論文　超高強度コンクリート（170～230N/mm^2）を使用した RC 柱の中心圧縮性状

田野　健治[*1]・松田　拓[*1]

要旨：設計基準強度 170～230N/mm^2 の超高強度コンクリートを使用した鉄筋コンクリート造柱の中心圧縮性状に及ぼす異形 PC 鋼棒を用いた横補強筋の拘束効果を把握するために，柱の中心圧縮実験を実施した。その結果，設計基準強度 170～230N/mm^2 の超高強度コンクリートにおいても，横補強筋を適切に配置することによって拘束効果を得ることが可能であり，鉄筋コンクリート造柱の靭性能を向上させることができることを確認した。また，既往のコンクリートの軸応力－軸ひずみ関係モデルを用いて，実験結果を評価することは概ね可能であるが，最大荷重時以降の性状については検討の余地が残されている等の知見を得た。

キーワード：RC 柱，中心圧縮実験，超高強度コンクリート，靭性，拘束効果

1. はじめに

近年，鉄筋コンクリート（以下，RC）造は，高強度材料や高強度材料を用いた構造部材に関する研究開発が進み，高強度コンクリートの高層建物への適用が多く見られるようになってきた。また，集合住宅を中心に高層化の需要が増加し，それにともない使用する材料はより高強度化する傾向にある。

一方，より高強度のコンクリートの特性を活かすには，地震時に大きな軸力を負担する柱部材への適用が考えられる。しかし，コンクリート強度が高くなるにつれて，コンクリートを拘束することによる圧縮靭性能の改善効果は低くなるとの報告[1)]がある。また他方，超高強度 RC 柱においても，適当量の横補強筋を配することによって圧縮靭性能が改善され，曲げ変形性能が向上するという報告[2)]もある。

十分な曲げ変形性能が期待される柱部材に超高強度コンクリートを使用する場合には，荷重－変形関係におけるピーク時の挙動を把握することが不可欠であり，そのためには圧縮域のコンクリートの応力－ひずみ関係を明らかとする必要がある。しかしながら，圧縮強度 200N/mm^2 以上の超高強度コンクリートを用いた検討例は少ないのが現状である。

そこで本研究では，超高強度コンクリートを使用した RC 柱の横補強筋による拘束効果および圧縮靭性の改善効果を確認するために，設計基準強度（以下，Fc）が 170～230N/mm^{2}のコンクリートを異形PC鋼棒によって拘束した超高強度 RC 柱試験体の中心圧縮実験を計画した。実験では，横補強筋量を連続的に変えた試験体により，拘束量の変化による拘束効果を確認するとともに，既往の文献による軸応力－軸ひずみ関係のモデルを用いた算定結果と実験結果との比較を行う。以降，その結果について報告を行う。

2. 実験計画

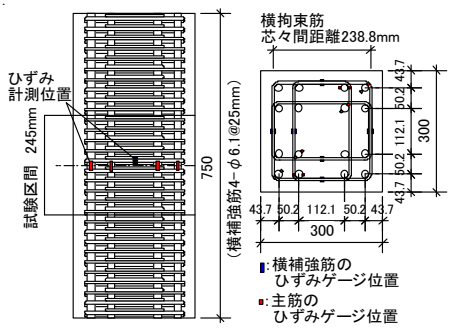
2.1 試験体

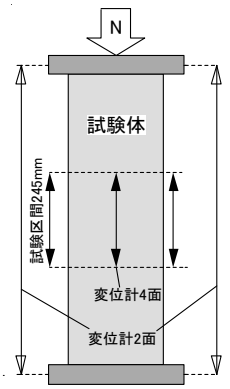
試験体一覧を**表－1** に，試験体の形状および配筋を**図－1** に示す。試験体数は，縮尺約 1/3 を想定した計 8 体である。断面寸法は，かぶりコンクリートの早期剥落による急激な耐力低下を防ぎ安定した応力－ひずみ関係

表－1　試験体一覧

試験体	正方形断面(1辺) mm	コンクリート設計基準強度Fc N/mm^2	横補強筋 配筋	p_w %	ρ_s %
No.1	245	170	4-φ5.1@40	0.67	2.15
No.2			4-φ6.1@40	1.00	3.24
No.3			4-φ6.1@25	1.60	5.19
No.4*	300				
No.5	245	230	4-φ5.1@40	0.67	2.15
No.6			4-φ6.1@40	1.00	3.24
No.7			4-φ6.1@25	1.60	5.19
No.8*	300				

