

# 論文 超高強度コンクリートを使用したRC造柱部材の曲げ性状に関する実験的研究

杉本 訓祥\*1・増田 安彦\*1・津田和明\*1・江戸 宏彰\*1

**要旨:** 圧縮強度  $120\text{N/mm}^2$  を超えるコンクリートを使用したRC造柱部材の曲げせん断実験を実施した。特に、かぶりコンクリートの剥落により耐力が低下する状況に着目し、耐力評価方法を検討した。また、かぶりコンクリートの剥落を防止し、かぶりコンクリートの破壊に伴う急激な耐力の低下を軽減する方法を提案した。提案した手法により、曲げ性状の改善が見られた。

**キーワード:** 超高強度コンクリート, かぶりコンクリート, 外殻プレキャスト

## 1. はじめに

近年、設計基準強度  $F_c=120\text{N/mm}^2$  (以下  $F_c120$  と略記, 他強度も同様) を超える高強度コンクリートを使用した部材や架構に関する研究開発が増え<sup>1)</sup>, 実施工物件にも採用されつつある。高強度コンクリートのメリットとして、高軸力を負担できることがあげられるが、 $F_c100$  を超えるコンクリートを用いた場合、高軸力下で曲げせん断力を作用させると、かぶりコンクリートの圧壊が急激に起こり、一時的に耐力が低下する性状があることが報告されている<sup>2)</sup>。この要因のひとつとして、高強度になるほど、コンクリートの最大耐力到達後の破壊が急激になる傾向が関連していると考えられる。そこで、かぶり部分の早期破壊を防ぐために、通常強度のコンクリートにより製造した外殻 PCa の内部に、 $F_c120$  級コンクリートを打設した RC 造柱試験体を製作し、その効果を確認した。本報では、これら RC 造柱部材の実験および検討結果について述べる。

## 2. 実験シリーズ I

### 2.1 実験概要

試験体一覧を表-1 に、試験体配筋詳細の例を図-1 に示す。使用材料の材料特性を表-2, 表-3 に示す。また、試験体断面図を図-2 に、加力装置図を図-3 に示す。図-2 には、次章で述べるシリーズ II の断面もあわせて示す。シリーズ I では、基本的な破壊性状を確認する目的で、同一の主筋配筋に対し、曲げ降伏先行型(No.3), せん断破壊型

(No.2), 付着割裂破壊型(No.1)を計画した。主筋はSD685とした。せん断補強筋にはSD785を用い、試験体 No.1 のみ D10 とし、残りの試験体は D13 を用いた。加力は、一定軸力比0.244を作用させた状態で上下スタブを平行に保って水平力を載荷する正負交番繰り返し載荷とし、試験体 No.1, 2 については部材角  $R=\pm 1/500, 1/250, 1/167, 1/125, 1/100, 1/67$  を、試験体 No.3 については  $R=\pm 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33$  を各2回繰り返ししたあと、最大で 1/10 程度の大変形まで載荷する履歴とした。

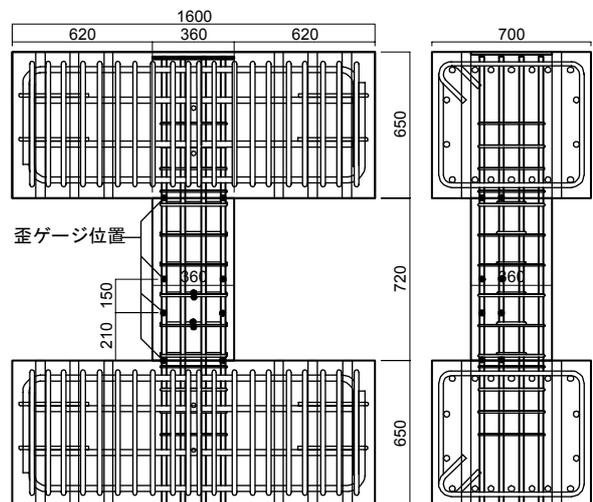


図-1 試験体形状寸法 (I-No.1)

表-1 試験体一覧(シリーズ I)

