

論文 モルタル充てん継手を有するプレキャスト RC はりの曲げ破壊挙動に及ぼす目地の影響

小林 研太*1・大窪 一正*2・松本 智夫*3・二羽 淳一郎*4

要旨：本研究では、モルタル充てん継手を用いて接合したプレキャスト RC はりの曲げ破壊挙動に及ぼす接合目地の影響を検討するため、スパン中央の接合目地の形状および材料をパラメータとしたプレキャスト RC はりの載荷実験を行った。その結果、目地の違いに関わらず計算値以上の曲げ耐力を有しており、目地の違いによる曲げ耐力への大きな影響はないことを確認した。また、目地の界面に目粗しなどの凹凸を設けることにより界面の付着強度が増大し、目地界面の開口を抑制する効果が大きいことが明らかとなった。

キーワード：モルタル充てん継手, 接合目地, プレキャスト RC はり, 曲げ破壊

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の品質の安定化や工期短縮が可能となることから、プレキャスト工法の適用が広がってきている。プレキャスト部材同士の接合の際、主鉄筋の連続性の確保のために機械式継手を使用されることが多い。また、部材間には目地が形成され、目地材として無収縮モルタルやエポキシ樹脂系接着剤などが使用される。このようなプレキャスト RC 構造では、接合目地に使用される接着剤や目地の形状、あるいはそれらの組み合わせが構造物の耐力や変形性能に影響すると考えられる。

森ら¹⁾は、モルタル充てん継手を有する RC はりのせん断性状に対してモルタル接合目地が与える影響を検討し、接合目地を起点としてはりが大きく変形してせん断破壊に至るものの、その耐力は目地の無い RC 供試体と同等となることを確認した。また、新保ら²⁾は、モルタル充てん継手を用いたプレキャスト部材の接合部における疲労特性について検討し、接合目地の開口が生じ、接合目地の無い供試体に比べてひび割れの発生本数が少なくなり、ひび割れ発生間隔が広がることから目地が耐久性上の弱点になり得ることを報告している。しかし、接合目地ならびに機械式継手を有するプレキャスト RC 部材を対象とした構造実験は少なく、目地の形状や

材料がプレキャスト RC 部材の耐荷挙動に与える影響を把握することは、目地部の耐久性向上や接合方法の合理化に繋がるものと考えられる。

本研究では、スパン中央に設けた接合目地の形状ならびに接合方法をパラメータとした 7 体のプレキャスト RC はりの 4 点曲げ静的載荷実験を行い、モルタル充てん継手を有するプレキャスト RC はりの曲げ破壊挙動に対して接合目地が与える影響を検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体一覧を表-1 に、供試体概要を図-1 に示す。供試体は、現場での打継ぎを想定した SK を除いて、は

表-1 供試体一覧

| 供試体名 | 接合方法 | 目粗し | 目地厚 | 製作方法 |
|------|----------|------|----------------------|--------------|
| DRY | ドライジョイント | なし | 10mm 20mm 40mm | プレキャスト 工法 |
| AD | 接着剤 | なし | | |
| M10 | モルタル | あり | | |
| M20 | | あり | | |
| M40 | なし | 20mm | | |
| M20S | | | | |
| SK | せん断キヤ | | | 現場打継ぎ |

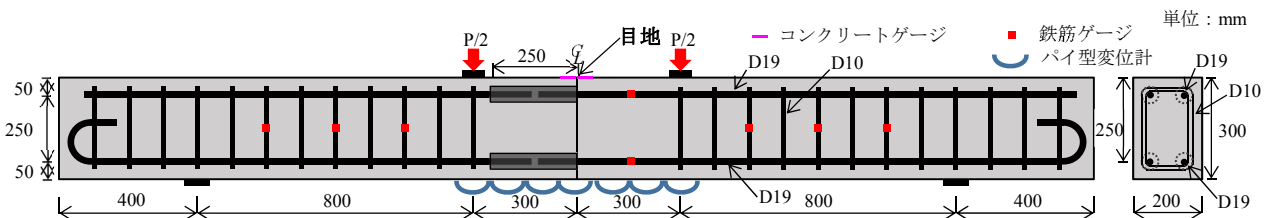


図-1 供試体概要

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース 修士学生 (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 受託研究員 (正会員)

