

論文 正負交番载荷を受ける圧着式接合工法を用いた分割式プレキャストボックスカルバート隅角部の耐荷性能

松本 康資*1・山口 浩平*2・松田 学*3・日野 伸一*4

要旨：分割式大型プレキャストボックスカルバートの耐荷性能を評価するため、ボックスカルバート隅角部を想定した L 形部材試験体で正負交番载荷試験を実施した。これまでの研究では、圧着式接合工法を用いた従来手法の試験体では既存工法に比べてその挙動は一体成形に近似し、接合部での破壊はみられなかったが、正载荷において耐荷重がやや小さい傾向にあった。本研究では圧着力作用位置を変えることで耐荷性能の向上を図った実験の結果、隅角部での破壊は見られず、正载荷でも従来手法より耐荷性能を向上できることが確認できた。さらには隅角部ではひび割れなどの変状発生を減少させることを確認した。

キーワード：プレキャストボックスカルバート、隅角部、接合工法、圧着力、正負交番载荷試験

1. はじめに

近年、国土交通省が推奨する「i-Construction」の 3 本の柱の一つであるコンクリート工の「規格の標準化」に向けて、コンクリート生産性向上検討協議会¹⁾が設置され、生産性向上を進めるために様々な検討がされているが、その中でプレキャストは生産性向上の観点から注目されている。

著者らもこれまでに分割式大型プレキャストボックスカルバートの隅角部に配する接合工法として開発した圧着式接合工法（以下、PJ 工法と称する）静的曲げ载荷試験および正負交番载荷試験を行った。その結果隅角部で破壊することなく、頂版部での曲げ破壊により終局状態に至っていることを検証してきた^{2) 3)}。しかし、正負交番载荷試験の正载荷（開方向）による荷重値は、一体成形に比べて僅かに小さい傾向が見受けられた。

そこで本研究では、圧着力の作用位置を変えることで耐荷性能の向上を目的とし、ボックスカルバートの隅角部を想定した L 形部材試験体を作製して正負交番载荷試験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験設計条件

表-1 に試験体の試験設計条件を示す。

試験体は、耐震設計を行ったボックスカルバート（内空幅 3000mm×内空高 3000mm）として、荷重条件に見合う頂版厚および側壁厚とし、要求耐力を満たす配筋量とした。ボックスカルバートは地中埋設構造物であることから応答変位法による耐震設計を行い、常時およびレベル 1 地震動時は許容応力度法、レベル 2 地震動時は限界

表-1 試験体の試験設計条件

試験設計の形状寸法	ボックスカルバート B3000×H3000mm
地盤条件	土被り 2.0m（地下水なし） 原地盤面まで N 値 5 基盤面まで N 値 10
荷重条件	常時荷重 L1 地震動時荷重 L2 地震動時荷重

表-2 使用材料

コンクリート	設計基準強度 (N/mm ²) 40 設計スランプ (cm) 18 設計空気量 (%) 2.0
鉄筋	SD345 : D13, D16（一般部） 主鉄筋 D16-4 本/0.5m 配力筋・フープ筋 D13 ハンチ筋出し D16-3 本/0.5m SD490 : D19（接合部圧着用） 主鉄筋 D19-3 本/0.5m

表-3 コンクリートの示方配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	FA	S	G	Air
38.0	36	175	389	100	593	1122	2.0

注)W/B：水結合材比，FA：フライアッシュ，Air：(%)

