

論文 突出し筋の有無に着目したボックスカルバート隅角部の力学的特性に関する実験的検討

坂井 義彰*1・梶田 幸秀*2・片山 強*3・壽上 隆司*4

要旨：PCa製大型ボックス工法の一つとして、隅角部をループ継手で接合して一体化する構造を提案している。これまでの研究では、実物大正負交番載荷実験および隅角部に着目し、一体型供試体と比較した正負交番載荷要素実験を行い、十分な耐震性能を有していることを確認している。しかし、提案している隅角部にはループ継手に加え、突出し筋が配置されており、その影響は明確ではない。本研究では、隅角部に配置している突出し筋の影響を評価するため、隅角部に着目した正負交番載荷要素実験を実施した。その結果、突出し筋の有無が破壊形態および耐震性能に大きな影響を与えることを確認した。

キーワード：突出し筋, ボックスカルバート, 正負交番載荷要素実験, 耐震性能評価, ループ継手

1. はじめに

国土交通省の推進する「i-Construction」の施策の中でコンクリート工の生産性向上を目的として、様々な検討が行われている。その中でプレキャスト工法の活用が注目されている。

プレキャスト工法は工場であらかじめ製造されたプレキャスト製品を運搬し、建設現場で部材を組立て、構築する工法であるため、現場における生産性向上に大きく貢献できる。そのため、道路や河川等で施工される大型構造物であっても、プレキャストコンクリート製大型ボックスカルバート（以下、PCa製大型ボックス）で構築する工法が増えてきている。PCa製大型ボックスは部材が大きくなるため、運搬上の制約から、部材を分割して建設現場で組立てられ、種々の接合工法により一体化される。PCa製大型ボックス工法の一つとして、**図-1**、**図-2**に示すように頂版部、側壁部と底版部に分割し、底版部は場所打ちコンクリートで構築し、頂版部と側壁部との接合は、隅角部に場所打ちコンクリートを充填し、ループ継手構造により、頂版スラブと側壁部を一体化する構造を提案している¹⁾。

一方、土木学会の2017年制定版コンクリート標準示方書〔設計編〕では、継手性能が十分であれば、いかなる位置に継手を設けてもよくなった²⁾。ただし、交番応力を受ける塑性ヒンジ領域で継手を用いる場合は、継手部が所要の高応力繰返し性能を有していることを実物大実験により照査することを求めている³⁾。著者らはこれまで隅角部にループ継手を有する実物大の正負交番載荷実験および隅角部に着目した一体型との比較実験である正負交番載荷要素実験を行い、構造全体および隅角部の

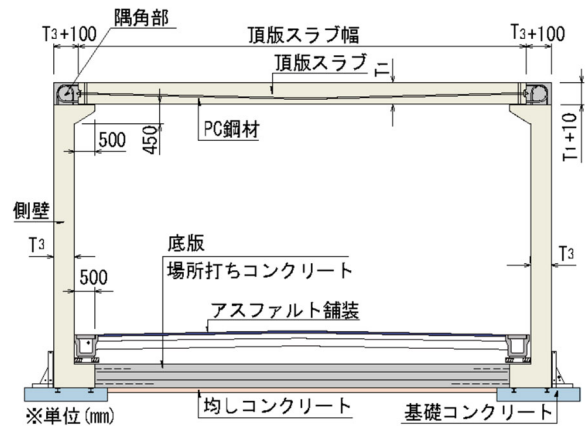


図-1 PCa製大型ボックスの構造図

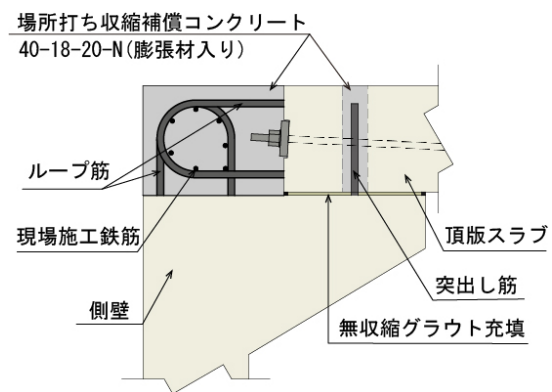


図-2 隅角部のループ継手構造と突出し筋の位置

十分な耐震性能を保有していることを確認した^{4),5)}。しかし、**図-2**に示すとおり、隅角部にはループ継手に加え、頂版スラブを架設する際のズレ止め防止目的で配置している突出し筋が文献⁵⁾において、引張抵抗すること