*3 日本プライススリーブ(株) 技術本部 顧問 博(工) (フェロー会員)

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 工博 (フェロー会員)

表-2 樹脂シート諸元

| 樹脂シート | |
|-------------|---------------|
| 凸状突起高さ (mm) | 凸状突起配置間隔 (mm) |
| 10 | 30 |

表-3 使用材料諸元

| 呼び強度 (N/mm ²) | 引張鉄筋および圧縮鉄筋 | | せん断補強鉄筋 | | | |
|---------------------------|-------------|-----------|----------------------------|------------|-------------------------------|----------|
| | 規格 | p_w (%) | f_y (N/mm ²) | 規格 | f_{wy} (N/mm ²) | s (mm) |
| 30 | D19, SD345 | 1.1 | 394 | D10, SD345 | 400 | 100 |

p_w : 引張鉄筋比, f_y : 降伏強度, f_{wy} : せん断補強鉄筋降伏強度,
 s : せん断補強鉄筋間隔



図-2 目粗しおよび打継ぎ界面の状況

表-4 スリーブおよびモルタル諸元

| 材質 | スリーブ | | | | グラウト材, 目地用モルタル |
|----------|-------------|---------|-----------|-----------|-----------------------------|
| | スリーブ長さ (mm) | 外径 (mm) | 広口内径 (mm) | 狭口内径 (mm) | 継手管理強度 (N/mm ²) |
| FCD700-2 | 250 | 48 | 36 | 25 | 70 |

表-5 载荷実験結果および計算値

| 供試体名 | コンクリート圧縮強度 (N/mm ²) | モルタル圧縮強度 (N/mm ²) | 初期ひび割れ荷重(kN) | | | 降伏荷重(kN) | | | 曲げ耐力(kN) | | | |
|------|---------------------------------|-------------------------------|------------------|---------|----------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|------|
| | | | 計算値 P_{cr-cal} | 実験値 目地部 | 実験値 目地以外 | 計算値 P_{y-cal} | 実験値 P_{y-exp} | P_{y-exp}/P_{y-cal} | 計算値 P_{u-cal} | 実験値 P_{u-exp} | P_{u-exp}/P_{u-cal} | |
| DRY | 33.4 | 91.3 | 35.8 | 3 | 18 | 124.9 | 114.4 | 0.91 | 129.9 | 168.3 | 1.30 | |
| AD | 34.0 | 91.3 | 36.2 | 13 | 12 | | 125.8 | 1.01 | | 130.2 | 156.3 | 1.20 |
| M10 | 34.0 | 91.3 | | なし | 20 | | 125.0 | 1.00 | | | 165.9 | 1.27 |
| M20 | 48.0 | 99.9 | 45.6 | 53 | 12 | | 127.6 | 1.02 | 136.0 | 162.9 | 1.19 | |
| M40 | 48.0 | 99.9 | | 62 | 17 | | 126.4 | 1.01 | | 158.8 | 1.17 | |
| M20S | 48.0 | 99.9 | | 19 | 12 | | 122.4 | 0.98 | | 156.9 | 1.15 | |
| SK | スリーブ側 | 34.0 | 36.2 | 12 | 22 | | 123.6 | 0.99 | 130.2 | 164.4 | 1.26 | |
| | スリーブなし側 | 46.7 | 44.7 | | | 135.5 | | | 1.21 | | | |

りのスパン中央で2体のプレキャスト部材を接合したプレキャスト RC はりとした。全ての供試体は、せん断スパン比 $a/d=3.2$, スパン 2200mm, 引張鉄筋比 1.1%, 断面幅 200mm ならびに高さ 300mm とした。目地とモルタル充てん継手 (以下, スリーブ) を無視して行った耐力計算結果に基づき, 曲げ引張破壊先行型となるよう設計した。なお, 等曲げ区間は全供試体で一律 600mm とした。

DRY は軸方向鉄筋をスリーブのみで接合しており, 接合目地部においてモルタルや接着剤を用いず, プレキャスト部材の端面同士を突き合わせただけの接合方法である (以下, ドライジョイント)。AD ではエポキシ樹脂系接着剤を用いて部材同士を接着させた。M10, M20 ならびに M40 では, プレキャスト部材の打設時に凝結遅延剤を塗布して界面を目粗しした後, それぞれ目地厚 10, 20 および 40mm に無収縮モルタルを充填したものである。M20S は界面の目粗し無しとした。SK は, 凹凸を有するエンボス加工樹脂シートを用いて, プレキャスト部材の接合面に予め円錐台形の多数の小突起を有するせん断キーを形成させ, 他方のコンクリートを打継いだ供試体である。樹脂シートの諸元を表-2 に, 目粗しによる目地界面および樹脂シートによる打継ぎ界面を図-2 に示す。

