# 論文 超高強度コンクリートを用いたRC柱部材の曲げせん断実験

杉本 訓祥\*1・増田 安彦\*1・津田 和明\*1・長沼 一洋\*1

要旨: 圧縮強度 150N/mm<sup>2</sup> 級コンクリートを用いた RC 柱部材の曲げせん断実験を実施し, 超高強 度コンクリートを用いた RC 柱部材に特有のかぶりの損傷と, 一時的で急激な耐力低下現象を確認 した。また, 外殻プレキャストを用いることで, この現象を防止できることを確認するとともに, コアコン クリートの圧縮強度の違いが耐力低下現象に及ぼす影響を明らかにした。

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  $Fc = 100N/mm^2$ (以下 Fc100 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、Fc100を超えるコンクリートを用 いた場合, 高軸力下で水平力を作用させると, か ぶりコンクリートの圧壊が急激に起こり,一時的に 耐力が低下することが報告されている<sup>2)</sup>。一方,筆 者らは, Fc120を用いたコアよりも強度の低いコンク リートを用いた外殻プレキャスト<sup>3)</sup>(以下,外殻 PCa と略記, Fc60 程度)を用いることで,このような現象 を防止できることを確認している4)。本報では、使用 するコンクリート強度を, Fc80 から Fc150 の範囲に 広げた RC 造柱部材の静的実験により,外殻 PCa の効果を検証した。併せて,付着性状および付着 割裂強度に関しても検討した。

### 2. 高強度コンクリートの材料特性

本報で使用したコンクリートの材料特性として,ヤ ング係数および圧縮強度時歪度と圧縮強度の関 係を図-1 に示す。図には,既往実験データ<sup>5)~9)</sup>も 比較のためにあわせて示す。また,図には,ヤング 係数および圧縮強度時歪度を,文献<sup>10)~12)</sup>による 一軸圧縮強度からの推定式を用いて計算した結 果もあわせて示した。材料試験結果は,骨材の違 いによる影響など要因もあり,ばらつきが大きいも のの,平均的には上述の計算値と対応している。

\*1 (株)大林組 技術研究所 博士(工学) (正会員)

また, 圧縮応力度-歪度の関係を, 修正 Ahmad モデル<sup>10)</sup>, および NewRC モデル<sup>12)</sup>と比較して図 -2 に示す。ここで, 圧縮強度時歪度は, 材料試験 結果を用いた。強度が低い場合(Fc90 程度<sup>5)</sup>), 特 に上昇域についてはどちらのモデルもよく対応して いるが, 超高強度コンクリートの場合は, 修正 Ahmad モデルの方が比較的対応がよい。





-541-

### 3. RC 柱の曲げせん断実験

#### 3.1 実験概要

試験体一覧を表-1 に, 試験体配筋詳細の例を 図-3 に示す。試験体は曲げ降伏先行型を6体とし, Fc を3水準(Fc80, Fc100, Fc150), 各 Fc につき2 体(外殻 PCa の有無), さらに Fc150 については, 付着割裂破壊型試験体を2体(外殻 PCa の有無) 加え, 合計8体である。使用材料の特性を表-2, 表 -3 に示す。また, 試験体断面を図-4 に, 加力装置 を図-5 に示す。加力は, 表-1 に示す一定軸力を作 用させた状態で上下スタブを平行に保ち水平力を 載荷する正負交番繰り返し載荷とし, 部材角 R= ±1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25 を各2回繰 り返したあと, 1/10 程度の大変形まで載荷した。

|   | 08F-RC/<br>08F-PC | 10F-RC/<br>10F-PC | 15F-RC /<br>15F-PC | 15B-RC /<br>15B-PC |  |
|---|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--|
| 断面  | B×D=360×360       |                   |                    |                    |  |
| 高さ  | 1080              |                   |                    |                    |  |
| 主筋  | 12-D19<br>SD490   | 12-D19<br>USD685  |                    | 16-D22<br>C 種 1 号  |  |
| 帯筋  | 4-U9.0<br>@50     |                   | 4-U10.7<br>@50     | 4-U7.1<br>@50      |  |
| 軸力  | 0.3·Fc·B·D        |                   | 0.1·Fc·B·D         |                    |  |
| Fc[N/mm <sup>2</sup> ]  | 80                | 100               | 1                  | 50                 |  |
| <u>08</u> F - <u>RC</u><br>→ RC:在来タイプ, PC:外殻 PCa 使用<br>→ F:曲げ降伏先行, B:付着割裂 |                   |                   |                    |                    |  |

