

報告 部分プレキャスト部材を用いたボックスカルバート構築工法の鉄道構造物への適用に関する検討

笠倉 亮太*1・黒岩 俊之*2・福田 俊*3・岸 秀樹*4

要旨：筆者らは、道路構造物を対象とし、大型ボックスカルバートの側壁および頂版を部分的にプレキャスト部材に置き換える躯体構築工法を開発し、実施工への適用を行っている。本工法は、道路構造物だけでなく鉄道構造物においても、生産性の向上に寄与できると考えられ、本報告では、過去に行った正負交番載荷試験の結果を用いて、鉄道構造物に本工法を適用した場合の性能検討を実施した。その結果、鉄道構造物においても、現場打ちコンクリートにて構築したボックスカルバートと同様な評価手法とすることで、本工法の部材特性を評価できることを確認した。

キーワード：ボックスカルバート、プレキャスト、機械式継手、塑性ヒンジ、あき重ね継手

1. はじめに

近年、建設業界の取り巻く社会情勢から、「i-Construction」に代表される建設業の生産性向上施策が推進されている^{例え1)}。コンクリート工においては、規格の標準化による生産性の向上が着目されており、プレキャスト製品等によるコスト、工期の削減および生産性の向上が注目されている²⁾。ここで、ボックスカルバートでは、以前からプレキャスト製品を用いた躯体構築が行われているが、運搬車両、揚重機等の施工機械や施工ヤードの制約から、内幅 6.0m 程度の中型以下のボックスカルバートに適用が限られてきた。そこで、筆者らは大型のボックスカルバートに対して、側壁および頂版を部分的にプレキャスト部材に置換えた躯体構築を採用することで、施工機械等の制約下においても、プレキャスト化による生産性向上を図るボックスカルバートの構築工法を開発し^{3)~6)}、実施工への適用を行っている⁷⁾。

本工法は、道路ボックスカルバートへの適用を念頭に、開発を行っており、既往の研究^{3)~6)}に基づく本工法の適用範囲を設け、一部の仕様規定を設けることで、道路橋示方書・同解説^{8)・9)}により RC 構造物と同様な手法で評価できることを確認している⁶⁾。また、部分プレキャスト構造を採用することで、後述の鉄筋組立、型枠組立・解体を削減するとともに、頂版の支保工を大幅に削減することで、施工中の頂版下の空間を有効に使える利点がある⁵⁾。このため、本工法は、道路構造物だけでなく、狭隘な箇所での施工が求められることが多い鉄道構造物にも有効であると考えられる。

そこで、本報告では、筆者らが過去に実施した正負交番載荷試験の結果を用いて、鉄道構造物に適用した場合の性能照査に関する検討について報告する。

2. 工法概要

本工法の概要図を図-1 に示す。本工法は、現場打ちボックスカルバートの側壁および頂版を部分的にプレキャスト部材に置き換えた Partial PreCast (以降、PPCa) 構造である。現場打ちコンクリートにより構築した底版上に、軸方向鉄筋、せん断補強鉄筋および配力鉄筋が内包された部分プレキャスト側壁部材を配置し、横断方向にモルタル充填継手にて部分プレキャスト部材を接合する。縦断方向は、隣接する部分プレキャスト部材を架橋する配力鉄筋を配置した後、中詰めコンクリートを充填する。頂版は、下側軸方向鉄筋、下側配力鉄筋、せん断補強鉄筋、ハンチ鉄筋が内包された部分プレキャスト頂版部材を側壁上に設置し、モルタル充填継手により側壁と接合後、上側軸方向鉄筋、上側配力鉄筋を配置し、中詰めコンクリートを打込みボックスカルバートを構築する。