2.2 使用材料

使用材料を表-3, 4 に示す。コンクリートの配合は, いずれの供試体も呼び強度 30N/mm² とし, 粗骨材の最大

寸法は 20mm, セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。引張鉄筋および圧縮鉄筋には異形鉄筋 D19 (SD345) を, せん断補強鉄筋には異形鉄筋 D10 (SD345) を用いた。なお, 引張鉄筋および圧縮鉄筋に用いた異形鉄筋 (D19) は, 複数のロットの材料 ($f_y=380\sim418\text{N/mm}^2$) が混在していたため, 表-3 中の降伏強度には各ロットの強度の平均値を記載している。モルタル充てん継手におけるグラウト材および接合目地のモルタルには継手管理強度 70N/mm² の無収縮モルタルを使用し, スリーブ内と目地を同時に充填した。

2.3 载荷方法と測定項目

载荷は, 油圧式 1000kN 万能試験機を用いて静的 4 点曲げ载荷とした。载荷点には幅 65mm の支圧板を, 支点には回転支承の上に幅 75mm の支圧板を設置した。支点の鋼板と供試体の間にはシリコングリスを 2 枚のテフロンシートで挟んだ減摩パッドを挿入し水平方向の摩擦を低減した。

測定項目は, 荷重, スパン中央の鉛直変位, 圧縮縁のコンクリートひずみ, 圧縮鉄筋ひずみ, 引張鉄筋ひずみ, せん断補強鉄筋ひずみおよび等曲げ区間の開口変位とした。図-1 中に測定箇所を示す。コンクリートひずみは躯体コンクリートの軸方向ひずみを計測するため目地上面の界面に対して左右に貼付した。開口変位の測定には検長 100mm のパイ型変位計を用いた。

