

論文 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

松田学*1・日野伸一*2・松本康資*3・畠山繁忠*4

要旨：施工性、経済性および安全性に優れた分割式 PCa ボックスカルバートの隅角部に配する接合工法の開発を目的として、高強度鉄筋を構造用鉄筋と緊張材として併用し、普通鉄筋より高強度になった分を部材接合面の圧着力に利用した接合工法を考案し、その曲げ耐荷挙動について実験的検討を行った。実験の結果、常時、L1 地震動時および L2 地震動時の設計荷重に対して十分な構造性能が得られ、荷重除荷後は開口変位が小さくなり、終局状態に至った後も接合面に損傷は認められなかった。

キーワード：プレキャストボックスカルバート、隅角部、高強度鉄筋、圧着力、接合工法

1. はじめに

施工の合理化、品質確保および環境負荷低減効果に優れたプレキャストコンクリート製品（以下、PCa 製品と称する）は、頻発する自然災害や次世代の担い手不足も相俟って、更なる利用拡大が期待されている。しかし、一方では長寿命化、メンテナンスおよびサステナビリティなどの建設構造物に対する新たな課題とともに、PCa 製品の設計方法、接合技術および製品自体の情報不足を指摘する声も聞かれる。

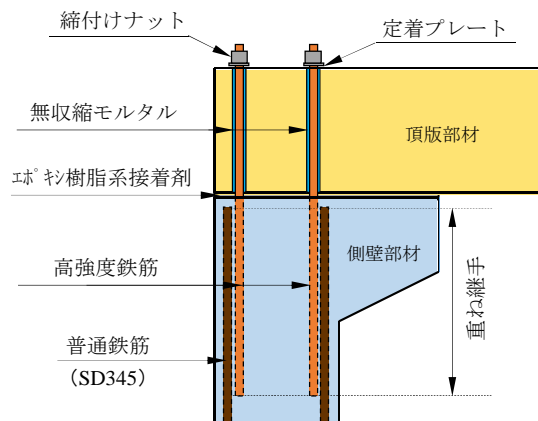
著者らは、PCa 製品の活用促進に向けて接合技術に着目し、各種鉄筋継手工法や PC 鋼材による圧着工法について実験的研究を行い、耐震設計による L2 地震動時の設計荷重時点でも終局状態に至ることなく、十分な構造性能を有することを確認している¹⁾³⁾。

しかし、分割式 PCa ボックスカルバートの隅角部に接合部を配した実験において、後施工コンクリートを用いた一部の鉄筋継手工法では、常時荷重時点で接合面の界面剥離が先行する可能性が指摘され、接合部の安全性については課題を残した¹⁾。

そこで、本研究では施工性、経済性および安全性に優れた PCa ボックスカルバートの隅角部に配する接合工法の開発を目的として、高強度鉄筋を構造用鉄筋と緊張材として併用し、高強度鉄筋の普通鉄筋より高強度になった分を部材接合面の圧着力に利用することで、接合面の開口変位の抑制および荷重除荷後の復元性が期待できる接合工法（以下、圧着式接合工法と称する）を考案し、その曲げ耐荷挙動について実験的検討を行った。

2. 圧着式接合工法の概要

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。側壁部材の上端縁からは構



※重ね継手部：普通鉄筋と高強度鉄筋は奥行方向の同一断面に配置

図-1 圧着式接合工法の概要図

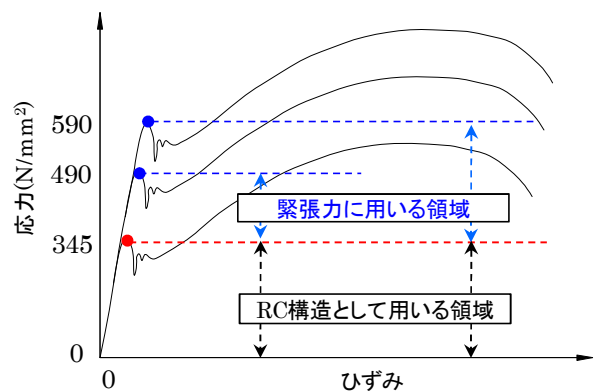


図-2 高強度鉄筋の利用コンセプト

造用鉄筋ならびに緊張材として用いる高強度鉄筋を突出させている。

スラブ形状の頂版部材の端部には、突出鉄筋に応じた開孔が設けられており、側壁部材の上端縁から突出する鉄筋に頂版スラブの開孔部を嵌め込んで定着プレートと

*1 (株) ヤマックス 技術本部部長 工博 (正会員)

