

# 論文 PCa ボックスカルバートの隅角部に配した各種接合方法の曲げ耐荷挙動

渡邊允弘\*1, 松田学\*2, 松本康資\*3, 日野伸一\*4

**要旨:** 施工性および経済性に優れる PCa 分割式ボックスカルバートの開発に資する知見を得るために、機械式鉄筋定着工法を継手部の配筋簡素化として用いたカルバート隅角部を模す L 形試験体を作製し、既存工法との比較で隅角部の曲げ耐荷挙動について実験的検討を行った。その結果、常時、L1 地震動時および L2 地震動時の設計荷重に対して、いずれの接合方法も隅角部を起因とするような耐力低下や大きな損傷はみられず、十分な構造耐力を有することが分かった。ただし、機械式鉄筋定着工法や一部の接合方法では、機械式鉄筋継手等の既存工法に比較して、コンクリート接合部の界面剥離が先行する可能性が指摘され、これについては今後の検討課題となった。

**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、曲げ耐荷挙動

## 1. はじめに

近年、現場施工の合理化・省力化の観点から、プレキャストコンクリート部材（以下、PCa 部材と称す）を用いた大型ボックスカルバートの採用が増加している。

形状寸法や重量等の搬送制限から分割式となる大型プレキャストボックスカルバートは、構造物の用途、設計条件、施工性、経済性および開発者の設計思想によって、様々な接合方法、接合位置および構築方法（オール PCa 工法、ハーフ PCa 工法）が検討され、実用化に至っている<sup>1)3)</sup>。

ボックスカルバートの隅角部に接合を設けた場合、PCa 部材がスラブ形状（頂版・底版部材）や L 形状（側壁部材）に規則化・単純化するために型枠製造費が縮減され、製造、運搬および組立工（特に斜角施工時）が容易となり施工性や経済性への効果がきわめて大きい。また、最近では機械式鉄筋定着工法の開発によって配筋施工が簡素化され、施工性の向上に貢献している。

そこで、本研究では PCa ボックスカルバートの隅角部を模して、機械式鉄筋定着工法により隅角部で接合した L 形試験体を作製し、既存工法との比較の下に曲げ耐荷挙動について実験的検討を行った。

## 2. 実験方法

### 2.1 使用材料

表-1 に使用材料、表-2 にコンクリートの示方配合を示す。PCa 部材ならびにハーフ PCa 部材を想定した後施工部のコンクリートは、設計基準強度 40N/mm<sup>2</sup> のコンクリート配合を用いた。試験体の主鉄筋には D16 の異形鉄筋を用い、配力筋およびフープ筋には D13 の異形鉄筋を

用いた。また、機械式鉄筋継手工法にはモルタル充填継手、機械式鉄筋定着工法にはナット定着を用いた<sup>4),5)</sup>。

### 2.2 設計条件

表-3 に試験体作製の設計条件を示す。試験体は耐震設計したボックスカルバート（内幅 3000mm×内高

表-1 使用材料

コンクリート	設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	40
	設計スランプ (cm)	18.0
	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	
	機械式鉄筋継手	モルタル充填継手 (D16)
機械式鉄筋定着	ナット定着 (D16)	

表-2 コンクリートの示方配合

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

注) W/B : 水結合材比, s/a : 細骨材率, Air : 空気量 (%), C : セメント, FA : フライアッシュ

表-3 試験体作製の設計条件

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	

\*1 九州大学大学院 工学府 都市環境システム工学専攻 (学生会員)

\*2 (株) ヤマックス 技術本部部長 工博 (正会員)

\*3 (株) ヤマックス 技術本部開発研究課 課長代理

\*4 九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門教授 工博 (正会員)

