論文 損傷を受けたボックスカルバートの補修・補強技術の提案および耐 荷力性能の検証

新田 裕之*1·阿部 忠*2·師橋 憲貴*3·塩田 啓介*4

要旨:本研究は静荷重により破壊したカルバートのひび割れ補修と展張格子筋を配置し、PCM 吹付け補強した場合の耐荷力性能および補強効果を検証した。無補強カルバートを用いた静荷重実験による最大耐荷力は456.6kNである。これに対してひび割れ補修と展張格子筋を配置し、PCM 増厚補強した供試体は550.3kNであり、1.2 倍の補強効果が得られた。破壊は押抜きせん断破壊である。よって、損傷を受けたカルバートの補強法においてひび割れ補修を適切に行い、補強材に展張格子筋を配置した PCM 増厚補強は有効的な補修・補強技術である結果が得られた。

キーワード:ボックスカルバート,ひび割れ補修,展張格子筋,増厚補強

1. はじめに

近年、道路橋のボックスカルバート(以下、カルバー トとする) は老朽化が進み、補修・補強技術の開発およ び維持管理手法の構築が課題となっている。従来のカル バートの補修・補強法は,主にひび割れ補修や漏水対策, 耐荷力性能の向上を図る補強法であるが、建築限界の確 保等を考慮しながらの対策が大きな課題となっている。 そこで、筆者らは無損傷のカルバートを用いて、補強材 として鋼板にレーザでスリットを挿入し, 専用の機械で 配力筋方向に展張した展張格子筋を提案した1)。補強法 においてはカルバートの内面を研掃後, 展張格子筋を配 置し, PCM を 40mm 吹付けする増厚補強を提案した²⁾。 このカルバートを用いて静荷重実験を行った結果、同一 寸法・材料で製作したカルバートの最大耐荷力は 1.66 倍となり、耐荷力が大幅に向上する結果を得た²⁾。しか し、実構造におけるカルバートはひび割れの発生やはく 離,漏水などの損傷を受けている。また,近年の地震動 によるひび割れ発生などの損傷も受けている。よって, 損傷発生後の補強効果についての検証は行われていない のが現状である。

そこで本研究では、静荷重実験において最大荷重 456.6kN で破壊させた供試体を、2 年間の曝露試験を実施し、ひび割れから雨水を浸透させたカルバートを試験体として用いた。このカルバートを用いて、ひび割れ補修および展張格子筋を配置した接着剤塗布型 PCM 増厚補強を施し、静荷重実験を行い、補強効果および破壊状況を検証し、カルバートの長寿命化修繕計画における補修・補強技術および維持管理の一助としたい。なお、補修・補強法の提案は「長寿命化修繕計画」を対象とした

技術の提案であり、耐震補強を対象とした補強技術の提案ではなく、老朽化対策を主とした補修・補強法の提案である。

2. カルバートの損傷事例

道路橋のカルバートにおいても老朽化が進み、その補 修・補強技術の開発が急務となっている。

ここで、道路橋カルバートの損傷事例を写真-1に示す。写真-1(1)は既製のカルバートの接合部の損傷状況であり、漏水によりコンクリートが劣化し、一部に浮きがみられる。国土交通省の点検要領における健全度の判定区部は III に相当する損傷である 3). 4)。写真-1(2)のカルバートは漏水と 2 方向のひび割れの発生や、漏水の箇所には遊離石灰が発生している。建設年代は不明であるが、点検要領における健全度評価は判定区部 IV に相当する損傷であり、直ちに漏水に対する補修および PCMなどによる増厚補強を施す必要がある。

一方, 道路橋のカルバートの設計においては 1994 年 改訂以前の道路橋示方書・同解説(以下, 道示とする) ⁵⁾ では, 橋種が 1 等橋で T 荷重は 80kN である。また, 1994





(1) カルバート接合部(2) 漏水・2方向ひび割れ写真-1 カルバートの損傷事例

- *1 日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻 (学生会員)
- *2 日本大学 生産工学部土木工学科教授 博(工) (正会員)
- *3 日本大学 生産工学部建築工学科教授 博(工) (正会員)
- *4 JFE シビル(株) 技術部

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

	コンクリー	鉄筋(SD295A)			
	上縮強度	使用 鉄筋	降伏強度	引張強度	ヤング係数
	(N/mm²)		(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)
Г	52.8	D13	360	496	200
		D10	363	494	200

