

論文

[2110] 高強度材料を使用した RC 柱の中心軸圧縮実験

丸田 誠*1・別所佐登志*1

1. はじめに

近年、RC材料の高強度化に伴う多くの研究・開発が行われ、40階を超える高層建物も建設されるようになった。筆者等は高強度材料を使用した高層建物を対象としたRC柱に関して各種の実験的研究を近年行ってきた^{1)~3)}。一方、崎野らの研究^{4)~6)}等で高強度材料を用いた正方形断面、円形断面高強度柱の軸方向性状についても明確になってきている。柱の軸拘束は丸フープと角フープではその効果は異なることが言われているが、筆者等が対象としている高層RC柱では、丸フープと角フープを組み合わせ用いており、その効果を定量化する必要がある。本研究では、高層RC下層階柱を対象に中心軸圧縮実験を行い軸耐力及び変形状を把握し、既往の拘束コンクリートの評価式等との比較を行った。

2. 実験計画

2.1 試験体

代表的な試験体の形状・寸法を図-1に、試験体パラメータ一覧を表-1に示す。試験体は実物の約1/2.6縮尺模型12体であり、この試験体の他に無筋コンクリートの試験体3体を加えた15体について中心軸圧縮実験を実施した。

主筋はSD490を16本、横補強筋（溶接による閉鎖型フープ）にはUSD785を標準とした。ただし、No.10,11の横補強筋（溶接による閉鎖型フープ）にはSD390、No.5,6の芯筋にはUSD685,8本を用いた。使用材料の力学的性質を表-2に示す。コンクリート強度は試験時目標 $\sigma_B=600\text{kgf/cm}^2$ とし、水セメント比35%、細骨材率45%とし高性能AE減水剤を用いて調合した。粗骨材は最大粒径が10mmの豆砂利とした。コンクリート強度は試験時現場封緘養生で $\sigma_B=505\sim 535\text{kgf/cm}^2$ となった。

表-1 パラメータ一覧

試験体名	横筋Pw(%) [ヒッチ]	軸筋比 Pg(%)	特徴	備考
No.1	0.6 [@71]	3.54	標準	
No.2	1.2 [@36]	3.54	高補強	
No.3	0.6 [@71]	3.54	かぶりなし	
No.4		-	かぶり主筋なし	
No.5		5.31	芯筋あり	
No.6		5.31	芯筋+芯筋フープ	
No.7	0.3 [@71]	3.54	配筋組み合わせ	
No.8	0.6 [@36]	3.54	丸フープと角フープの交互配筋	
No.9	1.2 [@18]	3.54	(みかけ@の減少)	
No.10	0.6 [@71]	3.54	横筋 SD390	Pw・σy=24 S D390 … 0.6% USD785 … 0.3%
No.11	1.2[@36]	3.54	横筋 SD390	
No.12	0.3 [@142]	3.54	低補強	
No.13~15	-	-	無筋試験体	シリンダ-との比較

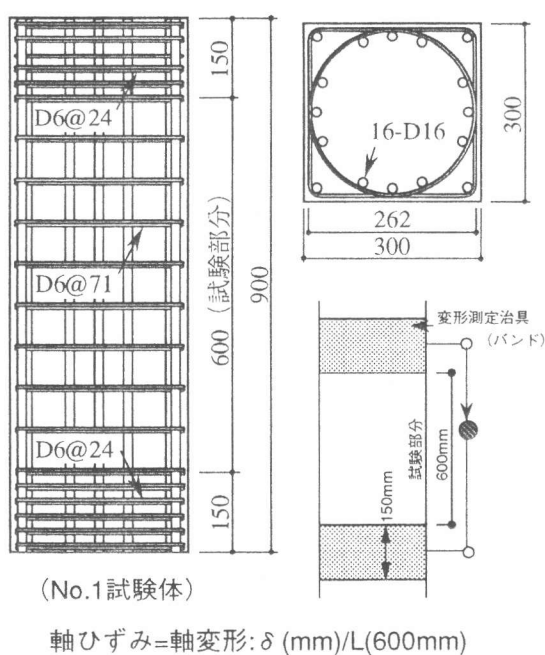


図-1 試験体形状・配筋

*1 鹿島 技術研究所 (正会員)