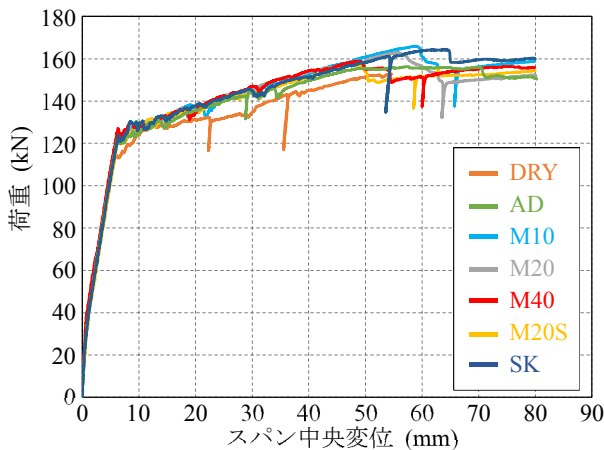


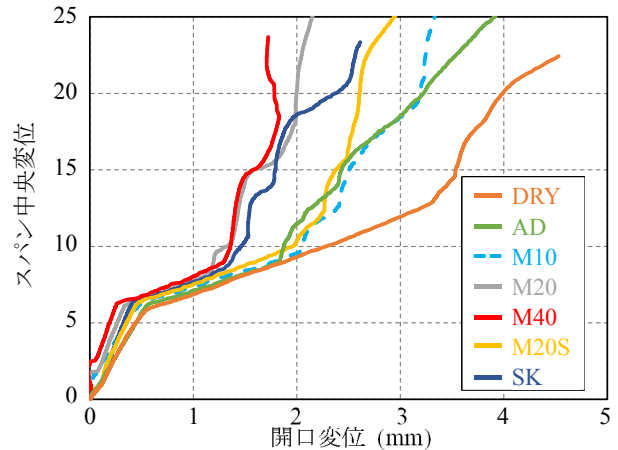
図-3 荷重-スパン中央変位関係

3. 実験結果

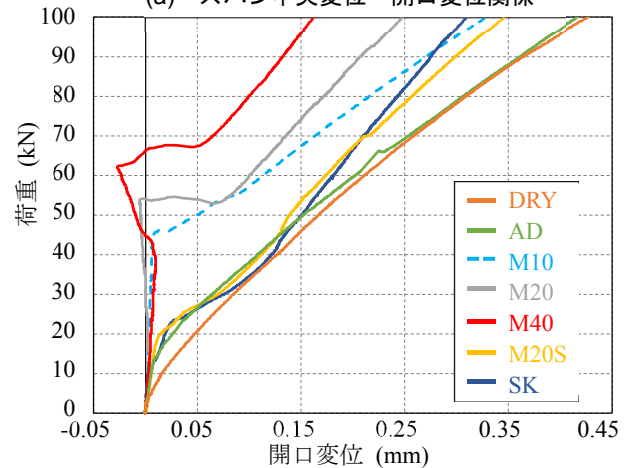
3.1 概要

表-5 に載荷実験結果、初期ひび割れ荷重、降伏荷重ならびに曲げ耐力の計算値を示す。実験値の降伏荷重は引張鉄筋降伏による荷重低下が最初に生じた荷重を示している。本実験の曲げ耐力は、基本的にコンクリートの圧壊によって決定しているが、DRY および AD では後述のとおり圧壊後も荷重が増加したため、表-5 の曲げ耐力は載荷中の最大荷重を示している。図-3 に全供試体の荷重-スパン中央変位関係を示す。荷重は万能試験機の出力値を用いる。表-5 中の初期ひび割れ発生荷重はパイ型変位計の値が大きく増加した荷重とした。計算値 P_{cr-cal} , P_{y-cal} , P_{u-cal} は接合部のない一体打ちの RC はりとしてコンクリート標準示方書³⁾に従って求めた。なお、DRY 以外の供試体は、スパン中央の変位が 80mm に達した段階で載荷を終了した。DRY においてはスパン中央の変位が 57mm の時点で変位計の測定範囲を超えたため変位の測定を中止し、以降荷重計測のみで載荷を継続した。最終的に引張鉄筋に沿って、付着割裂ひび割れが進展し、下面のかぶりコンクリートが剥離した段階で載荷を終了した。図-3 において、荷重、変位ともに一時的な低下を示している箇所は、計測機器の取り外し作業を行うために除荷したことによる。

全ての供試体において、引張鉄筋の降伏を確認した後、荷重が緩やかに増大し、等曲げ区間内の圧縮域のコンクリートが圧壊した。また、いずれの供試体においても、せん断補強鉄筋の降伏は確認されなかった。本研究で対象とした全ての供試体は、製作方法および目地の種類に関わらず、接合部のない一体打ちの RC はりとなし計算値を超える曲げ耐力を有しており、目粗しの有無、接合方法の違いおよび目地厚の違いといった目地部の状態により曲げ耐力が大きく異なることはないことを確認した。また、目地以外での初期ひび割れ発生荷重、曲げ耐力ともにコンクリート強度の違いによる明確な差は見られなかった。



(a) スパン中央変位-開口変位関係



(b) 荷重-開口変位関係(初期)

図-4 目地の開口変位

3.2 接合目地の開口挙動

表-5 に示すように、目粗したモルタル目地の供試体 M10, M20 ならびに M40 においては、目地の開口の前に目地以外の場所で初期のひび割れが発生した。図-4 にパイ型変位計によって計測した目地の開口変位を示す。なお、図-4(a)では引張鉄筋の降伏時以降の開口変位をわかりやすく表すため、縦軸はスパン中央変位としている。図-4 において M10 は目地自体の開口はなく、目地直近のひび割れ幅を測定していたため、点線でプロットしている。DRY, AD は最終的な目地の開口が他の供試体に比べて大きく、特に、DRY は載荷開始直後から目地の開口が確認できた。M10, M20 ならびに M40 では、界面のモルタルが引き剥がされるまで付着状態にあり、目地の初期開口がほとんど出なかった。また、他の供試体に比べて最終的な目地の開口も抑制されていることが確認できた。このことから、目粗しした後にモルタルを充てんすることによって目地の開口を抑制できたといえる。また、SK では載荷初期の開口変位の増大が、目粗しを有する M10, M20, M40 より大きかった(図-4(b))。しかしその後、せん断キーの存在によって、開口変位が 2mm 程度までの範囲では目粗しした供試体と概ね同様に目地部の開口を抑制できていた(図-4(a))。目粗しし