＊：かぶりコンクリートのある試験体
p_g：想定したかぶりを含む断面で求めた主筋比
　主筋16-D16（SD980），pg=3.54%
p_w：想定したかぶりを含む断面で求めた横補強筋比
ρ_s：拘束された断面（コア断面）で求めた体積比





図－1　試験体形状および配筋　図－2　加力・計測状況
（一例，No.4,8）

*1 三井住友建設（株）　技術開発センター　工修　(正会員)

表－2　コンクリートの使用材料

	種類	記号	物性
結合材(B)	低熱ポルトランドセメント	LC	密度：3.24g/cm^3，比表面積：3300cm^2/g
	早強ポルトランドセメント	HC	密度：3.13g/cm^3，比表面積：4550cm^2/g
	ジルコニア起源シリカ質微粉末	ZSF	密度：2.25g/cm^3，比表面積：10.2m^2/g
細骨材	フェロニッケルスラグ	S	密度：2.96g/cm^3，吸水率：0.76%，F.M.：2.2
粗骨材	硬質砂岩1305	G	密度：2.66g/cm^3，吸水率：0.84%，最大寸法：13mm
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸系

表－3　コンクリートの調合およびフュレシュ性状

F_C [N/mm^2]	W/B [%]	単位量[kg/m^3]						フロー時間 [sec.]		スランプフロー [cm]	空気量 [%]	コンリート温度[℃]	気温 [℃]
		W	B=LC+HC+ZSF			S	G	50cm	停止				
			LC	HC	ZSF								
230	13	150	808	115	231	366	848	4.6	＞180	65	2.6	19.3	14.1
170	18	150	584	83	167	679	848	4.5	＞180	80	2.3	28.8	17.5

を得る目的のかぶりのない断面（245mm 角）と，実際の柱を想定したかぶりのある断面（300mm 角）の 2 種類である。試験体の高さは，かぶりのある試験体の柱幅の 2.5 倍（750mm）とした。実験因子は，コンクリートの圧縮強度と横補強筋比である。コンクリートの使用材料を**表－2** に示す。コンクリートの使用材料・調合は既報 [3)]を参考とし，試験体の設計基準強度は 170，230N/mm^2 とした。結合材（B）には低熱ポルトランドセメント（L）とジルコニア起源シリカ質微粉末（ZSF）と早強ポルトランドセメント（H）を質量比 7：2：1 で混合したものを使用した。細骨材はフェロニッケルスラグ細骨材を，粗骨材は茨城県桜川産硬質砂岩砕石（6 号）を使用した。化学混和剤（SP）はポリカルボン酸系の高性能減水剤を使用した。コンクリートの調合およびフレッシュ性状を**表－3** に示す。コンクリートの練混ぜには強制二軸ミキサを使用した。練混ぜ順序および時間は，B 投入（30 秒）→W+SP 投入（180 秒）→G 投入（180 秒）とした。Fc=230N/mm^2 のスランプフロー値が 80cm と大きいが，Fc=230，170N/mm^2 ともに材料分離することなく良好なフレッシュ性状が得られ，速やかに柱試験体の打設を行うことができた。

柱試験体の養生条件は，既報 [4)]で検討した 70℃蒸気養生を参考にした。柱試験体は，4 側面を合板型枠+厚さ 50mm の断熱材，上下面を厚さ 50mm の断熱材で覆い，蒸気養生設備（断熱シート内）にて 20℃条件で 48 時間前養生した。その後，断熱材を取り外すことなく 70℃蒸気養生を 6 日間実施後に，蒸気出力を制御して 2 日間かけてコンクリート温度を外気温まで降下させた。なお，片寄らの論文 [5)]では，Fc150N/mm^2 の実大有筋試験体で自己収縮によるひび割れの確認が報告されているが，本研究で作製した試験体では，ひび割れ等は観察されることはなかった。また，φ100×200 の円柱供試体（以下，TP）

表－4　コンクリートの材料試験結果

試験体	圧縮強度 N/mm^2	弾性係数 (×10^4)N/mm^2	割裂強度 N/mm^2	ポアソン比
No.1～3（TP）	170	5.01	7.61	0.21
No.5～7（TP）	221	5.34	8.26	0.22
No.4（ｺｱTP）	188	－	－	－
No.8（ｺｱTP）	230	－	－	－