*1 (株)ヤマウ 技術本部 開発部 グループリーダー 修(工) (正会員)

*2 九州大学 大学院工学研究院社会基盤部門 准教授 博(工) (正会員)

*3 (株)ヤマウ 技術本部 技術研究所 グループリーダー 博(工) (正会員)

*4 (株)ヤマウ 技術本部 技術本部長

を確認しており、突出し筋が耐震性能に及ぼす影響までは確認していない。

そこで、本研究では、隅角部に着目した供試体を作成し、正負交番載荷実験を行い、突出し筋が耐震性能に及ぼす影響を検証した。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験供試体は大型ボックスの頂版部および側壁部で構成された隅角部周辺をL型に切り取った供試体とした。図-3に供試体の形状図・配筋図を示す。供試体は、頂版部と側壁部をループ継手および突出し筋と場所打ちコンクリートで接合した供試体(Lo)と突出し筋を除いた供試体(Lo-R)の2種類とする。供試体(Lo)は既報⁵⁾の供試体である。供試体(Lo)および供試体(Lo-R)において、本研究では突出し筋有無の違いによる力学的特性を確認するため、供試体(Lo-R)にも孔を設け、頂版スラブ底面と側壁ハンチ上面の隙間には無収縮グラウトを充填した。

実験設備における制約条件を考慮し、全幅 2400mm、全高 2400mm、製作長(奥行き) 850mmとした。

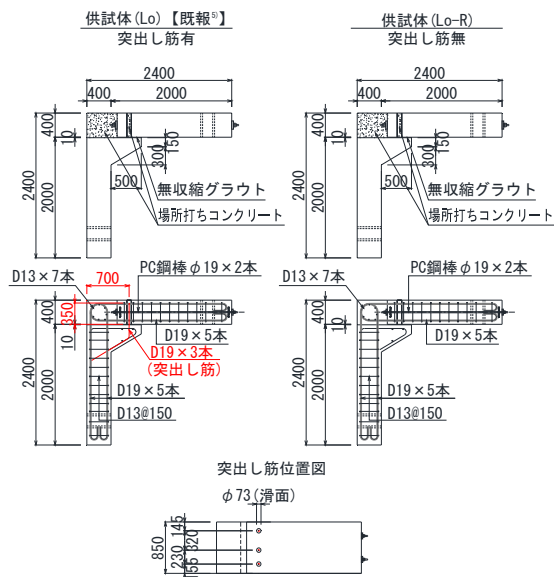


図-3 供試体概要

表-1 使用材料

コンクリート	PCa 製品	設計基準強度: 40N/mm ² , 40-18-20-N		
	隅角部	低添加型膨潤材 20kg/m ³ 入		
鋼材	鉄筋	内側主鉄筋	D19	SD345
		外側主鉄筋	D19	
		横拘束鉄筋	D13	
	PC 鋼棒	φ 19-B 種 1 号		

表-1 に使用材料を示す。コンクリートは設計基準強度 40N/mm²の収縮保証コンクリートとし、鉄筋は SD345 を使用した。頂版部にはアンボンド PC 鋼材を配置し、緊張力は設計値である 370kN をポストテンションにて導入した。このプレストレスは、図-1 に示すように、大型ボックスを構築する際に、頂版スラブに発生する自重によるたわみ量を抑制するためのもので、本実験でも同様の条件を再現した。

表-2、表-3 に材料特性値を示す。コンクリート、無収縮グラウトの圧縮強度試験および静弾性係数試験は正負交番載荷実験の 1 日前に実施し、設計基準強度を満足していることを確認した。