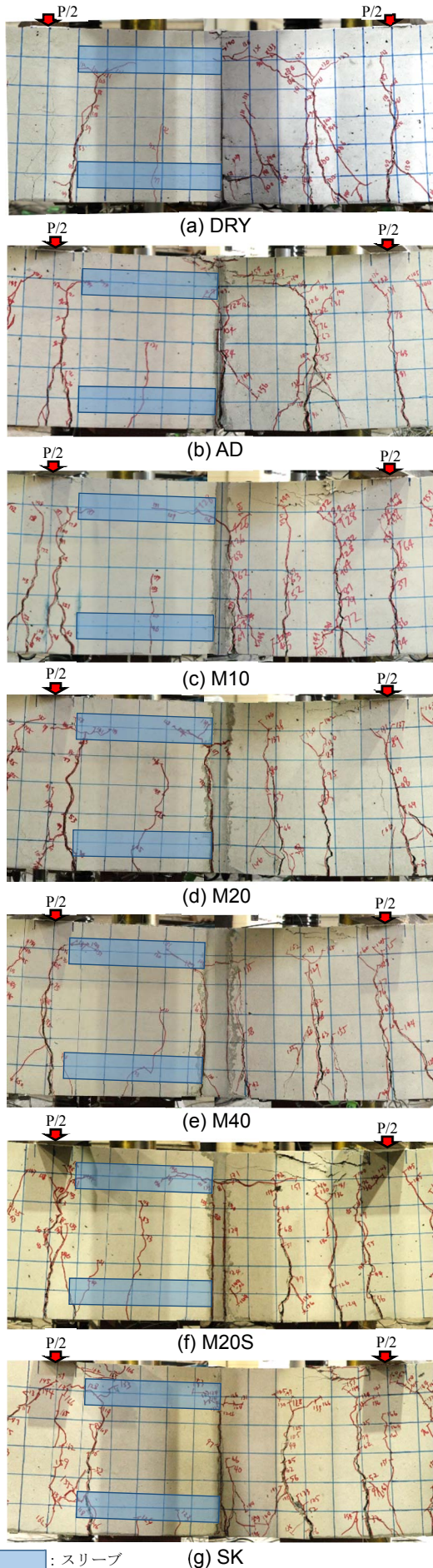


図-5 圧壊直後のひび割れ状態

たモルタル目地と異なり、樹脂シートによるせん断キーは目地部の下面付近には存在しないため、ひび割れがせん断キーに達するまでの開口変位は、目粗しをした供試体より大きく、M20Sと同程度になったと考えられる。せん断キーにひび割れが達した以降は、せん断キーの存在によって付着力が増大して目地部の開口がM10、M20供試体と同等の挙動を示したものと考えられる。

3.3 ひび割れ状態

図-5に各供試体のコンクリート圧壊直後のひび割れ状態を示す。なお、図-5は左右二台のカメラから撮影し、写真をつなぎ合わせたものである。いずれの供試体においても、目地のみに開口が集中することなく、等曲げ区間内で曲げひび割れが分散していることがわかる。一方で、スリーブの剛性が大きいためスリーブ区間のひび割れが抑制されており、代わりにスリーブ端部である左載荷点（赤矢印）付近のひび割れ幅が大きくなっていることが確認された。モルタル目地の供試体では、モルタルが躯体コンクリートよりも引張強度が高いため、モルタル目地自体には曲げひび割れは発生しなかった。また、目粗しを有するモルタル目地の供試体のうちM20およびM40では躯体とモルタルの界面の片側が開口し、M10では目地近傍でひび割れが発生して目地界面の開口は最大荷重直前まで確認されなかった。一方で、目粗しなしのモルタル目地供試体M20Sでは、モルタルと躯体の左右の界面がいずれも大きく開口した。

目地部のパイ型変位計によって得られた開口変位やひび割れ性状からわかるように、部材の接合による目地の開口は、目粗しや樹脂シートなどによる界面の凹凸によって付着面積が増大し、結果として付着力が増大することで、その開口や進展が抑制されることがわかった。一方で、DRYやADでは目地の開口が大きくなるため、部材の耐久性確保の観点からは、開口が大きくなることに注意を払う必要がある。

