

2

道路トンネルを対象としたトンネル覆工補強工法の開発

酒谷 弘行^{*1}・松岡 茂^{*2}・柳 博文^{*3}

概 要

道路トンネルを対象とした新しい補強工法を(独)土木研究所および(株)クラレとの共同で開発した。この工法は、短纖維補強モルタルとPVA(ポリビニルアルコール)の連続繊維メッシュを併用することにより、高韌性化と補強工の薄肉化を目的としたものである。本報告では、実大サイズの載荷試験により本工法の補強効果を確認するとともに、フレーム解析を用いた計算結果との比較により、設計手法の妥当性を確認した。さらに、模擬トンネルを用いた充填試験により、施工性の確認を行った。

キーワード：連続繊維メッシュ、短纖維補強モルタル、内巻き補強

Development of a lining reinforcing technique for road tunnels

Hiroyuki SAKAYA^{*1} Shigeru MATSUOKA^{*2} Hirofumi YANAGI^{*3}

Abstract

We have developed a new reinforcing technique for road tunnels, jointly with the Civil Engineering Research Institute (an independent government agency) and Kuraray Co., Ltd. This technique uses mortar reinforced with short fibers and continuous textile mesh made of PVA fiber, aimed at creating a tougher and thinner reinforcement. This paper confirms the reinforcing effect of the technique by means of a loading test with a full-scale model, and compares the experimental results with the results of frame analysis to validate the design technique. In addition, work efficiency was verified by filling tests with a simulation tunnel.

Keywords: continuous textile mesh, short-fiber-reinforced mortar, inner lining reinforcement

^{*1} Material / Structure Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

^{*2} Deputy General Manager, Technology Center, Engineering Division

^{*3} Geotechnical Engineering Group, Engineering Technology Center, Engineering Division

道路トンネルを対象としたトンネル覆工補強工法の開発

酒谷 弘行^{*1}・松岡 茂^{*1}・柳 博文^{*2}

1. 目的

トンネル覆工コンクリートについては、過大な土圧の作用、材料の経年劣化等を原因としたひび割れの発生およびその進展により、剥落、もしくは大きな変状が発生し、補強工事が必要とされる事例が多くなってきている。

補強工法としては、内巻き補強が採用されることが多いが、変状が発生したトンネルでは内空断面に余裕がないために、内巻き厚を確保することが難しく、補強対策が困難になってしまふことが考えられる。

このような覆工の補強工法として、当社では REDEEM 工法^{1),2)}を開発しており、実際に施工を行っている。REDEEM 工法は高強度モルタルと繊維マットを組合せた構造で、圧縮強度と韌性に優れており、内巻き厚を極力薄くすることができる。しかし、モルタルを現場で製造し、マットに注入する施工方法をとっているため、1 日の施工量をそれほど多くすることはできないという問題点がある。

鉄道トンネルのように、作業時間や作業スペース的に制約が多く、アジテータ等の使用が不可能な場合等は、REDEEM 工法が適しているといえるが、道路トンネル等のように、片側車線規制が可能で、スペース、時間的制約が少ない場合は、アジテータ等を使用することができるので、コスト的、工期的に課題が残る。

そこで、道路トンネルの補強を対象とした新しい内巻き補強工法を(独)土木研究所および(株)クラレと共同で開発を行った。この工法の特徴は、引張補強材として PVA の連続繊維メッシュを使用していること、使用するモルタルは

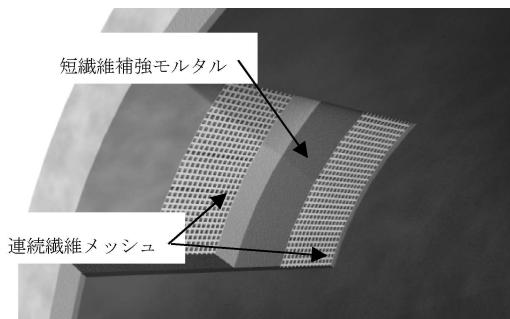


図-1 補強イメージ

一般的の生コン工場で製造されたモルタルを使用し、さらにアジテータに短纖維を投入して短纖維補強モルタルを製造し、コストの縮減や工期の短縮が可能となることである。この補強工法の効果を確認するために、実物大の供試体を作成し、載荷試験を行った。また、補強効果を算定するための設計手法として、汎用性のあるフレーム解析を利用した方法を用いて、試験結果の検証を行い、その妥当性を検証した。さらに、模擬トンネルにおいて、モルタル注入実験を実施し、その施工性を確認した。

