

論文

[2068] 高強度材料を用いたRC柱の曲げ性能の評価に関する実験的研究

正会員 加藤大介 (新潟大学建設学科)

1. まえがき

RC柱の曲げ性能は曲げ降伏以後の曲げ圧縮破壊、せん断破壊、あるいは、付着破壊により支配される。本研究では高強度材料を用いたRC造柱の高軸力下での変形能を確保するために必要なせん断補強筋、圧縮コンクリートの拘束筋、および、主筋の付着防止筋の配筋方法の開発を行うことを目的に、4体の高強度材料を用いたシアスパン比が2のRC造柱試験体の静加力実験を行った。具体的には、学会指針[1] (以下指針) による保証回転角評価式と付着に対する設計式の適用性、および、曲げ理論による曲げ靱性評価法の適用性について検討するものである。本論文では、実験結果の概要および付着に対する設計法の検討を中心に報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体は、帯筋強度、中子筋の有無、主筋の配置、および、軸力比をパラメータとし、曲げ降伏した後に曲げ圧縮破壊、せん断破壊、あるいは、付着破壊により靱性が決まるように設計した。表-1に試験体の寸法と配筋詳細を、表-2に試験体諸元を示す。また、図-1に試験体1の配筋図と各試験体の断面の配筋を示す。表-3に試験体の性能計算値一覧表を示す。欄1,2には指針による保証回転角に弾性変形分を加えた $R_p$ 、配筋詳細を考慮したコンクリートモデルを用いた平面保持解析[2]による耐力が最大耐力の80%に低下した点と定義した限界部材角 $R_f$ を示した。また、欄4、

表-1 試験体の寸法と配筋詳細

断面	D × B = 250mm × 250mm
柱全長さ	L L = 1000mm
シアスパン比	M / (Q · D) = 2.0
有効せい	d = 220mm
帯筋の外端長さ (コア長さ)	Dc = 215mm
かぶり厚 (主筋芯まで)	dc = 30mm
横補強筋の種類 (外周)	スパイラル
中子筋の135度フックの余長	48mm (帯筋径の8倍)

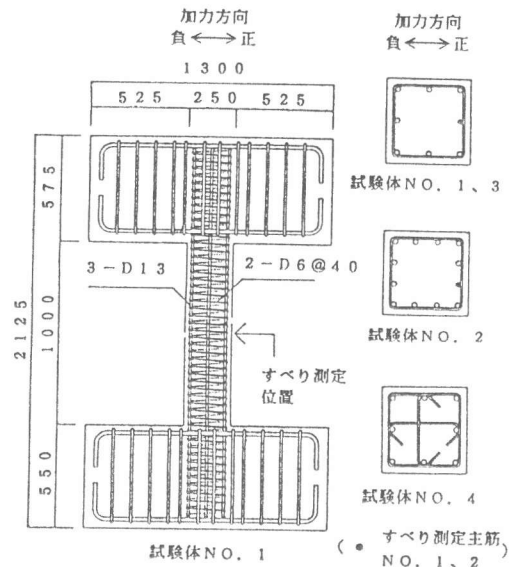


図-1 試験体配筋図

表-2 試験体の諸元

試験体名	コンクリート強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	主筋	主筋強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	帯筋	帯筋強度*1 (kg/cm <sup>2</sup> )	p w (%)	p w · σ wy (kg/cm <sup>2</sup> )	軸力 (ton)	軸力比*2 (全断面)
1	804	8-D13	6969	2-D6-φ40	8292	0.64	53.1	158	0.314
2	815	12-D13	6969	2-D6-φ40	8292	0.64	53.1	158	0.310
3	804	8-D13	6969	2-D6-φ25	9220	1.02	94.0	228	0.454
4	820	8-D13	6969	3-D6-φ40	9220	0.96	88.5	227	0.443

