

# 論文 閉合鉄筋継手を用いたプレキャスト梁柱接合部の地震時の性能に関する実験的検討

西村 知晃\*1・安保 知紀\*2・松岡 茂\*3・石橋 忠良\*4

**要旨：**ラーメン高架橋をプレキャスト工法で施工する際のプレキャスト部材同士の接合作業の省力化を目的に、柱梁接合において閉合鉄筋継手を用いる工法を考案した。筆者らは地震時の性能確認のため正負交番載荷試験を行い、過年度は接合部がモルタルのケースで早期に荷重低下することを確認した。今回は接合部をコンクリートにしたものを追加し、降伏点や最大荷重は一般的な RC 構造物として評価できることを確認した。一方、ひび割れ発生個所が限定的になることから最大荷重程度を保持できる最大変位が継手の無い部材より小さくなったため、塑性ヒンジ部の回転角と引張鉄筋比の関係を整理した。

**キーワード：**変形性能, 高架橋, 鉄道, 正負交番載荷試験, 生産性向上

## 1. はじめに

近年の高齢化等に伴う労働者不足に対して、建設業界では現場の生産性向上の必要性が増しており、プレキャスト工法の適用が進められている。プレキャスト工法の大きなメリットは、現場での施工期間を大幅に短縮できることである。ラーメン高架橋にプレキャスト工法を適用する場合、プレキャスト部材の接合方法が重要な要素であり、その中でも鉄筋の継手構造は、構造物の性能や製作費の他に、現場での施工速度に大きく影響を与える。

鉄道ラーメン高架橋で採用されたプレキャスト工法の事例の一つに、ハーフプレキャスト工法<sup>1)</sup>がある。部材をハーフプレキャストとすることで軽量化し、運搬や架設に大きな揚重機等を必要としない工法で、狭隘な市街地での適用に優位である。しかし、部材架設後に現地で鉄筋・型枠の組立、中詰めコンクリートの打込みといった作業が多く発生し、更なる生産性向上のためにはこれらの現地での作業量の削減が求められる。また、最近では現場での作業量を極力省略して大幅な施工期間短縮を図ったフルプレキャスト工法<sup>2)</sup>の事例がある。この事例では、部材から突出させた軸方向鉄筋を機械式継手に挿入しながら架設を行い、その後の現地作業は目地部の型枠組立と機械式継手のモルタル充填のみであり、現地作業が少ないことから大幅な工期短縮を実現している。しかし、機械式継手に軸方向鉄筋を挿入しながら架設するためにはプレキャストの鉄筋配置精度や部材架設精度を高める必要がある。また梁部材の架設作業では、部材から突出させた軸方向鉄筋を水平に差し込む必要があるため、もう一方の柱頭部の仕口付部材も併せて設置することから、機械式継手のモルタル養生中は梁部材を受け

る支保工の設置が必要となる。現地での施工性向上のためには、支保工や足場等の仮設備を削減することが求められる。

筆者らは、部材製作や架設時の許容誤差を拡大し、かつ支保工を不要とすることによるさらなる生産性向上を目的に、プレキャスト柱とプレキャスト梁の接合工法として、閉合鉄筋継手を使用した工法を検討している。閉合鉄筋継手を使用することで、高度な専門技術を必要とせず、プレキャスト部材製作時の製作誤差や現場での施工誤差を吸収し、梁部材は揚重機による鉛直方向の吊り込み作業が可能でかつ柱部材に取り付けた梁受け材で支持できるため支保工が不要となり、施工性の向上が期待できる。閉合鉄筋継手の既往の研究<sup>3)~5)</sup>では、地震時の性能については十分な検討が行われていない。そこで筆者らは、閉合鉄筋継手を用いたプレキャスト梁柱接合部を模擬した実物大規模の試験体を用いて正負交番載荷試験を行い、本接合部の地震時の性能をとりまとめた。

