

論文 大型プレキャストカルバート接合部の正負交番載荷実験

松本 康資*1・山口 浩平*2・松田 学*3・日野 伸一*4

要旨：本研究では、工場生産したプレキャストコンクリート部材を施工現場で接合して構築する大型プレキャストカルバートの接合部を研究対象とした。圧着式接合法および PC 圧着工法を用いて接合したスラブ試験体を作製し、地震動を想定した正負交番載荷実験を行い、接合部の構造特性について接合部のない一体型成形と比較した。その結果、圧着式接合法および PC 圧着工法を用いても土木学会道路土工カルバート工指針の要求性能を満足する接合法であることを確認し、一体型成形の耐荷力以上であること、部材間の応力伝達に異常はないこと、終局状態においても急激な荷重低下はみられないことが確認された。

キーワード：大型プレキャストカルバート、接合部、圧着式接合法、PC 圧着工法、正負交番載荷

1. はじめに

我が国は、近年の労働者不足の背景や生産性向上の観点からプレキャストコンクリートの活用が期待されている。プレキャストコンクリートは生産工場から施工現場までの運搬が必要となるため、サイズや重量が制限される。比較的大型サイズへの活用促進が期待されているボックスカルバートは、部材を分割製造して運搬し、施工現場で組み立てることが必要なことから、接合部の構造安全性を確保することが重要課題といえる。

全国ボックスカルバート協会では、RC ボックスカルバートおよび PC ボックスカルバートについて標準的な埋設工事から設計条件や形状寸法等の適用範囲を定め、その範囲内であれば RC 構造や PC 構造の構造種別に関係なく、同等の性能を有するものとして製品を規格している¹⁾。これらのボックスカルバートは道路土工カルバート工指針において従来型カルバートと位置付けられ、これまでの経験則から慣用設計法（常時の作用のみ）の性能照査でよいとされている。一方で適用範囲外となる大型カルバートでは、常時の作用に加えて地震動の作用に対する性能が要求されている²⁾。常時およびレベル 1 地震動に対しては、想定する作用によってカルバートとしての健全性を損なわない性能とされ、レベル 2 地震動に対しては、想定する作用による損傷が限定的なものにとどまりカルバートとしての機能の回復を速やかに行い得る性能とされる。これは塑性域においても急激な荷重低下に至らないことと考える。

著者らはこれまでに一体型成形の RC 構造との比較下で、既存の継手工法、圧着式接合法および PC 圧着工法を用いた模擬試験体の曲げ載荷試験により、接合部の構造特性について実験を行っている³⁾。

そこで本研究では、大型プレキャストカルバートの接

合部に適用する接合法として圧着式接合法および PC 圧着工法に着目し、頂版ならびに側壁を想定したスラブ形状試験体の正負交番載荷試験を実施して、接合部のない一体型成形の RC 構造との比較下で接合部の構造特性について知見を得ることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 設計条件

(1) ボックスカルバート

表-1 に試験体の設計条件を示す。試験体は耐震設計を行ったボックスカルバート（内幅 3000mm×内高 3000mm）に相当する版厚、配筋量で設計した。地中埋設構造物であるボックスカルバートは、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 地震動時は限界状態設計法の終局限界状態にて、安全性を照査した⁴⁾。

(2) 接合部（圧着式接合法）

著者らが考案した圧着式接合法⁵⁾⁶⁾は、ねじ節高強度鉄筋を用いることで、高強度鉄筋の降伏耐力と普通鉄筋の降伏耐力の差力分を接合面にナット締付けによる圧着力として与えて接合するものである。接合部であっても RC 構造を設計方針とするため、普通鉄筋 (SD345) の降伏耐力を残すことで一般的な RC 構造と同様に構造安全性照査を行うこととした。なお、ナット締付けはトルク管理により行い、所定の圧着力を与えることとした。

(3) 接合部（PC 圧着工法）

PC 圧着工法は PC 鋼材を用いることから、接合面では常時の作用に対してフルプレストレス状態、レベル 2 地震動の作用に対して PC 鋼材が弾性範囲内であることを設計方針として、PC 鋼材の径や種類および作用プレストレス力を設定し、他の断面は一般的な RC 構造と同様に

*1 (株) ヤマックス 技術本部開発研究課次長 (正会員)