状態設計法の終局限界状態にて安全性を照査した⁴⁾⁶⁾。

*1 株式会社ヤマックス 技術本部 開発研究課 課長（正会員）

*2 長崎大学 大学院工学研究科 准教授 博士（工学）（正会員）

*3 株式会社ヤマックス 技術本部 部長 博士（工学）（正会員）

*4 九州大学名誉教授 工学博士（フェロー会員）

ずれの試験体も奥行き長は 500mm とした。

2.5 荷重方法および測定方法

図-2 に荷重方法、図-3 に測定器の取付け位置、図-4 に正負交番試験状況を示す。

荷重は外側と内側の両方に曲げモーメントが作用するよう、開方向および閉方向に油圧ジャッキを作動させて曲げモーメントを再現した。加力は開方向を正荷重、閉方向を負荷重とした。試験体は鋼板上に水平に置き、鋼板上と試験体底面にテフロンシートを敷いて摩擦を減じた。

荷重パターンは正負方向共に 1 回ずつ予備加力を行った後、主鉄筋降伏時の荷重変位を降伏変位 δy として、 $\pm 1 \delta y$ 、 $\pm 2 \delta y$ 、 $\pm 3 \delta y \cdots$ と同一変位で 3 回ずつ正負に繰り返し荷重を行った。3 回の繰り返しで荷重の低下が認められない場合は、順次 $\pm 1 \delta y$ を増加させて荷重を続け、最大荷重の 80% 以下になるまで変位を漸増させた。

降伏変位は、別の試験体で事前に実施した一方向の静的荷重試験結果から、 $+ \delta y = 13.5\text{mm}$ および $- \delta y = 9.9\text{mm}$ とした。正荷重の $+ \delta y$ はコーベルの影響をうけないため、コーベルなしの試験体 N、負荷重の $- \delta y$ はコーベルの影響を受けるためコーベルありの試験体 PJ-H の主鉄筋の降伏時の荷重変位とした。

測定項目について、荷重変位は巻込型変位計を用いて油圧ジャッキ取付け位置の部材軸線間の変位を測定した。また、部材の水平および垂直変位は一般用変位計にて、部材接合部の開口変位は標点距離 100mm のパイ型変位計にて、主鉄筋ひずみはひずみゲージにて、それぞれ計測した。

3. 実験結果

3.1 材料特性値

表-5 に材料特性値を示す。コンクリートは正負交番荷重試験実施日に各種強度試験を実施し、充填モルタルは管理材齢の 28 日材齢日に圧縮強度試験を実施して、設計基準強度および規格強度を満足していることを確認した。鉄筋については、ミルシートで特性値を確認した。

3.2 正負交番荷重試験

(1) 終局時の破壊状況

図-5 に終局時の破壊状況を示す。試験体 PJ-R1 は負荷重 $-9 \delta y$ の 2 サイクル目、試験体 PJ-R2 は正荷重 $+6 \delta y$ の 1 サイクル目で頂版主鉄筋の破断により荷重が低下したため、荷重を終了した。試験体 PJ-R3 は正荷重 $+7 \delta y$ 、負荷重 $-7 \delta y$ 、で最大荷重の 80% 以下となったのを確認して荷重を終了した。

なお、一体成形の試験体 N は正荷重 $+8 \delta y$ 、負荷重 $-7 \delta y$ 、試験体 PJ-H は正荷重 $+9 \delta y$ 、負荷重 $-8 \delta y$ で最

