

# FRP シートと側壁基部アンカーの併用による水路トンネルの補強効果

## Combined reinforcing effect by FRP sheet and sidewall anchor for aqueduct tunnels

○石井 将幸\*, 上野 和広\*, 小森 篤也\*\*, 堀越 直樹\*\*\*, 西須 稔\*\*\*

ISHII Masayuki, UENO Kazuhiro, KOMORI Atsuya, HORIKOSHI Naoki and NISHISU Minoru

### 1. はじめに

トンネル覆工頂部周辺の背面空洞に起因する水路トンネルの変状への対策として、この空洞を充填する手法の有用性が広く認識されるようになった。しかしひび割れの原因となっている引張応力を解消するためには、充填した箇所から覆工へ背面土圧に即した荷重が伝わる必要がある。すべての充填工法でこれを実現できるわけではない。また充填部からの荷重はスプリングライン周辺の引張応力を軽減する一方、頂部周辺の圧縮応力を増大させる。頂部付近の覆工が設計より薄くなっているトンネルが存在しており、空洞の充填だけでは十分な安全性を確保できない事例があると推察される。

そこで本研究では、水路トンネルの内面にすだれ状の FRP ストランドシートを貼り付ける補強方法と、これに加えて側壁基部に鉄筋アンカーを打ち込む手法の有用性を評価するために、載荷試験と数値解析による検討を行なった。なお本研究は、官民連携新技術開発事業「無筋コンクリート水路トンネル覆工に最適化した補強工法の開発」において行われたものである。

### 2. 試験の概要

載荷試験は、Fig.1 に示す標準馬蹄形の供試体を対象として実施した。供試体の厚さ（トンネル軸方向の長さ）は 0.3m である。FRP ストランドシートによる内面補強の有無、また基部アンカーの有無を変えて試験を行い、荷重の大きさと変形量やひずみの値を測定した。FRP シートとアンカーの物性値、並びに補強量は Table 1 のとおりである。シートによる内面補強は、インバートを除くアーチ部と側壁部に対して行なっている。コンクリートの圧縮強度は 3.71MPa、

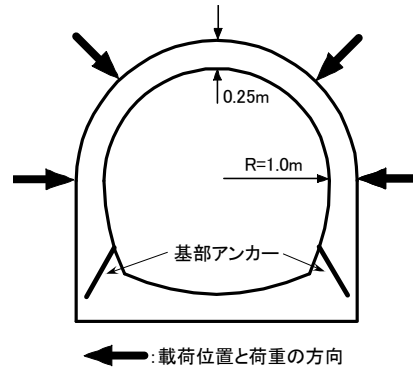


Fig.1 載荷試験の試験体と載荷の概要  
Outline of loading test and specimen

Table 1 補強に用いた材料の物性値と補強量  
Materials used for reinforcement

材料	弾性係数	引張・降伏強度	補強量
FRP シート	245GPa	3400MPa	覆工厚の 0.4%
アンカー	200GPa	345MPa	D16 を各 1 本

弾性係数は 23.6GPa である。

載荷は Fig.1 に示す 4 方向から油圧ジャッキで実施した。10kN ずつ荷重を増やしながらひび割れの発生や進展の状況を観察し、さらに最大

Table 2 載荷試験によるひび割れ荷重と破壊荷重  
Cracking and maximum loads obtained by loading tests

FRP シート	基部アンカー	ひび割れ発生・進展荷重	破壊荷重
無	無	60kN	90kN
有	無	120kN	200kN
有	有	120kN	220kN

の荷重である破壊荷重を測定した。

試験で得られた荷重を Table 2 に示す。なおシートなどで補強した供試体は、あらかじめ Fig.1 のものと同等の荷重で破壊してから、ひび割れ補修と補強を行ったものである。そのため Table 2 に示すひび割れ荷重は、無補強の供試体については初期ひび割れ荷重、補強した供試体につ

\* 島根大学学術研究院, Academic Assembly, Shimane University

\*\* 日鉄ケミカル&マテリアル(株), Nippon Steel Chemical & Material Co., Ltd.