*2 長崎大学大学院 工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 (株) ヤマックス 技術本部長 博(工) (正会員)

*4 九州大学 名誉教授 工博 (フェロー会員)

構造安全性照査を行うこととした。

2.2 使用材料

表-2 に使用材料、表-3 にコンクリートの示方配合を示す。コンクリートの示方配合は、プレキャストコンクリートの製造に通常使用している設計基準強度 40 N/mm² の配合を用いた。主鉄筋にはコンクリート用棒鋼の D16 (SD345, 有効長 750mm あたり 6 本)、配力筋およびフープ筋には D13 (SD345) を用いた。また圧着式接合法では断面内部の過密配筋を避けるため、D19 (SD490, 有効長 750mm あたり 5 本) の高強度鉄筋 (高張力ねじ節棒鋼) を用いた。PC 鋼棒には、φ23 (有効長 750mm あたり 3 本, C 種 1 号, SBPR1080/1230) を配して、常時荷重に対してフルプレストレス状態となる所要の緊張力 (1 本あたり 280kN) にて PC 圧着接合した。

2.3 試験体水準

表-4 に試験体の実験水準を示す。スラブ試験体は、圧着式接合法を用いた PJ-S、PC 圧着接合法を用いた PC-E、PC-M および比較用に接合部のない一体型成形の RC-N の 4 種類とした。圧着式接合法および PC 圧着工法は製造時の煩雑性や施工性の観点から、部材の全長に渡ってシース管を配置し、そのシース管に高強度鉄筋または PC 鋼材をあと差しして接合させることとした。

2.4 試験体形状

図-1 に試験体形状を示す。試験体形状は、版厚 300mm、長さ 3500mm のスラブ形状とし、中央 2 分割のプレキャストコンクリート部材で構成される。なお、試験体の有効長 (奥行き長) は試験設備能力の観点から 750mm とした。形状や配筋はいずれの試験体も同様とした。上下主鉄筋 D16 を 120mm 間隔で各 6 本配筋して、せん断破壊が先行しないようにせん断スパン内には D13 スターラップを 120mm 間隔で配筋した。PJ-S は主鉄筋と同じかぶり位置にシース管を配置して圧着力による接合を行った。その後、シース管内に無収縮モルタルを充てんした。PC-E は、接合面はフラットでエポキシ樹脂を塗布して PC 圧着接合した。PC-M はプレストレス導入のため、シアキー (深さ 30mm、長さ 130mm) を施した接合面に 30mm の間隔を設けて、無収縮モルタルを充てんして養生硬化後に PC 圧着接合することとした。PC-E および PC-M は、版厚断面中央に部材の全長に渡って φ40mm のシース管を 240mm 間隔で 3 本配置して PC 鋼棒 φ23mm に所定の緊張力 (1 本あたり 280kN) をポストテンション導入後にナット式定着を行った。その後、シース管内に PC グラウトを充てんした。

2.5 荷重方法および測定方法

図-2 に試験体の荷重方法、図-3 に正負交番荷重試験状況、図-4 に荷重制御の分類を示す。荷重は、スパン 3000mm、荷重点間距離 1000mm の 3 等分点荷重法と

表-1 試験体の設計条件

試設計の形状寸法	ボックスカルバート B3000mm×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 (T-25) レベル 1 地震動時荷重 レベル 2 地震動時荷重

表-2 使用材料

コンクリート	設計基準強度 40 N/mm ² 設計スランプ 18 cm 設計空気量 2.0 %
鉄筋	高強度鉄筋 : SD490 主鉄筋 D19-5 本/750mm 普通鉄筋 : SD345 主鉄筋 D16-6 本/750mm 配力筋・フープ筋 D13
無収縮モルタル	圧縮強度規格値 50 N/mm ² 以上
PC 鋼材	PC 鋼棒 φ23mm-3 本/750mm C 種 1 号 (SBPR1080/1230)
PC グラウト	圧縮強度規格値 30 N/mm ² 以上

表-3 コンクリートの示方配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		W	C	S	G	SP
40.0	38	175	438	653	1136	2.41

