

高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補強工法の実大載荷試験

鹿島技術研究所 正会員 名見耶 薫

(独) 土木研究所 正会員 真下 英人

鹿島技術研究所 正会員 ○福田 一郎 正会員 松原 功明

1. はじめに

変状トンネルの補強対策として鋼材と吹付け施工型の高靱性セメント複合材料（Engineered Cementitious Composite, 以下、ECC）¹⁾を用いた内巻補強工法（以下、本工法）を開発した。本工法の概要を図-1に示す。本工法は、覆工内面にブラストなどによる表面処理を行った後、エキスパンドメタルなどの鋼材をアンカーで覆工に設置して、ECCの吹付けを行うものである。ECCは、ひび割れ発生後も繊維の架橋効果により引張力を負担する。鋼材の降伏ひずみの10倍程度の引張ひずみが作用下しても引張力を保持できるため、局所的な破壊を抑制する。覆工と合成した補強効果が期待でき、補強断面の薄肉化により建築限界の確保が図れる。また、ECCのひび割れ抑制効果により、補強断面におけるひび割れの貫通を抑制し、さらに、エキスパンドメタルを介して、アンカーにより機械的に覆工に定着されるため、コンクリート片の剥離・剥落を防止する。ここでは、実大規模の試験体（半径4.85m）を用いた載荷試験を行い、本工法の耐荷力を検討した。

2. 実験概要

図-2および図-3に試験概要図を示す。載荷試験は2種類の載荷パターン（試験Ⅰ、試験Ⅱ）を実施した。

試験Ⅰは、天端ゆるみ土圧などを想定し、比較的大きな軸力が作用する曲げ卓越型の破壊モードとなる。載荷要領は、全周のジャッキ（17箇所×2段=34本）で同一荷重の20kNまで加力した後、中央3箇所（80、90、100°）以外のジャッキのバルブを閉めて反力ジャッキとした上で、中央3箇所のジャッキによる変位制御とした。覆工が損傷した状態での補強効果を確認するため、覆工単体の試験で最大荷重を確認して除荷を行った後に、本工法による補強を行い、同じ載荷要領で加力を行った。エキスパンドメタルの継手は突き合せとし、5本/m²の間隔でM10の金属拡張系アンカー（根入れ長40mm）で設置した。ECCの吹付け厚さは50mmとした。

試験Ⅱは、覆工にせん断ひび割れや目違いが生じた状態を想定しており、左右肩部に覆工内面から外面に貫通する斜め面状に弱点部を設けた。弱点部は、テフロン板を2枚のステンレス板で挟みこんだものを覆工コンクリート打設前に予め設置した。覆工コンクリート打設後に補強工を行い、全周から等荷重を作用させた。ECCの吹付け厚さを70mmとし、弱点部のずれ抑制を目的に、覆工内面の弱点部先端を中心に両側20°の範囲のみを厚さ9mmの鋼板で補強した。鋼板には補剛リブ（厚さ6mm、高さ50mm）を覆工周方向に4本溶接し、250mm間隔（22本/m²）でM16（根入れ長50mm）の金属拡張系アンカーにより固定した。鋼板以外の部分は、試験Ⅰ

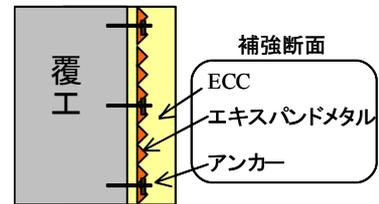


図-1 補強工の概要図

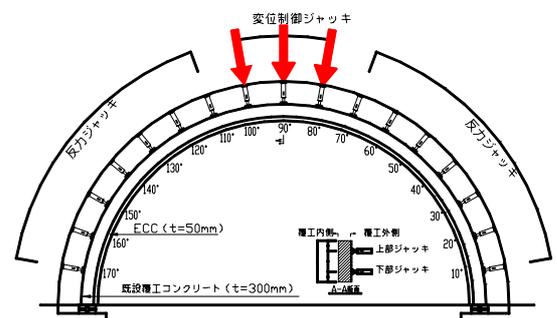


図-2 載荷試験Ⅰ

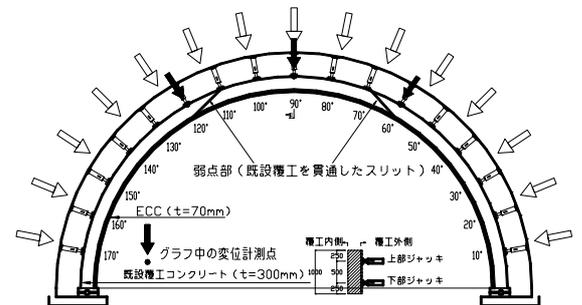


図-3 載荷試験Ⅱ

キーワード 覆工, 補強, 高靱性セメント複合材料, 吹付け

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1 鹿島技術研究所 TEL 0424-89-7076

と同様にエキスバンドメタルを設置した。

3. 実験結果

表-1 および表-2 に覆工および ECC の材料試験結果を示す。図-4～図-6 に試験 I および試験 II の荷重－変位関係、ひび割れ状況を示す。

試験 I では、損傷載荷、補強後載荷のいずれも天端部内面からひび割れが発生し、次に肩部外側でひび割れが発生した。損傷載荷では、天端部、肩部のコンクリートひずみがいずれも $3,500 \times 10^{-6}$ に達してから、周方向のひび割れが発生した後も荷重が増加し、最大荷重は 2,100kN（載荷ジャッキ 6 本の合計）だった。補強後載荷では、荷重の増加に伴い天端部内側の ECC のひび割れ本数が増加したが、個々のひび割れ幅は 0.04mm 程度と小さく、ECC のひび割れ抑制効果が認められた。荷重 2,745kN において、肩部で覆工と ECC 界面にずれが生じたが、その後も荷重は増加し、最終的には肩部の覆工が圧壊した。