2.2 加力方法及び計測方法

加力には東京大学総合試験場の2000tf大型構造試験機を用い、単調圧縮荷重を行った。急激な破壊を防ぐため、図-2に示すような200tfジャッキ4台で試験機のヘッドを抑えながら軸ひずみ(軸変形/試験部分長さ600mm)4%程度まで加力した。²⁾

変形の測定は、かぶりが剥離した後も計測できるように、図-1中に示すバンド型に巻いた幅150mmの計測治具間(600mm:2D)で行った。鉄筋ひずみの計測は、主筋、芯筋、丸フープ、角フープの主要点についてワイヤストレインゲージで行った。

3. 実験結果

3.1 実験経過及び荷重-軸変形関係

実験結果のうち各試験体の最大耐力時と鉄筋降伏時の荷重を一覧として表-3に示す。破壊状況及び荷重-軸変形(軸ひずみ)関係を、各パラメータ毎に比較して図-4に示す。最終破壊状況の一例を図-3に示す。

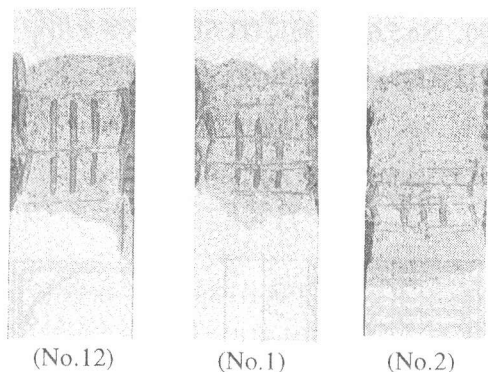


図-3 最終破壊状況

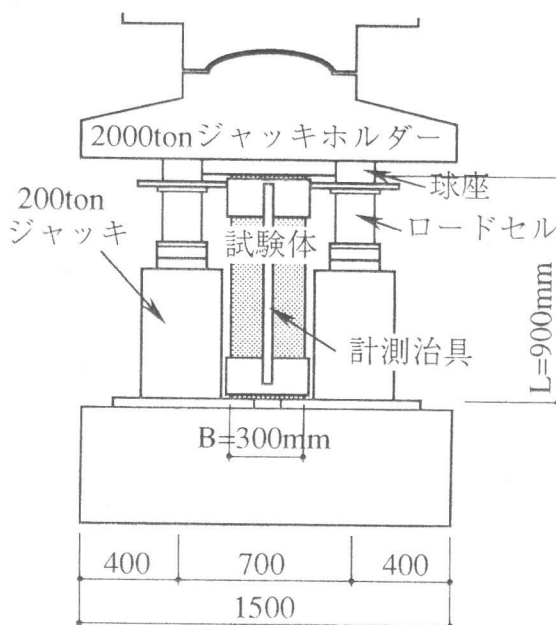


図-2 加力・測定状況

表-2 使用材料の力学的性質

○コンクリート

試験体	圧縮強度 σ_c (kgf/cm ²)	弾性係数* ^{1,2} ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)
No.1, No.2, No.3, No.4	535	3.05	33.9
No.5, No.6, No.8, No.9 No.12, No.15	517	3.06	33.4
No.7, No.10, No.11, No.12	505	3.08	31.8