## 2. 閉合鉄筋継手の概要

### 2.1 工法概要

図-1 に閉合鉄筋継手を用いた接合部の工法概要を示す。梁部材は、柱側面から突出したコの字鉄筋に、梁端部から突出した同様のコの字鉄筋を重ね合わせるように、上方から架設する。あらかじめ柱部材に仮設の梁受け材を設置するか、柱部材製作時に梁受け材を構築し、これで梁を受けることで支保工や支柱等の仮設備を省略することができる。図-2 に閉合鉄筋継手の概要図を示す。この継手は、コの字鉄筋の隅角部に支圧補強筋を配置することで支圧耐力が向上し、継手の長さ $2\phi$  ( $\phi$ :梁主筋

\*1 鉄建建設(株) 建設技術総合センター 研究開発センター (正会員)

\*2 鉄建建設(株) 建設技術総合センター 研究開発センター 博(工) (正会員)

\*3 鉄建建設(株) 専務執行役員 建設技術総合センター所長 工博 (正会員)

\*4 JR 東日本コンサルタンツ(株) 技術統括 工博 (名誉会員)

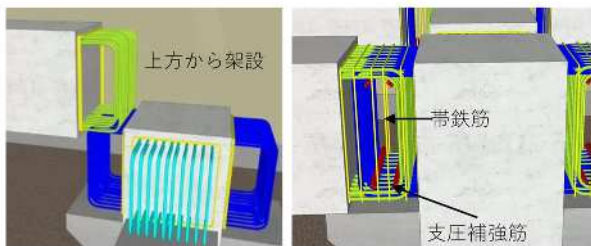


図-1 工法概要

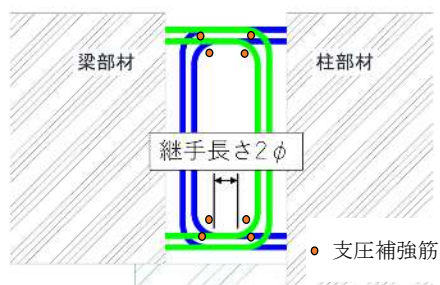


図-2 閉合鉄筋継手の概要

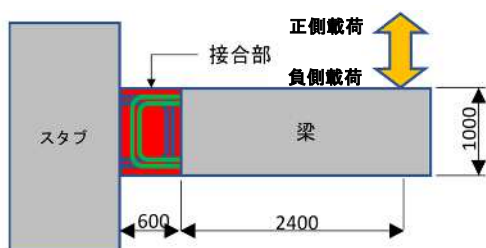


図-3 交番荷重試験体概要図

の鉄筋径) 以上で十分な耐力が発揮できる構造となっている<sup>3)</sup>。

主な施工手順は次の通りである。

- 手順1.柱部材に仮設の梁受け材を設置する(製作段階で柱部材に梁受け材を構築する場合は不要である)。
- 手順2.梁部材を上方から架設する。
- 手順3.接合部の支圧補強筋および帯鉄筋を組み立てる。
- 手順4.型枠を組立て、コンクリートあるいはモルタルを打ち込む。

## 2.2 閉合鉄筋継手の概要

### (1) 曲げ特性

閉合鉄筋継手のように鉄筋の曲げ内半径を小さくすると、鉄筋の曲げ加工の内側から腹圧が作用し、鉄筋の内側のコンクリートが割裂破壊して接合部の耐力が低下する。そのため継手鉄筋の曲げ加工部(隅角部)へ継手鉄筋の直角方向に支圧補強筋を配置し、鉄筋の継手長さを $2\phi$ 以上確保することで、接合部の耐力が一般的な継手のない鉄筋コンクリート部材と同等の耐力を確保している<sup>3)</sup>。また梁主筋を2段配置した場合にも継手のない鉄筋コンクリート部材の曲げ耐力と同等であることが確認されている<sup>4)</sup>。

