

# 論文 開孔径を実験因子とした梁端開孔を有するヒンジリロケーション梁の実験的研究

赤井 冬来\*1・安田 稜太\*2・田村 彰教\*3・丸田 誠\*4

**要旨：**筆者らは、RC 造柱梁接合部のプレキャスト化による施工の合理化を目的として、ヒンジリロケーションを応用する研究を行ってきた。本研究では、梁端部に高強度鉄筋を用いてヒンジ位置を継手先端位置とし、さらに梁端部に開孔を設けた片持ち梁型の構造実験を実施した。実験の結果、開孔径  $D/4.5$  ( $D$ : 梁せい) では開孔部を孔際せん断補強筋のみの補強で、開孔径  $D/4$  では孔際せん断補強筋および開孔補強筋の補強で継手先端での曲げ破壊となること、開孔径  $D/3$  では、開孔部せん断破壊の様相が大きく、大変形時での靱性保持には、入力せん断力の制限や更なる開孔部の補強が必要であることを確認した。

**キーワード：**鉄筋コンクリート造、プレキャスト、ヒンジリロケーション、高強度鉄筋、機械式継手、開口

## 1. はじめに

筆者らは、柱梁接合部のプレキャスト（以下、PCa）化による施工の合理化を目的として、ヒンジリロケーション（以下、HR）を応用する研究を行ってきた。PCa 部材の接続に用いられる A 級機械式継手は、ヒンジ領域を避けた位置（柱面から梁せい  $D$  以上離れた位置）に設ける必要がある。この場合、中柱接合部の PCa 部材長さ（接合部せい+鉄筋突出長）は運搬車両で積込できる長さを超え、PCa 化できないことが多い。本研究の HR は、梁端部から接合部内の主筋に対し、梁一般部の主筋よりも高強度な鉄筋を用いることで、ヒンジ位置を継手先端位置に移動させるものである。図-1 のように HR を応用して機械式継手を梁端部に設置することで、運搬車両に積込できる長さとなり、PCa 接合部として計画できる。

既報<sup>2)</sup>では、梁端部に  $D/4$  開孔を有する HR 梁の基本的な構造性能および開孔補強効果の確認を目的として片持ち梁型の構造実験を実施し、梁端部せん断余裕度を 1.0 以上確保すれば、継手先端曲げ破壊となり、大変形時まで安定した復元力特性を有すること、継手先端上下に配筋したせん断補強筋により継手先端近傍の損傷を抑制できること、開孔補強筋のせん断抵抗の寄与分はコ型補強筋および孔際せん断補強筋（以下、孔際補強筋）で大部分負担できることを確認した。

そこで、本研究では、開孔径  $D/4.5$  では開孔部を孔際補強筋、開孔径  $D/4$  では孔際補強筋および開孔補強筋、開孔径  $D/3$  では、孔際補強筋、開孔補強筋およびコ型補強筋の補強により継手先端曲げ破壊となり、 $R=+50 \times 10^{-3} \text{rad}$  まで最大耐力の 80% 以上を保持し、安定した復元力特性を有することの確認を目的に、構造実験を実施した。

