

RC 鉄道高架橋のプレキャスト化に向けた柱梁接合部の開発

伴野 由佳*1・田口 隆治*2・西村 知晃*3・安保 知紀*4

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略化を目的に、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、接合部がモルタルのケースでは早期に荷重が低下することを確認した。そこで、地震時の性能向上を目的に、数値解析を用いて方策を検討し、接合部をコンクリートに変更することにした。検証のため再び交番載荷試験を行い、モルタルの場合に比べて地震時の性能が向上し、一定の変形性能を有する結果を得た。

キーワード：閉合鉄筋継手，変形性能，交番載荷試験，地震時性能

DEVELOPMENT OF COLUMN-BEAM CONNECTIONS
FOR PRECAST RC RAILWAY VIADUCTS

Yuka BANNO *1, Ryuuji TAGUCHI *2, Tomoaki NISHIMURA*3・Tomorori ABO*4

Abstract

In order to reduce the amount of work required to join precast members when constructing a rigid frame viaduct using the precast method, we developed a method using closed rebar joints in the beam-column connections. The authors conducted a test applying positive and negative loads alternately to confirm the seismic performance, and verified that in the case of joints made with mortar, the load decreases early.

Therefore, we studied measures for a better seismic performance and decided on changing the joints to those made with concrete. Alternating loading tests were conducted again for review, which demonstrated that the joint of concrete, compared with the one made of mortar, increases seismic performance, demonstrating a certain degree of deformation performance.

Keywords: Closed rebar joint, Deformation performance, Alternating loading test and times of seism, Seismic performance

*1 Foundation / Structure Group, Research & Development Center

*2 Civil Engineering Department, Civil Engineering Division

*3 Manager, Foundation / Structure Group, Research & Development Center

*4 Deputy General Manager, Research & Development Center

RC 鉄道高架橋のプレキャスト化に向けた柱梁接合部の開発

伴野 由佳*1・田口 隆治*2・西村 知晃*3・安保 知紀*4

1. はじめに

建設業界では、近年の高齢化に伴う労働不足に対して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。柱と梁の接合部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¹⁾がある。ハーフプレキャスト工法は、ハーフプレキャストとすることで部材を軽量化し、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、部材架設後に現場で鉄筋・型枠の組立、中詰めコンクリートの打設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場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²⁾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、その後の現場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、現場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。また梁部材の接合作業では、軸方向鉄筋を水平に差し込む必要があるため、梁両

端の接合が終了してラーメン構造が完成するまで梁部材を受ける支保工の設置が必要となる。そのため、現地での施工性向上のためには、施工誤差の許容拡大と仮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、**図-1**に示すように、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ある程度吸収し、揚重機による鉛直方向の吊り込み作業が可能なため、施工性の向上が期待できる。

閉合鉄筋継手の既往の研究^{3)~5)}では、未だ地震時の性能については十分な検討が行われていない。そこで本研究では、閉合鉄筋継手を用いて梁部材を接合した実物大規模の試験体を製作し、地震時の性能の確認試験と数値解析を行ったので、得られた知見を報告する。

2. 閉合鉄筋継手の概要

2.1 工法概要

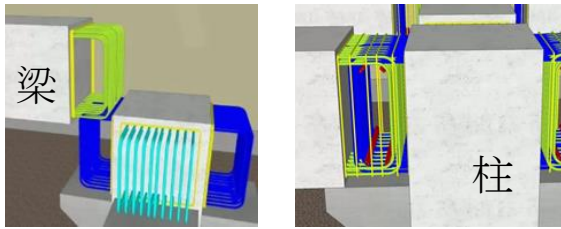
閉合鉄筋継手の概要図を**図-2**に示す。この継手は、コの字状に折り曲げた鉄筋を重ね合わせ、鉄筋の隅角部に支圧補強筋を配置することで支圧耐力が向上し、短い継手長さで十分な耐力が発揮できる構造となっている³⁾。この継手を用いることで、柱側面から突出したコの字鉄筋と梁端部から突出した同様のコの字鉄筋を重ね合わせるように、梁部材を上方から架設することを可能とした。さらに、この継手の特徴は、継手長さを 2ϕ (ϕ : 鉄筋径) 以上確保できれば、継手区間で

