

一般研究課題 都市環境・機能の合理化を目指した鉄筋コンクリート  
部材の劣化診断と補修・補強に関する研究  
助成研究者 中部大学 小林 孝一



## 都市環境・機能の合理化を目指した鉄筋コンクリート 部材の劣化診断と補修・補強に関する研究

小林 孝一・伊藤 睦・水野 英二  
(中部大学)

A study on the evaluation, repair and strengthening of  
RC beam aiming at rationalizing the urban environments  
and functions

Koichi Kobayashi, Atsushi Itoh, and Eiji Mizuno  
(Chubu University)

RC structure has superior mechanical performance intrinsically. However, its load-bearing capacity will decrease because of the defects generated during construction or the unexpected deteriorations. Therefore, this study aims at clarifying the effects of internal defects, such as rock pocket generated due to insufficient quality of construction work and breaking of lateral confinement due to alkali-aggregate reaction, on the mechanical performance of RC member. For this purpose, loading test of RC beam that has model defects of internal voids or stirrup breaking was carried out.

キーワード：RC部材，内部欠陥，ジャンカ，鉄筋破断，耐荷性能，ポストピーク

### 1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）構造は力学的性能に優れており，我が国でも重要なインフラストラクチャーを形成しているが，不適切な設計や施工，あるいは維持管理上の問題から，本来の性能が発揮できない場合がある。昨今話題となっている，アルカリ骨材反応による鉄筋の破断はその一つであり，また施工時に発生する不連続な打継ぎ面やジャンカ等の初期欠陥も，RC構造の耐荷性能に与える影響が大きい。

このような状況の下で、著者らはこれまでにブリーディング層やジャンカ、あるいは鉄筋破断、鉄筋腐食が、RC部材の耐荷性能に与える影響について、実験的ならびに解析的に検討を行ってきており<sup>1)2)3)4)</sup>、鉄筋の破断やジャンカの存在により、断面内での横拘束力が減少し、部材の耐荷性能、特にポストピーク域における挙動が健全供試体（内部欠陥がない供試体のことをいう）とは異なることを明らかにしている<sup>3)</sup>。

本研究では、ジャンカに代表される内部空隙、およびアルカリ骨材反応によって生じる横拘束筋の破断が、RCはり部材の耐荷性能、特にポストピーク域における挙動に対して与える影響を詳細に検討し、実験を通して明らかにすることを目的とした。

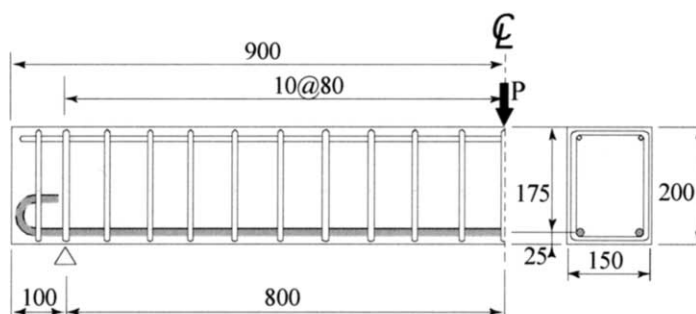


図1 横拘束筋間隔80mmの供試体（単位：mm）

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体

本研究で供試体として用いたRCはり部材の例を図1に示す。コンクリートはW/C=0.6とし、早強ポルトランドセメントを用いた。供試体の引張側には主筋としてD16（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17mmで配置した。またせん断補強筋あるいは横拘束筋としてD6（SD295）の横拘束筋を、間隔（ $s_s$ ）60mm、80mm、100mmのいずれかで配置した。

これらはそれぞれ横拘束筋体積比1.55%、1.17%、0.93%に相当し、 $s_s=80$ mmは、既報<sup>3)</sup>で用いられた供試体と横拘束筋体積比が同程度である。主筋と横拘束筋の力学的性能を表1に示す。また、内部欠陥を有しない健全供試体の一覧を、表2に示す。

供試体のうち一部は、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である。内部空隙は供試体作成時に15mm角、あるいは30mm角の発泡スチロールの立方体を、供試

|     | ヤング係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 降伏強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----|--------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| D6  | 202                            | 413                          | 528                          |
| D16 | 198                            | 344                          | 520                          |

表1 使用した鉄筋の力学的性

| 供試体名     | 横拘束筋<br>間隔(mm) | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|----------|----------------|------------------------------|
| 60sound  | 60             | 36.0                         |
| 80sound  | 80             | 39.1                         |
| 100sound | 100            | 35.2                         |

