

論文 超高強度材料を使用した RC 柱に関する実験研究

濱田 真*¹ 吉松賢二*² 石橋久義*² 堀江 啓*³

要旨：高強度コンクリート(60,100MPa)と高強度鉄筋(SD490,USD685)を組み合わせた柱部材の曲げ性状を把握するために、曲げせん断実験および断面曲げ解析を行った。実験は、4試験体について実施し、その破壊性状・変形性状を把握するとともに、最大曲げ耐力については断面解析による精算により評価できることが分かった。解析は、パラメータとして断面の構成材料、軸力比、コンファインド効果(せん断補強筋比)、加力方向の4つを選び、平面保持を仮定した断面曲げシミュレーション解析を行い、各パラメータが断面のモーメント-曲率関係に及ぼす影響を把握することができた。

キーワード：超高強度材料、RC柱、曲げせん断実験、曲げ耐力、断面曲げ解析

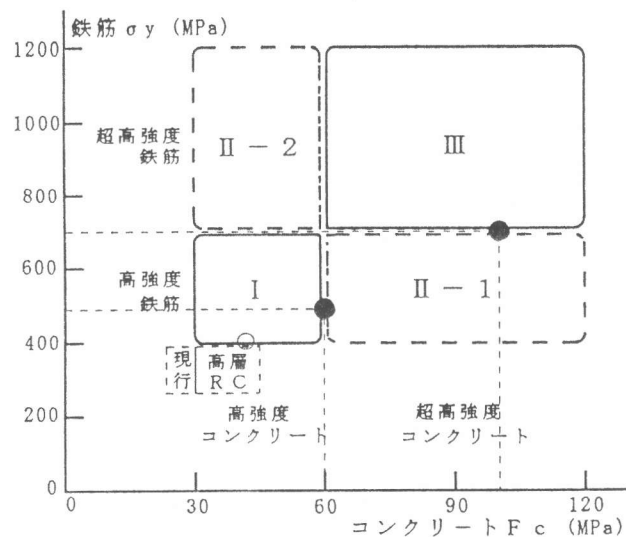
1. はじめに

当社では、コンクリート42MPaと主筋SD390を組み合わせた超高層住宅構法を開発し、30階程度の高層住宅を中心に、すでに多くの実績を積んできたが、プラン自由度を目的とした、長スパン化や、更なる高層化を可能にするため、高強度材料(コンクリートにFC60,100MPa,鉄筋にSD490,USD685)を使用したRC超高層住宅構法を開発した。図-1に使用材料強度範囲と建物のゾーン[1]を示す。既に開発した超高層住宅構法の位置を○印で、そして今回使用した材料強度の位置を●で示す。本研究では、図中の●印の2点の材料強度を組み合わせた柱部材の構造性能の把握を目的とした、曲げせん断実験を実施したので、その結果を示すとともに、断面の曲げシミュレーション解析により、断面の構成材料・軸力比・コンファインド効果そして加力方向が断面のモーメント-曲率関係に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

表-1に試験体の一覧を、図-2に試験体の形状・配筋ならびに断面を示す。C-1,2はコンクリートに60MPa、主筋にSD490の高強度材料を使用した。C-1は中柱をC-2は隅柱を対象としたものであ



- ゾーンI : 高強度材料を用いたRC造 (NewRC設計ガイドライン適用範囲)
- ゾーンII-1 : 超高強度コンクリートを用いたRC造
- ゾーンII-2 : 超高強度鉄筋を用いたRC造
- ゾーンIII : 超高強度材料を用いたRC造

図-1 材料強度範囲と建物ゾーン

*1 (株)熊谷組 技術研究所、工修(正会員)
 *2 (株)熊谷組 技術研究所、工修
 *3 (株)熊谷組 技術研究所

る。2体とも柱脚部をスリーブ式継手によりジョイントし、その接合面にシアークォッターを設けたプレキャスト試験体である。柱断面は400×400mm せん断スパン比(M/QD)は2.0である。尚、C-2については、スリーブが柱の曲げ耐力に及ぼす影響を柱脚部と同じにするため、柱頭部にもスリーブを設置し、そのスリーブ内の鉄筋は通し配筋とした。