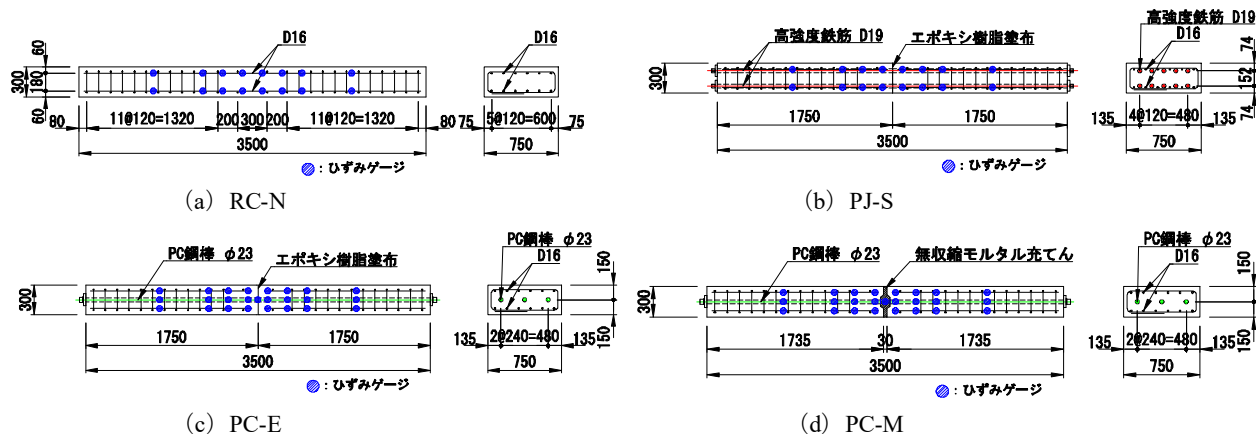
注) SP : 高性能減水剤

表-4 試験体の実験水準

試験体		備考
略記号	接合方法	
RC-N	一体型成形	比較用、接合部なし
PJ-S	圧着式接合法	高強度鉄筋 SD490 接合面 : F, E
PC-E	PC 圧着工法	接合面 : F, E
PC-M	PC 圧着工法	接合面 : S, M

注) F : フラット面, S : シアキー形状

E : エポキシ樹脂塗布, M : 無収縮モルタル充てん



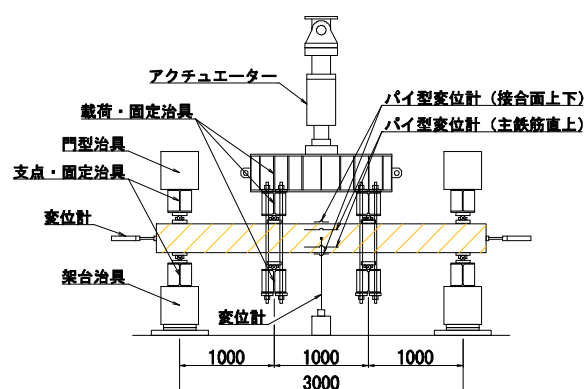
図一 試験体形状

する正負交番荷重試験とした。加力は電動油圧アクチュエーターを用いて行い、下方へ押す方向を正荷重、上方へ引く方向を負荷重とした。試験体端部は上下をピンローラー支承で挟んで固定した。荷重点はピン支承を用いて上下から荷重した。正荷重時には負荷重時の荷重治具が離れ、負荷重時には正荷重時の荷重治具が離れる形式となっている。

RC 構造の RC-N および PJ-S は、主鉄筋降伏時の荷重変位を降伏変位 δy として、 $\pm 1\delta y$ 、 $\pm 2\delta y$ 、 $\pm 3\delta y$ ・・・と同一変位で 3 回ずつ正負に繰返し荷重を行った。接合部が PC 構造である PC-E および PC-M は PC 圧着工法を用いており、PC 鋼材は降伏させない設計方針であるため、その特性から降伏変位を基準とした変位制御は適当でないと考える。そのため、事前に RC 構造である RC-N の正負交番荷重試験を変位制御で行い、その結果から RC-N の各サイクルで受けた荷重を記録し、同等の荷重を PC-E および PC-M に与えることによる荷重制御にて正負に繰返し荷重を行うこととした。これはボックスカルバートの設計を行う際に、接合方法の違いによって受ける荷重は変わらないことから、一体型成形構造との耐荷特性を比較するためである。

