# 論文 圧着式接合工法を用いた分割式 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

松本 康資\*1・松田 学\*2・井形 友彦\*3・日野 伸一\*4

要旨:分割式 PCa 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の耐震性能 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載荷試験を実施した。そ の結果、既存工法による比較用試験体では、隅角部の脆性的な破壊により終局状態となったが、提案する圧 着式接合工法では隅角部を起因とするような耐力低下や大きな損傷はなく曲げ破壊により終局状態に至って おり、十分な変形性能を確認した。

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,正負交番載荷試験

#### 1. はじめに

近年,国土交通省の推進する「i-Construction」も相俟 って,建設現場の生産性向上の観点からプレキャストコ ンクリートは注目となっている。

プレキャストコンクリートは、あらかじめ工場などで 製造されたコンクリート製品あるいはこれを用いた工法 であるため、トレーラー等の車両による運搬が必要とな る。また、昨今では大型構造物であっても人手不足等か らプレキャストコンクリートにて構築する傾向にあるた め、部材を分割製造し、建設現場にて組立施工するもの も近年増えてきている。

このため,組立施工には種々の接合工法が採用されて いるが,その耐震性能および耐久性能はあまり明らかに されていないのが現状である。

著者らは、分割式 PCa 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の静的曲 げ載荷試験を行い、耐震設計による L2 地震動時の設計 荷重に対して十分な構造耐力を有するとともに、接合面 の開口変位の抑制および荷重除荷後の復元性に優れた工 法であることを明らかにした<sup>1)</sup>。

しかし,降伏時の繰り返し荷重を想定した正負交番載 荷は検証しておらず,耐震性能の信頼性向上を目指す上 で重要な課題である。そこで本研究では,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,既 存工法との比較の下に正負交番載荷試験を実施し,塑性 域での変形性能について実験的検討を行った。

# 2. 実験概要

#### 2.1 試設計条件

表-1 に試験体の試設計条件を示す。カルバート工指

*1	(株)ヤマックス	技術本部	開発研	究課 割	果長	(正会員)			
*2	(株)ヤマックス	技術本部	3 部長	工博	(正会	会員)			
*3	(株)ヤマックス	技術本部	開発研	究課					
*4	大分工業高等専	門学校	学校長	(九州大	学名	誉教授)	工博	(フェロー会)	릝)

表-1 試験体の試設計条件

試設計の 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/mm²)40設計スランプ (cm)18設計空気量 (%)2.0
鉄筋	SD345:D13,D16 主鉄筋 D16-8本/m 配力筋・フープ筋 D13 SD490:D19 主鉄筋 D19-6本/m
機械式鉄筋継手	モルタル充填継手 (D16)

表-3 コンクリートの示方配合

W/B	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )						
(%)	(%)	W	С	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:空気量(%)

針<sup>2)</sup>では,L2 地震動の作用に対して,耐震性能2(構造物の損傷が限定的で,機能の回復を速やかに行い得る状態),あるいは耐震性能3(構造物の機能性が低下するものの致命的とならない状態)が要求されている。これを

変形領域に置き換えた場合,耐震性能2とは降伏耐力点 から最大耐力点までの変形領域であり,耐震性能3とは 最大耐力点の変位を超えて終局まで低下する変形領域と いえる。したがって,最大耐力以降もせん断破壊などに よって急激に耐力低下しない変形能力が要求される。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。 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L1地震動時は許 容応力度法,L2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<sup>3)-5)</sup>。

### 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。コンクリートは通常コンクリート製品の製造に 使用している設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup>の配合を用いた。頂 版部材および側壁部材の主鉄筋にはコンクリート用棒鋼 の D16 (8 本/m, SD345),配力筋およびフープ筋には D13 (SD345)を用いた。また圧着式接合工法では主鉄 筋に D19 (6 本/m, SD490)の高張力ねじ節棒鋼(以下, 高強度鉄筋と称する)を用いた。

#### 2.3 実験水準

表-4 に試験体の実験水準を示す。試験体は、新たに 考案した圧着式接合工法(試験体 PJ)、比較用の一体型 成形(試験体 N)、既存工法としてモルタル充填式の機械 式継手(試験体 SS)および PC 床版の継手として用いら れるループ継手(試験体 Lo)の4 種類とした。

図-1 に圧着式接合工法の概要図,図-2 に高強度鉄 筋の利用コンセプトを示す。圧着式接合工法は、ナット 締付けに用いる高強度鉄筋を構造用鉄筋と接合用アンカ 一筋として併用し、普通鉄筋(SD345)より高強度にな った部分を部材接合のナット締付けに利用することで、 接合面に圧着力を与えて開口変位の抑制や荷重除荷後の 復元性が期待できる接合工法である。