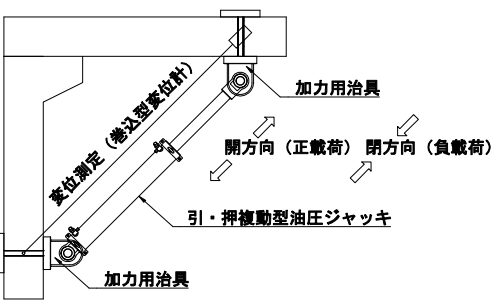


図-2 荷重方法および測定方法

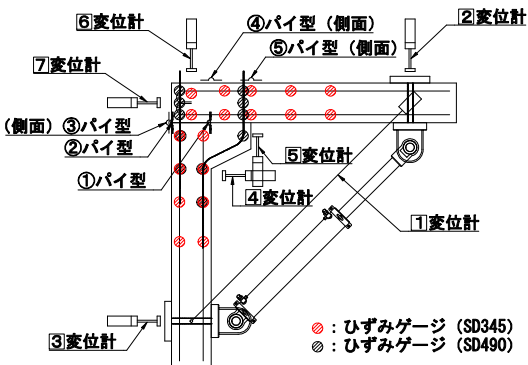


図-3 測定器の取付け位置



図-4 正負交番試験状況

表-5 材料特性値

コンクリート 材齢:載荷試験日 (材齢:約 6 週間)		圧縮強度(N/mm ²) ヤング係数(kN/mm ²) 割裂引張強度(N/mm ²)		49.7 31.2 3.19	
無収縮モルタル (σ ₂₈)		圧縮強度(N/mm ²)		77.2	
鉄筋	区分		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断 伸び(%)
	SD345	D13	394	534	22
		D16	395	541	22
	SD490	D19	538	681	19

大荷重の 80% 以下となったのを確認している。

いずれの試験体においても頂版ハンチ付根付近の断面変化点にて曲げ破壊となった。試験体 PJ-R1 は従来手法の試験体 PJ-H と比べ隅角部の変状は減少しているもの