表2 健全供試体一覧

| 供試体名      | 横拘束筋<br>間隔(mm) | ジャンカ<br>寸法(mm) | ジャンカ<br>位置(mm) | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|----------------|----------------|----------------|------------------------------|
| 60-15-17  | 60             | 15             | 17             | 36.0                         |
| 60-30-17  | 60             | 30             | 17             | 31.6                         |
| 80-15-17  | 80             | 15             | 17             | 31.6                         |
| 80-15-30  | 80             | 15             | 30             | 40.0                         |
| 80-30-17  | 80             | 30             | 17             | 39.1                         |
| 80-30-30  | 80             | 30             | 30             | 42.2                         |
| 80-30-45  | 80             | 30             | 45             | 42.2                         |
| 100-15-17 | 100            | 15             | 17             | 35.2                         |
| 100-30-17 | 100            | 30             | 17             | 40.0                         |

供試体名：横拘束筋間隔-空隙の大きさ(mm)-供試体上縁からの空隙の深さ(mm)

表3 内部空隙供試体一覧

| 供試体名    | スタラップ<br>間隔(mm) | 横拘束筋<br>切断本数 | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|---------|-----------------|--------------|------------------------------|
| 60bre1  | 60              | 1            | 37.4                         |
| 60bre3  | 60              | 3            | 37.4                         |
| 80bre1  | 80              | 1            | 40.4                         |
| 80bre3  | 80              | 3            | 34.2                         |
| 100bre1 | 100             | 1            | 35.3                         |
| 100bre3 | 100             | 3            | 45.4                         |

表4 横拘束筋切断供試体一覧

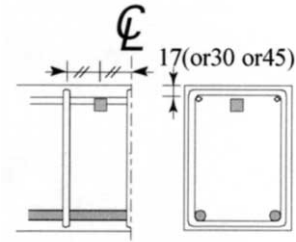


図2 内部空隙の位置の例(単位mm)

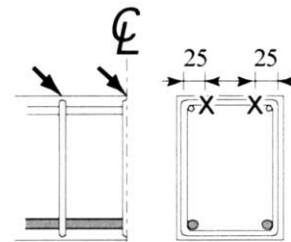


図3 横拘束筋切断の位置の例  
(3本切断の場合, 単位mm,  
は切断される横拘束筋, x  
はその切断場所を示す)

体中央に配置された横拘束筋の左右に1個ずつ埋設することによって模擬した(図2)。これら寸法は既報<sup>3)</sup>を参考にし、粗骨材最大寸法( $G_{max}=15\text{mm}$ )や、断面寸法に対する比率などを考慮したうえで決定した。また供試体上面から模擬空隙の上端までの距離は、17mm(=主筋のかぶり)に加え、そのおよそ2倍と3倍に相当する30mmおよび45mmとすることにより、空隙の位置が耐荷性能に与える影響を検討した。内部空隙を有する供試体の一覧を表3に示す。

また鉄筋の破断を模擬するためにコンクリート打設前に横拘束筋を切断した供試体を作製した。供試体中央の横拘束筋を1本だけ切断したものと、その左右に隣接する横拘束筋も含めて計3本を切断したものの2種類を作製した。横拘束筋を3本切断する場合の切断位置を一例として図3に示す。また横拘束筋を切断した供試体の一覧を表4に示す。

供試体は一要因につき、それぞれ2体ずつ、計36体作製した。

## 2.2 実験方法

供試体に対して一方向曲げ載荷実験を行った(写真1)。載荷スパンは1600mmとし、スパン中央に一点集中載荷を行った。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100mm程度となるまで続けた。

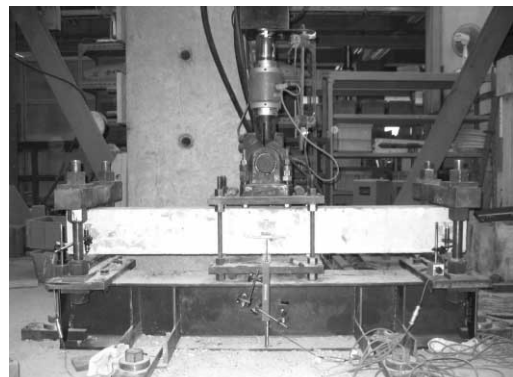


写真1 載荷実験の様子

### 3. 実験結果および考察

100×200mmの円柱コンクリート供試体に対する圧縮強度試験の結果，RCはり部材の載荷実験実施時のコンクリートの圧縮強度は31.6～45.4N/mm<sup>2</sup>であった（表2，3，4参照）。ばらつきが大きいのは，脱型後直ちに屋外に暴露したためであると考えられる。