	No.1	No.2	No.3
断面	360X360 [mmXmm]		
高さ	720 mm		1080mm
主筋	12-D19(SD685)		
帯筋	4-D10@134 SD785	4-D13@50 SD785	
軸力	0.244・Fc・B・D		

\*1 (株)大林組 技術研究所 (正会員)

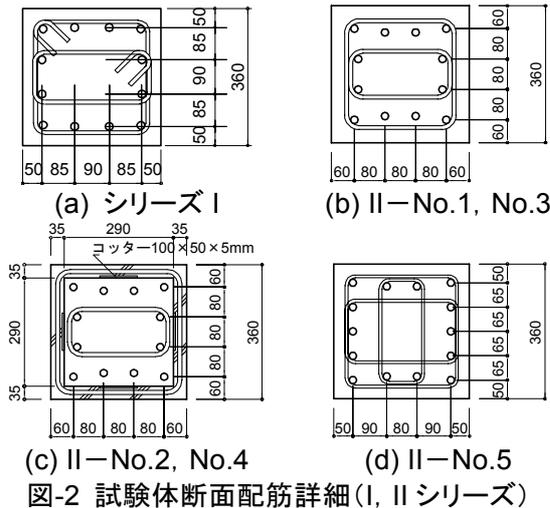


図-2 試験体断面配筋詳細(I, IIシリーズ)

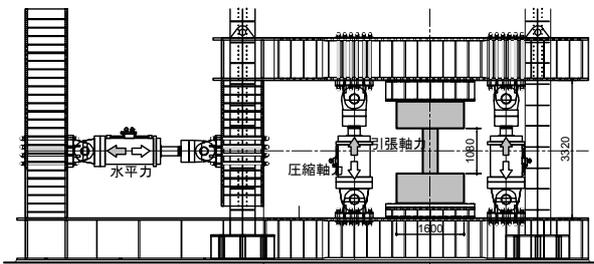


図-3 加力装置図(試験体 No.3 のセット状況)

表-2 コンクリートの材料特性(単位[N/mm<sup>2</sup>])

シリーズ	$\sigma_B$	$\varepsilon_B$	$\sigma_t$	$E_c(X10^4)$
シリーズ I	136.1	3440	5.34	4.67
シリーズ II	142.2	3180	5.19	4.97
シリーズ II 外殻 PCa	78.2	2790	3.87	3.77

表-3 鉄筋の材料特性(シリーズ I, 単位[N/mm<sup>2</sup>])

種類	$\sigma_y$	$E_s(X10^5)$	部位
D10	1082	1.99	No.1 帯筋
D13	1003	2.05	No.2, 3 帯筋
D19	710	1.95	主筋

## 2.2 破壊状況および荷重-変形関係

各試験体の最終破壊状況を図-4 に示す。また、各試験体の荷重-変形関係を図-5 に示す。

試験体 No.1 は、付着割裂破壊を想定したが、実験では主筋に沿ったひびわれは加力終了時まで確認できず、最終的にはかぶりコンクリートが大幅に剥落した。この試験体の破壊モードはせん断破壊であり、部材角  $R=1/167$  時に最大耐力 ( $Q=1300kN$ )となり、その後耐力は徐々に低下し、

部材角  $R=1/67$  時では、耐力は最大耐力の 61% に低下した。また、 $R=1/125$  のサイクルでせん断補強筋が降伏し、耐力低下も見られるが、履歴ループの面積は大きい。せん断破壊を想定した試験体 No.2 は、 $R=1/125$  時に圧縮側のかぶりコンクリートの剥落が顕著に生じ、わずかな耐力低下も見られたが、その後耐力は上昇し、主筋の圧縮降伏、引張降伏が生じた。大変形時まで耐力低下は見られなかった。また、軸力レベルが大きく、せん断変形が卓越する場合には見られる S 字型の履歴ループを描いているが、大変形 ( $R=1/25$ ) に達しても大きな耐力低下はみられなかった。試験体 No.3 の破壊モードは、 $R=1/100$  時に圧縮側かぶりコンクリートの剥落が顕著に生じ、一時的に耐力が低下したが、その後耐力は緩やかに上昇し、想定通りの曲げ降伏先行型となった。また、主筋の降伏以後ではやや履歴面積が大きくなるが、全体的にはエネルギー吸収の小さい履歴性状を示し、大変形時まで、急激な耐力低下は見られなかった。