荷重パターンは正負方向ともに 1 回ずつ予備加力を行った後、 $\pm 1\delta$ ($\pm 1\delta P$)、 $\pm 2\delta$ ($\pm 2\delta P$)、 $\pm 3\delta$ ($\pm 3\delta P$)・・・と同一サイクルで 3 回ずつ繰返し、 $\pm 8\delta$ ($\pm 8\delta P$) まで荷重した。PC-E および PC-M については、 $\pm 8\delta P$ 以降は荷重値を $\pm 50kN$ ずつ増加させて、PC 鋼材の降伏ひずみを確認するまで荷重を漸増させた。

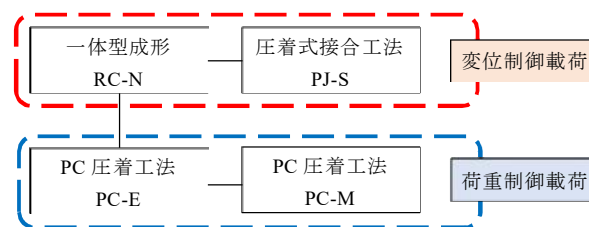
測定項目は、荷重、スパン中央変位、主鉄筋、高強度鉄筋および PC 鋼棒のひずみ、接合部上下面の開口変位とした。荷重変位は、巻込型変位計を用いて荷重スパン中央変位を測定した。また、主鉄筋、高強度鉄筋および PC 鋼棒のひずみはひずみゲージにて、部材接合部の開口変位はパイ型変位計（標点距離 100mm）にて、それぞれ計測した。



図二 試験体の荷重方法



図三 正負交番荷重試験状況



図四 荷重制御の分類

3. 実験結果および考察

3.1 材料特性値

表一5 に材料特性値を示す。コンクリートは荷重試験日の前日に圧縮強度試験、曲げ強度試験および割裂引張強度試験を行った。また、無収縮モルタルは、製造メー

カーカタログ記載の特性値として材齢 28 日における圧縮強度試験を行い 50N/mm^2 以上、PC グラウトは土木学会コンクリート標準示方書[施工編]により材齢 7 日における圧縮強度試験を行い要求強度 30N/mm^2 以上を満足していることを確認した。

3.2 正負交番荷試験による構造特性

(1) 荷重とスパン中央変位の関係

図-5 に荷重とスパン中央変位の関係、図-6 にスパン中央変位と載荷サイクルの関係を示す。図-5 の (c) および (d) には、載荷荷重を増加させた 9 サイクルを青色で示した。

比較対象となる RC-N は RC 構造のため、荷重の増加とともにスパン中央変位は増加し、残留変位を漸増させながら繰り返す履歴を示した。なお、8 サイクル繰返したところで、主鉄筋が破断したことにより荷重が低下したため、載荷を終了した。PJ-S は、RC-N 同様に、荷重の増加とともにスパン中央変位は増加し、残留変位を漸増させながら繰り返す履歴を示した。最大荷重は、RC-N に比較して正載荷で 1.65 倍、負載荷で 1.38 倍大きい結果となり、RC-N の終局までの各サイクルにおける荷重値を上回り続けることが確認された。8 サイクルでは圧縮面側のコンクリート圧壊が見られ、荷重が低下傾向にあった。

一方、PC-E および PC-M は PC 圧着の作用により、試験体 RC-N でみられた残留変位は小さく、PC 鋼棒は弾性範囲内であるため、原点指向型の履歴を示した。なお、8 サイクル繰返しても荷重の低下がみられなかったため、さらに正負ともに 50kN を増して載荷をした結果、PC-E は 9 サイクルの 2 回目、PC-M は 9 サイクルの 3 回目で PC 鋼棒の降伏ひずみが計測されたため、載荷を終了した。最大荷重は、RC-N と同じ荷重をかけたため比較はできないが、RC-N に鉄筋破断が生じた時点においても顕著な変状はみられず、PC 鋼棒の降伏ひずみが見られた時点での荷重と RC-N の最大荷重を比べても正載荷で 1.24 倍、負載荷で 1.12 倍それぞれ大きいことが確認された。

