

# 塑性圧による変状を生じたトンネルにおける 防錆鋼繊維補強覆工コンクリートの適用 — 東北中央自動車道 大笹生トンネル —

Application of Anti-Corrosive Steel-Fiber-Reinforced Lining Concrete in a Tunnel  
Subjected to Deformation Under Plastic Ground Pressure  
(OOZASOU Tunnel on the Tohoku-chuo Expressway)

寺島佳宏 <sup>※1</sup> Yoshihiro Terashima	岡田朋道 <sup>※1</sup> Tomomichi Okada	小関均 <sup>※1</sup> Hitoshi Koseki	小川勲 <sup>※1</sup> Isao Ogawa
川端康夫 <sup>※2</sup> Yasuo Kawabata	平間昭信 <sup>※2</sup> Akinobu Hirama	熊谷幸樹 <sup>※3</sup> Koki Kumagai	松元和伸 <sup>※4</sup> Kazunobu Matsumoto

## 【要旨】

大笹生トンネルではトンネル掘削時に、塑性圧を原因とした変状が発生し、覆工打設箇所にも後荷と思われるひび割れが複数スパンで発生した。そこで、掘削時の変位状況、覆工の損傷状況を踏まえた上で、これら損傷の発生原因の推定、対策工の選定を行い、押し出し性地山における覆工補強で施工事例が多い、鋼繊維補強コンクリートを採用することとした。

覆工コンクリートにおいて、鋼繊維は高いじん性を付与することができることから、有効な補強材料として使用されてきた。しかしながら、鋼繊維は錆の発生リスクがあり、コンクリート表面に点または線状に赤褐色の浮錆が生じて美観が損なわれる欠点を有している。このことから、高いじん性を必要としない、覆工コンクリートの剥離剥落対策としては、現在、非鋼繊維の適用が主流となっている。このような鋼繊維の欠点を補うため、海外では鋼繊維に亜鉛メッキ処理を行い、防錆効果を付与した鋼繊維が使われているが、我が国では使用された実績や報告されたデータが少ない。本稿では、室内試験における促進発錆試験による防錆効果の結果および現場適用の結果について報告するものである。

【キーワード】 山岳トンネル 覆工コンクリート 鋼繊維補強コンクリート 亜鉛メッキ 促進発錆試験

## 1. はじめに

東北中央自動車道大笹生トンネル工事は、東北中央自動車道（福島JCT～米沢IC間）の内、福島県福島市郊外に位置する全長 2,089m の山岳トンネルである。トンネルの施工位置図を図-1に示す。

大笹生トンネルではトンネル掘削時に大きく2つの区間、STA.25+8～STA.26+34.1の126.1m区間（以後、変状区間Aと記す）と、STA.34+63.5～STA.37+53.5の290m区間（以後、変状区間Bと記す）において塑性圧を起因とする地山や支保の変状が発生し、覆工打設箇所でも後荷によるひび割れが施工中に複数箇所が発生した。そこで、掘削時の変位状況、覆工の損傷状況を踏まえた上で、これら損傷の発生原因の推定、対策工の選定を行った。

本報告では、対策工として採用した亜鉛メッキ処理した鋼繊維補強覆工コンクリートについて、適用までの検討、および現場適用の結果について報告する。覆工コンクリートにおいて、鋼繊維は高いじん性を付与すること

ができることから、有効な補強材料として使用されてきた。しかしながら、鋼繊維は錆の発生リスクがあり、コンクリート表面に点または線状に赤褐色の浮錆が生じて美観が損なわれる欠点を有している。この欠点を補うため、海外では鋼繊維に

亜鉛メッキ処理を行い、防錆効果を付与した鋼繊維が使われているが、我が国では使用された実績や報告されたデータが少ない。そこで、大笹生トンネル工事でこの適用に先駆けて、室内試験における促進発錆試験による防錆効果の検討を実施したものである。



図-1 大笹生トンネル位置図

## 2. 工事概要

### 2.1 工事概要

工事概要を表-1に示す。

表-1 工事概要

工事名	東北中央自動車道大笹生トンネル
工事場所	福島県福島市大笹生地内
発注者	国土交通省 東北地方整備局
工期	平成19年3月20日～平成23年2月28日
施工者	飛鳥建設株式会社
トンネル延長	2,089m
掘削断面積	77m <sup>2</sup>
掘削工法	D I-b : 上半先進ベンチカット工法 D II : ミニベンチカット工法 C II-b : 補助ベンチ付全断面掘削工法
掘削方式	発破掘削
ずり出し方式	連続ベルトコンベア

### 2.2 地形・地質概要

大笹生トンネルは、通称「まないた山」と呼ばれる台山を貫くルートとなっている。この台山は標高462mを有し、350m前後の平坦地ないしは緩斜面を呈する台地形の山であり、西側の栗子峠より延びる山地東縁部に位置する。

