

# 論文 部材軸直角方向圧縮力作用下の RC はりの曲げ挙動

丸山 健太郎\*1・遠藤 典男\*2・大原 涼平\*2

**要旨**：本研究では、部材軸直角方向に圧縮力が作用する RC はりの曲げ挙動を実験的に評価する。RC はりにボルトを挿入し、ボルト締結時のトルクにより作用圧縮力を制御することができるとともに、アンカー機能に加えボルト周辺のコンクリートが拘束されることになる。RC はりに部材軸直角方向圧縮力を作用させることで耐荷力や復元力が向上することはないが、設計基準強度の 1/5 程度の比較的小さな圧縮応力が作用することで、RC はりの靱性が向上するが、2/5 倍以上の圧縮応力が作用しても靱性は頭打ちとなる。

**キーワード**：アンカー、部材軸直角方向圧縮力、プレストレス

## 1. 緒 論

既存の RC 曲げ部材に対してアンカーを敷設する場合、大きな引張応力が作用する位置においては、引張力の作用によりアンカーの穿孔によりひび割れが誘発され、埋め込み部においては拘束力が弱く、十分な定着性能が得られないため、一般的には施工されない。

ここで、アンカーに関する既往の研究としては、RC 曲げ部材に対する補強工法<sup>1)</sup>の一つである鋼板接着工法において、アンカーにより鋼板と被補強部材との補強性能の向上を図っている。また、連続繊維シート等により補強する場合、アンカーによりシートの剥離を抑制する技術<sup>2)</sup>の提案もなされている。

そこで本研究では、はり高さと同程度の長さのボルトを埋設し、ナットで締結し部材軸直角方向の圧縮力（以下、軸直角圧縮力と記す）を作用させることで、引張力作用下のコンクリートでもアンカーとしての定着機能を

保持させるのみならず、補強効果が期待できると考えた。ここで、部材軸直角方向に圧縮力を作用させ補強する手法は、RC 柱の耐震補強として部材軸直角方向平面の直交する 2 方向に、部材外側より複数の面に圧縮力を作用させ、曲げ破壊に対する靱性の向上を検証している<sup>3)</sup>。このことから、本研究の対象である RC はりに対して、はり内部にボルトを挿入・埋設して軸直角圧縮力を作用させることでも補強効果が向上すると考えた。また、打設コンクリートの設計基準強度を基準に、ボルト締結時のトルクにより作用させる圧縮応力を制御し、段階的に変化させ（設計基準強度の 1/5~4/5 倍程度）、RC はりの曲げ挙動に与える影響を実験的に検証する。