補強後の最大荷重は、無垢の覆工耐力の約 1.3 倍であり、本工法の適用により、耐力が向上することが確認された。

試験 II では、載荷初期は全断面一様に内空側に変位したが、載荷荷重（1 本当り平均）が 60kN の時点で、弱点部に大きなずれが生じ、その箇所の変位（ 120° ）の勾配が小さくなるとともに 90° の変位が反転した。最終的には、300kN で弱点部先端の覆工内面でコンクリートひずみが $2,000 \times 10^{-6}$ 以上になった後、鋼板を覆工に固定していたアンカーの抜けと、既設覆工と鋼板界面の付着切れが生じたため、弱点部を境に覆工で大きなずれが生じて、弱点部先端の覆工が圧壊し、鋼板先端でせん断引張破壊した。最大荷重時における全ジャッキ荷重の合計を覆工表面積で除した値を土圧とすると、 670kN/m^2 であった。

鋼板に座屈等は生じておらず、アンカーの抜けにより鋼板のずれが大きくなり、補強後の剛性及び耐力が決まっているため、アンカー径を太くすることや覆工への根入れ長を長くすることで、耐力の増加が期待できると思われる。

4. おわりに

鋼材と吹付け施工型の高靱性セメント複合材料を用いたトンネル補強工法を開発し、実大載荷試験により補強効果を確認した。今後は、現場適用および現場適用をもとに様々な分野へ展開を図りたい。

参考文献

- 1) 坂田ほか：高靱性繊維補強セメント複合材料の吹付け施工システムの開発，鹿島技術研究所年報，Vol. 50, pp. 187-190, 2002. 9

表-1 覆工の材料試験結果

項目	試験体	試験値
圧縮強度 (N/mm ²)	試験 I の損傷載荷	20.0
	試験 I の補強後載荷	22.4
	試験 II	17.9

表-2 ECC の材料試験結果

項目	試験体	試験値
圧縮強度 (N/mm ²)	試験 I	43.9
	試験 II	51.0
引張降伏強度 (N/mm ²)	試験 I	3.5
	試験 II	3.8
引張終局ひずみ (%)	試験 I	2.5
	試験 II	2.2

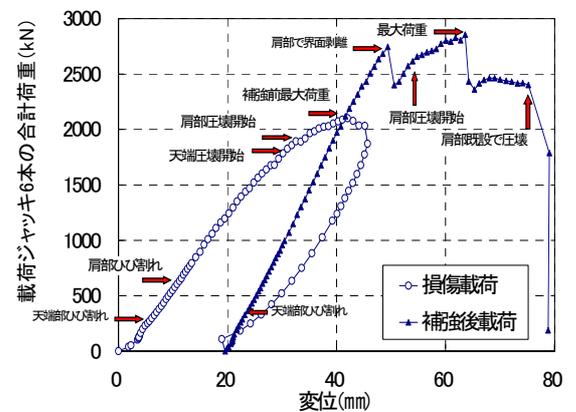


図-4 試験 I の荷重－天端変位関係

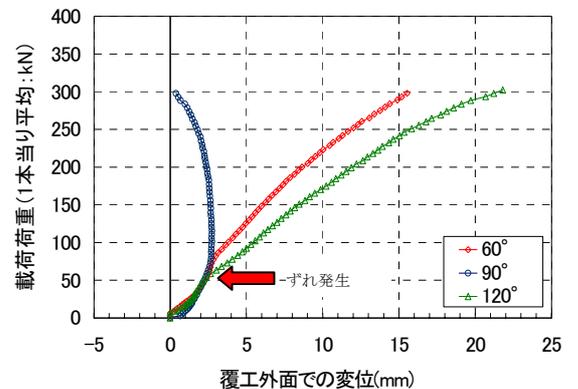


図-5 試験 II の荷重－変位関係

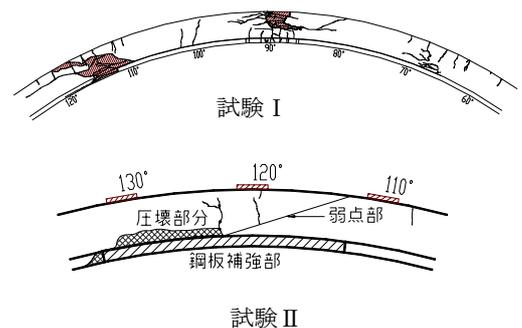


図-6 ひび割れ状況（終局時）