### (2) せん断特性

閉合鉄筋継手で接合した部材のせん断特性を確認するために、4点曲げ荷重試験や逆対称曲げ荷重試験を実施した結果、閉合鉄筋内部には明確な損傷は認められず、接合部が梁部材のせん断耐力に与える影響は小さく、一般的な継手のない鉄筋コンクリート部材として算出した計算値と同等の耐力を有していることを確認した<sup>5)6)</sup>。

### (3) 疲労特性

鉄道高架橋の梁のように列車荷重を受ける部材には疲労破壊に対する安全性を確保する必要があり、接合部の疲労性能を確認するため、高サイクル繰り返し試験を実施した。その結果、鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物<sup>7)</sup>(以下、鉄道標準)に従って算出した疲労寿命以上の繰り返し回数を荷重しても鉄筋の破断には至らず、その後の静的荷重においても曲げ耐力の低下は見られなかった<sup>4)</sup>。

### (4) 地震時の性能

梁柱接合部は地震時に塑性化する可能性があることから、鉄道標準の損傷レベルの照査を参考に、最大荷重程度を保持できる変位の最大値の把握が必要である。筆者らは接合部にモルタルを打設した試験体を製作して、交番荷重試験および数値解析を行って得られた知見を報告した<sup>8)</sup>。今回は、地震時の性能向上を目的として接合部にコンクリートを打設した試験を行って地震時の性能としてとりまとめた。次章以降でその内容について記述する。

## 3. 性能確認試験

### 3.1 試験概要

閉合鉄筋継手を用いた柱梁接合部の地震時の性能を確認するため、正負交番荷重試験を4体の試験体を用いて実施した。試験は、図-3に示すように、実際の高架橋の柱と梁の接合部に合わせて、梁部材を水平に接合して鉛直方向の正負交番荷重とし、梁には軸方向力を作用させない条件とした。柱を模擬したスタブは反力用固定壁に固定した。

荷重方法は、鉛直上向きを正側荷重とし、図-3の青色で示す2段配置した梁基部の引張鉄筋のうち、先に降伏ひずみに達した時点の荷重点位置の鉛直変位を $1\delta y-1$ 、続いてもう一方の鉄筋が降伏ひずみに達した時点の変位を $1\delta y-2$ とした。鉛直方向下向きとなる負側荷重についても、同様に $-1\delta y-1$ と $-1\delta y-2$ とし、これらの変位の絶対値の平均を降伏変位と定義して $1\delta y$ とした。いずれの降伏も、スタブとの接合面の位置で鉄筋に貼付したひずみゲージが離散的に配置した隣接したひずみゲージが降伏ひずみに達した。その後は、 $1\delta y$ 、 $2\delta y$ と整数倍毎に変位を漸増させ

表-1 試験体諸元

No.	B×H (mm)	有効 高さ (mm)	せん断 スパン (mm)	せん断 スパン比	引張鉄筋 鉄筋比	帯鉄筋 帯鉄筋比	支圧 補強筋	接合部材料
1	450× 1000	920	3000	3.26	SD490 8本-D25 0.98%	SD345 D10@75 0.42%	外側:2-D19 内側:1-D25	モルタル
2	↑	↑	↑	↑	↑	SD345 D13@75 0.75%	外側:1-D19 内側:1-D19	↑
3	↑	↑	↑	↑	SD345 8本-D25 0.98%	SD345 D10@75 0.42%	外側:2-D19 内側:1-D25	コンクリート
4	↑	↑	↑	↑	SD345 8本-D19 0.55%	↑	外側:1-D19 内側:1-D19	↑

