

150N級高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート柱部材の耐震性能

杉本 訓 祥 増田 安 彦
津田 和 明

Earthquake Resistant Performance of RC Columns using High Strength Concrete

Kuniyoshi Sugimoto Yasuhiko Masuda
Kazuaki Tsuda

Abstract

This paper describes the experimental and analytical results of RC columns constructed using ultra-high-strength concrete over 100MPa, and subjected to reversed cyclic lateral loads. The cover concrete crushed at an early stage followed by a sudden drop in the resisting moment during the experiment. A simple method, i.e., covering the core concrete with a precast shell made of low-strength concrete, was proposed to prevent the undesirable failure that is governed by premature cover crushing. Test results indicated that the proposed method was effective in preventing this phenomenon. Nonlinear finite element analyses were conducted for all specimens, and the calculated results were corresponded well with the experimental ones.

概 要

近年の高層RC建物の低層部によく用いられる超高強度コンクリートRC柱部材を対象として、静的載荷実験を実施した。コンクリートが高強度化すると、比較的軸力が大きい場合には、曲げ降伏先行型であっても、主筋が降伏する以前にかぶり部分の圧壊に伴って、急激な荷重低下を起こすこと、および、コアよりも強度が低いコンクリートにより製造した外殻PCaを用いることで、この現象を防止できることを実験的に確認した。本報告では、Fc80～150級コンクリートを用いて、外殻PCaの有無を変数としたRC柱の静的実験の概要を報告するとともに、復元力特性評価法の適用性の検証結果、およびFEM解析による評価精度の確認と、圧壊現象の検証結果を述べる。

1. はじめに

近年、設計基準強度 $F_c=100\text{N/mm}^2$ （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、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¹⁾。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（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²⁾。

本報では、まず、実験概要を述べる。本報で述べる実験は、高層RC建物の低層部内柱を想定し、RC柱の耐震性能として、一定軸力下の水平力載荷時の復元力特性とかぶりの損傷状況を確認することを目的としている。すなわち、RC柱試験体にせん断力を作用させ、せん断力と層間変形の関係と、かぶりの損傷状況との相関性を確認する。次に、実験結果を踏まえて復元力特性の評価について検討する。特に、実務設計において有用な、復元力特性の包絡線を簡略的に評価する手法の適用性を確認す

る。さらに、FEMによる詳細解析により、上述のかぶりコンクリートの圧壊現象について検証する。

2. 実験概要

試験体一覧をTable 1に、試験体の配筋詳細の例をFig. 1に示す。試験体は、曲げ降伏先行型6体である。圧縮強度を3水準（80、100、150）、各強度に対して外殻プレキャストの使用の有無を変数とした。使用材料の特性をTable 2に示す。加力は、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返し載荷とし、部材角 $R=\pm 1/200, 1/100, 1/67, 1/50, 1/33, 1/25$ を各2回繰返したあと、1/10程度の大変形まで載荷した。加力装置をFig. 2に示す。

各試験体の損傷状況をFig. 3に示す。在来型の試験体（08F-RC、10F-RC、15F-RC）では、コンクリート強度が高くなるほど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。大変形時には、一箇所のひびわれが集中して開いており、斜めひびわれが顕著となっている。一方、外殻PCaを用いた試験体では、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 $R=1/100$ では、在来型では端部の圧壊が激しいが、外殻PCaを用いた試験体では、端部の損傷が軽減されていることがわかる。

3. 復元力特性の評価

ここでは、簡略的に復元力特性包絡線を評価し、実験結果と比較する。包絡線の評価手法は、文献³⁾に述べた手法を用いる。本手法では、曲げとせん断に分離して各変形を算定する。曲げ変形におけるひびわれ後の指向点は、かぶりコンクリートの圧壊または主筋の降伏などを選択することができる。変形は、曲率分布の積分により求める。このとき、曲率分布は、コンクリートの圧壊時

(または主筋降伏時)の断面解析により求めたモーメント～曲率関係 (Fig. 4参照) にもとづき仮定する。せん断変形は、せん断ひびわれにより剛性低下すると仮定し、せん断耐力時をひびわれ後の指向点として与える。本実験シリーズでは、曲げに対するせん断余裕度は十分大きく、せん断非線形性は顕著ではないため、曲げの変形性状が支配的となる。

Table 1 試験体一覧 (応力度単位: [N/mm²])

