論文　寸法の異なる角形鉄筋コンクリート柱内部への拘束効果に関する三次元 FEM 圧縮解析

伊藤　誠[*1]・水野　英二[*2]・畑中　重光[*3]

要旨：軸圧縮力を受ける，断面寸法の異なる角形鉄筋コンクリート柱の三次元有限要素解析を実施し，横拘束筋による内部コンクリートへの拘束効果に対して，横拘束筋比や寸法比，コンクリート強度が与える影響を,「等価拘束圧」なる指標を定義して「拘束効率」および「拘束係数」という二つの変量により考察した。その結果，横拘束筋比が大きくなるほど拘束効率は小さくなること，拘束効率は拘束圧とコンクリート強度の比に依存していること，コンクリート強度が低強度の場合拘束効率に寸法効果が現れるが，高強度の場合逆の傾向になることが分かった。

キーワード：寸法比，横拘束筋比，等価拘束圧，拘束効果，拘束効率

1.　はじめに

鉄筋コンクリート製橋脚の場合，横拘束筋による内部コンクリートへの拘束効果により，耐力および塑性変形能力を高めることが知られている。星隈ら[1)]は断面寸法 500mm のコンクリート柱模型の一軸圧縮試験を行い，横拘束筋による拘束効果を考慮したコンクリートの応力－ひずみ関係式を提案している。しかし，提案式において拘束効果は横拘束筋比で評価されており，断面寸法の比については触れられていない。提案式は断面寸法 500mm とかなり大きい断面での実験結果に基づいたものであるが，実橋脚はさらに寸法が大きいので，断面寸法が塑性変形に影響を及ぼすことが考えられる。

本研究では，断面寸法，横拘束筋比，コンクリート強度をパラメータとして角形鉄筋コンクリートの軸圧縮解析を行い，寸法比が最大耐力および拘束効果に及ぼす影響について考察する。

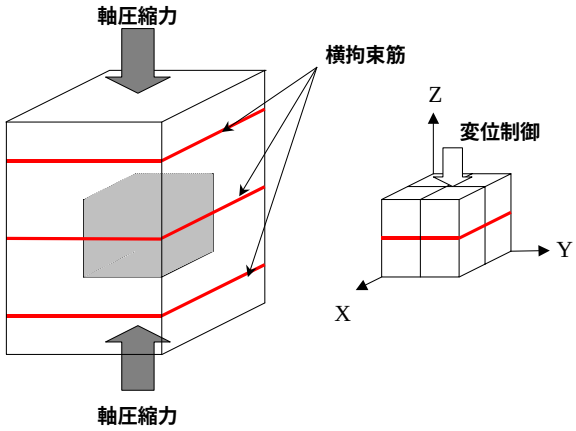
2.　解析概要

2.1　構成モデルおよび要素タイプ

本研究では，三次元 FEM（有限要素法）解析プログラム DIANA を用いて解析を行う。鉄筋には DIANA 既存の「von Mises の降伏基準」を適用し，Beam 要素でモデル化した。また，コンクリートには水野らが開発した「圧縮軟化型モデル」[2)]をユーザーサブルーチンに導入して適用し，8 節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。なお，鉄筋とコンクリートの間については完全付着を仮定している。

2.2　解析モデル

解析モデルは**図－1**に示すように角形鉄筋コンクリート柱において横拘束筋が巻かれている一部を取り出し，対称性を考慮し 1/4 モデルと



図－1　解析モデルの概要図

*1 中部大学大学院　工学研究科建設工学専攻　工修　(正会員)
*2 中部大学　工学部土木工学科教授　Ph.D.　(正会員)
*3 三重大学　工学部建築学科教授　工博　(正会員)