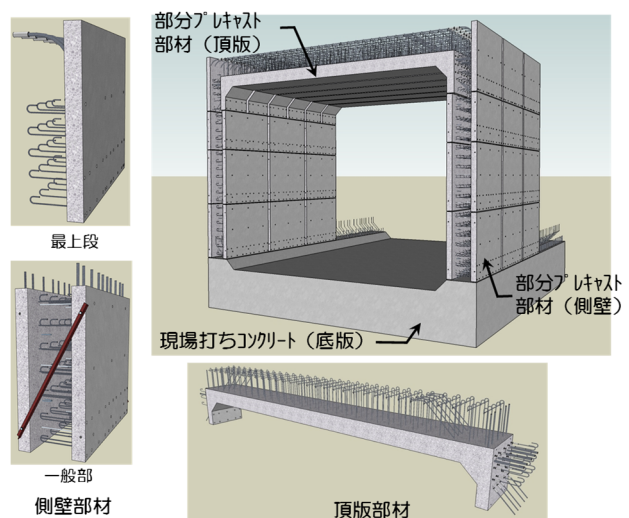


図-1 工法概要 (中詰めコンクリート打設前)

*1 東急建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 主席研究員 博士(工学) (正会員)

*2 東急建設(株) 技術研究所 土木構造グループ グループリーダー 博士(工学) (正会員)

*3 旭コンクリート工業(株) 技術・設計開発部 技術開発課 課長

*4 旭コンクリート工業(株) 技術・設計開発部 部長

3. 検討概要

3.1 概要

本検討に用いた試験体は、既往の研究⁹⁾にて正負交番載荷試験を行ったボックスカルバートの側壁を模した試験体3体である。本試験体は、ボックスカルバート標準設計図集¹⁰⁾に示される標準的な道路用ボックスカルバートを参考に設定した試験体であり、プレキャスト化による軸方向鉄筋のモルタル充填継手、せん断補強鉄筋の

あき重ね継手が耐力、変形性能に与える影響を検討することを目的に載荷試験を行っており、本工法において、軸方向鉄筋のモルタル充填継手、せん断補強鉄筋のあき重ね継手が耐力、変形性能に与える影響は小さいことを確認している⁹⁾。ここで、道路ボックスカルバートでは、地震時の照査が省略されることがあり¹¹⁾、設計基準の相違から鉄道ボックスカルバートとは構造細目が異なり、軸方向鉄筋量やせん断補強鉄筋量が異なる場合がある。

表－1 試験体諸元

No	形式	継手	高さ × 幅 mm	有効 高さ* d mm	せん断 スパン L_a mm	軸応力 N/mm^2	引張軸方向鉄筋*		せん断補強鉄筋*		
							径-本数-間隔 mm	鉄筋比 %	径-組-間隔 mm	鉄筋比 %	あき mm
1	RC	なし	600	484(488)	1800	1.00	D22(D16)-6-160	0.480(0.244)	D13-2.5-300	0.106	なし
2	PPCa	モルタル	×								20
3	PPCa	充填	1000	477(475)			D32(D35)-6-160	0.999(1.210)	D16-5.0-300	0.331	20

