

(38) 展張格子筋を用いてPCM補強したボックスカルバートの補強効果および実用性の検証

新田 裕之¹・阿部 忠²・水口 和彦³・塩田 啓介⁴・吉岡 泰邦⁵

¹ 学生会員 日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

² フェロー会員 日本大学教授 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

E-mail:abe.tadashi@nihon-u.ac.jp

³ 正会員 日本大学准教授 生産工学部土木工学科 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

⁴ 正会員 JFE シビル株式会社 技術部 (〒 111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)

⁵ 正会員 JFE シビル株式会社 社会基盤事業部 (〒 111-0051 東京都台東区蔵前 2-17-4)

近年、道路施設であるボックスカルバートは建設後数十年が経過したことで老朽化が進んでおり、その補修・補強対策が課題となっている。一方、コンクリート部材の引張補強材として、縞鋼板にレーザでスリットを挿入し、専用のジャッキで展張した展張格子筋が開発された。本研究では、カルバートの補強材に展張格子筋を用いて、接着剤塗布型 PCM 増厚補強法における補強効果を検証した。補強法は、展張格子筋を配置し、はく離抑制のためにエポキシ系接着剤を塗布した後 PCM を 40mm 吹付け補強した。その結果、同一寸法を有するカルバートの最大耐荷力に比して、補強したカルバートは 1.64 倍の補強効果となり、実用性が評価された。

Key Words : Box culvert, Metal-Grid expanded type, PCM thickness increase, Static load test, Stiffening effect

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、この補修・補強技術開発および維持管理手法の構築が課題となっている^{1),2)}。

老朽化したカルバートの耐荷力性能の向上を図るための補強法は、ひび割れ補修後、鉄筋を配置してコンクリートで増厚する補強法が一般的である。この補強法における鉄筋の配置は、主筋と配力筋を格子状に配置し、ポリマーセメントモルタル（PCM）で吹付け補強することから 60mm 程度の増厚が必要となる³⁾。

一方、筆者らは、鉄筋に代わる引張補強材として 2 タイプの鋼板格子筋（展張格子筋、格子鋼板筋）を開発している⁴⁾。この鋼板格子筋は、鋼板をレーザで格子状に一面加工したもので、仕上げに防錆材を塗布することから、塩害対策にも効果を発揮する材料である。また、耐荷力の向上、施工の合理化・省力化が図られ、コストの縮減などの効果も期待できる。さらに、一面加工されることから鉄筋を格子状に組み立てた場合に比べて 1 方向分の厚さが減少できることから吹付けモルタルの量が減少され、死荷重の軽減が図られることになる。カルバートの断面増厚には、一般的に PCM を用いた吹付けによる増厚補強が施されている。よっ

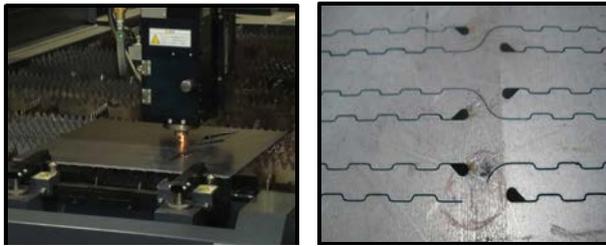
て、これらの材料を引張補強材として適用した場合の耐荷力性能について検証し、実用性を評価する必要がある。

そこで本研究では、道路橋カルバートの補強技術として、展張格子筋を配置し、補強界面との付着性を高めるためにエポキシ系接着剤を塗布して PCM 吹付けする補強法における耐荷力性能を評価する。実験供試体には 3/5 モデルとしたカルバートを用いて静荷重実験を行い、同一寸法の無補強カルバートの最大耐荷力を基準に、補強したカルバートの最大耐荷力から補強効果を検証し、地方公共団体が管理する道路橋カルバートの補修・補強技術および維持管理の一助としたい。

2. 展張格子筋の製作方法

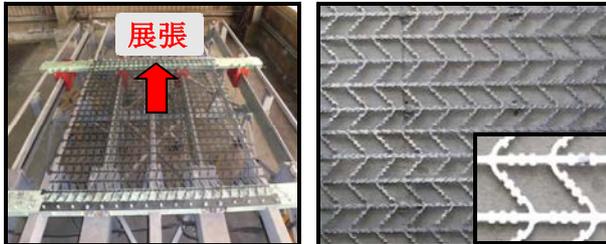
(1) 鋼板格子筋の製作方法

鉄筋にかわる引張補強材として展張格子筋が開発されている⁴⁾。展張格子筋は軸方向にレーザでスリットを挿入し、軸直角方向にジャッキで展張して格子状に加工した格子筋である。鋼材には縞鋼板および鋼板が用いられ、鋼種は SS400 および SM490A の使用が可能である。また、板厚については、縞鋼板は 16mm、鋼板は市販されている板厚が適用可能である。本供試体