表－5　鉄筋の材料試験結果

鉄筋径	降伏点 N/mm^2	引張強さ N/mm^2	弾性係数 (×10^5)N/mm^2	降伏ひずみ μ(×10^{-6})	伸び %
D16	893	999	1.84	5199	5.7
φ5.1	1421	1470	1.99	7714	9.9
φ6.2	1271	1445	2.01	6873	9.4

*降伏点はG.Y.P法による

を簡易鋼製モールドで作製して，ビニルシートで封かんし，蒸気養生シート内で養生した。

横補強筋には，直径 5.1，6.2mm の異形 PC 鋼棒（降伏点 σ_y=1275N/mm^2）を一筆書きで囲形に成形したものを使用し，横補強筋比（以下，Pw）を 0.67，1.00，1.60% の 3 種類とした。主筋は D16（SD980）を断面内に 16 本配置した。

本研究で使用したコンクリートの材料試験結果を**表－4** に，鉄筋の材料試験結果を**表－5** に示す。なお，コンクリートの材料試験結果には TP に加え，同じコンクリートを試験体と同条件で養生したブロック（W×D×H=300×300×750mm）からコアを抜き出したφ100×200 の円柱供試体（以下，コア TP）の結果も示す。

2.2 加力方法および計測方法

加力・計測状況を**図－2** に示す。加力は，24MN 圧縮試験機を用いて単調一軸圧縮載荷にて行った。試験区間は試験体中央の 245mm（かぶりなし断面の幅と同じ）とし，変位は 4 面に設置した変位計により計測を行った。また，試験体上下にある載荷板間（750mm）の 2 面を変位計により計測し制御変位とした。鉄筋のひずみは，試

験体高さ中央位置において主筋および横補強筋について，ひずみゲージを用いて計測した。

3. 実験結果

3.1 軸応力－軸ひずみ関係

最大荷重時における軸応力と鉄筋の軸ひずみを**表－6**に，各試験体のコンクリートの軸応力－軸ひずみ関係を**図－3**に示す。なお，以下 TP の実圧縮強度を σ_{TP} と表記する。また，図中には hognestad 等の提案した[6]，円柱供試体（プレーンコンクリート）の圧縮試験から得られる圧縮強度を用いた角柱の最大荷重計算式(1)の計算結果も合わせて示す。

$$\sigma u = \left(0.85 \cdot fc' \cdot Ac + Es \cdot \varepsilon_{cu}' \cdot Ast\right) / Ac \qquad (1)$$

ここに，σu：角柱の最大荷重計算値（N/mm^2）

fc’：コンクリートの圧縮強度（N/mm^2）

Ac：コンクリートの断面積（N/mm2）

Es：鉄筋のヤング係数（N/mm^2）

εcu’：コンクリートの終局ひずみ

Ast：鉄筋の断面積（N/mm^2）

Hognestad 等は，円柱供試体の試験結果から角柱の最大強度を推定するにあたり，コンクリート断面の負担力と鉄筋断面の負担力の累加が成立するとしているが，その際には，コンクリート断面の負担力に低減係数 0.85 を乗ずる必要があるとしている。すなわち，角柱試験体のコンクリート断面は，円柱供試体の圧縮強度まで軸力を負担できないことを意味している。

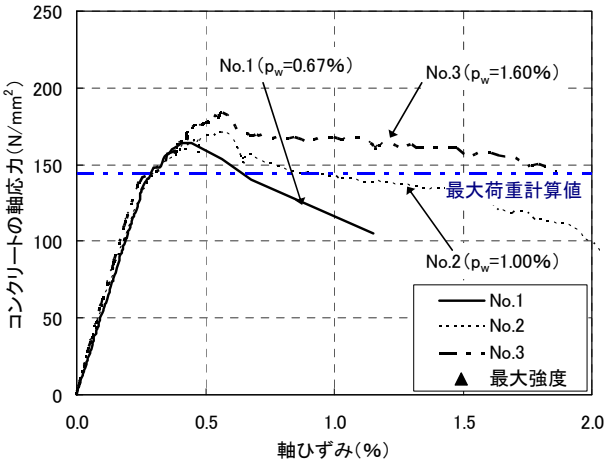
コンクリートの軸応力は，全体の載荷荷重から軸方向に配置されている主筋の負担する荷重を減じ，その値をコンクリートの断面積で除して求めた。軸ひずみは，最大荷重までは試験区間の 4 本の変位計により計測された値を試験区間（245mm）で除して求め，最大荷重以降については試験区間の変位計の値がばらつくため，上下載荷板間の 2 本の変位計により計測された値を試験体高さ（750mm）で除して求めた。