表－１　解析ケース（合計 160 ケース）

一軸圧縮強度 f_c’(MPa)	ヤング係数(MPa) およびポアソン比	1辺の長さ (cm)	寸法比 S	面積横拘束筋比 p_s(%)	ひずみ増分 Δε(%)
24	E_c=2.5×10^5 ν=0.2	20	1	0.0 0.1 0.2 0.5 1.0 2.0 4.0 5.0 7.5 10.0	p_s=0.0%～0.5% Δε=0.005(%)
		40	2		
		60	3		
		80	4		
30	E_c =2.8×10^5 ν=0.2	20	1		p_s=1.0%～2.0% Δε=0.010(%)
		40	2		
		60	3		
		80	4		
50	E_c =3.3×10^5 ν=0.2	20	1		p_s=4.0%～5.0% Δε=0.015(%)
		40	2		
		60	3		
		80	4		
70	E_c =3.7×10^5 ν=0.2	20	1		p_s=7.5%～10.0% Δε=0.020(%)
		40	2		
		60	3		
		80	4		

した。境界条件は X=0，Y=0，Z=0 の面に対しそれぞれ X 方向，Y 方向，Z 方向の変位を拘束した。解析は変位制御で行い，**表－１**に示すひずみ増分で 400step 載荷した。

2.3　解析ケース

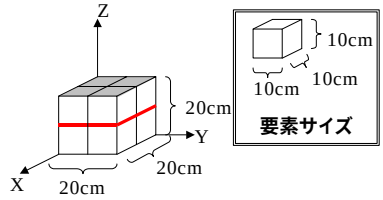
解析ケースは**図－２(a)**に示すように，1/4 モデルの１辺の長さが 20cm のものを基本サイズ（寸法比１）とし，〔体積／載荷面積〕が一定となるようにして，寸法比 S を 2，3，4 と変化させた。また，面積横拘束筋比 p_s は 0.0%～10.0% まで変化させて解析した。解析ケースは**表－１**のようである。また，鉄筋の材料定数を**表－２**に示す。

表－２　鉄筋の材料定数

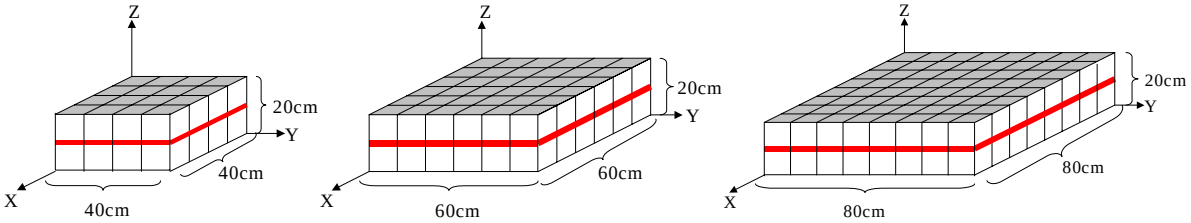
E_S	ν_S	σ_y
2.1×10^5 (MPa)	0.3	350 (MPa)

3.　解析結果

各シリーズの解析結果を**図－３(a)～(d)**に示す。縦軸は平均軸方向応力，横軸は平均軸方



(a)寸法比 1.0　（基本サイズ）



(b)寸法比 2.0　(c)寸法比 3.0　(d)寸法比 4.0

図－２　断面寸法の異なる解析モデル

向ひずみである。図中の結果は，面積横拘束筋比 0.5%，2.0%，7.5%に対する解析結果である。

3.1　f_C’=24(MPa)，30(MPa)シリーズ

図－３(a)および**(b)**をみると，面積横拘束筋比が 0.5%の場合は寸法比の違いによる平均応力－平均ひずみ関係に大きな差はないことがわかる。一方，面積横拘束筋比が 2.0%，7.5%と大きくなるにつれて，寸法比が大きいと最大平均応力が小さくなる傾向があり，寸法効果が現れていると思われる。

3.2　f_C’=50(MPa)，70(MPa)シリーズ

図－３(c)および**(d)**をみると，面積横拘束筋比が 0.5%の場合は寸法比の違いによる平均応力－平均ひずみ関係に大きな差はなく，f_C’=24 (MPa)および f_C’=30(MPa)シリーズと同じ傾向である。 しかしながら, 面積横拘束筋比が 2.0%, 7.5%と大きくなるにつれて，寸法比が大きいと最大応力が大きくなっており，逆の傾向となっている。