*1 研究開発センター 基礎・構造グループ

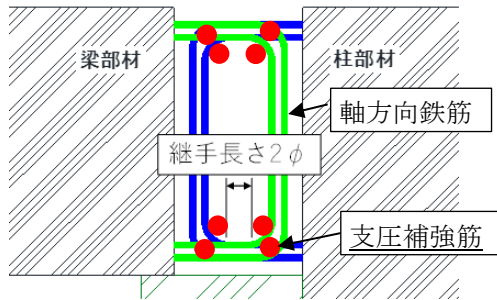
*2 土木本部 土木部

*3 研究開発センター 基礎・構造グループ グループリーダー

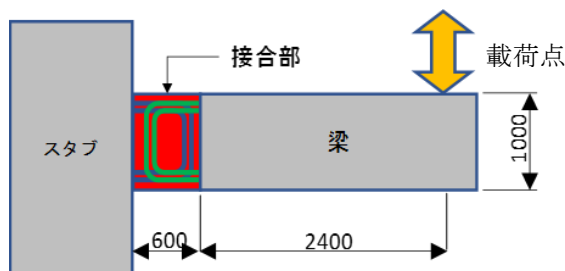
*4 研究開発センター 副所長



図－1 閉合鉄筋継手を用いたプレキャスト部材の接合工法の概要



図－2 閉合鉄筋重ね継手の概要



図－3 交番荷重試験体概要

の施工誤差の調整が可能であることである。また、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。

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 継手部の支圧補強筋および帯鉄筋を組み立てる。
- 手順4 型枠を組み立て、コンクリートあるいはモルタルを打ち込む。

2. 2 閉合鉄筋継手の力学特性

(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。そのため閉合鉄筋継手は、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 2ϕ 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³⁾。また軸方向鉄筋を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⁴⁾。

(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⁵⁾。

(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る。疲労特性は、閉合鉄筋継手で接合した梁試験体を用いて、高サイクル疲労試験により確認する予定である。

(4) 地震時の性能

閉合鉄筋継手で接合した梁部材の地震時の性能については、次章以降で詳述する。

3. 地震時の性能確認試験

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、性能確認試験を実施した。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試験とし、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壁に固定した。荷重方法は、鉛直上向きを正側荷重とし、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

表-1 試験体諸元

試験体	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	接合部 帯鉄筋	支圧 補強筋	コンクリート 強度 (N/mm ²)	接合部 モルタル強度 (N/mm ²)
No.1	450×1000	920	3000	3.26	D25×4本 ×2段 S490	D10@75 SD345	D25×1本 D19×2本	44.7	56.2
No.2	450×1000	920	3000	3.26	D25×4本 ×2段 S490	D13@75 SD345	D19×1本 D19×1本	44.6	55.8

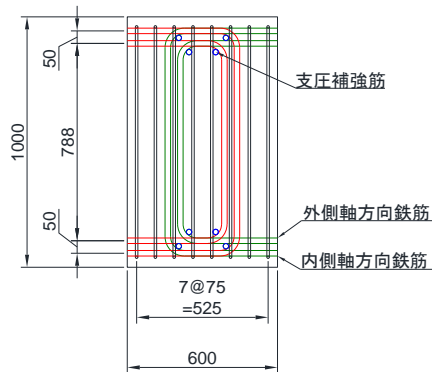


図-4 接合面配筋概要

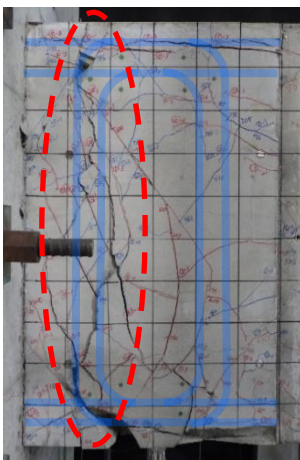


写真-1 試験体 No.1 2.5 δ y の損傷状況

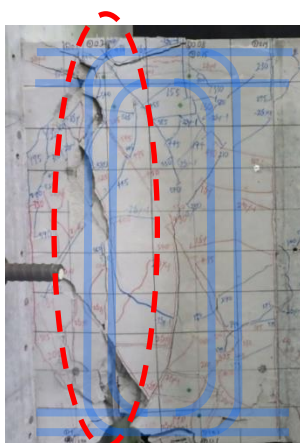


写真-2 試験体 No.2 2.5 δ y の損傷状況

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荷についても、同様に $-1\delta y-1$, $-1\delta y-2$ 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。その後は、 $1\delta y$, $1.5\delta y$, $2\delta y$ と 0.5 倍毎に変位を漸増させて、各 δy で正負 3 回繰返し荷荷をおこなった。