年改訂の道示では、1 等橋から B 活荷重と改定され、荷重は 100kN へと増大さた。よって、B 活荷重を考慮した場合は耐荷力の向上を図るための補強対策の検討が必要となる。

以上のように、カルバートにおいても老朽化が進行している。一方、旧基準で設計されたカルバートは交通量や路線の重要度にもよるが B 活荷重対応のための補強対策が必要となる。

3. カルバート供試体の使用材料および寸法

3.1 供試体材料

カルバートのコンクリートには、普通ポルトランドセメントを用いた。また、骨材には $5mm \sim 20mm$ の砕石および 5mm 以下の砕砂を用いた。次に、使用鉄筋はSD295A、D13 および D10 を用いた。ここで、コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-1に示す。

3.2 カルバート供試体寸法

カルバート供試体は 3/5 モデルとし、寸法および鉄筋配置を図-1に示す。

カルバート供試体の寸法は図-1に示すように幅が 2,100mm, 奥行きが 2,080mm, 高さ 2,140mm であり, 内空断面は 1,800×1,800mm である。頂版の厚さが 170mm, 側壁の厚さ 150mm である。側壁の鉄筋配置は 引張側 (内側) には D10 を 120mm 間隔, 圧縮側 (外側) には D13 と D10 を 120mm 間隔で配置した。配力筋は頂版同様に D10 を 300mm 間隔で配置した。主鉄筋の芯かぶりは全て 35mm である。次に, 頂版の鉄筋の配置は, 引張側 (下側) には D13 を 120mm 間隔で配置した。圧縮側 (上側) の主鉄筋には D13 と D10 を交互に 120mm 間隔で配置した。配力筋には D10 を 300mm 間隔で配置した。なお, 主鉄筋の芯かぶりは 35mm である。

4. 応力履歴作用に関する実験方法

4.1 静荷重実験

最大荷重 5,000kN の構造物試験機を用いて静荷重実験を行った。荷重載荷位置およびたわみの計測位置を図ー1に示した。本供試体は道路橋のカルバートを想定して3/5 モデルとした試験体であることから荷重載荷板は、道示5)の基準に準拠した寸法とした。道示5)に規定する

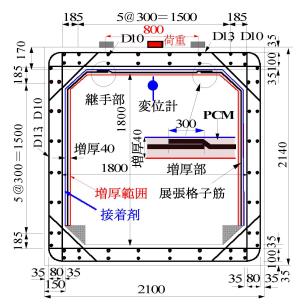


図-1 カルバート供試体の寸法および補強寸法

輪荷重の載荷面は幅 500mm, 奥行き 200mm であり, これを 3/5 モデル化すると 300×120mm の載荷板となる。

本実験は大型車輌のタンデム式の中軸・後軸間を想定 した2点載荷する。その後、T荷重を想定してカルバー ト中央のみの1点載荷による実験を行った。

(1) 2点載荷実験

カルバート供試体は、1980年改訂の道示の荷重を考慮し、大型車輌のタンデム式を考慮した2点載荷とし、荷重の間隔は800mmとした。荷重は、1等橋のT荷重198kNを考慮し、約2倍の荷重400kNまで載荷した。荷重条件は、荷重0kNから50kNまで増加し、その後、荷重5kNまで除荷し、再度荷重を増加する。たわみおよびひずみの計測は50kNごとに最大と除荷時の残留値を計測した。なお、たわみの計測は断面方向の中央とする。鉄筋および展張格子筋のひずみの計測も中央とした。

(2) 1点載荷実験

2 点載荷終了した後、カルバート中央で 1 点荷重による載荷試験は、図ー1に示すように、断面方向はカルバートの中央、前面から奥行き 890mm の位置とし、ひび割れ状況と併せて図ー4に示した。荷重載荷条件は 0kNから 50kN まで載荷し、その後荷重 5kN まで除荷し、残留値を計測する。その後、荷重を 50kN ずつ増加し、50kN増加ごとに 5kN まで除荷し、これを破壊するまで荷重増加と除荷を行う。本実験におけるたわみ、鉄筋および展張格子筋のひずみの計測は荷重載荷位置とする。

4.2 結果および考察

(1) 最大荷重

カルバート供試体の上面に2点載荷による実験は、荷 重 400kN まで載荷した。荷重 300kN 載荷から微細なひ び割れが発生した。次に、一点載荷による最大耐荷力は