2. 使用材料および配合

PVA(ポリビニールアルコール)繊維は、直径 $100 \mu\text{m}$ 、長さ 12mm の短纖維で、体積混入率は 2%とした。引張補強材として用いた連続繊維は、短纖維と同様に PVA 繊維であり、メッシ

表-1 短纖維と繊維メッシュの材料特性

短纖維	纖維長さ	12mm
	纖維直径	$100 \mu\text{m}$
	弾性係数	25.0kN/mm^2
	引張強度	1.10kN/mm^2
連続繊維 メッシュ	シート厚	1.5mm
	弾性係数	3.52kN/mm^2
	引張強度	88.0kN/mm^2

*1 エンジニアリング本部 技術センター 材料・構造グループ

*2 エンジニアリング本部 技術センター 副所長

*3 エンジニアリング本部 技術センター 地盤グループ

ユ状となっている。連続繊維メッシュと短繊維の材料特性を表-1に、またモルタルの配合を表-2に示す。

3. 試験方法

本試験は、前述した材料を内巻き補強に使用した直径9.7mのトンネル覆工を模擬した実物大の試験体を製作し、補強工の補強効果を確認するものであり、2ケースについて実施した。Case1では、図-2に示すように、覆工厚300mmの既設コンクリート部分(無筋)を製作した。この試験体に、一定の軸力を載荷後、天端部(80°～100°)のみ荷重を増加させ、損傷を与えた³⁾。その後、連続繊維メッシュを併用した短繊維補強モルタルを内巻き補強として75mm打設し、再度同様の方法で載荷を行い、内巻き補強の補強効果を確認した。なお、母材と補強モルタルの付着は、この工法では考慮しないため、内巻き補強工実施時、母材の下地処理は行わないこととした。Case2については、図-3に示すように、既設コンクリートの肩部部分に、せん断方向にひび割れが発生していることを想定して、仕切り板を設置した。既設覆工部分を打設後、Case1と同じ内巻き補強の施工を行った後、10°～170°で均等に等荷重を載荷した(図-3)。

4. 試験結果

試験時の圧縮強度は表-3に示すとおりである。図-4にCase1の損傷載荷試験結果と内巻き補強後の載荷試験結果を示す。損傷載荷では総荷重でおよそ1895kNまで上昇し、荷重が低下し始めたところで終了した。内巻き補強後の再載荷では、総荷重でおよそ2225kNまで上昇し、天端付近のひび割れがトンネル円周方向に進展し、荷重が低下した。その後、あまり荷重は増加せず、最終的には天端付近の既設コンクリート(無筋)が圧縮破壊を起こし、荷重が低下して終了した。内巻き補強後の最大荷重は、損傷載荷の最大荷重を上回ったことから、既設コ

表-2 モルタルの配合

水セメント比 W/C (%)	水 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	高性能 AE減水剤 SP (C×%)	AE AE (C×%)	PVA繊維 VF (vol%)
40.0	340.0	850.0	808.0	1.7	0.074	2.0