## 2.3 耐力性状

図-5 には、主筋の圧縮、および引張降伏時 (Yield.C, Yield.T) およびせん断補強筋降伏時 (Y.Hoop) をプロットするとともに、各強度の計算値もあわせて示した。

試験体 No.1 は、最大耐力は、概ねせん断終局強度 ( $V_{su}$ (韌))と対応していた。試験体 No.2 は、計算値よりやや低い荷重で主筋の降伏が生じた。最大耐力は、せん断終局強度

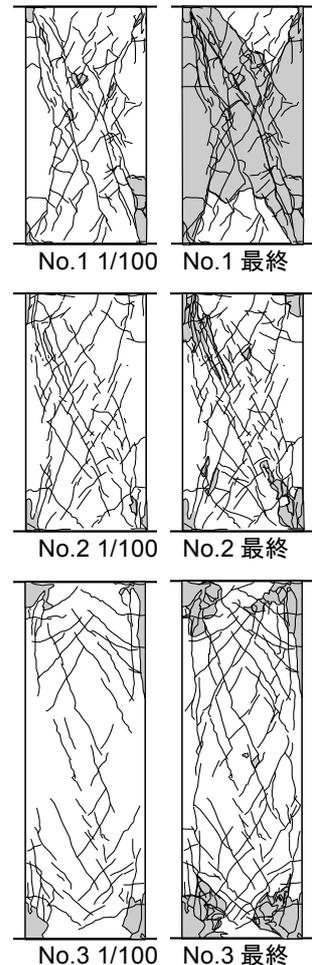


図-4 各試験体の損傷状況

( $V_{su}$ (靱)) および曲げ耐力 ( $V_{mC}$ ) とほぼ対応するが、曲げ降伏時せん断力 ( $V_{mYC}$ ) より低い荷重で主筋の降伏が生じている点で破壊モードが計算値と対応していない。試験体 No.3 は、靱性能が優れており大きな耐力低下はなかったが、かぶりの剥落が顕著であり、試験体 No.2 と同様に、主筋の降伏荷重が計算値よりやや低く、対応がよくない。