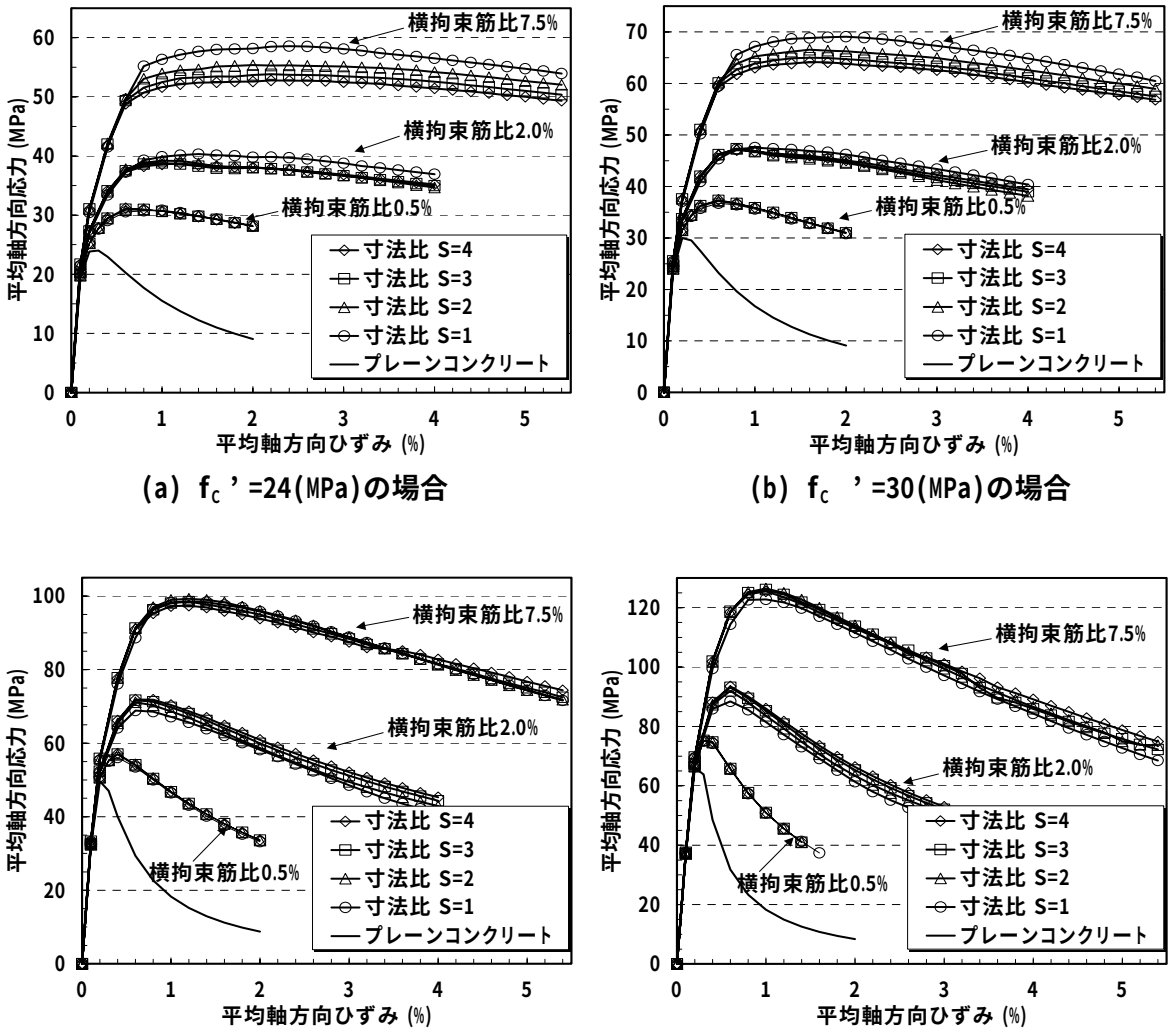
4.　拘束効果について

4.1　等価拘束圧 σ_L

等価拘束圧 σ_L[3]とは，一般応力状態を三軸主応力状態に換算したときの拘束圧である。**図－４**にその概要図を示す。載荷により応力状態が点 A の時，点 A から静水圧軸（I_1 軸）に向かって $1/\sqrt{3}$ の傾きで下ろした直線と静水圧軸（I_1 軸との交点の値を 1/3 したものを等価拘束圧 σ_L とする。