C-3,4 はコンクリートに100MPa、主筋にUSD685の超高強度材料を使用した。C-3 は中柱を、C-4 は隅柱を対象とし、こちらの2体は現場打設を想定した一体打ちとした。柱断面は350×350mm せん断スパン比(M/QD)は2.0である。4体とも横補強筋にはD6あるいはD8(SBPR785/930)の溶接閉鎖型鉄筋を囲型に配筋した。

2.2 使用材料

表-2にコンクリートの材料試験結果を、表-3に鉄筋の材料試験結果を示す。

2.3 実験方法

図-3に加力装置を示す。加力は、門型載荷フレームに軸力と水平力を同時に連動させながら行った。軸力は油圧ジャッキによりC-1,3では正負方向とも軸方向力 $0.3BD\sigma_B$ (C-1では3470kN, C-3では3710kN)の一定軸力を与え、C-2,4では変動軸力を想定し、正方向で軸方向力 $0.6BD\sigma_B$ (C-2では6980kN, C-4で

表-2 コンクリートの材料試験結果

試験体	養生方法	材令 days	圧縮強度 σ_B (MPa)	ヤング率 E_c (MPa)	縦引比 ν
C-1	現場封緘	32	72.3	34200	0.20
C-2	現場封緘	39	72.6	35600	0.22
C-3	現場封緘	43	100.9	37400	—
C-4	現場封緘	49	101.0	37300	—

表-3 鉄筋の材料試験結果

呼び径	種類	降伏点 (MPa)	降伏歪 (%)	ヤング率 (MPa)	備考
D19	SD490	527	0.277	190000	C-1, 2 試験体
D6	SBPR 785/930	886	0.582*	152300	
D19	USD685	745	0.374	199400	C-3, 4 試験体
D8	SBPR 785/930	850	0.656*	186600	
D6	SBPR 785/930	969	0.730*	182500	

注*: 0.2%オフセット法により求めた値

表-1 試験体一覧

	C-1	C-2	C-3	C-4
コンクリート強度 F_c (MPa)	60.0		100.0	
柱断面 $B \times D$ (mm)	400×400		350×350	
主筋種類	SD490	SD490	USD685	USD685
配筋	12-D19	16-D19 4-D19	12-D19	12-D19 4-D19
主筋 ag (mm ²)	34.44	57.40	34.44	45.92
主筋 P_g (%)	2.153	3.588	2.811	3.749
横補強筋種類	SBPR	SBPR	SBPR	SBPR
一般部配筋	785/930 4-D6@50	785/930 4-D6@60	785/930 2-D6@80	785/930 2-D6@80
ヒソ部配筋	0.64 4-D6@40	0.53 4-D6@60	1.17 2-D6@80	1.17 2-D6@80
横補強筋 P_w (%)	0.80	0.53	1.17	1.17
軸力 $N=BD\sigma_B$	正:0.3N 負:0.3N	正:0.6N 負:0.0	正:0.3N 負:0.3N	正:0.6N 負:0.0

