

## 論文 内部欠陥を有する鉄筋コンクリート部材のポストピーク挙動に関する実験的ならびに解析的研究

水野 英二<sup>\*1</sup>・小林 孝一<sup>\*2</sup>・藤村 敏之<sup>\*3</sup>

要旨：本研究では，内部欠陥を有する鉄筋コンクリート（RC）部材のポストピーク挙動に関する実験的ならびに解析的な考察を行った。ジャンカおよび横補強筋の破断などの内部欠陥を有する RC 部材の曲げ破壊実験を実施するとともに，これら実験結果と有限要素解析プログラム FEAP を用いたポストピーク挙動解析結果との比較を行った。さらに，内部欠陥による内部拘束状況ならびにポストピーク挙動への影響についても検討を行った。

キーワード：内部欠陥，ジャンカ，帯筋破断，RC 部材，曲げ破壊実験，ファイバー解析

### 1. はじめに

近年，解析手法の開発などにより，鉄筋コンクリート（RC）部材のポストピーク領域での破壊形態が徐々に解明されつつある<sup>1)</sup>。現実的には，ポストピーク挙動に影響を与える要因としては，設計条件の他に，構造的な不整（例えば，配筋誤差，施工誤差，初期ひび割れ，ジャンカなどによる不整）および材料的な不整（例えば，ブリーディング層の存在による材料強度の不均一性など）が考えられ，これらの内部欠陥を考慮したポストピーク解析を行うことが重要となる。平成 11 年に生じた山陽新幹線トンネルにおけるコンクリート破片落下事故，最近では阪神高速道路などでアルカリ骨材反応により鉄筋が構造物内部で破断するという事例などは，巨視的な内部欠陥を有する RC 構造物ならびに RC 構造部材のポストピーク挙動に関する研究の重要性を浮き彫りにした。

これまでに筆者らは，1) ブリーディング層などの材料的な不整またはジャンカなどの構造欠陥があるコンクリート供試体のポストピークにおける圧縮変形特性<sup>2), 3)</sup>，さらには 2) コンクリートの圧縮軟化挙動がコンファインドコンクリートおよび RC 柱のピーク耐力およびポストピーク挙動に及ぼす影響<sup>4), 5)</sup>，などを検討する

ためにコンクリートの各種構成モデルを用いた非線形有限要素解析を行ってきた。

本研究では，ジャンカおよび横補強筋の破断などの内部欠陥を有する RC 部材の曲げ破壊によるポストピーク挙動を検討するために実験的ならびに解析的な研究を行った。ここでは，RC 部材の曲げ破壊挙動を再現するため，内部欠陥を有する RC はり部材の 1 点載荷曲げ実験を実施した。これら実験結果と有限要素解析プログラム FEAP<sup>6)</sup>を用いたポストピーク挙動解析結果との比較を通して，内部欠陥による RC 部材内部の拘束状況の変化ならびにポストピーク挙動への影響についても考察・検討を行った。

### 2. 実験概要

本研究で供試体として用いた RC はり部材を図 - 1 に示す。引張側に主筋として D13 (SD295) を 2 本，圧縮側には組立筋として 6 を 2 本，いずれもかぶり 15 mm で配置した。また，せん断補強筋として D6 (SD295) スターラップを 100 mm 間隔で配置した。

供試体のうち一部は，帯鉄筋の破断を模擬するためにコンクリート打設前にスターラップを切断した。部材スパン中央のスターラップを 1 本だけ切断した供試体と，その左右に隣接する

\*1 中部大学 工学部都市建設工学科 教授 Ph.D. (正会員)

\*2 中部大学 工学部都市建設工学科 講師 博士 (工学) (正会員)

\*3 名古屋大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

スターラップも含めて計 3 本を切断した供試体の 2 種類を作成した。切断位置を図 - 2 に示す。

また、施工不良により発生するジャンカなどの内部空隙を模擬する供試体を作成した。空隙は供試体作成時に 15 mm 角、あるいは 30 mm 角の発泡スチロールの立方体を図 - 3 の位置(圧縮側上部)に埋設することによって模擬した。

