

論文 部材軸鉛直方向圧縮力作用下の損傷を有するRCはりの曲げ変形性能評価

丸山 健太郎*1・遠藤 典男*2・大原 涼平*2

要旨：既往の研究から RC はりに部材軸直角方向圧縮力を作用することで RC はりの靱性の向上が期待できるという知見を得た。これはコンクリートに圧縮力を作用させることで断面が拘束され、脆性的な破壊が遅れることにより靱性が向上すると考えた。本研究では、軽微な損傷を有する RC はりに部材軸鉛直方向の圧縮力を作用させた際の曲げ挙動を実験的に評価する。実験の結果、損傷付近に部材軸鉛直方向に圧縮力を作用させることで変形性能が向上する。一方、損傷位置と部材軸鉛直方向圧縮力を作用させる距離が大きくなると変形性能の向上効果が減少し、距離が大きくなりすぎることによってその向上効果を得ることができなくなる。

キーワード：部材軸直角方向圧縮力、プレストレス、ひび割れ

1. はじめに

現在、社会基盤の長寿命化が社会的ニーズであり、コンクリート構造物に対しても種々な補強手法が提案されている。RC 構造物においては、ある程度の損傷を許容しており、管理水準を下回るような損傷に対して補修・補強を行うという考えが一般的である。例えば土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、構造物には施工中および設計耐用期間内において、その用途・機能を果たすための要求性能が設定されており、その1つとして、地震の影響等の偶発作用等によって低下した構造物の性能を回復させ、継続的な使用を可能にする復旧性が挙げられている。そのため損傷した RC 構造物に対して、比較的簡易な施工で性能を回復する手法が求められている。

コンクリートの性能として一般に強度が議論されている一方で、コンクリートの破壊挙動を考えるうえで単に強度が高いというだけでなく、破壊時の靱性についても研究がされ²⁾、鉄筋コンクリート構造物における耐震設計においても靱性の概念が導入されている³⁾。靱性とは、単に強度だけでは表現しえない性質を示すものであ

り、材料が破壊を生ずるときに必要なとされる単位体積当たりの仕事を示すものである。一般に、靱性に富む材料は適度に高い強度と延性を兼ね備えたものである。

ここで、先に著者らが提起した、部材軸鉛直方向にボルトを挿入しナットで締結し圧縮力を作用させるという手法を健全な RC はりに対して適用し曲げ試験を行った結果、圧縮力による断面拘束効果により靱性の向上が期待できるという知見を得た⁴⁾。このことから、提起した手法を、軽微な損傷を有する RC はりに対して適用することで、靱性の向上が期待できると考えた。そこで本研究では、軽微な損傷を有する RC はりに対し、部材軸鉛直方向に圧縮力を作用させた後に曲げ試験を行い、その際の鉛直変位を計測し、鉛直変位、すなわち変形性能をもって靱性を評価することとする。