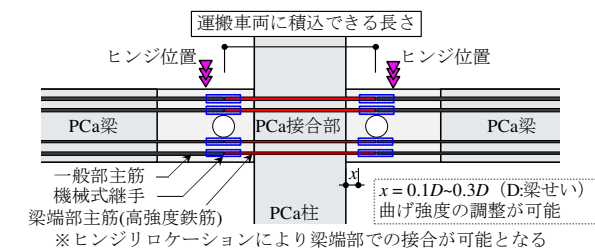


図-1 ヒンジリロケーションを PCa 構法に応用

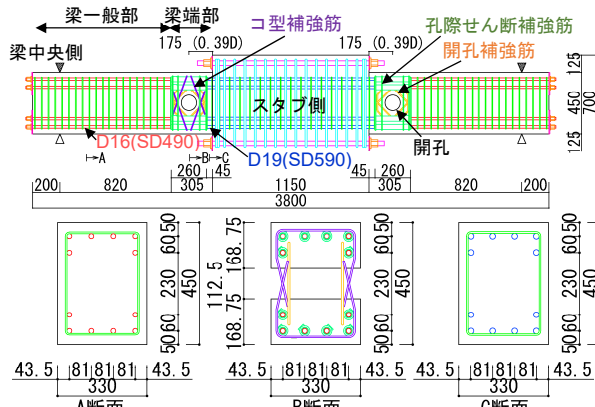


図-2 試験体の形状および配筋（左:PB-10, 右:PB-11）

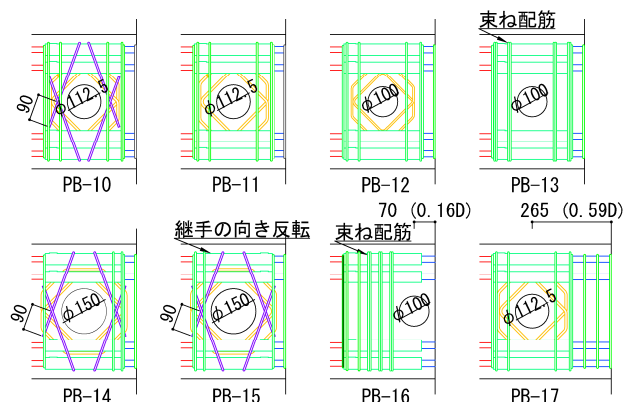


図-3 開孔部の形状および配筋

\*1 西松建設（株） 技術研究所 建築技術グループ 修士（工学）（正会員）

\*2 静岡理科大学 理工学研究科システム工学専攻（学生会員）

\*3 東京鉄鋼（株） ネジ・加工品事業部 営業部

\*4 静岡理科大学 理工学部建築学科 教授 博士（工学）（フェロー会員）

表－1 試験体諸元

| 試験体名                                         | PB-2                                 | PB-6                                 | PB-10            | PB-11         | PB-12                     | PB-13                             | PB-14            | PB-15         | PB-16                   | PB-17                   |
|----------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------|---------------|---------------------------|-----------------------------------|------------------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 試験体タイプ                                       | 既往試験体 <sup>2)</sup><br>Fc36<br>コ型筋あり | 既往試験体 <sup>2)</sup><br>Fc36<br>コ型筋なし | Fc24<br>コ型筋あり    | Fc24<br>コ型筋なし | D/4.5開孔<br>コ型筋なし<br>開孔筋径小 | D/4.5開孔<br>コ型筋なし<br>開孔筋なし<br>孔際筋増 | D/3開孔            | D/3開孔<br>継手反転 | スタブ面から<br>開孔中心<br>までの距離 | スタブ面から<br>継手末端<br>までの距離 |
| スタブ面から<br>継手末端の距離 $x$ [mm]                   | 45 (0.1D)                            |                                      |                  |               |                           |                                   |                  |               |                         | 135 (0.3D)              |
| 継手先端(ヒンジ位置)までの<br>せん断スパン比※1 $M/QD'$          | 1.8                                  |                                      |                  |               |                           |                                   |                  |               |                         | 1.6                     |
| 設計基準強度 $F_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]            | 36                                   |                                      | 24               |               | 33                        |                                   |                  |               |                         |                         |
| 梁端部主筋                                        | 4+2-D19 (SD590)                      |                                      |                  |               | 4+2-D19 (SD590)           |                                   |                  |               |                         |                         |
| 引張鉄筋比 $\rho_t$ [%]                           | 1.53                                 |                                      |                  |               | 1.37                      |                                   |                  |               |                         |                         |
| 梁一般部主筋                                       | 4+2-D16 (SD490)                      |                                      |                  |               | 4+2-D16 (SD490)           |                                   |                  |               |                         |                         |
| 引張鉄筋比 $\rho_t$ [%]                           | 1.06                                 |                                      |                  |               | 0.95                      |                                   |                  |               |                         |                         |
| せん断補強筋                                       | 2-S6#50 (KSS785)                     |                                      |                  |               | 2-S6#50 (KSS785)          |                                   |                  |               |                         |                         |
| せん断補強筋比 $\rho_w$ [%]                         | 0.43                                 |                                      |                  |               | 0.39                      |                                   |                  |               |                         |                         |
| 開孔径 $H$ [mm]                                 | 112.5 (0.25D)                        |                                      |                  |               | 100 (0.22D)               |                                   | 150 (0.33D)      |               | 100 (0.22D)             | 112.5 (0.25D)           |
| スタブ面から<br>開孔中心までの距離 $L'$ [mm]                |                                      |                                      |                  |               | 175 (0.39D)               |                                   |                  |               | 70 (0.16D)              | 265 (0.59D)             |
| 孔際補強筋※2                                      | 6-S6 (KSS785)                        |                                      | 6-S6 (KSS785)    |               | 10-S6 (KSS785)            |                                   | 2-S6 (KSS785)    | 6-S6 (KSS785) | 12-S6 (KSS785)          | 6-S6 (KSS785)           |
| 孔際補強筋比 $\rho_d$ [%]                          | 0.38                                 |                                      | 0.33             |               | 0.55                      |                                   | 0.11             | 0.33          | 0.66                    | 0.33                    |
| 開孔補強筋※2                                      | 4-S8 (KSS785)                        |                                      | 4-S8 (KSS785)    |               | 4-S6 (KSS785)             |                                   | 4-S8 (KSS785)    |               | -                       | 4-S8 (KSS785)           |
| 開孔補強筋比 $\rho_d$ [%]                          | 0.55                                 |                                      | 0.49             |               | 0.31                      |                                   | 0.49             |               | -                       | 0.49                    |
| コ型補強筋※2                                      | 2-D6 (SD295)                         |                                      | 2-D6 (SD295)     |               | -                         |                                   | 2-D6 (SD295)     |               | -                       |                         |
| コ型補強筋比 $\rho_h$ [%]                          | 0.16                                 |                                      | 0.14             |               | -                         |                                   | 0.14             |               | -                       |                         |
| 梁端曲げ余裕度※3                                    | 1.24                                 |                                      |                  |               | 1.26                      |                                   |                  |               | 1.12                    |                         |
| 入力せん断応力度レベル※4<br>(スタブ面) $\tau_{mu}/\sigma_B$ | 0.057 $\sigma_B$                     | 0.053 $\sigma_B$                     | 0.078 $\sigma_B$ |               | 0.058 $\sigma_B$          |                                   |                  |               | 0.056 $\sigma_B$        | 0.062 $\sigma_B$        |
| 入力せん断応力度レベル※4<br>(開孔部) $\tau_{mu}/\sigma_B$  | 0.151 $\sigma_B$                     | 0.142 $\sigma_B$                     | 0.207 $\sigma_B$ |               | 0.149 $\sigma_B$          |                                   | 0.147 $\sigma_B$ |               | 0.143 $\sigma_B$        | 0.167 $\sigma_B$        |
| 想定破壊モード                                      | 継手先端曲げ                               |                                      |                  |               |                           |                                   |                  |               |                         |                         |