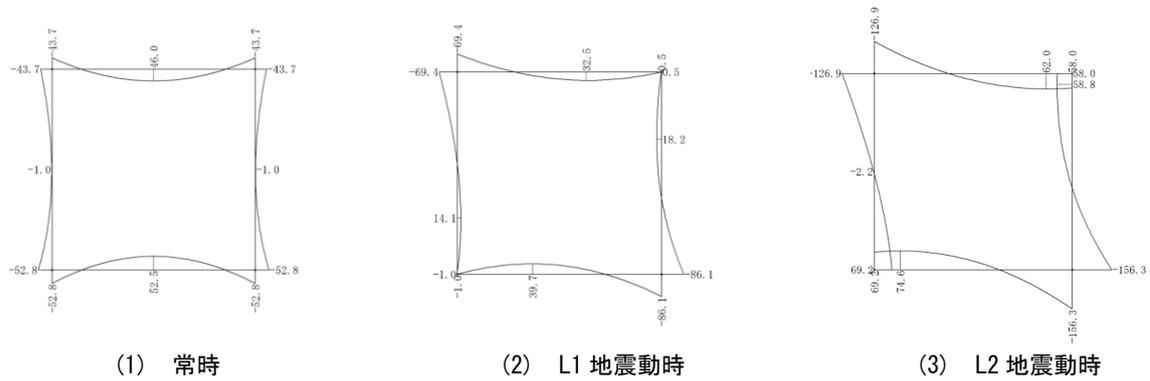


図-1 各荷重条件時の曲げモーメント図 (単位 : kN・m)

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 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>6),7)</sup>。図-1 に各荷重条件時の曲げモーメント図を示す。

### 2.3 実験要因および試験体

表-4 に試験体の概要を示す。試験体は,比較用の一体型試験体(試験体 N),既存工法としてモルタル充填型の機械式鉄筋継手試験体(試験体 S),基本定着長 20φ以上を有する重ね継手試験体(試験体 La)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)を隅角部の接合に用いた<sup>8)</sup>。

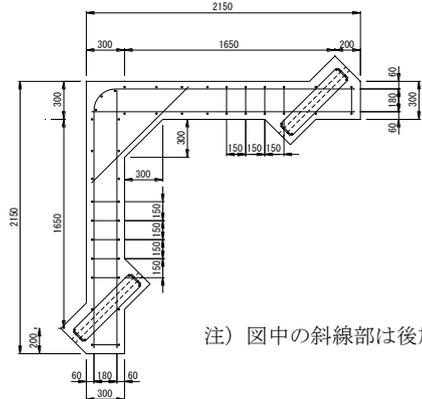
機械式鉄筋定着工法は,過密配筋を避けるために標準フックの代替として用いられることが多いが,付着力と支圧力によって定着長を短くする効果があり,鉄筋の重ね継手長さを短尺化することで配筋の簡素化に期待できる。最近では定着機構のみならずラーメン構造体としての要求性能を確保する目的として使用されることも少なくない<sup>4),5)</sup>。そこで,錨付ナットをねじふし嵌合(以下,錨付ナットと称す)した機械式定着工法(試験体 P)と,これと同様な定着機構を期待して,主鉄筋の端部にネジ加工を施して M ねじナットを固定した定着工法(試験体 M)を用いた。

図-2 に試験体の形状図を示す(試験体 N 以外は接合部の概要図)。試験体は各種接合方法をボックスカルバート(B3000×H3000mm)の頂版と側壁の隅角部に配した L 形試験体とした。内外主鉄筋 D16 を 120mm 間隔で配置し,曲げ降伏が先行するようにせん断スパンにはフープ筋 D13 を 150mm 間隔で配筋した。

試験体は,コンクリートを打設して 4 日間の型枠存置後に脱型し,試験体 S については専用の特殊モルタルを充填して接合した。後施工コンクリートにより接合を要するハーフ PCa 工法による試験体は,コンクリートを打

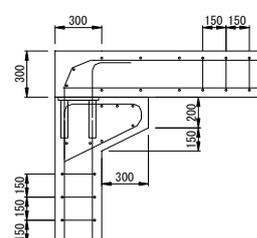
表-4 試験体の概要

試験体		備考	構築工法
略記号	接合方法		
試験体 N	一体型	比較用	現場打ち
試験体 S	機械式継手	モルタル充填	オール PCa
試験体 La	重ね継手	定着長 20φ以上	ハーフ PCa
試験体 Lo	ループ継手	DIN1045 準拠	
試験体 P	錨付ナット	定着長 12φ以上	
試験体 M	M ねじナット		