*：()内は内側の鉄筋を示す

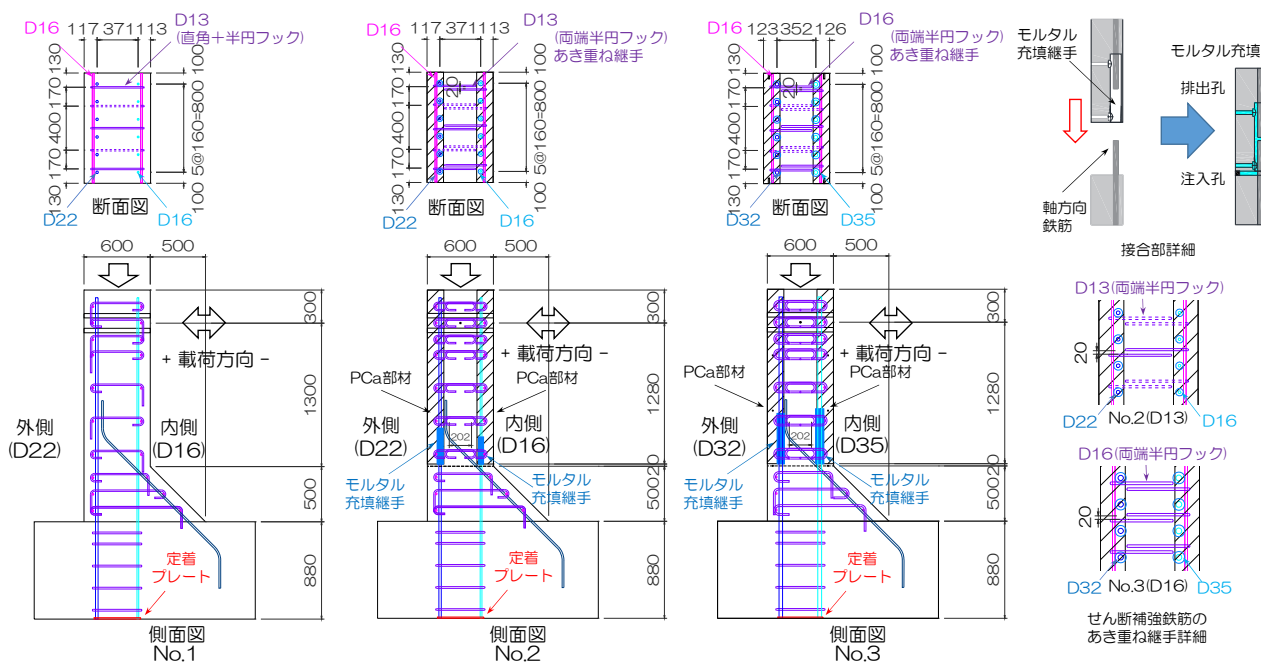
表－2 材料試験値（鉄筋）

種類	用途	降伏強度 MPa	引張強度 MPa	弾性係数 GPa
D35	内側軸方向	383	580	197
D32	外側軸方向	389	572	199
D22	外側軸方向	373	548	190
D16	内側軸方向 ハンチ,配力 せん断補強	370	536	191
D13	せん断補強	360	550	191

表－3 材料試験値（コンクリート、モルタル）

No	中詰め		基礎 ハンチ		PCa 部材		充填 モルタル
	圧縮 強度 MPa	静弾性 係数 GPa	圧縮 強度 MPa	静弾性 係数 GPa	圧縮 強度 MPa	静弾性 係数 GPa	圧縮 強度 MPa
1	32.1	23.8	41.7	25.5	-	-	-
2	34.0	25.3	54.2	28.6	78.2	37.3	97.4
3	31.9	23.9	36.6	36.6	61.3	33.9	-*

*：強度試験未実施



図－2 試験体寸法（単位：mm）

しかしながら、本工法では、工法の適用範囲として、ボックスカルバートの寸法、軸方向鉄筋量、せん断補強鉄筋量および破壊形態に関する適用範囲を設けることに加え、せん断補強鉄筋を標準フックとして配力鉄筋に掛けることを仕様規定としており¹²⁾、鉄道ボックスカルバートに本工法を適用した場合においても、耐力、変形性能を鉄道構造物等設計標準・同解説コンクリート構造物¹³⁾（以降、鉄道標準）により評価できる可能性があると考えられる。そこで、本検討では、本試験体を検討対象とし、鉄道標準による耐力および変形性能に関する評価を試みた。