※1 図-4に示す加力点から図-1に示す継手先端（ヒンジ位置）までのせん断スパン比

※2 -の前の数字は、孔周囲の補強筋の有効範囲内<sup>3)</sup>で、円形孔中心より45°方向に引いた直線が交差する各補強筋の本数を示す

※3 継手先端降伏時のスタブ面モーメントに対する梁端部降伏時モーメントの比

※4  $\tau_{mu}$ は継手先端降伏時せん断力を梁断面の幅およびせいで除した値、 $\tau_{mu0}$ は継手先端降伏時せん断力を梁断面の幅および開孔部のへりあきで除した値

表－2 鉄筋の材料特性

| 鋼種          | 降伏応力度<br>$\sigma_y$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | ヤング係数<br>$E_y$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 降伏ひずみ<br>$\sigma_y/E_y$<br>[μ] | 引張強さ<br>$\sigma_u$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 使用箇所                    |
|-------------|---------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------|
| D19 (SD590) | 642.6                                       | 191600                                 | 3354                           | 825                                        | 梁端部主筋                   |
| D16 (SD490) | 537.2                                       | 190400                                 | 2821                           | 717.7                                      | 梁一般部主筋                  |
| D6 (SD295)  | 326.5 <sup>※</sup>                          | 165400                                 | 1974                           | 498.7                                      | コ型補強筋                   |
| S6 (KSS785) | 884.6 <sup>※</sup>                          | 168800                                 | 5241                           | 1089.7                                     | せん断補強筋                  |
| S6 (KSS785) | 856.8 <sup>※</sup>                          | 160100                                 | 5352                           | 1089.7                                     | 開孔補強筋<br>(Φ100)         |
| S8 (KSS785) | 967.4 <sup>※</sup>                          | 187900                                 | 5148                           | 1176.5                                     | 開孔補強筋<br>(Φ112.5, Φ150) |

※ 0.2%オフセット法により求めた

表－3 コンクリートの材料特性

| 試験体 <sup>※</sup> | 圧縮強度 $\sigma_B$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 圧縮強度時 $\varepsilon_B$<br>[μ] | ヤング係数 $E_c$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] | 引張強さ $\sigma_t$<br>[N/mm <sup>2</sup> ] |
|------------------|-----------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------------|
| PB-10, PB-11     | 23.2                                    | 1816                         | 27800                               | 1.81                                    |
| PB-12, PB-13     | 31.0                                    | 1880                         | 30700                               | 2.24                                    |
| PB-14, PB-15     | 31.0                                    | 1880                         | 30700                               | 2.24                                    |
| PB-16, PB-17     | 31.2                                    | 1809                         | 32400                               | 2.33                                    |

※ 2つの試験体が一体となっており、その組合せを示している



図－4 加力状況（左：PB-10、右：PB-11）

## 2. 実験計画

### 2.1 試験体

試験体の形状および配筋を図-2に、開孔部の形状および配筋を図-3に、試験体諸元を表-1に、鉄筋の材料特性を表-2に、コンクリートの材料特性を表-3に示す。試験体は、超高層集合住宅における基準階大梁の約1/2スケールを想定し、梁幅 $B$ を330mm、梁せい $D$ を450mm（以下、 $D$ は梁せい）、スタブ面までのせん断スパン $M/Q$ を1125mmとした。なお、機械式継手に充填するモルタルには、120N/mm<sup>2</sup>級のものを用いた。