*2 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)

*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 助教 (正会員)

締付けナットを設置した後、トルクレンチ等を用いて所定の緊張力を与えて接合する。その後、頂版スラブの開孔部には、無収縮モルタルを充填して接合を完了する。

導入緊張力は高強度鉄筋に普通鉄筋（SD345）の降伏点・耐力を残して、これを超える高強度鉄筋の降伏点・耐力の範囲内で与えるものとし、より高強度な鉄筋を用いるほど導入緊張力を大きくすることができる。

3. 実験方法

3.1 高強度鉄筋のリラクゼーション試験

高強度鉄筋は、高層建築物や橋脚のせん断補強筋として用いられることが多いが、PC 鋼材のように緊張材としての利用も報告されている（例えば4)5)。

表-1 にリラクゼーション試験の実験水準を示す。リラクゼーションの試験方法は、JIS G 3109 PC 鋼棒に準じるが、本工法では PC 鋼棒のように高い導入力を与えるものではない。

そこで、SD490 および USD590 の高強度鉄筋において、JIS G 3109 で規定される引張強さの 70% 相当に加え、図-2 の利用コンセプトにおける導入力の最大値（引張強さの 23% 相当および 35% 相当）を載荷した 4 水準についてリラクゼーション試験を実施した。

リラクゼーション率は、荷重計ならびに高強度鉄筋に貼付けたひずみ計を用いて温度変化の少ない地下室（±3℃以下）で測定し、試験期間は 1000 時間とした。なお、ひずみ計による測定は試験架台にも貼付け、測定時の試験架台のひずみを考慮してリラクゼーション率を求めた。

3.2 曲げ載荷試験

3.2.1 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。頂版部材および側壁部材の主鉄筋には D16（8 本/m）、配力筋およびフープ筋には D13 の普通鉄筋（SD345）を用いた。側壁部材の上端縁から突出する接合用の高強度鉄筋は、鉄筋間隔を確保する目的で鉄筋本数を減らして D19（6 本/m）を配置し、SD390、SD490 および USD590 をそれぞれ配筋した。

3.2.2 設計条件

表-4 に試験体の設計条件、図-3 に設計荷重時の曲げモーメント図を示す。試験体は耐震設計したボックスカルバート（内幅 3000mm×内高 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⁶⁾⁷⁾。

3.2.3 実験水準および試験体

表-5 に試験体の実験水準を示す。試験体の接合には、SD390、SD490 および USD590 の高強度鉄筋をそれぞれ

表-1 リラクゼーション試験の実験水準

No.	鉄筋の種類 D19	導入荷重 (kN)	備考
1	SD490	124	JIS G 3109, 70%相当
2	SD490	41	使用領域の最大値, 23%相当
3	USD590	139	JIS G 3109, 70%相当
4	USD590	70	使用領域の最大値, 35%相当

表-2 使用材料

コンクリート	設計基準強度 設計スラブ 設計空気量	40N/mm ² 18cm 2.0%
無収縮モルタル	圧縮強度規格値	50N/mm ² 以上
鉄筋	高強度鉄筋：SD390, SD490, USD590 普通鉄筋：SD345 主鉄筋）D16-8 本/m, D19-6 本/m 配力筋・フープ筋）D13	
機械式定着	錨付ナット定着（D19 用）	

表-3 コンクリートの示方配合

W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					Air
		W	C	FA	S	G	
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(%)