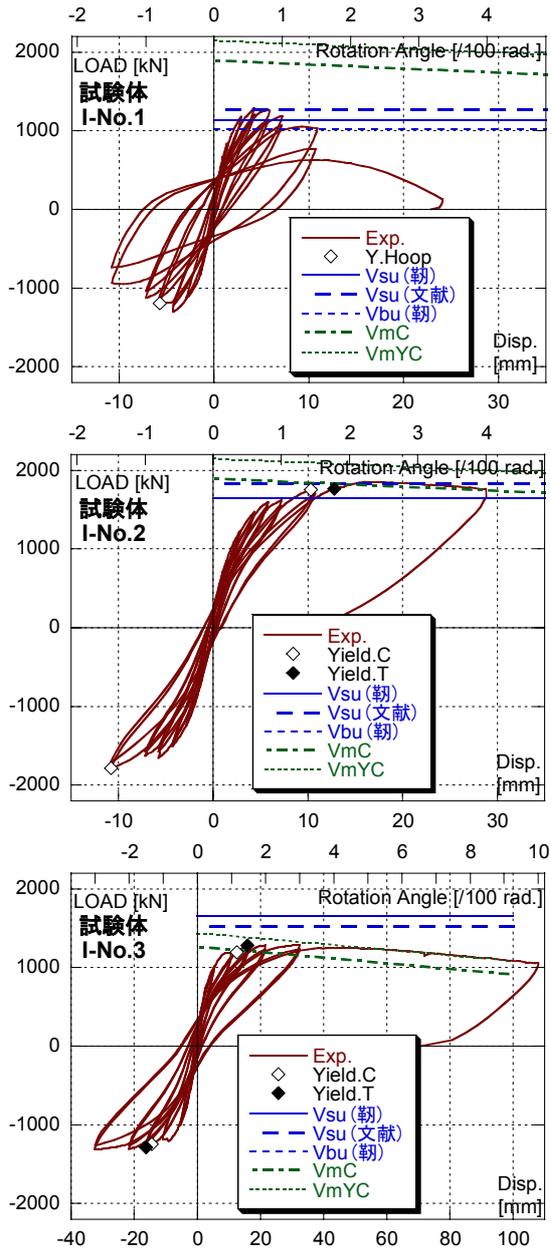


図-5 荷重-変形関係

計算強度はそれぞれ次の通り。Vs<sub>u</sub>(靱):靱性指針<sup>3)</sup>によるせん断終局強度, Vbu(靱):靱性指針による付着割裂破壊を考慮したせん断強度, Vs<sub>u</sub>(文献):文献<sup>4)</sup>によるせん断終局強度, V<sub>mC</sub>, V<sub>mYC</sub>:圧縮縁歪が最大応力度時歪となる時, および主筋圧縮降伏時せん断力(断面解析による:4章参照)

### 3. 実験シリーズ II

#### 3.1 実験概要

試験体一覧を表-4 に、試験体配筋詳細の例を図-6 に示す。また、試験体断面の配筋詳細は図-2 に示す。シリーズIIでは、かぶり部分のコンクリート強度を主な変数として試験体を計画した。すなわち、No.1~No.4 は、主筋および帯筋の配筋を同一とし、No.1, No.3 は全断面同一のコンクリート (Fc120) を使用し、No.2, No.4 では、Fc60 程度のコンクリートを用いて製造した外殻 PCa のコア内に Fc120 程度の超高強度コンクリートを打設して柱を形成した。また、No.1, No.2 は一定軸力比 0.3 を、No.3, No.4 は変動軸力(最大圧縮軸力比 0.45, 最大引張軸力は主筋降伏荷重の 70%)を与えた。一方、試験体 No.5 は、全断面同一のコンクリート (Fc120) を使用し、一定軸力比 0.1 を与え、付着割裂破壊型として計画した。No.1~No.4 では、主筋に SD685 級を用い、せん断補強筋には、SBPD1275 級を用いた。付着割裂破壊型の No.5 では、主筋に異型 PC 鋼棒を用いた。使用材料の材料特性を表-5 に示す。加力はシリーズ I と同様に、一定軸力比 (=0.3 または 0.1) を作用させた状態で、上下スタブを平行に保って水平力を载荷する、静的正負交番繰り返し载荷とし、試験体 No.3, 4 については、せん断力に比例させて変動軸力を与えた。いずれの試験体も、R=±1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25 を各2回繰り返した後、最大 1/10 程度の大変形まで载荷する履歴とした。

表-4 試験体一覧(シリーズ II)

	II-No.1	II-No.2	II-No.3	II-No.4	II-No.5
断面	360X360 [mmXmm]				
高さ	1080mm				
主筋	12-D19(SD685)				14-D19 PC 鋼棒
帯筋	4-U10.7@50				4-U7.1 @50
(種別)	SBPD1275				
形式 <sup>*)</sup>	フル	外殻	フル	外殻	フル
軸力比	0.3		0.45~0.7A <sub>g</sub> σ <sub>y</sub>		0.1

\*) フル:全断面同一コンクリート, 外殻:外殻 PCa を使用。

表-5 鉄筋の材料特性(シリーズ II, 単位[N/mm<sup>2</sup>])

種類	$\sigma_y$	$E_s(X10^5)$	部位
U7.1	1389	2.12	No.5 帯筋
U10.7	1381	2.19	No.1~4 帯筋
D19	713	1.94	No.1~4 主筋
D19	1193	1.99	No.5 主筋