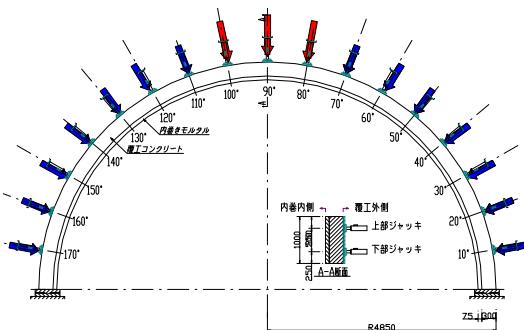


図-2 Case1 試験概要

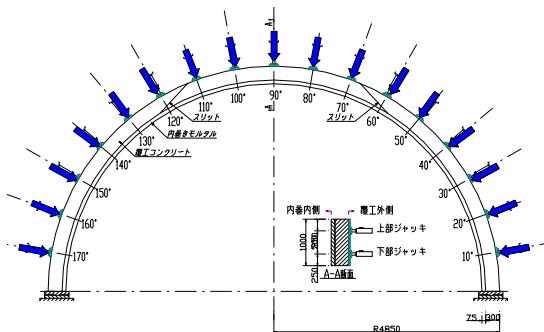


図-3 Case2 試験概要

表-3 試験時圧縮強度

圧縮強度 (試験時)	既設コンクリート (N/mm ²)	繊維補強モルタル (N/mm ²)
Case1	19	51
Case2	19	45

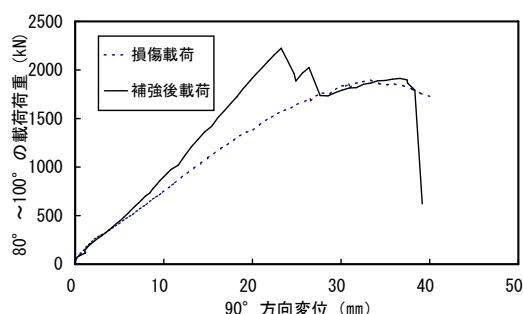


図-4 Case1 の試験結果

ンクリート(無筋)300mmの耐荷力に対して、繊維補強モルタルの内巻き補強による補強効果が確認できた。Case2の載荷試験結果を図-5に示す。ひび割れは既設コンクリートの天端部から肩部に発生したが、最終的にはスリットの入った肩部で破壊し、荷重が急激に低下した。覆工に作用する換算耐荷力(総荷重/覆工背面

側面積)は最大で 453kN/mm^2 であった。図-6に、Case2と同様の方法で行われた、125mm(無筋コンクリート)内巻き補強の載荷試験結果との比較を示す。最大耐力を比較すると、内巻き厚75mm(短纖維補強モルタル)でも、125mm(無筋コンクリート)と同等以上の耐荷力を示しており、補強効果を確認することができた。

5. フレーム解析による計算方法

ひび割れの発生・進展を考慮したフレーム解析については、鉄道総研から設計マニュアル⁴⁾が提案されており、ここではそれと同様の手法により、耐荷力を算定した。フレーム解析で補強効果を正確に算定するには、補強部材の断面耐力および断面耐力以降の変形挙動を、その補強部材の性能に合わせて設定することが必要である。本研究では、高強度で変形性能に優れた纖維補強モルタルを利用して、内巻き補強を行った場合の耐荷力の算定を目的としていることから、纖維補強モルタルの強度特性を考慮した断面耐力および部材の変形性能を把握し、解析に反映できるようにしなくてはならない。

纖維補強モルタルの圧縮破壊特性については、圧縮試験結果からピーク強度以降の変形挙動を図-7のように仮定した。圧縮強度に達するまでは、「コンクリート標準示方書」(土木学会)と同様の2次曲線としているが、圧縮強度以降は、ひずみの増加に伴い、応力は図-7のように漸減し、最終的には 15000μ に達すると応力の伝達がなくなるものとした。普通コンクリートについては、「コンクリート標準示方書」(土木学会)に準拠して、圧縮強度に達した後は、圧縮限界ひずみ(3500μ)まで圧縮強度が保持されるものとした。纖維補強モルタルの引張特性については、直接引張試験および曲げ試験結果から、図-8に示す引張応力-ひずみ曲線を使用した。

以上の条件から、部材の断面力を計算した結果を図-9に示す。本試験では、短纖維補強モルタルと連続纖維メッシュを組み合わせて、内巻き補強を行ったことから、短纖維補強モルタル