表-4 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

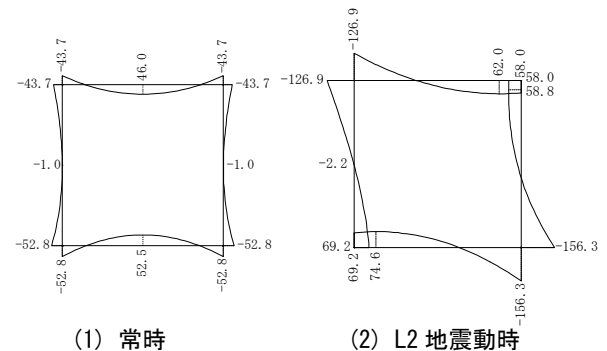


図-3 設計荷重時の曲げモーメント図

表-5 試験体の実験水準

試験体		鉄筋の仕様	備考
略記号	鉄筋		
390	SD390	異形棒鋼 ※端部ねじ加工	基本定着長 20φ以上 ※土木学会準拠
490	SD490	高張力 ねじ棒鋼	
590	USD590		
490P	SD490		ナット定着 12φ以上

注) 鉄筋 1 本当たりの最大緊張力：390-12kN, 490-41kN, 590-70kN

用い、普通鉄筋の降伏点・耐力 (345N/mm²) を残してこれを超えた強度領域内の 90%を緊張力に利用した。

高強度鉄筋は JIS G 3112 に準じるが、通常の異形棒鋼では端部にねじ加工を施す必要があるために、汎用性を考えて SD490 および USD590 の高強度鉄筋では高張力ねじ棒鋼を用いた。

鉄筋の定着長は、土木学会のコンクリート標準示方書に準じて基本定着長を求めたが、SD490 鉄筋については製造時の利便性に配慮して、鈔付ナット定着工法によって定着長の短尺化 (12φ) を図った試験体を加えた。なお、側壁部材の重ね継手部には緊張力導入時のコンクリートの付着破壊を抑制する目的でスパイラル筋を配した。

図-4 に試験体の概要図を示す。試験体は、ボックスカルバート (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。

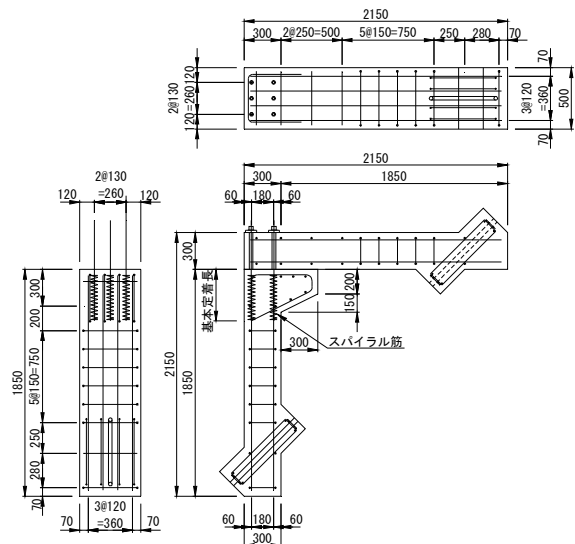


図-4 試験体の概要図 (単位 : mm)

3.2.4 荷重方法および測定方法

図-5 に荷重方法および測定方法を示す。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-3 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、荷重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荷重によって静的に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。荷重は開方向 (内側モーメント) の L1 時荷重、L2 時荷重を荷重後、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) まで荷重を行った。荷重試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・側壁の変位量を測定した。