3.2 試験体諸元

試験体諸元を表-1、使用材料の材料試験結果を表-2、3、試験体寸法を図-2に示す。試験体はハンチを有する側壁部材を模した実大試験体であり、現場打ちコンクリートで製作したRC試験体1体（No.1）と本工法で製作したPPCa試験体2体（No.2、3）の計3体である。全試験体ともにせん断補強鉄筋を設置し、No.1、2では正側載荷時に側壁内側のハンチ始点を曲げ破壊させる設計とし、ハンチを含めたせん断スパン $L_a=1800\text{mm}$ としている。せん断補強鉄筋はRC試験体のNo.1ではRC構造を模し、片側半円フック、片側直角フックであるが、PPCa試験体であるNo.2、3は、両端半円フックである。加えて、部分プレキャスト部材の内外側を対にした際の、せん断補強鉄筋の干渉を防止するため、せん断補強鉄筋はあきを20mmとしたあき重ね継手としている。No.1とNo.2は同一諸元とし、プレキャスト化による軸方向鉄筋のモルタル充填継手の有無、せん断補強鉄筋のあき重ね継手を試験変数としている。また、No.3はNo.2に対し、軸方向鉄筋量を増加させた試験体であり、せん断破壊防止のため、せん断補強鉄筋量も増加させている。なお、ボックスカルバートは常時の土圧に対して設計されるため、鉄道構造物においても側壁部材はボックスカルバートの内、外側で軸方向鉄筋量が相違する場合がある。そ

こで、No.3は負側載荷時に側壁外側で破壊が生じるように内、外側の鉄筋量を調整している。

4. 検討結果

4.1 試験体の破壊状況

荷重低下時の損傷状況を写真-1に示す。試験体No.1は、降伏変位 $\delta_y (=6.0\text{mm})$ 以降、ひび割れ幅が進展することで損傷が進んだ。 $+5\delta_y$ (δ_y =降伏変位)時に新規の斜めひび割れが発生するとともに、外側（圧縮部）ハンチ始点のコンクリートに圧壊の傾向が認められ、荷重が緩やかに低下した。その後、 $5\delta_y$ 載荷時に外側のかぶりコンクリートがはく落し、荷重が低下した。

No.1と同量の軸方向鉄筋を配置したNo.2の降伏変位 δ_y は5.0mmであり、プレキャスト化による降伏剛性の向上がみられた。損傷状況はNo.1とほぼ同様な傾向であり、 $+9\delta_y$ 時にハンチ始点の圧壊傾向と新規の斜めひび割れが発生し、荷重が緩やかに低下した。その後、 $+11/\delta_y$ 時に外側（圧縮部）のプレキャスト部材とハンチ部に割裂ひび割れが発生して荷重が低下した。

No.2よりも軸方向鉄筋量を増加させたNo.3では、降伏変位までに斜めひび割れの発生が認められ、降伏変位 $\delta_y (=12.0\text{mm})$ は、斜めひび割れの影響を受けているものと考えられる。降伏変位以降の損傷状況はNo.2と同様な傾向を示しており、 $+7\delta_y$ 時には外側（圧縮部）のハンチ始点のかぶりがはく離し、荷重が低下する傾向を示し、 $+8\delta_y$ 時に荷重が低下した。

全試験体ともに、緩やかな荷重低下は正側載荷時の圧縮側コンクリートの圧壊により生じており、荷重低下の後には、ハンチ部のひび割れとともに、側壁上部に発生した斜めひび割れのひび割れ幅が進展し、破壊に至った。

軸方向、せん断補強鉄筋のひずみ分布の一例を図-3、4に示す。なお、図中の計測位置の原点は基礎の天端とし、赤破線は鉄筋の降伏ひずみ、青枠部はモルタル充填継手の設置範囲を示している。

