# 論文 高じん性モルタルを内巻き補強したトンネル覆エコンクリートの耐 荷力とその評価方法

酒谷 弘行\*1·真下 英人\*2·堀越 哲郎\*3柳 博文\*4

要旨:トンネル覆エコンクリートの内巻き厚を極力薄くするために,圧縮強度とじん性に優 れた短繊維補強モルタルと引張補強材である連続繊維メッシュを併用した新しい内巻き補 強工法を開発し,実物大の載荷試験によりその補強効果を確認した。さらに,汎用性のある フレーム解析を使った手法により,その耐荷力を適切に算定できることを確認した。 キーワード:短繊維補強モルタル,連続繊維メッシュ,内巻き補強

1. はじめに

近年,トンネル覆エコンクリートに関しては, 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及びその進展により,剥落, もしくは大きな変状が発生する事例が数多く報 告されている。それに伴い、トンネル覆エコン クリートに対する補修・補強工事が必要とされ る事も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,補修・補強が必要とされるトン ネルは変状が発生している場合が多い。その場 合,トンネル内空断面に十分な余裕が無いため に,必要とされる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うことが考 えられる。

このような覆エコンクリートの補強方法とし て、高じん性モルタルを内巻き補強として使用 する方法<sup>1),2)</sup>があり、鉄道トンネルなどでの施工 例がある。このような圧縮強度とじん性に優れ たモルタルを内巻き補強として使用することに より、内巻き厚を普通コンクリート等と比べて 薄くすることが可能となる。施工方法としては、 モルタルを現場で製造し、型枠に直接注入する 方法をとっているため,鉄道トンネルのような 作業時間や作業スペースに制約が多く,アジテ ータ等の使用が不可能な場所では適していると いえる。しかしながら,道路トンネルのように, 作業スペースや時間的制約があまりない場所で は,施工方法を変更することにより,施工効率 をさらに上げて、コスト縮減および工期短縮を 図れる可能性があると考えられる。

そこで、道路トンネル等を対象とした新しい 内巻き補強工法の開発を行った。この工法の特 徴は、図―1に示すように、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一般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 繊維を投入して短繊維補強モルタルを製造し、 使用することにより、コストの縮減や工期の短 縮、片側車線規制による施工を可能としたこと である。ここでは、この内巻き補強の効果を確 認するために実施した実物大の載荷試験結果と その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 いた計算方法により、試験結果の検証を行い、 その妥当性を検討した。

\*1 鉄建建設(株) 技術センター 材料・構造グループ (正会員)
\*2 (独) 土木研究所 基礎道路技術研究グループ
\*3 (株) クラレ 研究開発本部構造物性研究所 (正会員)
\*4 鉄建建設(株) 技術センター 地盤グループ (正会員)

#### 2. 使用材料及び配合

短繊維と連続繊維メッシュの強度特性を表-1に、モルタルの配合を表-2に示す。短繊維 には、直径100µm、長さ12mmのPVA(ポリ ビニールアルコール)繊維を使用しており、体 積混入率は2%となっている。引張補強材として 用いた連続繊維メッシュは、短繊維と同様にP VA繊維であり、メッシュ状になっている。

# 3. 試験方法および試験結果

本試験は前述した材料を使用して,実物大の 試験供試体を製作し,既設のトンネル覆エコン クリートに対する補強効果の確認を行うもので ある。載荷形式については,緩み荷重等の土圧 が覆工天端に作用することを想定した荷重形式 (載荷形式1)と,膨張性地圧等のように覆工 全周に等方的な等圧が作用することを想定した 荷重形式(載荷形式2)の2通りの形式を設定 した。

## 3.1載荷形式1

試験概要図を図-2に示す。覆工厚 300mmの 既設コンクリート部分(無筋)をまず製作し, 一定の軸力を載荷後,天端部(80~100°)のみ 荷重を増加させ,ある程度の損傷を与えた<sup>3)</sup>(損 傷載荷)。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内巻き補強として 75mm打 設し,再度同様の方法で載荷試験(補強後載荷) を行い,内巻き補強の補強効果を確認した。な お,母材と内巻き補強との付着は,この工法で は考慮しないため,内巻き補強施工時,母材の 下地処理は行わないこととした。

## 3.2載荷形式2

形状に関しては先に示した載荷形式1と同様 であるが、図-3に示すように、既設コンクリ ートの肩部分に、せん断方向にひび割れが発生 していることを想定して、仕切り板を設置して いる。仕切り板はステンレス板の2枚重ねで、 間にはテフロンシートを挟んでいる。既設コン クリート部分を製作後、載荷形式1と同様の内 巻き補強を施工し、10~170°の範囲で均等な荷