かぶりのない試験体（σ_{TP}=170N/mm^2）は，最大荷重の約 7 割程度の荷重で，試験体表面の薄いかぶり部分（厚さ 2mm 程度のモルタル）が剥落をはじめ，その後，徐々に剛性が低くなり最大荷重に至った。最大荷重時のコンクリートの軸応力および軸ひずみは，概ね横補強筋比の増大にともない大きくなる傾向を示した。最大荷重時以降の載荷における荷重の低下は，横補強筋比が大きくなるにつれて緩やかになり安定したものとなった。

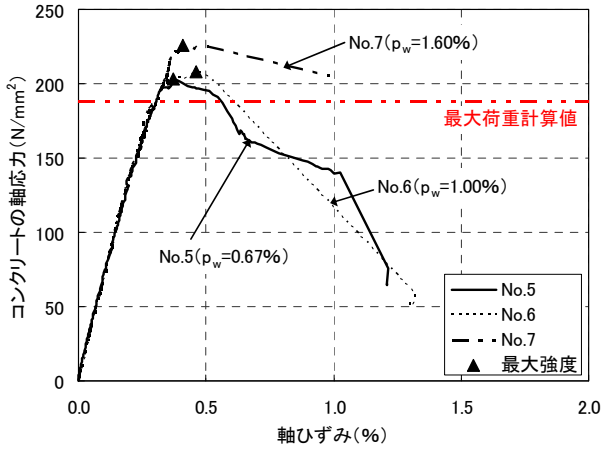
かぶりのない試験体（σ_{TP}=221N/mm^2）は，最大荷重の 7 割程度の荷重から，試験体表面の薄いかぶり部分が剥落をはじめたが，軸応力－軸ひずみ関係にはほとんど影響をもたらさなかった。その後，最大荷重に達すると

表－6　最大荷重時における軸応力と鉄筋の軸ひずみ

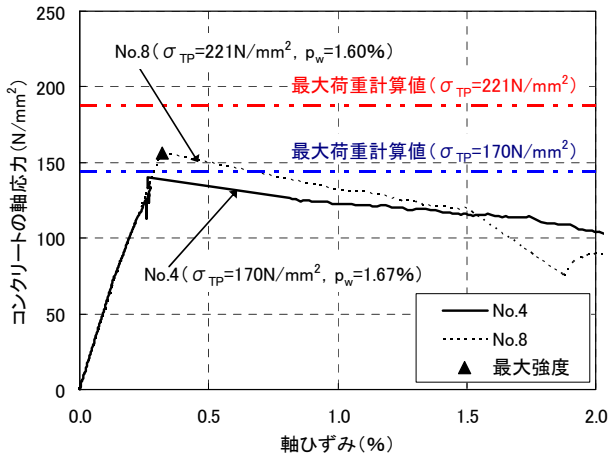
No.	STEP	最大強度時 軸応力 N/mm^2	軸ひずみ %	主筋 軸ひずみ %	横補強筋(中) 軸ひずみ %	横補強筋(外) 軸ひずみ %
No.1	113	164.1	−0.45	−0.42	0.15	0.17
No.2	195	169.2	−0.53	−0.49	0.16	0.14
No.3	236	183.7	−0.56	−0.48	0.21	0.20
No.4	198	139.9	−0.26	−0.32	0.06	0.06
No.5	178	126.8	−0.23	−0.35	0.09	0.09
No.6	270	203.0	−0.37	−0.43	0.13	0.15
No.7	200	207.8	−0.46	−0.47	0.14	0.16
No.8	261	225.8	−0.41	−0.52	0.13	0.18
No.9	201	156.3	−0.32	−0.35	0.08	0.08
No.10	197	147.8	−0.36	−0.33	0.10	0.09



(a)　かぶりコンクリートなし（σ_{TP}=170N/mm^2）



(b)　かぶりコンクリートなし（σ_{TP}=221N/mm^2）



(c)　かぶりコンクリートあり

図－3　コンクリートの軸応力－軸ひずみ関係

σ_{TP}=170N/mm^2 試験体と比較して，急激に荷重が低下した。最大荷重時のコンクリートの軸応力および軸ひずみは，概ね横補強筋比の増大にともない大きくなる傾向を示した。また，最大荷重時以降の載荷における荷重の低下は，No.7 試験体（pw=1.60%）では同コンクリート強度の他の 2 体の試験体に比べ緩やかであったものの，No.5（pw=0.67%），No.6（pw=1.00%）では横補強筋比の違いによらず，急なものとなった。