## 2. 試験体の作製

図-1 に試験体の側面図を、図 2(a) に断面図（試験体 1 の基本断面）を示す。試験体の形状寸法は図示する

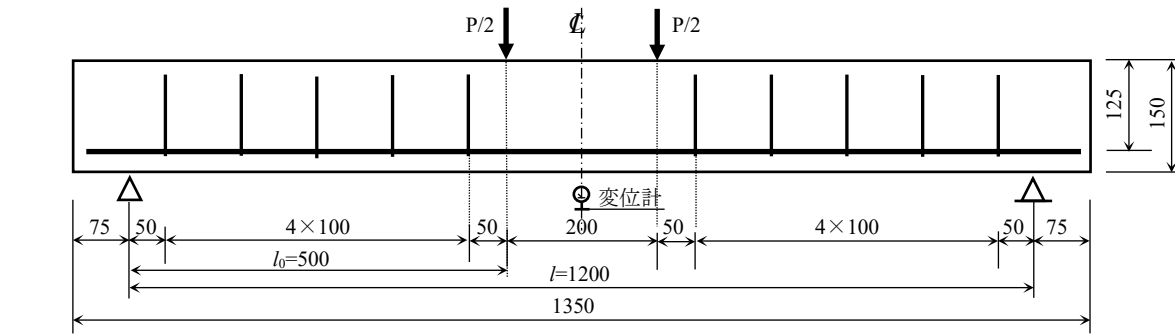


図-1 試験体 1 の側面図

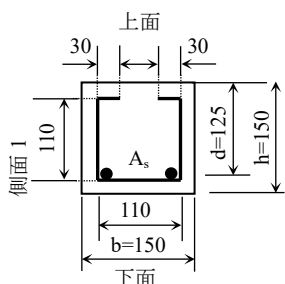


図-2 (a) 試験体 1

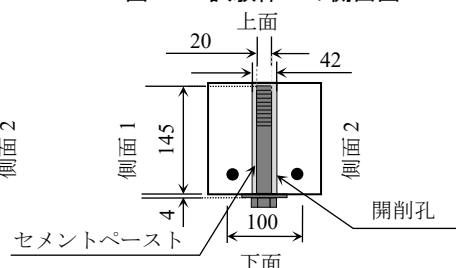


図-2 (b) 試験体 2

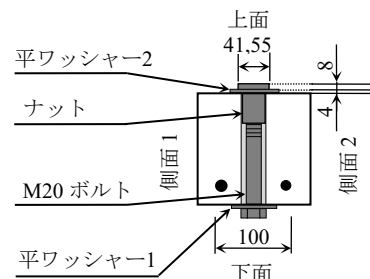


図-2 (c) 試験体 3~6

図-2 試験体断面図

\*1 長野工業高等専門学校 技術支援部 (正会員)

\*2 長野工業高等専門学校 環境都市工学科 (正会員)

通りであり、試験体中央より左右 100mm の位置で載荷する（支点より載荷位置までの距離  $l_0$  は 500mm）。RC はりの作製に使用したコンクリートは水セメント比を 0.55、設計基準強度  $f_{ck}$  を 27N/mm<sup>2</sup>、スランプ 8cm、空気量 5.0% と仮定し、練りあがりコンクリートの材齢 28 日における平均圧縮強度  $f_c$  は 37.7N/mm<sup>2</sup>、スランプと空気量の実測値は、各々 7.0cm、5.0% であった。

配筋に関しては、図-1、2 に示すように、引張主鉄筋として直径 13mm の異形棒鋼（材質 SD295）を 2 本配置（断面積  $A_s=253\text{mm}^2$ ）し、スターラップとして直径 6mm の丸棒鋼（材質 SR235）を U 形に加工し支点より 100mm 間隔で 10 組配置した。同図に示すように RC はりの断面は単鉄筋長方形断面としたが、圧縮側コンクリートのひび割れ発生と進展が圧縮鉄筋に影響されることを避けるためである。試験体の作製に使用した棒鋼、および圧縮力を作用させるために使用したボルト、ナット、ワッシャーの機械的性質を表-1 に示す。

ここで、無垢な試験体 1 の引張主鉄筋の降伏荷重  $P_y$ 、終局荷重  $P_u$ 、およびせん断破壊荷重  $P_s$  を算出する。まず、引張鉄筋の降伏荷重を計算するにあたり、コンクリートの 28 日圧縮強度が  $f_c=37.7\text{N/mm}^2$  であることから、参考文献 4) を基にヤング係数  $E_c$  を算出すると、

$$E_c = \left( 2.8 + \frac{f_c - 30}{33} \right) \times 10^4 = 30.3 \text{ kN/mm}^2 \quad (1)$$

が算出される。上式、および表-1 より引張主鉄筋のヤング係数が  $E_s=200\text{kN/mm}^2$ 、100mm ピッチでスターラップを配置したことから、 $P_y$  は 33.0kN、 $P_u$  は 35.0kN、 $P_s$  は 121.4 kN となり、曲げ破壊が先行することになる。

本研究で使用する単鉄筋長方形断面を有する 6 種類の試験体の概要と作製方法に関して以下に記し、作用させるトルクと圧縮力の決定に関しては後述する。

試験体 1：無垢な試験体

試験体 2：試験体 1 の中央に六角ボルトを挿入

試験体 3：試験体 1 の中央に六角ボルト挿入し

8.8kN の圧縮力を導入

試験体 4：試験体 3 と同様で 17.6 kN の圧縮力を導入

試験体 5：試験体 3 と同様で 26.4 kN の圧縮力を導入

試験体 6：試験体 3 と同様で 35.2 kN の圧縮力を導入

試験体 2 の作製にあたり、まず試験体のスパン中央に刃径 40mm のコアドリルで孔を開削する（孔径 42mm 程度）。図-2 (b) に示すように、六角ボルトに平ワッシャー 1（外径 60mm、内径 21mm、厚さ 3mm）を通した後、試験体上面より孔へ、グラウト材として水セメント比が 30% のセメントペーストを充填した。

試験体 3~6 の作製は、試験体 2 と同様に孔を開削し六角ボルトに平ワッシャー 1 を通した後、ボルトを試験体の孔下面より挿通し（図-2 (c) 参照）、両者の空隙をセメ