また，RCはり部材は，いずれも載荷点近傍でコンクリートの圧壊が生じ，曲げ破壊した。なお同一要因の供試体は全て2体ずつ作製して載荷実験を行なったが，これ以降，図中では2体の結果を（供試体名）+（-1）or（-2）と区別して示す。

#### 3.1 健全供試体

図4に内部欠陥を有さない健全供試体の荷重-たわみ関係を示す。いずれの供試体も荷重60kN程度で降伏し，その後たわみが30～50mmで荷重が70～75kNに達した後に，耐荷力の低下が生じている。

また， $s_s=60\text{mm}$ の場合には，たわみ50mm程度で最大耐力75kN程度が得られるのに対し， $s_s=80\text{mm}$ の場合にはたわみ35～50mm程度で最大耐力66～75kN， $s_s=100\text{mm}$ の場合にはたわみ30～45mmの時点で最大耐力70～74kNとなっており，横拘束筋量が多いもの程，最大耐力に達するときのたわみが大きくなる。

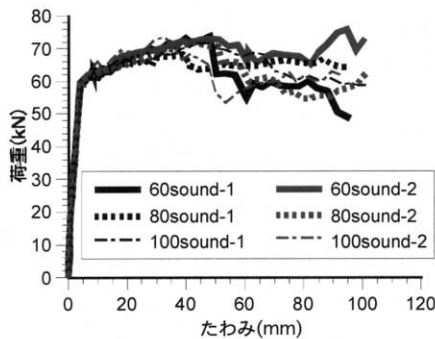


図4 健全供試体の荷重-たわみ関係

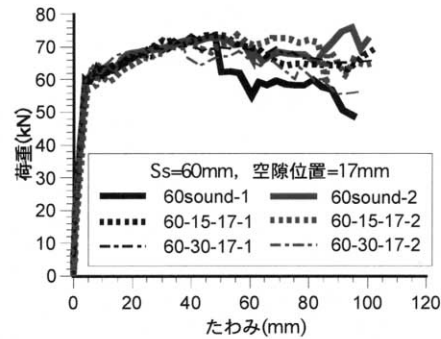


図5 内部空隙の寸法が荷重-たわみ関係に与える影響（横拘束筋間隔60mm）

#### 3.2 内部空隙の大きさの影響

図5，6および7にそれぞれ， $s_s=60, 80, 100\text{mm}$ で内部空隙が部材上縁から深さ17mmの位置にある場合の荷重-たわみ関係に，内部空隙の大きさが与える影響について示す。

$s_s=60\text{mm}$ の場合（図5）には，内部空隙の寸法が30mmのときに，最大耐力時の変位が若干小さ

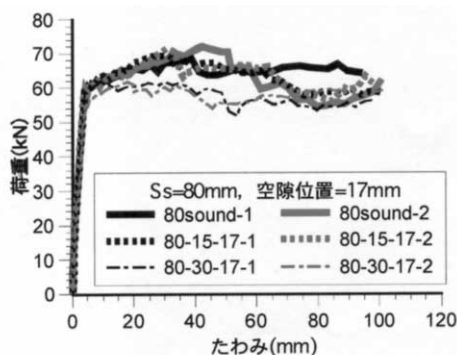


図6 内部空隙の寸法が荷重-たわみ関係に与える影響（横拘束筋間隔80mm）

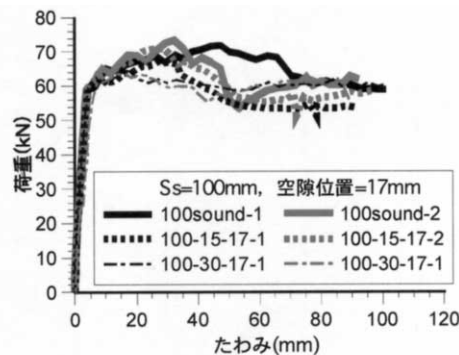


図7 内部空隙の寸法が荷重-たわみ関係に与える影響（横拘束筋間隔100mm）

くなるという現象が見られた。それに対し、 $s_s=80\text{mm}$ の場合(図6)には、寸法が15mmの内部空隙は供試体の荷重-たわみ関係にほとんど影響を与えないが、30mmの内部空隙が存在する場合には、部材降伏後の耐荷力の増加がほとんど見られない。さらに $s_s=100\text{mm}$ の場合(図7)には、寸法が15mmの内部空隙の存在により、最大耐力に達するのが若干早まり、さらに寸法30mmの内部空隙が存在する場合、部材降伏後の耐荷力の上昇がほとんど見られなくなる。