Properties of Test Specimens			
	08F-RC/ 08F-PC	10F-RC/ 10F-PC	15F-RC/ 15F-PC
断面・高さ	360×360, 1080mm		
主筋	12-D19(490)		
帯筋	4-U9.0@50	4-U9.0@50	4-U10.7@50
軸力	0.3FcBD		
Fc	80	100	150
外殻Fc	80		

08F-RC → RC: 在来型, PC: 外殻PCa使用

Table 2 材料特性 (応力度単位: [N/mm²])

Material Properties

(a) コンクリート

Concrete

	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
Fc80	103	4.40 × 10 ⁴	5.2
Fc100	135	4.31 × 10 ⁴	6.9
Fc150	163	5.10 × 10 ⁴	7.1
外殻PCa	90	4.05 × 10 ⁴	4.7

(b) 鉄筋

Reinforcement

	降伏強度	ヤング係数	引張強度
U9.0	1376	2.10 × 10 ⁵	1482
U10.7	1392	2.18 × 10 ⁵	1510
D19(490)	519	1.95 × 10 ⁵	709
D19(685)	716	1.98 × 10 ⁵	915

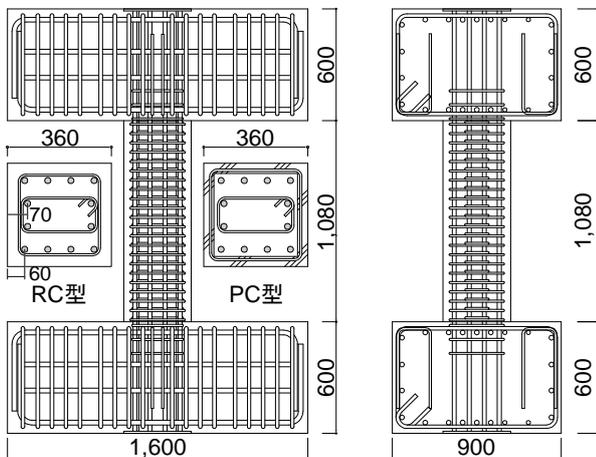


Fig. 1 試験体の配筋詳細

Dimensions and Reinforcement of Test Specimens

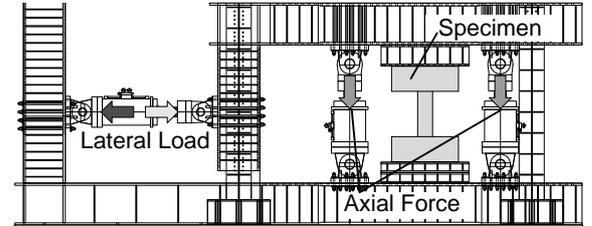


Fig. 2 加力装置図

Test Setup

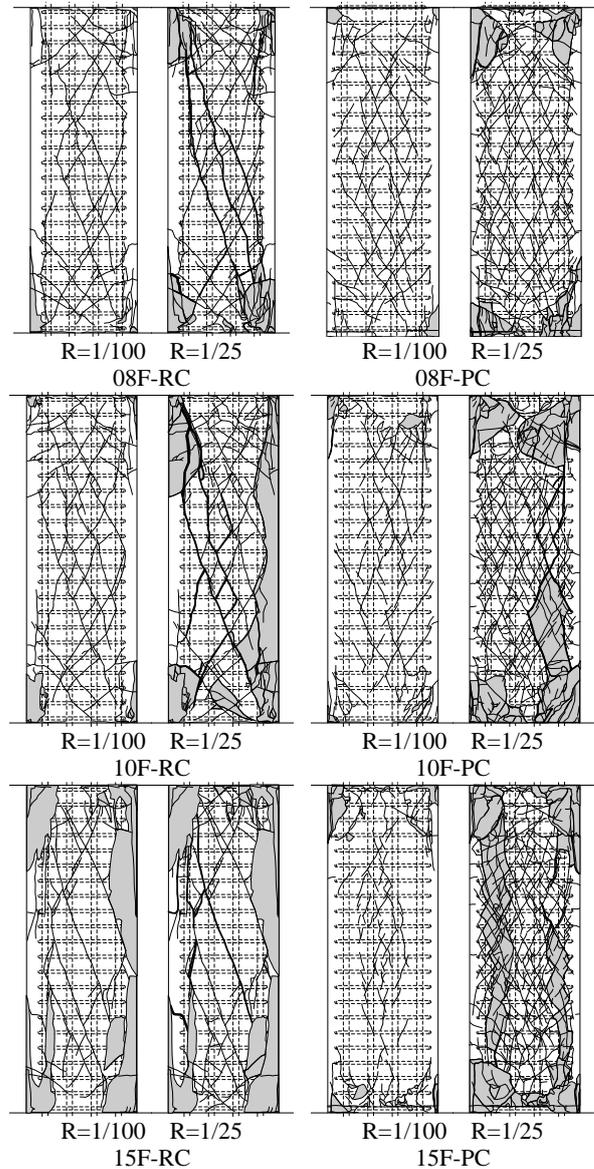


Fig. 3 各試験体の損傷状況
Crack Patterns of All Specimens

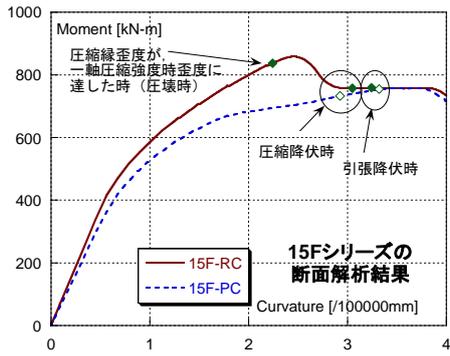


Fig. 4 モーメント～曲率関係の例
Moment - Curvature Relationship of 15F

実験結果と計算結果を比較してFig. 5に示す。復元力特性の包絡線は、試験体08F-RCおよび、外殻PCaを用いたシリーズでは、計算結果と良好に対応している。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はほぼ一致し、圧壊によりせん断力が低下した後の挙動は、かぶり部分の圧壊後の主筋降伏時を折れ点とした計算結果とよく一致している。すなわち、本手法によれば、かぶり部分の圧壊とその後の挙動を簡略的かつ精度よく評価可能であるといえる。