表-1 棒鋼、六角ボルト、ナット、ワッシャー物性値

| 種類                    | 降伏応力<br>N/mm <sup>2</sup> | 引張強度<br>N/mm <sup>2</sup> | ヤング係数<br>kN/mm <sup>2</sup> |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| 引張主鉄筋<br>(SD295)      | 295                       | 440                       | 200                         |
| スターラップ<br>(SR235)     | 235                       | 380                       | 200                         |
| M20 六角ボルト<br>(SCM435) | 900                       | 1000                      | 210                         |
| ナット (S45C)            | 345                       | 570                       | 205                         |
| 平ワッシャー1,2<br>(SS400)  | 245                       | 400                       | 205                         |

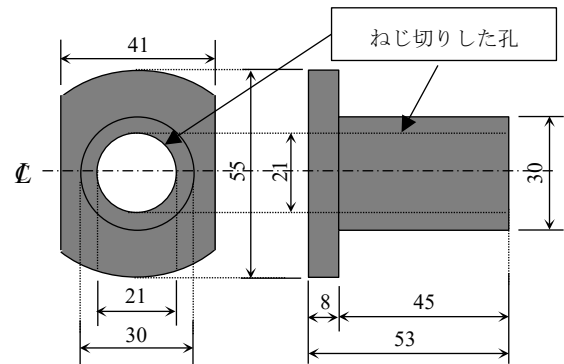


図-3 ナットの詳細図

ントペーストで充填する。この後、後述する図-3 のナットに平ワッシャー 2（外径 65mm、内径 31mm、厚さ 4mm）を通し上面より孔に挿通し、トルクレンチによりボルト側で所定のトルクを導入することで軸直角圧縮力を作用させる。

図-3 に本研究で提案するナットの詳細図を示す。物性値は表-1 に示す通りであり、六角ボルトとナットを締結するにあたり、RC はり上部において突起が小さくなるような形状のナットを開発した。すなわち、開削した孔にナット長さの大部分を挿入させるよう外径は 30mm とし、内径は M20 ボルトが締結できるよう 21mm の孔の内部をねじ切りし、当該部分の長さを 45mm とした。さらに、六角ボルトにトルクを導入することで生じる引張力に対して十分な抵抗力を有する必要があるため、突起部の厚さを 8mm とし、直径 55mm の円形断面の一部を平行に切断し、二面幅 41mm のスパナで固定できる形状寸法となるよう、直径 60mm、長さ 60mm 程度の円柱鋼塊より削り出し加工した。

### 3. 作用トルクの決定

試験体 3~6 で作用させる軸直角圧縮力は六角ボルトに導入するトルクにより制御することになるため、作用させるトルクとひずみの関係を評価する予備実験を実施した。試験体と同一の断面寸法を有する無筋コンクリートはり（長さ 530mm）を作製し、先述した試験体 3~6 に引張力を導入する方法と同様の操作を行う（孔と六角ボルトの空隙にはセメントペーストを充填しない）。ボルトの長さ方向中央部両面にひずみゲージを接着し、作用トル

ク  $T(N\cdot m)$  とボルトに生じるひずみ  $\varepsilon(\mu)$  を計測した。ボルトに作用させるトルクを  $0N\cdot m$  から  $40N\cdot m$ 、および  $60N\cdot m$  から  $260N\cdot m$  まで  $40N\cdot m$  増加させる操作を 3 回繰り返した計測した範囲では作用トルク  $T$  と六角ボルトに発生するひずみ  $\varepsilon$  は、

$$\varepsilon = 2.668 \cdot T \quad (2)$$

で表される強い線形性 (相関係数  $R^2=0.997$ ) を示す結果となった。3 回トルクを導入したが、ボルトに発生するひずみに大きな変化がないことから、試験体に開削した孔周辺のコンクリートの損傷は皆無、もしくは軽微であると考えられる。

ここで、上述の六角ボルトに  $260N\cdot m$  のトルクを導入した場合、コンクリート部分に作用する応力を評価するため有限要素解析を行った。解析は線形弾性解析を行い、要素は 3 次元アイソパラメトリック要素を用いた。ヤング係数はコンクリートが式(1)で算定された値、ボルトが表-1 に示す値を用い、ポアソン比はコンクリートでは 0.2、六角ボルトでは 0.28 とした。

