

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^2 から 150N/mm^2 程度まで変動させた RC 柱部材実験では、 100N/mm^2 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^2 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 $F_c=100\text{N/mm}^2$ (以下 F_c100 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¹⁾、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²⁾。一方、筆者らは、コアコンクリートとして $F_c100\sim150$ 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³⁾ (以下、外殻 PCa と略記、 $F_c60\sim80$ 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⁾。

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

一としてコンクリート強度を主な変数とした 3 体 (F_c80 , 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」⁵⁾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⁶⁾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⁷⁾に従い、畑中らの係数⁸⁾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⁹⁾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

*1 (株)大林組 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

表-1 試験体一覧(応力度単位: N/mm^2)

	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-U9.0@50 SBPD1275		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)		

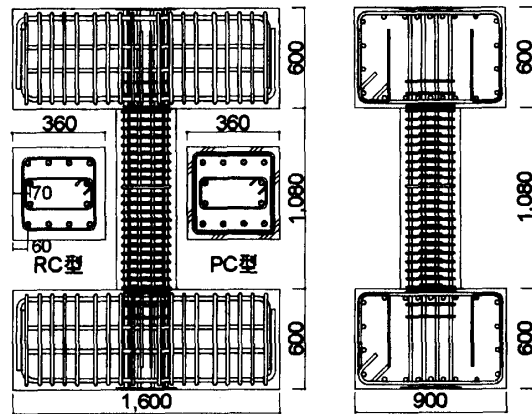


図-1 試験体形状・寸法

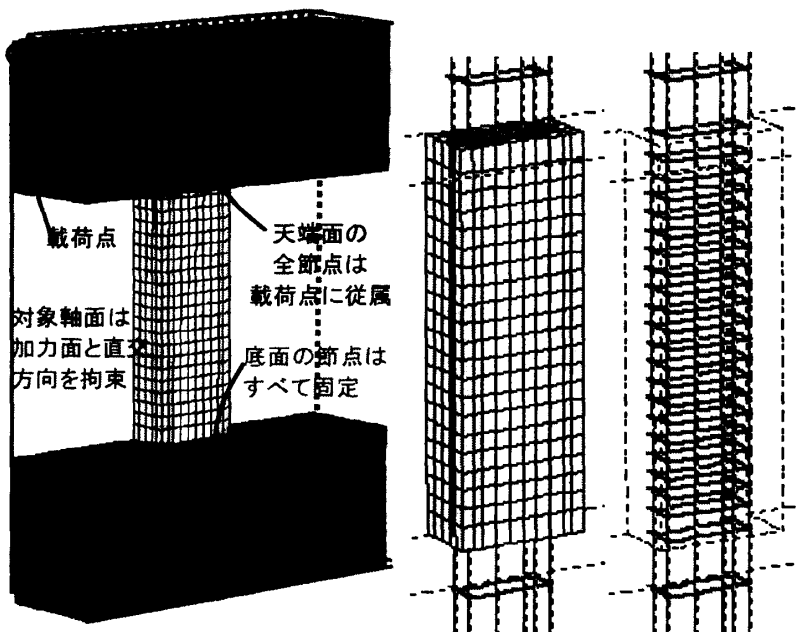


図-2 解析モデル

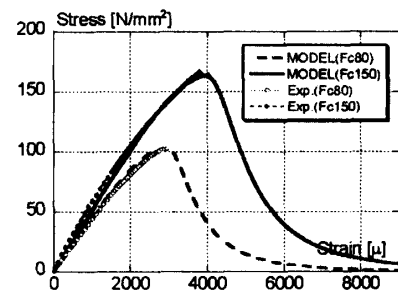


図-3 コンクリート特性モデル

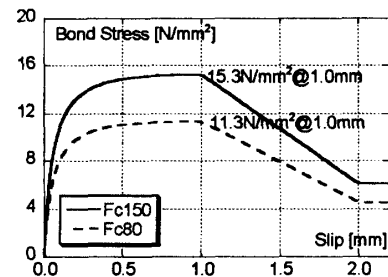


図-4 付着特性モデル

表-2 耐力一覧 (解析結果と実験結果の比較)