*1: 各値は3本の平均値 *2: 各値は実験時現場封緘養生の値
*3: $\sigma_B/3$ 時の割線剛性の値

○鉄筋

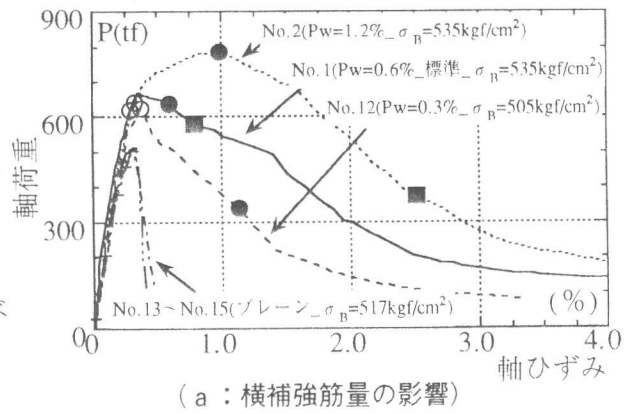
種類	降伏点 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (10^4 kgf/cm ²)	伸び (%)
SD490(D16)	5840	7460	2.10	17.3
USD685(D16)	7700*1	9770	2.09	15.4
USD785(D6)	8630	10770	1.85	7.8
SD390(D6)	4580	5980	2.02	24.0

*1: 0.2%オフセット値

表-3 実験結果一覧

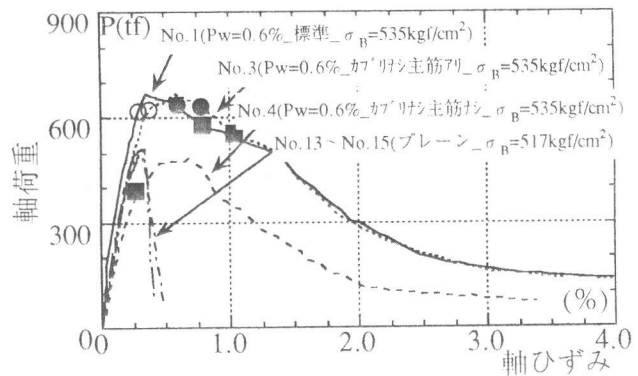
試験体	最大耐力時		主筋降伏時		丸フープ降伏時		角フープ降伏時	
	荷重(tf)	軸ひずみ(μ)	荷重(tf)	軸ひずみ(μ)	荷重(tf)	軸ひずみ(μ)	荷重(tf)	軸ひずみ(μ)
No.1	667	3525	619	2900	644	5575	637	6183
No.2	785	9850	626	3100	773	9166	587	18266
No.3	667	5883	623	3800	645	7216	585	9491
No.4	485	6866	-----	-----	457	7791	-----	-----
No.5	772	4358	697	3525	731	8150	709	9025
No.6	802	4408	730	3275	771	7250	757	8075
No.7	622	4183	597	3808	547	5708	502	7125
No.8	682	4091	647	3600	633	7541	570	9508
No.9	745	10116	652	3483	743	10116	707	12433
No.10	672	4266	597	2708	657	4266	623	3658
No.11	675	3991	603	3425	672	4158	655	7400
No.12	622	3741	621	3741	521	5316	518	5891
No.13	512	2858	-----	-----	-----	-----	-----	-----
No.14	512	3158	-----	-----	-----	-----	-----	-----
No.15	515	3358	-----	-----	-----	-----	-----	-----

1) 横補強筋量 (図-4 a 無筋、 $P_w=0.3, 0.6, 1.2\%$)
 No.1, No.2, No.12と無筋の試験体No.13~15について比較すると、耐力・靱性とも横補強筋の増大によってかなり改善されることがわかる。主筋の降伏がNo.1, No.2, No.12試験体とも同程度の荷重・ひずみ時に生じていることから、その後の性状の違いには拘束されたコンクリートの性状が現われていると考えられる。最大耐力は $P_w=1.2\%$ のNo.2に比べ $P_w=0.6\%$ のNo.1では約85%、 $P_w=0.3\%$ のNo.12では約80%となっている。No.2では、最大荷重時に丸フープの降伏が生じ、高強度横補強筋が有効に働いていることが分かる。