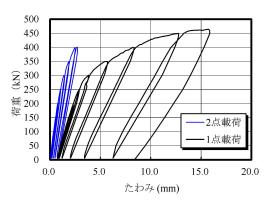


図-2 荷重とたわみ関係

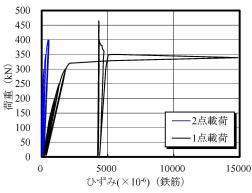


図-3 荷重とひずみの関係

456.6kN であり、破壊は軸方向に発生したひび割れ進展し、曲げ破壊を呈している。

(2) 荷重とたわみの関係

カルバート供試体に2点荷重および1点荷重載荷による荷重とたわみの関係を**図-2**に示す。

2 点載荷時における荷重とたわみの関係は図-2に示すように、荷重 400kN までは線形的に増加し、最大たわみは 2.72mm である。荷重除荷時の残留たわみは 0.72mm である。なお、2 点荷重載荷による残留たわみを1点荷重載荷時の初期値とする。

1 点載荷時のカルバート供試体の荷重とたわみの関係 は図-2に示すように、最大荷重 456.6 時で 15.82mm, 荷重除荷時の残留たわみは 8.36mm である。

(3) 荷重とひずみの関係

2 点荷重および 1 点荷重載荷による荷重とひずみの関係を図-3に示す。表-1に示す材料特性値より鉄筋 D13 の降伏ひずみは 1800×10^{-6} (= $360 N/mm^2$ / $200 kN/mm^2$) である。

2 点載荷時におけるカルバート頂版の引張主鉄筋 D13 の荷重とひずみの関係は図-3に示すように,2 点載荷による荷重 400kN 時の最大ひずみは 548×10^6 である。荷重除荷時の残留ひずみは 168×10^6 である。なお,残留ひずみは 1点荷重載荷時の初期値とする。

次に、1点載荷による荷重直下に配置した鉄筋 D13 の

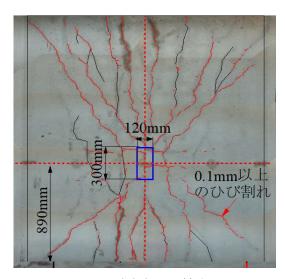


図-4 破壊時のひび割れ

荷重とひずみの関係は図-3より、荷重 300kN までは線形的に増加している。この時点の鉄筋ひずみは 1824×10⁶であり、降伏ひずみに達している。その後の荷重増加において荷重 330kN 載荷後ひずみが急激に増加し、荷重 340kN 載荷時のひずみは 14870×10⁻⁶である。これは、配置した鉄筋位置とひび割れが一致し、急激にひずみが増加したものと推察される。その後の荷重増加からひずみが減少している。

(4) 破壊状況

カルバートの破壊状況を**図ー4**に示す。荷重直下の頂版下面の軸方向にひび割れが荷重載荷位置から降伏線方向に発生している。破壊は支間中央に発生した軸方向のひび割れが進展し、荷重 456.6kN で曲げ破壊となった。

以上のように、荷重とたわみの関係においては残留たわみが 8.5mm、ひずみにおいては既に降伏しているものの破断は見られない。破壊状況は軸方向および降伏線方向に 0.1mm 以上のひび割れが発生している。よって、補修・補強する前に、ひび割れ補修が必要となる。また、厚さについては筆者らの既往の研究 ²⁾に用いた厚さと同様に頂版中央で 40mm 増厚する。

5. カルバートの補修・補強材料および補修・補強工法5.1 カルバートの補修・補強材料

(1) 展張格子筋(100×100mm)

カルバートの引張補強材には、展張格子筋を用いる。 展張格子筋には一般的に使用されている SS400 材、厚 さ 9mm の鋼板を用いた。ここで、展張格子筋の材料特 性値は $\mathbf{表}-\mathbf{2}$ に示す。

材料試験は、同一鋼板を用いて展張角度 60 度で展張した場合の軸方向筋(主筋) および軸直角方向(配力筋) の材片はそれぞれを JIS 13B 号に準拠した寸法で製作し、引張試験は JIS Z 2241 号に準拠して行った。表-2

表-2 展張格子筋の材料特性値

	格子間寸法	降伏強度 (N/mm²)	引張強度 (N/mm²)	ヤング係数 (kN/mm²)	
主筋	(55555)	(========)		,	
配力筋	100×100	299	461	200	