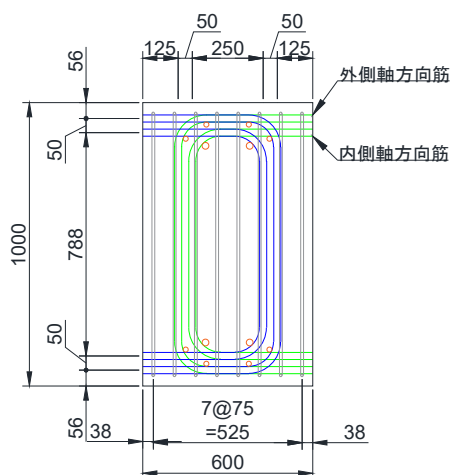


図-4 接合部配筋概要図

表-2 材料強度試験結果

試験体	プレキャスト コンクリート 強度と弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) (kN/mm <sup>2</sup> )	接合部材料 強度と弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) (kN/mm <sup>2</sup> )	引張鉄筋 降伏強度 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) (kN/mm <sup>2</sup> )	帯鉄筋 降伏強度 弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> ) (kN/mm <sup>2</sup> )
1	44.7 34.0	モルタル 56.2 24.4	520 184	376 182
2	44.6 32.9	モルタル 55.8 24.2	↑	370 179
3	36.3 29.2	コンクリート 58.6 34.5	382 194	387 193
4	35.3 30.7	コンクリート 55.5 32.9	399 192	403 194

て、各目標変位で正負3回繰返し载荷を行った。

### 3.2 試験体諸元

試験体は曲げ破壊型とした。表-1に試験体諸元を示す。試験体1と2は接合部にプレミックスタイプの無収縮モルタルを打設し、帯鉄筋比を変更した。試験体3と4は、高流動コンクリートを打設し、引張鉄筋比を変更した。図-4に接合部の配筋概要図を示す。支圧補強筋は、軸方向鉄筋と同径1本または複数本で同面積程度としたが、試

験体2のみ軸方向鉄筋D25より細いD19-1本とした。表-2に各材料の強度試験結果を示す。プレキャストコンクリートの強度にバラつきが見られるが、梁の変形量は圧縮強度と弾性係数を考慮して算出しており、また主な変形箇所が接合部であることから、接合部の地震時の性能に与える影響は小さいと考えられる。プレキャスト部材の接合面は、ワイヤーブラシによって目粗しを施した。

### 3.3 試験結果

#### (1) 破壊状況

写真-1 に試験体 1 の荷重低下直後の変位量  $2\delta_y-3=63.4\text{mm}$  における接合部の損傷状況を示す。試験体 1 は接合部をモルタルで打設したことで、図-3 の緑色で示した鉄筋の鉛直部付近に発生した損傷の進行が早く、この箇所でのせん断伝達力が早期に低下したことが、荷重低下の原因である。詳細は、参考文献8)にまとめている。同様にモルタルで打設した試験体 2 も、帯鉄筋量や支圧補強筋量の違いによる有意な差はみられず、破壊状況は試験体 1 と同じであった。

写真-2 に試験体 4 の荷重低下直後の変位量  $6\delta_y-1=74.6\text{mm}$  における接合部の損傷状況を示す。試験体 4 は接合部をコンクリートで打設したことで、曲げひび割れの発生、引張側鉄筋の降伏、最大荷重に達した後にかぶりコンクリートの剥落に伴う緩やかな荷重低下を確認した。損傷箇所は限定的で、写真-2 の緑色で示した支圧補強筋付近から発生する曲げひび割れ (矢印 1,2,3) と、圧縮側コンクリートの圧壊 (矢印 4) とかぶりコンクリートの剥落 (矢印 5) である。梁寄りの支圧補強筋付近のひび割れ (矢印 3) は、概ね鉛直方向に進展した。同様にコンクリートで打設した試験体 3 も、破壊状況は同じであった。

#### (2) 荷重と変位の関係

図-5 にコンクリートを打設した試験体 3 と 4 の荷重と載荷点変位の関係を示す。どちらの試験体も、引張鉄筋が降伏して最大荷重に達したあと緩やかな荷重低下が確認できる。

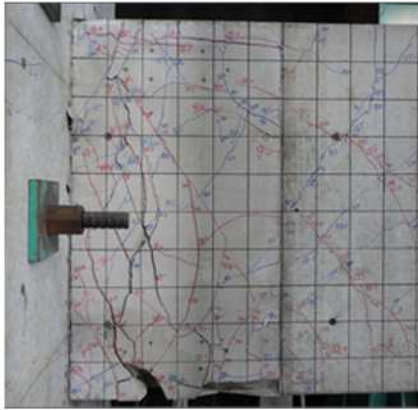


写真-1 破壊の状況 (試験体 1  $\delta=63.4\text{mm}$ )

