

閉合鉄筋継手を用いて接合した プレキャスト梁部材の変形性能に関する実験的検討

李 志鵬*1・西村 知晃*2・土井 至朗*1・伴野 由佳*1

概 要

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。本検討では、地震時の性能照査に用いる梁部材の変形性能把握のために、引張鉄筋比と帯鉄筋比を試験パラメータとして実物大規模の試験体を用いて正負交番載荷試験を行った。その結果、一般的なRC部材より変形性能が小さくなることが分かった。また、最大曲げモーメントを保持できる最大の変位における塑性ヒンジ部の回転角は、引張鉄筋比を増加させると小さくなり、帯鉄筋比を増加させると大きくなることが分かった。

キーワード：高架橋，柱梁接合部，正負交番載荷試験，省力化

EXPERIMENTAL STUDY OF DEFORMATION OF PRECAST BEAM MEMBERS JOINED USING CLOSED REBAR JOINTS

Shihou LI*1, Tomomitsu NISHIMURA*2, Shiro DOI*1, Yuka BANNO*1

Abstract

In order to save labor in joining precast members when constructing a rigid frame structure viaduct using the precast construction method, we have developed an approach using closed rebar joints in the column-beam connections. On a full-scale specimen, positive and negative cyclic loading tests were conducted using the tensile bar ratio and rebar ratio as test parameters in order to grasp the performance under deformation of the beam members used for seismic performance verification. The results showed that the deformation of the closed rebar joints is smaller than when using ordinary RC members. The rotation angle of the plastic hinge at the maximum displacement at which the maximum bending moment can be retained was found to decrease with increasing the tensile rebar ratio and to increase with increasing the band rebar ratio.

Key words: viaducts, column-beam connection, positive-negative cyclic loading tests, labor-saving.

*1 Foundation / Structure Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

*2 Manager, Foundation / Structure Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

閉合鉄筋継手を用いて接合したプレキャスト梁部材の変形性能に関する実験的検討

李 志鵬*1・西村 知晃*2・土井 至朗*1・伴野 由佳*1

1. はじめに

建設工事では、生産年齢人口の減少に伴う技能者の高齢化や技能者不足が課題となっている。このような背景の中、鉄筋コンクリート工事では、生産性向上を目的にプレキャスト工法の活用が期待されている。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、接合部の性能やプレキャスト工法の施工性に大きな影響を与える。当社では、施工性に優れたプレキャスト梁部材の接合方法として、閉合鉄筋継手を用いた工法を開発してきた¹⁾。本継手を用いることで、プレキャスト部材の製作精度や現場での施工精度のばらつきを吸収することができ、揚重機による鉛直方向の移動のみで梁の架設が可能のため、施工性の向上が期待できる。

これまでに閉合鉄筋継手を用いて接合した梁部材の力学的特性に関しては、曲げ特性やせん断特性、疲労性能に関する研究^{2)~5)}が行われており、一般的な鉄筋コンクリート部材として現行の設計式で評価できることが分かっている。一方、ラーメン高架橋の柱梁接合部は地震時に塑性化を許容し、エネルギーを吸収することが求められるが、閉合鉄筋継手を用いた当該部の地震時の変形性能に関する研究はなされていない。そこで、筆者らは閉合鉄筋継手を用いたラーメン高架橋の柱梁接合部を模擬した実物大規模の試験体で正負交番載荷試験を行い、一般的な鉄筋コンクリート部材を対象に提案された変形性能算定手法⁶⁾で得られた鉄道高架橋の地震時の変形性能⁷⁾に比較して、最大曲げモーメントを保持できる変位の最大値（以下、M点変位と呼ぶ）が小さくなることを確認した⁸⁾。今回は、地震時の変形性能を考慮

した構造設計を可能とするために、変形性能に影響を与えると考えられる引張鉄筋比と帯鉄筋比をパラメータとした試験を行い、M点変位における塑性ヒンジ部の回転角と引張鉄筋比および帯鉄筋比の関係を整理した。

2. 閉合鉄筋継手の概要

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。梁部材の架設後、接合部に支圧補強筋および帯鉄筋を配置し、型枠を設置してコンクリートを打ち込む。