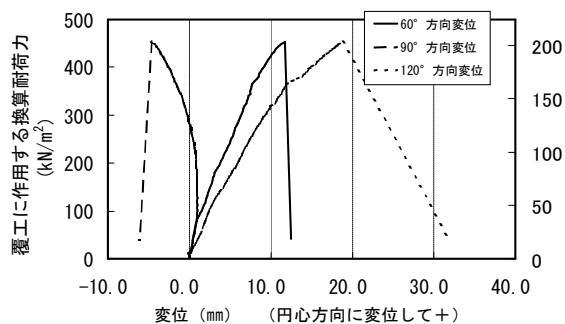


図-5 Case2 の試験結果

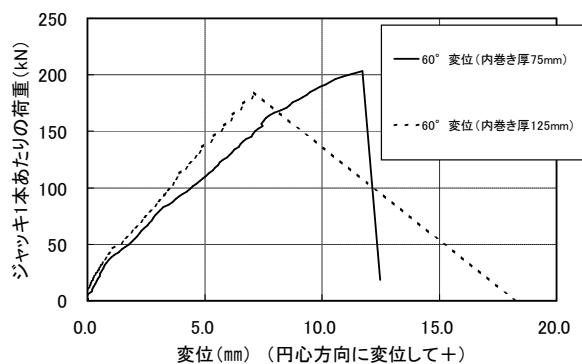


図-6 125mm内巻き厚(無筋)との比較

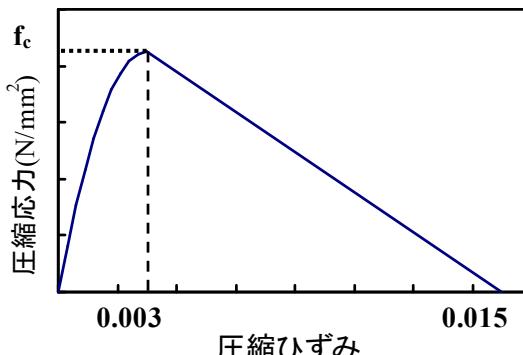


図-7 圧縮応力-ひずみ曲線

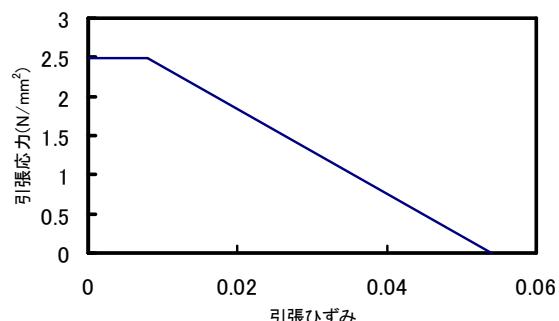


図-8 引張応力-ひずみ曲線

ルのみと、連続繊維メッシュを組み合わせた場合とで断面耐力の比較をした。軸力が低い領域で、曲げ耐力が増加し、連続繊維メッシュの効果がでていることがわかる。なお、断面力の算定方法の妥当性については、曲げ試験⁵⁾により確認している。

6. 実物大試験結果と計算結果の比較

内巻き補強後の耐荷力計算の妥当性を確認するために、前述した繊維補強モルタルの強度特性を考慮して算出した断面耐力および変形性能を用いてフレーム解析した計算結果と実物大の載荷試験結果と比較を行った。フレーム解析では、既設覆工に相当する部材と内巻き補強部分で構成された二重梁として部材をモデル化した。図-10にCase1、図-11にCase2の試験結果と計算結果を示す。Case1の計算では、荷重が試験結果ほど上昇しなかったが、終局時は覆工部分で破壊して計算が終了しており、試験結果と同様の傾向を示した。Case2では、計算結果は試験結果に比べ変位は小さかったものの、終局時の耐力については、ほぼ同等の値となっている。

7. 施工試験

実施工への適用を考え、実際の状況に近い状態で施工試験を行い、施工性を確認した。試験は技術センター内の模擬トンネルを使用し、内空高さ3m程度の断面を、3回に分けて打設した。このときのスランプフローは600mmであった。注入状況図を図-12に、注入状況を写真-1に示す。モルタルの注入は土木研究所の立会のもとで行い、施工性に問題がないことを確認した。さらに、注入後、上部のコア抜きをして、モルタルが充填できていることを確認した(写真-2)。