(\*1) 帯筋強度: 残留歪が0.2%の点の応力度とした

(\*2) 軸力比: 軸力を全断面積とコンクリート強度の積で除したもの

表-3 試験体の性能計算値一覧

試験体名	(#1)	(#2)	(#3)	(#4)	(#5)	(#6)
	R <sub>p</sub> (rad)	R <sub>f</sub> (rad)	R <sub>s</sub> (rad)	$\tau_{bu}'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\tau_f$ (kg/cm <sup>2</sup> ) ( $\tau_f/\tau_{bu}'$ )	$\tau_{f'}$ (kg/cm <sup>2</sup> ) ( $\tau_{f'}/\tau_{bu}'$ )
1	0.026	0.044	0.046	93.0	58.1 (0.62)	79.2 (0.85)
2	0.023	0.045	0.012	75.3	58.1 (0.77)	78.8 (1.05)
3	0.044	0.031	0.057	103.5	58.1 (0.56)	80.9 (0.78)
4	0.044	0.041	-	111.5	58.1 (0.52)	80.9 (0.73)

(#1) R<sub>p</sub> : 学会指針 [1] のせん断強度式より逆算した降伏ヒンジ領域の回転角  
 (#2) R<sub>f</sub> : 文献 [2] のコンクリートモデルを用いた曲げ解析による限界部材角  
 (#3) R<sub>s</sub> : 付着指標より推定した付着割裂すべりを生じる部材角 (本文式(2))  
 (#4)  $\tau_{bu}'$  : 学会指針 [1] の積算式(解説)による付着強度で引張主筋の内の最小のもの  
 (#5)  $\tau_f$  : 学会指針 [1] による設計用付着応力度  
 (#6)  $\tau_{f'}$  :  $\tau_f$  の有効付着長さを軸力レベルにより変化させた付着応力度 (本文式(1))

5には指針による付着強度  $\tau_{bu}'$  と付着指標  $\tau_f/\tau_{bu}'$  を示した。ただし、 $\tau_{bu}'$  は指針の解説に示されてある積算式で、すべての引張主筋の加重平均とはせず最小の主筋の値とした。なお、欄3の R<sub>s</sub> は実験結果から推定した主筋の滑り開始部材角であり、4.節で述べる。

試験体1, 2, 3は高強度主筋を用いて曲げ降伏後の付着破壊を評価する試験体で中子筋無しの中間主筋をもつものである。既往の実験より付着破壊が生じる可能性のある付着指標をもつ試験体1と同一の横補強筋で中間主筋を2本に増やすことにより付着指標を上げた試験体2、および、試験体1と同一の主筋配置で帯筋間隔を減ずることにより付着指標を下げた試験体3である。一方、付着破壊しない場合に、試験体1, 2は計算上曲げ降伏後のせん断破壊で靱性が決まり、試験体3, 4は曲げ降伏後の曲げ圧縮破壊により靱性が決まるもので、曲げ圧縮部で靱性が決定される試験体では中子筋の無いもの(試験体3)と中子筋のあるもの(試験体4)を行った。

2. 2 荷重方法と計測方法

図-2に加力装置図を示す。軸力は2000ton加力装置により加えた。加力ヘッドと加力上梁との間はテフロン支承(1000t用、受圧面積1000cm<sup>2</sup>)により滑りが生じる。高さ方向中央に反曲点を設定し、水平ジャッキにより横力を加えた。なお、加力上梁を水平に保つために、試験体左右の曲げ戻しジャッキ

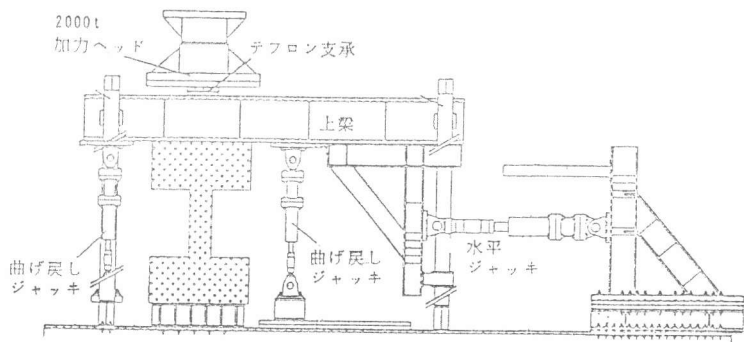


図-2 加力装置図

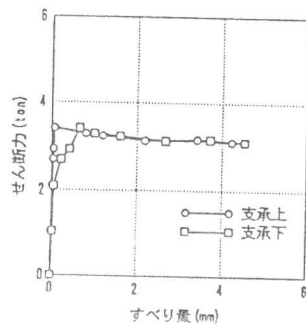


図-3 テフロン支承の滑り-せん断力関係(受圧面1000cm<sup>2</sup>、軸力150t)