(1) レーザ加工

(2) スリット挿入



(3) 展張

(4) 展張格子筋

写真-1 展張格子筋の製作方法

のカルバートの補強筋には SS400、厚さ 9mm の鋼板にレーザでスリットを挿入し、展張した格子筋を使用した。展張格子筋の製作方法を写真-1 に示す。展張格子筋の製作方法は、縞鋼板および鋼板の軸方向（主筋方向）にレーザ（写真-1(1)）でスリットを挿入する（写真-1(2)）。スリットは付着性を高めるために 7mm ごとに 6.5mm の突起を設けた。スリット挿入後、加工台に設置し、専用のジャッキで全幅均等に軸直角方向に展張する（写真-1(3)）。なお、本実験に用いる展張格子筋の角度は 60 度とした（写真-1(4)）。展張後は防錆材としてエポキシ系の防錆材あるいは亜鉛メッキを塗布する（写真-1(4)）が、本供試体には溶融亜鉛メッキを施した。最後に、カルバートの補強材として用いる場合は、一面加工された展張格子筋をカルバートの寸法に合わせて折り曲げ加工する。

以上のように、展張格子筋は主筋および配力筋の必要断面積が確保できる寸法に合わせてスリットを挿入し、また、折り曲げ加工においても実構造の寸法に合わせて加工できることから施工精度にも優れている。

3. 使用材料および供試体寸法

(1) 供試体材料

a) カルバートの使用材料

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 ～ 20mm の碎石および 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。

b) 展張格子筋の材料特性値

展張格子筋には、一般的に使用されている鋼材および縞鋼板が用いられるが、本供試体には SS400 材、厚

表-1 コンクリートおよび鉄筋の材料特性値

コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)		鉄筋 (SD295)			
Aタイプ	Bタイプ	使用 鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
52.8	47.1	D13	360	496	200
		D10	363	494	

表-2 展張格子筋の材料特性値

断面	格子間寸法 (mm)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
主筋 配力筋	100×100	299	461	200

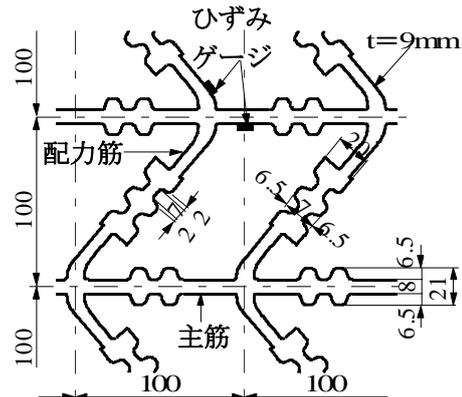


図-1 展張格子筋の寸法および形状

さ 9mm の鋼板を用いる。ここで、展張格子筋の材料特性値を表-2 に示す。展張後の展張格子筋の材料特性値は、軸方向筋（主筋）および軸直角方向筋（配力筋）の降伏強度は 299N/mm²、引張強度は 461N/mm² である。

c) 展張格子筋の寸法

展張格子筋の寸法を図-1 に示す。展張格子筋は、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）とした。また、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との角度を 60 度となるよう設定した。さらに、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 カ所設けることで、付着力を高める構造とした。

一方、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、予備実験より 3.11N/mm² が確保されることを確認しており、鉄筋と同等の付着強度を有している。

d) 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いるビニロン繊維を配合した市販のセメント材料を用いた。