表-1 試験体一覧(計8体)

→08:Fc80, 10:Fc100, 15:Fc150

| 表-2 材料特性(コンクリート) [N/mm <sup>2</sup> ] |      |                      |      |  |  |  |
|---------------------------------------|------|----------------------|------|--|--|--|
|                                       | 圧縮強度 | ヤング係数                | 割裂強度 |  |  |  |
| Fc80                                  | 103  | $4.40 \times 10^{4}$ | 5.2  |  |  |  |
| Fc100                                 | 135  | $4.31 \times 10^{4}$ | 6.9  |  |  |  |
| Fc150                                 | 163  | $5.10 \times 10^4$   | 7.1  |  |  |  |
| 外殻 PCa                                | 90   | $4.05 \times 10^{4}$ | 4.7  |  |  |  |

| 表-3 | 材料特性(鉄筋) | $[N/mm^2]$ |
|-----|----------|------------|
|     |          |            |

|          | 降伏強度 | ヤング係数                  | 引張強度 |
|----------|------|------------------------|------|
| U7.1     | 1426 | 2.13 × 10 <sup>5</sup> | 1479 |
| U9.0     | 1376 | $2.10 \times 10^{5}$   | 1482 |
| U10.7    | 1392 | $2.18 \times 10^{5}$   | 1510 |
| D19(490) | 519  | $1.95 \times 10^{5}$   | 709  |
| D19(685) | 716  | $1.98 \times 10^{5}$   | 915  |
| D22      | 1201 | $1.99 \times 10^{5}$   | 1311 |

#### 3.2 破壊状況

各試験体の最終破壊状況を図-6 に示す。曲げ 降伏先行型試験体では,在来型の試験体 (08F-RC, 10F-RC, 15F-RC)の場合, コンクリート 強度が高くなるにつれて、ひびわれ本数が少なく、 1本のひびわれが長くなる傾向が見られる。つまり, 1箇所にひびわれが集中し、長くなっている。その ため、大変形時の斜めひびわれが顕著となる。一 方,外殻プレキャストを用いた場合(08F-PC, 10F-PC, 15F-PC), コンクリート強度によらず, 表面 のひびわれは分散し,多数発生している状況が見 られる。また、10F、および 15F シリーズの R=1/100 を見ると, 在来型では端部の圧壊が激しいが, 外 殻 PCa を用いることで、端部の損傷が軽減されて いる。また,付着割裂破壊型試験体(15B-RC, 15B-PC)では、大変形時に主筋に沿ってコンクリー トが剥落しており,外殻 PCaの有無に関わらず,付 着割裂による損傷が顕著に生じている。



### 3.3 荷重-変形関係

各試験体の荷重-変形関係を図-7(a)に示す。

コンクリート強度が最も低い 08F シリーズでは,外 殻 PCa の有無に関わらず,部材角 R=1/100 に至 るまでのかぶり部分の圧壊に続いて,主筋の圧縮 および引張降伏が生じているが,荷重-変形関係 上,不安定な性状は見られない。

一方, 10F-RC では, 圧壊に伴う急激な耐力低下 はないものの, R=1/100 時に最大耐力を迎えた後, 耐力は低下している。これに対し, 外殻 PCaを用い た場合(10F-PC), 最大耐力は, 10F-RC よりやや 低いものの, 急激な低下は見られない。

次に, さらにコンクリート強度の高い 15F シリーズ では, 外殻 PCa を用いない 15F-RC で, R=1/100 の加力サイクルにおいて, 圧壊に伴って急激な耐 力低下が顕著に生じている。これに対し, 外殻 PCa を用いると(15F-PC), 最大耐力はやや低いものの, 圧壊に伴う不安定な性状はまったく生じていない。

また, 15B シリーズでは, 外殻 PCa の有無によら ず, R=1/100 でほぼ最大耐力となった後, 徐々に 耐力低下を生じるとともに, 付着劣化に伴うスリップ も見られるようになっている。