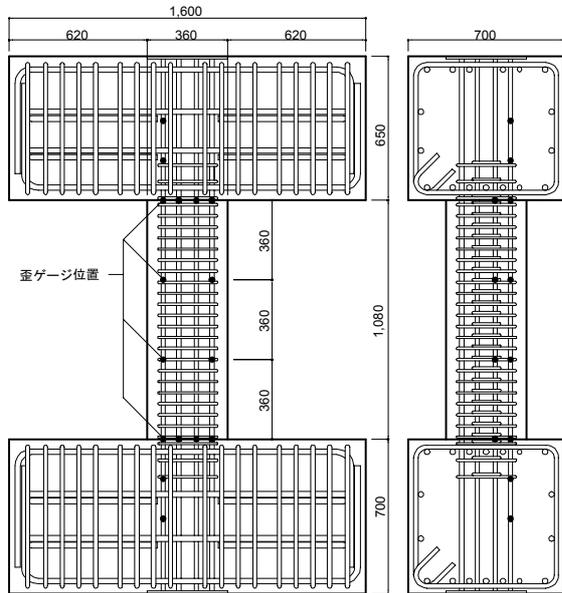


図-6 試験体形状寸法(II-No.1, No.3)

### 3.2 損傷状況および荷重-変形関係

各試験体の最終破壊状況を図-7 に示す。また、各試験体の荷重-変形関係を図-8 に示す。

一定軸力を与えた試験体 No.1 は、 $R=1/100$  のサイクルで圧縮側かぶりコンクリートの剥落が顕著に生じ、耐力の一時的な低下も激しかった。かぶり剥落時が最大耐力となりその後は徐々に耐力低下を続け、 $R=1/50$  程度までに、主筋の圧縮降伏、引張降伏が生じた。試験体 No.2 は、かぶりコンクリートの損傷は生じたものの、それに伴う耐力低下はなく、 $R=1/67$  程度までに主筋の降伏が生じて最大耐力に達し、その後は徐々に耐力低下した。いずれも想定どおりの曲げ降伏先行型となった。変動軸力を与えた試験体 No.3 は、試験体 No.1 と同様に、 $R=1/100$  のサイクルで圧縮側かぶりコンクリートの剥落とともに最大耐力となり、その後  $R=1/67$  で圧縮降伏し、耐力は徐々に低下し続けた。引張軸力時は、 $R=1/200$  までに引張降伏が生じ、その後も耐力は上昇を続けた。試験体 No.4 は、 $R=1/100$  時に圧縮降伏が生じるとともに最大耐力となり、その後

耐力は徐々に低下し続けた。引張軸力時は No.3 と同様の性状を示した。No.3, 4 とともに、想定どおりの曲げ降伏先行型となった。一定軸力を与えた試験体 No.5 は、 $R=1/33$  の加力サイクルから主筋に沿った付着割裂ひびわれが顕著になり、その後耐力低下した。一部に主筋の引張降伏も確認されたが、想定どおり付着割裂破壊となった。