梁部材としての限界部材角の確認のために、継手先端（継手の梁中央側端部）曲げ破壊型の片持ち梁を8体計画した。主な実験因子は、コンクリート強度 $F_c$ 、開孔径 $H$ 、スタブ面から開孔中心までの距離 $L'$ 、スタブ面から継手末端（継手のスタブ側端部）までの距離である。なお、梁端部はスタブ面から継手先端までの区間を示す。

既往の実験<sup>2)</sup>の試験体PB-2およびPB-6を基準とし、本実験と比較する。PB-2、PB-6はFc36でコ型補強筋の有無が異なる。本試験体では加力治具の都合により、梁幅 $B$ を330mmとした。スタブ面入力せん断応力度レベルをPB-2およびPB-6と同程度（0.055 $F_c$ 程度）とするため、PB-12～PB-17ではFc33とした。PB-10およびPB-11はそれぞれ、PB-2およびPB-6のFc36をFc24と小さくした。PB-12はPB-6の開孔径を $D/4.5$ と小さくし、開孔補強筋径をS8からS6と小さくした。PB-13はPB-6の開孔径を $D/4.5$ と小さくし、開孔補強筋をなくし、孔際補強筋量を増やした。PB-14はPB-2の開孔径を $D/3$ と大きくした。継手注入口と開孔のかぶりの都合により、継

手先端側孔際補強筋を配筋していない。PB-15はPB-14の継手の向きを反転させ、継手先端側孔際補強筋を配筋した。PB-16はPB-13よりスタブ面から開孔中心までの距離 $L'$ を0.39 $D$ から0.16 $D$ と小さくした。PB-17はPB-6よりスタブ面から継手末端までの距離 $x$ を0.1 $D$ から0.3 $D$ と大きくした。いずれの試験体も継手先端で曲げ降伏し、 $R=+50 \times 10^{-3}$ rad.まで最大耐力の80%以上を保持することを想定し、計画した。なお、コ型補強筋の鉄筋端





表-4 実験結果および計算値一覧

| 試験体   | 実験値            | 終局強度計算値              |                     |                         |                                |                         |                    |                         |                          |                               |                             | 破壊形式<br>※2 |
|-------|----------------|----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------------|-----------------------------|------------|
|       |                | 曲げ                   |                     |                         |                                | せん断                     |                    |                         |                          |                               |                             |            |
|       | 最大強度           | 梁一般部<br>曲げ終局強度<br>※1 | 梁端部<br>曲げ終局強度<br>※1 |                         | 梁一般部<br>せん断強度<br>( $R_p=2\%$ ) |                         | 梁端部<br>せん断強度       |                         | 梁端部<br>せん断強度<br>(コ型考慮)   |                               | 梁端部<br>せん断余裕度               |            |
|       | $eQ_m$<br>[kN] | $cQ_{fu1}$<br>[kN]   | $cQ_{fu2}$<br>[kN]  | $\frac{eQ_m}{cQ_{fu1}}$ | $cQ_{su1}$<br>[kN]             | $\frac{eQ_m}{cQ_{su1}}$ | $cQ_{su2}$<br>[kN] | $\frac{eQ_m}{cQ_{su2}}$ | $cQ_{su2\Delta}$<br>[kN] | $\frac{eQ_m}{cQ_{su2\Delta}}$ | $\frac{cQ_{su2}}{cQ_{fu1}}$ |            |
| PB-10 | 250            | 268                  | 336                 | 0.93                    | 301                            | 0.83                    | 310                | 0.81                    | 317                      | 0.79                          | 1.16                        | F          |
| PB-11 | 247            | 268                  | 336                 | 0.92                    | 301                            | 0.82                    | 310                | 0.80                    | —                        | —                             | 1.16                        | F          |
| PB-12 | 266            | 268                  | 336                 | 0.99                    | 376                            | 0.71                    | 287                | 0.93                    | —                        | —                             | 1.07                        | F          |
| PB-13 | 274            | 268                  | 336                 | 1.02                    | 376                            | 0.73                    | 272                | 1.01                    | —                        | —                             | 1.01                        | F          |
| PB-14 | 235            | 268                  | 336                 | 0.88                    | 376                            | 0.63                    | 270                | 0.87                    | 279                      | 0.84                          | 1.01                        | FS         |
| PB-15 | 250            | 268                  | 336                 | 0.93                    | 376                            | 0.67                    | 306                | 0.82                    | 313                      | 0.80                          | 1.14                        | FS         |
| PB-16 | 267            | 268                  | 336                 | 0.99                    | 387                            | 0.69                    | 293                | 0.91                    | —                        | —                             | 1.09                        | F          |
| PB-17 | 271            | 300                  | 336                 | 0.90                    | 387                            | 0.70                    | 321                | 0.85                    | —                        | —                             | 1.07                        | F          |