e) 高耐久型エポキシ系樹脂接着剤

展張格子筋を配置し、既設コンクリートの削り面と PCM 吹き付けによる増厚補強材との付着性を高めるために削り面、すなわち増厚界面に高耐久型エポキシ系樹

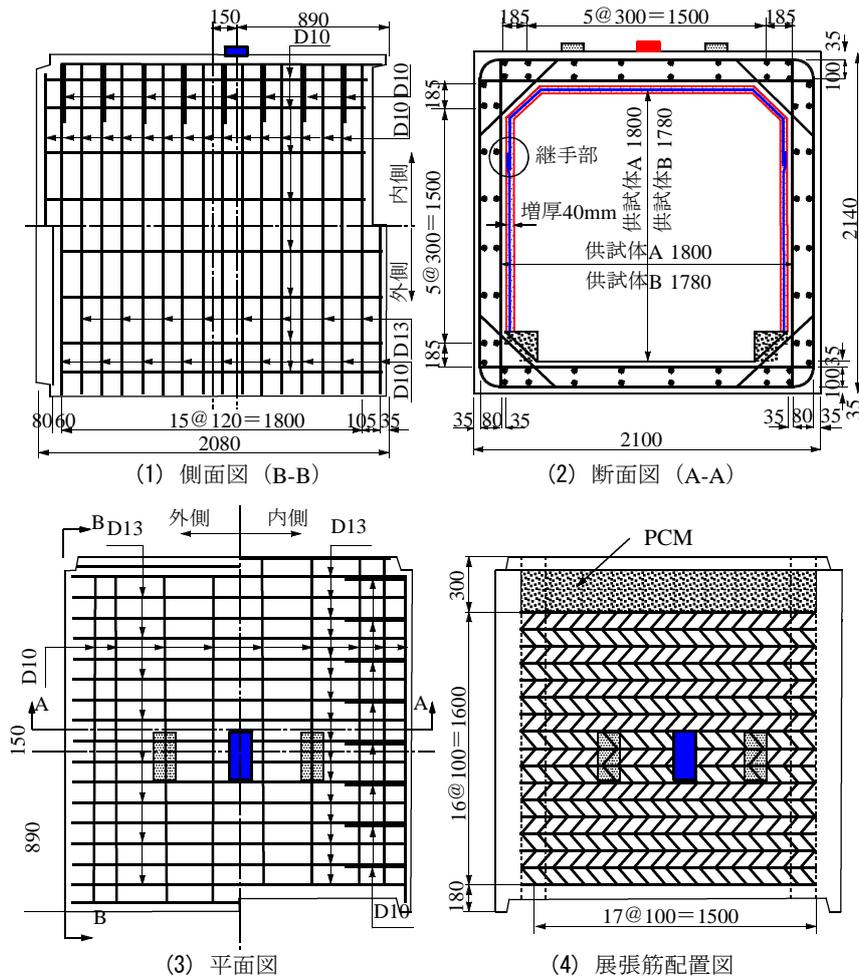


図-2 カルバート供試体寸法および展張格子筋の配置



(1) 研掃



(2) 展張格子筋設置



(3) 接着剤塗布後 PCM 吹付け

写真-3 補強法

脂接着剤（以下、接着剤とする）を用いる。コンクリートとの付着強度は 3.7N/mm^2 が確保されており、引張試験では母材コンクリート側で破壊することを確認している。

(2) 供試体寸法

a) 無補強カルバート供試体

3/5 モデルとしたカルバート供試体の寸法および鉄筋を図-2に示す。カルバート供試体は、無補強の供試体と補強用の供試体の2タイプを製作した。無補強供試体をAタイプ、補強用供試体をBタイプとする。

Aタイプの供試体の寸法は、図-2(2)に示すように幅 2,100mm、奥行き 2,080mm、高さ 2,140mmとし、頂版の厚さを 170mm、側壁の厚さを 150mmとした。側壁の鉄筋配置は図-2(1)に示すように引張側（内側）には D10 を 120mm 間隔、圧縮側（外側）には D13 と D10 を 120mm 間隔で交互に配置した。配力筋は頂版同様に D10 を 300mm 間隔で配置した。主鉄筋のかぶりは 35mm である。

次に、頂版の鉄筋の配置は図-2(3)に示すように、引張側（下側）には D13 を 120mm 間隔で配置した。

圧縮側（上側）には主鉄筋には 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、主鉄筋のかぶりは 35mm である。

b) 補強用カルバート供試体

Bタイプの供試体、すなわち補強するカルバート供試体はコンクリートの劣化等により脆弱したコンクリートを除去した後、PCM で吹付け補強するのが一般的である。ここで、補強寸法および展張格子筋の配置状況を図-2(2)、(4)に示す。