### 3.3 耐力性状

図-8 には、図-5 と同様に主筋の圧縮・引張降伏時 (Yield.C, Yield.T) をプロットし、各種強度の計算値も合わせて示した。

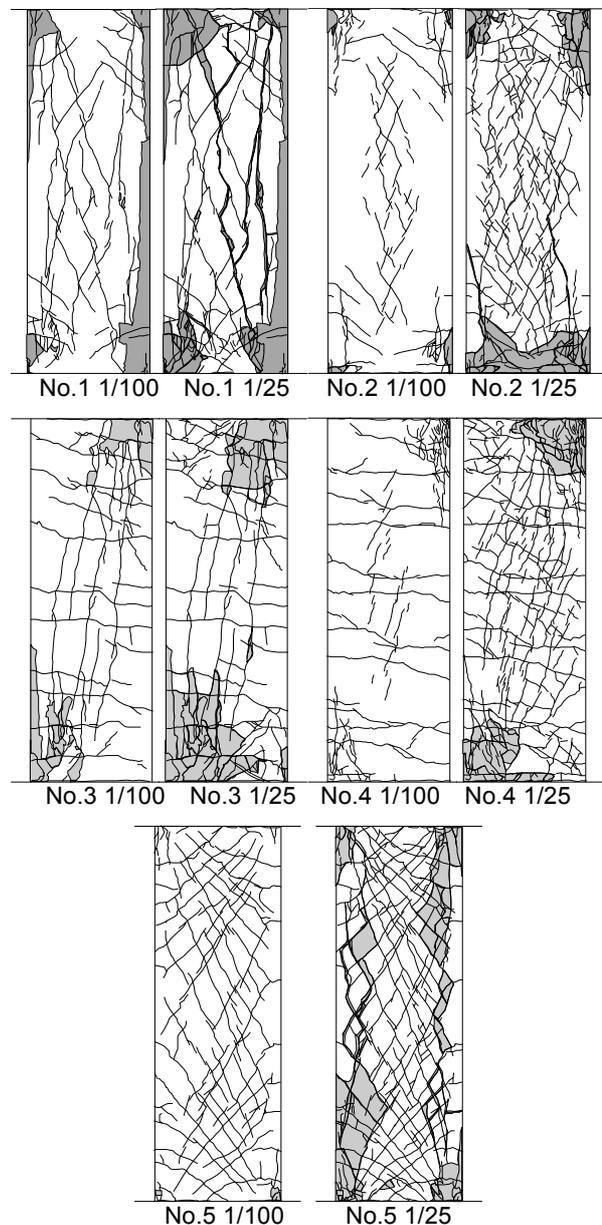


図-7 各試験体の損傷状況

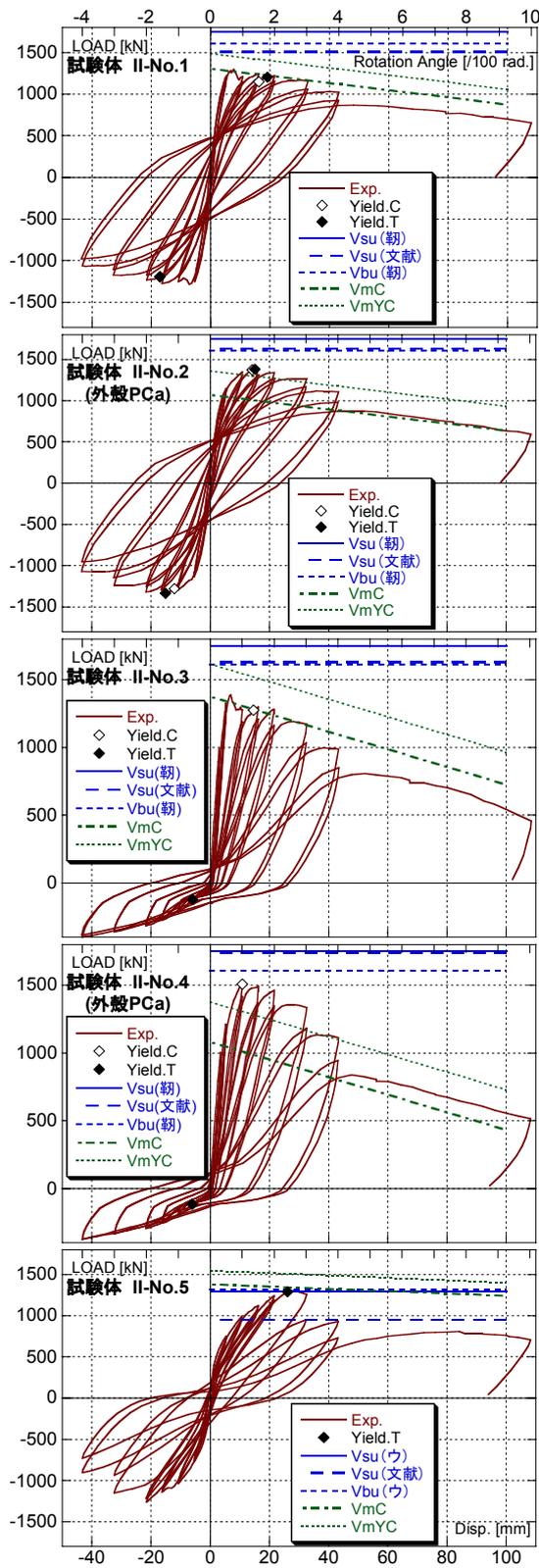


図-8 各試験体の荷重-変形関係

計算強度はそれぞれ次の通り。

$V_{su}$ (靱),  $V_{bu}$ (靱): 靱性指針<sup>3)</sup>によるせん断終局強度, および付着割裂破壊を考慮したせん断強度,  $V_{su}$ (文献): 文献<sup>4)</sup>によるせん断終局強度,  $V_{su}$ (ウ): SBPD1275 評定式<sup>5)</sup>(せん断強度),  $V_{bu}$ (ウ): 同(付着割裂破壊を考慮したせん断強度),  $V_{mC}$ ,  $V_{mYC}$ : 圧縮縁歪が最大応力度時歪となる時, および主筋圧縮降伏時せん断力(断面解析による: 4章参照)

試験体 No.1 および No.3 は, いずれも曲げ降伏強度計算値と同程度かやや低い値で主筋の降伏が生じており, 実験結果との対応はよくない。また, 最大耐力は, 圧縮側かぶりコンクリートの剥落時に生じていることから, 計算上の破壊モードとも対応していない。一方, 試験体 No.2 および No.4 は, 最大耐力および曲げ降伏強度ともに計算値より上回っており, 十分な余裕度を持って安全側に評価可能であることが示されたといえる。特に, No.1 に比べ No.2 の方が, No.3 に比べ No.4 の方が最大耐力は高い結果となっていることから, 外殻 PCa を用いたことでかぶりコンクリートの急激な剥落を防止し, さらに耐力の向上につながったといえる。