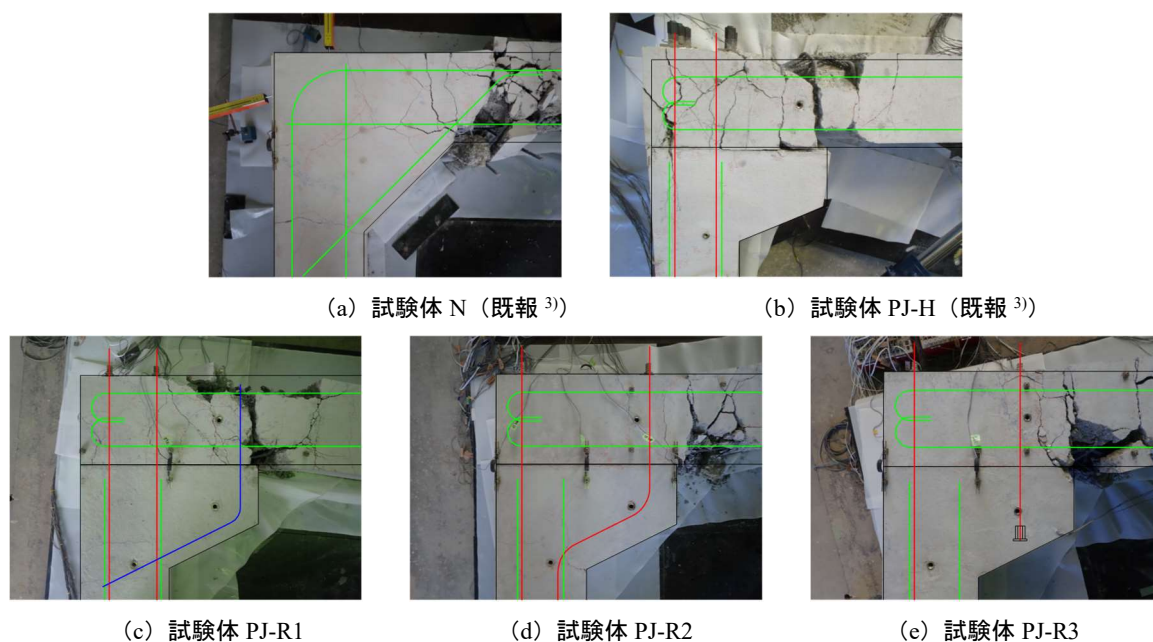


図-5 終局時の破壊状況

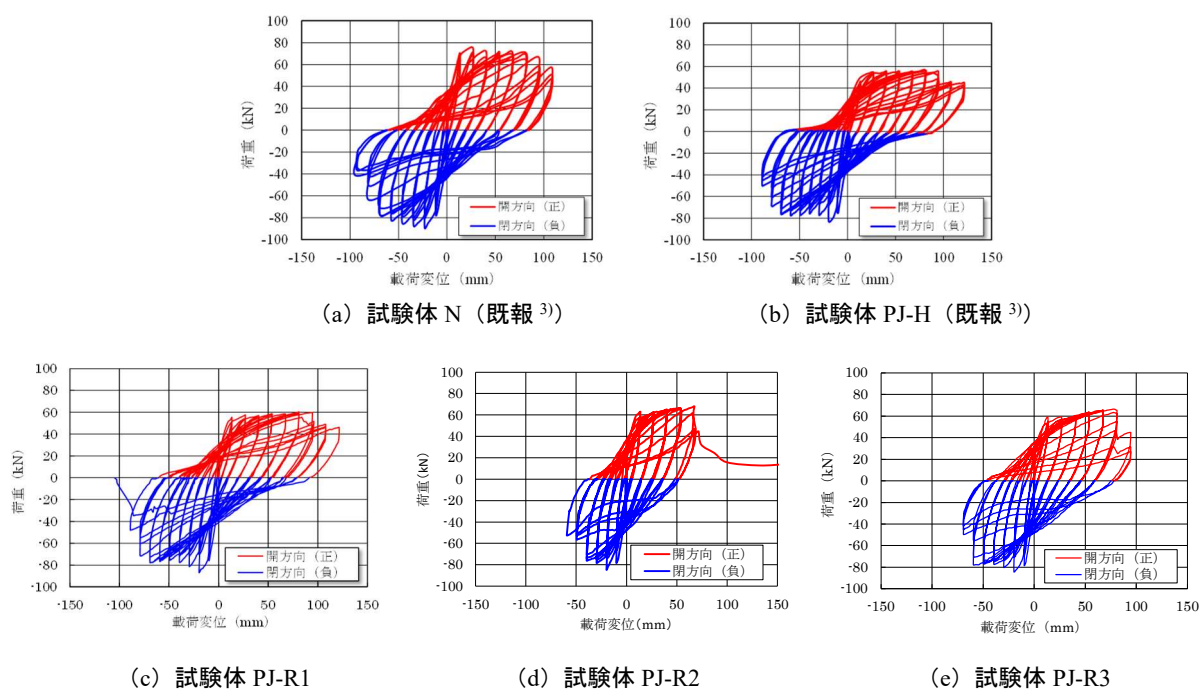


図-6 荷重と載荷変位の関係

の、他試験体に比べ破壊の範囲が大きい。一方、試験体 PJ-R2、試験体 PJ-R3 は接合部の両端に圧着力を作用させており、その区間内では変状がほとんど見られず、破壊の範囲も小さいことがわかる。

(2) 荷重と載荷変位の関係（ヒステリシス曲線）

図-6 に荷重と載荷変位の関係を示す。いずれの試験体も正載荷と負載荷ともに、変位の増加に伴う荷重の低下はなく、ヒステリシス曲線の描く面積は大きく、形状も正負対称に近い履歴を示した。

本研究で着目している正載荷における荷重値は、従来

手法の試験体 PJ-H に比べて、圧着力の作用位置を変えてない試験体 PJ-R1 で 7% と向上があまりみられなかった。一方、圧着力の作用位置を変えた試験体 PJ-R2 および試験体 PJ-R3 の荷重値は、それぞれで 21% および 16% 向上した。なお、荷重値は一体成形の試験体 N よりも 9 ~ 19% とやや低いものの、これは断面耐力に考慮されていないハンチ筋の鉄筋量の差が影響していることが考えられる。

なお、負載荷における荷重値は、一体成形の試験体 N と比較すると、試験体 PJ-R1 で 97%，試験体 PJ-R2 で

95%，試験体 PJ-R3 で 95%であり，いずれの試験体についても従来手法の試験体 PJ-H に比べて 2~5%と微増ではあるが向上しており，負荷荷においても最大荷重値の向上を確認した。