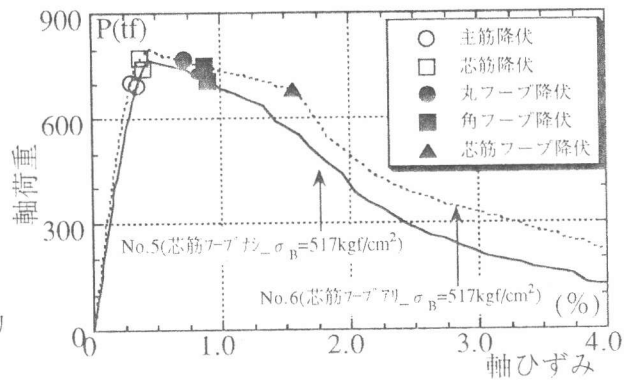


(a: 横補強筋量の影響)

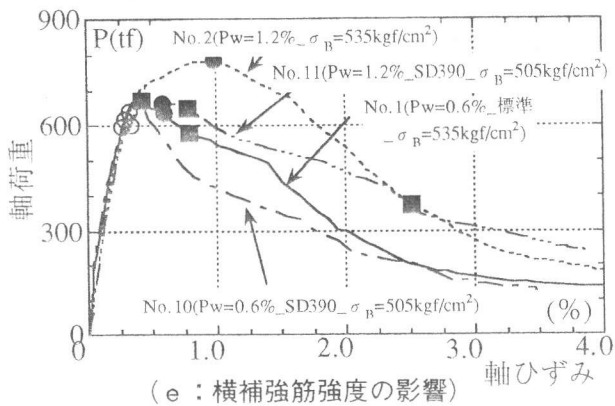
2) かぶり及び軸方向主筋の影響 (図-4 b)
 無筋、標準、かぶりなし、かぶり+主筋なし)
 $P_w=0.6\%$ のNo.1を標準とし、このNo.1からかぶりを省いたものをNo.3、かぶりと主筋を省いたものをNo.4としてその影響を比較する。この図にも無筋の試験体No.13~15の結果も合わせて示す。No.1とNo.3を比較すると、かぶりの有無は、コンクリート断面積が異なるための初期剛性の違い、かぶりコンクリート剥離時(ピーク)の鋭角的に荷重低下する点異なる程度で各降伏及び最大耐力・大変形時性状は殆ど変わらない。かぶりの影響は最大耐力には影響しないが、その最大耐力時の軸ひずみに影響し、No.3がNo.1より1.7倍大きくなった。かぶりを省いただけのNo.3とかぶり+主筋を省いたNo.4ではその耐力の差(182tf)は、主筋断面積×降伏点(185tf)とほぼ一致した。No.4の耐力が無筋のNo.13~15試験体よりも小さいのは、コンクリート断面積が異なるためである。以上より拘



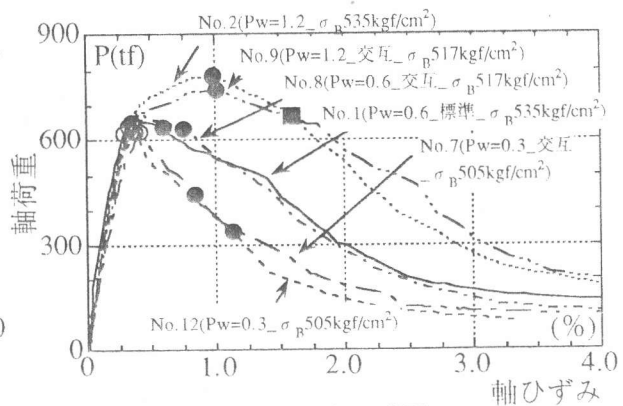
(b: かぶり及び軸方向主筋の影響)



(c: 芯筋フープ筋の影響)



(e: 横補強筋強度の影響)



(d: 交互配筋の影響)

図-4 荷重-軸変形(ひずみ)関係

束されたコンクリート強度を評価する際に、軸鉄筋がある場合には鉄筋負担分 ($A_g \times \sigma_{gy}$) を差し引いてコア断面積で除した値で評価できる。