3.2 試験体諸元

試験体は曲げ破壊型とした。試験体は、スタブと梁部材を所定の位置に配置したのち、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て一体化した。プレキャスト部材の接合部は、ワイヤーブラシによって目粗しを施した。

接合部の配筋概要図を図-4に示す。試験のパラメータは、表-1に示すように支圧補強筋量と帯鉄筋量とした。

3.3 試験結果

(1) 損傷状況

写真-1に試験体 No.1, 写真-2に試験体 No.2 の荷重低下後の $2.5\delta y$ の接合部損傷状況を示す。いずれの試験体も梁の軸方向鉄筋の鉛直部付近に発生したひび割れの幅が徐々に拡大していき、荷重が低下した。荷重の低下は、縦方向のひび割れの発生により、せん断力を伝達できなくなったためであると推察される。また、今回の試験では、帯鉄筋量や支圧補強鉄筋の違いによる有意な差はみられなかった。

(2) 荷重-変位関係の計算値との比較

図-5に、実験から得られた荷重変位関係と鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造

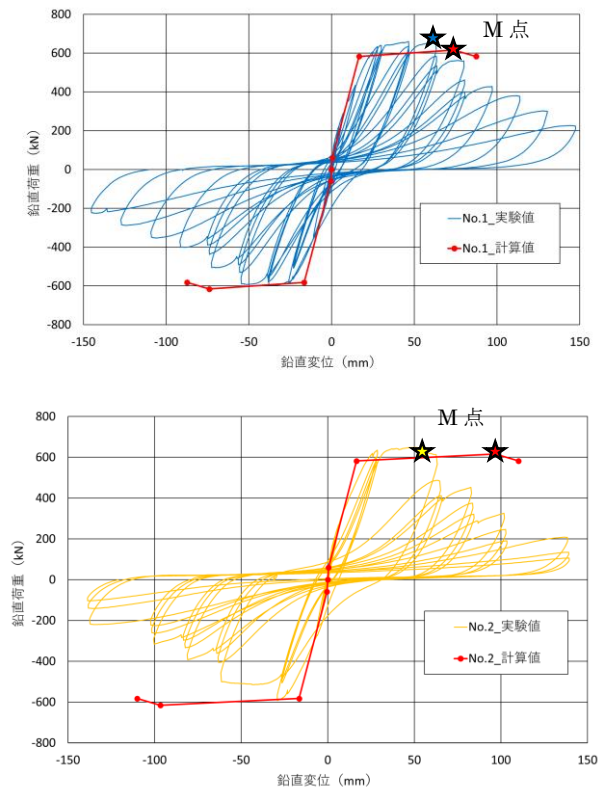


図-5 荷重-変位関係の計算値との比較

物⁶⁾(以後、「鉄道標準」と記す。)に従って算出した計算値を示す。いずれの試験体でも、最大荷重程度を維持できる最大変位(M点)が計算値よりも実験値は小さい。また、No.2はNo.1より計算値に対する実測値の荷重の低下がわずかに早くなった。

4. 数値解析による検討

4.1 数値解析の概要

性能確認試験では、鉄道標準で算出した計算値より早期に荷重が低下したことから、試験体 No.1 を対象として数値解析による検証を行った。

数値解析は、材料非線形モデルに基づく三次元 FEM 解析を COM3 (研究版) を使用して行った。解析モデル図を図-6 に示す。また、主な解析条件を以下に記す。

- ・ X 方向を梁部材軸方向, Y 方向を荷重直交方向, Z 方向を荷重方向と定義し, 試験体を 1/1 スケールでモデル化した。
- ・ 材料特性や構造形状, 鉄筋配置に応じた非線形

要素としてモデル化した。ただし、荷重部周辺は弾性要素とした。また、モルタル充填部とプレキャスト部との境界には、鉄筋の伸びだし等の局所的な変形を考慮するための接合要素を定義した。