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

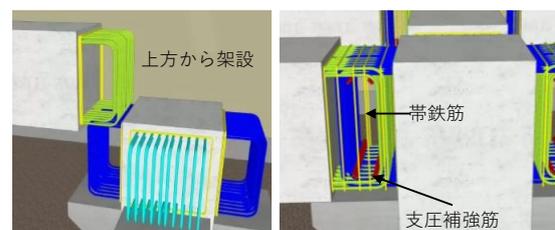


図-1 工法概要

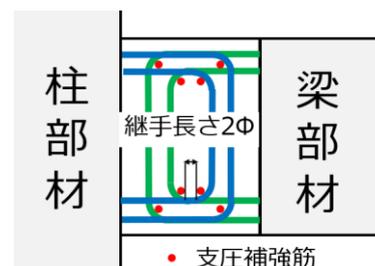


図-2 閉合鉄筋継手の概要

*1 土木本部 エンジニアリング部 基礎・構造グループ

*2 土木本部 エンジニアリング部 基礎・構造グループ グループリーダー

することで支圧耐力が向上し、継手の長さ 2ϕ (ϕ :軸方向鉄筋の鉄筋径)以上で十分な耐力が発揮できる構造となっている²⁾。

3. 地震時変形性能確認試験

3.1 試験概要

閉合鉄筋継手を用いて接合したプレキャスト梁部材の地震時の変形性能を確認するため、実物大の70%程度のスケールの試験体を製作して正負交番載荷試験を実施した。図-3に試験概要図を示す。プレキャスト部材の梁と柱を模擬したスタブは工場で作成し、鉛直打継ぎ面はワイヤーブラシによって目粗しを施した。スタブを反力壁に固定し、梁部材を水平に設置して、接合部に高流動コンクリートを打ち込んで接合した。梁部材の寸法は、幅が450mm、高さが1000mm、閉合鉄筋継手の接合部の長さが600mm、軸方向鉄筋は2段に配置した。

試験体は4体製作していずれも曲げ破壊型で設計した。表-1に試験体諸元を示す。鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物⁷⁾(以下、鉄道標準と呼ぶ)の変形性能算定方法に倣って、試験パラメータを引張鉄筋比と帯鉄筋比とし、実構造物の鉄筋比の範囲を概ね網羅できるように設定した。試験体3は、この関係の検証を目的として、引張鉄筋比が試験体1と2の中間となるように設計し、最大荷重を保持できる範囲まで載荷を行った。試験体4は帯鉄筋比と塑性ヒンジ回転角の関係を把握するために、試験体1に対して帯鉄筋比が2倍となるように設計した。図-4に試

験体1の接合部の配筋概要図を示す。いずれの試験体も、内側軸方向鉄筋の直線部の重ね長さを 2ϕ とした。支圧補強鉄筋は、軸方向鉄筋と同径1本としたが、試験体1と4の外側軸方向鉄筋に対しては内側軸方向鉄筋との鉄筋の空きの制約より、D19を2本配置して軸方向鉄筋と同面積程度とした。

載荷方法は、鉛直方向の正負交番載荷とし、梁には軸方向力を作用させない条件とした。鉛直上向きを正側載荷とし、図-3青色で示す2段配置した軸方向鉄筋のいずれかが降伏ひずみに達した時点の載荷点位置の鉛直変位を $18y-1$ 、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 $18y-2$ とした。鉛直方向下向きとなる負側載荷についても、同様に $-18y-1$ と $-18y-2$ 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 $18y$ とした。その後は、 $18y$ 、 $28y$ と整数倍毎に変位を漸増させて、各目標変位で正負3回繰返し載荷を行った。なお、試験体2~4の目標変位の基準となる $18y$ は試験体1に合わせた。