4.2　拘束効率 R

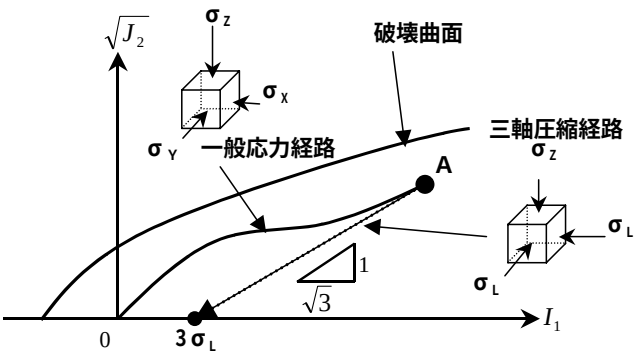
横拘束筋比の違いが内部コンクリートへの拘束効果に及ぼす影響を「拘束効率 *R*」なる指標で考察する。



(a) f_C’=24(MPa)の場合　(b) f_C’=30(MPa)の場合

(c) f_C’=50(MPa)の場合　(d) f_C’=70(MPa)の場合

図－３　解析結果

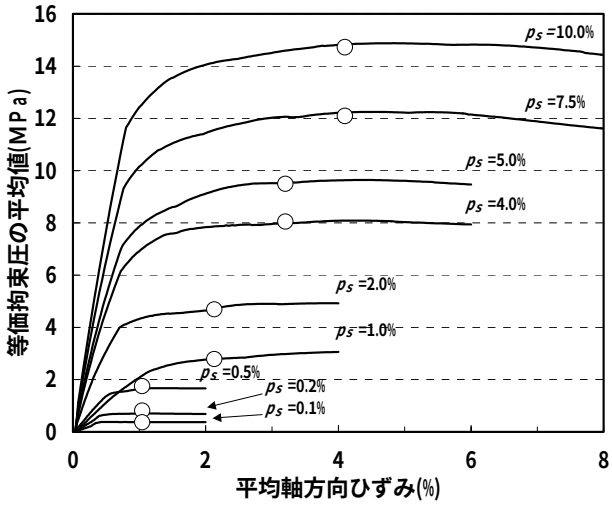


図－４　等価拘束圧 σ_L の概要図

拘束効率 R[4]は次の式で定義される。

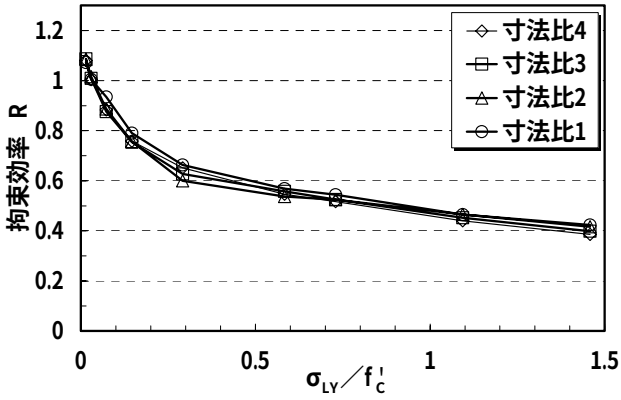
$$R = \frac{\sigma_L}{\sigma_{LY}} \tag{1}$$

ここで σ_L は等価拘束圧であり，σ_{LY} は横拘束筋降伏時に円形断面に働く計算上の側圧で，面積横拘束筋比 p_s と横拘束筋の降伏強度 σ_y との積である。拘束効率 R が大きいということは内部コンクリートに作用している等価拘束圧が大きく，拘束効果が高いことを示している。