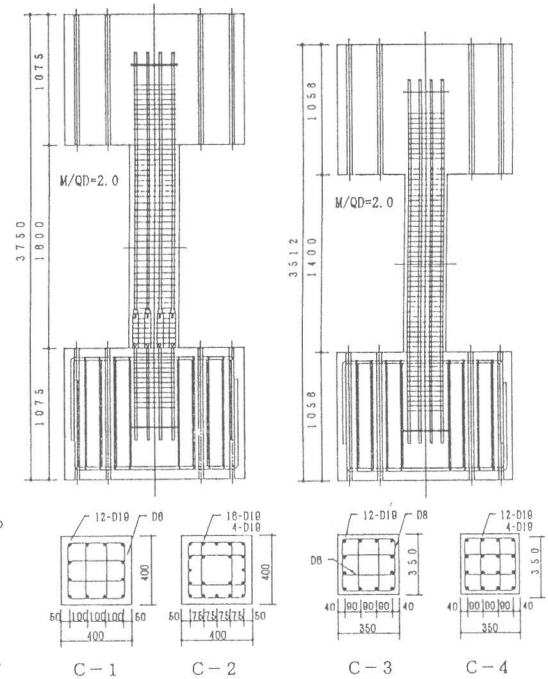


図-2 試験体形状・配筋

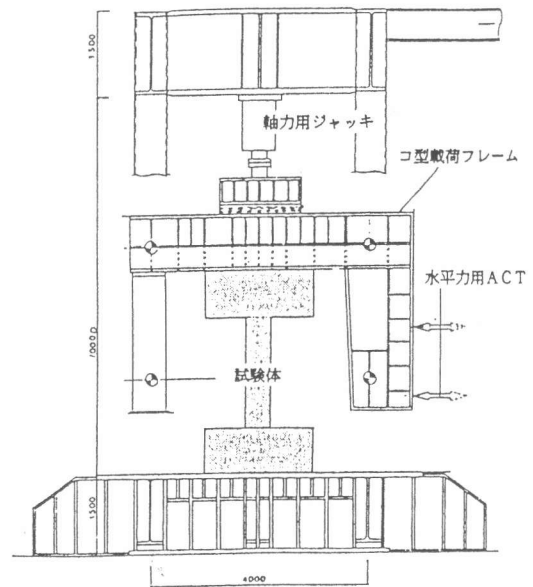


図-3 加力装置

は7420kN)、負方向では軸力を0とした。水平力は、門型載荷フレームが平行移動するように2台のアクチュエーターを制御し、繰り返し曲げせん断加力を行った。載荷履歴は、原則として $R=1/400\text{rad}$ で1回、 $1/200, 1/100, 1/50\text{rad}$ でそれぞれ2回ずつ繰り返した後、大変形載荷を行った。計測は、加力スタブの層間変形、回転変形、鉛直変形、主筋および横補強筋のひずみについて行った。

3. 実験結果

3.1 変形性状および破壊性状

図-4に層せん断力-変形角関係と最終ひび割れ状況を示す。

C-1は、正負方向とも曲げ、曲げせん断、せん断ひび割れの順でひび割れが発生した。主筋は $R=1/200\text{rad}$ 前後で圧縮降伏、 $R=1/80\text{rad}$ 前後で引張降伏したが、繰り返しによる大きな耐力低下はみられなかった。最大耐力は正負方向とも $R=1/60\text{rad}$ 前後で観測された。C-2は、軸力比で0.6を与えた正方向では、先ず主筋が圧縮降伏し、 $R=1/65\text{rad}$ で最大耐力に達した。高軸力下における最大耐力が確認できたので、その後の変位増分は行わなかった。軸力0の負方向については、曲げひび割れ、曲げせん断ひび割れ、せん断ひび割れの順にひび割れ発生した。主筋が引張降伏した後、 $R=1/23\text{rad}$ まで耐力は低下しなかった。C-3, 4はそれぞれC-1, 2試験体とほぼ同じ破壊経過を辿った。破壊性状としては、C-1, 3の正負方向とも主筋の引張降伏で耐力が決定した曲げ破壊、C-2, 4の正方向は圧縮降伏で耐力が決定した曲げ圧縮破壊、負方向は曲げ破壊であった。材料強度の組み合わせの違い、プレキャストと一体打ちの差による、変形・破壊性状の相違はみられなかったが、柱のせん断余裕度の低いC-3, 4の方がC-1, 2に比べひび割れが多く発生していた。