2.2 供試体の設置状況

実験機材設置状況を図-4、写真-1 に示す。PCa 製大型ボックスに対して地震動による応答計算を行った場合、隅角部では、部材軸線の内側および外側の曲げモーメントが発生するため、荷重は内側および外側に曲げモーメントを再現させた。加力は開方向を正の荷重、閉方向を負の荷重とした。文献⁶⁾を参考に供試体は鉄板上に設置し、鉄板と供試体底面間には摩擦を減じる目的でテフロンシートを敷設した。荷重変位はジャッキ取付け位

表-2 材料特性(コンクリート)

種別・部位		材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
供試体 (Lo) 既報 ⁵⁾	頂版	49	50.6	35.1
	側壁	49	49.3	38.0
	隅角部	35	49.5	33.5
	グラウト	35	72.0	—
供試体 (Lo-R)	頂版	91	63.2	35.9
	側壁	91	63.2	35.9
	隅角部	39	62.2	36.0
	グラウト	39	79.1	—

表-3 材料特性(鉄筋)

種別・鉄筋径		ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
供試体 (Lo) 既報 ⁵⁾	D13	183.3	380
	D19	178.5	376
供試体 (Lo-R)	D13	185.9	367
	D19	193.2	365

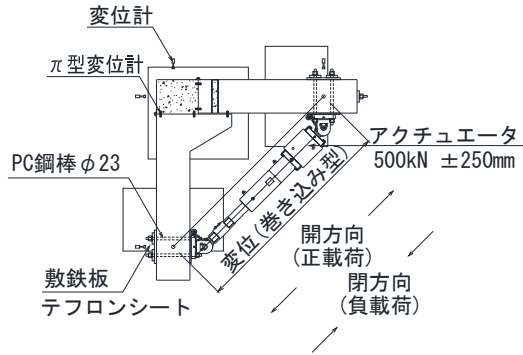


図-4 供試体設置状況



写真-1 供試体設置状況

表-4 解析より求めた基準変位 $1\delta_y$

		変位量(mm)
供試体 (Lo)	開	7.1
	閉	4.8
供試体 (Lo-R)	開	9.2
	閉	4.8

置の部材間の変位を巻き込み型変位計で測定した。部材接続部にはパイ型変位計を用いて変位量を測定した。主鉄筋および突出し筋のひずみはひずみゲージにて測定を行い、後掲の図-11の位置で測定した。

2.3 荷重方法

供試体の最外縁の主鉄筋が初降伏を迎える基準変位 $1\delta_y$ の算出は供試体使用するコンクリートおよび鉄筋の強度試験結果を基に、3次元FEMのプッシュオーバー解析を実施して求めた。初降伏はいずれも側壁ハンチ下部で確認した。

交番荷重は、アクチュエータ取付け位置の部材軸線間の変位制御で行った。実験供試体の主鉄筋が初降伏を迎えると想定される表-4に示す基準変位 $1\delta_y$ に達するまで荷重し、以後基準変位の整数倍を順次荷重した。開方向(押し)を正、閉方向(引き)を負として、図-5に示すように正負1回ずつの荷重を1サイクルとし、各荷重ステップで3サイクルの繰返し荷重を行った。1サイク

