最大鉛直応力の低下率 k_1 および最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率 k_2 から、横補強筋量、特に配筋によってせん断力による低下率は異なることが分かる。そこで、横補強筋の配筋を考慮したせん断力による最大鉛直応力および最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率係数をそれぞれ k_{1S} 、 k_{2S} として、式(10)、(11)のように表す。

$$k_1 = 0.450 + 0.550 \sqrt{1 - \frac{\tau'^2}{k_{1s}^2}} \quad (10)$$

$$k_2 = 1 - k_{2s} \tau' \quad (11)$$

図-8にせん断力による最大鉛直応力の低下率係数 k_{1S} と横補強筋有効拘束応力 $\sigma_r(1-S/D)$ の関係を、図-9にせん断力による最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率係数 k_{2S} と横補強筋有効拘束応力 $\sigma_r(1-S/D)$ の関係を示す。図-8の縦軸にせん断力による最大鉛直応力の低下率係数 k_{1S} をとり、図-9の縦軸にせん断力による最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率係数 k_{2S} をとる。横軸は共に、横補強筋有効拘束応力 $\sigma_r(1-S/D)$ である。ここで、 σ_r は横補強筋面積比 p_w と降伏強度 σ_{sy} の積であり、 S は横補強筋間隔、 D は横補強筋長さを表す。図-8より、横補強筋有効拘束応力は、実験結果から求めた最大鉛直応力の低下率係数にほとんど影響を及ぼしていない。そこで、せん断力による最大鉛直応力の低下率係数 k_{1S} を、式(12)で表す。また、図-9より、横補強筋有効拘束応力が増加すると、実験結果

から求めた、最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率係数は直線的に低下する傾向にある。そこで、最小自乗法により回帰直線を求め、これをせん断力による最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率係数 k_{2S} とし、式(13)で表す。

$$k_{1s} = 1.000 \quad (12)$$

$$k_{2s} = 1.597 - 0.375 \sigma_r (1-S/D) \quad (13)$$

式(12)、(13)をそれぞれ式(10)、(11)に代入し、式(14)および式(15)を、横補強筋量の影響を考慮したせん断力による最大鉛直応力および最大鉛直応力時の鉛直ひずみの低下率として提案する。

$$k_1 = 0.450 + 0.550 \sqrt{1 - \tau'^2} \quad (14)$$

$$k_2 = 1 - \{1.597 - 0.375 \sigma_r (1-S/D)\} \tau' \quad (15)$$

4.3 実験値との比較

既往の研究⁹⁾で提案されている応力-ひずみ関係式に、式(14)、(15)を適用して得られる最大鉛直応力比および最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比の値を計算値とし、実験値と比較する。最大鉛直応力比の比較を図-10に、最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比の比較を図-11に示す。最大鉛直応力比についてはどの試験体も比較的良好な対応が見られるが、横補強筋体積比 $p_b = 2.26\%$ 、 3.42% の試験体において、実験値に対し計算値ではやや小さく評価し、 $p_b = 1.58\%$ の試験体において、実験値に対し計算値ではやや大きく評価している。最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比については、横補強筋体積比 $p_b = 3.42\%$ の試験体では比較的良好な対応が見られるが、 $p_b = 2.26\%$ の試験体においてはやや過大評価している。横補強筋