図-4 に要素分割図、境界条件、荷重条件、および対象領域の鉛直方向 ( $z$  方向) の応力状態を示す。解析対象として、部材軸方向は荷重条件より曲げモーメントが最大となる中央から支点に向け  $100mm$  の長さ (図中  $x$  方向)、幅  $150mm$  (同  $y$  方向)、高さ  $150mm$  (同  $z$  方向) の領域を考え、対称性を鑑み部材軸方向と幅に対しては各々の半分を要素分割した。六角ボルトに対しても対称性を鑑み、断面の  $4$  分の  $1$  を要素分割した。六角ボルトと試験体に開削した孔の隙間にセメントペーストを充填し、直後にボルトへトルクを導入したが、解析に際してはセメントペーストの硬化後の状態をモデル化し要素分割した。境界条件は対称性を考慮し、同図に示すように設定した。荷重条件として、ボルトに導入した引張力が試験体上部に設置した平ワッシャー-2 の全面 (黒枠の扇型部分) に等分布な圧縮力として作用させ、試験体下部の平ワッシャー-1 を設置した部分において、 $z$  方向の変位を拘束した。なお、平ワッシャー-1 と 2 の直径が異なるが、解析においては両者の直径をともに  $60mm$  とした。荷重に関しては、図-4 において  $260N\cdot m$  のトルクを導入した場合、式(2)より六角ボルトには  $694\mu$  のひずみが発生し、表-1 に示すボルトのヤング係数 ( $210kN/mm^2$ ) と断面積 ( $314mm^2$ ) を掛けることで、ボルトに作用する引張力  $45.8kN$  が得られる。したがって、外径  $60mm$  の平ワッシャー-2 に  $16.2N/mm^2$  の等分布荷重が作用するとして解析を行った。

同図にはコンクリート部分のみの応力を示しており、六角ボルト部分の応力はコンクリート部分の応力と大きな差が生じているため表示していない。圧縮力を作用させた上部ワッシャーの直下部分、および  $z$  方向変位を拘

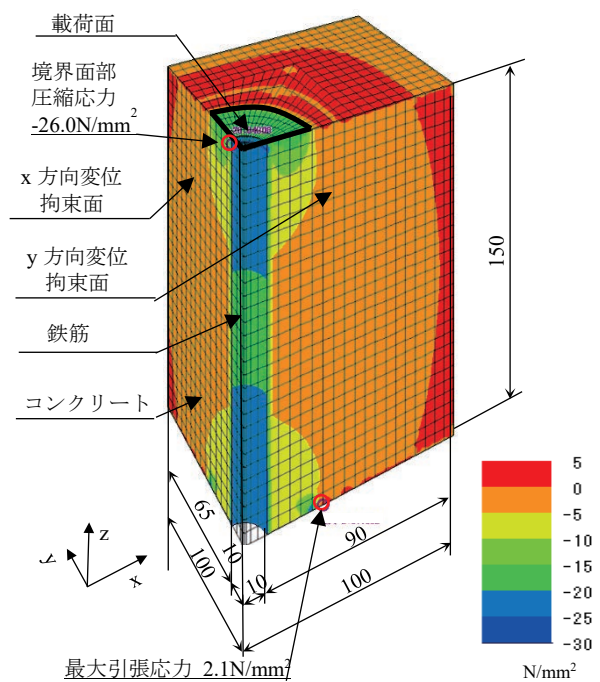


図-4 要素分割, 荷重条件, 境界条件

表-2 トルク, 軸直角圧縮力, 最大圧縮応力

| 試験体番号 | トルク $N\cdot m$ | 軸直角圧縮力 $kN$ | 最大圧縮応力 $N/mm^2$ |
|-------|----------------|-------------|-----------------|
| 3     | 50             | 8.8         | 5               |
| 4     | 100            | 17.6        | 10              |
| 5     | 150            | 26.4        | 15              |
| 6     | 200            | 35.2        | 20              |

束した下部ワッシャーの直上部分において、比較的大きい圧縮応力が作用しており、ボルトとコンクリートとの界面部には  $26N/mm^2$  を超える程度の、最大となる圧縮応力が作用した。一方、解析対象の大部分は圧縮応力が  $5N/mm^2$  未満の小さな圧縮応力が作用した。これに対し、引張応力は最大値でも  $2N/mm^2$  程度作用した。これは対称性を考慮し、図-4 で示すように変位拘束した境界条件設定に起因すると考えられる。実試験体は荷重時に拘束した方向にも変位が生じるため、作用する引張応力は解析結果よりも小さくなり対象領域への影響も小さいと判断した。また、圧縮応力の最大値と設計基準強度  $f_{ck}$  ( $=27N/mm^2$ ) は同程度であり、コンクリートの圧縮強度が  $38N/mm^2$  程度で圧壊に対する余裕はあるが、曲げ圧縮応力の増加に伴い圧縮主応力の増大が考えられる。以上を鑑み、試験体に設置したボルトに導入するトルクの最大値を  $200N\cdot m$  とし、以下、ボルトに作用させるトルクを  $50N\cdot m$  ごと段階的に減じた、 $150N\cdot m$ 、 $100N\cdot m$ 、 $50N\cdot m$  とした 4 試験体とするとともに、ボルトのみを挿入した試験体、および無垢の試験体の曲げ試験を行った。表-2 に試験体 3~6 で六角ボルトに作用させるトルク、トルクを作用させることで生じる軸直角圧縮力、および圧