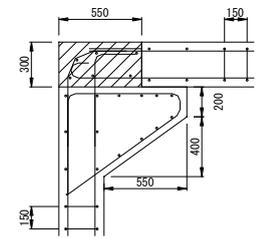


注) 図中の斜線部は後施工部

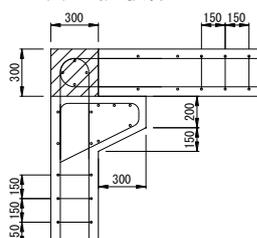
(a) 試験体 N



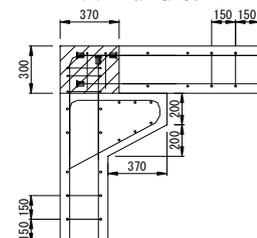
(b) 試験体 S



(c) 試験体 La



(d) 試験体 Lo



(e) 試験体 P, M

図-2 試験体の形状図 (単位 mm, 試験体幅 500mm)

設して2週間以上の養生を行って載荷試験に供した。なお、後施工コンクリートを打設するPCa部材の接合面はグリーンカット処理を施し、PCa部材同士の接合面はエポキシ樹脂を塗布して接合を行った。

## 2.4 載荷方法および測定方法

図-3に載荷方法および測定方法および図-4に載荷試験状況を示す。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(図-1参照)。ただし、地震時には軸線内側にも曲げモーメントが発生するため、載荷は部材軸線の外側ならびに内側に曲げモーメントが作用するように、開方向および閉方向の一方方向載荷によって曲げモーメントを作用させた。

開方向は、油圧ジャッキの両端にヒンジ構造の鋼材支柱を設置して、油圧ジャッキのストロークを伸ばすことで曲げモーメントを発生させ、閉方向は頂版および側壁の端部を貫通するPC鋼棒を油圧ジャッキで緊張して隅角部に曲げモーメントを発生させた。載荷は開方向(内側モーメント)のL1時荷重、L2時荷重を載荷後、閉方向(外側モーメント)の常時荷重、L1時荷重およびL2時荷重を与え、終局状態(鉄筋降伏やコンクリート圧壊により耐力が低下する状態)まで載荷を行った。載荷試

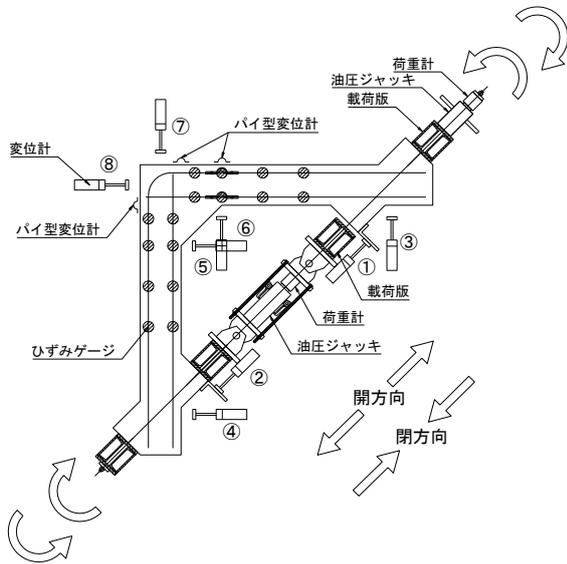


図-3 載荷方法および測定方法



(1) 開方向の載荷 (2) 閉方向の載荷

図-4 載荷試験状況

験はレベル調整した鋼板上に試験体を水平に置いて行うが、鋼板上ならびに試験体底面にそれぞれテフロンシートを設置して摩擦抵抗を減じた。

測定は、荷重、内外主鉄筋のひずみ、頂版ハンチ外側・接合部の開口変位および頂版・側壁の変形量を測定した。

## 3. 実験結果

### 3.1 材料特性値

表-5に材料特性値を示す。コンクリートおよび機械式継手用の充填モルタルの圧縮強度試験は、載荷試験日に実施し、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 開方向の載荷試験

図-5に各種接合方法の変形性状を示す。試験体NのL2時の合計変位量1.0mm(変位計③と④の合計)に対して、試験体Laで0.7mmと同等以下であるが、試験体Sで2.0mm、試験体Loで3.1mm、試験体Pで3.0mmおよび試験体Mで2.8mmとなり、開方向の変位量にはやや差がみられた。今般の試験では、試験体Nではハンチ筋を配置しているが、他の試験体では試験体作製の都合上から、頂版部材と側壁部材が主鉄筋のみの接合となっ