図-7(a)には, 文献<sup>4,13)</sup>に述べた復元力特性評 価法による包絡線の計算値も併せて示した。本手 法では,曲げとせん断に分離して変形を算定する。 曲げ変形は,ひびわれ後の指向点を断面解析に より求めたモーメント-曲率関係(図-7(b))をひびわ れ点を折れ点とするバイリニアに置換して積分して 求める。せん断変形は,ひびわれ後の剛性低下を 考慮する(詳細は文献<sup>4,13)</sup>参照)。断面解析では, コンクリートの応力度-歪度関係に修正 Ahmad モデ ル10)を用い、コアコンクリートについては拘束による 圧縮強度上昇を考慮した。特に,かぶりの圧壊が 顕著であった試験体 10F-RC および 15F-RC では, ひびわれ後の指向点を, 圧縮縁歪度が一軸圧縮 強度時歪度に達した時(圧壊時と呼ぶ)とした場合 と、かぶりの圧壊後に主筋が降伏する時とした場合 の2通りの結果を図示した。また、付着割裂破壊型 の試験体 15B シリーズでは、付着割裂破壊を考慮 したせん断強度<sup>3,14)</sup>(Vbu)も図示した。



08F-RC および外殻 PCa を用いたシリーズ,および 15B シリーズは,計算値との対応は良好である。 一方,10F-RC および 15F-RC では,圧壊時を折れ 点とした計算結果とほぼ一致し,その後の低下した せん断力は,かぶり部分の圧壊後の主筋降伏時 せん断力によく一致している。





## 4. 実験結果の検討

### 4.1 曲げ耐力性状

既報<sup>4)</sup>の実験結果を含め,曲げ降伏が先行した 試験体について,最大耐力と耐力低下の傾向に ついて検討する。本報および既報の実験結果から, コンクリート圧縮強度と最大耐力の関係,およびコ ンクリート圧縮強度と最大耐力と圧壊後の最大せ ん断力(圧壊後ピーク)の比の関係を図-8(a)(b)に



示す。最大耐力と、圧壊後ピークの定義の例を図 -8(c)に示す。図より、コンクリート強度の上昇に伴って、耐力が上昇する傾向は、外殻 PCa を用いて も同様に現れている。ただし、コアコンクリートと外 殻 PCa 部の強度の関係によると見られるばらつき が生じている。一方、最大耐力と圧壊後ピークの関 係は、RC 試験体では、圧縮強度が 130N/mm<sup>2</sup> 以 上の場合、耐力低下が顕著に生じており、圧縮強 度が高いほど、低下の割合が大きい傾向がある。 しかし、外殻 PCa を用いることで、その傾向は見ら れなくなっており、この点からも、外殻 PCa により耐 力低下を防ぐ効果が現れているといえる。

### 4.2 主筋の付着性状

15F および 15B シリーズの主筋の付着応力度履 歴を図-9 に示す。図には,曲げ降伏時付着応力 度(τ<sub>FLEX</sub>)及び付着割裂強度計算値(τ<sub>BOND</sub>)を示 す。付着応力度実験値は,柱頭柱脚から 340mm 離れた2箇所の歪ゲージの値から主筋応力度を算 出し,中央 400mm 区間の平均付着応力度として 求めた。付着割裂強度計算値は,試験体 15B-RC



は文献<sup>14)</sup>の精算値(解説中の式)を用い, 試験体 15B-PC は文献<sup>3)</sup>による外殻 PCaを用いた RC 部材 特有の破壊モードを考慮した方法を用いて算出し た(詳細は文献<sup>3)</sup>参照)。曲げ降伏時付着応力度 は柱頭柱脚の主筋降伏時とし, 付着長さを内法ス パンから柱断面せいを除いた区間として算出した。

15Fシリーズでは、部材角R=1/100からR=1/50 にかけて、曲げ降伏時付着応力度に達した後も、 履歴性状は安定している。外殻PCaを用いた場合 に、やや付着応力度の低下が見られるものの、付 着性状が良好であることがわかる。 一方,付着割裂破壊型の場合,外殻PCaの有無 に関わらず,R=1/100から1/50にかけて,付着応 力度は最大となり,その後は付着応力度が低下す るとともに,スリップ性状も現れている。いずれの試 験体も付着割裂破壊の性状を示している。