3) 芯筋フープ筋の影響 (図-4 c 外柱: 芯筋フープ筋あり、なし)

高層RC低層階外柱では芯筋を用いており、その芯筋にも横補強筋が巻かれる。文献2)の結果では、外柱(芯筋柱)の軸耐力が、その芯筋補強筋も含めた横補強筋量の増大に伴い増大したため、主筋の横補強筋量は同じで、芯筋の補強を25mmピッチで行ったNo.6と芯筋補強を行わないNo.5を比較する。最大耐力は、No.5がNo.6の96%程度であった。最大耐力後の大変形時では、芯筋補強を行ったNo.6の性状がダブルコアとして働き、No.5より若干良好な性状を示したが大きく性状が異なることはなかった。

4) 交互配筋の影響 (図-4 d 丸・角フープ: 同一断面配筋、交互配筋)

丸フープと角フープを重ねて配筋するケースが多いが、これを交互配筋し、みかけのピッチを小さくした場合との比較を行う。Pw=0.3,0.6,1.2%の3種類について比較を行ったが、いずれも殆ど差異は見られなかった。

5) 横補強筋強度の影響 (図-4 e SD390,USD785)

高強度横補強筋USD785 ($\sigma_y=7700\text{kgf/cm}^2$)の拘束効果把握のために、普通強度横補強筋SD390 ($\sigma_y=4580\text{kgf/cm}^2$)を用いた場合との比較を、Pw=0.6,1.2%の2種類について行う。Pw=0.6%のNo.1(高強度)とNo.10(普通強度)では最大耐力以降に差異は見られるが最大耐力近傍では殆ど差異が見られない。No.10の場合、最大耐力と同時に補強筋の降伏が生じている。対してPw=1.2%のNo.2(高強度)とNo.11(普通強度)では、その性状が異なりNo.2の方が、かなり良好な軸抵抗性状を示している。普通強度のNo.10(Pw=0.6%)とNo.11(Pw=1.2%)を比較しても、最大耐力近傍では差異は見られず、その後の耐力低下時に差異が見られた。高強度鉄筋を用いる効果は普通強度鉄筋を用いる場合に比べ、Pwが1.2%と大きい場合には大きいですが、Pwが0.6%程度の場合にはそれほど大きくない。3%を超えるような大ひずみ時には伸び能力の大きい普通強度鉄筋の方が良好な性状を示している。Pw・ σ_y と最大耐力の相関は明確にならなかった。ただし、No.2の結果より、高強度柱の軸耐力の上昇を図るには、Pw、 σ_y ともに大きくすることが有効と言える。

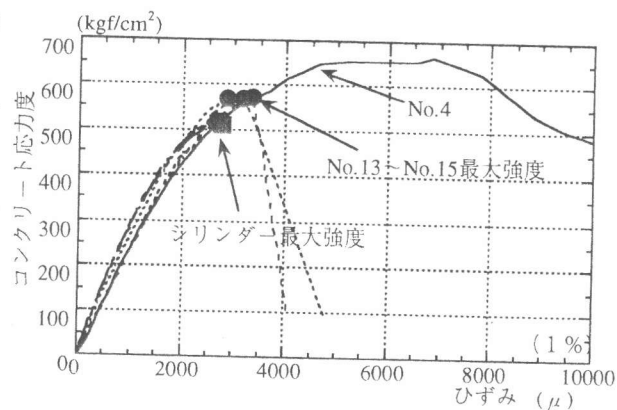


図-5 無筋試験体とシリンダー強度比較

3.2 無筋コンクリートとシリンダー強度との比較

図-5にNo.13~15の無筋コンクリートと同バッチの現場封緘養生のシリンダー(10φ×20cm)の比較を行う。参考にPw=0.6%で拘束されたNo.4(主筋・かぶりなし)の結果も同図中に示す。シリンダーに比べ無筋コンクリートの強度は約1割程度高い結果となった。

