炭素繊維シートを鋼材により固定した場合のトンネル補強効果に関する実験的検討

国立研究開発法人土木研究所 正会員 〇石村利明,砂金伸治,日下 敦

1.はじめに

国内の供用中の道路トンネルは年々増加傾向にあり,平成25年4月現在で箇所数10,000を超え,総延長も約4,200kmに達している。また,約半数以上のトンネルが供用後約30年以上経過している。これらのトンネルの中には供用後に何らかの理由により覆エコンクリートに外力が作用し,ひび割れ等のさまざまな変状が発生しているものがある。本報文は,外力作用により変状したトンネルを想定し,覆エコンクリート内面に炭素繊維シートを貼付後,炭素繊維シートと覆工表面とのはく離を抑制するためのボルトや鋼材(ここでは「はく離抑制治具」と称する)を所定の間隔で設置した対策を実施した場合の耐荷力,破壊形態に関して実験を実施したのでその結果を報告するものである。

2. 実験方法

実験は、図-1、写真-1に示すように外径 9.7m、覆工厚さ 30cm の 実大規模の覆工コンクリートを模擬した供試体に対して載荷を行っ た。載荷は 2 段階で実施した。第 1 段階として、供試体に損傷を与 える目的で徐々に載荷荷重を増加させ、覆工が損傷し、載荷荷重が 減少し始めた状態まで実施した(損傷載荷)。その後、一旦、荷重を 除荷し、第 2 段階として、内面補強工の炭素繊維シート(表-1)を貼 付した後、必要な養生を行った後に再び載荷を行い供試体が破壊す るまで実施した(補強後載荷)。なお、補強後載荷時には、はく離抑 制治具として 55 度~125 度の 10 度ピッチに炭素繊維シートと供試 体を固定するため、溝形鋼(100×50×5×7.5)を供試体の内面側と外 面側に設置して上下両端部を M24 の固定ボルトで連結した(写真-2)。

載荷は、半円形の覆エコンクリートを模擬した供試体の天端付近 (80 度~100 度)に油圧ジャッキにより変位制御により載荷した。

天端以外の油圧ジャッキは供試体が外 側に変位した時に 1 断面あたり 400kN/mm 相当のバネ反力として作用 するように制御を行った。計測は,供試 体に発生するひび割れの観察のほか,各 載荷ステップの段階で供試体表面のひ ずみ,変位等を測定するとともに,補強

載荷時には炭素繊維シートのうきやはく離状況の観察,はく離抑制治具に作 用するボルト軸力を測定した。なお、実験に使用した供試体は、呼び強度 18N/mm²,スランプ 12cm,最大粗骨材寸法 40mm のプレーンコンクリー トで,試験実施日での供試体の材料特性は**表-2**に示すとおりである。



図-1 実物規模の覆工載荷実験



写真-1 覆工載荷実験の概要



写真-2 はく離抑制治具

表-2 供試体の材料特性

	材令(日)	圧縮強度fc N/mm ²	弾性係数E GPa	ポアソン比 <i>ν</i>
損傷載荷	42	25.37	19.31	0.152
補強後載荷	77	26.72	20.91	0.171

3. 実験結果

損傷載荷試験時の覆工コンクリートの変位と荷重の関係を図-3 に示す。載荷重が約 400kN 時に 90 度付近の内 面側にひび割れが発生し、その後、載荷重の増加に伴って外面側 65 度、117.5 度付近にひび割れが発生し、約 1300kN 時に 60 度、120 度付近の内面側に周方向のひび割れが発生した。その後、載荷重約 1700kN 時に 90 度 付近の上面妻部にコンクリートの圧壊が確認された。最大荷重約 2400kN で 110 度付近の内面側に圧壊が確認さ れ、載荷重の低下が確認されたため、実験を終了して荷重を除荷した。変形モードとしては本実験条件がトンネ ル天端(90 度)付近からの載荷であるため、90 度付近の覆工外面側に圧縮ひずみが、覆工内面側に引張ひずみが

