

損傷を受けたトンネル覆工の内面補強工の補強効果について

独立行政法人土木研究所 正会員 真下英人、正会員 石村利明
 正会員○箱石安彦、正会員 森本 智

1. まえがき

損傷を受けた既設トンネル覆工の補強工として、炭素繊維シート接着工や内巻きコンクリート工などの覆工内面に補強材を設置する方法がある。本研究では、覆工内面に補強材を設置することによる補強効果のメカニズムを明らかにするため、過年度¹⁾に引き続き、炭素繊維シート接着工を補強工としたケースの実験を実施したので、その実験結果の概要を報告する。

2. 覆工載荷試験

(1) 実験手順および載荷形式：実験は、まず損傷したトンネル覆工を再現するため覆工コンクリート供試体（外径 9.7m、覆工厚 30cm、トンネル軸方向長さ 1.0m、水平置き）に載荷を行い、ひび割れを発生させた。載荷は、最大荷重を示した後、最大荷重の 90～95% 荷重時まで低下した状態まで続行して行った（損傷載荷）。損傷載荷では、曲げ圧縮によって、先に天端外面で圧壊が発生し、次いで両肩内面で圧壊が発生し、後者の時点で最大荷重に達した。損傷載荷の終了後、一旦除荷し、覆工コンクリート供試体の内面側に補強材を設置し、再度、損傷載荷と同じ載荷形式で、最終破壊となるまで載荷を行った（補強後載荷）。載荷形式は、背面変位拘束の高い状態で、天端上方から外荷重が作用する状況を想定したものである（図 1）。

(2) 実験ケース：実験での内面補強工は炭素繊維シート接着工とした。実験ケースを表 1 に示す。case1 は、炭素繊維シート接着範囲を、覆工内面が比較的顕著に圧縮となる範囲（損傷載荷時に覆工内面の円周方向の圧縮ひずみが比較的顕著に発生が見られた区間を設定）のみとし、覆工内面が引張となる天端部には接着しないケースである。case2 は、炭素繊維シートを全周に接着したケースである。炭素繊維シート接着工の仕様を、表 2 に示す。覆工供試体の両肩内面では、両ケースとも、損傷載荷時に曲げ圧縮によってコンクリートに剥離や浮きが発生（圧壊）したため、当該箇所は、シート接着前に、ハンマーでたたいてコンクリートの浮いた部分を除去し、エポキシ樹脂パテ材にて断面修復を実施した（表 3）。なお、覆工供試体の母材コンクリート強度等は、補強後載荷時（材齢 28～33 日）で、一軸圧縮強度 22～23N/mm²、静弾性係数 19kN/mm²であった。

3. 実験結果と考察

(1) 荷重変位曲線：損傷載荷時および補強後載荷時における作用荷重（θ＝80 度、90 度、100 度位置でのジャッキ荷重値の合計値）と天端（θ＝90 度）外面位置での内空側への変位の関係曲線を、図 2 に示す。図 2 には、無補強ケース¹⁾も合わせて図示した。無補強の場合には、再載荷時の最大荷重は損傷載荷時に示した最

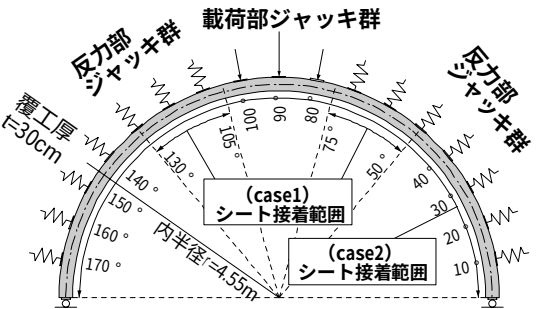


図 1 実験概要

表 1 実験ケース

実験ケース	炭素繊維シート接着範囲
case1	θ＝50～75度およびθ＝105～130度の 2 箇所
case2	全周

表 2 炭素繊維シート接着工の仕様

	目付量		プライマー	パテ	含浸接着剤	接着強度
	g/m ²		kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	N/mm ²
case.1	300	※1	0.21	1.41	0.93	2.24
case.2	(1層)	※2	0.26	1.33	0.90	1.57

※1) 幅 0.25m、長さ 2.2m～3.6m のシート片群を、円周方向にはラップ長 0.12m、トンネル軸方向にはラップ無しで、千鳥配置状に接着した。繊維方向は円周方向のみ。
 ※2) 幅 0.25m、長さ 2m のシート片群を、トンネル軸方向にはラップ無しで配置し接着した。繊維方向は円周方向のみ。
 ※3) シートは、高強度型炭素繊維シート。
 引張強度 4.3kN/mm²。引張弾性率 261kN/mm²。
 ※4) プライマー、パテ、含浸接着剤は、エポキシ樹脂。
 パテ、含浸接着剤の硬化後の力学的特性値（JIS-K-7208）
 ・パテ：圧縮弾性率 2.2kN/mm²、圧縮強さ 73N/mm²。
 ・含浸接着剤：圧縮弾性率 2.2kN/mm²、圧縮強さ 89N/mm²。
 ※5) 接着強度は、JSCE-E545-2000 で求めた値で、補強後載荷日の試験値の平均値。

表 3 肩部内面の断面修復の程度

	位置 θ (度)	浮き除去範囲		パテ 使用量 kg
		平均幅 mm	平均深さ mm	
case.1	70	-	-	-
	110	230	30	9.70
case.2	70	244	23	9.05
	110	192	21	7.30