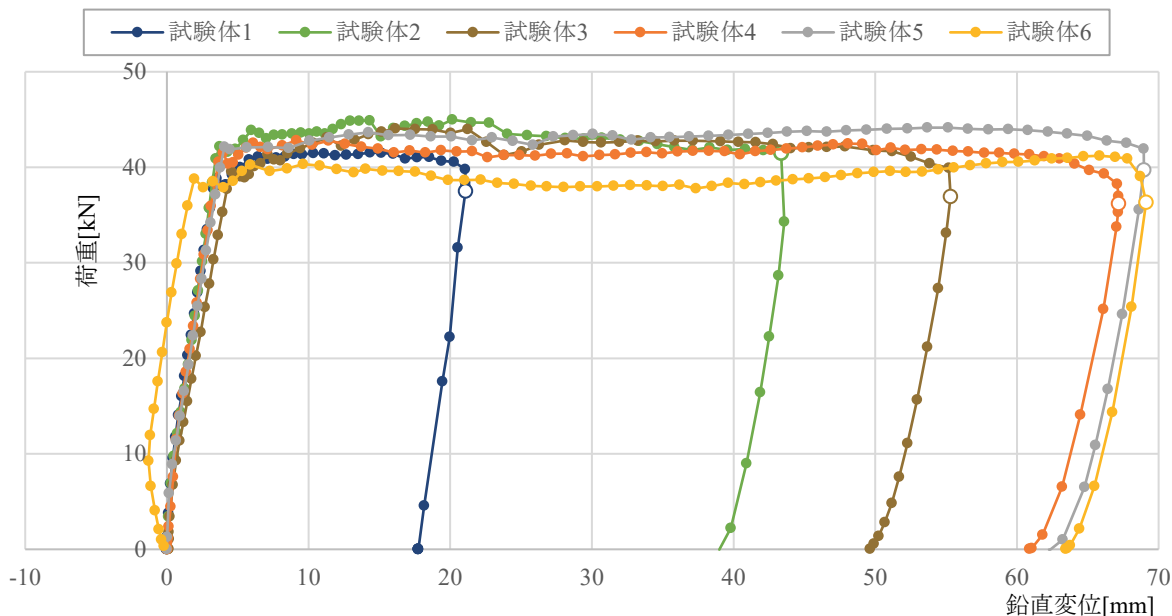


図-5 荷重－鉛直変位関係

縮応力(線形有限要素解析を実施したため 45.8kN の圧縮力を作用させた結果より比例計算で算出) の値を示す。

#### 4. 曲げ試験結果

図-5 に各試験体の曲げ試験による荷重－鉛直変位関係を示す。同図の鉛直変位は図-1 に示す試験体下面中央に設置した変位計で測定した値であり、荷重によって試験体下面中央部が鉛直方向に変位した量を直接測定した値である。曲げ試験において、荷重が最大荷重の 1 割程度低下した時点(同図の○で示される箇所)で除荷を行った。軸直角圧縮力の有無に依存せず、除荷を開始した時点の最大鉛直変位に対する、最大鉛直変位と除荷が完了した時点での鉛直変位の差は、全ての試験体で 10%程度であることから、軸直角圧縮力が復元に寄与することはないと考える。また、全ての試験体において先に算出した降伏荷重  $P_y$  と考えられる 40kN 程度までは、荷重の増加に伴い鉛直変位は単調に増加したが、軸直角圧縮力の作用による耐荷力の向上は見られない。