スパン中央変位について、PJ-S は RC-N と同じ変位を与えているので比較にならないが、PC-M では、RC-N の 8 サイクル時点での変位 91.2mm と比較して、正載荷で 22.7mm 、負載荷で 13.9mm であり 24.9%および 15.2%に抑制され、PC-E では、正載荷で 25.0mm 、負載荷で 13.6mm であり 27.4%および 14.9%に抑制されていることが確認された。

(2) 主鉄筋ひずみ

図-7 に負載荷における主鉄筋ひずみ、図-8 に負載荷における高強度鉄筋または PC 鋼棒のひずみを示す。部材断面は対称断面であり正載荷と負載荷で特徴的な差

表-5 材料特性値

コンクリート	圧縮強度(N/mm^2)	48.8		
	ヤング係数(kN/mm^2)	30.6		
	割裂引張強度(N/mm^2)	3.10		
	曲げ強度(N/mm^2)	5.92		
鉄筋	呼び名	D13	D16	D19
	引張試験	SD345	SD345	SD490
	降伏点(N/mm^2)	385	397	541
	引張強さ(N/mm^2)	537	538	691
破断伸び(%)		26	25	18
無収縮モルタル		圧縮強度(N/mm^2)	73.6	
PC 鋼棒 C 種 1 号 $\phi 23$		耐力(N/mm^2)	1215	
		引張強さ(N/mm^2)	1302	
		伸び(8d%)	12	
PC グラウト		圧縮強度(N/mm^2)	38.8	