側壁部材の上端縁からは高強度鉄筋を突出させており, スラブ形状の頂版部材の端部には突出した高強度鉄筋に 応じた開孔を設けている。突出した高強度鉄筋に頂版部 材を嵌めこんで定着プレートと締付けナットを設置した 後,トルクレンチを用いて所定のトルクにてナットを締 付けて接合させる。その後頂版部材の開孔部には,無収 縮モルタルを充填して完了となる。

なお, 試験体 N は接合部のない試験体で現場打ちコン クリート構造を想定している。また, 試験体 SS および 試験体 Lo は現在活用されている代表的なプレキャスト 接合工法である。

## 2.4 試験体概要

図-3 に試験体概要を示す。試験体は、ボックスカル

#### 表-4 試験体の実験水準

	/#= #		
略記号	接合方法	順考	
試験体 N	一体型成形	比較用	
試験体 PJ	圧着式接合工法	新考案	
試験体 SS	機械式継手	モルタル充填式	
試験体 Lo	ループ継手	DIN1045 準拠	



バート(内幅 3000mm×内高 3000mm)の頂版と側壁で 構成されたL形状の切取り試験体とした。基本的な形状 配筋はいずれの試験体も同様とし,隅角部は各種接合工 法の構造細目に準じた。試験体 PJ,試験体 SS,試験体 Loについては実構造物同様,側壁部材上端にコンクリー ト標準示方書に準じたコーベルを配置し,この上端でス ラブ形状の頂版部材を接合させた。試験体 Nについては 通常の三角ハンチとし,ハンチ筋を配置した。

### 2.5 載荷方法および測定方法

図-4 に載荷方法,図-5 に測定器の取付け位置,図 -6 に正負交番試験状況を示す。

地中埋設構造物であるボックスカルバートの構造計算 を行った場合,隅角部では部材軸線の外側に発生する曲 げモーメントの影響が大きくなる傾向にあるが,地震動 時には部材軸線内側にも曲げモーメントが発生するため, 載荷は外側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 ーメントを再現させた。加力は開方向を正載荷,閉方向 を負載荷とした。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。

載荷パターンは正負方向共に1回ずつ予備加力を行っ た後,主鉄筋降伏時の載荷変位を降伏変位δyとして, ±1δy, ±2δy, ±3δy・・・と同一変位で3回ずつ正 負に繰り返し載荷を行った。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±1δyを増加させて載荷 を続け,最大荷重の80%以下になるまで変位を漸増させ た<sup>0,7)</sup>。

降伏変位は,事前に実施した一方向の静的載荷試験結 果から主鉄筋の降伏時の載荷変位を決定し,その載荷変 位を降伏変位+δyおよび-δyとした。

測定項目について,載荷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,それぞれの 変位量を計測した。

## 3. 実験結果

#### 3.1 材料特性值

表-5 に材料特性値を示す。コンクリートは正負交番 載荷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。

## 3.2 正負交番載荷試験

## (1) 終局時の破壊状況

図-7に終局時の破壊状況を示す。試験体Nは正載荷





図-6 正負交番試験状況

表-5 材料特性值

コンクリート 材齢:載荷試験日 (材齢:約6週間)			圧縮強 ヤング 割裂引張	49.5 31.1 3.24	
無収縮モルタル ( <sub>528</sub> )			圧縮強	66.1	
機械式継手用高 強度モルタル( <sub>528</sub> )			圧縮強	96.9	
	区分		降伏点 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	破断 伸び
鉄筋	SD345	D13	406	550	24
UL.		D16	389	535	26
	SD490 D19		527	684	18





+8 $\delta$ y, 負載荷-7 $\delta$ y, 試験体 PJ は正載荷+9 $\delta$ y, 負載 荷-8 $\delta$ y, 試験体 SS は正載荷+3 $\delta$ y, 負載荷-7 $\delta$ y, 試験体 Lo は正載荷+6 $\delta$ y, 負載荷-6 $\delta$ y で最大荷重の 80%以下となったのを確認した。

試験体Nおよび試験体PJは最終的に正載荷(開方向) で最大荷重の80%以下となっており,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。それに対して, 試験体SSおよび試験体Loは最終的に負載荷(閉方向) で最大荷重の80%以下となった。ボックスカルバート隅 角部に発生した斜めひび割れが外側主鉄筋に沿って進展 拡大しており,最終的には付着や付着割裂に起因した破 壊によって終局状態となったと考えられる。

(2) 荷重と載荷変位の関係(ヒステリシス曲線)