試験体 6 においては最大 2mm 程度の負の変位が発生したが、これは試験体 6 の作製時に上面と下面で若干のねじり変形生じていた影響によるものと考えられる。しかしながら、試験体 6 の最大変位は 70mm 程度であり、荷重直後に発生した負の変位は試験結果に甚大な影響を与えなかったと判断した。次に、引張主鉄筋降伏後の挙動について考察する。各試験体とも、除荷時点までひび割れ幅の進展に伴い、荷重が増減を繰り返しながら、鉛直変位が増加する様子が確認できる。引張主鉄筋降伏後から終局荷重作用後の挙動に関しては、試験体のひび割れ性状との関連が大きいため後述する、図-6~11 に示す荷重試験終了後における各試験体のひび割れ性状と併

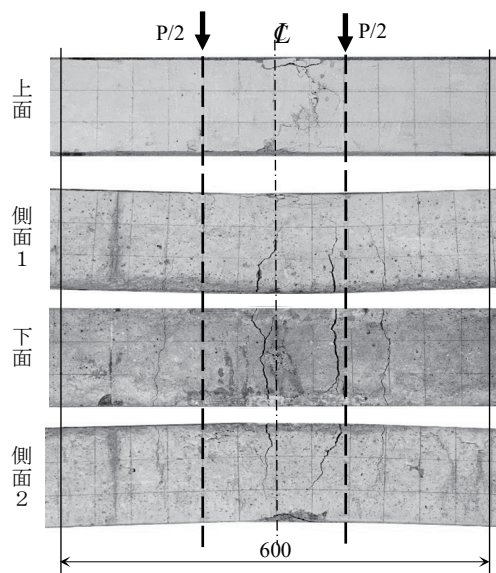


図-6 試験体 1 のひび割れ性状

せて考察していく。

図-6~11 に各試験体のひび割れ性状を示す。全ての試験体において支点付近には損傷が確認できなかったため、中央から左右 300mm の範囲を示すとともに、図-2(a)~(c)で示したように試験体上面、側面 1、下面、側面 2 の順に図示し、また図中に点線で荷重点も示した。ここで、試験体 1 (無垢な試験体) の最大鉛直変位が 21mm だったことから、この値を基準に他の試験体の最大鉛直変位の増加割合をもって、靱性の向上を考察する。

図-6 に試験体 1 のひび割れ性状を示す。同図の下面、側面において 2 本の大きなひび割れが確認でき、双方のひび割れ幅は 2.8mm と、概ね同等な値であった。また、左右対称の変形となっていることが側面図より確認でき、他の試験体に比し最大鉛直変位が小さいことに起因し、上面における圧縮コンクリートの損傷も軽微であった。

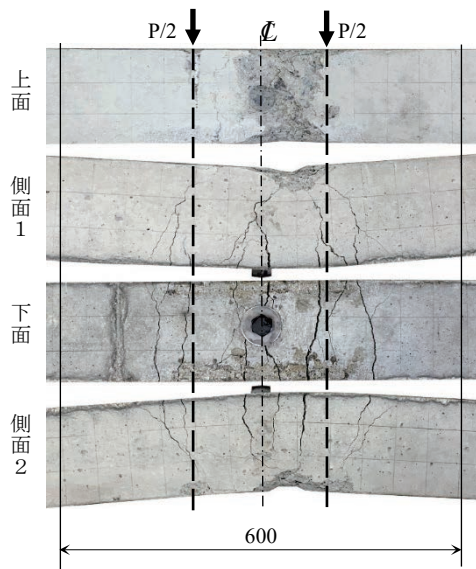


図-7 試験体 2 のひび割れ性状

図-7 に試験体 2 のひび割れ性状を示す。図-5 に示すように試験体 1 の最大鉛直変位は 21mm であり、試験体 2 では 43mm と約 105% 靱性が向上した。また、試験体 1 に比し最大鉛直変位が大きくなったことに起因し、図-7 に示すように下面、側面のひび割れ幅も大きくなっており、試験体右側で発生した最大ひび割れ幅は 3.5mm となった。加えて、ボルトを挟んだ左側のひび割れ幅は右側のものより小さく、変形も左右非対称となっていることが、側面の状況より確認できる。このことは、片側でひび割れが増大し変形が大きくなっても、挿入したボルトが反対側への変形を抑止する効果を有しているためであると考えられる。この効果によりボルトを挿入した試験体 2 は試験体 1 に比し靱性が向上したと考えられる。また、後述で考察する軸直角圧縮力を導入した試験体 3~6 に対しても同様な傾向が確認できる。