5 種類の供試体をそれぞれ 2 体ずつ、計 10 体を作製した。供試体の一覧を表 - 1 に示す。

材齢 28 日の供試体に対して一方向曲げ載荷試験を行なった。載荷スパンは 1,400 mm とし、スパン中央に一点集中載荷を行なった。最大耐力近傍までは荷重制御により、一方、ポストピーク領域においては変位制御により荷重 - 変位関係を得た。載荷は部材のたわみが 80 mm 以上となるまで続けた。

### 3. 実験結果

#### 3.1 材料強度

100 × 200 mm の円柱コンクリート供試体の材齢 28 日における圧縮強度の平均値は 31.4 MPa であった。また、主筋に用いた D13 の降伏強度は 374 MPa、引張強度は 548 MPa、ヤング係数は 208 GPa であった。

#### 3.2 実験曲線

図 - 4 に健全供試体 (Nor.-a, -b) と部材中央のスターラップを 1 本のみ切断した供試体 (Bre.1-a, -b) および 3 本切断した供試体 (Bre.3-a, -b) の曲げ載荷試験の結果を示す。同じく、図 - 5 に健全供試体と、15 mm 角のジャンカを有する供試体 (Void15-a, -b) および 30 mm 角のジャンカを有する供試体 (Void30-a, -b) の曲げ載荷試験の結果を示す。なお、いずれの供試体

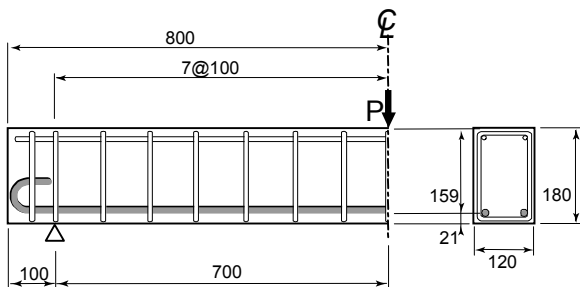


図-1 実験用供試体

呼称	供試体モデル
Nor.	健全な供試体
Bre.1	中央 1 本の帯鉄筋を切断
Bre.3	中央 3 本の帯鉄筋を切断
Void15	15 mm 角の発泡スチロールを埋設
Void30	30 mm 角の発泡スチロールを埋設

も最終的には載荷点付近においてコンクリートの圧壊が生じた。

#### 3.3 健全供試体

欠陥を有しない健全供試体 (2 供試体) の場合には、部材のたわみが 60 mm を越えた時点から耐力力の急激な低下が生じている。これは載荷点近傍においてコンクリートの圧壊が生じたためであり、載荷点近傍において部材のたわみ量が増大するに従い、曲げによるひび割れが主体となった斜めに進展する曲げせん断ひび割れが両供試体において観察された (写真 - 1)。本実験は RC はり中央での一点載荷実験であるため、載荷点近傍において曲率が局所的に大きくなり、この部分における曲げ耐力が低下したことが原因と思われる。

#### 3.4 スターラップ切断供試体

スターラップを切断した供試体の場合には、健全供試体と比較して、耐力力が低下し始める変位が小さい傾向にある (図 - 4 参照)。これはスターラップの切断によりコンクリートに対する横拘束力が低下したためであると考えられる。スターラップ 1 本のみを切断した供試体の場合には、たわみ 50 mm 程度で耐力力のピークを迎え、それ以降は耐力力が緩やかに低下している。一方、スターラップ 3 本を切断した供試体 Bre.3-b では、たわみ 40 mm を超えた時点で耐力の低下、せん断ひび割れに起因する引張側コンクリート