3.2 柱の軸ひずみ

図-5に柱の軸ひずみ(柱軸変位を柱内法

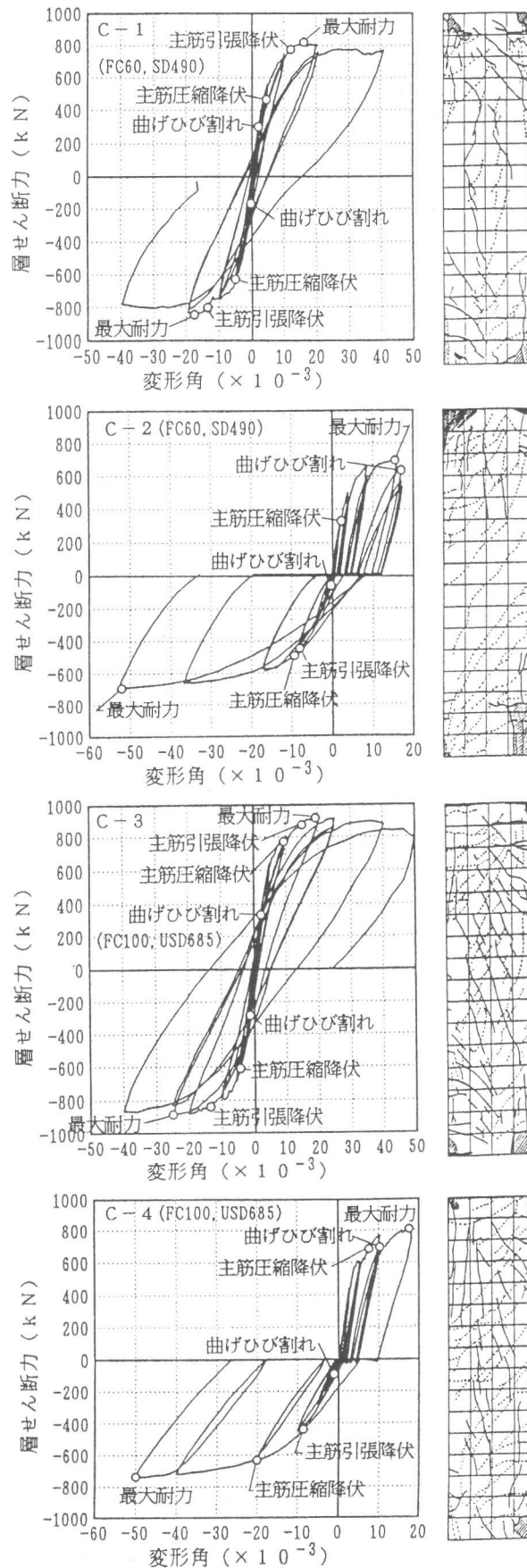


図-4 層せん断力-変形角関係・ひび割れ状況

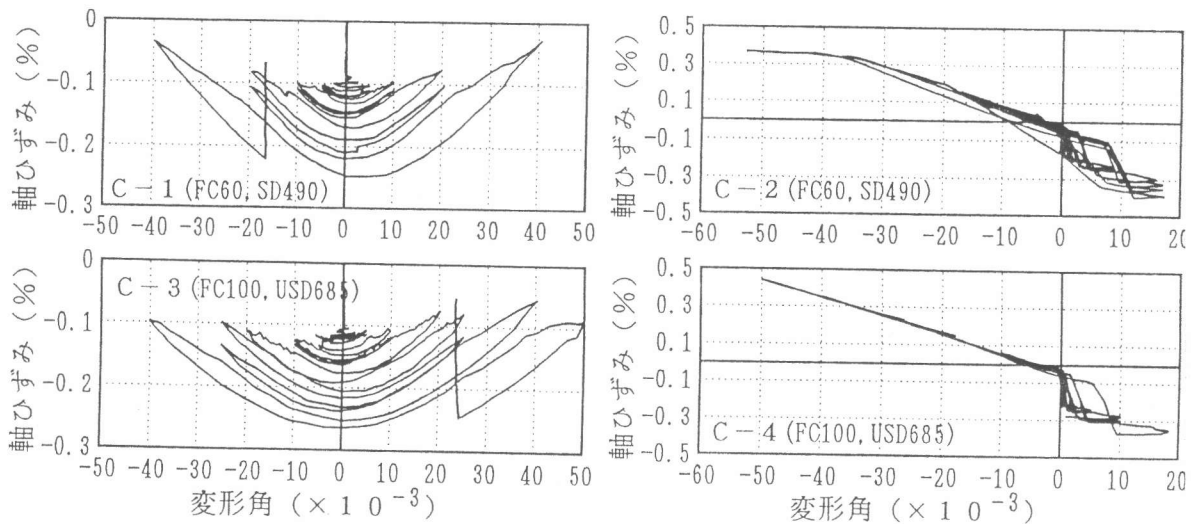


図-5 軸ひずみ-変形角関係

スパンで徐した値) -変形角関係を示す。一定軸力比0.3を与えたC-1,3の軸ひずみは、水平加力時に伸び、除荷時に縮む傾向があり、軸力比0.6を与えたC-2,4の正方向の軸ひずみは、水平加力時に縮み、除荷時にほとんど変化しない傾向があった。図-6に全試験体の、各正サイクルの最大変形角時の軸ひずみの進展状況を示す。C-1,3は軸ひずみがほぼ一定値であるのに対し、C-2,4は変形の増大とともに軸ひずみが進行していた。特に、C-2は $R=20/1000\text{rad}$ 近傍で変位増分がないにもかかわらず、軸ひずみが増大しているのは、軸力を保持できないことを示していると思われる。このように軸力比0.6を与えた場合は、変位の増大とともにコンクリートの圧壊がコアコンクリート内部に及び、軸ひずみが進展するものと考えられる。一方、軸力比0.3程度では、コアコンクリートは健全であることから、軸ひずみは進展しないものと考えられる。

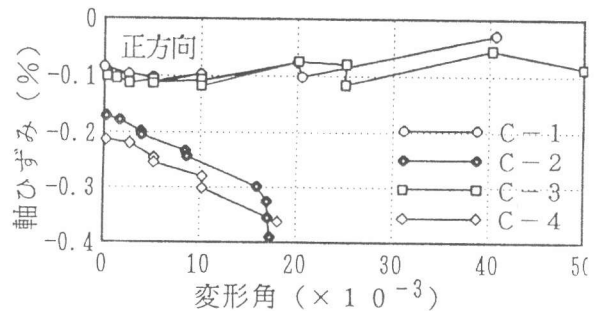


図-6 軸ひずみの比較

4. 最大耐力の検討

表-4に実験値最大耐力と計算値との比較を示す。曲げ終局耐力については、高強度コンクリートにも適用できると仮定して、学会略算式[2]、ACIスレスプロック法、平面保持による断面解析(コンクリートのモデルにe関数、Fafitis-Shah式[3]、NewRC式[1])を用いて求めた最大抵抗モーメント)による5つについて、せん断終局耐力については、終局強度指針[4]とNewRC式[1]の2式について求めた。

学会略算式は、軸力比0と軸力比0.3では良い一致をみるが、高軸力比0.6を与えたC-2,4の正方向については、曲げ耐力を過大評価している。圧縮縁ひずみで耐力を決定するACIスレスプロック法は、全て安全側の評価をしているが、プレキャスト試験体であるC-2の正方向は、他の比較値に比べて小さい値となっている。断面解析にe関数を用いた場合は、高軸力比を与えたC-2の正方向のみが実験値を下まわっている。Fafitis-Shah式を用いた場合は、ACIスレスプロック法と同様に全て安全側の評価を与えている。コンクリートのモデルに横補強筋によるコンファインド効果を