表-5 材料特性値

	区分	PCa	後施工
	コンクリート	スランブ(cm)	16.0
材齢：載荷試験日	空気量(%)	1.7	1.5
	※PCa 27日	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	52.4
後施工 23日	ヤング係(kN/mm <sup>2</sup> )	34.3	30.9
	管理材齢 2週	割裂引張強(N/mm <sup>2</sup> )	4.35
	曲げ強度(N/mm <sup>2</sup> )	6.57	—
鉄筋	区分	D13	D16
	降伏点(N/mm <sup>2</sup> )	385	387
	引張強さ(N/mm <sup>2</sup> )	564	601
	破断伸び(%)	24	22
鉄筋継手用モルタル	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	100	
	※規格値 70以上		

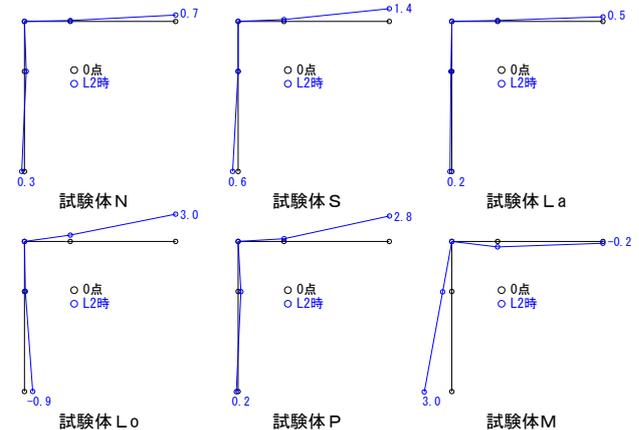


図-5 開方向の変形性状(単位: mm 10倍表示)

いる。実際に構造体を製造組立てる場合には、ハンチ筋の代替ならびに組立施工時の精度と安全に配慮して、側壁部材のハンチ頭からアンカー鉄筋を突出させて頂版部材に設けた貫通孔に通した後、無収縮モルタルを充填して連結することを考慮している。

したがって、本試験体による結果は実構造物の配筋に対して過大に評価することになるが、全試験体ともにL2時荷重においてもひび割れや接合部の界面剥離は発生しておらず、L1地震時およびL2地震時の設計荷重に対して十分な構造性能を有することを確認した。

### 3.3 閉方向の荷重試験

#### (1) ひび割れ、変形状および曲げ耐力

表-6 に閉方向時試験の各荷重時の変形状、図-6 に荷重と載荷点変位の関係、図-7 にL2荷重時の引張主鉄筋ひずみおよび表-7 に終局時のひび割れ性状示す。なお、図-6 には常時、L1地震動時およびL2地震動時の構造計算で隅角部に発生する曲げモーメントの最大値を荷重値に読み替えて設計値として併記した。

閉方向の荷重試験では、全ての試験体にて頂版および側壁のハンチ付根に向かって曲げひび割れ発生後、荷重の増加にともなって曲げひび割れが分散拡大した。最終的には引張主鉄筋の降伏した後、曲げ引張破壊によって終局に至った。常時荷重点で曲げひび割れの発生はみられず、L2荷重点でも引張主鉄筋の降伏には達しておらず、設計荷重に対して十分な曲げ耐力が確認された。

試験体Sと試験体Nを比較すると、最大耐力はほぼ同等であり、変形能力はやや大きくなっている。試験体Sは側壁部に接合を有するために目開きの影響が変形量の増加に寄与した可能性が考えられる。

試験体La、試験体Pおよび試験体Mは、試験体Nに対して曲げ剛性がやや大きく、最大耐力も11~19%大きくなっているが、変形能力については32~54%小さくなった。試験体Laでは20φ以上、試験体Pおよび試験体