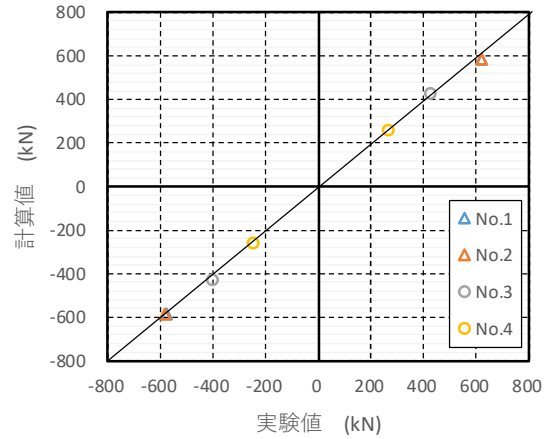


図-6 降伏点荷重の計算値と実験値の比較



写真-2 破壊の状況 (試験体 4  $\delta=74.6\text{mm}$ )

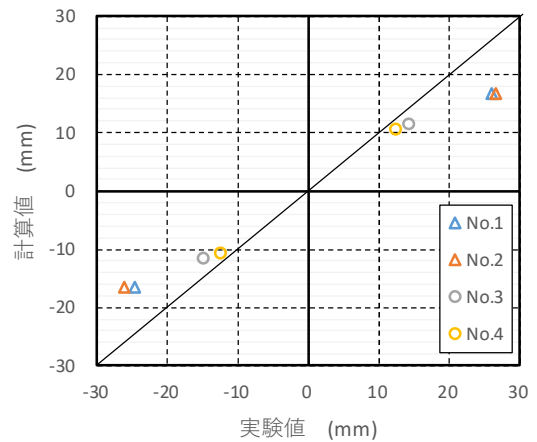


図-7 降伏点変位の計算値と実験値の比較

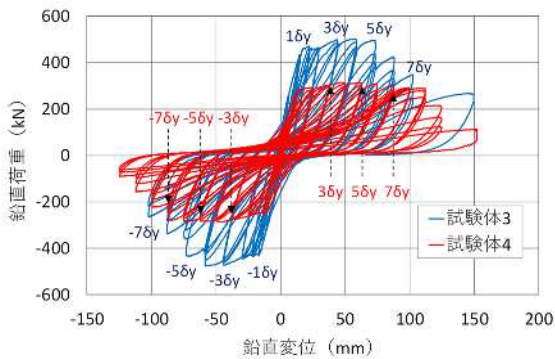


図-5 荷重と変位の関係 (試験体 3, 4)

### (3) 降伏点

図-6 に降伏点荷重の計算値と実験値の比較を示す。計算値は、材料強度と弾性係数に表-2 の値を用いて、継手の影響を考慮せずに鉄道標準に準拠して算出した。図-6 より、計算値と実験値が精度よく一致していることから、閉合鉄筋継手を用いた接合部の降伏点荷重は、継手の影響を無視して継手の無い一般的な RC 部材として算出できる。