2. 実験概要

2.1 RC はり

図-1 に本研究で使用する RC はりの側面図を示す。RC はりの形状寸法は全長 1350mm、スパン l は 1200mm

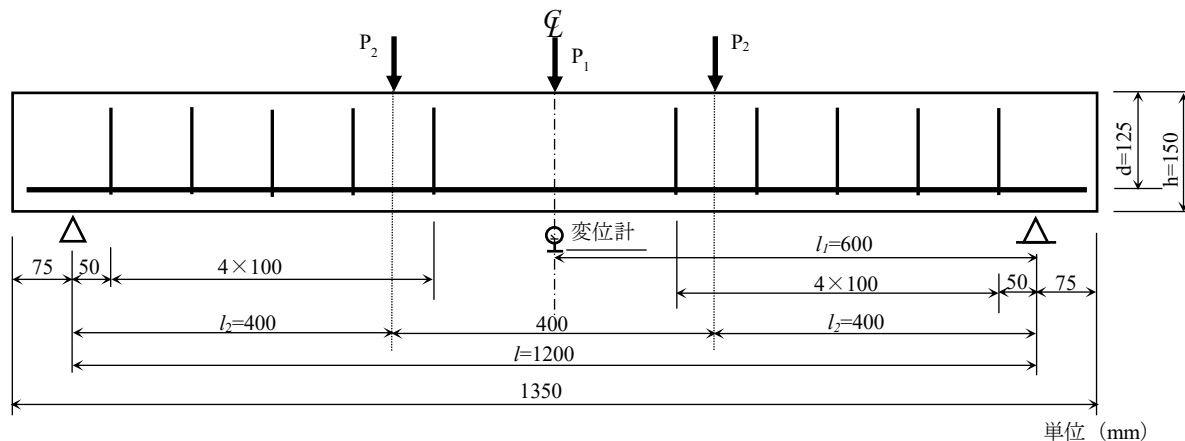


図-1 RC はり側面図

*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 工学科 都市デザイン系 (正会員)

であり、引張主鉄筋として直径 13mm の異形棒鋼（材質 SD295，降伏応力 $f_{sy}=295\text{N/mm}^2$ ）を 2 本配置した（ $A_s=253\text{mm}^2$ ）。

図-2 に RC はりの断面図を示す。RC はりの断面の高さ $h=150\text{mm}$ ，幅 $b=150\text{mm}$ ，有効高さ $d=125\text{mm}$ ，また，直径 6mm の丸棒鋼（材質 SR235，降伏応力 $f_{sy}=235\text{N/mm}^2$ ）を併合形に加工し，スターラップとして 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，これは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。

打設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^2 ，スランプ 8cm，空気量 5.0% と仮定した。練りあがりコンクリートのスランプと空気量の実測値は，各々 9.0cm，4.7%，材齢 28 日におけるテストピース 3 本の平均圧縮強度 f'_c は 33.8N/mm^2 であった。

RC はりの作製に使用した棒鋼，および後述する圧縮力を作用させるために使用したボルト，ナット，ワッシャーは参考文献 4) と同様のものを使用した。

2.2 事前実験

本研究は軽微な損傷を有する RC はりに対して部材軸鉛直方向圧縮力を作用させるため，損傷を有する試験体を作製する。ここで損傷を有する RC はりを作製するにあたり，後述する曲げ試験と同様の 2 点集中荷重を行うと，下面に発生するひび割れの位置がばらつくと考えられる。したがって下面中央付近にひび割れを発生させるため，図-1 で示す通り，RC はりのスパン中央に集中荷重 P_1 を載荷した。

上記の方法で損傷を有する RC はりを作製するにあたり，事前実験として健全な RC はりに対しスパン中央に P_1 を載荷した際の荷重と中央下面の鉛直変位の計測を行った。図-3 に事前実験を実施した RC はり 1 の， $\bar{M}$ とスパン中央の鉛直変位 δ_1 の関係を示す。ここで $\bar{M}$ は鉄筋降伏時における曲げモーメント M_0 と作用曲げモーメント M との比である。 $\bar{M}$ および M_0 は以下のように算出した。

$$\bar{M} = M/M_0 \quad (1)$$

$$M_0 = f_{sy} \cdot A_s \cdot (d - \frac{x}{3}) = 8.25 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (2)$$

ここで， x は中立軸までの距離（ $x=43.4\text{mm}$ ）である。

また事前実験を行った RC はり 1 において，載荷重が最大荷重の 10% 程度低下した時点で計測を終了し，除荷を行った。

同図において，RC はり 1 は鉛直変位が 3mm を超えた以降で載荷重がほぼ一定となり試験体下面にひび割れが発生し始めた。載荷を継続すると，鉛直変位の増加に伴い，ひび割れ幅も大きくなった。鉛直変位が 20mm 程度に達したところで載荷重が最大荷重の 10% 程度減少し