4. FEM解析

4.1 解析モデル

FEM解析は、大林組の自社開発ソフト「FINAL[®]」⁴⁾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、下スタブ最下面と平行を維持するようにした。解析モデルをFig. 6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⁵⁾でモデル化し、多軸応力下の破壊条件は、コアコンクリートについてはOttoosenの提案⁶⁾に従い、畑中らの係数⁷⁾を用いた。本破壊基準は、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らの提案モデル⁸⁾を用いた。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、主筋軸方向のコンクリートとの間の付着すべりをモデル化した。付着応力度～すべり量関係は、文献⁹⁾の手法によりモデル化した。このとき、最大付着強度は付着割裂強度¹⁰⁾とし、強度時のすべり量は1.0mmと仮定した。

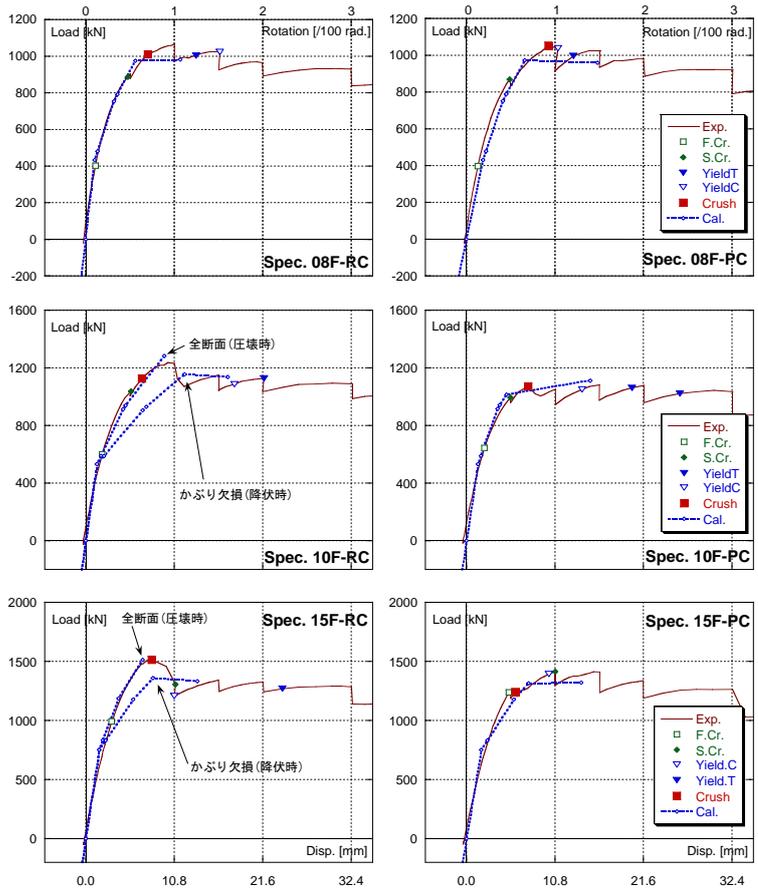
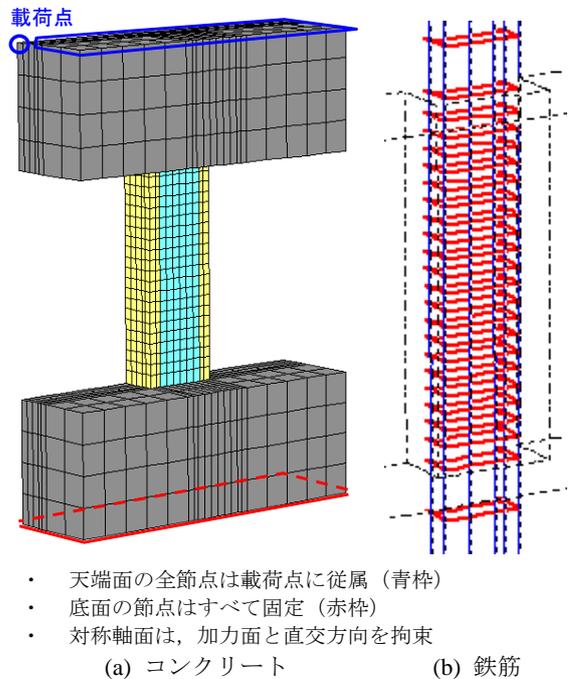