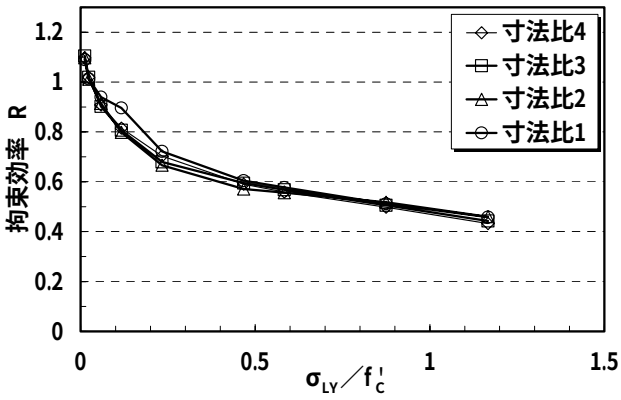


図－５　等価拘束圧の平均値
(f_c'=24(MPa)シリーズ：寸法比 S=1 の場合)

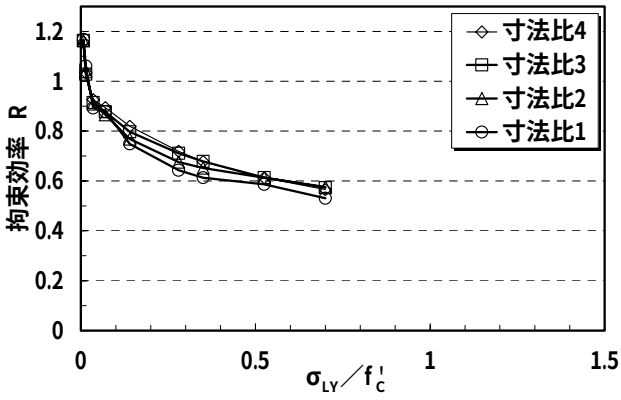
等価拘束圧は１解析ステップについて，解析モデルのガウス点毎に計算できるが，モデル全体に作用している拘束圧の拘束効率を検討するため，各ガウス点での等価拘束圧を平均した値を使用した。また，解析ステップによっても値



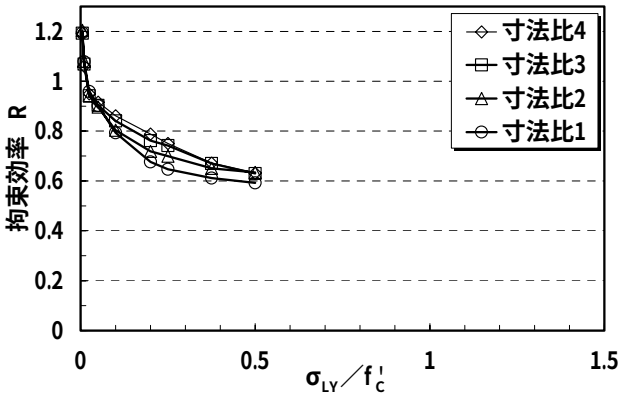
(a) f_c'=24(MPa)の場合



(b) f_c'=30(MPa)の場合



(c) f_c'=50(MPa)の場合



(d) f_c'=70(MPa)の場合

図－６　拘束効率 R と〔計算側圧 σ_{LY}／一軸圧縮強度 f_c'〕との関係

が異なるが，**図－5**の例にあるようにほぼ一定となっている解析ステップの値（図中○印）を採用して拘束効率を計算した。

各シリーズの拘束効率を**図－6**(a)～(d)に示す。縦軸は拘束効率 R，横軸は〔計算側圧 σ_{LY}（$=p_s\times\sigma_y$）／一軸圧縮強度 f_C'〕の強度比である。