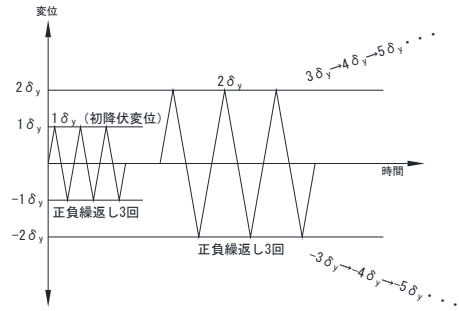


図-5 荷重パターン

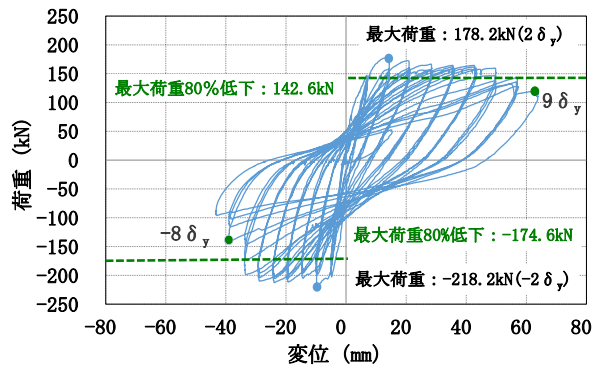


図-6 供試体(Lo)の荷重変位関係

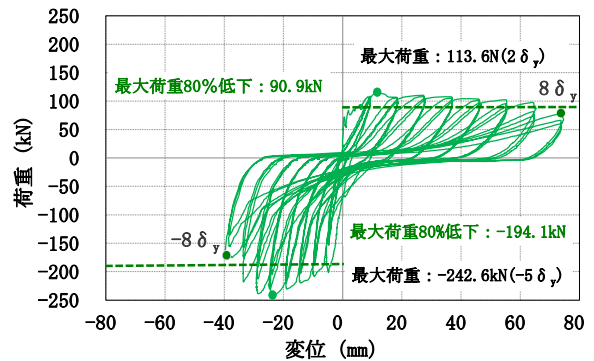


図-7 供試体(Lo-R)の荷重変位関係

ル目の荷重で正負両側共に正負それぞれの最大荷重の80%以下に低下するまで荷重を繰り返した。

3. 実験結果

3.1 荷重と変位の関係 (ヒステリシス曲線)

図-6, 図-7に供試体(Lo)および供試体(Lo-R)それぞれの荷重と変位の関係を示す。横軸の変位はジャッキ取付け位置の部材間の巻き込み型変位計で測定した変位を示す。供試体(Lo)について、正載荷 $+9\delta_y$ 、負載荷 $-8\delta_y$ で最大荷重の80%低下を確認した。供試体(Lo-R)について、最大荷重到達後、正載荷 $+8\delta_y$ 、負載荷 $-8\delta_y$ で最大荷重の80%低下を確認した。正載荷において、供試体(Lo-R)の最大荷重値は供試体(Lo)と比較すると64%に留まり、

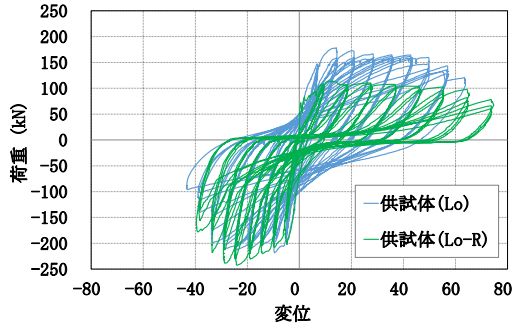


図-8 ヒステリシス曲線比較

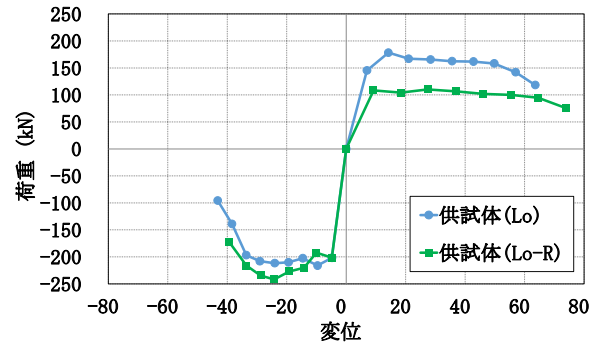


図-9 包絡線比較



写真-2 供試体 (Lo-R) 下部の側壁ハンチ損傷状況

大きく低下した。図-8に供試体(Lo)と供試体(Lo-R)のヒステリシス曲線の比較結果を示す。供試体(Lo)のヒステリシス曲線の形状は正負対象に近い履歴を示しているのに対し、供試体(Lo-R)は正負非対称の履歴を示した。これは隅角部に配置された突出し筋の有無が影響しているといえる。一方、負荷荷重においては、供試体(Lo)に対し、供試体(Lo-R)の最大荷重値は111%と若干大きい値を示した。これは表-2に示しているように圧縮強度の違いによるものと、3.3で後述するように破壊の集中箇所が供試体(Lo-R)は供試体(Lo)に比べ、ジャッキ載荷点位置から遠くなったことが考えられる。供試体(Lo-R)において、供試体(Lo)では見られなかったが、頂版と側壁の隙間に充填している無収縮モルタルが破壊され、正載荷の $6\delta_y$ 1回目に破片が試験体下部に落下し、その結果、側壁ハンチに力が集中し、写真-2に示すように側壁ハンチ部の損傷を確認した。