Fig. 5 荷重～変位関係 (包絡線) 実験と計算結果の比較
Comparisons of Test and Calculated Results



- 天端面の全節点は荷重点に従属 (青枠)
- 底面の節点はすべて固定 (赤枠)
- 対称軸面は、加力面と直交方向を拘束

(a) コンクリート (b) 鉄筋

Fig. 6 解析モデル
Finite Element Meshes

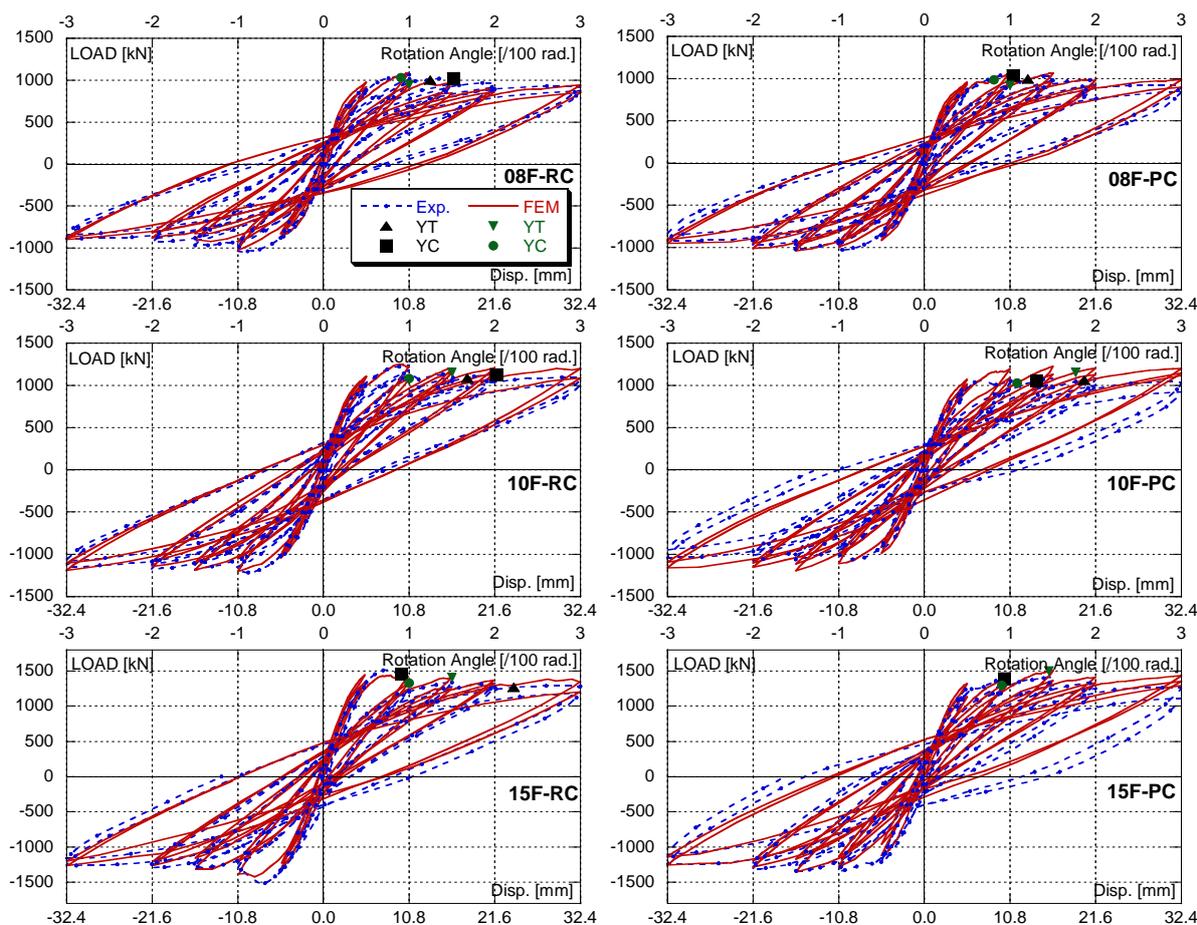


Fig. 7 FEM解析結果と実験結果の比較 (荷重～変位関係)

Comparisons of Test and Analytical Results (Load – Displacement Relationships)

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。

4.2 解析結果と実験結果の比較

各試験体の荷重～変位関係をFig. 7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、10F-RCおよび15F-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PC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～変位関係への影響は少なく、この傾向もFEM解析により再現できている。一方、履歴性状としては、残留変位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る。

次に、主筋の応力度分布について比較する。各試験体の主筋の応力度分布をFig. 8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¹⁾を用いた。 $R=1/100$ 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。解析結果は、実験結果の傾向をとらえており、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、降伏域の広がり程度が、実験に比べてやや少なく、対応していない場合もあるものの、実験結果の傾向は、概ね評価できている。

4.3 危険断面の応力度分布

実験では、危険断面からおおよそ50mm程度離れた高さのコンクリート表面の歪度を測定した。また、主筋については危険断面において歪度を測定している。これらの結果を用いて、危険断面の歪度分布を解析結果と比較する。さらに、解析により得られる、危険断面近傍の要素の応力度分布を用いて、かぶりコンクリートの圧壊前後の挙動について検証する。危険断面の歪度分布の実験値および解析結果と、応力度分布の解析結果をFig. 9に示す。

図は、15Fシリーズについて、圧壊が生じた $R=1/100$ 前後のステップについて示した。圧壊が顕著に生じた15F-RCでは、圧壊直前と圧壊後の $R=1/100$ について、15F-PCでは圧壊後の $R=1/100$ について、それぞれ示した。

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応力度歪度分布の解析結果は、実験結果とよく一致しており、また、平面保持が概ね成立している。