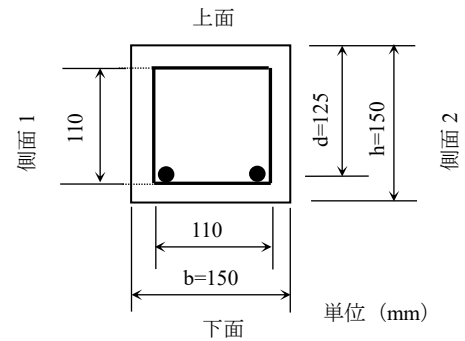


図-2 RC はり断面図

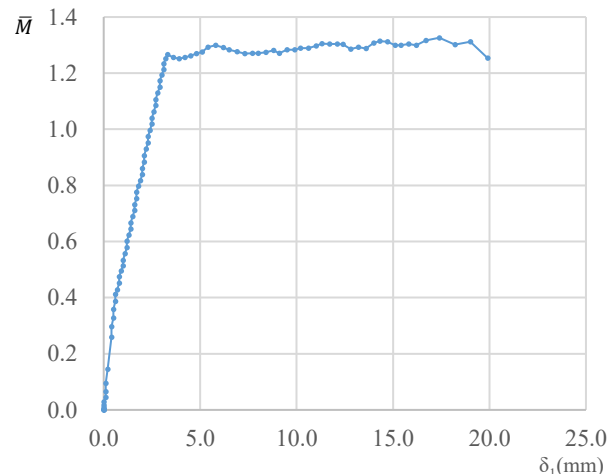


図-3 事前実験の $\bar{M}$ - 鉛直変位 (δ_1) 関係

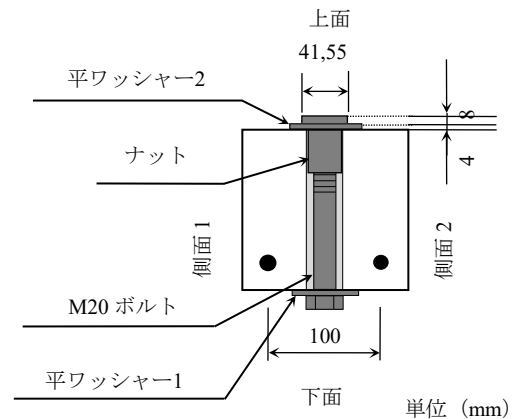


図-4 圧縮力導入方法の概要

たため，載荷を止めて除荷をした。

以上の結果を踏まえ，本研究では軽微な損傷を対象としているため，損傷の導入は RC はり 1 の最大鉛直変位（約 20mm）の 5 分の 1 にあたる約 4mm の鉛直変位が発生したところで除荷を行うこととした。また，各試験体のひび割れ幅については個体差があるため，測定は行わず，ひび割れの発生位置については後述する。

2.3 部材軸鉛直方向圧縮力の作用方法

図-4 に損傷を与えた RC はりに対して実施する，部材軸鉛直方向への圧縮力導入方法の概要を示す。前述した方法で RC はりに軽微な損傷を与えた後，圧縮力導入

位置に刃径 40mm のコアドリルで孔を開削する（孔径 42mm 程度）。開削した孔に M20 ボルト（材質 SCM435）に平ワッシャー1（外径 60mm，内径 21mm，厚さ 3mm）を通した後，ボルトを試験体の孔下面より挿通し，空隙を水セメント比 30%のセメントペースト（材齢 28 日の平均圧縮強度 77.8N/mm²）で充填する。この後，セメントペーストを充填した直後に，後述する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 100N・m のトルクで締結した。この際，既往の研究⁴⁾結果から，ボルトには約 18kN の引張力が作用する。

ナットは参考文献 4) で使用したものと同様の，六角ボルトと締結するにあたり，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使用した。

2.4 試験体概要

曲げ試験を実施するにあたり，前述した方法で RC はりに軽微な損傷を与えた試験体 1～4 を用意した。図-5 に軽微な損傷を与えた際の試験体 1 の下面を示す。同図より，ひび割れはスパン中央から 75mm 程度離れた位置に発生した。試験体 2～4 も同程度のひび割れが発生し，スパン中央からひび割れまでの距離は 25～75mm 程度であり，これらのひび割れを軽微な損傷とする。

RC はりに損傷を与えた後，前述した方法で部材軸鉛直方向に圧縮力を導入した試験体に曲げ試験を行った。ここで試験体は，圧縮力導入位置が違う 3 種類の試験体と，比較のために圧縮力の導入を行わない RC はりを用意した。以下に各試験体の概要を記す。

- ・試験体 1：図-6 に示すように，損傷を有する RC はりに対し圧縮力の導入を行わず 2 点集中荷重曲げ試験を行った。下面のひび割れとスパン中央との距離は約 75mm であった。