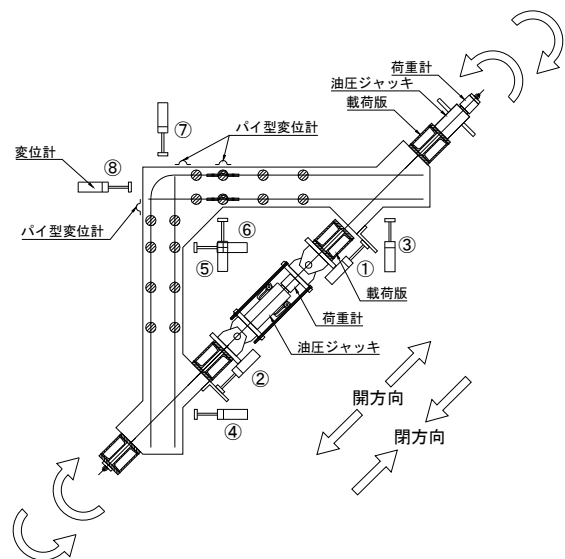


図-5 荷重方法および測定方法

表-6 リラクゼーション率の試験結果

項目	荷重値 (kN)	リラクゼーション率 (%)				
		100 (hr)	200 (hr)	400 (hr)	800 (hr)	1000 (hr)
SD490	124	1.2	1.3	1.5	1.8	1.9
	41	2.1	2.2	2.3	2.2	2.2
USD590	139	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	70	1.0	1.0	1.2	1.1	1.2
		1.2	1.3	1.4	1.4	1.4
		1.5	1.6	1.6	1.7	1.7
		0.9	0.9	0.9	1.0	1.0
		1.1	1.1	1.3	1.4	1.4

注) 表中上段 : 荷重計による測定値, 下段 : ひずみ計による測定値

4. 実験結果

4.1 高強度鉄筋のリラクゼーション試験

表-6 にリラクゼーション試験の結果を示す。リラクゼーション率は、荷重計ならびにひずみ計によってそれぞれ求めた。荷重計の測定値に比べて、架台ひずみを考慮したひずみ計によるリラクゼーション率はやや大きく、また、測定中の温度変化の影響と思われるひずみ値のバラつきが散見されたが、いずれも JIS G 3109 による PC

鋼棒のリラクゼーション率の規格値 (4%以下) を満足する結果であった。

JIS G 3109 に準じて引張強さの 70%相当の荷重 (124kN および 139kN) を与えた場合、USD590 鉄筋に比べて SD490 鉄筋のリラクゼーション値がやや大きいのが 2.3% 以下であった。また、本工法による使用領域の場合 (41kN

および 70kN), SD490 鉄筋および USD590 鉄筋ともに 1.4%以下のリラクゼーション率であった。

これらの実験結果から、高強度鉄筋を緊張材として使用することに特に問題はないことが確認された。

4.2 曲げ載荷試験

4.2.1 材料特性値

表-7 に材料特性値を示す。コンクリートおよび無収縮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。

4.2.2 開方向の載荷試験

図-6 に開方向試験の変形性状を示す。荷重の増加にともなって開方向への変形が大きくなり、L2 荷重時における試験体の変位量を側壁部材と比較すると、390 試験体 1.61mm に対して、490 試験体で 1.24mm、590 試験体で 0.84mm となり、導入緊張力が大きいほど変位量は小さくなった。なお、490P 試験体の変位量は 1.21mm であり、490 試験体とほぼ同程度であった。

開方向試験の結果、変位量にやや差が認められるが、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認められず、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が確認された。

4.2.3 閉方向の載荷試験

(1) ひび割れ、変形および曲げ耐力

図-7 に荷重と載荷方向変位の関係、表-8 に各荷重時の変形性状および表-9 に終局時のひび割れ性状を示す。なお、図-7 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示した。また、図中には、比較用として一体型試験体による既報の実験結果¹⁾を併記している。

閉方向の載荷試験では、全ての試験体で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。最終的には引張鉄筋が降伏した後、曲げ圧縮破壊によって終局状態に至った。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。

初期ひび割れ荷重、降伏荷重および最大荷重については、390 試験体、490 試験体および 590 試験体ともに、普通鉄筋を配筋した位置で降伏および終局状態に至っているのほぼ同様となり、既報の一体型試験体 (SD345 鉄筋) の結果と良く一致した。なお、590 試験体の降伏荷重については、他試験体の降伏点近傍で 2 つの変曲点が観察される。著者らは、PC 圧着工法による部材接合部の曲げ耐荷挙動で同様な現象を確認しており、接合面において PC 鋼材位置の圧縮プレストレスが解放され、曲げ変形とともに圧着接合面の離間に起因する回転変形より、

表-7 材料特性値

区分	スランプ(cm)		降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断伸び (%)
	コンクリート	空気量(%)			
鉄筋	SD345	D13	385	564	24
		D16	387	601	22
	SD390	D19	476	609	21
	SD490		548	716	18
	USD590		653	817	13
無収縮モルタル	圧縮強度(N/mm ²)		74.7		