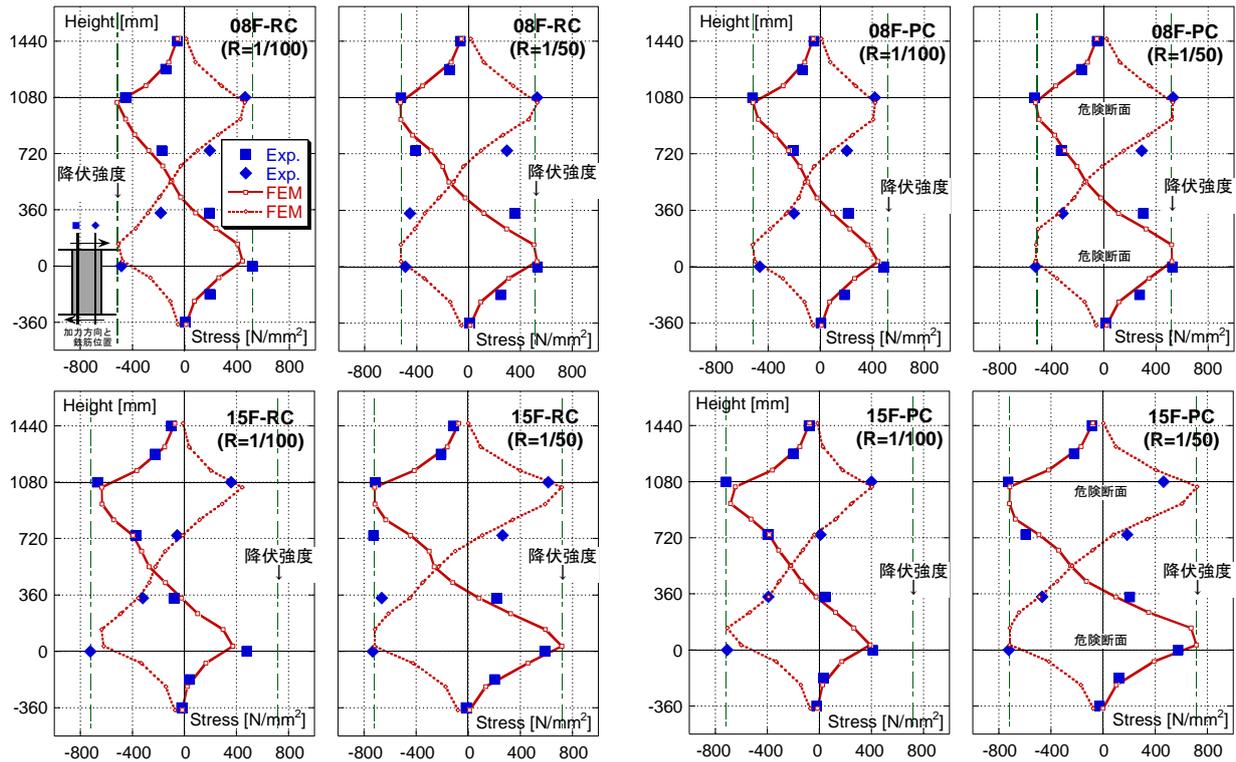


Fig. 8 FEM解析結果と実験結果の比較 ～主筋応力度分布～

Comparisons of Test and Analytical Results (Stress Distributions of Longitudinal Reinforcement)

また、このときの応力度分布は、圧縮縁まで応力が高く、 150N/mm^2 以上となっており、圧縮側のコンクリートが十分に応力負担していることがわかる。一方、圧壊後（ $R=1/100$ ）の応力度分布では、圧縮側のかぶり部分の要素は、応力をほとんど負担しておらず、圧壊によりかぶり部分がほぼ耐力を失っていることがわかる。この結果、部材の負担せん断力も低下していると考えられる。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、圧縮強度程度の応力を維持している。このように、外殻PCaが、コアコンクリートに比べて強度・剛性が小さく、軟化域の強度低下がゆるやかであるため、脆性的なかぶりコンクリートの圧壊を防ぎ、効率よく断面内の応力度負担ができていることが、解析的にも確認された。

5. まとめ

圧縮強度 $80\sim 150\text{N/mm}^2$ 級の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を実施し、FEM解析によりかぶりコンクリートの圧壊現象について検証した実験結果と解析結果を比較・検討し、以下の知見を得た。

- 1) 10F-RC, 15F-RCのように、圧縮強度 130N/mm^2 程度以上のコンクリートを用いた試験体では、曲げ降伏先行型であっても、圧壊により最大耐力となり、急激な荷重低下が生じる。
- 2) この現象は、コアコンクリートよりもやや低い強度のコンクリートを用いた外殻PCaを用いることで、改善さ

れた。

- 3) 上記の挙動に対して、断面解析結果に基づく、既提案の簡略的な復元力特性評価法は、適用可能であった。
- 4) FEM解析により、本実験シリーズの復元力特性は、適切に評価可能であった。
- 5) 危険断面の歪度・応力度分布を検証し、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ことが解析的にも確認された。
- 6) 一方、コアよりも強度・剛性が低いコンクリートで製造した外殻PCaを用いることで、圧壊による急激な耐力低下を起こさない状況を解析的に確認できた。

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)
- 2) 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)
- 3) 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)