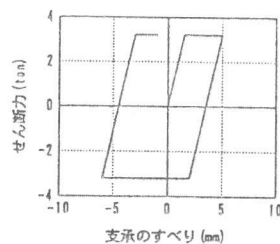
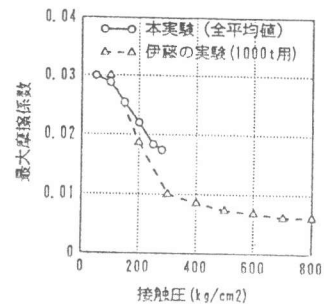
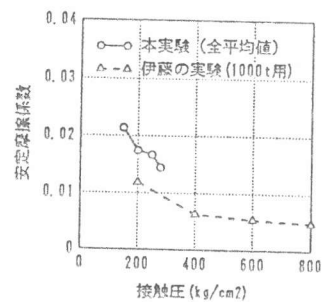


図-5 テフロン支承のモデル



(a) 最大摩擦係数と接触圧



(b) 安定摩擦係数と接触圧

図-4 テフロン支承の摩擦係数と接触圧の関係

キを用いた。なお、本実験で測定された横力はP-Δ効果および後述するテフロン支承の摩擦分を考慮して修正した。標準載荷履歴は部材角で±0.005、±0.01、±0.015、±0.02radを2回づつ繰り返した後に、各試験体の損傷に応じて載荷履歴を与えた。

測定は、水平変形、軸方向変形の絶対変形その他、曲げ変形成分を計算するための柱軸方向に6領域に分割された領域での曲率、および、せん断変形を測定した。なお、せん断変形は柱の上下のヒンジゾーン(25cm)において縦、横、斜め方向をそれぞれ2方向ずつ測定して求めた。さらに、試験体1,2では柱の中間主筋が滑ることが予想されるため、図-1に示すように中間主筋(加力方向に対して直交方向の主筋の中の中央のもの)

の高さ方向の中央でのコンクリートと主筋の相対変形(主筋の滑り量と考える)を測定した。この他に、主筋と帯筋の歪を測定した。

### 2.3 テフロン支承の滑り実験と評価

本実験では軸力が150~225tonと高いため、横力に含まれるテフロン支承の摩擦せん断力が無視できなくなる危険がある。そこで、柱試験体の加力終了後、加力上梁と試験体の間に実験で用いたものと同一のテフロン支承を設置し、テフロン支承の摩擦係数を求めた。

図-3に軸力が150ton(接触圧:150kg/cm<sup>2</sup>)の場合の上下の支承の滑りとせん断力の関係を示す。加力初期には剛であるが、最大せん断力に達する前に滑りだし、その後はせん断力が若干減少し、最終的には安定したせん断力を維持することが分かる。この最大のせん断力と安定したせん断力を摩擦係数に換算して、横軸に接触圧をとって示したものが図-4(a)(b)である。図には伊藤らの実験[3]による結果も示したが、ほぼ対応している。

図-5はテフロンの滑り-せん断力のモデルである。試験体のせん断力はこのモデルより推定される摩擦力を減じて求めた。なお、モデルの最大せん断力は本実験より得られた安定した摩擦係数より計算し、3.2ton(軸力150ton)、3.8ton(軸力225ton)、最大せん断力時の滑りは1.5mm(共通)とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 試験体の復元力特性と破壊性状