本供試体は、無補強供試体の内側のかぶりを 10mm 程度切削することを考慮して供試体製作時にかぶりを 25mm とした。よって、頂版の厚さは 160mm、側壁の厚さは 140mm とした。補強筋には材質 SS400、板厚 9mm の鋼板を加工した展張格子筋を用い、主筋と配力筋の格子間はそれぞれ 100mm である。ここで、展張格子筋の配置を図-3に示す。展張格子筋は厚さが 9.0mm であることから、界面から 9.0mm かぶりを考慮して配置する。また、継手部の配置は図-3に示すように継手部は重ね継手とする。補強はカルバート界面から 40mm とし、展張格子筋のかぶりは 22mm である。

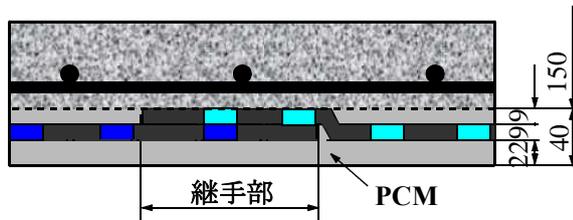


図-3 展張格子筋の配置

(3) カルバートのPCM補強法

実施工における PCM の吹付け補強法は、「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)⁹⁾」に準拠する。ここで、カルバートの補強手順を写真-3に示す。カルバート供試体の内側コンクリートの表面をディスクサンダーで切削し、表面仕上げを行う。通常のカルバートの補修・補強法では、漏水処理やひび割れ補修を施した後に補強対策を講じる必要がある。本実験に用いた供試体は未損傷であることから、コンクリート表面をディスクサンダーで切削した後、付着性を高めるために切削面をブラスト研掃する(写真-3(1))。表面処理が終了した後、展張格子筋を側壁に10mmのかぶりを取り、設置する(写真-3(2))。側壁設置後、頂版の設置を行う。その後、PCM との付着性を高めるために接着剤を平均厚1.0mm程度で全面に吹付けする(写真-3(3))。この接着剤は120分で強度を発揮することから、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後、PCMを吹付けする(写真-3(3))。1層目のPCM吹付けは20mm程度とし、8時間養生終了した後、2層目のPCMを吹き付ける。2層目のPCM吹付け終了後、表面仕上げを行い養生した。

4. 静荷重実験

(1) 実験方法

最大載荷能力5,000kNの構造物試験機を用いて静荷重実験を行う。ここで、荷重載荷状態を写真-4に示す。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、荷重載荷板は道示の基準に準拠した荷重状態とした。道示が規定する輪荷重の載荷面は幅500mm、奥行き200mmであり、これをモデル化して本実験での載荷板は300×120mmの載荷板を設けた。

実験はタンデム式の中軸・後軸間を想定した2点載荷と中央のみの1点載荷による実験を行った。

a) 2点載荷実験

Aタイプ供試体は、1980年改訂の道示の荷重および大型車輛のタンデム式を考慮して2点載荷とし、載荷版の間隔は800mmとした。荷重は0kNから400kNまで載荷した。これは、1973、1985年改訂の道示に規定



写真-4 実験の載荷状況

する自動車荷重198kNの約2倍の荷重に相当する。たわみの計測は断面方向の中央、ひずみは荷重載荷位置の鉄筋および展張格子筋の主筋とする。

一方、補強したBタイプ供試体は、1994年改訂の道示⁹⁾の基準に基づいて自動車荷重245kNの約2倍の500kNまで載荷した。両供試体ともに荷重0kNから50kNまで増加させ、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ごとの最大値と除荷時の残留値を計測した。

b) 中央の1点載荷実験

ボックスカルバートの中央に1点荷重による載荷試験の載荷位置は、断面方向はカルバートの中央、側面方向は前面から890mmの位置とした。荷重載荷条件は0kNから50kNまで載荷し、その後荷重5.0kN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5.0kN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。

5. 結果および考察

(1) 2点荷重載荷実験

a) 最大荷重

カルバート上面に2点載荷による実験荷重は、無補強のAタイプ供試体は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。補強したBタイプ供試体は500kNまで載荷し、荷重350kN載荷時に微細なひび割れが発生した。いずれの供試体も最大荷重載荷時も破壊には至っていない。

b) 荷重とたわみの関係

2点載荷時におけるAタイプ供試体の荷重とたわみの関係は、荷重400kNまで線形的に増加し、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。一方、補強したBタイプ供試体は荷重400kNまで線形的に増加し、この時点のたわみは1.15mmで、Aタイプ供試体の42%である。その後も