表-4 実験結果と計算値との比較

試 験 体		C - 1		C - 2		C - 3		C - 4	
		正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向	正方向	負方向
実験値最大耐力	実験値	819.3	844.5	694.5	691.7	916.1	887.1	807.1	738.1
	実験値#1	907.1	919.9	802.2	691.7	1034.8	1011.1	937.6	738.1
RC規準略算式による計算値	計算値	849.2	849.2	999.9	604.6	991.1	991.1	1084.7	684.5
	比較値#2	1.07	1.08	0.80	1.14	1.04	1.02	0.86	1.08
ACIストレスプロット法による計算値	計算値	753.1	753.1	784.3	569.8	802.9	802.9	768.1	624.7
	比較値#2	1.20	1.22	1.02	1.21	1.29	1.26	1.22	1.18
コンクリートモデルにe関数を用いた計算値	計算値	856.7	856.7	945.5	—	908.1	908.1	920.2	—
	比較値#2	1.06	1.07	0.85	—	1.14	1.11	1.02	—
コンクリートモデルにFafitlis-Shah式を用いた計算値	計算値	790.9	790.9	792.6	575.9	814.7	814.7	719.1	496.0
	比較値#2	1.15	1.16	1.01	1.20	1.27	1.24	1.30	1.49
コンクリートモデルにNewRC式を用いた計算値	計算値	854.3	854.3	851.2	589.3	896.2	896.2	906.9	511.2
	比較値#2	1.06	1.08	0.94	1.17	1.15	1.13	1.03	1.44
終局強度指針によるせん断耐力計算値	計算値	1095.6	1095.6	845.7	845.7	751.8	751.8	750.5	750.5
	比較値#2	0.83	0.84	0.95	0.82	1.38	1.34	1.25	0.98
NewRC提案式によるせん断耐力計算値	計算値	1070.1	1070.1	1019.3	722.0	1191.4	1191.4	1353.2	1260.2
	比較値#2	0.85	0.86	0.79	0.96	0.87	0.85	0.69	0.58
備 考	実験値#1: P-δ効果を除去した値 比較値#2=実験値#1/計算値 (単位: kN)								