一方, 試験体 No.5 は, せん断強度および付着割裂破壊を考慮したせん断強度計算値と最大耐力はほぼ対応しており, 余裕度は小さいものの概ね評価可能であるといえる。

## 4. 結果の検討

### 4.1 曲げ耐力性状

曲げ降伏が先行した試験体(シリーズ I の No.2, No.3 およびシリーズ II の No.1~No.4)について, 断面解析により得られる M-N 相関曲線と, 実験値を比較して図-9 に示す。断面解析は, コンクリートの応力度歪度関係に, NewRC 提案の拘束効果を考慮したモデル<sup>6)</sup>を用い, 特に, 補強筋より外側の要素については, 拘束効果なしとしたモデルを用いた。また, 鉄筋については, 降伏後の剛性を初期剛性の 1/100 とするバイリニアモデルとした。図には, 引張最外縁主筋の引張降伏時および圧縮側最外縁主筋の圧縮降伏時として求めた M-N 相関曲線のほか, 圧縮縁歪度がコンクリートの圧縮強度時歪度に達したときとして求めた曲線も示した( $\epsilon_c = \epsilon_{cB}$ )。図より, シリーズ I およびシリーズ II の No.1, No.3 については, 圧縮軸力時の降伏モーメント(YC)は計算値と同程度か, それよりやや低い結果となっている。一方, 外殻 PCa を用いた試験体(シリーズ II, 試験体 No.2, No.4)は, 計算値を上回っており, 妥当な結果となっている。これは, 前者の各試験体では, 剥落した圧縮側かぶりコン