(3) 履歴吸収エネルギー

図-7 に履歴吸収エネルギーを示す。いずれの試験体も変位の漸増に伴い履歴吸収エネルギーも増大し，最大値を計測した後に低下する履歴を示した。履歴吸収エネルギーの低下がみられことから，軸方向鉄筋の座屈が生じたものと推察される⁹⁾。終局時の破壊性状からみて，頂版ハンチ付根付近の断面変化点にて塑性変形していることが確認できる。履歴吸収エネルギーの累積値は，試験体 N で $121\text{kN}\cdot\text{m}$ ，試験体 PJ-H で $124\text{kN}\cdot\text{m}$ ，試験体 PJ-R1 で $115\text{kN}\cdot\text{m}$ ，試験体 PJ-R2 で $53\text{kN}\cdot\text{m}$ および試験体 PJ-R3 で $89\text{kN}\cdot\text{m}$ であり，これは塑性変形の範囲に関連していると考えられ，塑性変形の範囲が大きいほど履歴吸収エネルギーの累積値も大きくなっている傾向にある。

(4) 接合部開口変位

図-8 に接合部の開口変位と載荷変位の関係を示す。横軸の中央の 0 点を基準に正載荷を+方向，負載荷を-方向として示している。

圧着力の作用位置が従来手法の試験体 PJ-H と同様の試験体 PJ-R1 はあまり相違ないが，内空側にハンチ筋相当を配置したことで，若干の抑制効果がみられる。

抑制効果の大きい正載荷をみると，1 δ 時点では従来手法の試験体 PJ-H の 2.88mm に比べて，試験体 PJ-R1 で 1.97mm，試験体 PJ-R2 で 0.28mm および試験体 PJ-R3 で 0.71mm と開口変位量を大きく低減させていることを確