次に, 既報<sup>4</sup>も含めた全試験体について, 付着 割裂強度計算値および曲げ降伏時付着応力度と 実験から得た付着応力度最大値( $\tau_{EXP}$ )の関係を 図-10に示す。図は, 縦軸に実験値( $\tau_{EXP}/\tau_{FLEX}$ ), 横軸に付着強度( $\tau_{BOND}/\tau_{FLEX}$ )を示している。図よ り, 付着割裂破壊型シリーズでは余裕度 1.0 程度, 曲げ降伏先行型では余裕度 1.0~1.6 程度となり, いずれも破壊モードの判別ができている。

# 5. まとめ

圧縮強度 80N/mm<sup>2</sup>~150N/mm<sup>2</sup>級の高強度コン クリートを用いた RC 造柱部材の曲げせん断実験を 行い, さらに, 既往の実験結果を含めて検討し, 以 下の知見を得た。

1) 圧縮強度 130N/mm<sup>2</sup>を超える超高強度コンクリートを用いると,曲げ降伏先行型とした部材であっても,圧壊により最大耐力となり,せん断力の一時的かつ急激な低下が生じる。

 2) 上記の現象は、コアよりもやや低い強度のコン クリートとした外殻 PCa を用いることで改善された。
3) 上記の現象に対し、かぶり部分の損傷程度を 考慮することで、既往の復元力特性評価法を用い て荷重-変形関係の包絡線を評価可能であった。

4) 外殻 PCa の有無によらず,付着割裂強度の既 往の手法による計算値は実験結果とよく対応した。

ただし、本報および既報の実験では、軸力比を 0.3 程度としており、軸力比と圧壊現象との関係に ついては未確認であり、今後の課題である。



#### 参考文献

- 増田安彦, 杉本訓祥, 江戸宏彰: 超高強度コンクリート(120N/mm<sup>2</sup>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構造 IV, 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, 構造 IV, pp.315-318, 2004.08
- 杉本訓祥, 増田安彦, 江戸宏彰, 吉岡研三: 外殻プレキャストを用いた RC 柱の力学的性状に関する研究 (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概 集, 構造 IV, pp.875-878, 1999.09
- 4) 杉本訓祥,増田安彦,津田和明,長沼一洋:超高強 度コンクリートを用いた RC 造柱部材の曲げ性状に関 する実験的研究,高強度コンクリート構造物の構造性 能研究委員会報告書・論文集,日本コンクリート工 学協会,pp.464-471,2006.07
- 5) 杉本訓祥, 増田安彦, 江戸宏彰: 柱梁接合部のシー ス管内通し主筋の付着性状確認実験, コンクリート工 学年次論文集, Vol.26, No.2, pp.817-822, 2004
- 江村勝, 森岡徹, 後閑章吉ほか: 柱梁接合部のプレ キャスト化に関する実験研究(その2)付着性能確認 試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, pp.851-852, 2004
- 杉本訓祥, 増田安彦, 津田和明, 江戸宏彰: 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, pp.667-672, コンクリート工学年 次論文集, Vol.27, No.2, 2005
- 杉本訓祥:鉄筋コンクリート造柱部材のせん断非線形 性状評価手法の実験的検証,日本建築学会構造系 論文集, No.592, pp.137-144, 2005.06
- 杉本訓祥, 増田安彦, 木村耕三, 勝俣英雄: 付着割 裂破壊する既存鉄筋コンクリート造柱部材の L 型 CFRP 板による補強効果に関する実験的研究, コンク リート工学年次論文集, Vol.28, No.2, pp.127-131, 2006
- 長沼一洋:三軸圧縮下の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.474, pp.163-170,1995.08
- 11) 雨宮篤,野口博:超高強度鉄筋コンクリート部材の有 限要素解析プログラムの開発(その1),日本建築学会 大会学術講演梗概集, pp.639-640,1990.10
- 12) 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
- 13) 杉本訓祥:鉄筋コンクリート造柱・梁部材の復元力特 性の評価法(せん断非線形性状に着目した包絡線の 評価),日本建築学会構造系論文集,No.578, pp.123-130,2004.04
- 14) 日本建築学会: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, 1998