面積横拘束筋比，寸法比，コンクリート強度が拘束効率に与える影響について考察する。

(1)　面積横拘束筋比の影響

各シリーズとも面積横拘束筋比が大きくなるに従い，拘束効率は低下していく傾向にある。

(2)　寸法比の違いによる影響

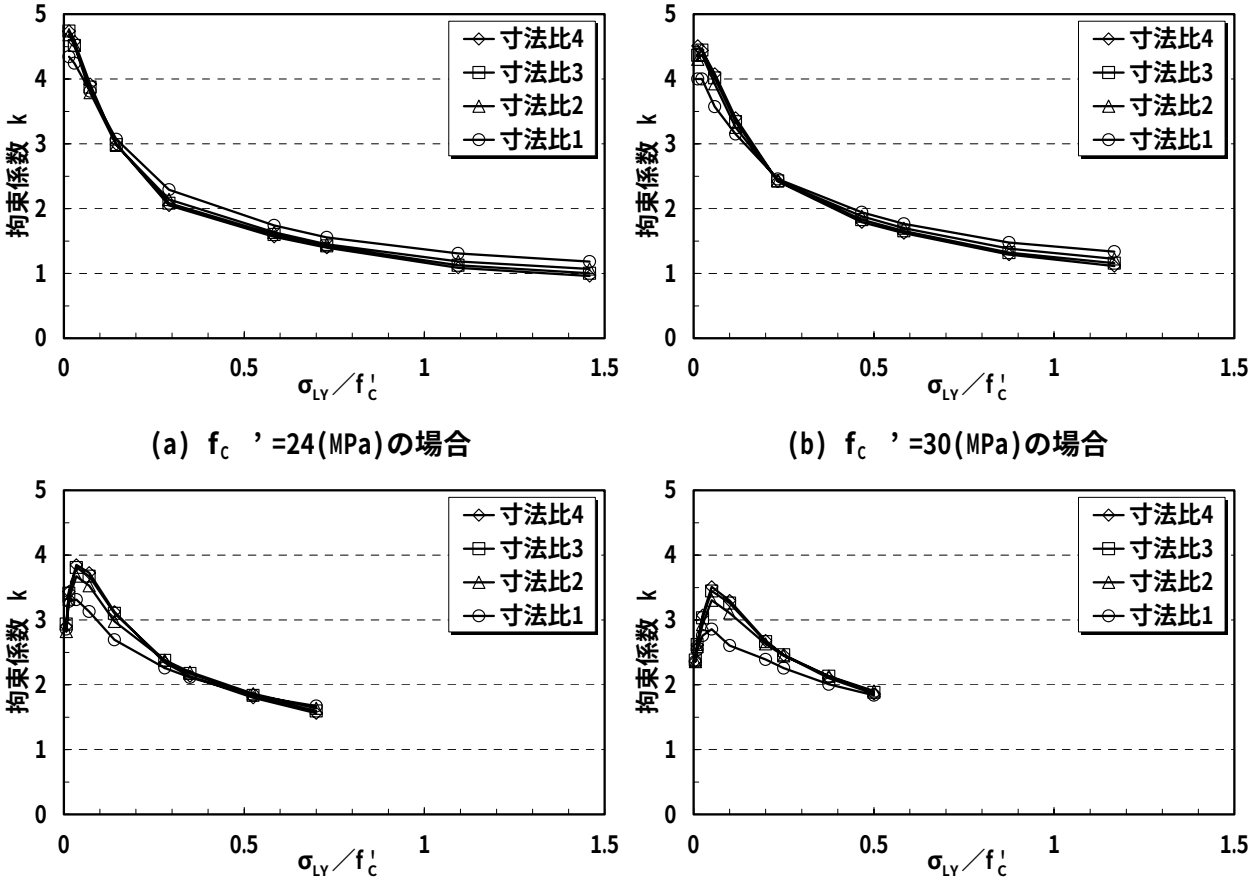
一軸圧縮強度が低い場合（24,30MPa）は，等価拘束圧はコーナー部でもっとも高く内部に向かって徐々に小さくなる傾向にあり，寸法比が大きくなるとその低減度合いは大きくなる。そのため，fc'=24(MPa)シリーズおよび 30(MPa)シリーズでは寸法比が大きくなるに従い，拘束効率 R は小さくなる。それに対し，一軸圧縮強度が高い場合（50,70MPa）は，等価拘束圧はコーナー部のみ卓越し，内部まで拘束効果が及んでいない。また，寸法比が大きくなるにつれてコーナー部の等価拘束圧は大きくなる。そのため，fc'=50（MPa）シリーズおよび 70(MPa)シリーズでは寸法比が大きいほど，拘束効率 R は大きくなるという逆の傾向になる。

