論文 内部欠陥を有する RC はり部材の耐荷性能に関する実験的研究

小林 孝一*1・伊藤 睦*1・水野 英二*2

要旨: RC 構造物は経済的で力学的にも優れた構造であるが,近年,施工時に発生する初期欠 陥や予期せぬ劣化のために,耐荷力が損なわれる例が数多く報告されている。そこで本研究で は,初期欠陥の例としてジャンカ,耐久性低下の例としてアルカリ骨材反応による鉄筋破断を 対象とし,これらを模擬するモデル欠陥を有する RC はり部材の曲げ試験を行ない,その耐荷 性能を調査,検討することとした。その結果,横拘束筋間隔の異なる RC はり部材において, ジャンカの大きさ,位置,または横拘束筋の切断状況が部材の耐荷性能に対して与える影響に ついて,明らかにすることができた。

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¹⁾²⁾³⁾⁴⁾,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³⁾。

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。

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φ6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



*1 中部大学講師 工学部都市建設工学科 博(工) (正会員) *2 中部大学教授 工学部都市建設工学科 Ph.D (正会員)

表-1 使用した鉄筋の力学的性能

	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)
D6	202	413	528
D16	198	344	520



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 その切断場所を指す)

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=80mmは, 既報³⁾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³)を参考にし,粗骨材最大寸法

表-2 健全供試体一覧

供試体名	横拘束筋 間隔(mm)	圧縮強度 (N/mm²)
60sound	60	36.0
80sound	80	39.1
100sound	100	35.2

表-3 内部空隙供試体一覧

供試体名	横拘束筋 間隔(mm)	ジャンカ 寸法(mm)	ジャンカ 位置(mm)	圧縮強度 (N/mm²)
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)

供試体名	スターラップ 間隔(mm)	横拘束筋 切断本数	圧縮強度 (N/mm²)
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

(G_{max}=15mm)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。

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。

3. 実験結果および考察

φ 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/mm²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 =60mm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 =80mmの場合にはたわみ35~50mm程度で最大 耐力66~75kN、 s_s =100mm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、横拘束筋量が大きいもの程、最大耐力に達す るときのたわみが大きくなる。

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=60,80,100mm 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。



写真-1 載荷実験の様子



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)



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)



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

 $s_s=60mm$ 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 さくなるという現象が見られた。それに対し、 $s_s=80mm$ 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 $s_s=100mm$ 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。

既報³において著者らは,有限要素解析プログ ラム FEAP⁵⁾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



A=7 内部空隙のう法が何里=たわみ関係に与 える影響(横拘束筋間隔100mm)

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 の範囲が広くなる。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=60mm)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=80mm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 カ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。

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, 100mm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。

 $s_s=60mm$ の場合(図-10)には、健全供試体で はたわみ50mm程度で耐荷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、耐荷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 $s_s=80mm$ (図-11) あるいは $s_s=100mm$ (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。

一方, s_s=60mmあるいは80mmの場合には,ポ ストピーク域における耐荷力の低下が大きく,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,耐荷力が小さな傾向にあ る。また,s_s=100mm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, 緩やかに耐荷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 荷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³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"。をパラメーターと することにより,内部空隙の存在や横拘束筋の破 断がRC部材の耐荷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なっており,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

- 吉田幸夫,水野英二,畑中重光:ブ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.
- 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.
- 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.
- 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.