※1 梁一般部曲げ終局強度計算値は梁一般部主筋が継手先端位置で降伏した際のせん断力を、梁端部曲げ終局強度計算値は梁端部主筋がスタブ面位置で降伏した際のせん断力を示す

※2 破壊モード F: 継手先端曲げ破壊 FS: 継手先端曲げ降伏後のせん断破壊

では、コ型補強筋を配筋していない PB-11 の方が開孔周囲のコンクリートの剥落が顕著であった。コ型補強筋が有効なことが分かったが、その差は小さく、開孔径  $D/4$  とした場合、孔際補強筋と開孔補強筋で補強できると考える。開孔径を  $D/4.5$  とし、開孔の補強方法が異なる PB-12 および PB-13 は梁一般部曲げ終局強度計算値に達し、 $R=50 \times 10^{-3} \text{rad.}$  まで安定した復元力特性が得られた。復元力特性に大きな違いは見られないが、破壊性状で開孔上部のひび割れに違いが見られた。開孔径を  $D/4.5$  とした場合、孔際補強筋が有効であり、その量を十分確保すれば孔際補強筋のみで補強できると考える。スタブ面から開孔中心までの水平距離が異なる PB-13 および PB-16 では復元力特性に大きな違いは見られないが、破壊性状では、開孔をスタブ面に寄せた PB-16 の方が梁端部の損傷が抑制された。なお、PB-16 は  $R=50 \times 10^{-3} \text{rad.}$  の 1 サイクル目の負側で梁一般部せん断補強筋の溶接部が肌別れるように破断し、若干耐力低下した。開孔径を  $D/3$  とした PB-14 および PB-15 は、梁一般部曲げ終局強度計算値に達せず、継手先端で曲げ降伏後に急激に耐力低下し、開孔縁のせん断ひび割れが拡幅し、開孔部せん断破壊の様相が大きい。継手の注入口が継手先端側の孔際せん断補強筋と干渉せずに配筋できるよう継手の注入口を梁中央部からスタブ面側に向け、PB-14 から継手の向きを反転させた PB-15 は  $R=30 \times 10^{-3} \text{rad.}$  まで最大耐力の 80% 以上を保持し、靱性能の向上が見られ、破壊性状では PB-14 よりも梁端部の損傷が抑制された。孔際補強筋は有効であるが、大変形時における靱性能保持には、入力せん断力の制限や更なる開孔部の補強方法の検討が必要である。スタブ面から継手末端までの距離を  $0.3D$  とした PB-17 は、 $R=30 \times 10^{-3} \text{rad.}$  に梁端部主筋が継手末端付近で圧縮降伏した。梁一般部曲げ終局強度計算値に達せず、 $R=50 \times 10^{-3} \text{rad.}$  の負側で最大耐力の 78% まで耐力低下した。

### 3.2 実験結果と計算値の比較

実験結果および計算値一覧を表-4 に示す。継手先端で曲げ破壊した試験体は、実験値最大強度  $eQ_m$  / 梁一般

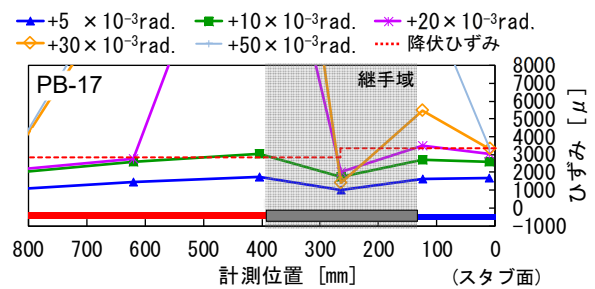
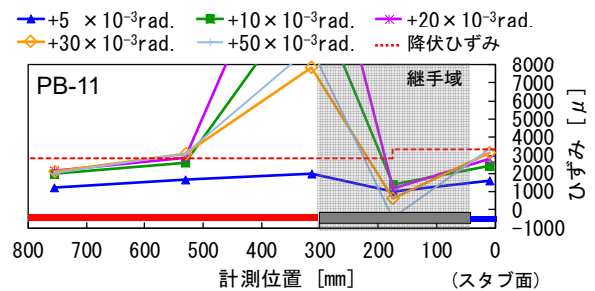


図-6 正加力時の主筋ひずみ分布  
(上: PB-11, 下: PB-17)

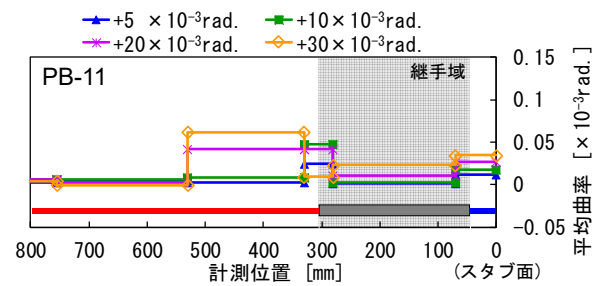


図-7 曲率分布

部曲げ終局強度計算値  $bQ_{fu1}$  が 0.90~1.02 であった。RC 規準<sup>3)</sup>を基に本研究の梁端部に開孔を有する HR 梁の曲げ終局強度を安全側に評価するには、今後、メカニズムの検討に基づく修正係数による低減などが必要である。

