# 論文 超高強度コンクリートを用いた RC 柱の曲げ性状

杉本 訓祥\*1·米澤 健次\*1·津田 和明\*1·長沼 一洋\*1

要旨: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 検証するため,既往のRC柱部材実験を対象としてFEM 解析を実施した。圧縮強度を100N/mm<sup>2</sup>から150N/mm<sup>2</sup> 程度まで変動させた RC 柱部材実験では,100N/mm<sup>2</sup>程度までは従来強度と同様の挙動を示しているが,これ より高い強度の場合ほど,圧壊に伴う耐力低下現象が顕著となる。対象とした実験範囲では,FEM 解析でも 実験と同様の傾向が現れていることが確認され,解析においてかぶり部分のコンクリートの特性を適切に表 現することで,150N/mm<sup>2</sup>級のコンクリートへも既往のFEM 解析手法が適用可能であることを示した。 キーワード:FEM 解析,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<sup>2</sup>(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、コアコンクリートとして Fc100~150 程度のコンクリートを用いるとともに、コアよりも強度 の低いコンクリートで製造した外殻プレキャスト<sup>3)</sup>(以 下,外殻 PCa と略記,Fc60~80 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<sup>4)</sup>。

軸力の大きさや主筋強度にもよると考えられるもの の,コンクリート強度が高くなるにつれて,主筋の降伏 に先行して圧壊が生じやすくなる。さらに,圧壊時のか ぶり部分の損傷が激しいために,圧壊による断面欠損が 無視できなくなり,負担モーメントが低下する。しかし, コア部分のコンクリートは健全であるため,一時的な耐 力低下後も加力を続けると,断面欠損によってやや低下 したモーメントを維持し,やがて主筋の降伏が確認され る。既往の実験的研究では,曲げ降伏先行型として設計 された高強度 RC 柱が,このような経過を経ることが確 認されている。本報では,既往の実験を対象として,FEM 解析を実施し,荷重~変形関係について検討を行った。 特に,かぶりの圧壊現象に着目し,復元力特性や損傷状 況,鉄筋の歪度などを比較検証した結果を述べる。

### 2. 既往実験概要と解析モデル

### 2.1 解析対象とした既往実験の概要

本報告で対象とする試験体の一覧を表-1に示す。試験 体の形状寸法を図-1に示す。試験体は、形状・寸法を同

\*1(株)大林組 技術研究所 博士(工学) (正会員)

ーとしてコンクリート強度を主な変数とした3体(Fc80, 100,150)と,これらと同一配筋で,かぶり部分にやや 強度の低いコンクリートを用いた外殻PCaを配置した3 体の合計6体である。主筋および帯筋の配置は同一とし, コンクリート強度が高くなるにつれて鉄筋の材料強度, または帯筋の径を大きくした。軸力は一定とし,設定し たコンクリート強度を基準として軸力比0.3相当とした。 載荷は,上下スタブの平行を維持しながら静的正負交番 繰り返し載荷とし,部材角R=1/200,1/100,1/67,1/50, 1/33を各2回繰り返した。いずれの試験体も,かぶりコ ンクリートの圧壊と主筋の降伏がそれぞれ確認され,曲 げ降伏先行型の破壊モードとなった。

#### 2.2 解析モデル

FEM 解析は、大林組開発ソフト「FINAL」<sup>5)</sup>を用いて 行った。試験体形状の対称性を考慮して、試験体の断面 幅方向中央で切断した 1/2 の部分をモデル化した。下ス タブの最下面の節点を固定とし、上スタブの最上面の節 点は互いに水平加力方向・鉛直方向に関して従属させ、 下スタブと平行を維持するようにした。解析モデルを図 -2 に示す。

コンクリートは六面体要素,試験部分の柱主筋および せん断補強筋は線材要素でモデル化した。コンクリート の応力度-歪度関係は,修正 Ahmad 式<sup>6</sup>によりモデル化 し,多軸応力下の破壊条件は,コアコンクリートについ ては Ottosen の提案<sup>7</sup>に従い,畑中らの係数<sup>8</sup>を用いた。 本破壊基準では,拘束応力により,最大強度が上昇する 現象を再現できる。圧縮強度後の軟化域については,か ぶり部分については修正 Ahmad 式によりモデル化し,コ アコンクリートについては Nakamura ら<sup>90</sup>の提案モデル を用いた。拘束がない場合の材料特性の例を,材料試験 結果と比較して図-3 に示す。また,鉄筋の応力度~歪度 関係はバイリニアとした。

柱主筋の線材要素とコンクリートの六面体要素との

	08F-RC/ 08F-PC	10F-RC/ 10F-PC	15F-RC ⁄ 15F-PC			
断面	B×D=360×360					
高さ	1080					
主筋 (降伏強度)	12-D19 (519)	12-D19 (716)				
帯筋	4-U9.1	4-U10.7@50				
軸力	0.3·Fc·B·D					
Fc (実強度)	80 (103)	100 (135)	150 (163)			
外殻(実強度)		80(90)				

表-1 試験体一覧(応力度単位:[N/mm<sup>2</sup>])