※) パテは、エポキシ樹脂。

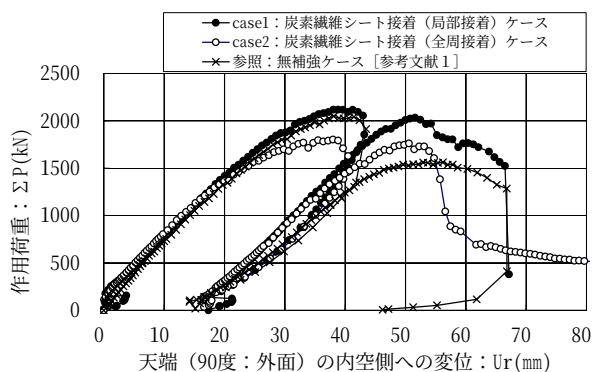


図2 荷重変位曲線

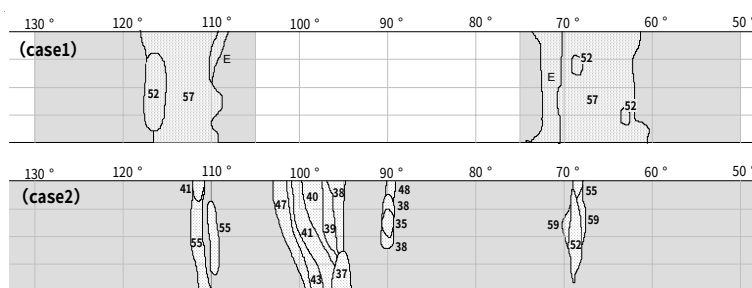


図3 炭素繊維シートの剥離の進展状況（補強後載荷時）

大荷重値の約 76%までしか回復せず、最終破壊時には載荷ジャッキの載荷板で変位拘束されている天端外面よりも変位拘束のない肩部内面でコンクリートがはく落した¹⁾。これに対して、損傷を受けた覆工に炭素繊維シート接着工を施した場合には、局部範囲に接着した場合（case1）と全周範囲に接着した場合（case2）のいずれも、図2に示すように、補強後載荷時の最大荷重は損傷載荷時の最大荷重とほぼ同じで、同程度の耐力の回復が認められた。

(2) 補強後載荷時における破壊状況：case1 では、両肩部でシート剥離がほぼ同時に発生した時点で最大荷重に達した。最終破壊は、覆工の肩部（65 度）で圧縮せん断破断面を伴った脆性的な破壊となった。case2 では、最大荷重の約 66%荷重時にシートの最初の剥離が天端部で発生し、その後作用荷重の増加に伴ってシート剥離は発生箇所から左肩方向へ進展し（図3）、最大荷重の約 95%荷重時にはシート剥離進展は位置 102.5 度付近で止まった。さらに作用荷重の増加によって、左右肩部で剥離がほぼ同時に発生し作用荷重は最大荷重に達した。最大荷重時以降は主に覆工天端部にひび割れが集中しながら荷重が低下し、載荷ジャッキのストロークが限界に達した時点で試験を終了した。肩部シート剥離発生時に最大荷重に達するという挙動はいずれのケースも同じであった。また、2 ケース共に剥離したシート面にはコンクリートが付着して剥がれた。

(3) 覆工コンクリートの円周方向ひずみ分布：図4

に、補強後載荷時の最大荷重にほぼ達した時点の、覆工外面、覆工内面の円周方向ひずみ分布図を各ケース結果の重ね書きで示す。補強を行った case1 と無補強ケースとでひずみ分布を比較すると、case1 では肩部内面で圧縮ひずみが大きく発生しており、圧縮力の伝達が無補強ケースに比べて大きかったと考えられる。

case2 では、肩部内面で圧縮ひずみが大きい傾向はひずみゲージの破損によりひずみ値が計測されない点があるため明確には現れていないが、case1 と同様に肩部内面で圧縮力の伝達が大きかったと推測される。覆工内面での圧縮伝達について、case1、case2 では、接着された炭素繊維シート部が圧壊した覆工の内空側への変形を

拘束することにより、圧壊したコンクリート部での圧縮力伝達が可能となったことによるものと考えられる。

4. まとめ

本実験結果から、天端上方から外荷重が作用し肩部内面の圧壊で最終破壊する場合、補強材がシート系材料のように圧縮抵抗しない部材でも、覆工内面の圧壊が進む箇所に設置することにより、覆工の変形を拘束すれば、覆工自体の内面側での圧縮伝達が高まり覆工の耐力の回復が期待できると思われる。

参考文献：1) 箱石・真下・石村・森本：損傷トンネル覆工における内巻きコンクリートの補強効果に関する実験的研究、土木学会トンネル工学研究論文・報告集第 13 巻、pp.349～354、2003 年 11 月

（符号）－圧縮、＋引張、（備考）引張や剥離で破損したひずみゲージ部は表示していない。

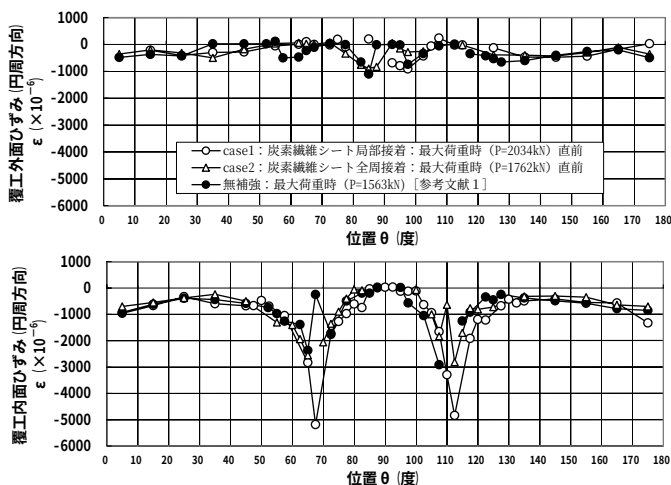


図4 覆工のひずみ（円周方向）分布図