### 3.3 梁主筋ひずみ分布

PB-11 および PB-17 の正加力時の梁下端 1 段筋ひずみ分布を図-6 に示す。他試験体は、PB-11 と同様の傾向であったため、代表として PB-11 を示す。図中には、材料試験結果から求めた鉄筋の降伏応力度をヤング係数で除した値 (以下、降伏ひずみと称す) を併せて示す。なお、継手中央部のひずみは継手に貼付したゲージの値を示す。

継手先端位置のひずみは、ともに  $R=10 \times 10^{-3} \text{rad}$  に降伏ひずみを超えていることが分かる。PB-11 ではスタブ面位置のひずみは  $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$  まで弾性範囲に分布し、PB-17 では継手末端位置で  $R=-33 \times 10^{-3} \text{rad}$  に引張ひずみに先行して、圧縮ひずみが降伏ひずみを超えた。

### 3.4 曲率分布

PB-11 の曲率分布を図-7 に示す。曲率は梁材軸方向の区間変形から求めた区間平均曲率である。既報<sup>1)</sup>と同様に継手先端の曲率が突出し、大変形時においても継手先端から  $0.5D$  までの区間の曲率が梁端部区間の曲率より大きい傾向であった。他試験体も同様の傾向を示した。

### 3.5 補強筋ひずみ

開孔部の補強筋のひずみ履歴を図-8 に示す。図中の×印は  $R=50 \times 10^{-3} \text{rad}$  に達する前にゲージが破断した点を示す。PB-10 では、継手先端側孔際補強筋は降伏ひずみの90%程度のひずみが生じており、既報<sup>2)</sup>のコンクリート強度が  $Fc36$  のPB-2 に対し、ひずみが  $1700 \mu$  程度小さくなった。開孔補強筋のひずみは降伏ひずみの30%程度となっており、既報<sup>2)</sup>と同様に他の補強筋に比べ小さい。PB-2 ではスタブ面側コ型補強筋は降伏し、ひずみが急増しているが、PB-10 ではコ型補強筋のひずみは降伏ひずみを若干上回る程度で、ひずみは急増していない。

PB-11 では、継手先端側孔際補強筋のひずみは、 $R=-30 \times 10^{-3} \text{rad}$  に降伏ひずみを上回っており、PB-10 に対し、コ型補強筋を配筋していないため、ひずみが大きくなった。既報<sup>2)</sup>のコンクリート強度が  $Fc36$  のPB-6 では継手先端側孔際補強筋は  $R=-20 \times 10^{-3} \text{rad}$  で降伏し、 $Fc24$  と小さくしたことでより大きな部材角で降伏するようになった。開孔補強筋のひずみはPB-6、PB-10 と同様に  $1000 \mu$  程度と小さい。コンクリート強度を  $Fc24$  とした場合においても  $Fc36$  のPB-6 と同様の傾向を示し、コ型補強筋がせん断抵抗に寄与することで、孔際補強筋の降伏を抑制したと考える。開孔周囲の補強筋のひずみが一部、 $Fc36$  より  $Fc24$  の方が小さいことは、梁幅やスタブの境界条件が異なることを含め、今後の検討課題である。

PB-13 はPB-6 に対し、開孔補強筋をなくし、孔際補強筋を多く配筋したことで、継手先端側孔際補強筋のひずみが降伏ひずみを若干上回る程度に抑えられ、ひずみは急増しなくなった。スタブ側孔際補強筋のひずみは  $2000 \mu$  程度小さくなった。HR 梁の梁端部に  $D/4.5$  以下の開孔を設け、上下を機械式継手で囲う場合は、開孔補強筋のせん断抵抗の寄与分は孔際補強筋で負担できると考える。

PB-15 はPB-2 に対し、開孔径を  $D/4$  から  $D/3$  としたことで、 $R=+10 \times 10^{-3} \text{rad}$  に孔際補強筋に先行して、コ型補強筋が降伏するようになり、 $R=+30 \times 10^{-3} \text{rad}$  の継手先端側孔際補強筋のひずみはPB-2 では  $4187 \mu$ 、PB-15 では  $3555 \mu$  と小さくなった。開孔径が大きいほどコ型補強筋