図-6(a)~(d)に各試験体の水平荷重と水平変形および軸方向変形の関係を示す。また、

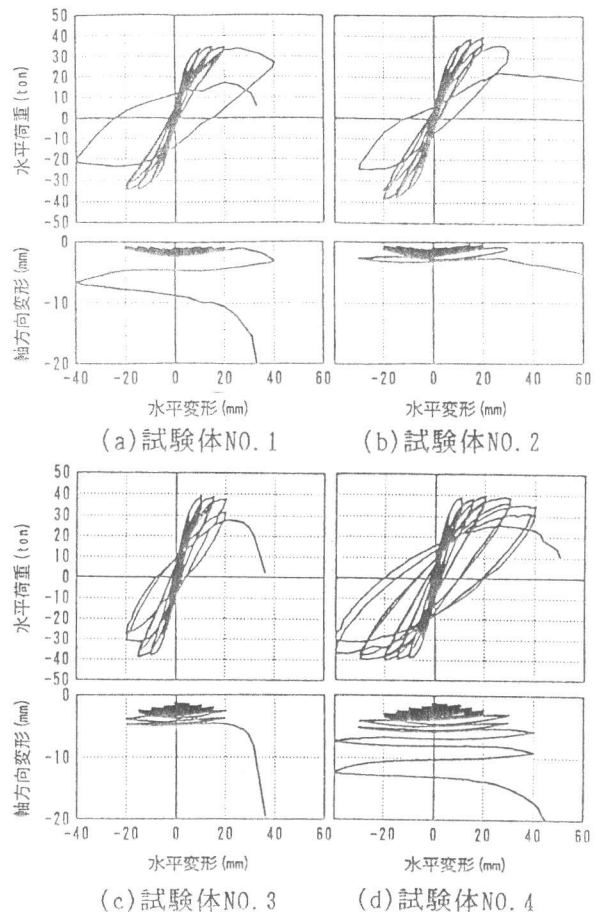


図-6 各試験体の水平荷重-水平変形関係と軸方向変形-水平変形関係

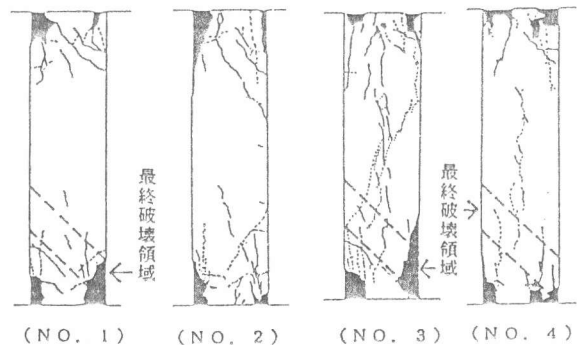


図-7 各試験体のひび割れ図(部材角R=1/50)

図-7に各試験体の部材角 $R=0.02\text{rad}$ 時のひび割れ図を示す。いずれの試験体も主筋は圧縮降伏が引張降伏に先行し、部材角 $0.005\sim 0.009\text{rad}$ で生じた。その後、試験体1,3,4の3体は安定した挙動を示し、いずれも突然軸力を負担できなくなり終局状態となった。最終的には、図-7の破線で示すように柱脚部で角度45度程度の滑り面が幅15cm程度にわたって観察され、この領域に含まれる主筋に座屈・破断が見られた。一方、試験体2は、部材角 $0.030\text{rad}$ の繰り返しで主筋に沿う付着ひび割れが顕著となり、以降耐力は最大耐力の約半分程度に低下したが、軸力は負担し、典型的な付着破壊の性状を示した。なお、部材角 $1/50$ では試験体3,4に中間主筋に沿った縦ひび割れが観察されたが、最終的に試験体3のひび割れは広がり、試験体4では広がらなかった。

### 3. 2 主筋の滑り

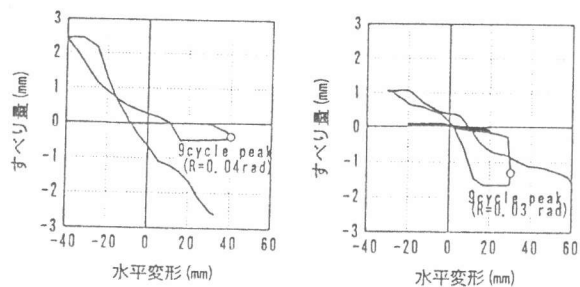
図-8(a)(b)に試験体1,2の水平変形と中間主筋の滑り量の関係を示した。試験体1は部材角 $0.04\text{rad}$ のサイクルの最後に突然滑りだした。一方、試験体2は同様に部材角 $0.030\text{rad}$ のサイクルの最後に滑りだすが、それ以前にも滑りが観察されている。この滑り開始部材角と試験体の靱性能を比較すると、いずれも耐力の低下と滑り開始がほぼ同時期であった。なお、滑り開始部材角として試験体1は部材角 $\pm 0.040$ 、試験体2は部材角 $\pm 0.030$ とした。試験体3,4は主筋の滑りを測定していないが、中間主筋の上と下の危険断面位置での歪の履歴をみると、主筋の歪度の変動は最初から最後までほぼ同程度であり、限界部材角までは主筋の滑りは生じなかったと推定される。