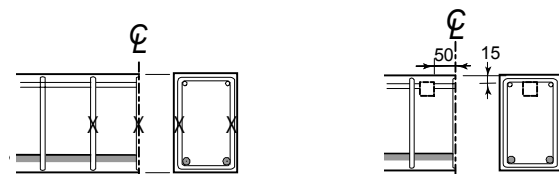


図-2 スターラップ切断の位置 図-3 模擬ジャンカの位置

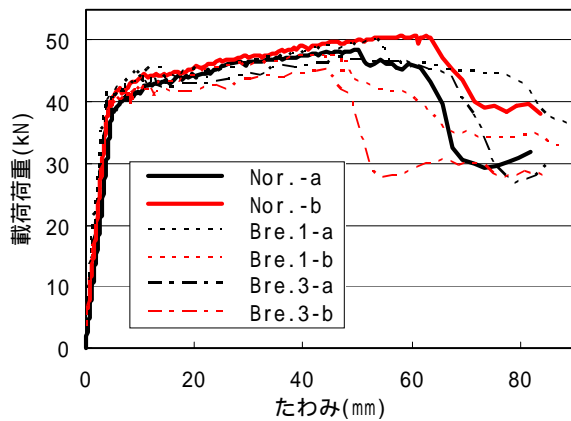


図-4 荷重 - 変位 (スターラップ切断供試体)

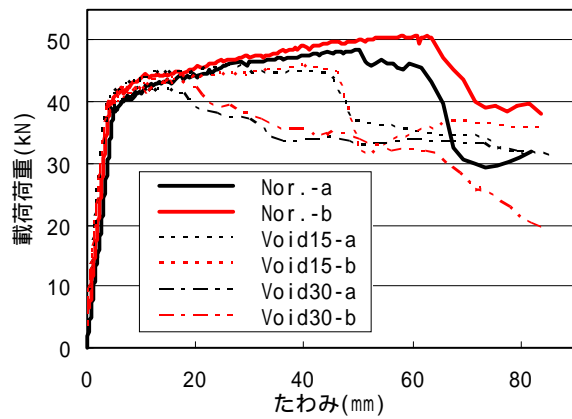


図-5 荷重 - 変位 (ジャンカ供試体)

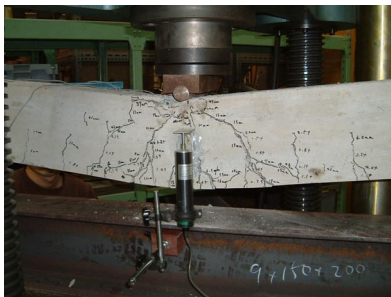


写真 - 1 健全供試体



写真 - 2 スターラップ切断供試体 Bre.3-b の破壊状況

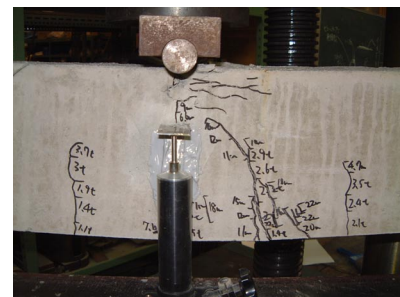


写真 - 3 ジャンカ供試体 Void30-a (たわみ 25mm 程度時点)

の剥落が観察された(写真 - 2)。スターラップの切断により、コンクリートに対する横拘束効果が低下しせん断耐力も低下したため、このような破壊に至ったものと考えられる。

### 3.5 ジャンカ供試体

ジャンカ供試体の場合には、その影響はスターラップ切断よりも顕著であり、ジャンカの寸法が大きくなるとともに、耐荷力の低下が生じる時の部材たわみが小さくなっており、ジャンカが 30 mm 立方の場合には、たわみがわずか 10 mm 強で耐荷力の低下が始まっている(図-5 参照)。目視によっても、他の供試体と比較して変位が小さな段階で、圧壊およびそれに伴うかぶりコンクリートの剥離が観察された(写真 - 3)。また、破壊後の供試体を観察すると、上記のコンクリートの剥離面は、ジャンカを模する発泡スチロール立方体を貫通していた。したがって、ジャンカの存在によりその近傍に応力の集中あるいは不均一分布が生じ、早期の段階でコンクリートの圧壊が生じたものと考えられる。

### 4. 内部欠陥を考慮したポストピーク解析

本章では、有限要素法プログラム FEAP により内部欠陥を有する RC はりの有限変形解析を実施し、第 3 章の実験結果と比較・考察することにより、内部欠陥が RC はりのポストピーク挙動に与える影響について論ずる。