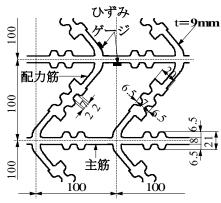


図-5 展張格子筋の形状および寸法

より、主筋および配力筋の降伏強度は $299N/mm^2$ 、引張強度は $461N/mm^2$ である。また、ヤング係数は道示の値である。

(2) 展張格子筋の寸法

展張格子筋の寸法を図-5に示す。展張格子筋には厚さ 9.0mm の鋼板を用いて格子間寸法を 100×100mm とし、軸方向の主筋の寸法は 9.0×8.0mm (断面積 72.0mm²)である。一方、軸直角方向の配力筋の寸法は 9.0×7.0mm (断面積 63mm²)とした。なお、展張時には縦筋と軸方向筋の角度を 60 度とした。展張格子筋には格子間 100mm の間に 7mm 間隔ごとに 2mm の突起を 3 カ所設け、付着力を高める構造とする。

また,展張格子筋には防錆効果を高める目的で溶融亜 鉛メッキを施した。溶融亜鉛メッキを施した展張格子筋 の付着強度は 3.11N/mm² 確保され,鉄筋と同等以上の 付着強度を有している。

(3) ひび割れ補修用接着剤

ひび割れ補修用接着剤には、最小ひび割れ幅が 0.05mm 以上に浸透する市販の浸透性接着を用いる。浸透性接着剤は道路橋 RC 床版の上面補修に用いる接着剤であり、ひび割れ幅 0.05mm まで浸透することが確認されている。ここで、浸透性接着剤の性能を表-3に示す。

(4) 付着用接着剤

筆者らは、カルバート補強には、コンクリート界面と付着性を高めるために付着用接着剤を塗布した²⁾。この接着剤は高耐久型エポキシ系樹脂接着剤(以下、付着用接着剤とする)を用いる。付着用接着剤の材料特性値を表-4に示す。コンクリートとの付着強度は 3.7N/mm²が確保されている。

表-3 ひび割れ補修用の性能評価

項	目	浸透性接着剤	備考	
外観	主剤	無色液状	異物混入無し	
クト毎兄	硬化剤	無色液状	共物能八無し	
混合	計比	10:3	重量比	
硬化物	勿比重	1.2	JIS K 7112	
圧縮	強度	104.4N/mm ²	JIS K 7181	
圧縮弾	性係数	3,172N/mm ²	JIS K 7181	
曲げ強さ		92.8N/mm ²	JIS K 7171	
引張せん断強さ		58.2N/mm ²	JIS K 6850	
コンクリート 付着強さ		2.6N/mm ²	JIS K 6909	

表-4 付着用接着剤の性能評価

項	目	付着用接着剤	備考	
外観	主剤	白色ペースト状	異物混入無し	
フト毎元	硬化剤	青色液状	共物成八無し	
混合	計比	5:1	重量比	
硬化物		1.42	JIS K 7112	
圧縮	強度	102.9N/mm ²	JIS K 7181	
圧縮弾	性係数	3,976N/mm ²	JIS K 7181	
曲げ	強さ	41.6N/mm ²	JIS K 7171	
引張せん	心断強さ	14.9N/mm ²	JIS K 6850	
コンクリート 付着強さ		3.7N/mm ² 以上 または母材破壊	JIS K 6909	

表-5 PCMの配合条件

	単位量(kg/m³)				水結合比
項目	プレミッ:	クス粉体	繊維	水	/J (// L D D
	結合剤	その他	和以术田	八	(%)
PCM	750	1125	Premix	300	40

(5) ポリマーセメントモルタル (PCM)

カルバートの増厚補強に用いる PCM は、一般的に吹き付け工法に用いられており、早強セメントに砂、ビニロン繊維を配合した市販のセメント材料を用いた。PCM の発現強度は、材齢 24 時間で圧縮強度が 24N/mm² 確保されている。ここで、本実験供試体に用いる PCM の配合を表-5に示す。なお、PCM にはビニロン繊維が配合されているが、詳細は公表されていない。

5.2 破壊したカルバートのひび割れ補修および補強

(1) ひび割れ補修

静荷重実験における破壊時のひび割れ状況は、図-4に示すように、曲げによるひび割れは、載荷位置から軸方向および降伏線方向にひび割れが発生している。図-4には 0.1mm 以上のひび割れ赤線で示している。この 0.1mm のひび割れ位置に、低圧用の樹脂注入器具取り付台を約 150mm 間隔およびひび割れの分岐位置に接着で取り付けする。また、0.5mm 以上やひび割れの分岐箇所にはドリルで φ 3mm、深さ 50mm の孔を開け、その後に樹脂注入器具の台を接着し、ひび割れ位置全体をシール材で、樹脂が漏れ無いように覆う。シール材および樹脂注入箇所を図-6に示す。接着剤が硬化した後、直ちに浸透性接着剤を取り付け圧入する。本供試試体の