考慮したNewRC式を用いた場合は、その比較値はe関数の比較値とほぼ同じであるが、高軸力比0.6を与えたC-2の正方向の比較値はe関数のものより改善されている。

5. 断面解析による検討

5.1 仮定断面ならびに解析変数

RC柱部材の耐震性能あるいは変形性能を評価するためには、ヒンジ領域の断面の曲げモーメント-曲率関係を知る必要がある。そこで、解析変数として4つのパラメータを選び、各変数が断面の曲げモーメント-曲率関係にどのような影響を与えるかの検討を行った。パラメータとしては、(1)断面の構成材料 (2)軸力比 (3)コンファインド効果(せん断補強筋比) (4)加力方向とし、計24通りについて解析を行った。表-5に解析変数の一覧を示す。解析断面は、図-2のC-1と同断面とした。尚、この解析においてはせん断・付着に対する検討は全く行っていない。

5.2 コンクリートと鉄筋の応力ひずみ関係

解析に用いたコンクリートのモデルはNewRCで提案されている方法[1]に従った。すなわち、

表-5 解析変数一覧

(1)材料の構成材料 ・ FC60とSD490 ・ FC100とUSD685
(2)軸力比 $\eta = N/Nuc$ ・ $\eta = 0.3$ $Nuc = ag\sigma_y$ ・ $\eta = 0.6$ $+BDFc$
(3)せん断補強筋比 ・ $Pw = 1.067\%$ (4-D6@30) ・ $Pw = 0.800\%$ (4-D6@40) ・ $Pw = 0.640\%$ (4-D6@50)
(4)加力方向 ・ 0度方向(主軸) ・ 45度方向(対角)