#### 4.1 解析モデル

RC はり中央への 1 点載荷実験であるため、解析モデルとしては、図 - 6 に示すように、はり中央を固定端、はり支点を自由端とする片持ちばりに置き換えることにより、プッシュオーバー(一方向載荷)解析を有限要素法プログラム FEAP により行った。分割モデルを図 - 7 に示す。また、ジャンカ 30 mm を有する断面分割モデルを図 - 8 に示す。

本解析で用いた構成モデルは、主鉄筋部分には水野が開発した修正二曲面モデル<sup>5)</sup>の一軸応力 - ひずみ関係を、コンクリート部分には図 - 9 に示すひずみ軟化型一軸応力 - ひずみ関係<sup>5)</sup>を採用した。コンクリートおよび鉄筋の諸強度を表 - 2 に示す。

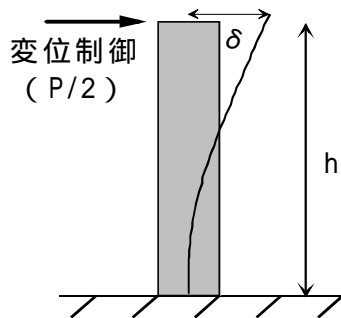


図 - 6 解析モデル

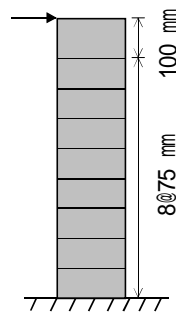


図 - 7 分割モデル

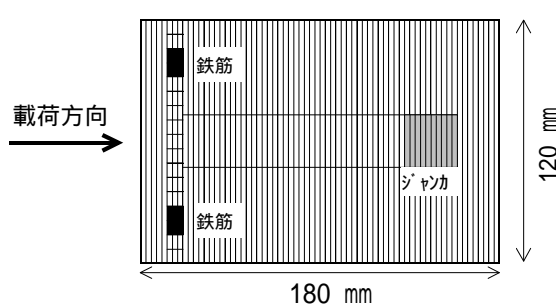


図 - 8 断面分割モデル

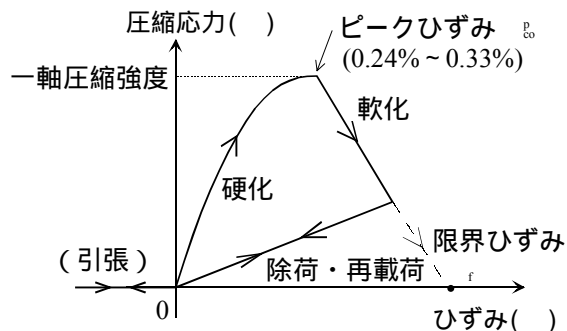


図 - 9 一軸応力 - ひずみ関係 (コンクリート)

表 - 2 材料諸強度

	健全 供試体	帯筋切断 供試体	ジャンカ 供試体
コンクリート強度 (MPa)	30.3	32.1	31.9
ピークひずみ (%)	0.29	0.30	0.26
限界ひずみ (%)	6.99	6.89	6.03
コンクリートヤング係数 (GPa)	21.1	21.8	24.8
鉄筋降伏強度 (MPa)	374		
鉄筋引張強度 (MPa)	548		
鉄筋ヤング係数 (GPa)	208		
ひずみ硬化係数 (GPa)	4.55		

#### 4.2 解析ケース

3 解析ケースとも要素長さは 7.5 cm (解析モデルで自由端の要素長は 10 cm) に設定した。各要素長のコンクリート要素に対するひずみ軟化型応力 - ひずみ関係における“限界ひずみ”は文献 5) に示す式によって算定した。

##### 解析ケース 1：健全供試体

全要素のコンクリートに対する限界ひずみを 6.99 % と設定して、鉄筋のひずみ硬化係数をヤング係数 E の 1/45 倍 (実験データによる数値) および 1/90 倍を用いた 2 解析、さらに弾完全塑性モデルによる解析、計 3 解析を行った。