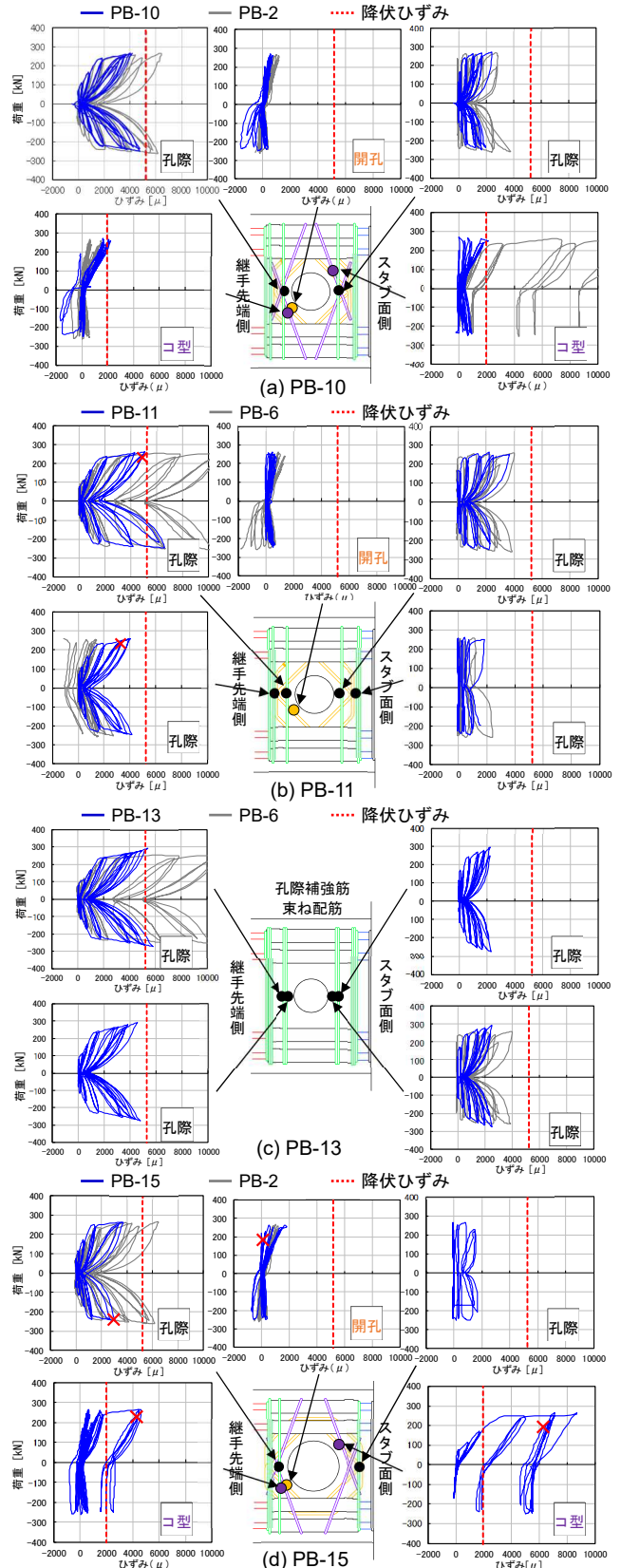


図-8 開孔部の補強筋のひずみ履歴

のせん断抵抗の寄与分が大きく、有効に働くことが確認された。また、コ型補強筋が降伏していることからコ型補強筋の鉄筋端側の長さを梁せい中心から  $90 \text{mm}$  (鉄筋径の15倍) とすることで定着長さは確保されていると考える。

#### 4. せん断ひび割れ

PB-11 のせん断ひび割れ幅の推移を図-9 に示す。図中にはピーク時せん断ひび割れ幅を実線で、長期荷重まで除荷時残留せん断ひび割れ幅を点線で示す。梁一般部せん断ひび割れに比べ、開孔縁せん断ひび割れの方が大きい。 $R=10 \times 10^{-3} \text{rad.}$ では、長期荷重まで除荷した時のひび割れ幅が 0.15mm を超えている。

開孔縁の除荷時残留せん断ひび割れ幅の推移を図-10 に示す。なお、開孔中心から  $45^\circ$  方向に伸展するひび割れ幅を示す。開孔径  $D/4$ ,  $D/4.5$ ,  $D/3$  の順に大きい傾向を示し、コ型補強筋を配筋していない開孔径  $D/4$  の PB-11 が最も大きい。コ型補強筋を配筋した PB-10 は半分以下のひび割れ幅に抑えられ、開孔補強筋を配筋した  $D/4.5$  開孔の PB-12 は、開孔補強筋を配筋していない PB-13 に対し、半分以下のひび割れ幅に抑えられており、コ型補強筋および開孔補強筋がせん断ひび割れの抑制に有効に働いていることが分かる。開孔をスタブ面に寄せた PB-16 は、米澤らの既往の研究<sup>4)</sup>で述べられているように、柱（スタブ）の拘束効果により開孔部に生じるせん断ひび割れが抑制されたため、小さい。