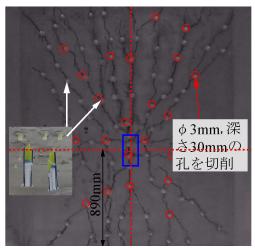


図-6 ひび割れ注入箇所

ひび割れ補修に用いる接着剤は表-3に示す浸透性接着を用いた。この接着剤の硬化時間は常温で8時間程度である。よって、養生時間は8時間以上とし、その後、注入器具の撤去およびシール材をサンダー適切に除去し、表面仕上げする。

(2) カルバートのPCM吹付け補強

PCM の吹付けによる補強方法は、「ポリマーセメントモルタル吹付け工法によるコンクリート構造物の補修補強設計・施工マニュアル(案)⁶」に準拠し、接着剤塗布型 PCM 吹付け増厚補強を行う。

カルバートの補強手順は、ひび割れ補修した箇所をサ ンダーで切削・研掃し、展張格子筋を取り付ける。カル バートは内空断面確保のために本供試体の増厚範囲およ び寸法は図-1に示すように 40mm の最小限の増厚補強 を施す。よって、展張格子筋の継手部は直接カルバート 面, それ以外は 10mm のかぶりを確保する。継手部は 頂版の端部 400mm の位置で重ね継手構造とする。補強 法は, コンクリート表面処理が終了した後, 展張格子筋 を側壁および頂版に設置する。展張格子筋の取り付け作 業は 30 分程度であることから、施工の省力化が図られ る補強筋である。次に、PCM との付着性を高めるため にエポキシ系接着剤を平均厚 1.0mm 程度で研掃面全面 に吹付ける。この接着剤は120分で強度発現されている ため、接着剤塗布と同時に PCM の練り混ぜを開始する。 接着剤を全面に吹付けた後, PCM を吹付ける。まず、1 層目の PCM 吹付けを行う。養生終了後,2 層目を吹き 付けし,表面仕上げして養生を行う。

6. 補強効果に関する実験

6.1 実験方法

補強後の耐荷力実験は 4.1(2)の項で述べた静荷重実験を行うこととする。荷重載荷位置は破壊試験を行った同じ位置とする。よって、荷重載荷条件は 5.1(2)と同様と

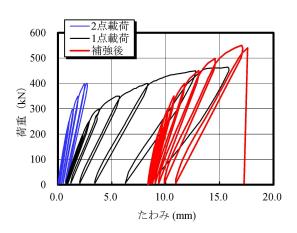


図-7 荷重とたわみの関係

する。

6.2 結果および考察

補強後の結果および考察は、最大耐荷力および荷重とたわみの関係、展張格子筋の荷重とひずみの関係、破壊状況について示す。なお、頂版中央に配置した鉄筋の荷重とひずみの関係においては、図-3に示すように、既に降伏点を超えていることから鉄筋のひずみについての考察は省略する。

(1) 最大耐荷力

ひび割れ補修後本提案する接着剤塗布型 PCM 吹付け補強後の最大耐荷力は,550.3kN である。補強前の破壊荷重は456.6kN であり,1.21 倍の補強効果が得られる結果となった。よって,1994 年改定以前の活荷重 80kN で設計したカルバートを1994 年改定以降の活荷重 100kNに対応できる補強効果であると考えられる。

(2) 荷重とたわみの関係

破壊時までの荷重とたわみの関係および補強後の荷重 とたわみの関係を**図**-7に示す。

補強後の荷重とたわみの関係は図-7 (赤線) に示すように、荷重 300kN までは線形的にたわみが増加している。補強後のこの時点のたわみは 2.50mm, 累積たわみは 13.19mm である。その後の荷重増加からたわみの増加が徐々に大きくなっている。荷重 550.3kN 載荷時のたわみは 8.78mm, 累積たわみは 17.2mm, 残留たわみの累積が 10.9mm である。破壊は荷重増加中 540.1kN で押抜きせん断破壊となった。

以上より、展張格子筋を配置し、最小増厚 40mm で補強することで、曲げ変形が抑制され、たわみの増加が抑制され、補強前の曲げ破壊から押抜きせん断破壊へと移行され、耐荷力の向上も図られる結果となった。