図-8に荷重と載荷変位の関係を示す。試験体Nお



よび試験体 PJ は正載荷負載荷ともにエネルギーの減衰 が小さく,耐荷力を保持したまま正負交番の降伏変位± δy を漸増させた線形を示しており,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線形となっている。これに対して,試験体 SS および試験体 Lo は負載荷では耐荷力を保持しているものの,正載荷ではエネ



図-11 主鉄筋ひずみ(正載荷時:開方向)

ルギーの減衰が大きいため,耐荷力が小さく,早期に低下している傾向にある。そのためヒステリシス曲線の描く形状は負載荷方向に偏りがあり,面積は小さい分布となった。これは接合部の挙動の影響と想定され,隅角部での付着や付着割裂に起因した破壊に起因していると考えられる。

# (3) 履歴吸収エネルギー

図-9 に履歴吸収エネルギーを示す。履歴吸収エネル ギーは、履歴ループの安定性等を評価する指標として用 いられ、耐震性能を定量的に評価する際の一つの指標と なるといわれている<sup>7)</sup>。

試験体 N および試験体 PJ は降伏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 6 δ y およ び 7 δ y 以降に低下する線形を示した。これは履歴吸収エ ネルギーが前の載荷変位よりも減少した場合,軸方向鉄 筋の座屈が生じたと判断できる。それに対して,試験体 SS および試験体 Lo は降伏変位の漸増に伴い増大するも のの履歴吸収エネルギー値は試験体 N および試験体 PJ に比べて小さく,最大値を計測した後に低下することな く直線状のまま最大値で終局となる結果となった。

この結果から,試験体 N および試験体 PJ は塑性変形 していること,試験体 SS および試験体 Lo は脆性破壊と なっていることが確認できる。

# (4) 主鉄筋ひずみ

図-10 に負載荷時の主鉄筋ひずみ,図-11 に正載荷 時の主鉄筋ひずみを示す。図中の起点は隅角部格点を0 とし、+方向を頂版側、-方向を側壁側としてその計測 位置を示している。発生モーメントの大きい負載荷の場 合、いずれの試験体も頂版ハンチ付根付近の断面変化点 にて最大ひずみを計測しており、隅角部での応力伝達に 問題は認められなかった。最大ひずみが頂版側に発生し ているのは、油圧ジャッキの可動が頂版側であった影響 および側壁部材側にはコーベルを配置した影響が考えら れる。また、試験体 Lo はループ状の主鉄筋をアンカー 筋としたため、その鉄筋定着長端の位置付近で最大ひず みが発生していると考えられる。

地震動時に発生する内側モーメントの正載荷の場合, 試験体 N および試験体 PJ は負載荷同様に頂版ハンチ付 根付近の断面変化点にて最大ひずみを計測しているが, 試験体 SS および試験体 Lo では隅角部で最大ひずみを計 測している。これは終局時の破壊状況と同じ傾向を示し ており,隅角部の脆性的な破壊の発生に起因しているも のと考えられる。

## 4. まとめ

ボックスカルバートの頂版隅角部を各種接合工法にて

接合した L 形状の切取り試験体で,正負交番載荷試験を 行った結果,次のことが明らかになった。

- 試験体 N および試験体 PJ では、断面変化点での曲げ 破壊型にて終局状態となった。試験体 SS および試験 体 Lo では、隅角部に発生した斜めひび割れが外側主 鉄筋に沿って進展拡大しており、最終的には付着や 付着割裂に起因した破壊によって終局状態となった と考えられ、脆性的な破壊が確認された。
- 2)荷重と載荷変位の関係から、試験体 SS および試験体 Lo に比較して、試験体 N および試験体 PJ の正載荷 (開方向)の荷重履歴は、最大荷重ならびに繰返し による荷重低下も小さく、十分な耐力を有すること が確認された。
- 3) 履歴吸収エネルギーの線形から, 試験体 SS および試 験体 Lo は履歴吸収エネルギーが小さく脆性破壊とな っているのに比較して, 試験体 N および試験体 PJ は 履歴吸収エネルギーが大きく, 試験体 PJ は 7 δ y 以降 に軸方向鉄筋の座屈による履歴吸収エネルギーの低 下がみられ, その後は緩やかに減少することを確認 した。
- 4) 主鉄筋ひずみは、特に正載荷において終局時の破壊状況と同じ傾向を示しており、試験体 PJ は断面変化点で最大ひずみとなり隅角部の応力伝達に問題がないことを確認した。

### 参考文献

- 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
- 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), H22.3
- 3) (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-
- 4)(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-
- 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-(後編)-2015年度版-
- (初期)
  (初期)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
  (11)
- 7)(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