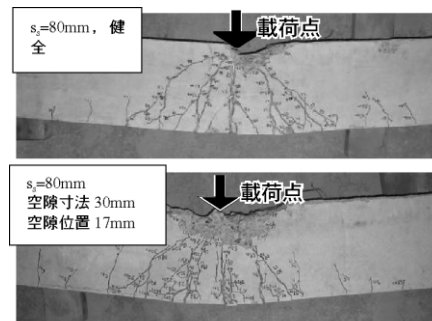


写真2 載荷実験終了後の供試体  
(上: 80sound, 下: 80-30-17)

既報<sup>3)</sup>において著者らは、有限要素解析プログラムFEAP<sup>5)</sup>を用いたポストピーク挙動解析を通して、内部空隙の存在により圧縮域のコンクリートに対する横拘束力が減少し、場合によってはほぼ無拘束状態になるために、ポストピークへの移行が早まることを明らかにしている。

写真2に載荷実験終了後の供試体の例を示す。健全供試体と比べて、内部空隙を有する供試体の場合には、載荷点近傍のコンクリートの圧壊の範囲が広がる。これは上記のように、内部空隙の存在により、コンクリートが適切に横拘束されなかったためであると考えられる。

本研究では、横拘束筋体積比が1.55% ( $s_s=60\text{mm}$ )と比較的大きい場合には、内部空隙の存在が部材の耐荷性能に与える影響は小さいもの、これより横拘束筋量が小さい場合には、特に内部空隙の寸法が30mm(部材幅の1/5)のときに部材の耐荷性能が大きく低下した。

### 3.3 内部空隙の位置の影響

図8および9に $s_s=80\text{mm}$ の場合に内部空隙の位置が荷重-たわみ関係に与える影響を示す。内部空隙の寸法が15mm, 30mmの場合とも、空隙が深さ30mmより下に存在すると、荷重-たわみ関係は健全供試体のものとほぼ同一である。

本研究で用いた供試体の中立軸位置を、前述のコンクリート強度と鉄筋降伏強度を用いて等価応力ブロック法にて求めると、30~43mmとなる。したがって、写真2に示したように、載荷中にコンクリートの圧壊により中立軸位置は移動しているものの、空隙が深さ30mmより下に存在する場合には、空隙位置近傍に発生する圧縮応力が小さいため、内部空隙の存在が供試体の耐荷性能に与える影響が小さかったものと考えられる。

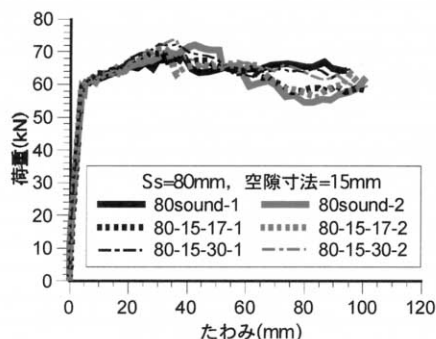


図8 内部空隙の位置が荷重-たわみ関係に与える影響(横拘束筋間隔80mm, 空隙寸法15mm)

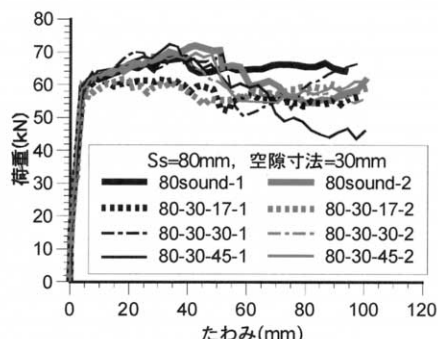


図9 内部空隙の位置が荷重-たわみ関係に与える影響(横拘束筋間隔80mm, 空隙寸法30mm)