##### 解析ケース 2：スターラップ切断の影響

本解析では、スターラップ 1 本を切断した場合に対しては、はり中央から外側のスターラップまでの 100 mm 区間の限界ひずみ  $\epsilon_f$  を、スタ

ーラップ 3 本を切断した場合に対しては、はり中央から外側のスターラップまでの 200 mm 区間の限界ひずみ  $\epsilon_f$  を段階的に低減させることにより、スターラップ切断によるコンクリートへの拘束効果低減を考察する。スターラップ切断の影響を考慮するため、はり中央での限界ひずみ  $\epsilon_f$  を健全供試体での限界ひずみ 6.89 % から 6 %、5 %、4 %、3 % と低減させることにより解析を行った。

##### 解析ケース 3：ジャンカの影響

本解析では、15 mm および 30 mm ジャンカの存在 (強度はゼロと仮定) によるコンクリートへの拘束効果を考慮するため、ジャンカを含む断面内のコンクリートの限界ひずみ  $\epsilon_f$  を健全供試体での限界ひずみ 6 % から 5 %、4 %、3 % と徐々に低減させることにより解析を行った。

#### 5 解析結果および考察

##### 5.1 解析ケース 1：健全供試体

健全供試体に対する 3 解析結果と実験データ (○, △ のシンボル) との比較を図 - 10 に示す。3 解析ケースとも鉄筋の降伏棚が終了するまでは一致した結果を示すが、ひずみ硬化係数にヤング係数 E の 1/45 倍を用いた解析結果 (線種 ) は、実験データよりもやや高めの耐力を予測する。一方、鉄筋に弾完全塑性モデルを用いた場合には、最大耐力に達した後、やや下降するポストピーク挙動 (線種 ) を示す。それゆえ、実験で見られる初期降伏後の耐力増加は、引張鉄筋のひずみ硬化によるものと判断できる。ひずみ硬化係数にヤング係数 E の 1/90 倍を用いた解析結果 (線種 ) は、概ね実験データと一致

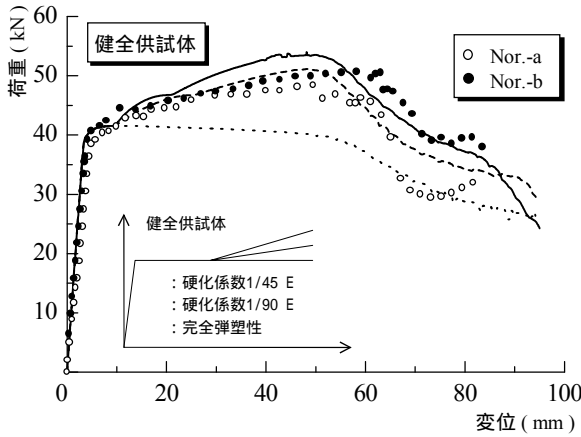


図 - 10 解析・実験結果の比較（健全供試体）

した結果を示している。さらに、変位 60 mm 近辺での耐力の低下状況も良く予測しており、コンクリートの軟化型構成モデルの有効性が確認できる。それゆえ、以下に示す解析ケース 2 および解析ケース 3 では、鉄筋のひずみ硬化係数にヤング係数の 1/90 倍の値を用いた解析結果と実験データとを比較・考察する。

### 5.2 解析ケース 2：スターラップ切断による影響







スターラップ 1 本切断および 3 本切断に対する解析結果と実験データ（,  のシンボル）との比較を図 - 11 および図 - 12 に示す。図中には、はり中央のコンクリートの限界ひずみに  $\epsilon_c = 6.89\%$ ,  $6\%$ ,  $5\%$ ,  $4\%$  を用いて切断区間の限界ひずみを段階的に変動させた場合の解析結果をそれぞれ線種 , , ,  で示してある。