かぶりのある試験体（σ_{TP}=170,221N/mm^2 ともに）は，最大荷重の約 9 割程度の荷重で破裂音とともにかぶりコンクリートの一部が剥落し，その後，最大荷重に至った。最大荷重以降は，かぶりコンクリートを除々に押分けながら荷重が低下した。

なお，全試験体に共通であるが，最大荷重時には横補強筋の降伏は見られなかった。しかし，最大荷重時以降の載荷においては，一部の試験体において横補強筋が折り曲げ部において破断していることが確認された。

最大荷重の実験値と計算値の比較では，かぶりのない試験体（σ_{TP}=170,221N/mm^2）は，実験値が計算値を約 13～19%ほど上回った。一方，かぶりのある試験体（σ_{TP}=170,221N/mm^2）は約 13～17%ほど下回った。このことは，かぶりコンクリートは早期に剥落し，最大荷重時の荷重寄与率が小さいことによるものと思われる。

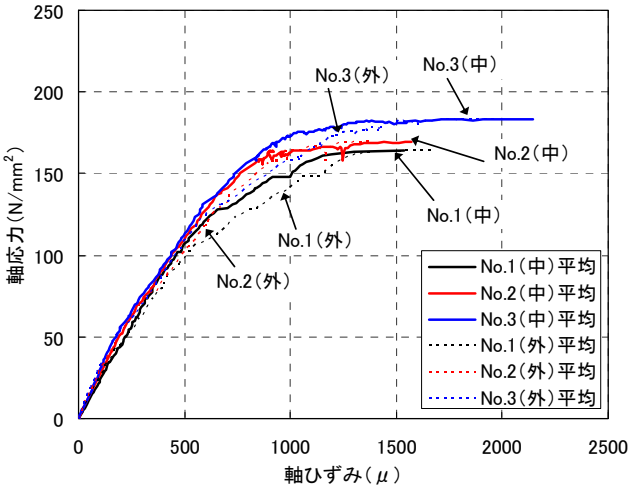
3.2 軸応力ー横補強筋ひずみ関係

各試験体の最大荷重時までのコンクリートの軸応力ー横補強筋ひずみ関係を**図ー4** に示す。破線は横補強筋の最外縁に貼付されたひずみゲージの平均値であり，実線は断面中に貼付されたひずみゲージの平均値である。

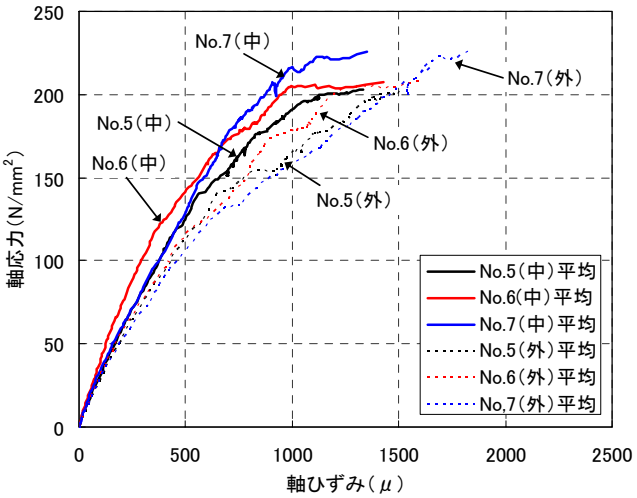
かぶりのコンクリートのない試験体（σ_{TP}=170N/mm^2）は，最大荷重の約 7 割程度の荷重から横補強筋のひずみの増加割合が大きくなりはじめ，その後，最大荷重に至った。同軸応力時におけるひずみは，最外縁より断面中の方が若干ではあるが大きく，横補強筋比が小さいほど大きな値を示している。

かぶりコンクリートのない試験体（σ_{TP}=221N/mm^2）は，最大荷重の約 7 割程度の荷重から横補強筋のひずみの増加割合が若干であるが大きくなりはじめ，その後，最大荷重に至った。同軸応力時におけるひずみは，最外縁より断面中の方が大きく，横補強筋比が小さいほど大きな値を示している。また，最大荷重時の横補強筋のひずみを σ_{TP}=170N/mm^2 の試験体と比べると，σ_{TP}=221N/mm^2 試験体は最大荷重時のひずみが小さい。このことは，コンクリートの強度が高くなるにつれて，横補強筋による拘束効果が得難くなることを示している。