### 3. 3 試験体の靱性

表-4に実験結果の一覧表を示す。限界部材角は表-4の注(\*2,3)に示すように2通りの判断基準により評価した。すなわち、安定したサイクルの部材角(限界部材角1)と包絡線上で最大耐力の80%以下となる部材角(限界部材角2)である。これらの結果を見ると、限界部材角1は限界部材角2の正負の小さい方とほぼ対応していることが分かる。一方、この実験結果と表-3に示した計算値とを比較すると、試験体3以外は $R_p$ 、 $R_f$ 、 $R_s$ の最小値で概ね評価されているが、計算値が $R_p$ と $R_f$ のどちらで決まるかどうかとその破壊形式とは明確な対応が観察されなかった。試験体3の評価と共に今後の検討が必要である。

### 4. 主筋の付着性状の評価

図-9は主筋の付着割裂により靱性が決まっ



(a) 試験体NO. 1 (b) 試験体NO. 2  
図-8 中間主筋の滑り量-水平変形関係

表-4 実験結果一覧

試験体	最大耐力 (ton)		最大耐力時部材角 (rad)		降伏部材角 (rad) *1	限界部材角 1 (rad) *2	限界部材角 2 (rad) *3		すべり開始部材角 (rad) *4
	正加力	負加力	正加力	負加力			正加力	負加力	
1	34.7	-34.1	0.015	-0.020	0.007	$\pm 0.020$	0.039	-0.020	$\pm 0.040$
2	39.4	-38.5	0.020	-0.020	-0.009	$\pm 0.020$	0.030	-0.020	$\pm 0.030$
3	39.0	-38.6	0.010	-0.015	0.005	$\pm 0.015$	0.020	-0.015	-
4	39.3	-39.9	0.020	-0.020	0.005	$\pm 0.040$	0.040	-0.040	-

- (\*1)降伏部材角 : 主筋の初降伏時(圧縮あるいは引張のいずれかであるが本実験ではすべて圧縮降伏が先行)  
 (\*2)限界部材角 1 : 正負の繰り返しにより耐力があまり低下しないサイクルの部材角(1回目に最大耐力の80%以上の耐力があり、2回目の繰り返しで1回目の80%以上の耐力を維持していることを目安にした)  
 (\*3)限界部材角 2 : 包絡線において最大耐力の80%の低下点  
 (\*4)すべり開始部材角 : 繰り返しにより大きくすべり出した時のサイクルの部材角

た試験体2の中間の引張主筋（滑りを測定した主筋と図心に対して対称位置）の応力度分布を各サイクルのピーク時について示したものである。なお、主筋の応力度は歪ゲージによる歪度をバイリニア履歴にあてはめて求めた。図によると主筋が滑りだす直前のサイクル（R=0.020rad）では、引張側も圧縮側も少なくとも断面せいと同一の25cm以上の領域ではほぼ降伏しており、付着力は中間の50cmの領域で発揮されていることが分かる。

図-10(a)(b)は試験体1と2の滑りを測定した主筋について縦軸に主筋の応力度から得られる中央の50cm部分の平均付着力を横軸に主筋の滑りをとって示したものである。また、図中には付着強度（表-3の $\tau_{bu}'$ ）も示してあるが、試験体1ではこの付着強度に達する以前に滑りが生じているのに対し、試験体2では付着力が付着強度に達した前後で滑りを生じていることが分かる。すなわち、試験体2が付着強度が不足して滑りだしたのに対し、試験体1では変形が進行しコンクリートが劣化して付着強度が低下し滑りだした、と解釈できる。