図-1 補強イメージ



短繊維	繊維長さ	12mm
	繊維直径	100 <i>µ</i> m
	弾性係数	25.0kN/mm <sup>2</sup>
	引張強度	1.10kN/mm <sup>2</sup>
連続繊維 メッシュ	シート厚	1.5mm
	弾性係数	3.52kN/mm <sup>2</sup>
	引張強度	88.0kN/mm

表-2 モルタルの配合

水	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
セメント	水	セメント	細骨材	高性能	短繊維
比				AE	
W/C				減水剤	
(%)	W	С	S	SP	VF
40	320	800	1005	4.00	26.0

表-3 試験時圧縮強度

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

重を載荷し、試験を行った。

#### 3.3 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に載荷形式1の損傷載荷試験結果と, 補強後載荷試験結果を示す。損傷載荷では,天 端付近および肩部付近にひび割れが発生し,総 荷重で最大およそ1895kNまで上昇後,徐々に荷 重が低下し始めたところで,損傷載荷試験を終 了している。

内巻き補強後の載荷試験では,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,最終的には既設 覆エコンクリートの天端付近で圧縮破壊を起こ し,荷重が低下して終了した。



図-2 試験概要図

載荷形式2の試験結果を図-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。補強後の覆工 の耐荷力は(総荷重/覆工背面面積)は最大で 453kN/m<sup>2</sup> (ジャッキ1本当り 203kN) であった。 変位に関しては、中央部の変位よりもスリット 部分変位が大きくなっている。また、中央部の 変位は、途中でマイナス側(背面側)に転じて いる。

図-6に、載荷形式2と同様の方法でおこな われた 125mm (無筋コンクリート) 内巻き補強 後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(短繊維補強モルタ 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いることから、短繊維補 強モルタルと連続繊維メッシュを併用すること で,通常の無筋コンクリートに比べて内巻き厚 の薄肉化が可能であると考えられる。

## 4. 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<sup>4)</sup>と して提案されており、図-7示すような手順で 耐荷力を算定している。その算定手法では、フ



図-3

スリット設置位置 2500 (kN) 損傷載荷 ≥ 2000 単単単目500 1000 補強後載荷 °1000 € 2500 80° 0 0 10 20 30 40 50 90°方向変位(mm) 載荷形式1試験結果 図-4 500 ·60° 方 1 1 0 0 CIC作用する換算耐荷力 (KN/m<sup>2</sup>) 00 00 00 00 80 8 ₩ 200 ·90° 方向变位 Ż ··120°方向 应应 ジャッキ1本当たりの荷重 150 100 50 100 蠲 ゴ 0 0 -10.0 0.0 10.0 20.0 30.0 40.0 変位 (mm) (円心方向 変位して+) 図-5 載荷形式 2 試験結果

レーム解析により断面力の計算を行い,随時断 面力によってひび割れの発生を判断し,ひび割 れの発生ごとに構造モデルを変更して新たに計 算を行っている。ここで,ひび割れは塑性ヒン ジによりモデル化し,ひび割れが生じる時の断 面力,変位とひび割れをピン結合に変更して計 算したモデルの増分の断面力,変位とを重ね合 わせることにより表現する。このように繰り返 し計算を行い,部材の回転角が限界回転角に達 した時点(圧縮損傷発生)を最終状態としてい る。

計算はコンクリート部材の変形挙動が,最大 荷重(断面耐力)に達すると急激に変形が増加 することに着目し,部材の断面力が断面耐力に 達した時点をひび割れの判定基準としている。 つまり,断面耐力に達する以前は,ひび割れが 発生しても,そのひび割れ幅は微細であること から,そのひび割れは無視する。断面耐力に達 した後は,ひび割れ幅が急増するものとし,断 面耐力をひび割れ発生の判定としている。

以上のように、コンクリート部材は断面耐力 に達した時点をひび割れ発生と判定するが、ト ンネル覆工では軸力の度合いによって曲げ耐力 が異なるため、M-N(曲げモーメントと軸力) 線図を作成して、ひび割れ発生の判定を行う。 断面耐力に達した部材については、計算におい てはヒンジとして取り扱う。ヒンジの回転角が、 限界回転角に達した時点部材が破壊したと判定 するが、その判定には $M-\phi$ (曲げモーメント と回転角)線図を使用する。なお、M-Nおよ び $M-\phi$ 線図は、短繊維補強モルタルの強度特 性を考慮して、軸力をパラメータとした断面力 の釣合い計算を行うことにより算出する。

## 5. 短繊維補強モルタルの強度特性

# 5.1 圧縮側強度特性

短繊維をコンクリートに混入すると,引張破 壊特性のみでなく圧縮強度以降の圧縮じん性が 大幅に改善されることが知られている。「鋼繊維 補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針(案)」