認できる。試験体 PJ-R3 はひび割れ発生の影響で計測不能となったため，正載荷の 2 δ 時点で計測器を取り外した。

(5) 主鉄筋ひずみ

図-9 に負荷荷時の主鉄筋ひずみの分布，図-10 に正載荷時の主鉄筋ひずみの分布を示す。図中の起点は隅角部格点を 0 とし，+方向を頂版側，-方向を側壁側とし

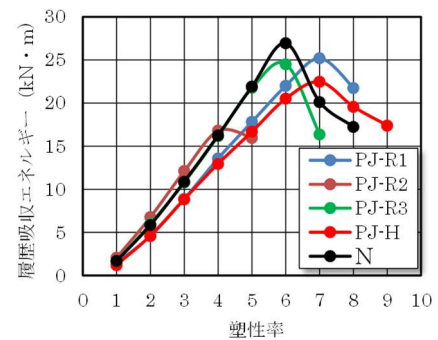


図-7 履歴吸収エネルギー

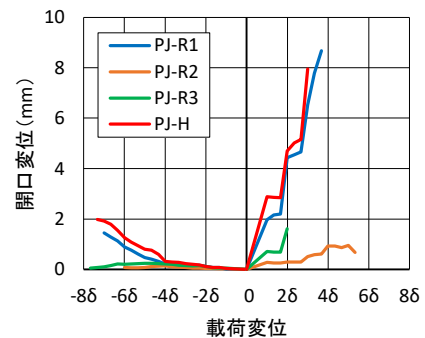


図-8 接合部の開口変位と載荷変位の関係

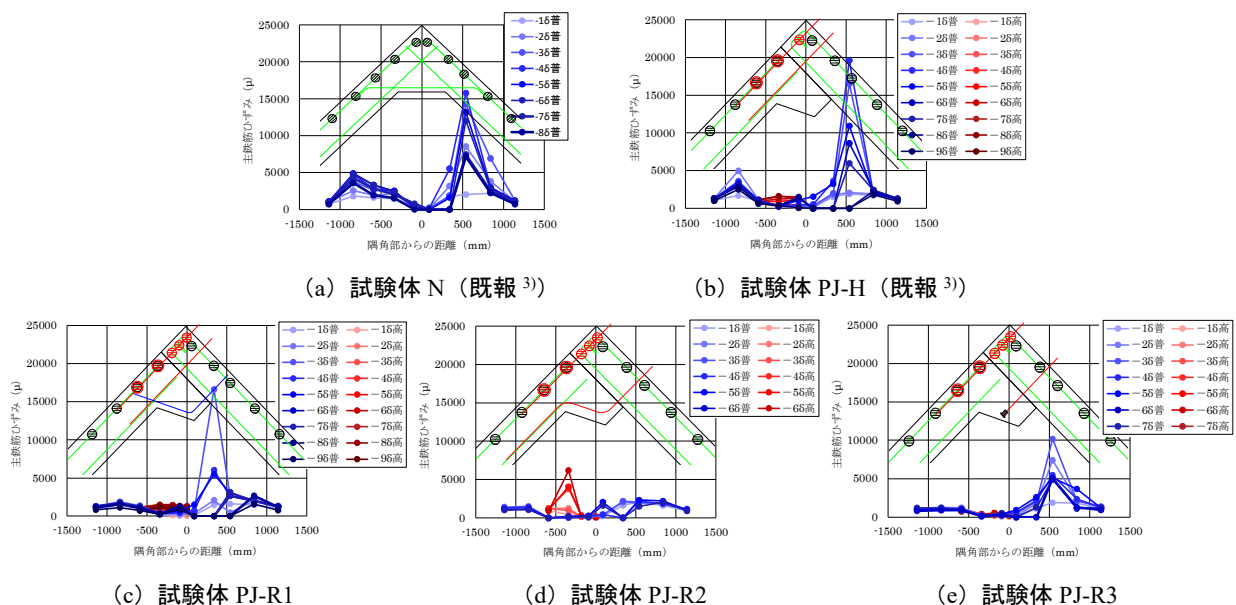


図-9 主鉄筋ひずみ（負荷荷時：閉方向）

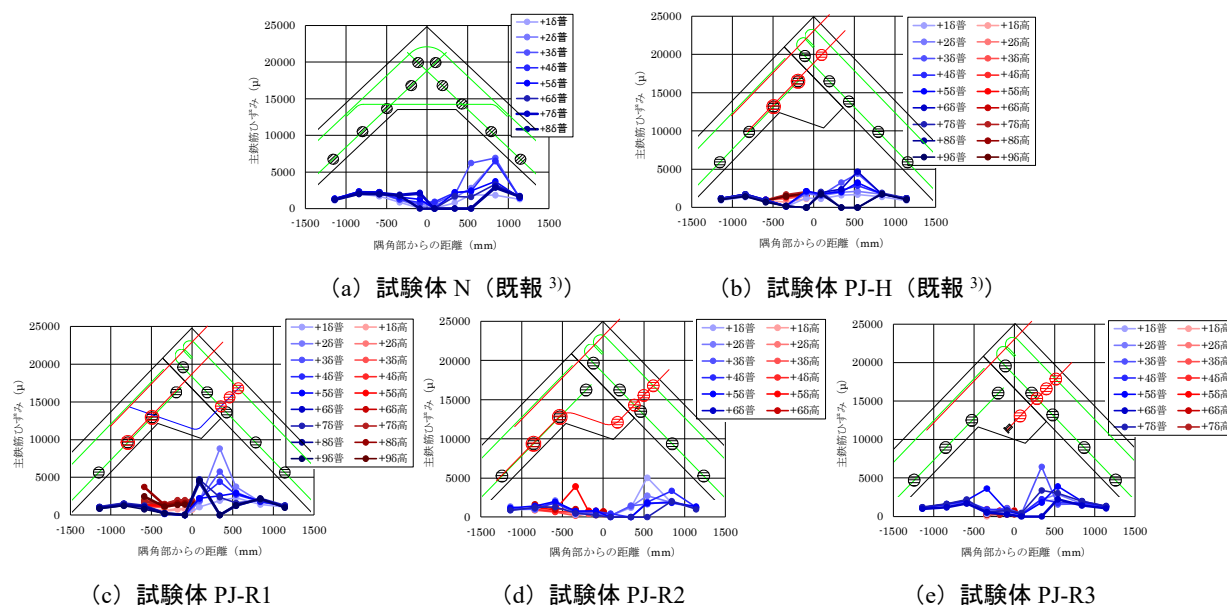


図-10 主鉄筋ひずみ（正載荷時：開方向）

てその計測位置を示している。正載荷、負載荷のいずれの試験体も頂版ハンチ付根付近の断面変化点にて最大ひずみが発生している傾向にあり、終局時の破壊性状と一致している。隅角部起点0付近でのひずみはあまり小さくなく、接合部での応力伝達に問題は認められなかった。

また、図-9 から既報³⁾で最大ひずみを計測した頂版の断面変化点における主鉄筋ひずみは、圧着力作用位置を変えた試験体 PJ-R2 および試験体 PJ-R3 では従来手法よりひずみの発生を抑制させていることが確認された。

図-10 の正載荷では既報³⁾のひずみ値と同程度であり、PJ 工法の作用位置を変えた試験体 PJ-R2 および試験体 PJ-R3 の高強度鉄筋でも普通鉄筋との差はみられなかった。

4. まとめ

ボックスカルバートの頂版隅角部を想定したL形状の切取り試験体を用いて行った正負交番載荷試験で、圧着力作用位置を変えることで耐荷性能の向上を図った結果、次のことが確認できた。

- 1) 接合部に圧着力を与える位置をボックスカルバートの内空側へ配置した結果、側壁から直筋を突出させて接合した従来手法に比べて、正載荷および負載荷のいずれにおいても荷重値の向上を確認した。
- 2) 圧着力の作用を接合面両端に配置させることで、接合部の開口変位を抑制でき、圧着力の作用間には変位の発生を低減させることを確認した。