図-11(a-1)(a-2)は高強度材料を用いた既往の柱・はり試験体の実験 [4, 5, 6, 7] について、主筋の滑り開始部材角と表-3の $\tau_f/\tau_{bu}'$ で表される付着指標1の関係を中子筋の有無で分けて示したものであり、本実験結果も示してある。なお、図中の $\Delta$ は滑りが観察されなかった試験体の限界部材角（ここでは最大耐力の80%に低下した点）であり、この部材角までは試験体が健全でなおかつ滑りを生じていなかったことを意味するデータである。図-11(a-1)の既往のデータで滑りを生じているものは引張主筋が4本のはり4体と引張主筋が3本の柱1体であり、この両者の間には大きなばらつきがある。これに対し本実験結果は試験体1,2とも既往の柱に近く、このばらつきは主筋の本数に依存するのではなく、軸力の存在に依存することが分かる。

図-11(b-1)(b-2)は主筋の滑り開始部材角と付着指標2の関係を示したものである。付着指標2は図-9の考察により、付着長さを作用軸力の関数と考え、設計用付着応力度を式(1)で評価したものである。なお、図-12に示した主筋が圧縮と引張で同時に降伏するときの概念図より、このときの軸力比を1/3と仮定し、軸力比1/3で付着長さが有効せいdだけ減少する関数とした。図-11(b-1,2)をみるといずれも付着滑りを生じたものと生じないものでは指標1前後を境界に分離されていることが分かる。また、図-11(b-1)中のすべったデータには右下がりの傾向がみられ、これは、前述したように試験体の変形レベルによりその付着強度が低下していくことを意味している。これらのデータの回帰直線が図中の破線で表した式(2)であり、中子筋無しのはりと柱の滑り部材角と付着指標2の評価式となる。

$$\tau f' = d b \cdot (2 \cdot \sigma_y) / (4 \cdot L b) \quad (1)$$

$$L b = L - d - d \cdot \gamma$$

$$\gamma = N / (b \cdot D \cdot \sigma_B / 3) \quad (\leq 1)$$

$$R s = 0.19 - 0.17 \cdot (\tau f' / \tau_{bu}') \quad (2)$$

ここで、 $d b, \sigma_y$ は主筋の径と降伏応

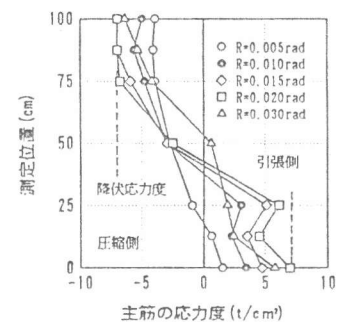
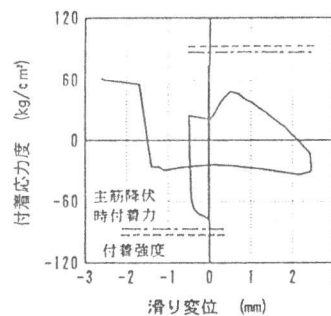
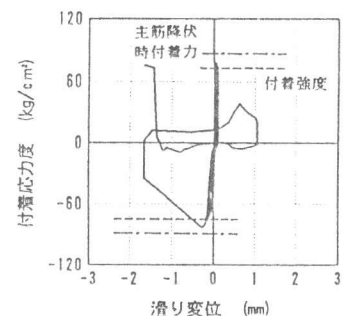


図-9 試験体NO.2の中間主筋の応力度分布



(a) 試験体NO.1



(b) 試験体NO.2

図-10 中間主筋の付着応力度-滑り量関係

力度、 $L$ 、 $D$ 、 $d$ 、 $b$ は試験体の全長、全せい、有効せい、幅、 $\sigma_B$ はコンクリート強度、 $N$ は軸力である。式(2)による滑り開始部材角が表-3に示した $R_s$ である。

### 5. まとめ

高強度材料を用いたRC造柱の高軸力下での変形能を確保するために必要なせん断補強筋、圧縮コンクリートの拘束筋、および、主筋の付着防止筋の配筋方法を開発することを目的に、4体のRC造柱試験体の静加力実験を行った。靱性能は曲げ降伏後のせん断破壊、曲げ圧縮部の破壊および付着割裂破壊に分類することにより概ね評価できた。さらに、作用する付着力の有効長さが軸力の影響で短くなることが観察され、指針の設計用付着力の評価式を修正した。