#### 図—7 計算手順

では、鋼繊維を混入することで圧縮強度以降の じん性が改善されることを考慮して、圧縮限界 ひずみを10000µに定めている。本工法で用いる 短繊維補強モルタルに関しても、鋼繊維と同様に 圧縮強度以降のじん性が大幅に改善されている 事が確認されている<sup>5)</sup>。そこで、圧縮試験で得 られた応力—ひずみ関係から、本工法で使用す る短繊維補強モルタルの圧縮応力—ひずみ曲線 を図—8のように仮定する。圧縮強度に達する までは、普通コンクリートの場合と同じように 2次曲線で近似し、到達後は緩やかに応力が低下 するものとして、最終的には、15000µに達すると 応力の伝達が無くなるものとした。

## 5.2 引張側強度特性

図-9に直接引張試験の実験結果から仮定し た引張軟化曲線を示す。短繊維補強モルタルの 引張側強度特性については、ひび割れ幅と引張 応力との関係である引張軟化曲線で表されるこ とが多いが、曲げ試験から等曲げモーメント区 間に複数のひび割れが発生することが確認され ている。高靭性繊維補強セメント材料に関する 最近の研究報告<sup>6</sup>によると、曲げひび割れが部材 に複数発生する場合、変形性能を算定する方法 として引張軟化曲線でなく引張応力-ひずみ曲 線を用いる方法が提案されている。この引張応 カーひずみ曲線は、短繊維補強モルタル部材の 曲げ変形性能を算定する場合に適用する。図-10に、今回の試験結果から仮定した引張応力 --ひずみ曲線を示す。

連続繊維メッシュの効果については、短繊維 補強モルタルのみと連続繊維メッシュと組み合 わせた場合の断面耐力を算定すると、連続繊維 メッシュを組み合わせることで、軸力が低い領 域での曲げ耐力が増加していること、また、断 面耐力後の変形特性についても、短繊維補強コ ンクリートの圧縮限界ひずみが 15000 µ と大き いため、短繊維補強モルタルの回転角は圧縮限 界ひずみを 3500 µ とした普通コンクリートの場 合より大きくなっていることを確認している<sup>7)</sup>。

### 6. 実物大試験結果と計算結果の比較

前述した短繊維補強モルタルの強度特性を考 慮してフレーム解析を行った計算結果と,実物 大の載荷試験結果との比較を行った。図—11 に載荷形式1補強後載荷のモデルを示す。既設 覆工と内巻き補強に相当する部材で構成された 二重梁としてモデル化している。なお,損傷載 荷後の既設覆エコンクリート全体の引張強度は 0として計算を行っている。

図-12に載荷形式1,図-13に載荷形式 2の試験結果と計算結果の比較を示す。計算結 果では、荷重が試験結果ほど上昇はしなかった が、これは既設覆工の引張強度を0にしている



ことと内巻き補強との付着を無視しているため と考えられる。計算では終局時に既設覆エコン クリート中央部で破壊して終了しており,試験 結果と同様の傾向を示した。載荷形式2では, 終局時の耐力はほぼ同等の値なっているが,試 験結果に比べ変位は小さい結果となった。これ は,フレーム計算ではコンクリートの初期の弾 性係数しか考慮できず,圧縮強度付近及び圧縮 強度以降の軟化が計算に反映されていないため と考えられる。

## 7. まとめ

短繊維と連続繊維メッシュを併用した高じん 性モルタル 75mm を内巻き補強し,実物大載荷 試験を行った結果,以下のことが確認できた。

- (1)載荷形式1の試験より,内巻き補強後の耐力 は,損傷前の既設覆エコンクリートの耐力を 上回っており,この工法による補強効果を確 認することができた。
- (2)載荷形式2では、同様の形式で行われた無筋の125mm内巻き補強と比較し、内巻き厚75mmで同等以上の補強効果を有することが確認できた。
- (3)短繊維補強モルタルの断面耐力や変形挙動を 算出し、ひび割れ進展を考慮した汎用性のあ るフレーム解析の手法を用いることで、試験 結果の傾向を概ね再現することができた。

## 参考文献

- 土井至朗,松岡茂,齋藤雅春,松尾庄二,永 岡高:ビニロン繊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, pp.175-180, 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,pp.349-354,





図-13 試験結果と計算結果(載荷形式2)

2003.11

- (財)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, 1998.2
- 5) 土井至朗,松岡茂,松尾庄二:ビニロン繊維 マットを用いた高じん性補強材料の開発,土 木学会年次学術講演会講演概要集第5部, pp.609-610,2002
- (A) 閉田徹志, li, Victor C, 浜田敏裕:ビニロン 繊維を用いた高靭性FRCの材料設計と開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, 1998
- 7) 酒谷弘行,真下英人,松岡茂,保城秀樹:高 じん性モルタルを使用したトンネル内巻き 補強の耐荷力の評価方法,第60回土木学会 年次学術講演会概要集,第Ⅲ部門,pp.452-453, 平成17年9月