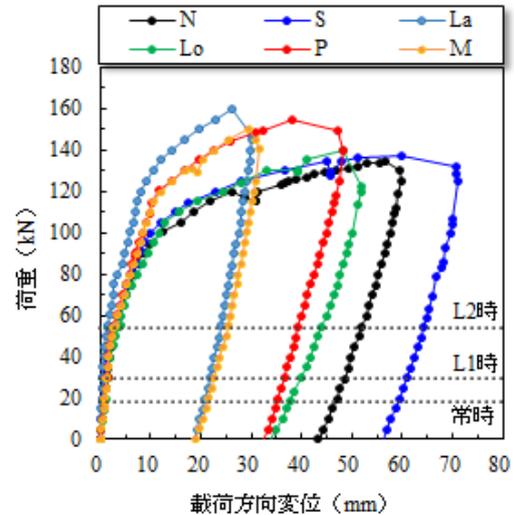


図-6 荷重と載荷方向変位の関係（閉方向）

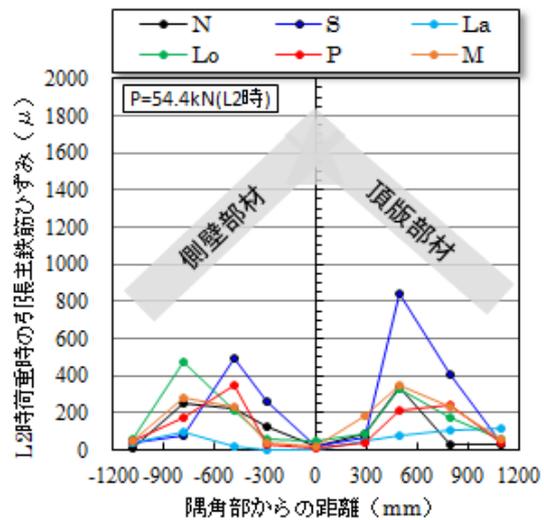


図-7 L2荷重時の主鉄筋ひずみ（閉方向）

Mでは12φ以上の鉄筋の重ね定着長を設けており、定着長さに起因してハンチが大きくなるため、結果としてせん断スパンが小さくなり、曲げ剛性、最大耐力および変

表-6 各荷重時の変形状（単位：変位 mm）

区分	閉方向（外側 M）の設計荷重値						初期ひび割れ		降伏荷重		終局荷重	
	常時(18.7kN)		L1時(29.8kN)		L2時(54.4kN)		荷重 (kN)	載荷方向 変位	荷重 (kN)	載荷方向 変位	荷重 (kN)	載荷方向 変位
	ひび割れ	載荷方向 変位	部材性能	載荷方向 変位	部材性能	載荷方向 変位						
N	発生なし	0.9	降伏に至らず	1.4	終局に至らず	2.8	44	2.0	94.8	9.9	135	56.5
S		0.4		0.8		2.8	45	1.3	99.7	9.7	137	59.7
La		0.3		0.5		1.4	47	1.1	125	9.1	160	26.2
Lo		1.0		1.5		3.6	48	3.1	105	12.7	140	48.1
P		0.9		1.3		2.8	53	2.8	120	11.8	154	38.2
M		0.8		1.2		2.8	43	1.9	120	12.2	150	29.6