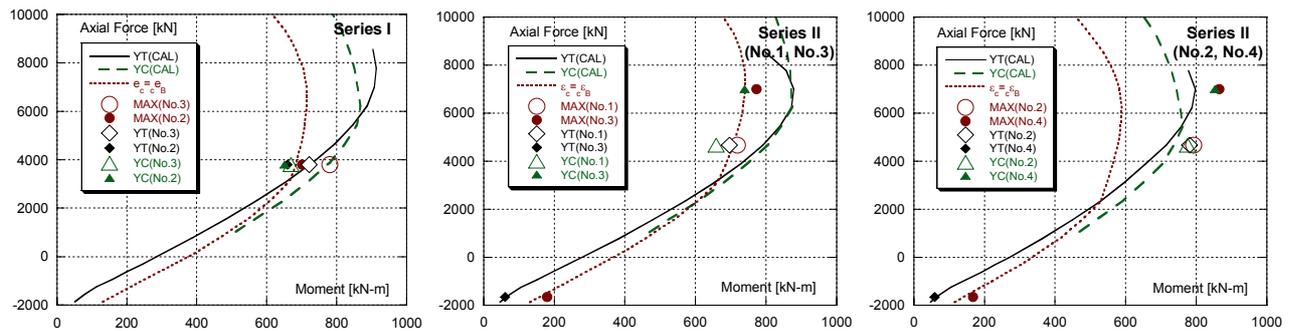


図-9 M-N 相関曲線と実験結果の比較

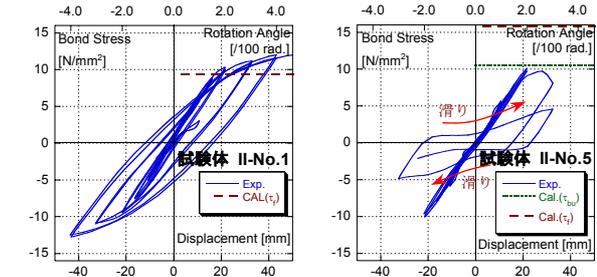
クリートが圧縮応力を負担できないため、実験における降伏モーメントが小さくなったと考えられる。最大モーメントが、圧縮縁歪度が圧縮強度時歪度に達したときのモーメントとほぼ同程度となっていることから、かぶりコンクリートの劣化を考慮する必要があるといえる。つまり、かぶりコンクリートのように、鉄筋の拘束がない状態のコンクリートの応力度歪度関係の評価精度が現状では不十分であると同時に、軸力の大きさによっては、圧縮側かぶりコンクリートの圧壊でほぼ最大耐力に達し、その後に主筋降伏が生じる場合もあり、曲げ性状評価に注意が必要である。

#### 4.2 主筋の付着性状

シリーズ II の試験体 No.1 および No.5 の主筋歪度測定結果から求めた付着応力度の履歴を図-10 に示す。図には、計算値(靱性指針による付着割裂強度精算値<sup>3)</sup>および曲げ降伏時付着応力度をそれぞれ示す。曲げ降伏した試験体 No.1 では、紡錘形の履歴を描いているが、試験体 No.5 では、付着割裂ひびわれが見られた  $R=1/33$  の加力サイクルで付着応力度は最大となり、その後低下するとともに滑りも顕著に表れている(図-10)。また、最大応力度は、靱性指針による精算値とほぼ同程度であり、このことから、従来の設計式が適用可能であると判断できる。ただし、シリーズ I の No.1 のように、曲げ耐力が想定より低い結果、破壊モードが計算結果と相違する場合もあり、注意が必要である。

#### 5. まとめ

圧縮強度  $120\text{N/mm}^2$  を超える高強度コンクリートを用いた RC 造柱部材の曲げせん断実験を行い、以下の知見を得た。



付着応力度はスパン中央部2点の歪度測定値を元に算出。

図-10 付着応力度の履歴

1. Fc120 級コンクリートを用いた RC 造柱では、かぶり部分の劣化が顕著になり、曲げ耐力評価に影響する可能性がある。
2. コアコンクリートの Fc120 より低い Fc60 程度のコンクリートを用いた外殻 PCa を用いることで、かぶり部分の劣化が生じることなく安定した曲げ性状が得られた。
3. 付着割裂強度は、既往の評価式で概ね評価できていた。

#### 参考文献

- 1) 増田安彦, 杉本訓祥, 江戸宏彰: 超高強度コンクリート( $120\text{N/mm}^2$  級)を使用した RC 架構の耐震性能に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.839-842, 2004.08
- 2) 小室努, 村松晃次, 今井和正, 是永健好: 軸方向力と曲げが同時に作用する超高強度コンクリート RC 柱の曲げ耐力, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.315-318, 2004.08
- 3) 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 日本建築学会, 1997
- 4) 杉本訓祥: 鉄筋コンクリート造柱・梁部材の復元力特性評価法, 日本建築学会構造系論文集, pp.123-130, No.578, 2004.4
- 5) 高周波熱錬株式会社: 鉄筋コンクリート造はり, 柱のせん断補強筋として PC 鋼棒ウルボンを使用する工法設計指針・同解説
- 6) 崎野健治, 孫玉平: 直線型補強材により拘束されたコンクリートの応力-ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, No.461, pp.95-104, 1994.7