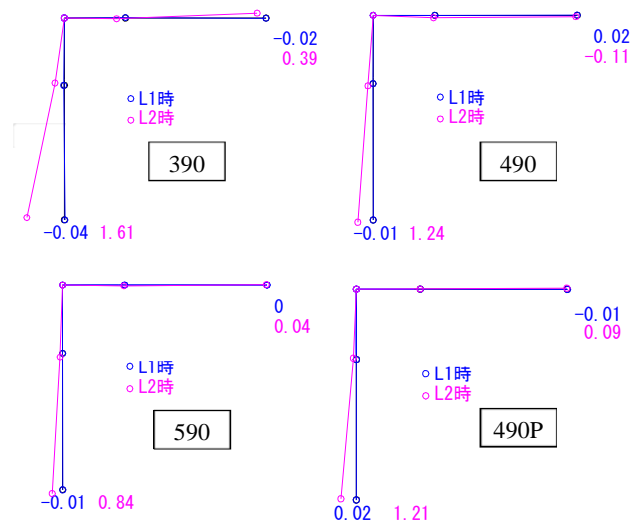


図-6 開方向の変形性状 (単位: mm 100 倍表示)

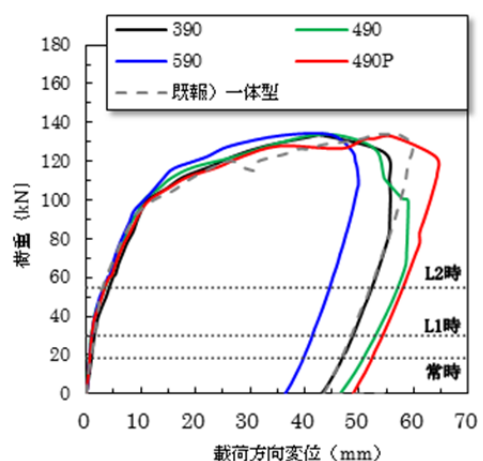


図-7 荷重と載荷方向変位の関係 (閉方向)

鋼材が降伏していないにも関わらず急激に変形量が増大することを報告している²⁾。

590 試験体の接合面に与えた圧着力は、PC 鋼材を用いた圧着工法の設計条件 (PC 圧着接合部は常時荷重点で

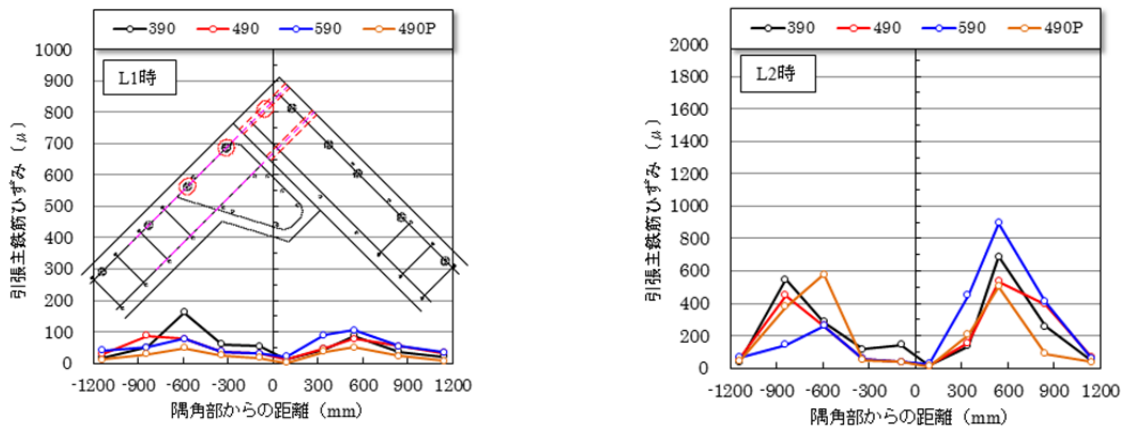
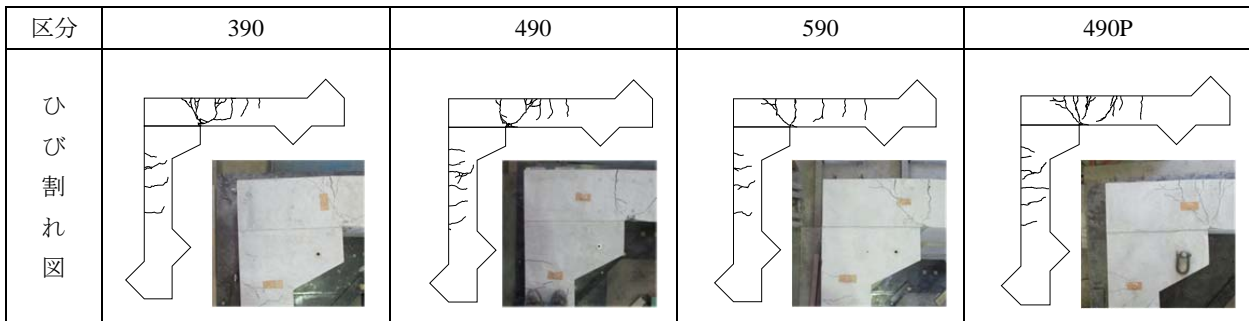
表-8 各荷重時の変形性状 (単位: 変位 mm)