地質は新第三紀中新世の凝灰岩類（天王寺層：湖沼堆積）およびそれらに貫入した流紋岩類からなり、ともに脆弱な地質となっていた。STA.34+63.5からは、天王寺層に属する凝灰質シルト岩が出現し、出口側（西側）坑口まで分布した。この凝灰質シルト岩も多くは変質などにより粘土化しており、とくに変状区間Bの軽石凝灰岩との境界・混在部では脆弱な地質となっていた。

なお、本工事では支保パターンのランクアップ（当初設計：C I→実施工：C II-b, D I-b, D II）が連続したため、掘削途中段階で弾性波探査の再解析（当初：はぎとり法、再解析：トモグラフィ的解析）を実施した。その

解析結果は、おおむね実施工で出現した地山に相当する弾性波速度が得られている。

トンネル縦断面図とトモグラフィ的解析によって得られた弾性波速度分布を図-2に示す。

## 3. トンネル掘削時、覆工に生じた変状と損傷

### 3.1 変状区間A 掘削時の変状と対策

変状区間A (STA.25+8～STA.26+34.1) におけるトンネル掘削時の変状と、その対策工について以下に示す。

C II-b パターンで掘削中であった STA.25+8 付近より、当初想定よりも脆弱な地山が連続し、切羽崩壊（写真-1）、150mm を超える内空変位、支保工の変状（写真-2）が発生したため、支保工のランクアップ（D I-b(1), D II(1)）、即効性のある鋼管拡張型ボルトによる増しボルトや鏡ボルトの実施、吹付けコンクリートによる仮インバート、およびD II 支保規模への縫返しなどの各種対策工を実施した。さらに早期に地山変位を収束させるため、掘削工法を上半先進ベンチカット工法からミニベンチカット工法に変えて、速やかにインバートを施工することでトンネル構造の安定化を図った。しかし、掘削の進行とともに、粘土化した流紋岩および軽石凝灰岩の未固結部が遮水層となり貯留されていた地下水が、亀裂の増加に伴い、硬軟不規則な切羽から噴き出し、湧水に伴って軟質部の土砂が流出したため、空洞充填および小口径鋼管先受け工などの各種補助工法の実施を余儀なくされた。

以上、変状区間Aにおける変状は、当該区間の一軸圧縮強度が $q_u=1.8\text{MPa}$ と極度に小さく、土かぶりが200mであったことに起因していると考えられる。すなわち、地山強度比（ $G_n=0.43<0.5$ ）の低下による塑性地圧が主因であると考えられた。