図-7 に降伏点変位の計算値と実験値の比較を示す。降伏点変位の計算値は、鉄道標準に準拠して、スタブからの鉄筋の拔出しによる変位と、梁の曲げ変形による変

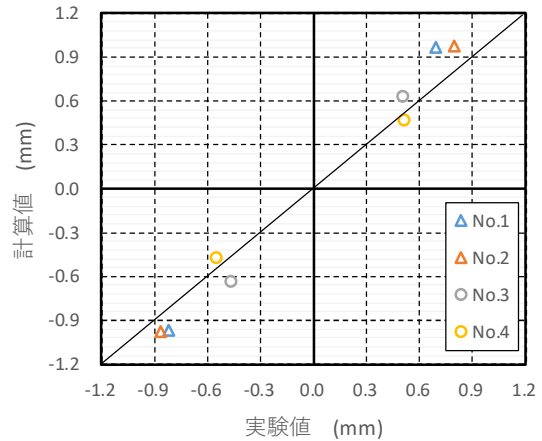


図-8 降伏点での鉄筋拔出し量の計算値と実験値の比較

位を加算して算出した。2 段に配置した鉄筋の拔出し量は、橋梁および高架橋耐震照査の手引き<sup>9)</sup>に従って算出した。梁の曲げ変形による変位は、部材軸方向に分割し各断面での曲率を積分して算出した。図-7 で△のマークで示した接合部にモルタルを打設した試験体 1 と 2 では、実験値は計算値より大きくなった。一方、○のマークで示したコンクリートを打設した試験体 3 と 4 で

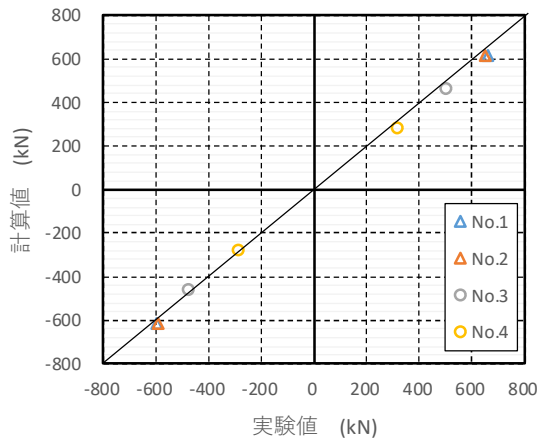


図-9 最大荷重の計算値と実験値の比較

表-3 最大荷重程度を保持できる最大変位

試験体	M点変位(mm)	M点変位(mm)		
		実験値	計算値	exp/cal
試験体 1	正側載荷	46.4(1.5 δy)	73.9	0.63
	負側載荷	-37.8(-1.5 δy)	-73.9	0.51
試験体 2	正側載荷	26.7(1 δy)	96.7	0.28
	負側載荷	-26.1(-1 δy)	-96.7	0.27
試験体 3	正側載荷	58.4(4 δy)	68.5	0.85
	負側載荷	-43.8(-3 δy)	-68.5	0.64
試験体 4	正側載荷	62.2(5 δy)	77.5	0.80
	負側載荷	-74.6(-6 δy)	-77.5	0.96

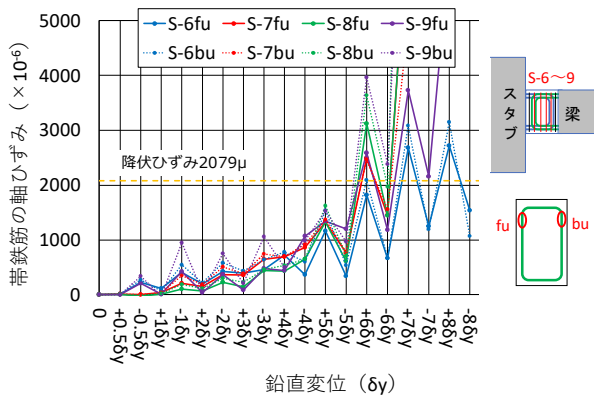


図-10 接合部帯鉄筋のひずみの推移 (試験体 4)

は、同じく実験値の方が計算値を上回っているがその差は小さい。図-8 に降伏点での軸方向鉄筋の拔出し量の計算値と実験値の比較を示す。この図では正側載荷の引張鉄筋拔出し量をプラスで、負側載荷での引張鉄筋拔出し量をマイナスで表記した。実験値はスタブとの接合面の目開き量の計測結果から引張鉄筋位置での目開き量を算出し鉄筋の拔出し量とした。図-8 では、試験体 4 を除いて実験値は計算値よりやや小さいが概ね同等である。したがって、試験体 1 および 2 の降伏点変位が計算値より大きくなった原因は、梁の接合部での曲げ変形が計算値より大きくなったためと考えられる。これは、接合部にモルタルを用いたことにより、コンクリートに比べて