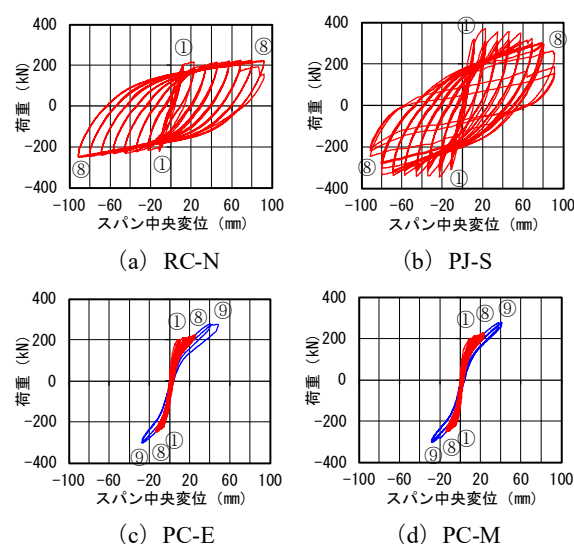


図-5 荷重とスパン中央変位の関係

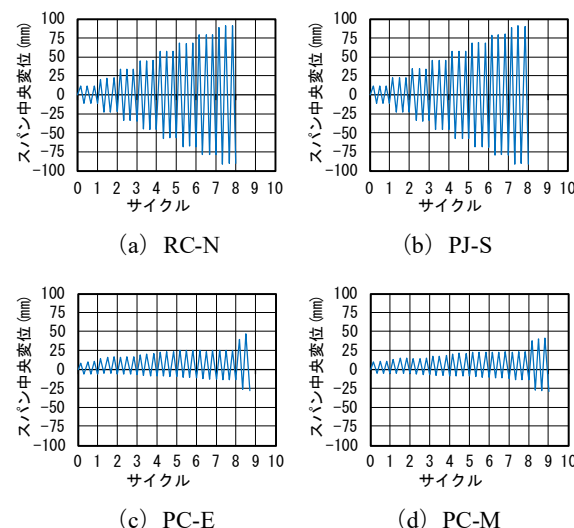


図-6 スパン中央変位と載荷サイクルの関係

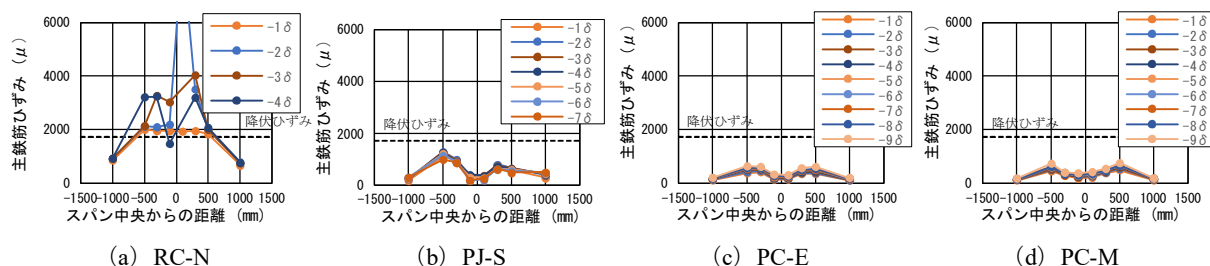


図-7 主鉄筋ひずみ（負荷荷）

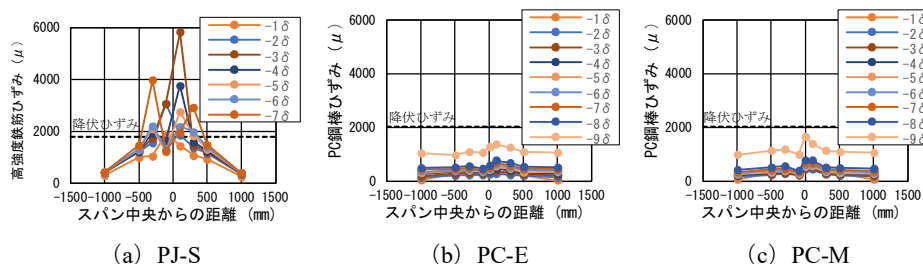


図-8 高強度鉄筋またはPC鋼棒ひずみ（負荷荷）

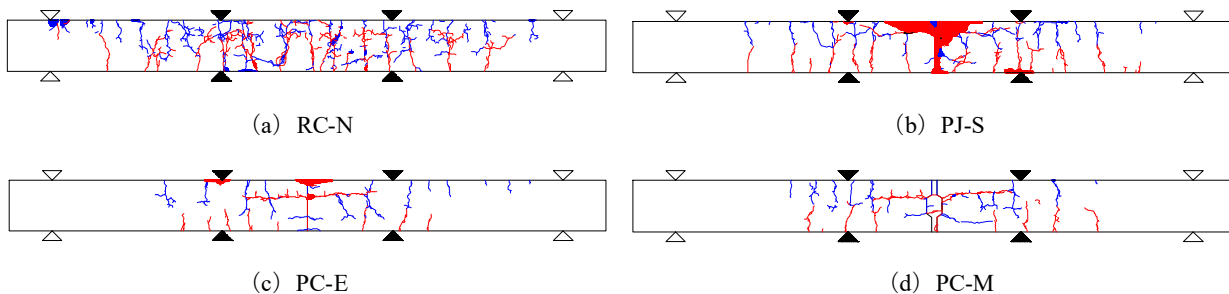


図-9 終局時の状況

がないことから、負荷荷の結果のみを示す。また、図中のひずみは計測本数の平均値を示し、降伏ひずみの値を破線にて併記した。高強度鉄筋の降伏ひずみの値はナット締付けトルクによる初期ひずみを除いた残存降伏ひずみの値を示す。RC-N は、 $\pm 1\delta$ 時点で主鉄筋が降伏しているため、 $\pm 2\delta$ 以降は急激に主鉄筋ひずみが増大し、 $\pm 4\delta$ 時点で計測が不可能となったが、PJ-S の主鉄筋は、 $+5\delta$ （負荷荷は降伏ひずみに至らず）、高強度鉄筋は $+2\delta$ および -1δ で降伏ひずみを超える結果となった。普通鉄筋よりも高強度鉄筋が先に降伏ひずみを超えることから、貫通鉄筋として接合部にも配置されている高強度鉄筋による応力負担が大きくなったが、荷重が分散したため RC-N 程ひずみが卓越はしなかった。

一方、PC-E および PC-M はともに、RC-N と同様の荷重を与えた 8δ まで降伏ひずみを超えることなく、 9δ で PC 鋼棒 3 本のうち 1 本が降伏ひずみに達した。載荷点位置近傍でのひずみ量がやや大きいものの、RC-N に比べて PC 圧着の作用により両部材の主鉄筋が受けるひずみは極めて小さくなっており、PC 鋼棒と主鉄筋では同程度のひずみとなることが確認された。