- 3) 隅角部および接合部での破壊はなく、頂版の断面変化点で塑性変形していることを確認し、履歴吸収エネルギーの低下がみられことから、軸方向鉄筋の座屈が生じたものと確認できた。

- 4) 接合部の開口変位を抑制できていること、接合部を介した主鉄筋ひずみの応力伝達に問題は認められないことから、隅角部は剛域を形成していると判断できる。

参考文献

- 1) 国土交通省ホームページ コンクリート生産性向上検討協議会 参照：<https://www.mlit.go.jp/tec/i-con-concrete.html>（閲覧日：2020年12月25日）
- 2) 松田学，日野伸一，松本康資，畠山繁忠：分割式PCaボックスカルバートの隅角部に圧着力を導入した接合法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.397-402，2017.7
- 3) 松本康資，松田学，井形友彦，日野伸一：圧着式接合法を用いた分割式PCaボックスカルバート隅角部の正負交番載荷試験に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.2，pp.577-582，2019.7
- 4) (公社) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説-2014年度版-
- 5) (公社) 日本下水道協会：下水道施設耐震計算例-管路施設編-（前編）-2015年度版-
- 6) (公社) 日本下水道協会：下水道施設耐震計算例-管路施設編-（後編）-2015年度版-
- 7) (公社) 日本道路協会：道路土工カルバート工指針（平成21年度版），丸善出版，pp140，H29.11
- 8) (公社) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】，丸善出版，pp373-pp374，H30.3
- 9) (独行) 土木研究所：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン（案）（橋脚の正負交番載荷実験方法および振動台実験方法），土木研究所資料，第4023号，2006.8