付着強度や破壊エネルギーが小さいことから曲げひび割れの発生とその進行が速くなったためと推察する<sup>8)</sup>。以上のことから、引張鉄筋に SD345 を使用して接合部にコンクリートを打設した場合は、継手の無い一般的な RC 部材として降伏点変位の算出が可能である。

#### (4) 最大荷重

図-9 に最大荷重の計算値と実験値の比較を示す。計算値は、材料強度と弾性係数に表-2 の値を用いて、継手の影響を考慮せずに鉄道標準に準拠して算出した。図-9 より、計算値と実験値が精度よく一致していることから、閉合鉄筋継手を用いた接合部の最大荷重は継手の影響を無視して鉄道標準により算出できる。

#### (5) 最大荷重程度を保持できる変位の最大値

表-3 に渡邊らの研究<sup>10)</sup>を参考に算出した最大荷重程度を保持できる変位の最大値 (以下、M 点) と、鉄道標準に従って継手の影響を無視して算出した M 点変位の計算値を示す。M 点変位までは、部材の耐荷性能が損なわれておらずひび割れ注入や断面修復により早期復旧が可能な状態と定義されている。表-3 より、試験結果は計算値より小さいことが確認できる。これは破壊状況で記述したとおり、試験体 1 と 2 ではモルタルの破壊エネルギーがコンクリートに比べて小さいことが主な要因で、コンクリートを打設した試験体 3 と 4 では、曲げひび割れが限定的に入っていることが影響していると考えている。試験体 4 の荷重低下発生タイミングを示すため、図-10 に接合部に配置した帯鉄筋の上部のひずみの推移を示す。この図より、上部が圧縮側となる正側載荷で帯鉄筋のひずみが大きくなっていることと、帯鉄筋の降伏と荷重低下のタイミングが同じ 6δy であることから、帯鉄筋が圧縮側鉄筋の外側へのはらみ出しを拘束しており、荷重低下は帯鉄筋が降伏して拘束効果が低下することで発生すると考えられる。この圧縮側鉄筋のはらみ出しによって荷重が低下する現象は継手の無い一般的な RC 構造物と同様と考えられる。

### 4. 閉合鉄筋継手を用いた接合部の地震時の性能

鉄道標準に示される耐震性能の照査に用いる構造解析時に閉合鉄筋継手で接合した部材を線材としてモデル化することを前提に、実験結果より M 点変位における引張鉄筋比と部材角の関係を整理した。本章では、モルタルを打設した試験体 1 と 2 の結果を除外した。

#### (1) 降伏点

降伏点の曲げモーメントと変位は閉合鉄筋継手の影響を考慮せずに、一般的な RC 部材として鉄道標準にしたがって算出する。

#### (2) M 点

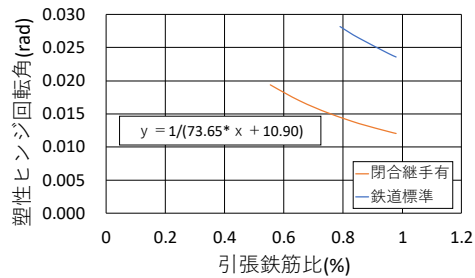


図-11 M点における塑性ヒンジ回転角と鉄筋比の関係

M点の曲げモーメントは最大曲げ耐力として、鉄道標準にしたがって算出する。

M点の変位は、鉄道標準に準じて、柱からの鉄筋の拔出しによる変位と梁の曲げ変形による変位を加算して算出する。梁の曲げ変形は、塑性ヒンジ部以外の曲げ変形と塑性ヒンジ部の曲げ変形を加算して算出する。塑性ヒンジ長は、接合部の長さとした。