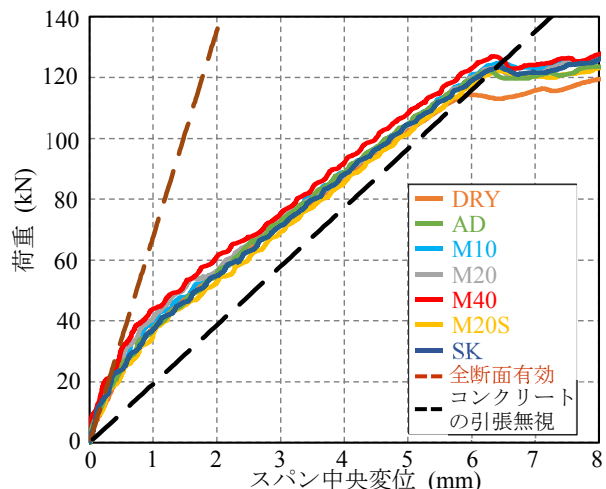


図-6 荷重-スパン中央変位関係 (はり降伏まで)

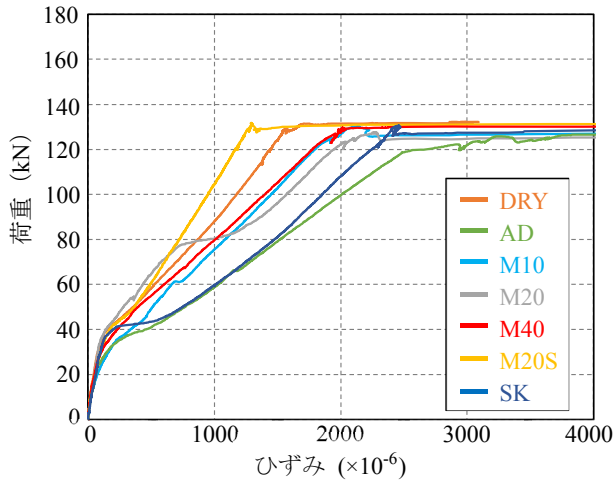


図-7 荷重-引張鉄筋ひずみ関係

3.4 初期の剛性およびはり降伏までの挙動

図-6 に荷重開始からはり主鉄筋降伏時付近までの荷重-スパン中央変位関係を示す。また、コンクリート標準示方書³⁾に基づいて鉄筋の存在を無視し、全断面有効として算出した荷重-変位関係および引張鉄筋を考慮し引張部のコンクリートを無視して算出した荷重-変位関係を合わせて図-6 に示す。目地の違いによる曲げひび割れ発生までの初期剛性への影響はほとんどなく、概ね同じ剛性を示した。いずれの供試体においても荷重初期は全断面有効とした荷重-変位関係の計算値と同等の挙動となり、曲げひび割れが発生したことで、荷重 20~30kN 程度から徐々に乖離していき、はり主鉄筋降伏付近でコンクリートの引張域を無視した荷重-変位関係に漸近した。DRY の接合目地はプレキャスト部材同士が接しているだけであるため、目地部のコンクリートは初めから引張抵抗に全く寄与していない。しかし、荷重初期は目地部以外で引張鉄筋に十分付着していることでコンクリートが引張に貢献し、はり全体の剛性としては、コンクリートの引張部を無視した荷重-変位関係ではなく、全断面有効として算出した荷重-変位関係に一致することを確認した。モルタル充てん継手を用いたプレキャスト RC はりにおいて、引張鉄筋とコンクリートが十分に付着していることによって、目地界面の引張貢献が期待されなくとも、はり全体の初期剛性に与える影響はほとんどない結果となった。

3.5 引張鉄筋降伏とはり部材の降伏

図-7 に荷重-引張鉄筋ひずみ関係を示す。引張鉄筋のひずみは、図-1 に示すように、スパン中央からスリーブが無い側に 150mm の位置で計測したものをを用いた。表-5 からわかるように DRY を除く 6 体の供試体において、 $P_{y-exp}=122\sim 128\text{kN}$ であった。一方、ロットの違いによる f_y のばらつきを考慮した計算結果は $P_{y-cal}=120\sim 133\text{kN}$ であり、実験結果のばらつきは計算結果