\*\*\* オリエンタル白石(株), Oriental Shiraishi Corporation

キーワード: 水路トンネル, 内面補強, 破壊解析

いては補強後に加えた荷重で新たなひび割れが生じた荷重である。シートとアンカーのそれぞれに補強効果が認められ、両者の併用にも効果があることがわかる。供試体の破壊モードは、無補強の場合は曲げ破壊、FRP シートで補強した場合は側壁基部アンカーの有無によらず、シートの剥離破壊であった。

### 3. 荷重試験の FEM 解析による再現

FRP スtrandシートと側壁アンカーの補強効果を再現する目的で、3次元 FEM 解析を実施した。用いたプログラムは ATENA 3D で、コンクリートのひび割れや鉄筋の降伏、またシートの破断を考慮可能なものである。Table 1 に示す物性値を用いるとともに、FRP スtrandシートの異方性を表現するためシートの表現には面要素を用いず、線要素を間隔 60mm で配置した。トンネル軸方向の要素サイズは約 100mm であるため、トンネル内面に並ぶすべての要素は FRP 線要素によって補強される。

この解析プログラムは、適切な設定を行なうことでシートの剥離を考慮することが可能である。しかし剥離に関するパラメータが得られていないため、シートの強度を実際より下げ、剥離の代わりに降伏を生じさせることによって、剥離現象を模擬することとした。

降伏ひずみを変化させることで得られた破壊荷重を Table 3 に示す。降伏ひずみがある程度以上大きくしても破壊荷重が頭打ちになることと、解析結果と試験結果の整合性を踏まえて、降伏ひずみの値を 4500 $\mu$  とした。これは実際の破断ひずみや引張強度の 0.32 倍に相当する。

Table 3 シートの降伏ひずみと破壊荷重  
Ultimate load obtained for different yielding strain

破断ひずみ	破壊荷重	破断ひずみ	破壊荷重
1500 $\mu$	135kN	3500 $\mu$	169kN
2000 $\mu$	150kN	4000 $\mu$	173kN
2500 $\mu$	158kN	4500 $\mu$	173kN
3000 $\mu$	161kN	5000 $\mu$	173kN

### 4. 側壁基部アンカーの補強効果

Table 2 に示したように、FRP スtrandシートと側壁基部アンカーを併用した供試体の荷重

試験では、シート単体より高い補強効果が得られた。そこで無補強、シート単体補強、アンカー単体補強、シートアンカー併用補強の 4 とおりについて解析を行い、破壊荷重の値を求めた。Table 4 に示すように、アンカー単体では補強効果があまりみられない一方、併用補強の補強効果は、単体補強の補強効果の合計より大きい。トンネル内面のシート補強によって側壁基部に集中する変形を、基部アンカーによって効果的に拘束できるためであると考えられる。

荷重試験で用いた供試体の厚さは 300mm で

Table 4 FEM で求めたシートとアンカーの補強効果  
Reinforcing effects by sheet and anchor by FEM analysis

シート	アンカー	破壊荷重	補強効果
無	無	101kN	-----
有	無	173kN	72kN
無	有	105kN	4kN
有	有	214kN	113kN

あるため、これは実際のトンネルに 300mm 間隔でアンカーを設置した場合に相当する。アンカーの間隔による補強効果の違いを検証するために、長さ 3m 分のトンネルを対象とし、シートアンカー併用補強を想定した解析を行なった。得られた結果を Table 5 に示す。なお破壊荷重は Table 4 の値と直接比較できるように、トンネルの長さ 0.3m あたりの値に換算されている。

想定したアンカー (SD345, D16) では間隔を 1m 未満まで小さくしないと顕著な補強効果が得られないことがわかる。しかし表には示していないが、間隔が大きい場合でも併用補強の効果は単体補強の効果の合計を上回った。より太い鉄筋を使用することで間隔が大きい場合の補強効果も向上できると推察され、内面シート補強と側壁基部アンカーの組み合わせの有用性が示されたと考えられる。

Table 5 アンカーの間隔と破壊荷重  
Ultimate load obtained for different spacing of anchors

アンカー間隔	破壊荷重	アンカー間隔	破壊荷重
3.0m	128kN	0.75m	143kN
1.5m	135kN	0.5m	150kN
1.0m	139kN	0.375m	158kN