表-1 貼付した炭素繊維シートの仕様

引張強度

N/mm

3400以上

4341

曲げ強さ:72N/mm

引張強さ:49N/mm³

引張せん断強さ:17N/m

ウリート付着強度3.8N/

引張弾性率

N/mm2

 245 ± 24

259

炭素目付

g/m²

300以上

306

エポキシ樹脂

材料種類

規格値

試験値

プライマー※

含浸接着樹脂※ エポキシ樹脂

※JIS Z8703に準じた試験値

キーワード 道路トンネル, 覆工コンクリート, 変状, 補強工, 炭素繊維シート

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 国立研究開発法人土木研究所 TEL 029-879-6791

-383



120°

着色箇所がはく離部分

図-6

130°

110°

100

900

80

発生し、載荷重の増加に伴い引張ひび割れの 発生に伴い内面側 90 度付近,外面側 110 度 付近で大きなひずみが発生した。

次に、補強後載荷時の覆工コンクリートの 変位と荷重の関係を図-4に示す。載荷重が約 830kN時に90度付近で炭素繊維シートの浮 きが確認され,載荷重の増加に伴ってその周 辺のシートのはく離が進展し、約 2100kN 前

後でシートのはく離が発生した。その後、載荷重の増加とともに85度 付近から 115 度付近でシートのはく離が進展し、荷重約 2500kN 後を ピークに載荷重が上がらなくなり、天端部の変位が約 40mm の時に急 激に荷重が低下して終了した。なお, 覆工コンクリートの破壊形態は, 実験終了後の観察では円周方向の軸圧縮力が卓越して, 覆工内面側 110 度付近から外面側 100 度付近に斜めにせん断破断面を伴って圧壊した と考えられる。

50 ← T-75° → T-95° 45 (¥ 40 T-105 T-115 上下合計 35 30 25 20 ボルト軸力 15 ¥₽_₽ 10 5 初期軸力:5kN 0 20 25 30 35 40 45 変位 δ(mm) はく離抑制治具のボルト軸力 図-7

はく離抑制治具

60

50°

70

図から分かるように、補強後の最大荷重は、損傷載荷時とほぼ同程度 であった。これより補強による効果は、損傷載荷後に無補強の状態で再

度載荷を実施した場合の耐荷力が損傷載荷時の約75%程度 いに比較して大きいものの,損傷前の耐荷力以上に耐 荷力を増加させる効果は期待できないことが分かる。ただし、実験終了後の観察では、110度付近において最大約 50cm×25cm×8cm を含む合計約 30kg のコンクリート片のはく離が確認されたものの, 破壊時にコンクリート片 が大きく脱落することは無かった。これは炭素繊維シートがコンクリート片の脱落を防止したためであると考え られる。一方、本実験でははく離抑制治具をトンネル縦断方向に設置しており、はく離抑制治具がトンネル縦断 方向に連続した状態で固定されていれば、比較的大きなコンクリートブロック塊の脱落の抑制に効果が期待でき る可能性があると考えられる。この効果については今後十分な検証が必要である。

図-5 に炭素繊維シート面と覆工表面のひずみ(差分)分布を示す。炭素繊維シートと覆工コンクリートが密着 していれば、ほぼゼロとなるが、85度、95度および67.5度、95度~105度、110度~115度付近でそれぞれ圧 縮側, 引張側の両ひずみの差分が顕著に表れている。図−6 に載荷途中と実験終了時に観測した覆工内面側の炭素 繊維シートのはく離部分を示すが、ひずみの差分が生じている部分と一致した。

また,図-7にはく離防止治具のボルト軸力を示す。これよりボルトに軸力が作用するのは、はく離抑制治具周 辺のシートがはく離するまでは変化はなく、最大荷重後に変化し始めることが分かった。また、今回の実験条件 においては 115 度のボルトで最大 45kN の引張力が作用した。

4. まとめと今後の課題

本実験により覆工コンクリート内面に炭素繊維シートを貼付後、炭素繊維シートと覆工表面とのはく離を抑制 するための鋼材を所定の間隔で設置した場合の耐荷力、破壊形態を把握した。その結果、損傷前の耐荷力以上に 耐荷力を増加させる効果は期待できないが、破壊時にコンクリート片のはく離・脱落を抑制する効果はあると考 えられた。今後、はく離抑制治具の構造、設置する方向等に対する効果を検証することが必要であると考える。 参考文献

1) 真下英人,石村利明,箱石安彦:変状トンネルの内面補強工の耐荷力に関する研究報告書,土木研究所資料第4005号,2006年3月