試験体	閉方向 (外側 M) の設計荷重値						初期ひび割れ荷重		降伏荷重		最大荷重	
	常時(18.7kN)		L1 時(29.8kN)		L2 時(54.4kN)		荷重 (kN)	荷重方向変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重方向変位 (mm)	荷重 (kN)	荷重方向変位 (mm)
	ひび割れ	荷重方向変位 (mm)	部材性能	荷重方向変位 (mm)	部材性能	荷重方向変位 (mm)						
390		0.9		1.4		4.1	39.2	2.1	100.5	11.4	133	43.3
490	発生なし	0.5	降伏に至らず	0.9	終局に至らず	3.3	39.2	1.4	100.9	10.8	134	42.3
590		0.6		1.0		3.1	39.0	1.4	94.5, 116.5	8.72, 16.1	134	44.7
490P		0.6		1.0		3.3	39.4	1.5	100.0	11.5	133	56.1
既報) 一体型		同上		0.9		同上	同上	同上	2.8	44	2.0	94.8

注 1) 既報) 一体型: 一体型で製造した既報の実験結果¹⁾

注 2) 590 試験体の降伏点: 変曲点が 2 点あるため, この 2 点を示した (図-7 参照)

表-9 終局時のひび割れ性状 (閉方向)



(1) L1 設計荷重時

(2) L2 設計荷重時

図-8 L1 設計荷重時および L2 設計荷重時の引張鉄筋ひずみ (閉方向)

フルプレストレス状態)を満たしていることから, 同様な現象が 590 試験体の接合面に生じたと考えられる。

変形量は, 設計荷重 (常時, L1 時, L2 時), 初期ひび割れ荷重, 降伏荷重および最大荷重ともに, 導入緊張力の小さい 390 試験体の変形量がやや大きく, 490, 590 および 490P 試験体についてはほぼ同様であった。

図-8 に L1 時および L2 時の設計荷重における引張主鉄筋ひずみを示す。荷重の伝達状態に特に問題は認められず, 頂版部材および側壁部材ともにハンチ付根近傍に

最大ひずみが発生しており, ひび割れ性状の結果と一致する。主鉄筋ひずみの最大値は, L1 時荷重で 162μ (32.4N/mm^2), L2 時荷重で 895μ (179N/mm^2) と測定され, 設計荷重に対して十分な安全性が確認できる。

閉方向試験の結果, 常時, L1 地震動時および L2 地震動時の設計荷重に対して十分な構造性能が得られることが確認された。

(2) 接合部の変形性状

図-9 に各試験体の変形性状を示す。常時, L1 時および

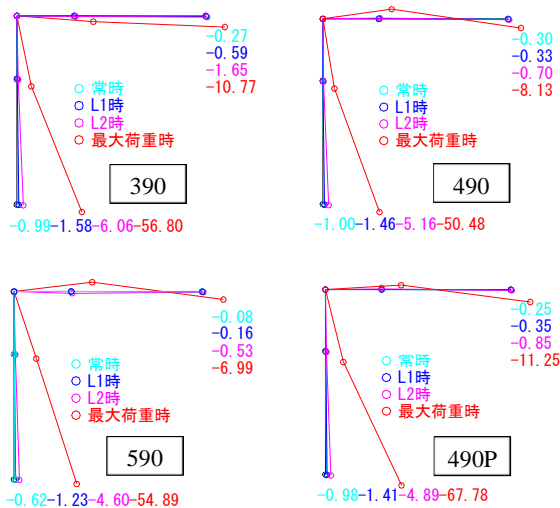


図-9 各試験体の変形状 (単位: mm 10倍表示)