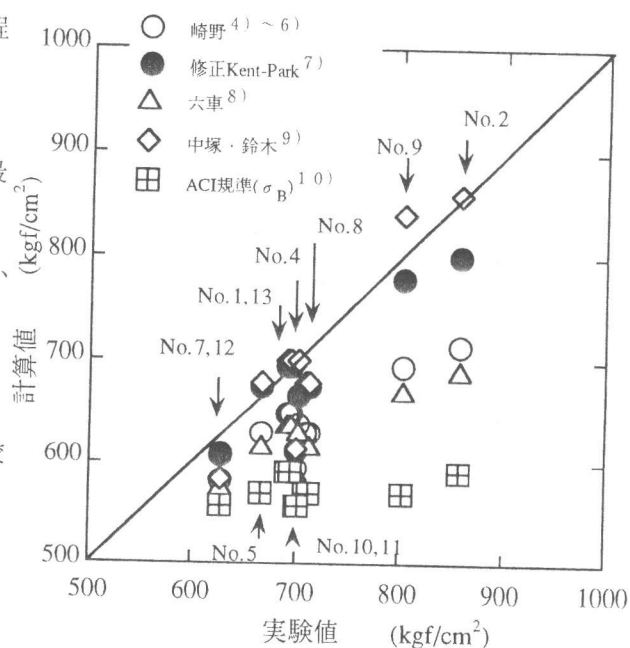


図-6 最大強度比較(実験値と計算値)

4. 拘束コンクリートに関する考察

拘束されたコンクリートについては数多くの研究がなされている。^{4)~10)} 本実験のような丸フープと角フープが混在した柱では、丸と角の抵抗機構が異なるため難しい。幾つかの仮定の基に既往の提案モデルとの比較を試みる。

①実験結果の整理

実験結果を基に以下の条件で整理した。

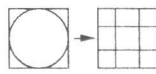
- 1) 主筋は完全弾塑性のバイリニア型と仮定し、拘束コンクリートの負担分を評価する。すなわち、最大強度算定には、最大荷重より鉄筋負担分 ($A_g \times \sigma_{gy}$) を差し引き評価する。
- 2) 1) で求めた荷重から、コア部分の面積で応力度を算出する。
- 3) コンクリート強度はシリンダー強度 \times (無筋試験体強度 / 無筋試験体シリンダー強度) とする。

②既往の提案式及び適用上の仮定

算定は、以下の提案モデルで行う。

- a) NewRC提案式 (崎野モデル)^{4)~6)}
- b) 修正Kent-Park⁷⁾
- c) 六車モデル⁸⁾
- d) 中塚・鈴木モデル⁹⁾

丸フープの方が角フープに比べ拘束効果は大きいと考えられるが、a)、d) については、試験体形状も考慮し丸フープは角フープを抑える井桁の中子筋として働くことと仮定して算定した。