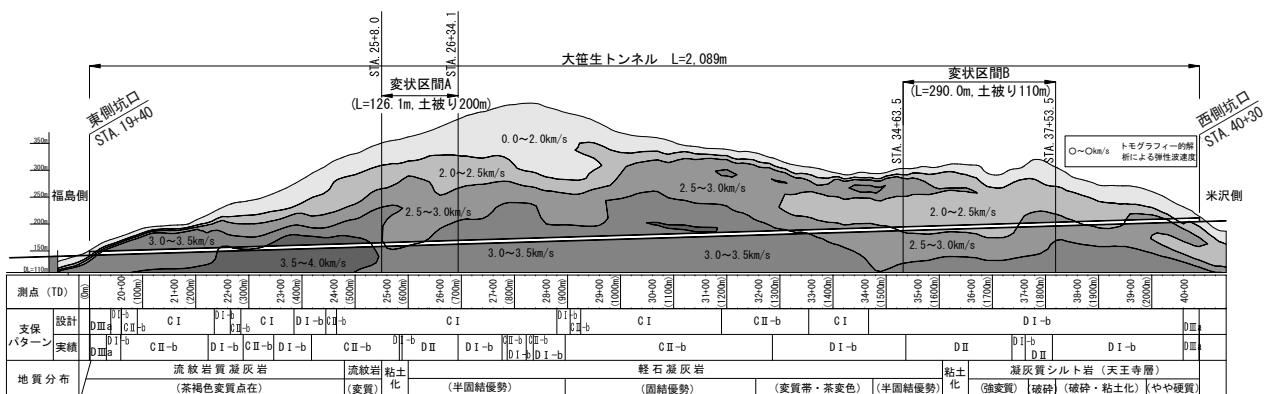


図-2 大笹生トンネルの地質縦断面図



写真-1 変状区間Aの切羽崩壊

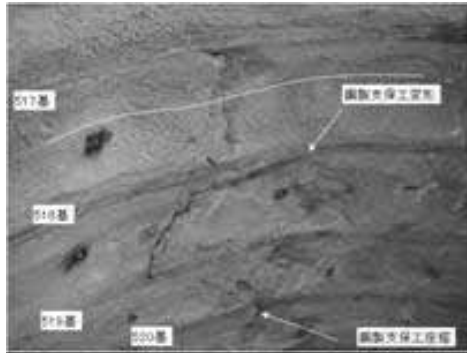


写真-2 変状区間Aの支保の変状状況

### 3.2 覆工コンクリートに生じた損傷、発生原因と対策

#### (1) 損傷の発生状況について

トンネル施工中に打設完了区間の覆工で発生した損傷ブロックの施工経緯と損傷形態を表-2に、損傷発生状況の例を写真-3に示す。施工済み覆工にひび割れの変状が発生したのは、変状区間Aおよびこれ以降のD I-b区間であり、写真-3に示す亀甲状ひび割れが発生したブロックは掘削時に小口径鋼管先受け工などの補助工法を実施し、湧水の増加に伴って横断排水を追加設置した区間であった。以下に、覆工の損傷状況および損傷箇所の特徴を示す。

- ①掘削から覆工打設までに要した期間は5~6ヶ月が経過しており、地山変位の収束規定（変位速度が1~3mm/月以下となったことを2週程度連続して確認できた場合）<sup>9)</sup>に準拠し、収束を確認した上で覆工を打設した。
- ②打設は3~5月に行われており、コンクリートの性状や坑内打設環境は比較的安定した時期であった。
- ③覆工打設後、1ヶ月間で損傷発生は確認されていない。
- ④損傷は、損傷が確認された11月までの8ヶ月間で徐々に進行した。

⑤D IIパターンの65ブロックの損傷が最も著しい。ただし、隣接するブロックでは損傷はない。

⑥67, 69および70ブロックの損傷形態は、材料や施工法、施工環境に起因する初期欠陥で見られる比較的軽度なひび割れである。これに対し、65ブロックおよび71ブロックは、亀甲状、放射状のひび割れとなっており、極めて特徴的なひび割れ形態を示している。

⑦全ブロックのひび割れ幅は、0.2~0.3mmと小さい。

なお、損傷を確認した時点では、覆工は変状区間Bの手前100mまでが完了（非常駐車帯を除く）しており、トンネルは未貫通であった。

表-2 覆工コンクリートで損傷ブロックと損傷形態

BL	パターン	掘削時期	打設日	最終変位(mm)		ひび割れの発生形態
				天端沈下	天端沈下	
65	D II	H20.09.17-24	H21.3.31	-61.1	-67.5	天端：放射状~亀甲状 複数閉合、幅0.3mm
67	D I-b	H20.10.20-24	H21.4.23	-17.6	-1.7	天端：周方向、単独 幅0.3mm、長さ2.0m
69	D I-b	H20.11.10-12	H21.5.12	-22.8	-3.2	天端：周方向、単独 幅0.2mm、長さ2.0m
70	D I-b	H20.11.12-14	H21.5.14	-28.2	-10.0	天端：周方向、端部閉 幅0.2mm、長さ2.0m
71	D I-b	H20.11.14-18	H21.5.16	-16.6	-16.6	天端：放射状 幅0.2mm

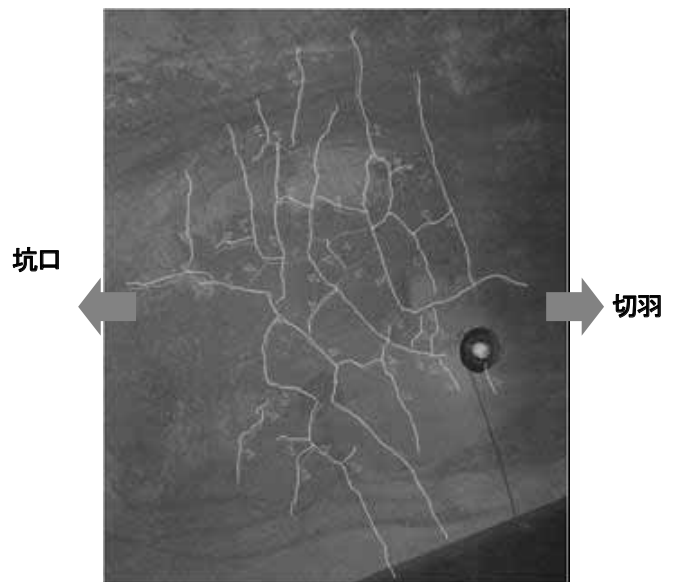


写真-3 変状区間Aの覆工変状状況 (BL-65)



## (2) 損傷発生原因について

一般に、覆工に発生する変状（損傷）の要因は、内的要因と外的要因に大別され、この両面から覆工に発生した損傷発生要因について推定を行った。

65ブロックおよび71ブロックで確認された亀甲状および放射状ひび割れは、温度収縮や乾燥収縮などに起因するトンネル軸方向や断面方向のひび割れとまったく形態が異なり、コンクリートの不良（アルカリ骨材反応、セメントの異常収縮）に起因するひび割れに近い形態であった。しかし、打設したコンクリートの品質に異常は確認されておらず、これら内的要因に起因する可能性は極めて低いものと想定された。