- ・試験体 2：図-7 に示すように，損傷を有する RC はりのスパン中央で圧縮力を導入した。下面のひび割れと圧縮力導入位置との距離は約 30mm であった。

- ・試験体 3：図-8 に示すように，損傷を有する RC はりに対して，スパン中央からひび割れが生じた側へ有効高さ d ($=125\text{mm}$) の位置に圧縮力を導入した。下面のひび割れと圧縮力導入位置との距離は約 75mm であった。

- ・試験体 4：図-9 で示すように，損傷を有する RC はりに対して，スパン中央をはさんでひび割れが生じた反対側へ有効高さ d ($=125\text{mm}$) の位置に圧縮力を導入した。下面のひび割れと圧縮力導入位置との距離は約 150mm であった。

ここで，参考文献 4) で示した FEM の解析結果から，作用させた圧縮力の影響はボルト直径の 3 倍程度となることが得られている。本研究では直径 20mm のボルトを使用しているため，60mm 程度までは圧縮力の影響があ

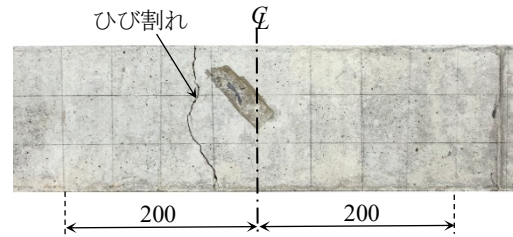


図-5 軽微な損傷を与えた際の試験体 1 の下面

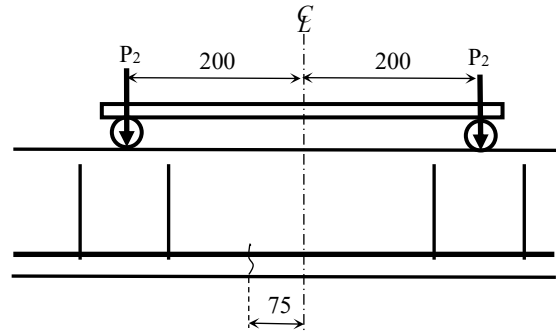


図-6 載荷板と試験体 1 のひび割れの位置

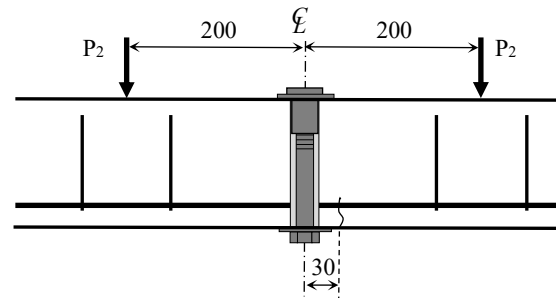


図-7 試験体 2 の圧縮力導入位置・ひび割れの位置

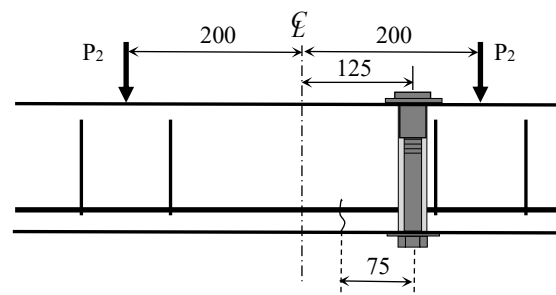


図-8 試験体 3 の圧縮力導入位置・ひび割れの位置

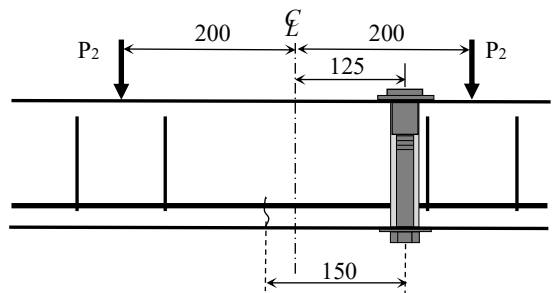