図 - 11 から分かるように、スターラップを 1 本切断させた場合の実験データは、限界ひずみ

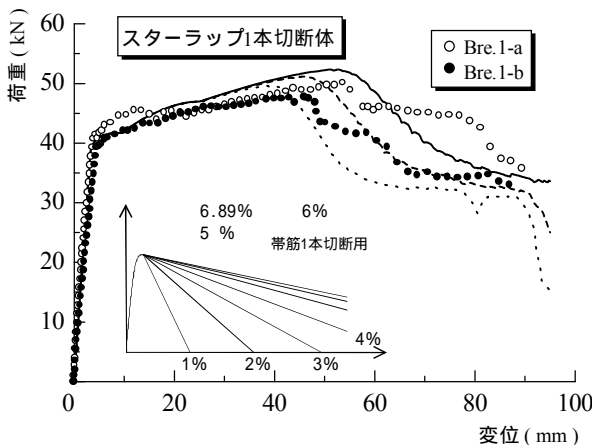




図 - 11 解析・実験結果の比較（切断供試体 1）

6%を用いた解析結果（線種 ) と概ね一致したポストピーク挙動を示す。一方、スターラップを 3 本切断させた場合の実験データは、限界ひずみ 6%または 5%を用いた解析結果（線種 ) と概ね一致したポストピーク挙動を示す（図 - 12）。このことより、スターラップ切断によるポストピーク挙動の影響は、ポストピークが生ずる変位レベルが早まり、最大耐力の低下耐力を招くが、コンクリートへの拘束効果がそれ程低下しないことが分かった。

### 5.3 解析ケース 3：ジャンカによる影響












スターラップ 1 本切断およびスターラップ 3 本切断に対する解析結果と実験データ（,  のシンボル）との比較を図 - 13 および図 - 14 に示す。図中には、ジャンカが存在するはり断面内のコンクリートの限界ひずみに  $\epsilon_c = 6\%$ ,  $5\%$ ,  $4\%$ ,  $3\%$ ,  $2\%$ ,  $1\%$  を用いた解析結果をそれぞれ線種 , , , , ,  で示してある。

図 - 13 から分かるように、ジャンカ 15 mm を含む供試体の実験データは、限界ひずみ 3%を用いた解析結果（線種 ) と概ね一致したポストピーク挙動を示す。一方、ジャンカ 30 mm を含む供試体の実験データは、限界ひずみ 2%または 1%を用いた解析結果（線種  または線種 ) と概ね一致したポストピーク挙動を示す（図 - 14）。このことより、ジャンカによるポストピーク挙動の影響は、ジャンカの寸法が大きいほどその断面周辺のコンクリートに対する拘束効果が急に低減して局所的な破壊を引き起

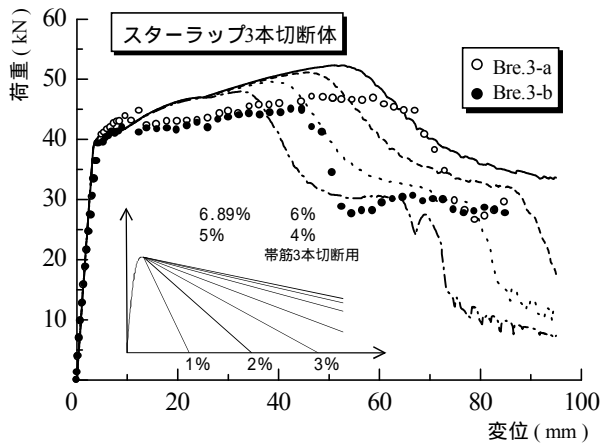


図 - 12 解析・実験結果の比較（切断供試体 2）

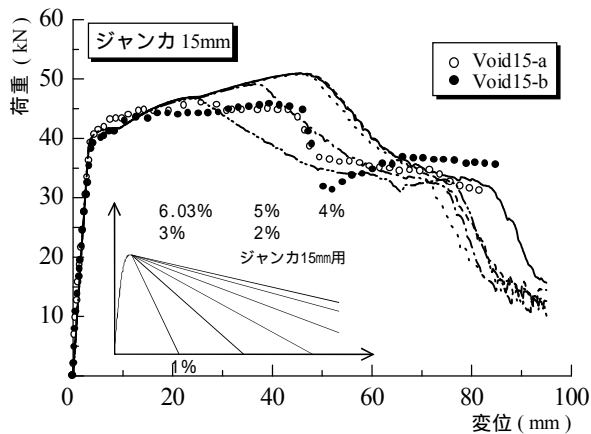


図 - 13 解析・実験結果の比較 (ジャンカ供試体 1)