- ・ 鉄筋は、3 方向の要素鉄筋比としてモデル化した。鉄筋配置部には RC 要素を配置し、Tension Stiffening を材料構成則に基づいて設定した。鉄筋が配置されていない領域には無筋コンクリート要素を適用した。なお、接合部の閉合鉄筋は鉄筋量のみをモデル化した。
- ・ 破壊エネルギーは、コンクリート標準示方書⁷⁾に示される推定式で算出した。
- ・ かぶりコンクリートの剥落、主鉄筋の座屈や破断は考慮していない。
- ・ 境界条件は、モデル端部 (X=0) を固定した。

4.2 試験結果の再現性

最大荷重を示した鉛直変位付近 ($\delta = 50\text{mm}$) のモデルの中央断面における最大主ひずみのコンター図を図-7 に示す。解析においては、荷重が進むにつれて、接合面 (特にフーチング側) での損傷と開口が大きくなっていき、最終的には基部での損傷が過大となってせん断力を伝達できなくなり、耐力低下に至った。図-8 に最大荷重程度を維持できる最大変位 (M 点) $\delta = -66\text{mm}$ における変形図を示す。一般的な RC 塑性ヒンジとは破壊形状が異なり、鉛直方向に貫通するような破壊面が形成された現象は実験と類似する挙動と言え、数値解析は試験の破壊を再現できていると考える。

また、荷重-変位関係の再現結果を図-9 に示す。解析結果の鉛直荷重-鉛直変位関係では、最大荷重付近までは概ね実験結果と整合した。

以上の結果から、数値解析モデルは概ね試験結果を再現できていると考える。

4.3 試験結果の再現性

実験結果および数値解析の結果より、特に軸力が作用しない接合部の変形性能には、せん断伝達耐力の向上が重要と考えた。ここでは、接合部の破壊エネルギーを向上させるために、接合部の材

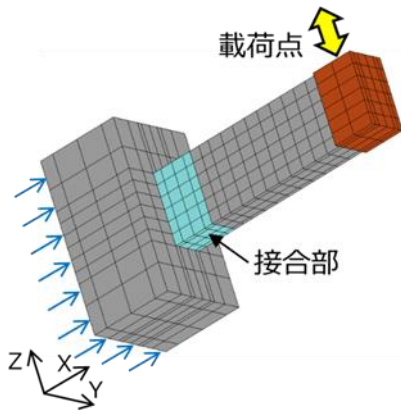


図-6 解析モデル図

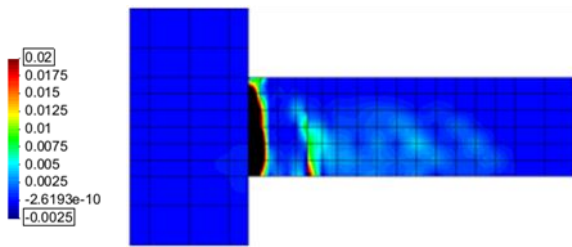


図-7 最大主ひずみコンター (δ=50mm 時)

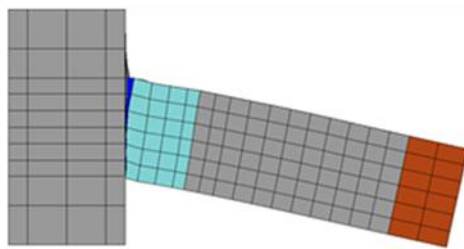


図-8 変形図 (×10倍) δ=66mm 時

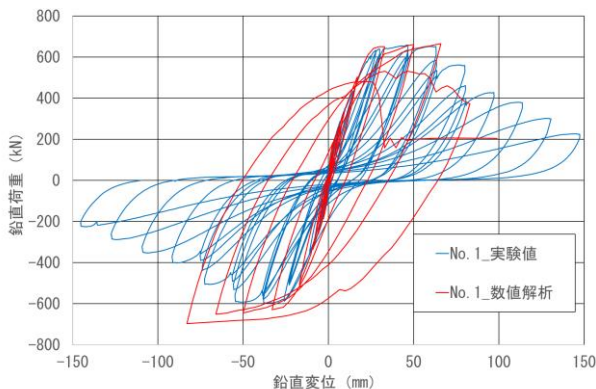


図-9 試験体 No.1 荷重-変位関係の再現結果

料を無収縮モルタルから普通コンクリートに変更したケースについて検討を行った。解析結果の鉛直荷重-鉛直変位の関係を図-10に示す。接合部材料の変更により破壊エネルギーが大きくなると、荷重低下の発生が遅くなり、地震時の性能が向上する可能性があることを確認した。