	08F-RC	08F-PC	10F-RC	10F-PC	15F-RC	15F-PC
$Q_{\max}[E]$	1066/-1046	1052/-1026	1236/-1217	1081/-1071	1514/-1515	1413/-1515
$Q_{\max}[F]$	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	平均値: 0.98, 変動係数: 9.6%					

Q_{\max} : 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¹⁰⁾を修正した文献¹¹⁾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¹²⁾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载荷した後、正負交番繰返し载荷とした。

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

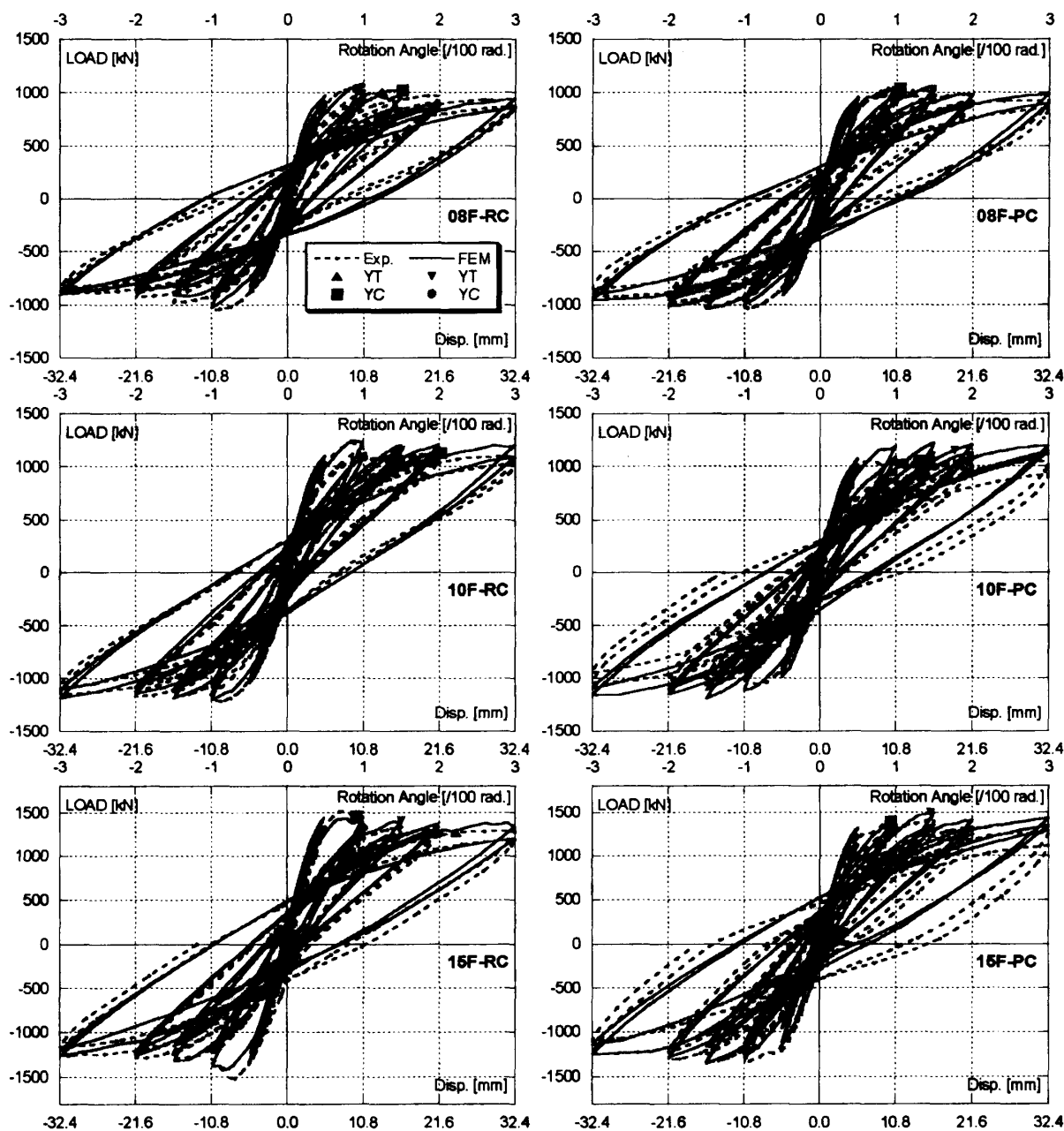


図-5 荷重～変形関係(YT:引張降伏時, YC:圧縮降伏時)

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

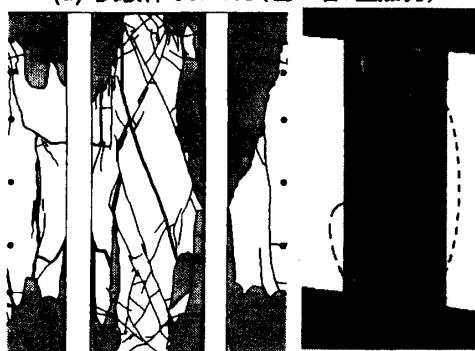
次に、荷重～変形関係から、各変位振幅の2回目の加力サイクルにおける等価粘性減衰定数を算出し、各変位振幅との関係を、図-7に示す。08F シリーズではやや解析結果が実験結果を過大評価し、15F シリーズでは過小評価する傾向があるものの、解析結果は実験結果とほぼ対応している。

(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。



(a) 試験体 08F-RC(左→右:正加力)



(b) 試験体 15F-RC(左→右:正加力)

図-6 損傷状況(R=±1/50 終了時)