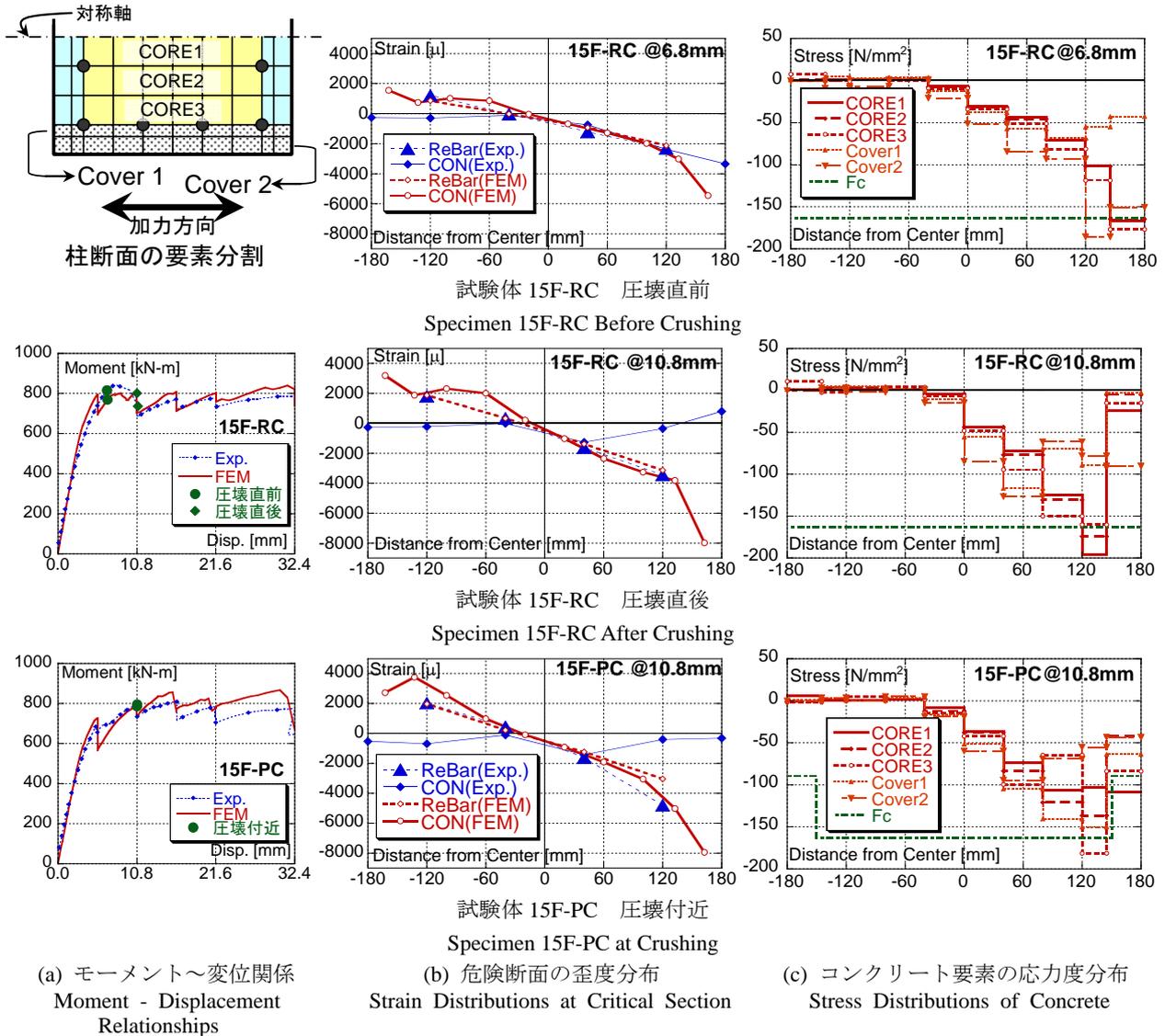


Fig. 9 危険断面の歪度分布とコンクリートの応力度分布
Strain and Stress Distributions at Critical Section

- 4) 長沼一洋, 米澤建次, 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の導入, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.427-428, (2003)
- 5) 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)
- 6) Ottosen, N. S.: A Failure Criterion for Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol. 103, No. EM4, pp.527-535, (1977)
- 7) 畑中重光, 服部宏巳, 吉田徳雄, 谷川安雄: 低側圧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)
- 8) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar of Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Load, JCI-C51E, Vol.2, pp.259-272, (1999)
- 9) 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, No.586, (2004)
- 10) 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, (1998)
- 11) Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V. V. and Popov, E. P.: Analytical Model for Concrete Anchorage of Reinforcing Bars Under Generalized Excitations, No. UCB/EERC-82-83, Univ. of California, Berkeley, (1982)