図-9 試験体 4 の圧縮力導入位置・ひび割れの位置

ると考えられる。試験体 3 および 4 では，ひび割れから離れた位置に圧縮力を作用させたいため，ボルト設置位

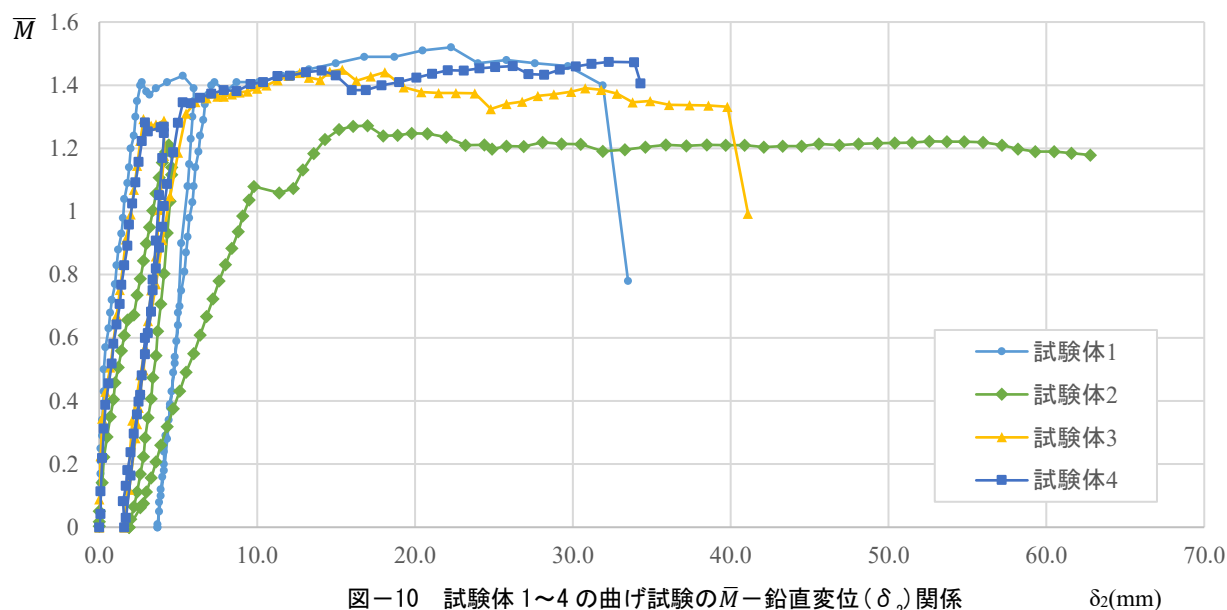


図-10 試験体1～4の曲げ試験の $\bar{M}$ －鉛直変位(δ_2)関係

置の距離はスパン中央からRC試験体の有効高さ125mm離れた位置とした。

曲げ試験は、試験体1～4に対し図-1における P_2 をスパン中央より両側200mmの位置に2点集中荷重を行い、その際の荷重と中央下面の鉛直変位を測定した。2点集中荷重は図-6に示すように、載荷板を用いて行った。載荷板は、幅300mm、長さ420mm、厚さ16.5mmの鋼板(材質SM490)に、長さ300mm、直径32mmの丸鋼棒(材質SR235)を溶接で固定して作製した。試験体2～4も同様の載荷板を用いて2点集中荷重を行ったので、図-7～9への載荷板の記載は省略した。また、図-8および図-9で示すように試験体3・4の圧縮力導入位置と載荷板による載荷位置との距離は75mm離れているため、載荷板位置による影響はないと考える。

曲げ試験を行う際、載荷重が最大荷重の10%程度低下した時点で計測を終了し、除荷を行った。また、載荷重が最大荷重の10%程度低下する直前に測定した鉛直変位を最大鉛直変位とした。

3. 曲げ試験結果

図-10に曲げ試験実施における試験体1～4の $\bar{M}$ －鉛直変位(δ_2)関係を示す。 $\bar{M}$ は前述した事前実験と同様の方法で算出した。鉛直変位(δ_2)はRCはりに損傷を与えたのち除荷した際の残量変位に、曲げ試験によって生じた鉛直変位を加えた値とした。