(3) 終局時の破壊性状

図-9 に終局時の状況を示す。図中の赤線は正載荷時、青線は負載荷時に発生したひび割れを示す。PJ-S は RC-N 同様に、純曲げスパン内の曲げひび割れが発生した後、荷重の増加とともにせん断スパン内に曲げひび割れが進展拡大し、最終的には鉄筋破断にて終局に至った。終局時においてもせん断ひび割れは確認されなかったが、圧縮面では圧着力の影響と考えられるコンクリート圧縮破壊が確認された。

PC-E および PC-M は、ほぼ同様のひび割れ発生状況であり、純曲げスパン内に曲げひび割れが発生した後、荷重の増加とともに進展拡大し、最終的には PC 鋼棒の降伏に至ったが、せん断スパンでは曲げひび割れの発生はほとんど見られなかった。また、接合部から水平方向のひび割れが確認された。これはプレストレス力による影響であると考えられ、PC 圧着工法は圧着面が一部離間することで屈曲変形するため、圧着領域と離間箇所の境界面で引張力が作用して水平方向のひび割れが発生したと考えられる。RC-N と PC-E および PC-M では、目視で確認したところ発生したひび割れ幅にも差がみられ、PC-M および PC-E はその幅も小さい結果となった。

いずれの接合工法でも一体型成形と比較して、ひび割れの発生本数は低減していることから、圧着式接合および PC 圧着接合の圧着力の効果が確認された。

4. まとめ

- (1) 圧着式接合工法での最大荷重は、一体型成形に比較して正載荷で 1.65 倍、負載荷で 1.38 倍大きい結果となり、一体型成形の終局までの荷重値を上回り続けることが確認された。
- (2) 圧着式接合工法での主鉄筋ひずみは、普通鉄筋よりも高強度鉄筋が先に降伏ひずみを超える結果となっており、貫通鉄筋として接合部にも配置されている高強度鉄筋による応力負担が大きいことが確認されたが、荷重が分散したため RC-N 程ひずみが卓越はしなかった。
- (3) 圧着式接合工法での終局時の破壊性状は、一体型成形および圧着式接合工法ともに純曲げスパン内の曲げひび割れが進展拡大しており、終局時においてもせん断ひび割れは確認されなかった。圧着式接合工法では普通鉄筋と高強度鉄筋で応力を受けるため、一体型成形のように鉄筋破断することなく、圧着力の影響と考えられるコンクリート縁の圧縮破壊が確認された。
- (4) 荷重制御とした載荷における PC 圧着工法でのスパン中央変位は、一体型成形に比較して正載荷で 25% 程度、負載荷で 15% 程度の抑制効果が確認された。PC 鋼棒の降伏時荷重においても、一体型成形の終局時に対して、最大荷重が正載荷で 1.24 倍、負載荷で 1.12 倍とそれぞれ大きいことが確認された。
- (5) PC 圧着工法での主鉄筋ひずみは接合面の処理方法に関係なく、一体型成形と比較して、いずれの試験体でも同様にひずみを抑制した挙動が確認された。載荷点位置近傍でのひずみがやや大きいものの、一体型成形に比べて PC 圧着の作用により両部材の主鉄筋が受けるひずみは極めて小さくなっており、PC 鋼棒と主鉄

筋では同程度のひずみとなることが確認された。

- (6) PC 圧着工法での終局時の破壊性状は、PC-E および PC-M とともにほぼ同様のひび割れ発生状況であり、純曲げスパン内に曲げひび割れが進展拡大しており、終局時においてもせん断ひび割れは確認されなかった。

以上のことから、大型プレキャストカルバートの接合部に圧着式接合工法および PC 圧着工法を用いても土木学会道路土工カルバート工指針の要求性能を満足する接合工法であることを確認し、一体型成形の耐荷力以上であること、部材間の応力伝達に異常はないこと、終局状態においても急激な荷重低下はみられないことが確認された。

参考文献

- 1) 全国ボックスカルバート協会：プレキャストボックスカルバート設計・施工マニュアル（鉄筋コンクリート製・プレストレストコンクリート製），2018.4
- 2) （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，pp.5-13，2017.11
- 3) 渡邊充弘，松田学，松本康資，日野伸一：PCa ボックスカルバートの隅角部に配した各種接合工法の曲げ耐荷挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.2，pp.607-612，2016.7
- 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－，2014.6
- 5) 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工法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.397-402，2017.7
- 6) 松本康資，松田学，井形友彦，日野伸一；圧着式接合工法を用いた 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.