(3)　コンクリート強度の違いによる影響

各シリーズとも拘束効率の低減度合いはほぼ同じである。このことから，拘束効率は作用する拘束圧とコンクリートの一軸圧縮強度の比に依存していると考えられる。

4.3　拘束係数 k

拘束圧を受けるコンクリート強度 F_{cf} と寸法比の関係を考察する。一般に，強度 F_{cf} は一軸圧縮強度 F_c，拘束係数 k および側圧 σ_{LY} により式(2)のように定義される。式(2)は一軸圧縮強度 F_c で無次元化した形である。



(a) f_C'=24(MPa)の場合　(b) f_C'=30(MPa)の場合

(c) f_C'=50(MPa)の場合　(d) f_C'=70(MPa)の場合

図－7　計算側圧 σ_{LY} と拘束係数 k との関係

$$\frac{F_{cf}}{F_c} = 1 + k \cdot \frac{\sigma_{LY}}{F_c} \qquad (2)$$

解析結果を基に，寸法比別に拘束係数との関係を**図－８**(a)～(d)に示す。縦軸は拘束係数 k，横軸は〔計算側圧 σ_{LY}（$=p_s \times \sigma_y$）／一軸圧縮強度 f_C’〕の強度比である。

図－７をみると，シリーズによって拘束係数が最大となる〔計算側圧 σ_{LY}／一軸圧縮強度 f_C’〕の値は異なるが，それ以降の拘束係数の低減度合いはほぼ同じである。このことから，拘束係数も作用する拘束圧とコンクリートの一軸圧縮強度の比に依存していると考えられる。

また，最も拘束係数が大きくなる場合の計算側圧を**表－３**に示す。括弧内は計算側圧に相当する面積横拘束筋比である。**表－３**から分かるように，寸法比に関わらず，コンクリート強度が高くなるに従い拘束係数が最大となる時の計算拘束圧（すなわち，面積横拘束筋比）も徐々に大きくなる。

表－３　最大の拘束係数となる時の計算側圧

コンクリート強度 fc’(MPa)	計算側圧 σ_{LY} (MPa)
24	0.35　(p_s=0.1%)
30	0.70　(p_s=0.2%)
50	1.75　(p_s=0.5%)
70	3.50　(p_s=1.0%)

5.　まとめ

本研究の成果をまとめると以下のようである。

(1) 等価拘束圧なる指標を定義して，内部コンクリートへの拘束効果について拘束効率 R を用いて考察した。

(2) 拘束効率 R は面積横拘束筋比が大きくなるにつれて小さくなる。

(3) 拘束効率 R は作用する拘束圧とコンクリートの一軸圧縮強度の比に依存している。

(4) 拘束係数 k が最大となる時の拘束圧は，コンクリート強度が高くなるにつれて大きくなる。

(5) 拘束効率および拘束係数とも，コンクリート強度が 30MPa までは寸法比が大きくなるにつれて小さくなるという寸法効果が現れている。しかし，50MPa 以上の高強度の場合，逆の傾向が見られる。これは内部コンクリートに作用する等価拘束圧の分布の違いによるものである。

(6) 本研究の結果は，横拘束筋の降伏強度が 350MPa の場合に対する結果であり，今後は横拘束筋の降伏強度を変動させた解析を行い，本研究で得られた「等価拘束圧－拘束効率」および「等価拘束圧－拘束係数」関係を検証する必要がある。

謝辞：本研究を遂行するにあたり，中部大学奨励研究費（伊藤），中部大学総合工学研究所補助金（第 6 部門 B），ハイテクリサーチ研究費（文部科学省）ならびに平成 14－15 年度文部科学省科学研究費補助金（基盤研究 C，研究代表者：水野英二）を受けたことを付記し，ここに謝意を表します。

参考文献

1) 星隈順一,川島一彦,長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力－ひずみ関係，土木学会論文集,No.520/ V-28,pp.1-11,1995.8

2) 水野英二,畑中重光：塑性理論によるコンクリートの圧縮軟化特性のモデル化,コンクリート工学論文集 pp.85-95,1991.7

3) 水野英二,畑中重光：コンクリートのひずみ軟化型モデルの開発とコンファインドコンクリートの三次元有限要素解析，土木学会論文集，No.571/V-36,pp.185-197,1997.8

4) 畑中重光，服部宏己，吉田徳雄，谷川恭雄ら：コンファインド高強度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，pp.1-20,1990.5