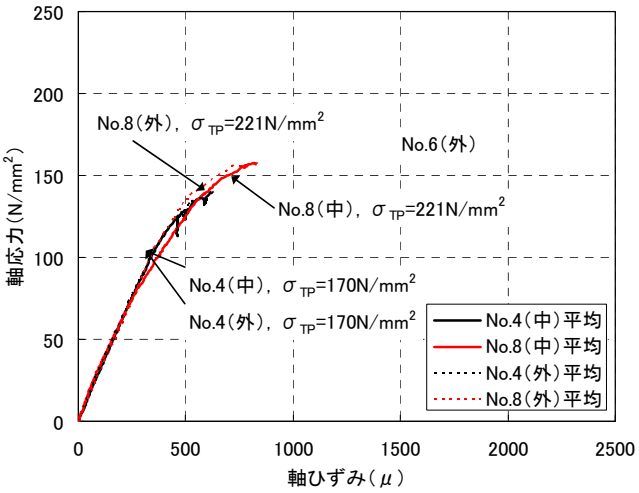
一方，かぶりコンクリートのある試験体（σ_{TP}=170,221N/mm^2 ともに）は，かぶりコンクリートのない試験体と異なり，最外縁および断面中のひずみはほぼ同様な性状を示している。このことは，かぶりコンクリートの存在が横補強筋の効き方に影響を及ぼしていることによるものと思われる。



(a)　かぶりコンクリートなし（σ_B=170N/mm^2）



(b)　かぶりコンクリートなし（σ_B=230N/mm^2）



(c)　かぶりコンクリートあり

図ー4　コンクリートの軸応力ー横補強筋ひずみ関係

3.3 横補強筋比による影響

円柱供試験体（TP）とコア抜きした円柱供試体（コアTP）の圧縮強度を用いて，実験結果を基準化した値と横補強筋比の関係を**図－5** に示す。(a)，(b) はコンクリートの最大軸応力について，(c) は最大軸応力時のひずみについて示している。横補強筋比の増加にともない最大軸応力および最大軸応力時のひずみが大きくなる傾向を示しており，横補強筋による拘束効果が認められる。また，コンクリート強度の増加やかぶりコンクリートの存在により，拘束効果が小さくなる傾向であることがわかる。なお，図中には 3.1 で示した式(1)のコンクリートの低減係数（0.85）を示している。かぶりのない試験体（σ_{TP}=170,221N/mm^2）は，0.85 を上回るが，かぶりのある試験体は 0.85 を下回る。このことは 3.1 でも触れたように，かぶりコンクリートが最大荷重に寄与していないことが原因であると思われる。