ただし、a)、b) の横補強筋の体積比算出の際は、丸フープと角フープの体積合計をコア部分の体積で除して算出した。

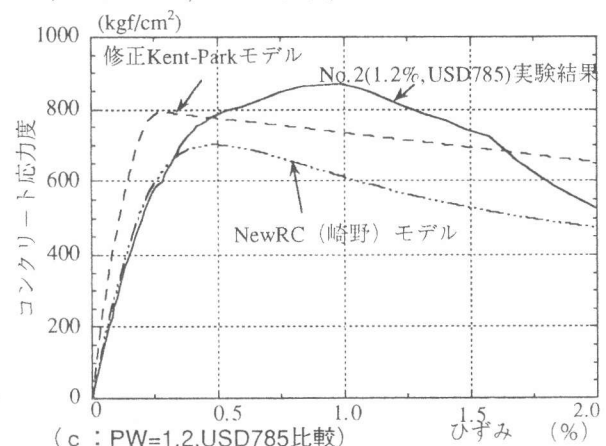
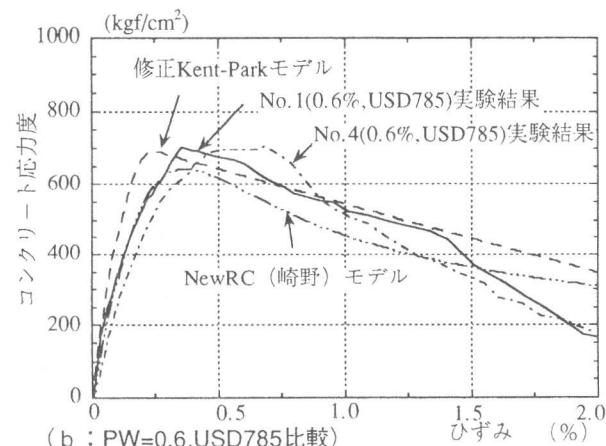
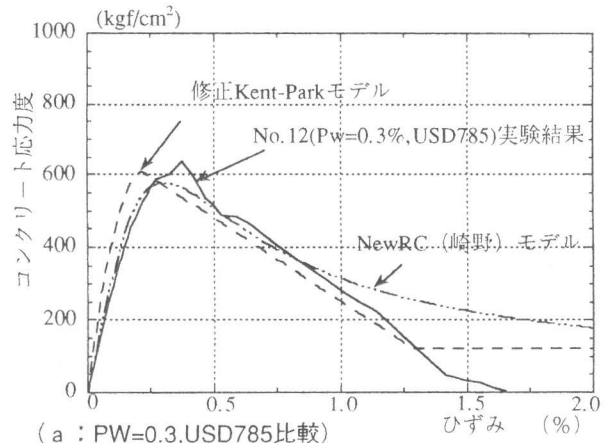
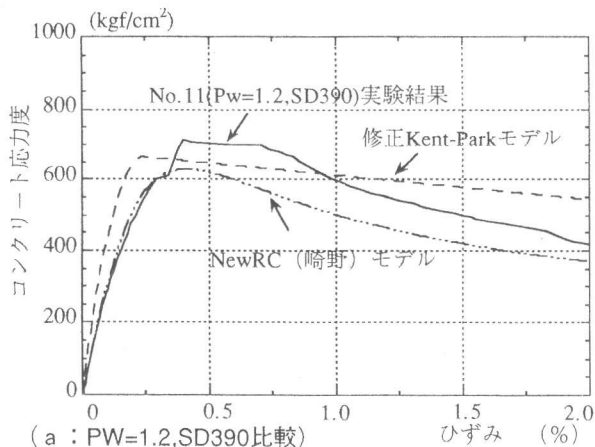


図-7 既往モデルとの比較 (高強度)

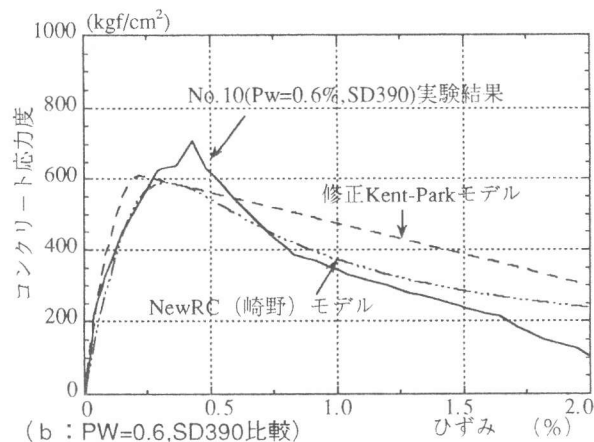


図-8 既往モデルとの比較 (普通強度)

4.1 最大耐力の検討

a) ~ d) までのモデルについて横軸を実験値、縦軸を計算値とし図-6に示す。a) NewRC提案式(崎野モデル)では、実験値と比し安全側の評価となった。b) 修正Kent-ParkモデルはNo.10(0.6%、SD390)を除きほぼ対応した。c) 六車モデルは、中子筋の評価ができないため過小評価となった。d) 中塚・鈴木モデルは、一部過大評価となる試験体もあったが概ねよい対応を示した。参考として示すe) ACI規準式¹¹⁾は累加強度式であり、計算値は σ_B となるため実験値に比べ計算値がかなり小さくなった。