まず2点集中荷重曲げ試験開始時から引張主鉄筋降伏前までの挙動について考察する。同図より、各試験体とも、2点集中荷重曲げ試験を行うと、載荷重と鉛直変位(δ_2)はおおよそ一定の割合で増加し、載荷重は損傷を与えた際の最大値程度まで増加した。最大となる $\bar{M}$ は1.28～1.52と有意な差はなかった。このことから、部材軸鉛



図-11 試験体2の曲げ試験終了後の載荷位置における局所的な損傷

直方向圧縮力を作用させることで耐荷力は向上しないと考えられる。

試験体2においては、荷重増分に対する鉛直変位の増分が、他の試験体に比べ大きくなった。これは試験体2の上面と下面とが平行に作製できておらず、その影響で、試験体載荷位置へ均等に載荷することができなかったためと考えられる。すなわち、2点集中荷重試験時において、載荷点と接している試験体載荷位置に大きな荷重が作用し、載荷点と接していない載荷位置では荷重が作用しないことで、試験体の剛性が低下したためであると考えられる。また鉛直変位10mm程度で載荷低下とともに鉛直変位が2mm程度増加している。これは、上述した載荷点と接している試験体載荷位置に大きな荷重が作用した影響で、図-11示す、局所的な損傷が生じたためであると考えられる。

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-12～15に示す载荷試験終了後における
各試験体のひび割れ性状と併せて考察していく。

図-12～15に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
载荷点も示した。

3.1 試験体1の引張主鉄筋降伏後の挙動

図-10に示すように、試験体1の引張主鉄筋降伏後の
挙動は、载荷重がおおよそ一定の値で推移したまま鉛直
変位が増加し、鉛直変位が32mm程度で载荷重が大きく
低下したことから、この値を基準にほかの試験体の最大
鉛直変位の増加割合をもって、変形性能を評価する。

図-12に試験体1のひび割れ性状を示す。同図の下面
および側面において、2点集中载荷位置内におおよそ等
間隔に4本のひび割れが確認できる。これは、試験体1
には圧縮力の導入を行わず2点集中载荷曲げ試験を行っ
た結果、一定の曲げモーメントが作用する2点集中载荷
位置内全体にひび割れが発生したためと考えられる。

3.2 試験体2の引張主鉄筋降伏後の挙動

図-10に示すように、試験体2の引張主鉄筋降伏後
の挙動は、载荷重はおおよそ一定の値で推移し鉛直変位
のみ増加し続け、鉛直変位が63mm程度で载荷重が大
きく低下した。この結果から、試験体2の変形性能は試
験体1に比べ約97%向上し、後述する試験体3および
試験体4よりも変形性能の向上効果が大きかった。これ
は、軽微な損傷によるひび割れ位置と圧縮力導入位置と
の距離が30mmと近いためであると考えられる。この
結果から、RCはりには生じた損傷付近に部材軸鉛直方向
に圧縮力を作用させることで変形性能が向上すると考え
られる。

図-13に試験体2のひび割れ性状を示す。同図より、
他の試験体に比べコンクリートの損傷が激しくなった。
これは試験体2の最大鉛直変位が他の試験体比べ大きい
ことに起因していると考えられる。また試験体1は载荷
範囲内におおよそ均等にひび割れが発生したのに対し、
試験体2は側面1の中央付近が他の面に比べ著しく損傷
しており、主鉄筋も破断している。これは前述したと
おり、これは試験体2の上面と下面とが平行に作製でき
ておらず、その影響で2点集中载荷をする際に均等に載
荷することができなかったためであると考えられる。また
部材軸鉛直方向圧縮力によりはり中央の断面が拘束され
たことで、曲げ载荷に伴うはり中央の圧縮縁側における
圧縮破壊の進行が抑制されたと考えられる。