3.2 引張鉄筋比の影響

写真-1に試験体3の最大荷重時- $48y-3$ における接合部の損傷状況の写真を示す。この写真の丸印

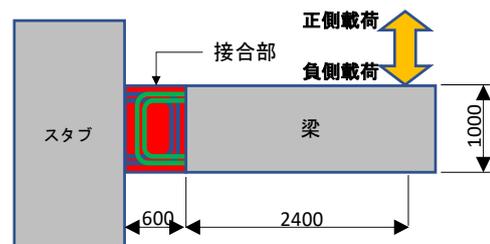


図-3 交番載荷試験概要図

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	軸方向鉄筋 引張鉄筋比	帯鉄筋 帯鉄筋比	支圧 補強鉄筋	コンクリート強度 上:プレキャスト 下:接合部 (N/mm ²)	鉄筋降伏強度 上:軸方向鉄筋 下:帯鉄筋 (N/mm ²)	耐力比 Vyd/Vmu
1	450× 1000	920	3000	3.26	8本-D25 0.98%	D10@75 0.42%	外側:2-D19 内側:1-D25	36.3 58.6	382 387	1.79
2	↑	↑	↑	↑	8本-D19 0.55%	↑	外側:1-D19 内側:1-D19	35.3 55.5	399 403	2.77
3	↑	↑	↑	↑	8本-D22 0.75%	↑	外側:1-D22 内側:1-D22	36.0 65.7	371 377	2.30
4	↑	↑	↑	↑	8本-D25 0.98%	D13@65 0.87%	外側:2-D19 内側:1-D25	34.4 56.9	391 379	3.22

注) Vyd:せん断耐力, Vmu:曲げ耐力から求まる最大せん断力

は支圧補強鉄筋の位置を示している。接合部では、荷重初期に支圧補強鉄筋付近から曲げひび割れが発生し、荷重の進行によりひび割れが進展した。このひび割れの内、スタブ側のひび割れはスタブに向かって斜め方向に進展する一方、梁側のひび割れはスタブと反対の方向に斜めに進展し、支圧補強鉄筋で囲まれた範囲にひび割れは確認されなかった。また、3δyの正側および負側荷重でそれぞれ圧縮側の軸方向鉄筋に沿って水平方向のひび割れが発生し、4δyの荷重でひび割れ幅が拡大した。接合部に配置した帯鉄筋の鉛直部の上下部に貼付したひずみゲージがそれぞれ4δyの正負荷荷時に降伏ひずみに達した。接合部とスタブまたは梁との接合面にはせん断ずれは確認されなかった。これらの損傷状況は、試験体1と2でも同様に確認され、閉合鉄筋継手を用いた接合部における特徴的なひび割れの発生と進展であった。

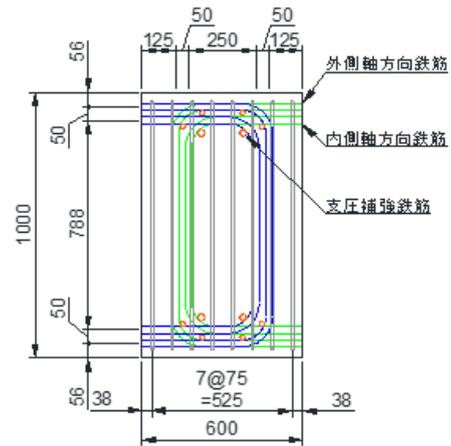


図-4 接合部配筋概要図 (試験体 1)

図-5に試験体1,2の荷重と変位の関係を示す。ここで、横軸は鉛直変位、縦軸は荷重値と降伏荷重の比とした。また、既往の研究⁹⁾を参考に、同一変位での2サイクル目以降の繰り返し荷重において顕著に荷重低下した箇所を矢印で示した。正側と負側荷重で先に荷重が低下した変位を試験体1と2と比較すると、引張鉄筋比の大きい試験体1の方が小さかった。

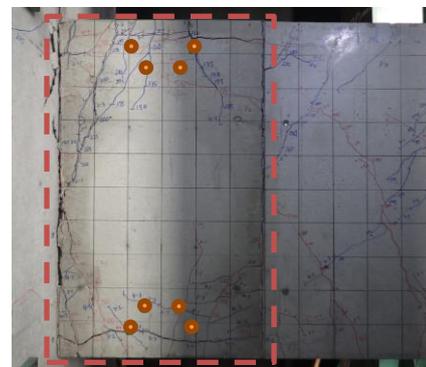


写真-1 接合部の損傷状況(試験体 3 -4δy -3)