図-1 試験体形状・寸法



表-2 耐カー覧 (解析結果と実験結果の比較)

	08F-RC	08F-PC	10F-RC	10F-PC	15F-RC	15F-PC
Q <sub>max</sub> [E]	1066/-1046	1052/-1026	1236/-1217	1081/-1071	1514/-1515	1413/-1515
Q <sub>max</sub> [F]	1086/-1027	1073/-1038	1245⁄-1203	1225/-1071	1443/-1467	1501/-1357
[E]/[F]	0.98/1.02	0.98/0.99	0.99/1.01	0.88/0.90	1.05/1.03	0.94/0.99
YC[E]	1023, (16.4)	1038, (11.2)	1086, (18.2)	693, (6.1)	1459, (9.8)	1394, (10.1)
YC[F]	1034, (9.4)	988, (8.8)	1083, (10.8)	1029, (11.7)	1327, (10.8)	1296, (9.8)
[E]/[F]	0.99	1.05	1.00	0.67	1.10	1.08
精度	平均值:0.98,	変動係数:9.6%				

Q<sub>max</sub>:最大荷重, YC:圧縮降伏(正加力時), ()内は圧縮降伏時変位, [E]:実験値, [F]:FEM 解析結果

間には、物理的な大きさを持たない接合要素を配置し、 主筋とコンクリート間の付着劣化によるすべりをモデ ル化した。付着応力度~すべり量関係は、Elmorsi らの提 案<sup>10)</sup>を修正した文献<sup>11)</sup>の手法によりモデル化した。付着 応力度~すべり量関係の例を図-4 に示す。強度は付着割 裂強度<sup>12)</sup>とし、強度時すべり量は 1.0mm と仮定した。

解析は変位制御とし、実験と同様に一定軸力を載荷し た後、正負交番繰り返し載荷とした。

## 3. 解析結果

3.1 荷重と変形の挙動

(1) 荷重~変形関係と損傷状況

各試験体の荷重~変形関係を図-5に,損傷状況を図-6 に,耐力一覧を表-2に示す。

いずれの試験体も、実験結果と解析結果はよく対応している。特に、超高強度コンクリートを用いた試験体 15F-RC, 10F-RC では、部材角 R=1/100 の加力サイクル において、正負ともにかぶりコンクリートの圧壊ととも



に一時的に荷重が低下しており, FEM 解析でもその状況 が顕著に現れている。一方,08F-RC および外殻 PCa を 用いた試験体では,かぶりコンクリートの圧壊は生じる ものの,荷重~変形関係への影響は少ない。この傾向は, FEM 解析結果と実験結果とでよく対応している。一方, 履歴性状としては,残留変形がやや異なる試験体も一部 にあり,この点は,要因の詳細な検討が必要であろう。

また損傷状況では,FEM 解析では,正加力方向の斜め ひびわれが顕著に見られている。解析では,各要素にひ びわれが分散するようモデル化されるため,少数の斜め ひびわれがほぼ連続するような実験結果と直接的には 対応しない。しかし,端部の正加力方向の斜めひびわれ が多数生じている点(赤破線),加力直交面の縦ひびわれ (青破線),および端部の圧壊状況(赤:圧壊,黄:軟化) など、解析結果は実験結果と概ね対応している。

## (2) 等価粘性減衰定数

次に、荷重~変形関係から、各変位振幅の2回目の加 カサイクルにおける等価粘性減衰定数を算出し、各変位 振幅との関係を、図-7に示す。08Fシリーズではやや解 析結果が実験結果を過大評価し、15Fシリーズでは過小 評価する傾向があるものの、解析結果は実験結果とほぼ 対応している。

# (3) 変形成分

さらに、変形成分を曲げとせん断に分離し、その成分 比率を比較する。実験結果と解析結果を比較して図-8 に 示す。曲げ変形の全体変形に占める割合は、小変形時の 対応はよくないが、損傷が進むにつれて、概ね 80%程度 となり、解析結果は実験結果とほぼ対応してくる。



# 3.2 応力度と歪度の挙動

### (1) 主筋の応力度分布

各試験体の主筋応力度分布を,実験結果と解析結果を 比較して図-9に示す。実験で計測した歪度を応力度へ換 算するにあたっては,応力度~歪度関係として,修正 Menegotto-Pintoのモデル<sup>13)</sup>を用いた。図は,08F,15F シリーズについて部材角 R=1/100, 1/50 の状態を示した。 R=1/100 では, 危険断面近傍を除き, 降伏には至って おらず, 柱内法高さの領域で, 概ね一定の勾配で分布し ている。また, 高軸力の影響で, 全体的に圧縮側にずれ ている。解析結果も, 実験結果の傾向をとらえており, ここでも精度よく評価できているといえる。 一方, R=1/50 では, 主筋は降伏しており, 実験では, 危険断面から離れた測定点でも降伏に至っている。解析 では,降伏域のひろがりの程度が,実験に比べて少ない 傾向があり,やや対応していない試験体もいくつかある ものの, 08F, 15F シリーズいずれについても, 概ね評価 できている。