注1) 載荷方向変位は、閉方向の変位計①および②の合計を示す。

注2) 初期ひび割れは、頂版ハンチ直上に生じた0.05mm以上の曲げひび割れを示す。

表-7 終局時のひび割れ性状

区分	試験体 N	試験体 S	試験体 La	試験体 Lo	試験体 P	試験体 M
終局時						

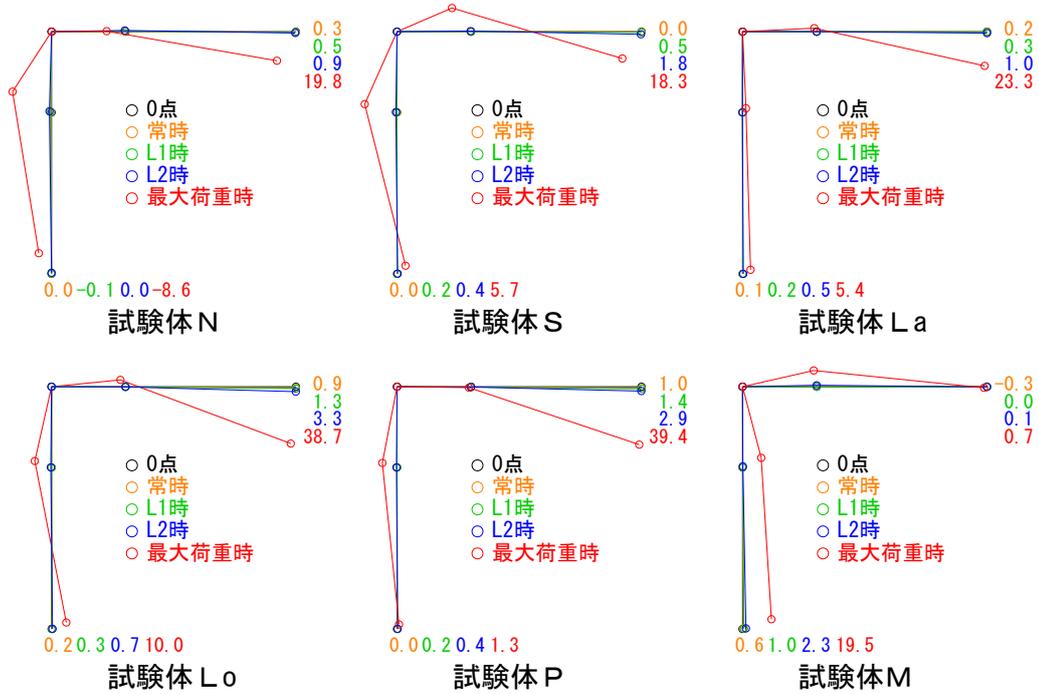


図-8 各種接合方法の変形性状（閉方向）

形能力に差が生じたと考えられる。なお、試験体 P と試験体 M は荷重と載荷方向変位の関係において、試験体 M が最大耐力に至るまで変位曲線がほとんど一致している。試験体 M は試験体 P に比べての定着ナットの頭径が小さく、ハンチ直上の曲げ引張り破壊とともに後施工コンクリート部に鉄筋の抜け出しと思われるひび割れが認められており、定着機構である支圧力の差によって先に終局状態に至ったと考えられる。

試験体 Lo は、試験体 N に対して最大耐力はほぼ同等であり、変形能力は 15% 小さくなった。試験体 Lo は、ループ状の鉄筋による支圧力と鉄筋の付着力による定着機構を有すると考えるが、重ね継手やナット定着のように曲げ剛性や最大耐力が大きくなるものではなく、一体型の試験体 N に近い曲げ性状を示したが、変形能力はやや小さくなった。