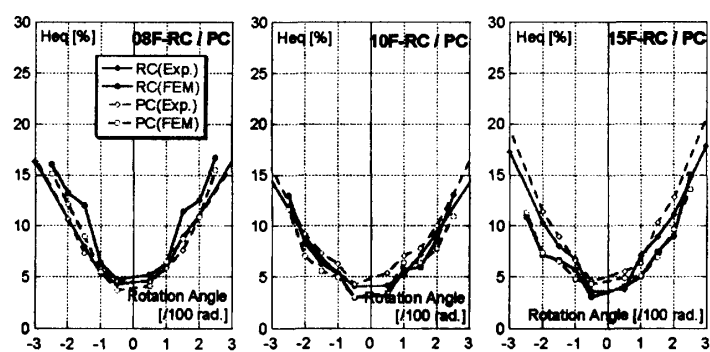


図-7 各試験体の等価粘性減衰定数

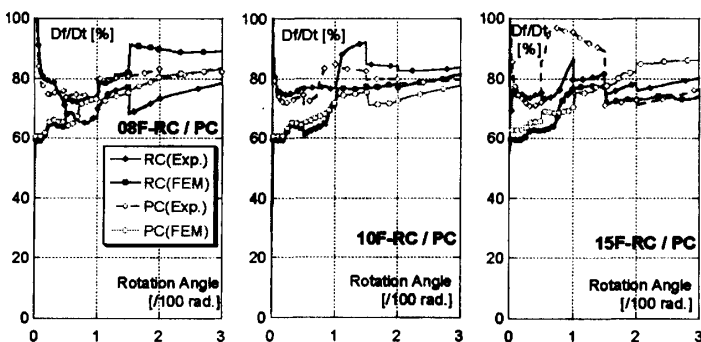


図-8 各試験体の変形成成分

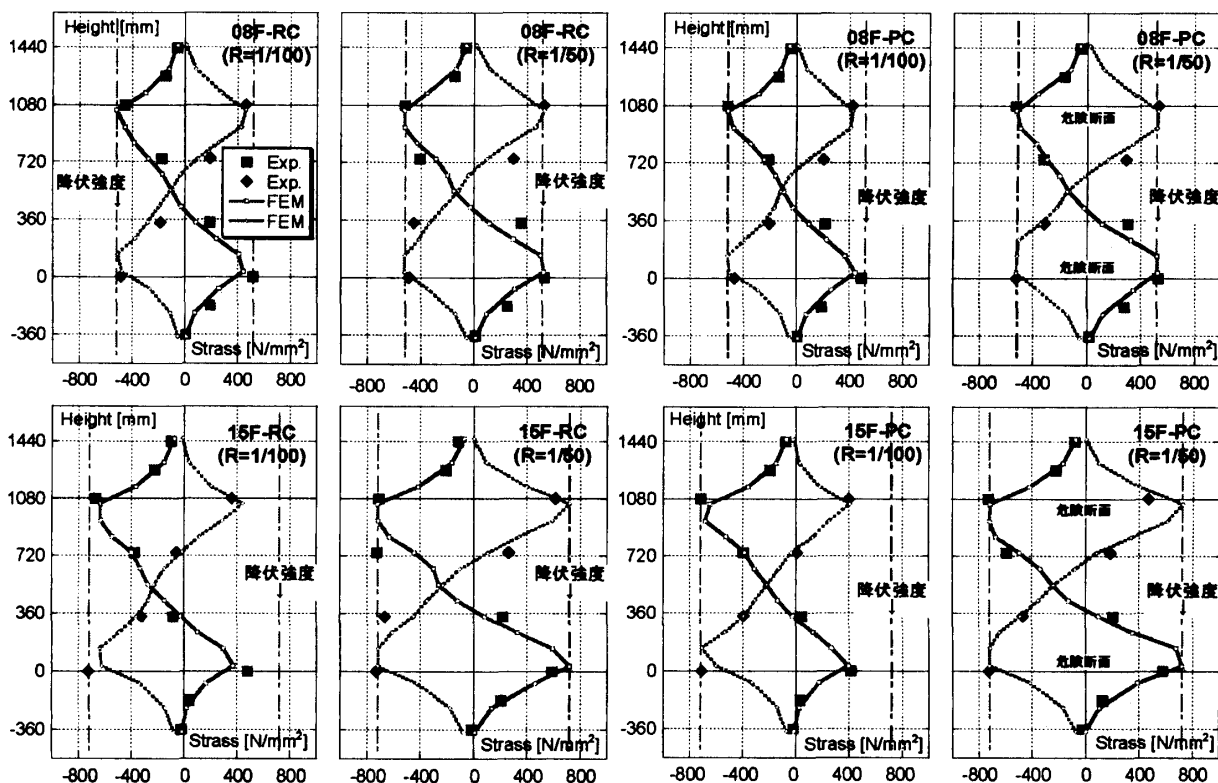


図-9 主筋の応力度分布

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¹³⁾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^2 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