図-8 に試験体 3 のひび割れ性状を示す。図-5 に示すように、試験体 3 の最大鉛直変位は 55mm であり試験体 1 に比べ約 160%、試験体 2 に比べ 28% 靱性が向上している。このことから中央に設置したボルトに 8.8kN の軸直角圧縮力を作用させ周辺コンクリートに設計基準強度の 1/5 程度の軸直角圧縮応力を作用させることで靱性の向上効果が期待できる。また、図-8 に示すように、下面、側面の状況より確認できる最大ひび割れ幅は 7.5mm であり、試験体 2 に比し鉛直変位の増加に伴い、ひび割れ幅も増加した。また、同図より試験体 3 では左側で大きな損傷が確認できるが、損傷の程度は左側に比し右側の方が著しく軽微である。一方、試験体 2 に比し試験体 3 の最大鉛直変位が増大したにもかかわらず、試験体上面におけるコンクリートの圧縮破壊性状に顕著な相違は確認できない。このことはボルトの設置および軸直角圧縮力の導入により試験体上面のコンクリートが拘

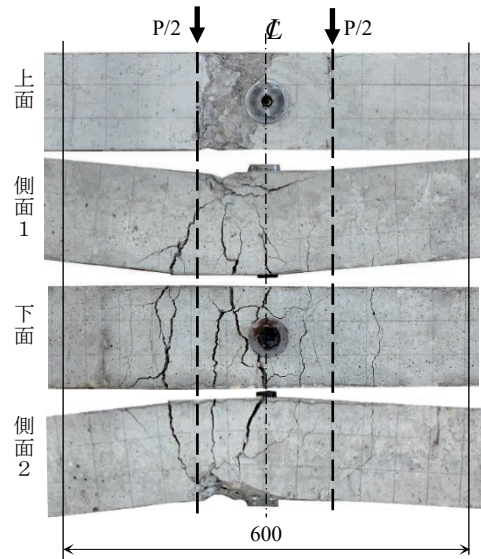


図-8 試験体 3 のひび割れ性状

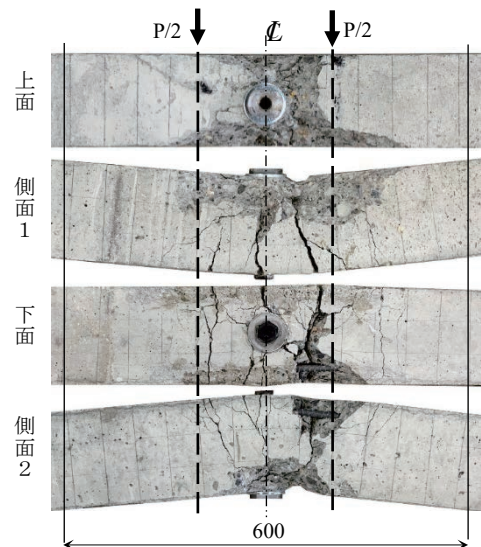


図-9 試験体 4 のひび割れ性状

束され、曲げ作用時の水平方向圧縮力に対して抵抗したものと考えられる。

図-9 に試験体 4 の、図-10 に試験体 5 の、図-11 に試験体 6 のひび割れ性状を示す。図-5 に示すように、いずれの試験体の最大鉛直変位も試験体 3 に比べ増大し、試験体 4 では 67mm、5 では 69mm、6 では 69mm と最大鉛直変位に顕著な相違はなく、試験体 1 に比べ約 220% 向上し、試験体 3 に比べ約 23% 向上した。このことから、試験体 4~6 において中央に設置したボルトに 17.6kN、26.4kN、35.2kN の軸直角圧縮力を作用させることで、周辺コンクリートに設計基準強度 2/5、3/5、4/5 程度の最大圧縮応力を作用させたが、設計基準強度の 2/5 程度までは靱性は増加するが、2/5 程度を超えると靱性が頭打ちになった。したがって、比較的小さな軸直角圧縮力をコンクリートに作用させることで、上述の効果が期待できると考えられる。また、最大鉛直変位の増大に伴い、試