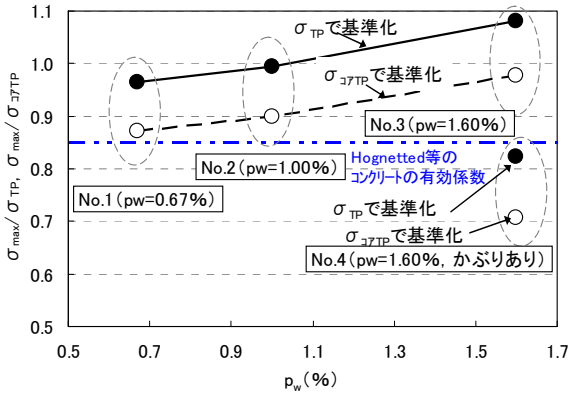
4. 拘束効果の検討

4.1 最大荷重の実験値と計算値

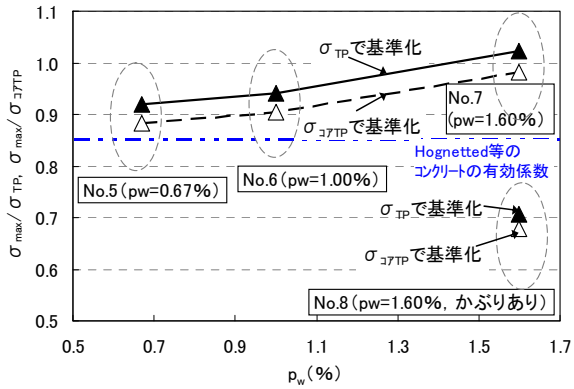
ここでは，かぶりコンクリートのない試験体について，既往の拘束コンクリートモデルとの比較を試みる。検討に用いる拘束コンクリートモデルとしては，六車等のモデル [2]と小室等のモデル [7]とした。六車等は横拘束コンクリートの応力ひずみ曲線実測結果を，プレーンコンクリートの応力ひずみ曲線における接線弾性係数Ｅｉ，最大応力時ひずみ ε m，曲げ圧縮限界ひずみ ε u，圧縮強度 fc'の実測値と研究で導いた横拘束係数 Cc を用いて整理し，拘束コンクリートのモデル化を提案している。小室等は，六車等のモデルの特性値を変更し，最大荷重以降の圧縮特性を超高強度コンクリートに適用可能な拘束コンクリートのモデルとして提案している。

本研究では次節で，小室等の提案モデルによる計算結果と実験結果との比較を行っている。ただし，小室等のモデルの適用範囲は圧縮強度 180N/mm^2 程度までであり，本研究で取り扱う圧縮強度 200N/mm^2 を超えるコンクリートに関しては適用範囲外となるが，ここでは参考のために敢えて用いた。

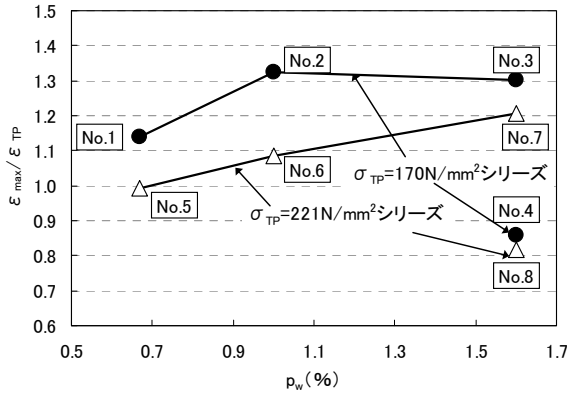
各モデルによる最大荷重の計算値と実験値の比較を**図－6** に示す。図中の白抜きが σ_{TP}=170N/mm^2 の試験体，黒塗りが σ_{TP}=221N/mm^2 の試験体である。これより，σ_{TP}=170N/mm^2 の試験体においては，六車等，小室等のモデルは実験値を多少過大に評価しているものの，横補強筋比の変化を概ね適切に取り扱っているものと思われる。一方，σ_{TP}=221N/mm^2 の試験体においては，六車等のモデルは横補強筋比の影響を表現できているものの，実験値を過大に評価している。小室等のモデルは，実験値を概ね評価できているものの，横補強筋比の変化によ



