

覆工内面のひび割れ部に炭素繊維シート接着補強した場合の覆工の耐荷力

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

1. まえがき

損傷を受けた既設トンネル覆工の補強工の一つに、覆工内面に炭素繊維シート接着工を施す方法がある。本文は、載荷位置の覆工内面に曲げ引張によるひび割れが発生した箇所を覆うように炭素繊維シート接着工を施した場合に、その覆工の耐荷力がどの程度増大するかを把握する目的で実施した、実大規模の覆工載荷実験の結果概要を報告するものである。

2. 覆工載荷実験

実験フローおよび実験概要図を、各々、図1および図2に示す。実験は、まず無垢の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、圧縮強度等は表1に示す。）に、天端から内空側（覆工部材に対して法線方向）に強制変位を載荷し、覆工内面（天端位置）にひび割れを発生させ、そのひび割れ幅が 1.0mm に達した時点で一旦載荷を中断した（損傷載荷）。載荷中断時の載荷変位を保持した状態で、天端のひび割れ発生箇所を覆うような範囲（ $\theta=75$ 度～105 度の範囲）に炭素繊維シート接着工を実際の対策工と同じような仕様および施工方法で施した（表2、表3）。その後、シート接着工に必要な養生期間をとった後に、載荷を再開し、最終破壊となるまで載荷を行った（補強後載荷）。なお、損傷載荷の終了判断をひび割れ幅 1.0mm 時とした理由は、炭素繊維シート接着工の対策工を検討するであろうと思われるひび割れ幅を 1.0mm と想定したこと、および同様な過去の実験の経験からひび割れ幅 1.0mm 時の作用荷重はシート接着作業時の安全を確保する上で問題のない荷重レベルであることが確実に予測できたためである。

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、実験では天端部分での強制変位は油圧ジャッキにてステップ載荷（変位制御）し、天端部分以外の箇所では油圧ジャッキの油圧弁を閉めて覆工コンクリート供試体の背面側方向への変位を拘束した。

表3 炭素繊維シートおよび接着剤の力学的特性値

項目	主な力学的特性値(メーカー試験成績書より)			
	引張強度(※1)	引張弾性率(※2)	(備考)	
1 高強度カーボン	4,700N/mm ²	2.4×10 ⁵ N/mm ²	引張強度に対応する引張ひずみ $\epsilon_t=4,700\text{N/mm}^2 \div 2.4 \times 10^5\text{N/mm}^2$ $=19,580 \times 10^{-6}$	
2 プライマー (エポキシ樹脂)	コンクリート接着強度(※3) 2.7N/mm ² (母材破壊)		圧縮強度(※4) 78N/mm ²	
3 不陸修正材 (エポキシ樹脂)	コンクリート接着強度(※3) 2.4N/mm ² (母材破壊)		圧縮弾性係数(※4) 1,700N/mm ²	
4 含浸・接着樹脂 (エポキシ樹脂)	引張強度(※5) 50N/mm ²	曲げ強度(※6) 69N/mm ²	圧縮強度(※4) 75N/mm ²	圧縮弾性係数(※4) 2,100N/mm ²