[謝辞] 本研究は、建設省総プロNew Rc(委員長青山博之東大教授)および、文部省科学研究費・総合研究A(代表者青山博之東大教授)の一環として行った。加力は東京大学工学部総合試験所大型構造物実験室で行った。実験に当り東京大学工学部建築学科・青山博之教授、同・小谷俊介助教授、同・細川洋治助手にご指導・ご援助をいただき、また、日比純一氏をはじめ青山・小谷研究室諸兄には多大なるご協力をいただきました。ここに関係各位に謝意を表します。

### [参考文献]

- 1) 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年
- 2) 加藤大介：鉄筋コンクリート部材の靱性評価に関する研究、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、1990年、pp. 131-138
- 3) 伊藤勝：構造物の実験法に関する研究、東京大学博士論文、昭和46年5月
- 4) 平石久廣、稲井栄一、他：鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の限界変形に関する研究(その1)、日本建築学会構造系論文報告集第410号、1990年4月、pp. 27-39
- 5) 川島俊一、平石久廣、他：高強度鉄筋コンクリート造柱の高軸力下の変形性状(その1、2)、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造I、1990年、pp. 845-848
- 6) 境有紀、日比純一、他：高強度コンクリートを用いたRC柱の曲げ変形性能に関する実験的研究、第12回コンクリート工学年次論文報告集、1990年、pp. 445-450
- 7) 藤沢正視、上之園隆志、他：高強度鉄筋コンクリートはりの靱性確保に関する研究(その1~3)、日本建築学会大会学術講演梗概集C構造I、1990年、pp. 277-282

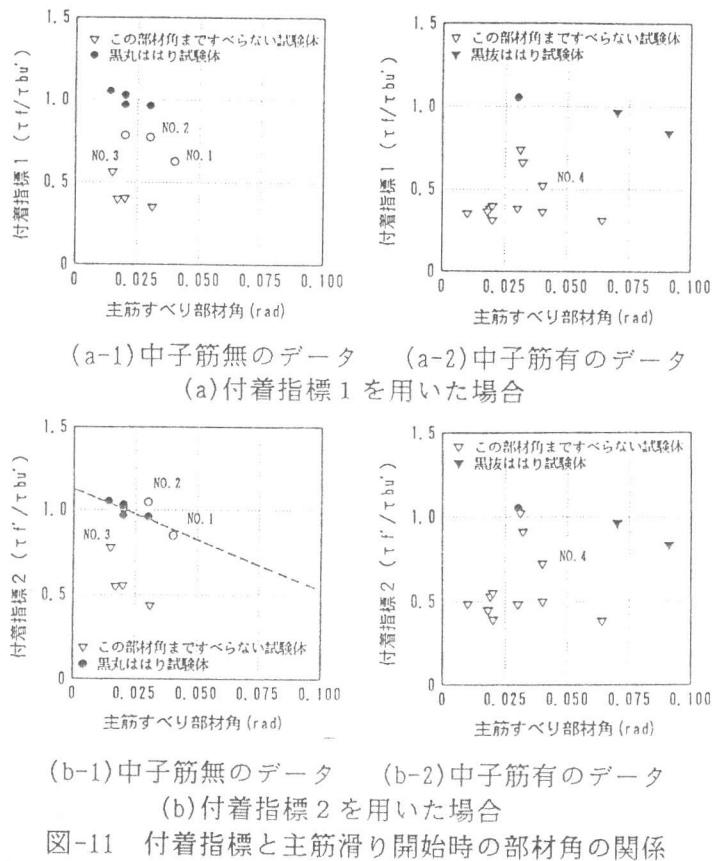


図-11 付着指標と主筋滑り開始時の部材角の関係

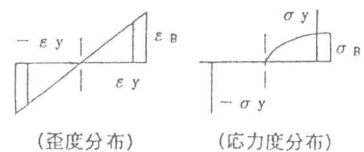


図-12 主筋が圧縮と引張で同時に降伏するときの概念図