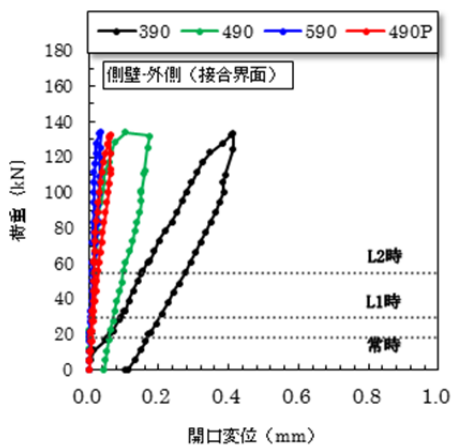


図-10 接合部の開口変位 (閉方向)

び L2 時の設計荷重では、各試験体に大きな違いは認められなかった。最大荷重時では、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。

図-10 に接合部の開口変位を示す。常時荷重時点で 390 試験体は 0.055mm の開口変位を確認したが、導入緊張力が大きい 490, 590 および 490P 試験体では開口変位はほぼ認められなかった。L2 荷重時点では、390 試験体が 0.15mm, 490 試験体が 0.013mm, 590 試験体が 0.009mm および 490P 試験体が 0.015mm であり、390 試験体の開口変位がやや大きい、一般に耐久性の観点から指標となるひび割れ幅 0.2mm 以下であった。

荷重除荷後は開口変位が小さくなっており、終局状態に至った後でも接合部の損傷はみられず、接合面に与えた圧着力の効果が確認された。

5. まとめ

施工性、経済性および安全性に優れた PCa ボックスカルバートの隅角部に配する接合工法の開発を目的として、

高強度鉄筋を構造用鉄筋と緊張材として併用し、普通鉄筋より高強度になった分を部材接合面の圧着力に利用した接合工法を考案し、そ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) 開方向の荷重試験では、導入力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 時荷重でもひび割れや界面剥離は認められず、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が確認された。
- 2) 閉方向の荷重試験では、全ての試験体において常時荷重で曲げひび割れの発生はみられず、L2 時荷重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構造安全性が確認された。
- 3) 閉方向試験において、初期ひび割れ荷重、降伏荷重および最大荷重は、390 試験体、490 試験体および 590 試験体ともほぼ同等であり、既報の一体型試験体 (SD345 鉄筋) の結果と良く一致した。
- 4) 閉方向試験時の開口変位は、L2 荷重時で 390 試験体が 0.15mm, 490 試験体が 0.013mm, 590 試験体が 0.009mm および 490P 試験体が 0.015mm であり、390 試験体の開口変位がやや大きい、一般に耐久性の観点から指標となるひび割れ幅 0.2mm 以下であった。また、荷重除荷後は開口変位が小さくなり、終局状態に至った後でも接合部の損傷はみられず、接合面に与えた圧着力の効果が確認された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 松田学, 日野伸一, 山口浩平, 松本康資, 久野俊文, 渡邊充弘: PC 圧着工法によるプレキャストコンクリート部材接合部の力学的挙動に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.62A, pp.873-884, 2016.3
- 3) 松田学, 山口浩平, 日野伸一, 周艾欣: プレストレスト構造を用いたプレキャストアーチカルバートの構造性能に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.361-366, 2014.7
- 4) 鈴木計男, 大野義輝, 白井俊彦: 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した PRC はりの曲げ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.9, No.2, pp.489-494, 1987
- 5) 竹崎真一, 是枝健好, 小室努, 河本慎一郎, 甲斐隆夫: 高強度異形鉄筋を用いたプレテンション方式 PCaPC 梁の構造性能, 大成建設技術センター報, 第 39 号, 2006
- 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-