3.3 帯鉄筋比の影響

図-6に試験体1と4の荷重と変位の関係と荷重低下の箇所を示す。試験体1は負側荷重の-4δy-3で荷重が低下しているが、接合部の帯鉄筋を増加させた試験体4では、同一変位で荷重低下が確認されなかった。また、荷重低下状況は試験体4の方が緩やかであった。

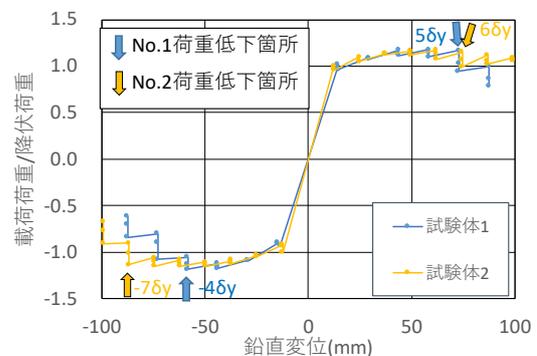


図-5 荷重と変位の関係(試験体 1, 2, 3)

写真-2に試験体1と4の最大荷重時付近-4δy-3における接合部の損傷状況の写真を示す。接合部の損傷状況を比較すると、軸方向鉄筋に沿ったひび割れの幅は試験体1の方が大きくなっていることが確認できる。帯鉄筋比の大きい試験体4のひび割れの進行は、試験体1よりもわずかに遅かった。どちらの試験体も接合面でのせん断ずれは確認されなかった。

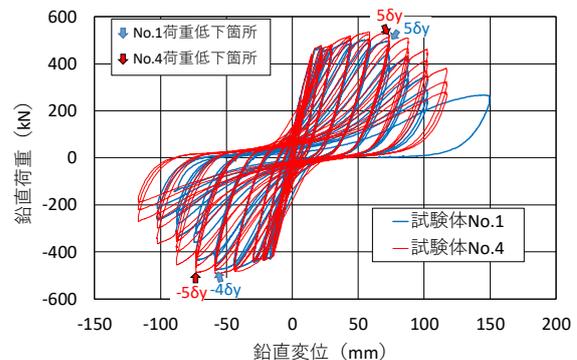


図-6 荷重と変位の関係 (試験体 1, 4)

図-7 に試験体 4 の接合部の帯鉄筋の鉛直部の上部に貼付したひずみゲージのひずみの推移を示す。帯鉄筋の上部に貼付したひずみゲージは圧縮側となる正側荷重時にひずみが大きくなる傾向を示した。下部に貼付したひずみゲージは上部に貼付したひずみゲージとは逆の挙動を示した。荷重の進行に伴ってひずみが徐々に増大しており、4δy-3 で降伏ひずみに達した。その後、5δy-3 で荷重が低下した。表-2 に、各試験体で圧縮側軸方向鉄筋に沿ったひび割れの発生、帯鉄筋の降伏、荷重が低下した荷重ステップを示す。圧縮側軸方向鉄筋に沿ったひび割れ発生後、概ね 1δy から 2δy で帯鉄筋の降伏低下が発生し、その後、直ちに荷重低下が発生した。

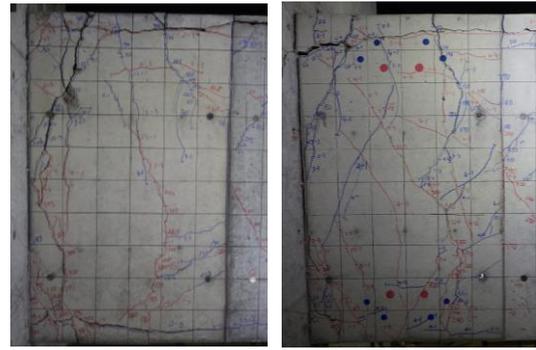
これらのことから、接合部では引張力作用時に降伏した軸方向鉄筋が交番荷重で圧縮力を受ける際にはらみ出すことにより鉄筋に沿ったひび割れが発生した。鉄筋のはらみ出しを帯鉄筋が抑制することで荷重を保持し、帯鉄筋が降伏すると鉄筋のはらみ出しを抑制できなくなり荷重低下にいったと考えられる。帯鉄筋量を増加させることで、M 点変位が大きくなったと考えられる。