図-9に供試体(Lo)と供試体(Lo-R)の包絡線の比較結果を示す。包絡線より、正載荷において、供試体(Lo-R)は供試体(Lo)と比較し、 $1\delta_y$ までの剛性は57%に低下する結果となった。一方、負載荷において、 $-1\delta_y$ までの剛性は同程度となった。

3.2 累積履歴吸収エネルギー

荷重-変位曲線より、各載荷ステップ1サイクル目目で描く正負の曲線の合計面積とした履歴吸収エネルギーを累積した累積履歴吸収エネルギーを図-10に示す。図-10より、供試体(Lo-R)の累積履歴吸収エネルギーは供試体(Lo)と比較して $3\delta_y$ までは同程度の累積値となり、4

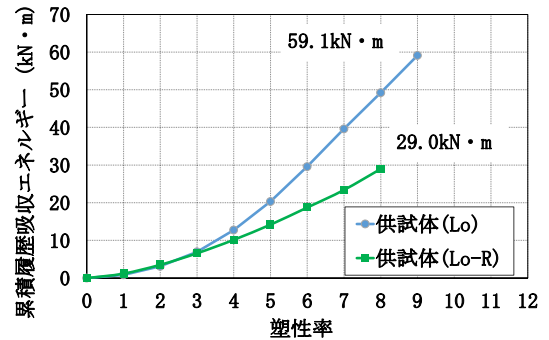


図-10 累積履歴吸収エネルギー



供試体 (Lo) 既報⁵⁾

供試体 (Lo-R)

写真-3 実験終了時の破壊状況



供試体 (Lo) 既報⁵⁾

供試体 (Lo-R)

写真-4 赤枠破壊部の損傷状況

δ_y 以降から累積値の差が徐々に広がり、試験終了時は49%に低下した。これは正載荷において、供試体(Lo-R)はハンチ部に配置されている突出し筋が無く、供試体(Lo-R)は供試体(Lo)と比べ、基準変位である $1\delta_y$ が大きく、荷重値が小さいことで損傷が少ない $3\delta_y$ までは累積履歴吸収エネルギー量に差が見られなかったと考えられる。

3.3 実験終了時の破壊状況

写真-3、写真-4に実験終了時の破壊状況を示す。写真-4は写真-3で示した赤枠部の損傷状況を示してお

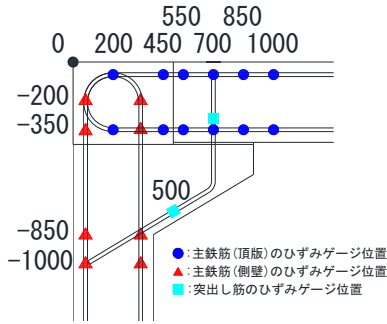


図-11 ひずみゲージ測定位置図

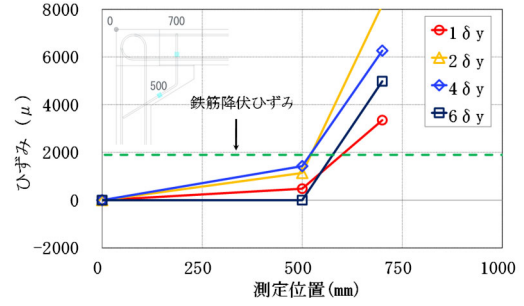


図-12 供試体(Lo) 突出し筋 正載荷時

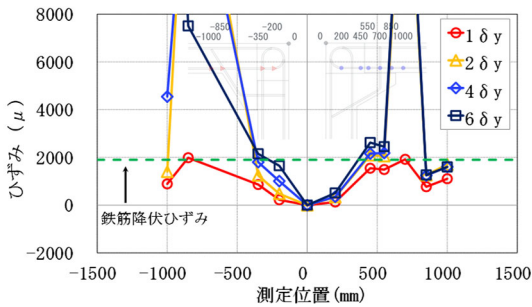


図-13 供試体(Lo) 正載荷時(内側鉄筋)