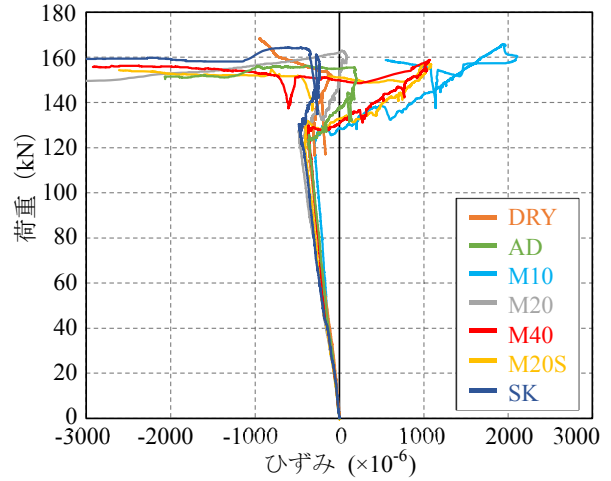


図-8 荷重-圧縮鉄筋ひずみ関係

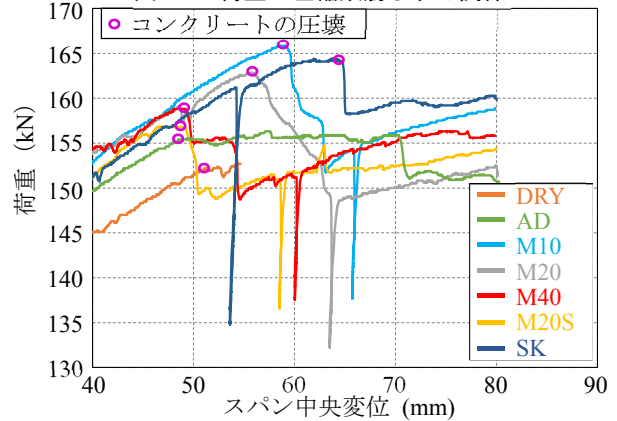


図-9 荷重-スパン中央変位関係(圧壊付近)

のそれよりも小さく f_y の平均値を用いた $P_{y-cal}=124.9\text{kN}$ とほぼ同等であった。したがって、表-5 には f_y の平均値による計算値のみを示した。一方で、図-6 からわかるように、引張鉄筋が降伏し、荷重低下が起きるはり部材の降伏は DRY のみ、 f_y のばらつきを考慮しても計算値より低い値で生じている。DRY では目地の開口が大きいことや目地部の引張貢献が引張鉄筋のみであることが影響し、目地付近の引張鉄筋に応力が集中したことで、計算値より低い値で降伏が生じたと考えられる。

3.6 コンクリートの圧壊

図-8 に荷重-圧縮鉄筋のひずみ関係を示す。全ての供試体において、引張鉄筋が降伏した後、中立軸位置が徐々に上端寄りになることで、一度圧縮鉄筋のひずみが引張側に移行しはじめるものの、コンクリートの圧壊後に圧縮鉄筋のひずみは再び圧縮側に移行した。図-9 に、圧壊前後の荷重-スパン中央変位関係を示す。DRY, AD は圧壊による荷重低下がほとんど見られず、その後も荷重が増加した。これは目地の圧縮上端において徐々にコンクリートの圧壊が進行したため、圧縮応力がコンクリートから圧縮鉄筋へと徐々に移行していったことによると考えられる。一方で、その他の供試体では、スリーブがない側の右載荷点付近から等曲げ区間で、DRY, AD に比べて広範囲でコンクリートの圧壊が起こり、一度荷