梁端部の破壊性状を図-11 に示す。PB-10, PB-12 および PB-15 は、それぞれコ型補強筋、開孔補強筋および継手先端に孔際補強筋を配筋したことでひび割れが拡散されており、開孔縁のひび割れは小さい。開孔径が  $D/3$  の PB-14 および PB-15 のひび割れ幅が比較的小さいことは、開孔中心から  $45^\circ$  方向に伸展するひび割れに加え、開孔の接線方向に生じたひび割れの進展も顕著になるためである。特に PB-14 では接線方向に生じたひび割れの進展が顕著なため、開孔中心から  $45^\circ$  に伸展する残留ひび割れ幅は全試験体の中で最も小さい。

#### 5. まとめ

本研究では、梁端部に開孔を有するヒンジリロケーション片持ち梁の構造実験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 開孔径  $D/4.5$  では、 $F_{c24}$ (スタブ面入力せん断応力度レベル  $0.078 \sigma_B$ )においても孔際補強筋のみで、開孔径  $D/4$  では、孔際補強筋および開孔補強筋で開孔部を補強することで、継手先端曲げ破壊となり、 $R=+50 \times 10^{-3} \text{rad.}$ まで最大耐力の 80%以上を保持し、安定した復元力特性を有することを確認した。
- 2) 開孔径  $D/3$  では、梁端部せん断強度を梁一般部曲げ終局強度で除した梁端部せん断余裕度を 1.14 とした場合、開孔部せん断破壊の様相が大きく、大変形時における靱性保持には、入力せん断力の制限や更なる開孔部の補強方法の検討が必要である。
- 3) 継手先端で曲げ破壊した試験体は実験値最大強度／終局強度計算値が 0.90～1.02 であり、曲げ終局強度

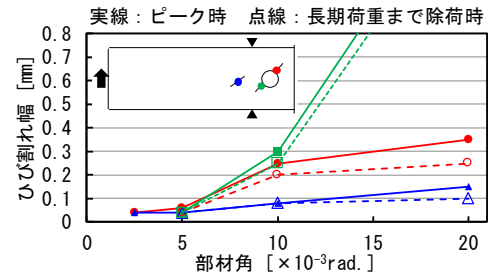


図-9 せん断ひび割れ幅の推移 (PB-11)

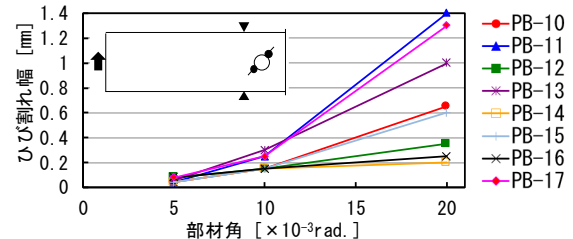


図-10 開孔縁の残留せん断ひび割れ幅の推移

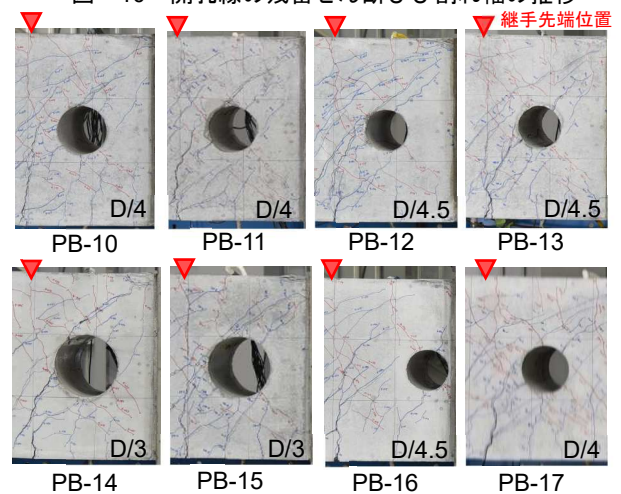


図-11 梁端部の破壊性状 (+20 × 10<sup>-3</sup>rad.)

を安全側に評価するには、今後、メカニズムの検討に基づく修正係数による低減が必要である。

- 4) 開孔補強筋やコ型補強筋の有無が異なる試験体では、復元力特性に大きな違いは見られなかったが、補強筋を配筋した試験体は、開孔縁残留ひび割れ幅が半分以下となり、開孔部の損傷抑制効果が見られた。

#### 参考文献

- 1) 小寺直幸, 赤井冬来, 田村彰教, 丸田 誠: 梁端部を高強度鉄筋で補強したヒンジリロケーション十字型骨組の実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.283-288, 2020
- 2) 安田稔太, 赤井冬来, 金川 基, 丸田 誠: 梁端部に開孔を有するヒンジリロケーション梁に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.433-438, 2022
- 3) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- 4) 米澤健次, 澁市克彦, 水越一晃, 増田安彦: 材端開口を可能とする RC 梁工法の開発, 大林組技術研究報, No.82, 2018