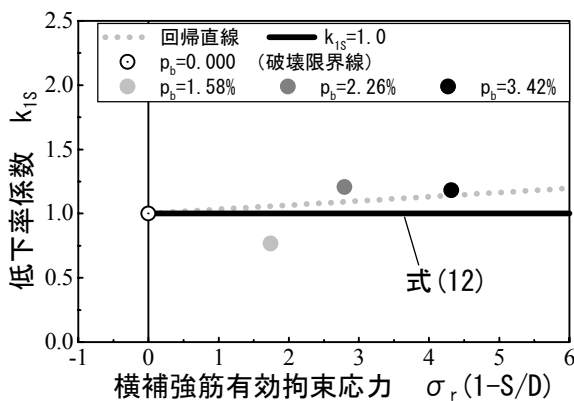


図-8 $k_{1S} - \sigma_r(1-S/D)$ 関係

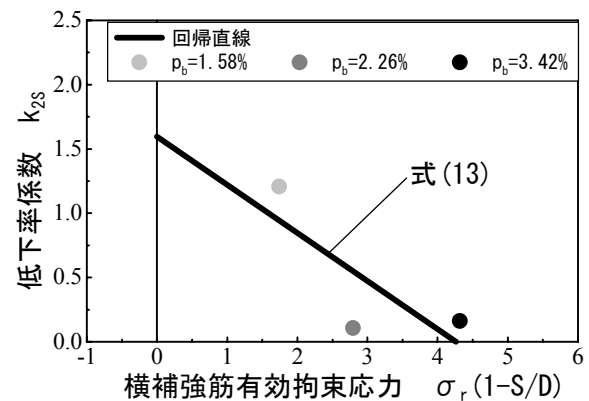


図-9 $k_{2S} - \sigma_r(1-S/D)$ 関係

体積比 $p_b=1.58\%$ の試験体における実験値は大きくばらつき、D6B50 では良好な対応が見られるが、D6C50 では過大評価し、D6A50 では過小評価する結果となった。横補強筋体積比が小さいものについては今後検討を要する。

5. まとめ

本研究により以下の知見が得られた。

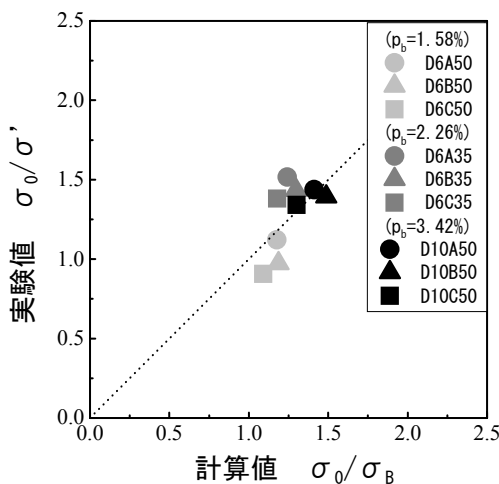


図-10 最大鉛直応力比の比較

(1)横補強筋量が小さくても、横補強筋間隔が密であれば最大鉛直応力は大きくなるという結果となった。

(2)せん断力が増加すると最大鉛直応力、その時の鉛直ひずみは低下する。最大鉛直応力の低下に関する横補強筋の効果には限界がある。これらの影響を考慮した低下率をせん断力、横補強筋量の関数として定式化した。

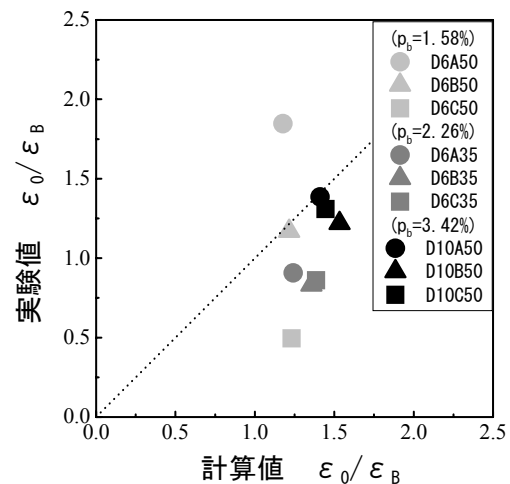


図-11 最大鉛直応力時の鉛直ひずみ比の比較

謝辞

実験実施にあたって広島大学大学院耐震工学研究室の皆様の多大なる協力を得た。ここに感謝の意を表す。また本研究の一部は科学研究補助金（課題番号 13650630 代表研究者：中塚侑）の援助を受けた。ここに併せて深謝する。

参考文献

- 1) 前川宏一, 竹村淳一, 入江正明: コンクリート非線形破壊に及ぼす三軸拘束効果, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.1, pp.253-258, 1989
- 2) 吉川弘道ほか: 中心軸圧縮を受ける鉄筋コンクリート柱の非線形モデル, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.2, pp.417-420, 1990
- 3) 畑中重光ほか: コンファインドコンクリートの圧縮靱性とその評価, コンクリート構造物の靱性と配筋方法に関するシンポジウム論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.1-20,

1990

- 4) 中塚侑, 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
- 5) 杉山絵美, 荒木秀夫, 椋山健二, 板倉三奈子: せん断力を受けるコンファインドコンクリートに及ぼす横補強筋の拘束効果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.163-164, 2002.8
- 6) 板倉三奈子, 荒木秀夫, 中塚侑, 椋山健二: せん断力を受けるコンファインドコンクリートの抵抗機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.1033-1038, 2003.7
- 7) 増田森治, 室田忠雄: 改訂工業塑性力学, 養賢堂, 1989.1
- 8) 山田嘉明: 塑性力学, 日刊工業新聞, 1959.12
- 9) R.Park, N.Priestley and W.D.Gill; "Ductility of Square-Confined Concrete Columns"; Journal of the Structural Division, ASCE, pp.929-950, April, 1982