(a)　最大軸応力（σ_{TP}=170N/mm^2）

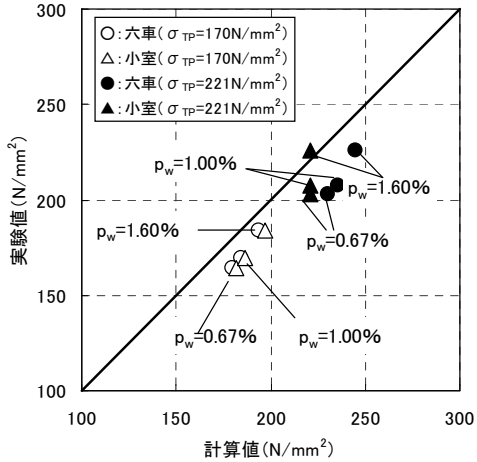


(b)　最大軸応力（σ_{TP}=230N/mm^2）

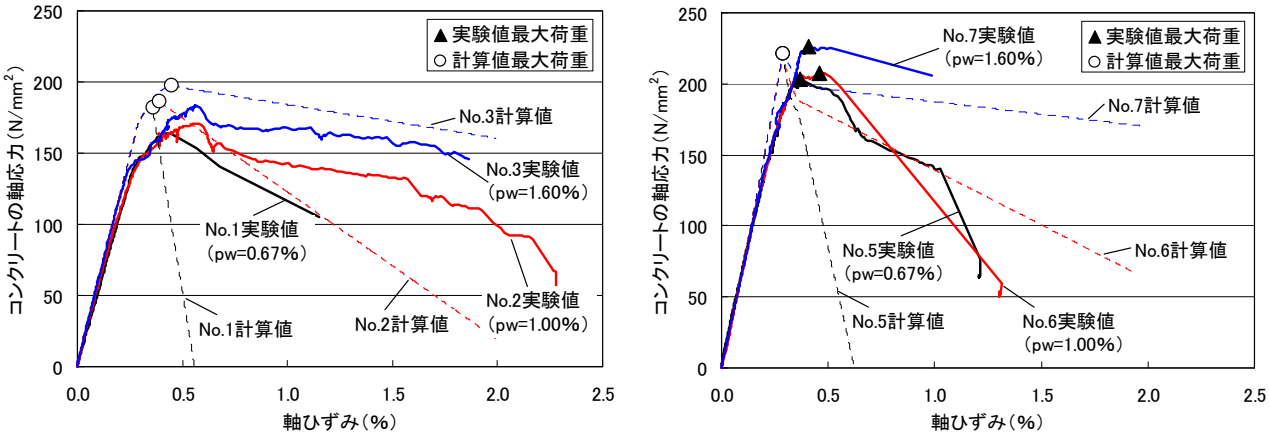


(c)　最大軸応力時ひずみ

図－5　基準化実験値と横補強筋比関係



図－6　各モデルによる最大荷重の計算値と実験値の比較



(a)　σ_{TP}=170N/mm²　　(b)　σ_{TP}=221N/mm²

図－7　拘束コンクリートの実験値と既往のモデルの比較

る最大荷重への影響を反映していないようである。

4.2 既往のモデルと実験値の比較

かぶりコンクリートのない試験体の実験値と小室等が提案しているコンクリートの軸応力－軸ひずみ関係モデルとの比較を**図－7** に示す。

σ_{TP}=170N/mm² の試験体では，最大荷重計算値は実験値を過大に評価し，最大荷重時の軸ひずみの計算値は，実験値を過小に評価していることがわかる。

σ_{TP}=221N/mm² の試験体では，最大荷重計算値は実験値をほぼ適切に評価し，最大荷重時の軸ひずみの計算値は，実験値を若干過小評価していることがわかる。

σ_{TP}=170，221N/mm² の試験体ともに，最大荷重時以降の性状は，計算値と実験値に大きな隔たりがある。今後の検討課題である。

5. まとめ

圧縮強度が 170，221N/mm² の超高強度コンクリートを使用した RC 柱の横補強筋による拘束効果および圧縮靭性の改善効果を確認するために中心圧縮実験を実施し，以下の知見を得た。

（1）圧縮強度 σ_{TP}=170，221N/mm² のコンクリートともに材料分離することなく良好なフレッシュ性状が得られ，速やかに柱試験体の打設を行うことができた。また，脱型後に試験体表面にひび割れ等は観察されることはなかった。

（2）圧縮強度 σ_{TP}=170，221N/mm² の超高強度コンクリートであっても，横補強筋を適切に配置することによって拘束効果を得ることが可能であり，コンクリートの圧縮靭性能を向上させることができる。

（3）コンクリートの軸応力－軸ひずみ関係を，既往の小室等のモデルを用いてモデル化を試みた結果，概ね評価が可能であることを確認した。しかし，最大荷重時以降の性状については，十分に評価がなされているとはいえず，今後，多くの実験が行われ，最大荷重以降の性状が解明されることが望まれる。

謝辞

本実験の実施にあたり，住友大阪セメント（株），日本シーカ（株），SMC コンクリート（株），JFE テクノワイヤ（株），共栄製鋼（株）の皆様にご協力いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1) 六車　熙ほか：高強度横補強筋による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究，日本建築学会学術講演梗概集 C-2，pp.1253-1254，1982.9

2) 六車　熙ほか：横補強による高強度コンクリートのじん性改善に関する研究，第 5 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp317-320，1983

3) 河上浩司ほか：200N/mm² 級超高強度の実用化に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1489-1494，2009.6

4) 蓮尾孝一ほか：200N/mm² 級超高強度 PCa コンクリートの検討，日本建築学会学術講演梗概集，材料施工，pp.991-994，2010.9

5) 片寄　哲務ほか：高強度コンクリートの弱材齢時における力学特性と自己収縮挙動，第 28 回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp497-502，2006

6) Mattock,A.H.;Kriz,L.B.Hognestad,E.”Rectangular concrete stress distribution in ultimate strength design” .Journal of the ACI.february 1961.

7) 小室　努ほか：100～180N/mm² の超高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱の圧縮特性，日本建築学会構造系論文集，577 号，pp77-84，2004.3