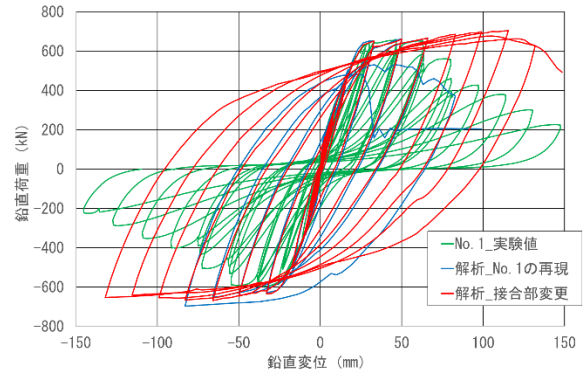


図-10 接合部材料の変更による荷重-変位関係の再現結果

5. 地震時の性能確認試験 (試験体 No. 3)

5. 1 性能確認試験 No. 3 試験概要

接合部材料の変更による地震時の性能の向上を検証するため、接合部の材料を無収縮モルタルから普通コンクリートに変更した試験体 No.3 を製作し性能確認試験を行った。荷重方法は試験体 No.1, No.2 と同様である。試験体の諸元を表-2に示す。引張鉄筋は実構造物で採用されることが多いSD345を使用し、その他は試験体 No.1 に合わせた。

5. 2 試験結果

(1) 損傷状況

写真-3に試験体 No.3の最大荷重付近4δyの接合部損傷状況を示す。試験体 No.3 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。試験体 No.3 は試験体 No.1 の性能確認試験より縦方向のひび割れの発生が遅く、ひび割れが顕著となるのも遅かった。

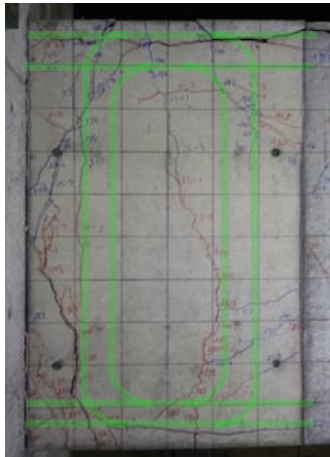
(2) 荷重-変位関係の計算値との比較

図-11に、実験から得られた荷重変位関係と鉄道標準に従って算出した計算値を示す。性能確認試験においても継手の無い場合の変形性能に近づいた。さらに、M点以降の荷重の低下も緩やかとなった。

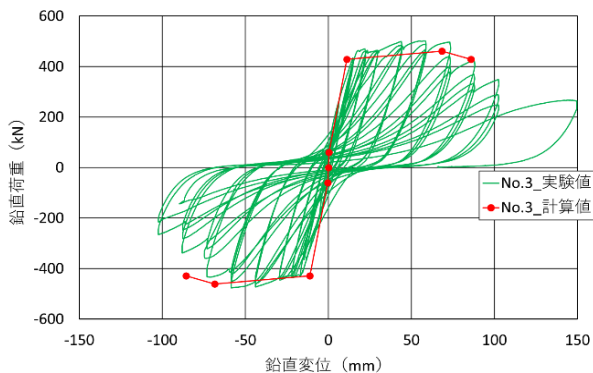
6. まとめ

表－2 試験体諸元

試験体	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	接合部 帯鉄筋	支圧 補強筋	コンクリート 強度 (N/mm ²)	接合部 コンクリート 強度 (N/mm ²)
No.3	450×1000	920	3000	3.26	D25×4本 ×2段 S345	D10@75 SD345	D25×1本 D19×2本	36.3	58.6



写真－3 試験体 No.3 4δy の損傷状況



図－11 試験体 No.3 荷重－変位関係の計算値との比較

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、実大規模の試験体を用いた正負交番載荷試験と数値解析を実施した。本研究から得られた知見を報告する。

- (1) 柱梁接合部の曲げ降伏荷重と最大荷重は鉄道標準に準拠して算出した値と同等であった。
- (2) 接合部の材料にコンクリートを用いることでモルタルの場合に比べて地震時の性能が向上

した。

今後は、地震時の性能を定量的に評価できるように実験及び数値解析を進める予定である。

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, pp.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) 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
- 7) 土木学会: 2017年制定 コンクリート標準示方書 [設計編], 2018.3