8. まとめ

短繊維と連続繊維メッシュを併用した高韌性モルタルを75mm内巻き補強し、載荷試験を行

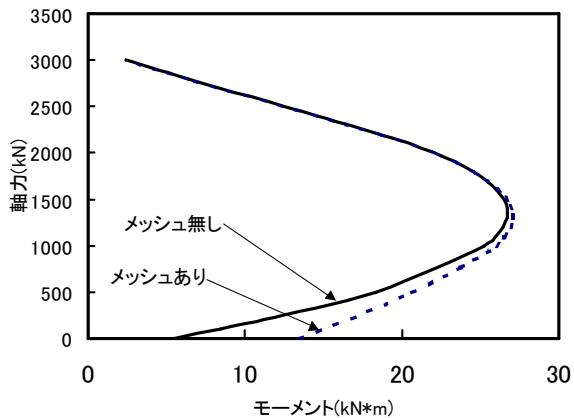


図-9 M-N線図

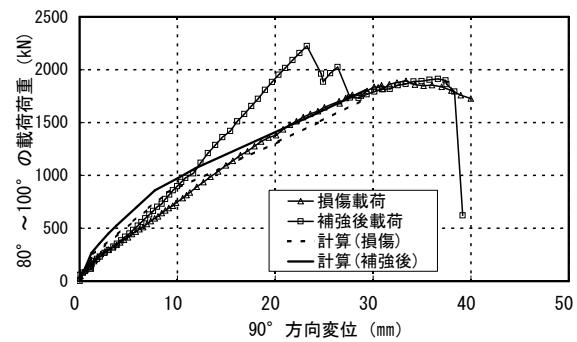


図-10 荷重変位曲線(Case1)

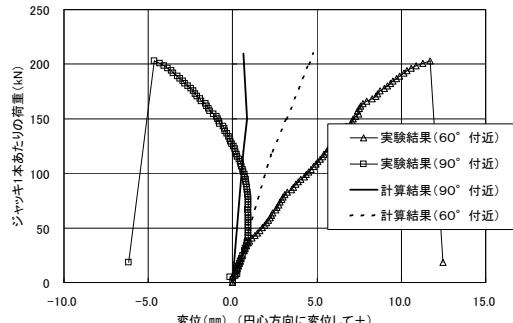


図-11 荷重変位曲線(Case2)

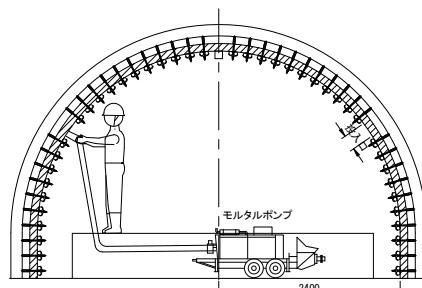


図-12 施工試験状況図



写真-1 注入状況

った結果、以下のことが確認できた。Case1では、既設コンクリート(無筋)300mmを損傷させた後、内巻き補強を行い、再度載荷した結果、補強体の耐力が補強前の耐力を上回っていることから、補強効果を確認できた。また、Case2では、125mm(無筋)の内巻き補強と同等以上の補強効果を有することが確認できた。

以上のことから、高韌性モルタルを使用することで、内空断面に余裕のないトンネル覆工の内巻き補強厚を薄肉化することは可能であると考えられる。

補強法の設計に関しては、簡易的なフレーム解析の手法を用いて、内巻き補強したトンネルの耐荷力の算定を行ったが、実物大の載荷試験結果をほぼ再現できることが確認できた。したがって、このフレーム解析を使った手法により、繊維補強モルタルによって内巻き補強をしたトンネル覆工の耐荷力を算定できると考えられる。

施工性については、実施工に近い状態で施工試験を行い、スランプフロー600mm程度で注入したが、施工性に問題がないことを確認した。実際の施工では、短纖維補強モルタルは一般の生コン工場で製造されたモルタルを使用し、データに短纖維を投入して製造することができる。また、プロテクターなどの防護を必要と



写真-2 充填状況確認

せず、片側車線規制で施工することが可能で、施工スペースも省力化できる。これにより、工期の短縮やコストの縮減が可能となると考えられる。さらに、安全面においても、短纖維および連続纖維メッシュの混入により、補強層が破壊しても、覆工コンクリートや内巻き補強モルタルが剥落することではなく、普通コンクリートの内巻きに比べて安全性は高いと考えられる。

参考文献

- 1)土井至朗・松岡茂・齋藤雅春・松尾庄二・永岡高：ビニロン纖維マットを用いた補修・補強工法、コンクリート工学年次論文集、VOL.24, No.2, 2002
- 2)松岡茂・齋藤雅春・鈴木唯夫・西脇敬一：既設トンネル覆工の新しい補強工法、コンクリート工学、VOL.41, No.4, 2003. 4
- 3)箱石康彦・真下英人・石村利明・森本智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、トンネル工学研究論文・報告集第13巻、pp349-354, 2003.11
- 4)鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル、平成10年2月
- 5)柳博文・川又篤・西脇敬一・松岡茂：短纖維と纖維シートを併用した高じん性モルタルの曲げ試験、第59回土木学会年次学術講演会概要集、平成16年9月