3.3 試験体3の引張主鉄筋降伏後の挙動

図-10に示すように、試験体3の引張主鉄筋降伏後

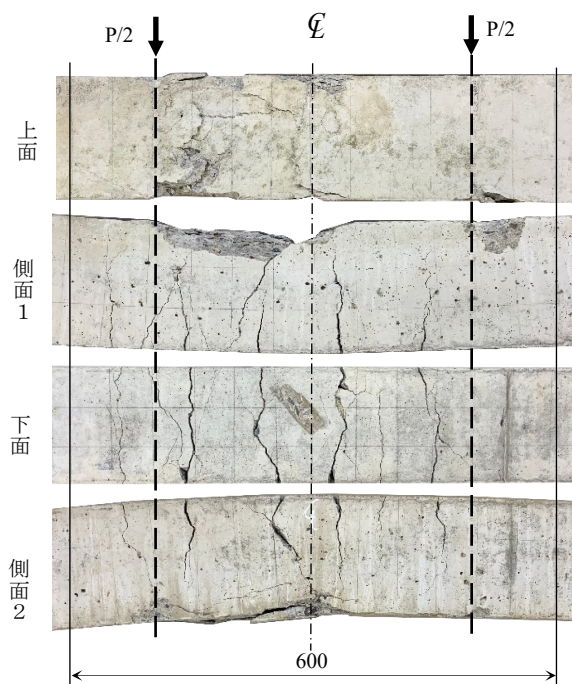


図-12 試験体1のひび割れ性状

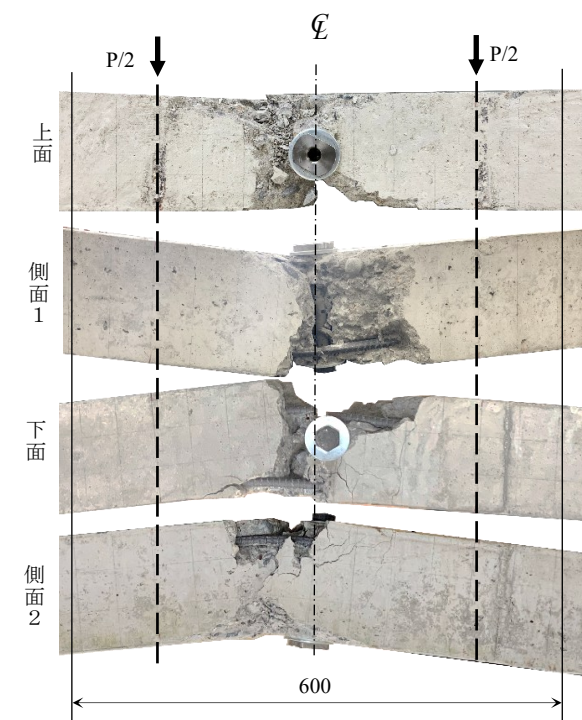


図-13 試験体2のひび割れ性状

の挙動は、载荷重がおおよそ一定の値で推移したまま鉛
直変位が増加し、鉛直変位が40mm程度で载荷重が大
きく低下した。この結果から、試験体3の変形性能は試
験体1に比べ約25%向上したこととなり、試験体2よ
りも変形性能向上効果が小さくなった。これは、試験体
2に比べ試験体3の軽微な損傷によるひび割れ位置と圧
縮力導入位置との距離が離れているためであると考えら
れる。このことから、圧縮力導入位置と損傷との距離が

離れると、変形性能の向上効果が小さくなると推察される。

図-14 に試験体 3 のひび割れ性状を示す。同図より、荷重範囲内に均等にひび割れが生じた試験体 1 に比べ、試験体 3 のひび割れはスパン中央部に多く発生した。これはひび割れに比較的近い位置に圧縮力を導入したことで、ひび割れの進展が抑制されたためであると考えられる。

3.4 試験体 4 の引張主鉄筋降伏後の挙動

図-10 に示すように、試験体 4 の引張主鉄筋降伏後の挙動は、荷重重はおおよそ一定の値で推移したまま鉛直変位が増加し、鉛直変位が 34mm 程度で荷重重が大きく低下した。この結果から、試験体 4 の変形性能は試験体 1 と比べほぼ同程度となった。これは、試験体 4 の軽微な損傷によるひび割れ位置と圧縮力導入位置との距離が 150mm とほかの試験体に比べ一番離れているためであると考えられる。このことから、圧縮力導入位置と軽微な損傷との距離が大きくなると、変形性能の向上効果が期待できなくなると考えられる。