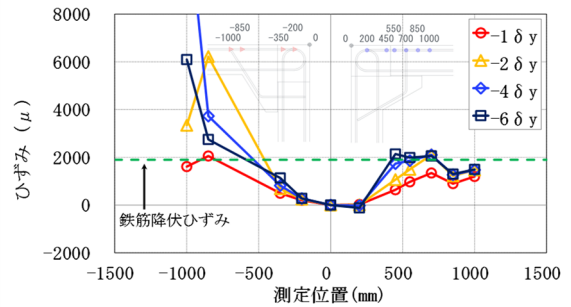


図-14 供試体(Lo) 負載荷時(外側鉄筋)

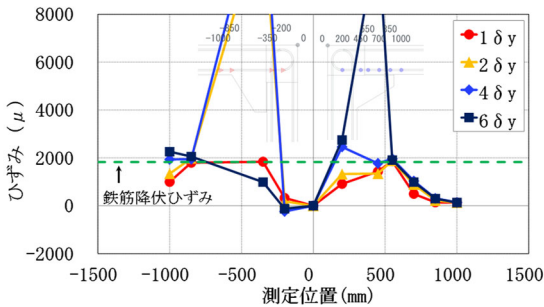


図-15 供試体(Lo-R) 正載荷時(内側鉄筋)

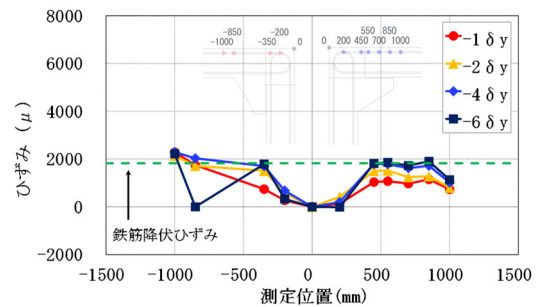


図-16 供試体(Lo-R) 負載荷時(外側鉄筋)

り、供試体(Lo)では側壁ハンチ下部外側、供試体(Lo-R)では隅角部外側の位置での状況を示す。

供試体(Lo)では側壁ハンチ下部のひび割れが進展し、かぶりコンクリートが剥落し、主鉄筋座屈を伴う曲げ破壊で実験が終了した⁵⁾のに対し、供試体(Lo-R)は頂版スラブと場所打ちコンクリート部打継目下部に発生した斜め方向のひび割れから外側主鉄筋に沿って進展し、場所打ちコンクリート部が破壊し、実験が終了した。突出し筋の有無により、破壊形態に差異が生じることを確認した。

3.4 鉄筋ひずみ

図-11にひずみ測定位置図を示す。図中のひずみ測定位置は隅角部格点を0とし、+方向を頂版スラブ側、-方向を側壁側としてその測定距離を示している。

図-12に供試体(Lo)の突出し筋ひずみ分布を示す。図-13、図-14に供試体(Lo)の主鉄筋ひずみ分布、図-15、図-16に供試体(Lo-R)の主鉄筋ひずみ分布を示す。鉄筋

の降伏ひずみは表-3に示している材料試験によって求めた降伏強度と設計値であるヤング係数 200kN/mm^2 を用いて算出した。図-12より、供試体(Lo)において、正載荷の $1\delta_y$ 到達までに突出し筋が降伏し、その後、図-13より、突出し筋配置箇所頂版スラブ主鉄筋、側壁ハンチ下部の降伏を確認した。図-15より、供試体(Lo-R)では場所打ちコンクリート部の -350mm の位置と頂版スラブ $+550\text{mm}$ の位置で降伏を確認した。これは突出し筋が配置されている供試体(Lo)では、突出し筋がアンカーとして抵抗することにより、突出し筋配置箇所の頂版スラブでひずみが増大し、突出し筋が配置されていない供試体(Lo-R)では場所打ちコンクリート部付近の側壁主鉄筋がアンカーとして抵抗し、ひずみが増大したと考えられる。図-14および図-16より、負載荷の $-1\delta_y$ 到達までに両供試体とも側壁側のハンチ下部である -850mm の位置で降伏を確認し、概ね同様のひずみ分布を確認した。