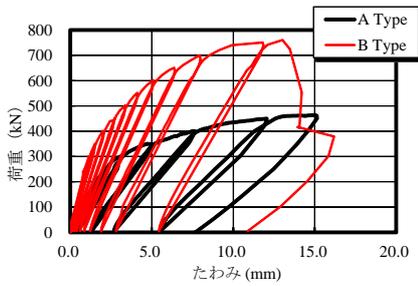


図-4 荷重とたわみの関係

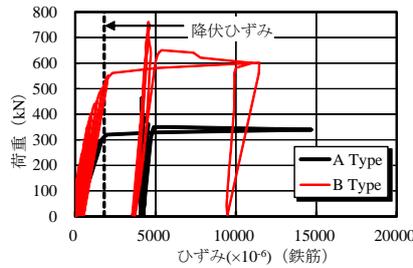


図-5 荷重とひずみの関係
(鉄筋)

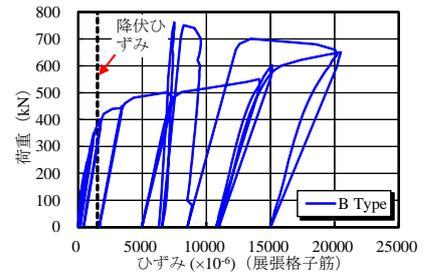


図-6 荷重とひずみの関係
(展張格子筋)

荷重 500kN まで線形的に増加している。荷重 500kN 載荷時のたわみは 1.57mm, 荷重除荷時のたわみは 0.37mm である。

c) 鉄筋の荷重とひずみの関係

2 点載荷時におけるカルバート頂版の引張主鉄筋の荷重とひずみの関係は, A タイプ供試体の荷重 400kN 時の最大ひずみは 548×10^6 である。材料特性値による鉄筋の降伏ひずみは 1800×10^6 であり降伏に至っていない。荷重除荷時の残留ひずみは 168×10^6 である。なお, 荷重 300kN 載荷時にひび割れが発生している。

一方, 補強した B タイプ供試体は荷重 400kN 時のひずみは 111×10^6 であり, A タイプ供試体の 20% である。荷重 500kN 時のひずみは 153×10^6 であり, 降伏ひずみに達していない。展張筋を配置し, 30mm 増厚することで大幅にひずみの増加が抑制されている。

d) 展張筋の荷重とひずみ

B タイプ供試体の補強に用いた展張格子筋の荷重とひずみの関係は, 最大荷重 500kN 時のひずみは 375×10^6 で, 鉄筋の 2.45 倍となっており, 補強引張材である展張筋も応力を分担している。

(2) 1点荷重載荷

a) 最大耐荷力

無補強の A タイプ供試体の最大耐荷力は 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。一方, 補強した B タイプ供試体の最大耐荷力は 760.7kN で, 無補強の A タイプ供試体に比して 1.64 倍耐荷力が向上する結果となった。よって, 本提案の展張格子筋を配置し, 30mm 増厚することで大幅な耐荷力の向上が図られる。

b) 荷重とたわみの関係

頂版中央, すなわち荷重直下の荷重とたわみの関係を図-4に示す。なお, 2 点荷重載荷による残留たわみは考慮しないものとする。

無補強の A タイプ供試体の荷重とたわみの関係は, 図-4に示すように荷重 300kN までは線形的に増加している。この時点のたわみは 3.3mm である。その後の荷重増加ではたわみの増加が大きくなるものの, 最大荷重付近まで線形的に増加している。荷重 400kN 時のた

わみは 7.52mm である。最大荷重 456.6kN 時のたわみは 15.1mm, 荷重除荷時の残留たわみは 7.75mm である。

一方, 補強した B タイプ供試体の荷重とたわみの関係は, 荷重 400kN まで線形的に増加し, この時点のたわみは 2.33mm であり, 無補強供試体の 30% 程度までたわみが低減している。その後の荷重増加においては荷重 700kN まで線形的に増加している。A タイプの最大耐荷力付近の荷重 460kN のたわみは 3.2mm であり, A タイプの 20% 程度である。荷重 700kN からたわみの増加が著しくなり, 最大耐荷力 760.6kN 時のたわみは 13.3mm である。その後荷重を除荷するもののたわみが増加している。この時点から既設カルバートコンクリートと PCM 補強との界面のはく離が予想される。破壊は既設カルバートの頂版載荷版付近で圧縮破壊し, カルバート全体では軸方向に発生したひび割れが進展し, 曲げ破壊を呈している。

c) 荷重と鉄筋ひずみの関係

頂版中央, すなわち荷重直下に配置した鉄筋 D13 の荷重とひずみの関係を図-5に示す。A タイプ供試体の鉄筋の荷重とひずみの関係は, 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 1656×10^6 である。本供試体の鉄筋の降伏ひずみは表-1に示した材料特性値より算定すると 1800×10^6 であり, この時点では降伏に至っていない。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 14690×10^6 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。