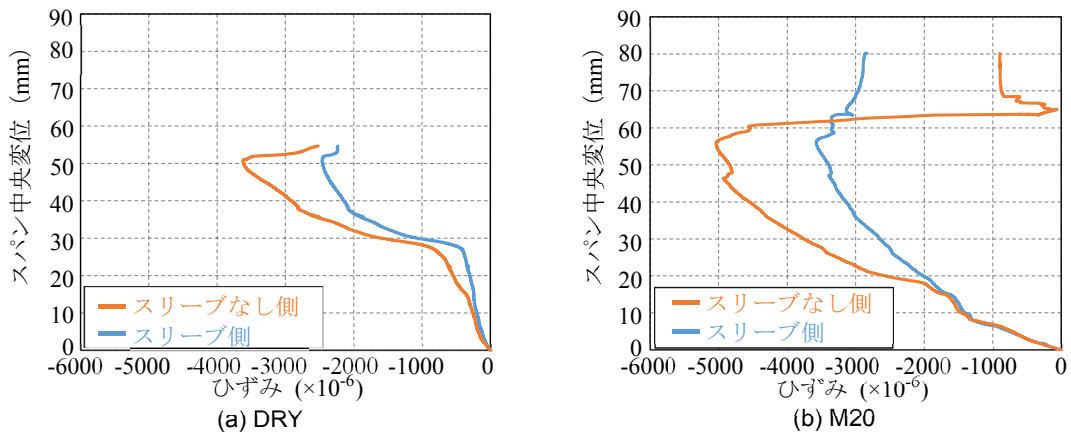


図-10 スパン中央変位-圧縮縁コンクリートひずみ関係

重低下が生じた後、荷重がほぼ横ばいとなった。目地の違いによるコンクリート圧壊性状の違いが生じた理由として、DRY および AD は目地の開口が大きいこと、あるいは目地部のコンクリート同士が面で接しておらず、はりの幅方向に圧縮応力が均一ではなく局所的に集中していたことにより目地の圧縮上端のコンクリートが上縁から順に少しずつ圧壊したためと考えられる。その他の供試体においては、目地の開口が抑制されていたことや目地の圧縮部の応力がはりの幅方向に均一となったことで、目地の圧縮上端付近のコンクリートに局所的な弱点が生じず、載荷点付近で応力集中が発生したことにより載荷点付近から先に圧壊が生じたと考えられる。以上のことから、圧壊時の荷重が DRY および AD で低くなったと考えられる。

図-10 に DRY および M20 のスパン中央変位と圧縮縁のコンクリートひずみの関係を示す。ほとんどの供試体において、はり断面の曲げ剛性が低い、スリーブなし側のコンクリートひずみの値が大きくなった。DRY は、前述のとおりコンクリート同士が面で接していないため圧縮応力が均等に作用せず、初期のひずみの伸びが小さくなったと考えられる。また、図-10 (b) のように、DRY および AD 以外の供試体では設計で用いる ϵ_{cu} を大きく超えて圧壊が生じた。

4. まとめ

本研究では、モルタル充てん継手を用いたプレキャスト RC はりの曲げ破壊に与える接合目地の影響を明らかにすることを目的に、目地形状ならびに接合方法の異なる7体のプレキャスト RC はりを対象に載荷実験を実施した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) モルタル充てん継手を用いたプレキャスト RC はりは、目地の種類に関わらず、目地や継手のない一体打ちの RC はりとした計算値以上の耐力を有しており、目地の違いによる曲げ耐力への大きな影響は無いことを確認した。また、ドライジョイントや接着剤接合

とした供試体では、目地が大きく開口、あるいは目地圧縮域の応力がはりの幅方向に均一ではなく局所的な応力集中が発生することで目地の圧縮上端のコンクリートが弱点となり、目地の圧縮上端で圧壊が起こることが示唆された。

- (2) 目地の界面に目粗しや樹脂シートなどによって凹凸を設けることで界面の付着力が増大し、目地界面の開口や進展を抑制する効果が大きいことを明らかにした。
- (3) モルタル充てん継手を用いたプレキャスト RC はりにおいて、目地界面の引張貢献が期待されなくとも、はり全体として初期剛性に与える影響は小さく、目地による初期剛性の違いはほとんど見られなかった。
- (4) ドライジョイントや接着剤接合とした供試体では、接合部のない RC はりと見なした計算値を上回る曲げ耐力が確認されたが、モルタル充てんした目地と比較して目地の開口が大きくなるため、部材としての耐久性確保の観点からは、目地の開口が大きくなることに注意を払う必要がある。

謝辞

本研究の供試体作製では、昭和コンクリート工業株式会社に多大なご協力をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 森敬倫, 中村拓郎, 松本智夫, 二羽淳一郎: モルタル充てん継手が接合目地を有する RC はりのせん断性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.517-522, 2018.7
- 2) 新保学幸, 谷村幸裕, 仁平達也ら: フルプレキャスト部材における接合部の疲労性能 I, 土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.67, V-293, pp.585-586 2012.8
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書[設計編], 2017