正載荷の $2\delta_y$ において、供試体(Lo)は $1\delta_y$ で降伏を確

認した突出し筋, 突出し筋配置箇所頂版スラブ主鉄筋, 側壁ハンチ下部の3ヶ所のひずみが増大した。供試体(Lo-R)は降伏を確認した場所打ちコンクリート部の-350mmの位置でひずみが増大した。負荷荷の $-2\delta_y$ では供試体(Lo)では側壁ハンチ下部のひずみが増大し, 鉄筋の塑性化が進んでいるのに対し, 供試体(Lo-R)では塑性化の進展は確認できなかった。

$\pm 4\delta_y$, $\pm 6\delta_y$ と荷重を進めていくと, 供試体(Lo)では側壁のハンチ下部と頂版突出し筋配置箇所ひずみが増大したが, 側壁ハンチ下部で破壊が進行し, 終局状態となった。突出し筋のひずみに着目すると $4\delta_y$ 以降減少していることが分かる。これは頂版スラブにはPC鋼材を配置し, プレストレスを導入しているため, 側壁ハンチ下部に損傷が集中したと考えられる。供試体(Lo-R)では, 場所打ちコンクリート部である-350mmの位置および+450mmの位置で塑性化が進展していることを確認した。ひずみ分布より, 突出し筋の有無で塑性化が進展する箇所に差異が生じることを確認した。

4. まとめ

隅角部に着目した供試体で正負交番荷重実験を行い, 突出し筋の有無が耐震性能に及ぼす影響を検証した。本研究の範囲内で得られた知見は以下の通りである。

1) 突出し筋無しは突出し筋有りと比較すると, 正荷重において, 最大荷重は64%に低下し, 靱性は $1\delta_y$ 低下し, 降伏直前までの剛性は57%に低下した。

2) 突出し筋無しは累積履歴吸収エネルギーは突出し筋有りと比較すると, $4\delta_y$ 以降から累積値の差が徐々に広がり, 実験終了時は49%に低下した。

3) 突出し筋無しの場合は場所打ちコンクリート部で損傷が進展し, 主鉄筋に沿った付着破壊で終局状態を確認したのに対し, 突出し筋有りの場合は側壁ハンチ下部で損傷が進展し, 曲げ破壊で終局状態を確認した。

4) 突出し筋無しの場合は場所打ちコンクリート部で主鉄筋のひずみが増大し, 塑性化が進んだのに対し, 突出し筋有りの場合は側壁ハンチ下部および頂版スラブ突

出し筋位置で主鉄筋のひずみが増大し, 塑性化が進んだ。

以上のことより, 突出し筋の有無で破壊形態および耐震性能に大きく影響を及ぼすことを確認した。

謝辞

本実験の事前解析において多大なるご協力をいただいた九州大学大学院工学府地震工学研究室の永田湧也氏に心より感謝申し上げます。また, 実験に際しては多大なるご協力いただいた九州大学工学部技術職員の山崎智彦氏に感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 佐川康貴, 片山強, 堤俊人, 松下博通: ループ継手構造によるプレキャストコンクリート製斜角大型ボックスカルバートの開発, コンクリート工学, Vol.49, No.3, pp.13-20, 2011.3
- 2) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書改定資料 設計編・施工編, pp.3-4, p.92, 2018.3
- 3) 土木学会: 2017年制定コンクリート標準示方書[設計編], p.51, pp.304-305, pp.364-366, 2018.3
- 4) 片山強, 梶田幸秀, 坂井義彰, 山崎智彦: ループ継手構造によるプレキャストコンクリート製大型ボックスカルバートの正負交番荷重実物大実験による耐震性能評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp.301-306, 2021
- 5) 坂井義彰, 梶田幸秀, 片山強, 山崎智彦: ループ継手構造を有する大型ボックスカルバートの正負交番荷重要素実験による耐荷性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.523-528, 2024
- 6) 松本康資, 山口浩平, 松田学, 日野伸一: 正負交番荷重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, コンクリート工学年次論文集, Vol.43, No.2, pp.307-312, 2021