(3) 荷重と展張格子筋ひずみの関係

荷重と展張格子筋ひずみの関係を図-8に示す。なお、図-8には荷重の増加に比例してひずみが増加している部分を青線、荷重の増加に対してひずみが減少している

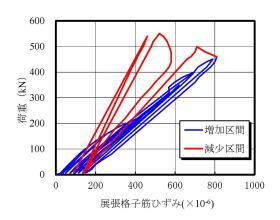


図-8 荷重と展張格子筋ひずみの関係

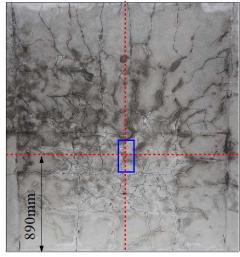


図-9 破壊時のひび割れ状況

範囲を赤線で示した。

荷重と展張格子筋ひずみの関係は図-8 (青線) に示すように、荷重 459.4kN 付近までは、線形的に増加している。この時点のひずみは 810×10⁻⁶ であり、降伏に至ってない。残留ひずみも 150×10⁻⁶ である。その後の荷重増加においても荷重 454kN 付近までは線形的に増加し、その後の荷重増加、すなわち補強前の破壊荷重付近からひずみの増加は見られず徐々に減少し始めている(赤線)。この付近から界面ではく離が開始されたものと考えられる。破壊時のひずみ荷重 450kN 増加中に破壊し、ひずみは 460×10⁻⁶ まで減少している。

(4) 破壊状況

頂版の破壊時におけるひび割れ状況を**図-9**に示す。 頂版底面のひび割れ状況は荷重載荷版 300×120mm の 45 度下面に,展張格子筋の主筋および 60 度で展張した 配力筋に沿った 2 方向ひび割れが発生している。破壊は 押抜きせん断破壊となった。

7. まとめ

(1) 曲げ破壊時に発生したひび割れ箇所に浸透性接着剤

を低圧注入した結果, 0.05mm 以上のひび割れ箇所 に樹脂が浸透したことから, 補強面には新たなひび われが発生している。よって, ひび割れ補修は適切 であったと考えられる。

- (2) 展張格子筋を配置する作業においては本供試体の場合は 30 分程度で取り付けが可能であり、現場で鉄筋を組立配置する場合に比べて大幅な施工の合理化が図れる工法である。
- (3) 破壊後に厚さ 9mm の展張格子筋を配置し、接着剤 塗布型 PCM 吹付け補強において最小厚 40mm で増 厚した結果、無補強カルバート供試体の破壊荷重の 1.2 倍の耐荷力が向上した。よって、最小厚 40mm での補強が可能となった。なお、展張格子筋の厚さ を厚くした場合の最小厚さは 40mm 以上の厚さが必 要となる。
- (4) 荷重載荷位置での荷重とたわみの関係においても、補強前の増加傾向に対して、補強後の増加は大幅に抑制されている。補強後は 8.78mm の増加後で押抜きせん断破壊となった。また、展張格子筋のひずみの増加においては補強前の破壊荷重付近までは線形的に増加しているが、その後の荷重増加からひずみの増加が減少している。この付近から斜めひび割れが発生する押抜きせん断破壊へと移行され、荷重載荷位置から 45 度底面の補強界面ではく離が開始されたものと考えられる。
- (5) 曲げ破壊した供試体をひび割れ補修した後,本提案 する展張格子筋を配置した接着剤塗布型 PCM 吹付 け増厚補強したカルバートには,2 方向ひび割れが発 生し,カルバート頂版は押抜きせん断破壊となった。

参考文献

- 1) 吉岡泰邦, 阿部忠, 師橋憲貴, 塩田啓介:展張格子 鋼板筋を用いた RC ボックスカルバートの増厚補強 効果に関する実大載荷実験による検証, コンクリー ト工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.1183-1188, 2017.7
- 2) 阿部忠,新田裕之,塩田啓介,吉岡泰邦:展張格子 筋を用いたボックスカルバートの補強技術および補 強効果の検証,セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.540-547, 2018.3
- 3) 国土交通省道路局:道路橋定期点検要領,2014.6
- 4) 国土交通省道路局:シェッド, 大型カルバート等定期点検要領, 2014.6
- 5) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I, 1994.2
- 6) RC 構造物のポリマーセメントモルタル吹付け補修・ 補強工法協会:ポリマーセメントモルタル吹付け工 法によるコンクリート構造物の補修補強設計・施工 マニュアル(案), 2011.7