(2) 接合部の変形性状

図-8 に各種接合方法の変形性状を示す。常時、L1 地震動時および L2 地震動時の載荷重では、各種接合方法

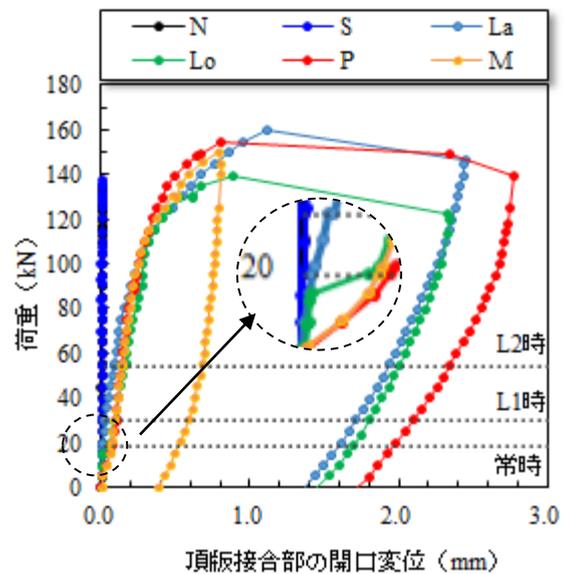


図-9 頂版接合部の開口変位（閉方向）

注) 試験体 N と試験体 S は頂版に接合部がないため、ハンチ直上の測定値を示す。

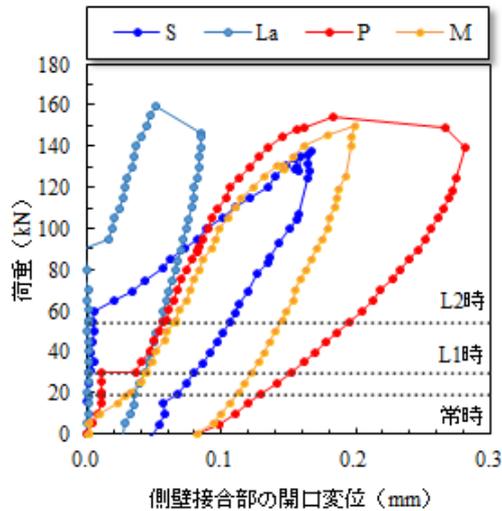


図-10 側壁接合部の開口変位（閉方向）

注) 試験体 N は計測なし，試験体 Lo は変位計脱着

に大きな違いはない。最大荷重時は試験体 La を除き、頂版もしくは側壁部材のハンチ付近が外側に膨らむように、載荷点近傍は内側に折れるように変形している。試験体 La では主鉄筋の重ね定着長さが長く、組立施工の関係から頂版部材の受け台となるハンチ部が大きく形成されることで隅角部の剛性が高くなり、他の試験体に比べると変形量が相対的に小さくなったと考える。

図-9 に荷重と頂版接合部の開口変位の関係を示す。試験体 N および試験体 S を除いた頂版に接合部を有する全ての試験体では、荷重の増加にともなって開口変位が大きくなった。L2 荷重時点で 0.14~0.16mm の開口変位を測定しているが、一般に耐久性の観点から指標となるひび割れ幅 0.2mm 以下と比較しても小さくなった。しかし、試験体 Lo、試験体 P および試験体 M では、常時荷重時に 0.05~0.08mm の開口変位が測定され、変位計の挙動からコンクリートの接合面に界面剥離が生じている可能性が指摘される。この場合、常時荷重時の要求性能（ひび割れ発生なし）を満足しない結果となるため、接合面の処理方法、接着方法および目地部の防水工法等について、今後検討する必要がある。

図-10 に荷重と側壁接合部の開口変位の関係を示す。試験体 M については常時荷重時に 0.02mm、試験体 P では 0.01mm の開口変位がみられたが、試験体 S および試験体 La では L2 時荷重点でも開口変位はみられなかった。

#### 4. まとめ

施工性および経済性に優れた PCa 分割式ボックスカルバートの開発に資する知見を得るために、機械式鉄筋定着工法を接合方法として適用したカルバート隅角部を模

す L 形試験体を作製し、既存工法との比較で隅角部の曲げ耐荷挙動について実験的検討を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- 1) 開方向の載荷試験では、接合方法によって変位量にやや差がみられたが、全ての試験体において L2 時荷重においてもひび割れや界面剥離は発生しておらず、L1 地震時および L2 地震時の設計荷重に対して十分な構造性能を有すること確認した。
- 2) 閉方向の載荷試験では、全ての試験体において常時荷重点で曲げひび割れの発生はみられず、L2 荷重点でも引張主鉄筋の降伏には達しておらず、設計荷重に対して十分な曲げ耐力を確認した。ただし、接合方法によって終局耐力や変形能力には違いがあり、一体型の試験体に比べて重ね継手やナット定着工法は曲げ剛性や最大耐力は大きくなるが、変形能力は小さくなる傾向にあった。
- 3) 閉方向の載荷試験にて、接合部の開口変位に着目すると、機械式鉄筋定着工法とループによる接合方法では常時荷重点で接合面に僅かに界面剥離が生じている可能性が指摘された。

機械式鉄筋定着工法を用いた試験体 P および試験体 M は、設計荷重に対して十分な構造耐力を有しており、今後、接合面の処理方法、接着方法および目地部の防水工法等を検討することで、十分に適用可能な接合方法であると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 佐藤光徳，長谷川明，鷲尾晴美：斜角を有する PRC ボックスカルバート実験，土木学会東北支部技術研究発表会（平成 17 年度），pp.128-129，2005
- 2) 手島良祐，大沢照正，三浦孝広：プレキャスト・現場打ちコンクリートを用いた組立式ボックスカルバートの力学的特性（3）～実物大構造物による性能試験，土木学会第 60 回年次学術講演会，pp.1093-1094，平成 17.9
- 3) 佐川康貴，片山強，堤俊人：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 49（3），pp.13-20，2011.3
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー128，鉄筋定着・継手指針[2007 年版]，2007.8
- 5) （財）日本建築総合試験所：機械式鉄筋定着工法 設計指針（2010 年改定），2010.5
- 6) （社）日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説－2006 年度版－
- 7) （社）日本下水道協会：下水道施設計画．設計施設と解説－2009 年度版－
- 8) （社）日本橋梁建設協会：PC 床板設計の手引き，平成 19 年 3 月