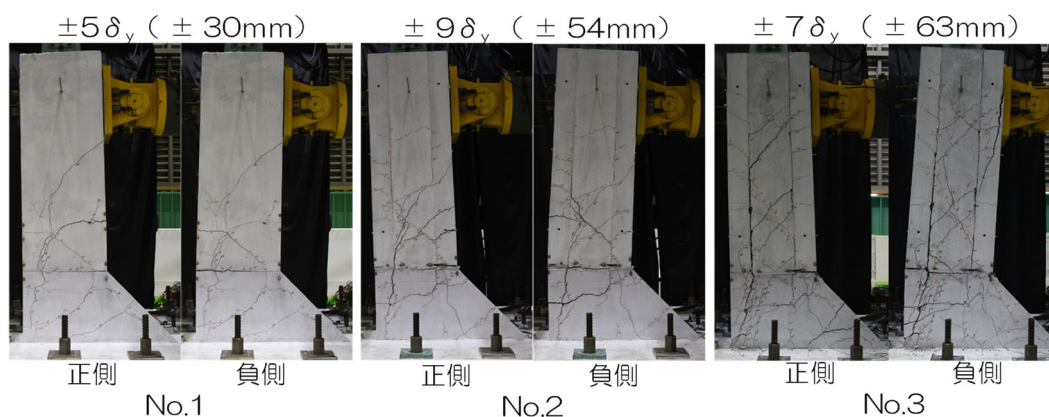


写真-1 損傷状況（荷重低下時）

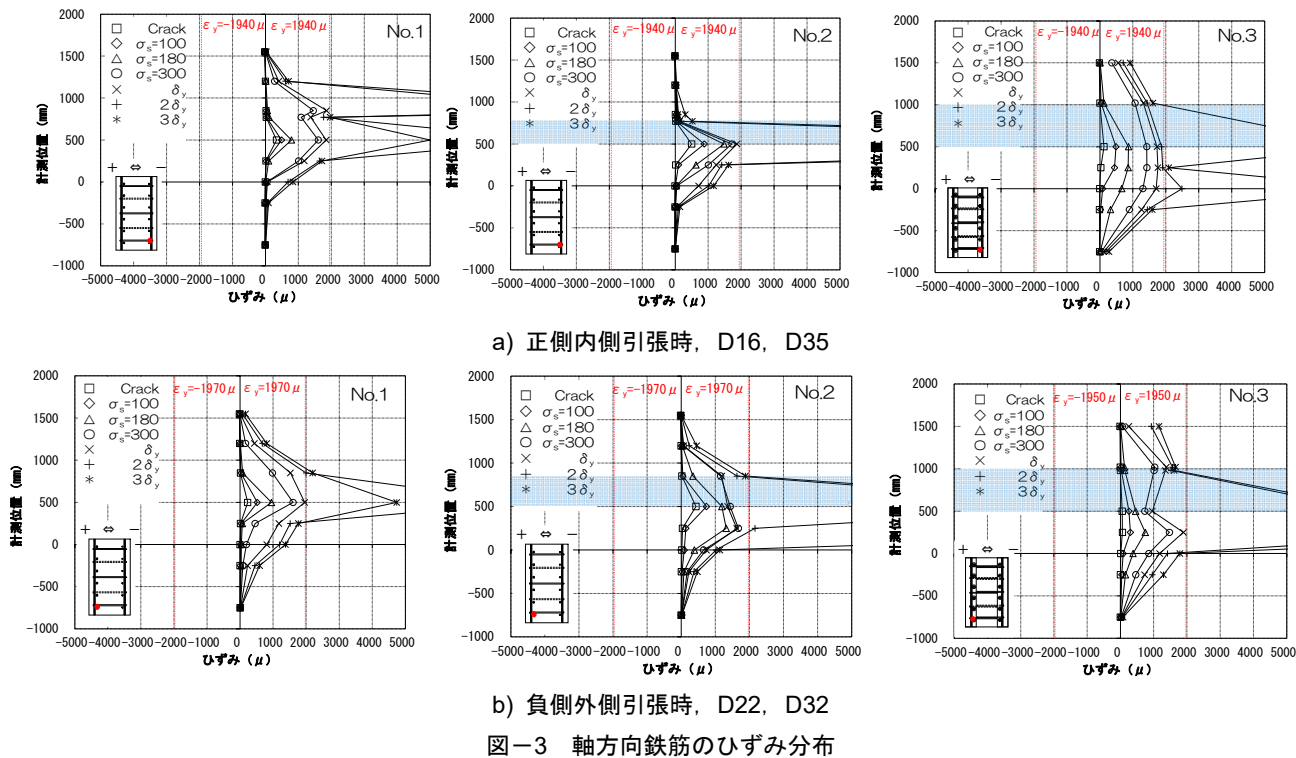


図-3 軸方向鉄筋のひずみ分布

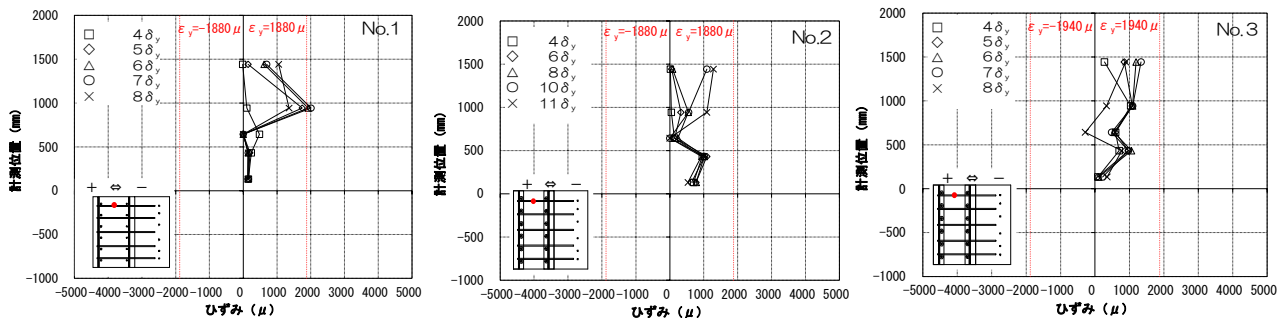


図-4 せん断補強鉄筋のひずみ分布（正側内側引張時）

全試験体とも、軸方向鉄筋のひずみはハンチ始点が初降伏点となっており、ハンチ部分もその後降伏に至っている。このため、試験体はハンチ始点が壁基部となり、破壊に至っているものと考えられる。また、せん断補強鉄筋は荷重低下後にひずみが大きくなっており、斜めひび割れ幅の進展によるものと考えられる。以上から、全試験体ともに曲げ降伏後の繰返し载荷により斜めひび割れが卓越し、せん断破壊したものと考えられる。

4.2 荷重変位関係

実験結果の一覧を表-4、試験体の荷重-変位関係を図-5に示す。図表中には、表-2、3に示す材料試験結果を用い、各安全係数を1.0として鉄道標準¹³⁾に準拠して算出した各耐力および骨格曲線を示している。耐力、骨格曲線の算出には、既往の研究³⁾から部分プレキャスト部材と中詰めコンクリートの打継ぎを無視し、表-3に示すハンチ部コンクリートの圧縮強度を用いている。なお、せん断耐力の算出にはハンチ寸法を考慮せず、壁断面にて、中詰めコンクリートの圧縮強度を用いて算出し

ている。また、骨格曲線の算出では、図-3に示す軸方向鉄筋のひずみ分布がハンチ始点で最大値となり、初降伏に至っていることから、ハンチ(500mm)を除く1300mmを見かけのせん断スパン L_a として算出している。なお、図中に示すY、M、N点は、それぞれ、軸方向鉄筋の降伏点、最大耐力後に同一変位での繰返しによる顕著な耐力低下を生じない最大変位点および最大耐力以降に降伏耐力を維持できる最大変位点である¹³⁾。