(備考)(※1)JIS K7071、(※2)JIS K7073、(※3)JIS A6909、(※4)JIS K7208、(※5)JIS K7113、(※6)JIS K7203

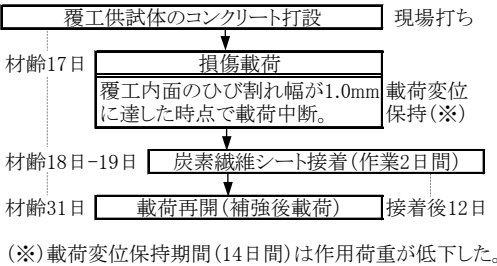


図1 実験フロー図

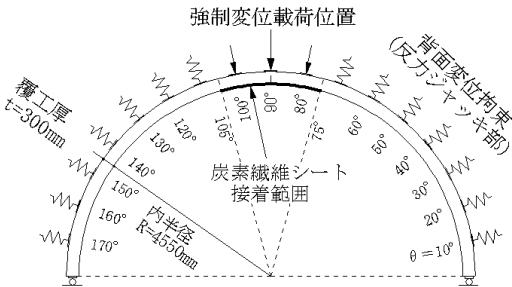


図2 供試体概要図および載荷形式

表1 覆工コンクリート供試体の力学的定数

覆工供試体 呼び配合 (種類)	材料 (日)	一軸圧縮 強度:fc (N/mm ²)	静弾性 係数:Ec (kN/mm ²)	ポアソン 比:ν (-)
普通18-12-40-N (プレーン)	17 31	19.9 22.9	18.4 19.8	0.14 0.16

※上段は損傷載荷時、下段は補強後載荷時の値。

表2 炭素繊維シート接着工の仕様

項目	使用した仕様など		
	繊維種類	繊維目付	設計厚さ 繊維方向
1 高強度カーボン		300g/m ²	0.167mm 円周方向 (1方向)
2 プライマー (エポキシ樹脂)	塗布量=0.20kg/m ² (平均)		
3 不陸修正材 (エポキシ樹脂)	塗り量=0.88kg/m ² (平均)		
4 含浸・接着樹脂 (エポキシ樹脂)	下塗り量=0.48kg/m ² (平均) 上塗り量=0.38kg/m ² (平均)		
5 接着試験結果 (JSC-E545-2000)	平均 2.8N/mm ² (2.2~3.2N/mm ²) (試験日=補強後載荷日)		

(施工時の特記事項)

- 1) 下地処理: サンドシット・プラスト処理
- 2) シート施工割付: 1枚の大きさが幅0.25m×長さ2.4mのシートを使用し、トンネル軸方向(1.0m)に4枚をラップ無しで接着。
- 3) 実験室の室温: 昼夜間通して約6~12℃(冬季)。シート接着後の2日間は投光器を用いた加温養生実施。

キーワード トンネル、覆工コンクリート、補強、炭素繊維シート接着工、覆工載荷実験

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6 独立行政法人土木研究所 基礎道路技術研究グループ(トンネル) TEL. 029-879-6791

3. 実験結果と考察

損傷載荷および補強後載荷における作用荷重（ $\theta = 80$ 度、 90 度、 100 度位置でのジャッキ荷重値の合計値： ΣP ）と天端（ $\theta = 90$ 度）外面位置での内空側への変位の関係曲線を、**図3**に示す。損傷載荷完了時の変位状態保持期間中に作用荷重は低下したが（**図中**B→C）、補強後載荷は作用荷重が低下した状態から載荷を再開した。なお、**図3**には無補強ケース群の結果も合わせて図示した。ここで、無補強ケース群とは、無垢の覆工コンクリート供試体を、同じ載荷形式で、最大荷重（ P_{max} ）を確認するまで載荷を行ったケースの荷重変位曲線群である。

図3より、シート剥離が発生していない段階では荷重変位曲線の曲線勾配がやや急であったが（**図3**中C～D間）、シート剥離が開始した（**図3**中D：約 $1/3 \times P_{max}$ 時）以降は曲線勾配は無補強ケース群の曲線に漸近し、シート剥離がひび割れ直上位置で供試体の上面および下面に達した時点（**図3**中E：約 $2/3 \times P_{max}$ 時）で曲線勾配は無補強ケース群の曲線にほぼ重なった。シート剥離は作用荷重の増加と共に左右肩部方向へ剥離範囲を拡げたが、最終的にはシート接着工を施していない左右肩部内面に圧壊が発生してほぼ最大荷重（耐荷力）に達した（**図4**）。左右肩部内面に圧壊が発生して耐荷力が決まる破壊形態は、無補強ケース群での破壊形態と同じであった。耐荷力は、バラツキの範囲内で、無補強ケース群（無垢の覆工）の耐荷力とほぼ同じ値であった。