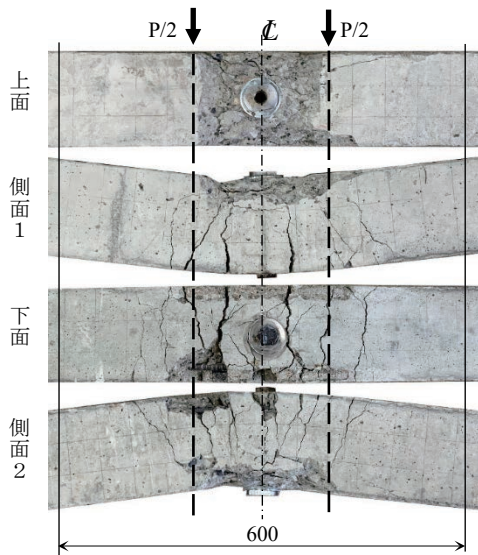


図-10 試験体5のひび割れ性状

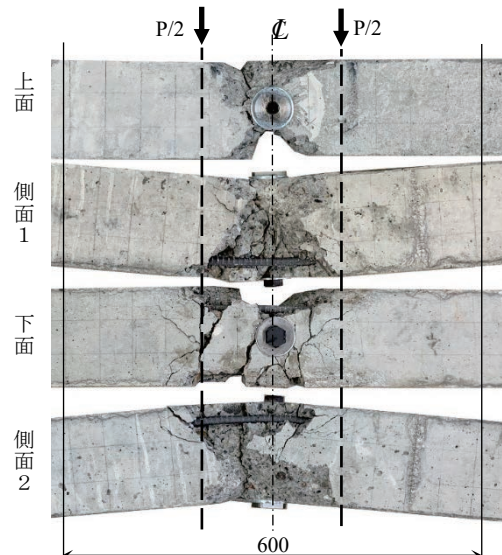


図-11 試験体6のひび割れ性状

験体下面、側面におけるひび割れ幅が大きくなるとともに、部分的にかぶりコンクリートの剥離が生じるなど、損傷が顕著となった。各試験体下面で一部、かぶりコンクリートの剥離が発生しているが、確認できるひび割れの最大幅は、試験体4で7.0mm、試験体5で7.0mm、試験体6で8.5mm程度であった。また、いずれの試験体においても、先述したように左右非対称の変形が確認できる。さらに、図-8~11の下面および側面におけるひび割れ性状において、圧縮力を作用させたボルト周囲のナットにまで到達する幅の大きなひび割れ生じたが、ボルトがむき出しになるような剥離は発生しなかった。このことから、ひび割れが発生し進展しても、軸直角圧縮力の断面拘束効果によりボルト周辺のコンクリートは剥離することがなかったと考えられる。

図-9、10において、試験体4、5の下面において確認できるかぶりコンクリートの剥離は、試験体4では右側に、試験体5では左側に位置しており、側面、上面の状況より確認できるように、剥離が発生した上方において圧縮コンクリートの断面欠損と曲げによる変形も顕著になる。これは、試験体3のひび割れ性状において考察した通り、軸直角圧縮力の作用によって下面においてはかぶりコンクリートが、上面においては圧縮コンクリートが拘束された影響によると考えられる。

図-11において、先述したように試験体6の作製時に上面と下面にねじり変形が生じてしまったことから、ねじりによるせん断力の発生に起因し、試験体中央部で顕著な部材軸より傾斜したひび割れと断面欠損が確認できる。しかしながら、試験体6においては顕著に断面欠損したことで、鉛直圧縮力を作用させた試験体中央部にお

けるコンクリートの残存が明確に確認でき、軸直角圧縮力による断面拘束効果が影響したと考えられる。

## 5. 結論

本研究では、RCはり内部にボルトを埋設し、ボルト締結時のトルクにより段階的に軸直角圧縮力を変化させ作用させ補強したが、得られた知見を以下に記す。

- 1) 軸直角圧縮力を作用させることで、耐荷力、復元力は変化しない。一方、圧縮側コンクリート圧壊後、軸直角圧縮力に起因する断面拘束効果により、靱性が著しく向上した。
- 2) RCはり内部にボルトのみ埋設した場合、設計基準強度の1/5倍程度の比較的小さな軸直角圧縮応力を作用させた場合においても靱性は向上するが、2/5倍以上の軸直角圧縮応力を作用させても、靱性は頭打ちとなる。

## 参考文献

- 1) 宮川豊明総編集：コンクリート補修・補強ハンドブック，朝倉書店，2011。
- 2) 鈴木健太郎，三上浩・岸徳光・澤田純之：AFRPシート曲げ補強 RC 梁のアンカーボルトを用いた剥離抑制法に関する実験的研究鋼板接着工法の RC 構造物への補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1477-1482，2006。
- 3) 富名腰泉，山川哲雄，李文聰，倉重正義：PC 鋼棒にプレストレスを導入した RC 柱の耐震補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1645-1650，2000
- 4) 土木学会 編：コンクリート標準示方書設計編，土木学会，2017。