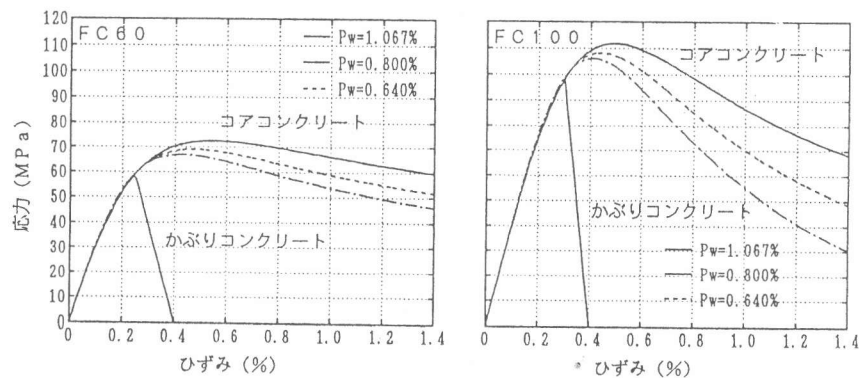


図-7 コンクリートの応力-ひずみ関係

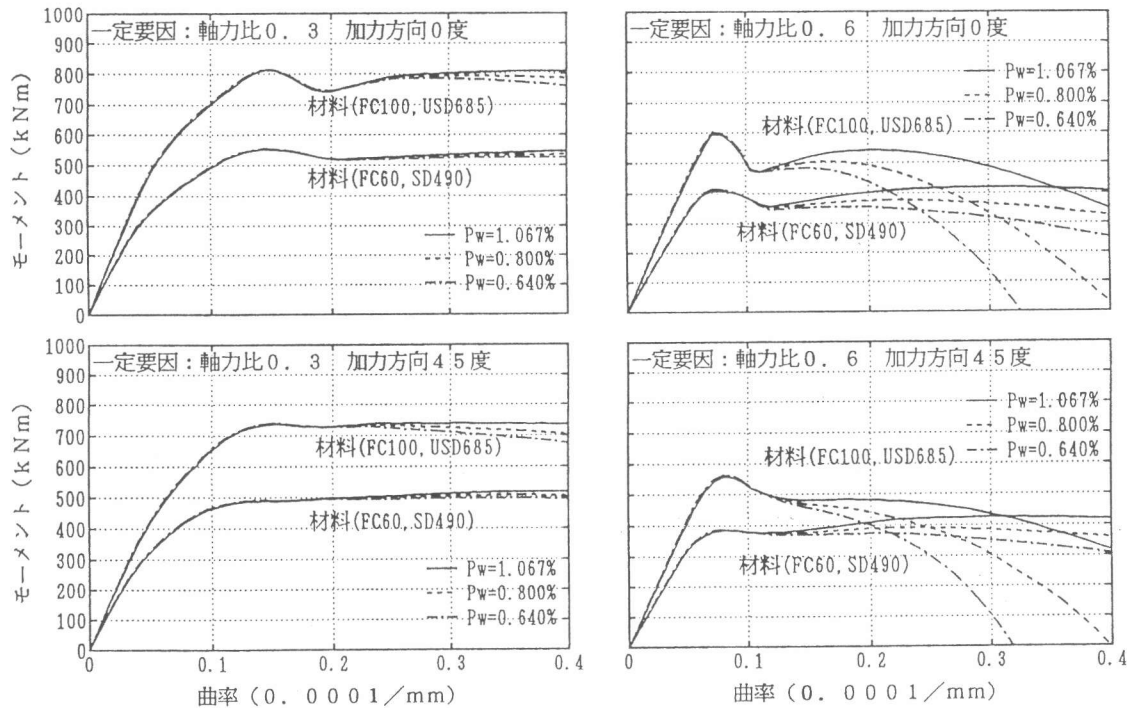


図-8 モーメント-曲率関係 (解析結果)

図-7に示すようにコアコンクリートにコンファインド効果を取り入れ、かぶりコンクリートは圧縮ひずみが0.4%を超過する場合は応力を負担しないモデルである。かぶりコンクリートのかぶり厚は30mmとし、鉄筋のモデルはトリリニア型とし、弾性係数を $E_s=2.059 \times 10^5$ MPa とした。

5.3 解析結果

図-8に解析結果による断面のモーメント-曲率関係を示す。解析結果より以下のことが言える。①断面の構成材料を高強度化（コンクリート1.67倍、鉄筋1.40倍）すると、その最大耐力は約1.5倍となる。②0度方向加力では、かぶりコンクリートの剝落により大きく耐力が低下しているが、45度方向では、それほど大きな低下はみられない。③コンファインド効果はかぶりコンクリート剝落後に現れ、コンクリート強度100MPaの方が60MPaに比べ耐力低下が大きい。④0度方向加力に対し、45度方向加力の最大耐力は小さくなる。

6. まとめ

- ①超高強度材料を用いた柱の曲げ性状について把握することができた。また、最大曲げ耐力は断面解析による精算によって評価できる。
- ②シミュレーション解析により、FC60に比べFC100はかぶりコンクリート剝落後の耐力低下が大きい。また、コンファインド効果の差は、かぶりコンクリート剝落後に現れ、高軸力下ではFC60に比べFC100の方が耐力低下が大きいことから、FC100の高軸力下での靱性確保には更なる補強が必要である。

[謝辞] 本実験に関し、日本大学青山博之教授より貴重なご意見を頂いたことを感謝します。

[参考文献] [1] (財)国土開発技術研究センター：平成4年度NewRC 研究開発概要報告書、1993.3 [2] 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、1990.2 [3] Shah, S.P., et al., "Prediction of Ultimate Behavior of Confined Columns Subjected to Large Deformation," ACI Journal, Proceedings, Vol. 82, No. 35, July-August 1985, pp423-433 [4] 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990.11