No.1、2とNo.3の負側の鉄道標準による骨格曲線の実験値により包含されている。実験値/計算値の耐力比は1.0~1.2程度であり、鉄道標準により安全側に評価できることを確認した。一方、No.3においては、正側の骨格曲線が包含されておらず、曲げ降伏、曲げ耐力の耐力比は0.93となった。これは、図-3に示す軸方向鉄筋のひずみ分布がNo.1、2と比較し、ハンチ部分および基礎部分のひずみが大きくなっており、見かけのスパンが想定よりも大きいことが影響しているものと考えられる。ここで、既往の研究¹⁴⁾によれば、Y、M点の曲げ(降伏)

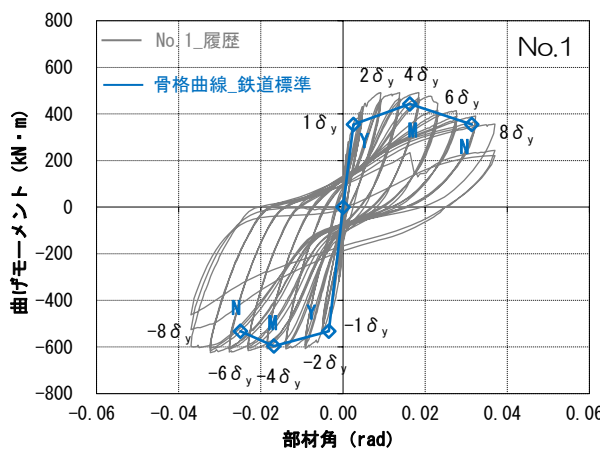
耐力の計算値は実験値をやや過小評価する傾向にあることが示されており、本実験の範疇においても、概ね妥当に評価できているものと考えられる。また、表-4 に示す降伏剛性 (M_y/δ_y) では、No.1 と No.2 を比較すると、

プレキャスト化により、20%程度の剛性の向上が認められ、高強度のプレキャスト部材とモルタル充填式継手により、剛性が向上したものと考えられる。一方で、降伏剛性の実験値/計算値の比は、斜めひび割れの影響を受け

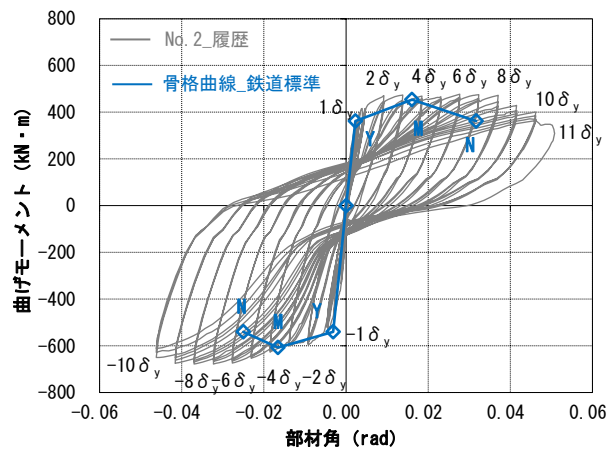
表-4 実験結果一覧

No		軸方向 鉄筋	計 算 値					実 験 値			M_{y_exp}/M_y	M_{u_exp}/M_u	K_{exp}/K_{cal}
			M_y	M_u	V_y	V_{mu} (M_u/L_a) $/V_y$	K_{cal}	M_{y_exp}	M_{u_exp}	K_{exp}			
1	正	D16	355.5	442.7	491.2	0.69	108.1	429.7	491.1	71.7	1.21	1.11	0.66
	負	D22	-532.3	-595.9	-527.8	0.87	117.7	-537.4	-608.6	84.2	1.01	1.02	0.72
2	正	D16	361.6	454.1	497.0	0.70	122.5	397.8	476.9	94.2	1.10	1.05	0.77
	負	D22	-540.3	-607.4	534.6	0.87	132.4	-541.1	-674.4	93.8	1.00	1.10	0.71
3	正	D35	1033.0	1098.2	940.0	0.89	134.5	966.3	1018.4	62.1	0.93	0.93	0.46
	負	D32	-905.3	-980.3	923.7	0.81	130.7	-920.1	-1062.7	102.5	1.02	1.08	0.78