4.2 応力度-ひずみ関係

修正Kent-Parkモデル及びNew RC(崎野)モデルと本実験を比較検討する。横補強筋量のみ異なるNo.1, No.2, No.12 (Pw=0.3~1.2%) 試験体及びNo.4 (Pw=0.6, 主筋・かぶりなし) 試験体について図-7に示す。また、普通強度横補強筋を用いたNo.10, No.11 (Pw=0.6, 1.2%) 試験体について図-8に示す。No.1とNo.4の実験値はあまり差異は見られなかった。図-7より修正Kent-Parkモデルは、小さめなひずみで最大耐力に達し形状的に実験結果と一致しない。New RC(崎野)モデルでは、Pw=0.6%時では若干類似しているが、Pw=1.2%時では最大強度及び強度時のひずみが実験値と計算値で大きく異なっている。図-8の普通強度鉄筋の場合は、両モデルの実験結果が特に最大強度近傍で異なっているためあまり良好な対応は示していない。丸フープと角フープが混在した柱は、特にPw、 σ_y が大きな場合に既往の提案式では良好な一致が見られなかった。丸フープと角フープは独立して働くのではなく今後、更なる検討が必要となる。

5. まとめ

高強度材料を使用した高層建物用RC柱の中心軸圧縮性状を検討し、以下の結論を得た。

- 1) 高強度横補強筋量の増大に伴い拘束コンクリートの耐力・靱性は大幅に改善される。
- 2) 高強度横補強筋(USD785)は、横補強量がPw=1.2%と大きな補強量の場合には有効に働くが、Pw=0.6%程度では普通強度鉄筋(SD490)を用いた場合との差異は見られなかった。
- 3) 丸フープと角フープの同一面配筋と交互配筋の配筋方法の差異の影響はなかった。
- 4) 芯筋を囲むフープは軸耐力・変形に有効ではあるが、その効果は小さい。
- 5) 丸フープと角フープが混在した柱の拘束コンクリート強度は、修正Kent-Park式、中塚・鈴木式の計算値との良好な対応をみた。
- 6) 丸フープと角フープは独立して働くのでは無いいため、既往の $\sigma-\epsilon$ モデルの適用は難しく、モデル化を含め今後の課題である。

[謝辞] 本研究において東北大学助教授 井上範夫博士に全般的に御助言頂きました。また、実験に関し東京大学教授 小谷俊介博士にお世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 丸田、別所「高強度材料を用いた高層RC柱の弾塑性挙動」 JCI年報14-2 '92、PP523~528
- 2) 丸田、別所、井上「高強度材料を用いた高層RC柱の軸耐力実験」 AIJ '92大会(構造II) pp549~550
- 3) 野口、別所他「高強度材料を用いたRC柱のせん断性状に関する研究」 AIJ '92大会(構造II) pp627~630、AIJ '93大会(構造II) pp709~712
- 4) 「New RC 研究概要報告書」(財)国土開発技術センター 平成四年度
- 5) 崎野、孫「コンファインド高強度コンクリートの中心圧縮性状に関する実験的研究」 JCI年報15-2 '93、PP713~718
- 6) 孫、崎野「高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の靱性改善に関する実験的研究」 JCI年報15-2 '93、PP719~724
- 7) Kent, D.C., Park, R. 「Flexural Members with Confined Concrete」 Proceedings ASCE, Vol.97, No. ST7, July 1971, PP1969~1990
- 8) 西山、六車他「横拘束によるコンクリート系部材の曲げ靱性改善」 JCIコンクリート構造物の靱性とその評価法に関するコロキウム、II PP33~44, 1988
- 9) 鈴木、中塚他「角形横補強筋によるコンファインドコンクリートの拘束機構と強度・変形特性」 JCI年報11-2 '89、PP449~454
- 10) 「ACI Building Code and Commentary-ACI 318-89」