図-15 に試験体 4 のひび割れ性状を示す。下面に生じたひび割れは試験体 1 のように広い範囲で発生した。これは前述とした通り、試験体 3 の場合に比べて試験体 4 の圧縮力導入位置と軽微な損傷との距離が離れていたため、試験体 3 のようなひび割れの進展を抑制する効果が得られなかったためと考えられる。

4. 結 論

本研究では、軽微な損傷を有する RC はりに対して、部材軸鉛直方向に圧縮力を作用させたのちに曲げ試験を行ったが、得られた知見を以下に記す。

- 1) 損傷を有する RC はりに対し、部材軸鉛直方向圧縮力を作用させることで、耐荷力は向上しない。一方、RC はりに生じた損傷付近に部材軸鉛直方向に圧縮力を作用させることで変形性能が向上する。
- 2) 損傷が生じた位置と部材軸鉛直方向圧縮力を作用させる位置が離れると変形性能の向上効果が減少し、離れすぎることによって変形性能の向上効果を得ることができなくなる。

参考文献

- 1) 土木学会：2022 年制定コンクリート標準示方書設計編，2022。
- 2) 小柳 洽，六郷 恵哲：コンクリートの破壊と靱性評価，コンクリート工学，Vol.20，No.4，p.8-14，1982
柴田 拓二：鉄筋コンクリート造建物における耐震

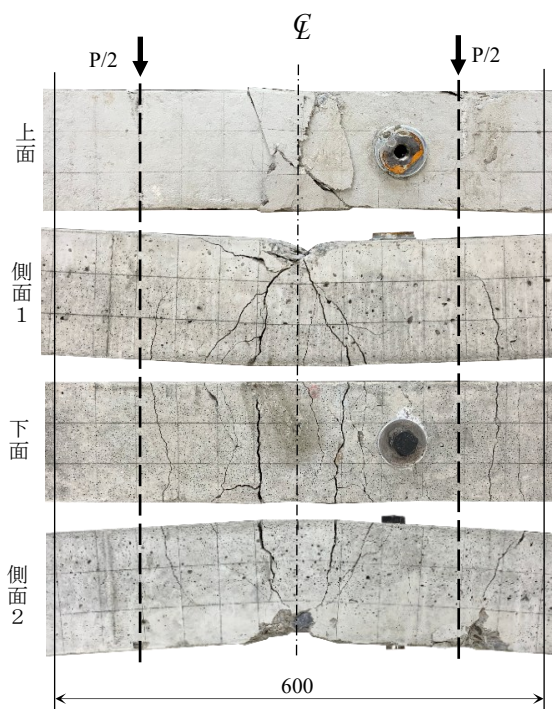


図-14 試験体 3 のひび割れ性状

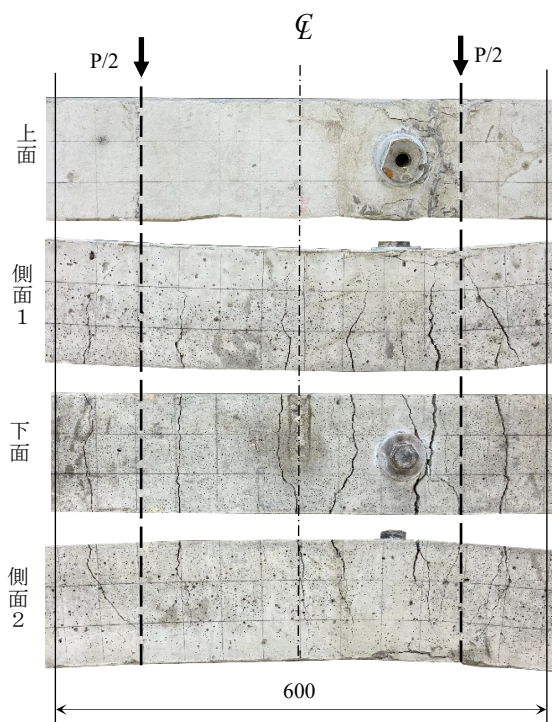


図-15 試験体 4 のひび割れ性状

設計の動向，コンクリート工学，Vol.27，No.2，p.9-19，1989

- 3) 丸山健太郎，遠藤典男，大原涼平：部材軸直角方向圧縮力作用下の RC はりの曲げ挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2(2022)，pp.259-264，2022