こすことが推測される。本解析では、30 mm ジャンカの場合には、その周辺のコンクリートは無拘束状態に近い状態になったと推測される。このことは実験における破壊状況からも推測することができる。

## 6. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のようなものである。

- 1) ジャンカ (15 mm, 30 mm), スターラップ切断 (1 本切れ, 3 本切れ) の内部欠陥を含む RC はり供試体を用いて曲げ破壊実験を実施した結果、欠陥を有する供試体は、最大耐力の低下、低変位レベルでのポストピークへの移行を示すことが確認できた。
- 2) 内部欠陥としてジャンカが存在する場合の方がスターラップ切断によるポストピーク挙動への影響度よりも大きいことが分かった。ジャンカが力学的に重要な位置に存在する場合には、早期の段階でその近傍に応力集中あるいは破壊の集中によるコンクリートの圧壊を招き、耐力の低下を引き起こすと考えられる。
- 3) ひずみ軟化型コンクリート構成モデルを用いて、拘束効果を表現できる限界ひずみを調整することにより、解析的に内部欠陥を有する RC はりの曲げ破壊解析を行うことができた。
- 4) 本解析結果より、ジャンカの存在は、コンクリートの拘束効果に大きな影響を及ぼすことが分かった。とくに、ジャンカ 30 mm (はり幅の 1/4) の場合には、周囲のコンクリート

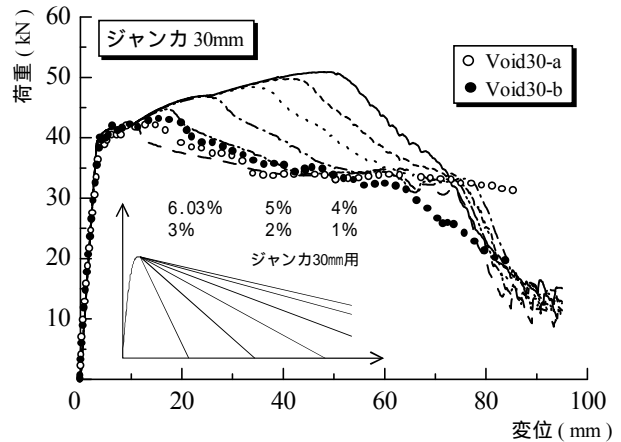


図 - 14 解析・実験結果の比較 (ジャンカ供試体 2)

はほぼ無拘束状態になることが推測できた。

謝辞：中部大学総合工学研究所補助金 (第 5 部門) ならびに平成 14-15 年度文部科学省科学研究費補助金 (基盤研究 C, 研究代表者：水野英二) を受けたことを付記し、ここに謝意を表す。また、三重大学建築学科教授・畑中重光先生には有益な情報を頂いた。ここに、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用, 2003.
- 2) 吉田幸夫, 水野英二, 畑中重光：プリーディング層を導入した寸法の異なる円形プレーンコンクリートの三次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, 2003.
- 3) 吉田崇, 吉田幸夫, 水野英二, 畑中重光：内部欠陥を有する角柱コンクリートの三次元 FEM 解析, DIANA ユーザー会議, 2003.
- 4) 水野英二, 沼田茂己, 畑中重光：部材耐力に及ぼすコンクリートの軟化挙動の影響に関する FEM 解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, 2, 407-412, 1997.
- 5) 水野英二, 松村寿男, 畑中重光：繰り返し載荷を受ける鉄筋コンクリート柱のポストピーク挙動解析, コンクリート工学論文集, 第 13 巻 3 号, pp. 47-60, 2002.
- 6) Zienkiewicz, O.C. : The Finite Element Method, Third Ed., (吉織・山田監訳「マトリクス有限要素法」), 培風館, pp.672-796, 1984.