3. 4 M点変位の実験値と計算値の比較

表-3 に、M 点変位の実験値と計算値の比較を示す。実験値は荷重低下が発生した荷重ステップの 1δy 前の変位とし、計算値は一般的な RC 部材として鉄道標準 η にしたがって算出した。全ての実験値は計算値より小さいことが確認された。このことから、閉合鉄筋継手で接合した部材の M 点変位は一般的な RC 部材と同等に扱うことができないことが分かった。

4. 塑性ヒンジ回転角と引張鉄筋比および帯鉄筋比の関係

閉合鉄筋継手で接合した部材を鉄道標準 η にしたがって性能照査するために、実験値を用いて M 点変位における塑性ヒンジ部の回転角と帯鉄筋比および引張鉄筋比の関係を整理した。表-4 に、実験値から求めた塑性ヒンジ部の回転角 θ_{pm} を示す。 θ_{pm} は、鉄道標準 η に倣って、式(1)および式



試験体 1 試験体 4

写真-2 接合部の損傷状況
(試験体 1,4 : 4 δ y-3)

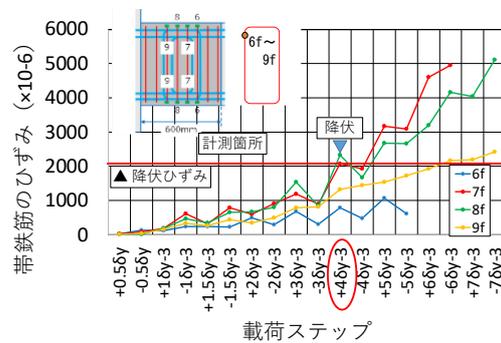


図-7 接合部帯鉄筋のひずみの推移
(試験体 4)

表-2 各イベント発生の荷重ステップ

試験体	側荷重	圧縮側鉄筋に沿ったひび割れ発生	帯鉄筋降伏	荷重低下
		試験体 1	正側荷重: 2 δ y 負側荷重: -2 δ y	※1
試験体 2	正側荷重: 3 δ y 負側荷重: -4 δ y	5 δ y -5 δ y	6 δ y -7 δ y	
試験体 3	正側荷重: 3 δ y 負側荷重: -3 δ y	4 δ y -4 δ y	※2 ※2	
試験体 4	正側荷重: 3 δ y 負側荷重: -4 δ y	4 δ y -5 δ y	5 δ y -5 δ y	

※1: 未計測, ※2: 未確認

表-3 M点変位の実験値と計算値の比較

試験体	側荷重	M点変位(mm)		
		実験値	計算値	exp/cal
試験体 1	正側荷重: 58.4(4 δ y) 負側荷重: -43.8(-3 δ y)	68.5	-68.5	0.85 0.64
試験体 2	正側荷重: 62.2(5 δ y) 負側荷重: -74.6(-6 δ y)	77.5	-77.5	0.80 0.96
試験体 3	正側荷重: 54.3(4 δ y) 負側荷重: -54.3(-4 δ y)	78.5	-78.5	0.69 0.69
試験体 4	正側荷重: 58.4(4 δ y) 負側荷重: -58.4(-4 δ y)	98.2	-98.2	0.59 0.59

表-4 各試験体の試験値および算出値

	試験体 1	試験体 2	試験体 3	試験体 4
Pt (%)	0.98	0.55	0.75	0.98
Pw (%)	0.42	0.42	0.42	0.87
δ_m (mm)	43.8	62.1	54.3	58.4
δ_{m1} (mm)	6.36	4.50	5.13	10.57
δ_{mb} (mm)	4.93	5.37	5.21	5.73
δ_{mp} (mm)	32.5	52.2	44.0	42.1
θ_{pm} (rad)	0.0120	0.0193	0.0163	0.0156

(2)を用いて算出した。

$$\delta_{mp} = \delta_m - (\delta_{m1} + \delta_{mb}) \quad (1)$$

$$\theta_{pm} = \delta_{mp} / (L_a - L_p / 2) \quad (2)$$

ここに、 δ_{mp} ：塑性ヒンジ部の曲げ変形

δ_m ：M点変位の実験値

δ_{m1} ：軸方向鉄筋の抜出しによる変位

δ_{mb} ：塑性ヒンジ区間を除く梁の曲げ変形

L_a ：せん断スパン (3000mm)