a) M点における鉄筋の拔出しによる変位

降伏点における鉄筋の拔出し量が現行の設計式で精度よく再現できていることから、M点における鉄筋の拔出しによる変位も鉄道標準に準拠して算出する。

b) M点における梁の塑性ヒンジ部以外の曲げ変形

梁の塑性ヒンジ部以外の曲げ変形は、継手の影響を受けないため、鉄道標準にしたがって算出する。

c) M点における梁の塑性ヒンジ部の曲げ変形

図-11に、表-3の試験結果のうち正側載荷と負側載荷を比べてM点の変位が小さい試験結果を用いて算出した塑性ヒンジ部の曲げ変形から求めた塑性ヒンジ部の回転角と引張鉄筋比の関係を示す。参考として、鉄道標準にしたがって算出した継手が無い場合の塑性ヒンジ回転角も併記した。引張鉄筋比0.98%と0.55%の間は、鉄道標準に倣って引張鉄筋比に逆比例するとして、M点における塑性ヒンジ部の回転角は、式(1)で求める。ここで帯鉄筋比は、実験で確認した範囲を下限値とした。

$$\text{塑性ヒンジ回転角(rad)} = 1/(73.65 \cdot x + 10.90) \quad (1)$$

x: 引張鉄筋比(%)

ただし、帯鉄筋比は0.42%以上

5. まとめ

閉合鉄筋継手を用いてプレキャスト梁部材を接合した際の地震時の性能を確認するために、実大規模の模型試験体を用いて正負交番載荷試験を実施した。本研究から得られた知見および考察を以下にまとめる。

(1) 降伏曲げモーメントと降伏点変位および最大曲げモーメントは、鉄道標準に準拠して算出した計算値と実験値が概ね等しい結果となり、実験で確認できている範囲において、閉合鉄筋継手がこれらに与える影響は小さいと考えられる。

- (2) 接合部が破壊に至る過程で、継手が無い鉄筋コンクリート部材と比較して特徴的なひび割れの発生・進展を示した。
- (3) 最大曲げモーメントを保持できる程度の変位(M点変位)について、引張鉄筋比と回転角の関係を整理し、曲げモーメントから部材角の推定を可能とした。

参考文献

- 1) 服部尚道, 黒岩俊之, 早川正, 吉住陽行: 鉄道営業線近接・直上におけるHPCa工法を適用したラーメン高架橋の構築, コンクリート工学, Vol.50, No.3, pp.275-281, 2012.3
- 2) 山根秀則, ほか: 鉄道初のフルプレキャストラーメン高架橋を採用した新幹線建設工事—北陸新幹線, 福井開発高架橋—(その1)~(その3), 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-366~VI-368, 2020
- 3) 渡邊明之, 石橋忠良, 栗栖基彰, 西島和男: 補強鉄筋を有する閉合形状に曲げ加工した重ね継手に関する実験的研究, 土木学会論文集 No.791, IV-67, 11-18, 2005.6
- 4) 土井至朗, 佐藤茂美, 益田彰久: 閉合鉄筋継手を用いたPRC桁の連続化, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, V-520, 2021
- 5) 安保知紀, 土井至朗, 田口隆治, 三嶋武典: 閉合鉄筋継手で接合した梁部材のせん断破壊に関する実験的検討, 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会, V-203, 2021
- 6) 土井至朗, 安保知紀, 西村知晃, 中田裕喜: 閉合鉄筋継手で接合した梁部材のせん断挙動に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.619-624, 2022
- 7) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004.4
- 8) 西村知晃, 安保知紀, 松岡茂, 石橋忠良: 閉合鉄筋継手を用いたプレキャスト梁柱接合部の高応力繰返し性能に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.625-630, 2022
- 9) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説[耐震設計](平成24年版)橋梁および高架橋耐震照査の手引き~静的非線形解析による照査~, 平成29年3月
- 10) 渡邊忠朋, 谷村幸裕, 瀧口将志, 佐藤勉: 鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定方法, 土木学会論文集, No.683/V-52, pp.31-45, 2001.8