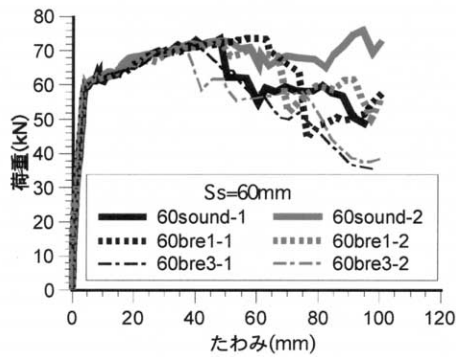


図10 横拘束筋の切断が荷重-たわみ関係に与える影響（横拘束筋間隔60mm）

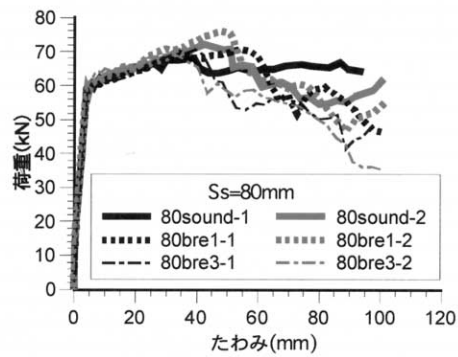


図11 横拘束筋の切断が荷重-たわみ関係に与える影響（横拘束筋間隔80mm）

### 3.4 横拘束筋切断の影響

図10, 11および12にそれぞれ,  $s_s=60, 80, 100$ mmの場合の荷重-たわみ関係に, 横拘束筋の切断が与える影響について示す。

$s_s=60$ mmの場合（図10）には, 健全供試体ではたわみ50mm程度で耐力力がピークに達していたのが, 横拘束筋が3本切断されることによって, 耐力力がピークとなるたわみが40mm程度にまで減少している。それに対し $s_s=80$ mm（図11）あるいは $s_s=100$ mm（図12）の場合には, 横拘束筋の切断がピーク位置に与える影響は顕著ではない。

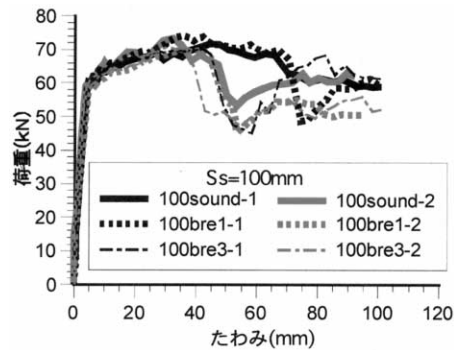


図12 横拘束筋の切断が荷重-たわみ関係に与える影響（横拘束筋間隔100mm）

一方,  $s_s=60$ mmあるいは80mmの場合には, ポストピーク域における耐力力の低下が大きく, 例えば, たわみが100mmの時点では横拘束筋切断本数の多いものほど, 耐力力が小さな傾向にある。また,  $s_s=100$ mmのポストピークの挙動を見ると, 健全および横拘束筋1本切断の供試体は, 緩やかに耐力力が減少しているものもあるのに対し, 横拘束筋を3本切断したものは, いずれも耐力力の低下が急である。

このような傾向は内部空隙を有する供試体では見られなかった。既報<sup>3)</sup>において著者らは, 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”<sup>6)</sup>をパラメータとすることにより, 内部空隙の存在や横拘束筋の破断がRC部材の耐力性能に与える影響およびそのメカニズムについて考察を行っており, 今後, 本研究で得られた結果についても, 数値解析を通じて検討を行なう予定である。

また, 本来アルカリ骨材反応により劣化の生じた構造物は, ゲルの析出およびそれにともなう膨張によりコンクリートの力学的性能自体も低下しているため, 今後はその影響も考慮して検討を行なう必要があるものと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、以下のような結論が得られた。

- 1) 内部空隙の存在により、ポストピークへの移行が小さな変位で生じた。
- 2) 1) の現象は、横拘束筋間隔が大きいほど、また、空隙が大きいほど顕著であった。またその場合、部材降伏後の耐荷力の増加がほとんどなかった。
- 3) 内部空隙が部材の中立軸よりも下に位置すると、内部空隙の存在が部材の耐荷力に与える影響はほとんど見られなかった。
- 4) 横拘束筋間隔が小さい場合には、横拘束筋の切断によってポストピークへの移行が小さな変位で生じた。
- 5) 横拘束筋間隔が小さい場合には、横拘束筋の切断はポストピーク移行後の耐荷性能に影響を与えた。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、日本私立学校振興・共催事業団からの学術研究振興資金、(財)日比科学技術振興財団および中部大学総合工学研究所から研究助成金の援助を得た。実験の遂行には、中部大学都市建設工学科水野・伊藤研究室および小林研究室の学生の助力を得た。ここに記して謝意を表す。

#### 参考文献

- 1) 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, No. 2, pp. 55-60, 2003.
- 2) 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.
- 3) 水野英二, 小林孝一, 藤村敏之: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 26, No. 2, pp. 49-54, 2004.
- 4) 小林孝一, 志知裕幸, 榊原吉正: 塩害がRC部材の耐震性に与える影響について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 26, No. 1, pp. 1059-1064, 2004.
- 5) Zienkiewicz, O.C.: The Finite Element Method, Third Ed., (吉織・山田監訳「マトリックス有限要素法」), 培風館, pp. 672-796, 1984.
- 6) 水野英二, 松村寿男, 畑中重光: 繰り返し载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.