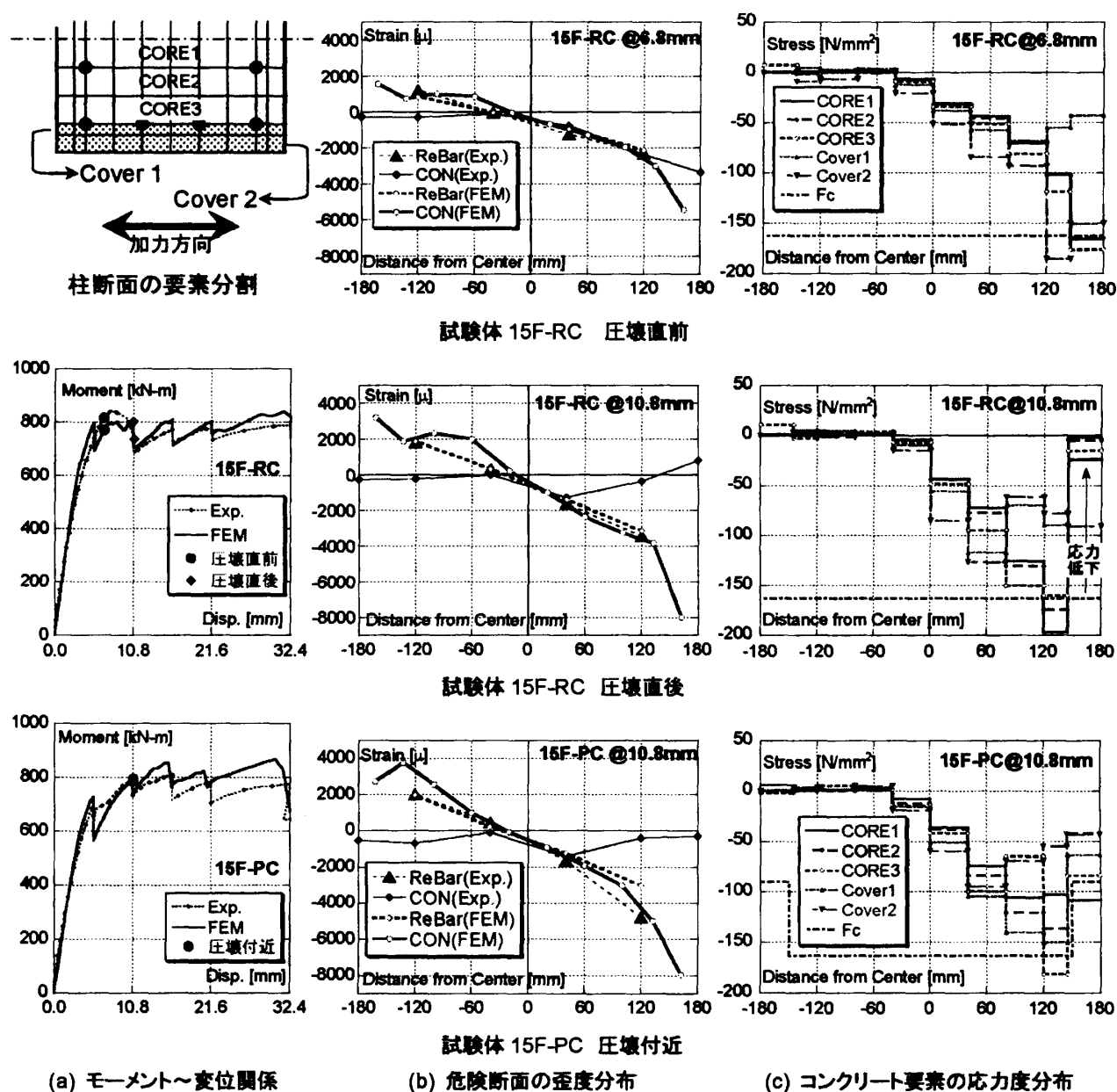


図-10 危険断面の歪度分布とコンクリートの応力度分布

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 F_c 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 $80\text{N/mm}^2 \sim 150\text{N/mm}^2$ 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^2 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で、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^2 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

- 1) 増田安彦, 杉本訓祥, 江戸宏彰: 超高強度コンクリート(120N/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
- 3) 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, 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
- 7) Ottosen, N. S.: A Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp.527-535, Aug. 1977
- 8) 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
- 9) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol. 2, pp.259-272, 1999.10
- 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
- 11) 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靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1998
- 13) Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V. V. and Popov, E. P.: Analytical Model for Concrete Anchorage of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, Report No. UCB/EERC-82-83, Univ. of California, Berkeley, Nov., 1982