一方, 補強した B タイプ供試体の鉄筋ひずみは荷重 500kN までは線形的に増加している。この時点のひずみは 1716×10^6 であり, 降伏に至っていない。降伏付近の荷重で比較すると無補強供試体の 1.67 倍の補強効果が得られている。その後の荷重増加において鉄筋は降伏に至っている。荷重 560kN 載荷後ひずみは急激に増加し, 荷重 600kN 載荷時のひずみは $11,450 \times 10^6$ であり, A タイプと同様に計測位置とひび割れが一致したために急激に増加したものと推測される。その後はひずみに減少が見られ, 破壊に至っている。

d) 荷重と展張格子筋ひずみの関係

展張格子筋の主筋の荷重とひずみ関係を図-6に示す。展張格子筋のひずみも鉄筋同様に、荷重 400kN 付近まで線形的に増加し、ひずみは 1700×10^{-6} である。なお、展張格子筋の主筋の降伏ひずみは表-2に示す材料特性値より 1700×10^{-6} である。荷重 400kN を超えた付近からひずみの増加が著しくなり、荷重 640kN 載荷時にひずみは 20480×10^{-6} である。その後の荷重増加からひずみが減少しはじめている。

7. まとめ

- (1) 1点載荷による静荷重実験では、無補強カルバートの最大荷重は 456.6kN、補強カルバートは 760.7kN であり、補強を施すことで耐荷力が 1.64 倍向上した。よって、吹付け層厚 40mm 内に展張格子鋼板筋を配置し、接着剤塗布型 PCM 吹付け補強することで十分な補強効果が得られることが明らかとなったことから、実用的であると考えられる。
- (2) 荷重とたわみの関係において、たわみ 5mm 付近から急激に増加している。たわみ急増時の荷重は、無補強カルバートが 320kN、補強カルバートが 600kN である。また、荷重とひずみの関係において、無補強カルバートが荷重 320kN で鉄筋が降伏し、補強カルバートでは荷重 500kN 付近で降伏に至っている。
- (3) 1点載荷における展張格子筋の主筋のひずみは、荷重 370kN 載荷後に降伏している。その後の荷重増

加で 600kN 付近までは荷重を分担してひずみが増加している。よって、本補強法は荷重 600kN 付近までは既存部と増厚層との一体性が確保され鉄筋と格子筋が耐荷力を分担している。

- (4) 展張格子筋は工場で加工されることからボックスカルバートの補強材として配置する場合、直接ボルトでの設置が可能であり鉄筋の組み立てに比して大幅な時間の短縮が図られる。また、一面加工であるため増厚 40mm での補強が可能であり、内腔断面の確保にも貢献できる補強法である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2014.6
- 2) 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
- 3) 土木学会：鋼構造シリーズ 27，道路橋床版の維持管理マニュアル 2016，2016.10
- 4) 阿部忠，塩田啓介，吉岡泰邦，今野雄介：2 タイプの鋼板格子筋を用いた RC はりの PCM 増厚補強における補強効果の検証，セメントコンクリート論文集 Vol.69，pp.634-641，2016.3
- 5) 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
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I，II，III，1994.2

Verification of Practicality and Reinforcement Effect of Box Culvert strengthening with PCM Thickness Increase Method Using Expanded Metal-Grid

Hiroyuki NITTA, Tadashi ABE, Kazuhiko MINAKUCHI,
Keisuke SHIOTA and Yasukuni YOSHIOKA

In recent years, Repair and reinforcement measures for the deterioration become the problem that box culvert of road facilities constructed from several decades passed, fatigue damage become deteriorated. On the other hand, Grid-Metal expanded type was developed with exclusive jack for tensile reinforcement of concrete member. In this study verified stiffening effect the reinforced method of a road bridge culvert using Metal-Grid expanded type installed Polymer Cement Mortar on surface thickness increase and applied adhesive. The reinforced method were installed with Metal-Grid expanded type, sprayed with epoxy adhesive to enhance adhesively then sprayed with PCM at 40mm. As result, the reinforced culvert has a stiffening effect of 1.64 times as compared with the maximum load carrying capacity of un-reinforcing culvert. This reinforce method is practical.