L_p ：塑性ヒンジ長 (600mm)

ここで、 δ_m は正側または負側載荷の結果を比べて小さい値を採用した。 δ_{m1} と δ_{mb} は鉄道標準 κ にしたがって算出した。塑性ヒンジ長は、閉合鉄筋継手の中心が塑性ヒンジの中心であると考え、接合部の長さとした。

図-8に、試験体1と4の実験結果から求めた塑性ヒンジ部の回転角と帯鉄筋比の関係を示す。関係式は、鉄道標準 κ に倣って一次関数と考え式(3)を求めた。

$$\theta_{pm} = 0.00801 * pw + 0.00865 \quad (3)$$

ここに、 pw ：帯鉄筋比(%)

図-8より、一般的なRC部材と同様に、帯鉄筋比が大きくなると塑性ヒンジ部の回転角が大きくなることが分かった。

図-9に、試験体1,2,3の実験結果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。鉄道標準 κ にしたがって算出した結果も合わせて示す。関係式は、鉄道標準 κ に倣って逆比例するとして最小二乗法を用いて式(4)を求めた。

$$\theta_{pm} = 1 / (73.65 * pt + 10.90) \quad (4)$$

ここに、 pt ：引張鉄筋比(%)

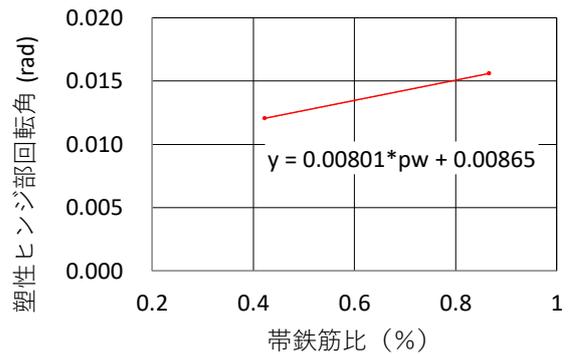


図-8 塑性ヒンジ部の回転角と帯鉄筋比の関係

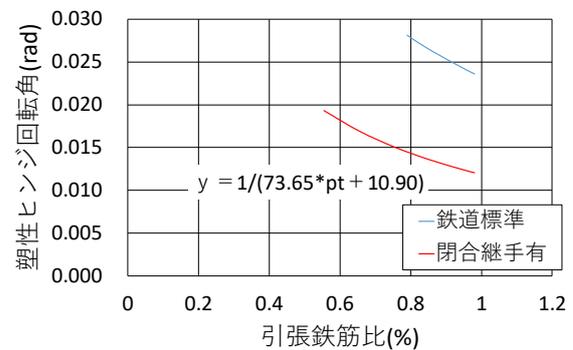


図-9 塑性ヒンジ部の回転角と引張鉄筋比の関係

図-9より、引張鉄筋比が大きくなると塑性ヒンジ部の回転角が小さくなることが分かった。

5. まとめ

閉合鉄筋継手を用いて接合したプレキャスト梁部材の変形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) 閉合鉄筋継手を用いたプレキャスト部材の接

合部は、継手のな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と進展を示した。

- (2) M 点変位は一般的な RC 部材と比較して小さいことが分かった。
- (3) 一般的な鉄筋コンクリート部材と同様に、引張鉄筋比が大きくなると M 点変位における塑性ヒンジ回転角(θ_{pm})が小さくなり、また接合部の帯鉄筋量を増加させて圧縮側鉄筋のはらみ出しを抑制することで、 θ_{pm} が増加することが分かった。

参考文献

- 1) 安保知紀, 鈴木裕隆, 田所敏弥, 石橋忠良: 5 日での構築を目指したプレキャスト鉄道高架橋の開発, 月刊セメント・コンクリート, 2021 年 6 月号, Vol.892
- 2) 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
- 3) 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
- 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, 2021.9
- 5) 田口隆治, 西村知晃, 中田裕喜, 安保知紀: 閉合鉄筋継手を用いて接合した梁部材の疲労特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.625-630, 2023.7
- 6) 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
- 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地震時の性能に関する実験的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.619-624, 2023.7