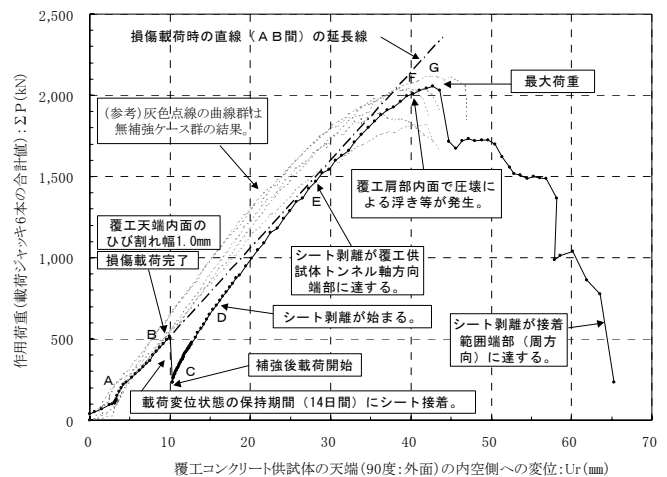


図3 荷重変位曲線

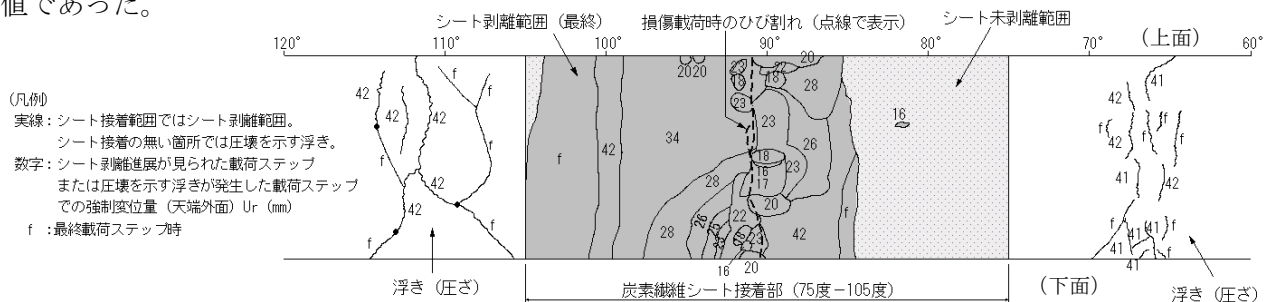


図4 炭素繊維シートの剥離進展状況（覆工内面での展開図）

一方、**図5**は肩部内面圧縮ひずみと作用荷重との関係を示したものである。ひずみー荷重曲線は、天端部でシート剥離が発生していない段階（**図5**中C～D）では、無補強ケース群の曲線に比較して比較的急な勾配を示しており、左右肩部内面で圧縮ひずみの発生が抑制されていることがわかる。これは、天端部でのシート接着部が引張クラックの進展を防ぐことにより覆工全体の変形を抑制する効果が現れたためと考えられる。

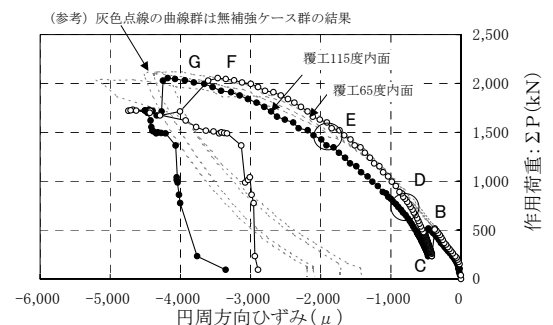


図5 覆工内面圧縮ひずみ～ ΣP の関係図

4. まとめ

ひび割れ発生のある覆工天端内面に施された炭素繊維シート接着工では、本実験で設定した荷重形式の場合には耐荷力の向上は認められなかった。これは、無垢の覆工の耐荷力の約 $1/3 \sim 2/3$ 荷重レベルの作用荷重において、シート引張力を最も期待するひび割れ直上で、シートが剥離しシート接着の無い状態つまり無垢の覆工と変わらない状況となったためであるが、シートが剥離するまでの間は覆工全体の変形を抑制する効果が現れたものと考えられる。