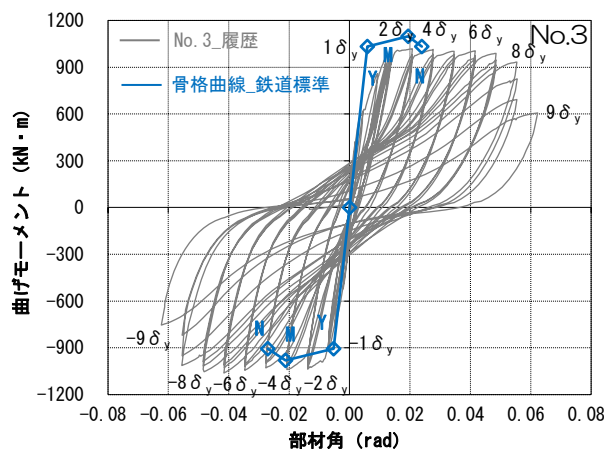
M_y : 曲げ降伏耐力, M_u : 曲げ耐力, V_y : せん断耐力, V_{mu} : 曲げ耐力時のせん断力, K : 降伏剛性 (M_y/δ_y)



a) No.1



b) No.2



c) No.3

図-5 荷重-変位関係

ていると考えられる No.3 の正側以外では、概ね 0.7 程度であり、プレキャスト化による剛性の向上が耐力や変形性能の評価に与える影響は小さいものと考えられる。

5. まとめ

本報告では、過去に実施した正負交番載荷試験の結果を用いて、本工法を鉄道ボックスカルバートに用いた場合の性能評価手法について検討した。本検討の範囲にて得られた知見を以下に示す。

- (1) ハンチがある壁部材では、ハンチ基部よりもハンチ始点の軸方向鉄筋ひずみが先行し、試験体がハンチ始点にて曲げ降伏に至った。
- (2) ハンチ始点をせん断スパンとし、中詰めコンクリートの圧縮強度を用いて鉄道標準により算出した骨格曲線は実験値を包含した。
- (3) 部分プレキャスト化による高強度プレキャスト部材およびモルタル充填式継手の使用により、RC 構造と比較して、20%程度の降伏剛性の向上が認められた。

参考文献

- 1) i-Construction 委員会：i-Construction～建設現場の生産性革命～，2016
- 2) (公社)土木学会：コンクリート構造物における品質を確保した生産性向上に関する提案，2016
- 3) 黒岩俊之ほか：部分的にプレキャスト化した RC 部材の単純梁の載荷試験，第 75 回土木学会年次学術講演会概要集，V-227，2020
- 4) 黒岩俊之ほか：部分的にプレキャスト化した RC 部

材の継手に関する載荷試験，第 76 回土木学会年次学術講演会概要集，V-205，2021

- 5) 笠倉亮太ほか：部分プレキャスト部材を用いたボックスカルバートの施工試験，第 77 回土木学会年次学術講演会概要集，V-302，2022
- 6) 笠倉亮太，黒岩俊之，福田俊，岸秀樹：部分的にプレキャスト部材を用いた RC 壁部材の正負交番載荷試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.44，No.2，pp.607-612，2022
- 7) 国土交通省関東地方整備局記者発表資料：
https://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000844440.pdf
- 8) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋・コンクリート部材編，2017
- 9) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編，201
- 10) 東日本高速道路(株)・中日本高速道路(株)・西日本高速道路(株)：ボックスカルバート標準設計図集，2005
- 11) (公社)日本道路協会：道路土工カルバート工指針，2010
- 12) (一財)先端建設技術センター：先端建設技術・審査証明報告書(技術名：PPCa ボックスカルバート)，2021
- 13) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物設計標準・同解説 コンクリート構造物，2009
- 14) 渡辺忠朋，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手法，土木学会論文集，No. 683/V-52，pp. 31-45，2001