上述の,やや対応しない状況は,スパン中央付近の応 力度分布の勾配に顕著にあらわれており,付着応力度~ すべりのモデル化が,その一因と推察される。また,こ のことは,履歴性状にも影響すると考えられるため,前 述した履歴性状がやや対応しない状況と関連している と推察される。付着応力度~すべり特性については,実 験データが乏しいこともあり,今後の課題である。

#### (2) 危険断面の歪度分布と応力度分布

次に,危険断面の歪度測定結果と,解析結果を比較・

検討する。ここでは、圧壊現象が顕著に生じた試験体 15F-RC および 15F-PC について述べる。

危険断面における主筋と、危険断面近傍のコンクリー ト表面で測定した歪度の分布と、解析結果を比較して、 図-10 に示す。図は、部材角 R=1/100 前後のステップを 示した。圧壊が顕著に生じた 15F-RC では圧壊直前と直 後について、15F-PC では圧壊が生じた付近についてそれ ぞれ示した。さらに、それらの時点の解析から得られた コンクリートの負担応力度の分布も示す。試験体 15F-RC の圧壊直前の状況では、主筋およびコンクリートの歪度 分布の解析結果は、実験結果とほぼ一致しており、この 時点では平面保持が成り立っていたと推察される。また このときの応力度分布を見ると、圧縮縁まで応力が高く、 150N/mm<sup>2</sup> 以上となっている。一方、圧壊直後では、コ ンクリートの歪度は計測できていないが、鉄筋の歪度分



図-10 危険断面の歪度分布とコンクリートの応力度分布

布と解析結果はよく一致している。応力度分布では、圧 縮側のかぶりに相当する要素はほとんど応力を負担し ていない状況にあり、このかぶり部分の圧壊により耐力 が低下している状況がわかる。一方、15F-PCでは、かぶ りコンクリート付近の歪度は大きくなっているが、圧壊 には至らず、圧縮強度程度(図中 Fcの線)の応力を負 担していることがわかる。このように、剛性・強度の小 さい外殻プレキャストを外周部に配置することで、脆性 的な圧壊を防ぎ、効率よく断面内で応力負担できている ことが解析的にも確認された。

# 4. 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対象とし, FEM 解析を実施した。解析結果と実験結果を比較検討し た結果,以下の知見を得た。

1) コンクリート強度によらず、各試験体とも、荷重 ~変形関係や最大耐力、降伏荷重などの解析結果は、実 験結果とよく対応した。

 2) かぶりコンクリートの圧壊現象とそれに伴う一時 的な荷重低下は、150N/mm<sup>2</sup>級コンクリートを用いた柱 部材については、解析でも生じ、それ以下の強度の場合 には現れず、実験結果と同様の挙動を示す結果となった。
 3) コンクリート強度によらず、各試験体とも、エネ ルギー吸収性状や、曲げとせん断に分離した変形成分の 解析結果は、実験結果とほぼ対応した。

4) 鉄筋の応力度分布については、降伏が進行した後では、やや対応しないところがあるものの、実験結果と 概ね傾向は対応する結果となった。

5) 危険断面の歪度・応力度分布を検証したところ, 超高強度コンクリートでは圧壊とともにコンクリート の負担応力が急激に低下する一方で,コアよりも剛性・ 強度の低いコンクリートで製造した外殻PCaを用いた場 合には,圧壊により急激に耐力低下を起こさない状況を, 解析的にも確認できた。

以上の結果から、本報で述べた FEM 解析手法では、 150N/mm<sup>2</sup> 級のコンクリートを用いた RC 柱部材に対し ても、比較的精度よく追跡可能であることがわかった。 一方、主筋の応力度分布や履歴性状について、若干対応 しない点もあり、今後の課題である。特に、付着特性に ついてはデータの蓄積が望まれる。

### 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
- 増田安彦,杉本訓祥,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柱部材の曲げせん断 実験,コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, p pp.541-546, 2007.7
- 5) 長沼一洋,米澤健次,江戸宏彰: RC 構造部材の三 次元繰返し FEM 解析の精度向上 その3 非直交ひ び割れモデルの改良と付着すべりモデルの導入,日 本建築学会大会学術講演梗概集, C-2,構造 IV, pp.427-428, 2003.09
- 6) 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、第 474 号、 pp.163-170、1995.08
- Ottosen, N. S. :A Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp.527-535, Aug. 1977
- 畑中重光,服部宏巳,吉田徳雄,谷川恭雄:低測圧 3軸圧縮下の高強度コンクリートの塑性変形挙動, コンクリート工学年次論文集,12-2,pp.719-724,1990
- Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected ot Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp.259-272, 1999.10
- Elmorsi, M., Kianoush, M. R. and Tso, W. K. : Modeling Bond-slip Deformations in Reinforced Concrete Beam-Column Joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000
- Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of Nonlinear Dynamic Response of Reinforced Concrete Scaled Model using Three-dimensional Finite Element Method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, August, 2004
- 12) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証 型耐震設計指針・同解説,1998
- Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V. V. amd Popov, E.
  P.: Analytical Model for Concrete Anchorage of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82-83, Univ. of California, Barkeley, Nov., 1982