一方、外的要因について考察すると、今回の損傷は、トンネル貫通前の打設後、長期間を経過せずに発生していること、および損傷区間は掘削時に大変形が生じていたことから、塑性圧による外力に起因する可能性が高いと判断され、以下の3項目に着目した。

### 1) 鉛直方向の塑性圧の作用しやすいトンネル形状

覆工にはいずれの箇所でも、天端において局所的な面、または線荷重が作用したと思われるひび割れが発生した。この損傷が発生した箇所は、塑性圧によって一次支保工に変状が生じた区間であり、道路2車線の偏平な形状のトンネルでは、鉛直方向の塑性圧が作用しやすい掘削形状であることが要因として考えられた。図-3に示す変状区間Aの地中変位計においても、鉛直方向の地中変位が最大値を示したことから想定できる。

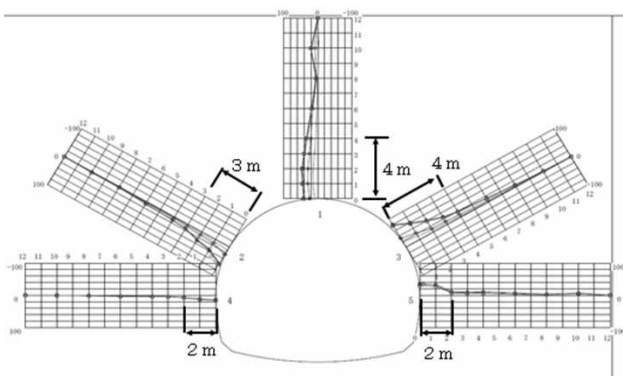


図-3 変状区間Aの地中変位測定結果

### 2) 地山強度が小さく、収束確認後に微小変形が発生

熱変質を受けた流紋岩や軽石凝灰岩の地山性状としては、地山強度が小さく、地山強度比が低下することで、掘削時の塑性変形は大きく、その変形が継続すると考えられる。

### 3) 地下水の浸潤により局所的に塑性化

覆工の損傷区間に分布する軽石凝灰岩は、浸水崩壊試験で「D」と評価され、地下水の影響により極端に強度劣化を起こす可能性を有している。ペネトロメーターによる地山強度試験でも、新鮮なものに比べ50%以下まで低下することが確認された。一方、今回の変状区間Aでは、掘削時に天端からの湧水が複数箇所確認されており、さらに一次支保施工後も広い範囲で湧水が確認された。この湧水の影響によって、地山の一部分が強度劣化し、さらに覆工に作用する鉛直圧が局所的に増大して表-2に示す損傷が発生したと考えられる。

また、覆工67~71ブロックでは、掘削段階でD I-aパターンとした比較的変位の小さい区間であったが、この区間で損傷が発生しているのは、湧水によって強度劣化を起こす軽石凝灰岩の特性に起因している。このことは、軟化した軽石凝灰岩では、とくに湧水の有無、分布に注意が必要であることを示唆している。

### (3) 長期残留荷重について

押し出し性地山における覆工構造の考え方は、トンネル標準示方書<sup>2)</sup>では、以下のように示されている。

①基本は変位収束後に施工する。

②変位の収束を待てない場合、または覆工に荷重を負擔させることが合理的な場合は、荷重に対抗できる覆工構造とする。

これらに準ずれば、本トンネルのように変位収束判断を行った上で覆工を打設し、その後、塑性圧による変状が生ずるような特殊な条件に対応することは難しい。押し出し性地山における長期残留荷重とひび割れの発生状況については、東北新幹線岩手トンネル(一戸工区)で検討されており、表-3に示す知見が得られている<sup>3)</sup>。

表-3 覆工の最終変位速度とひび割れ発生率

上半内空変位	ひび割れ発生率	考 察
最終変位速度が 0.001mm / 日 (0.03mm / 月) 未満	20%	殆ど収束したと判断しても、ひび割れが発生する可能性を示唆している。
最終 変位量	60mm 程度	最終変位量とひび割れ発生率の間には明確な相関性がある。
	80mm	
	100mm 超	

上記より、大径生トンネルでは、岩手トンネルと同様の凝灰岩を主体とした押し出し性地山で、覆工に損傷が

生じた区間は、掘削時に大きな変状が生じた区間でもあり、長期残留荷重が作用する可能性が高いと判断された。

#### 4. 覆工補強の検討

##### 4.1 覆工損傷発生リスクの検討

###### (1) 変状区間Aで打設済み区間の覆工損傷リスクの検討

「道路トンネル維持管理便覧」<sup>4)</sup>に準拠し、損傷を受けた5ブロックの健全度評価を行った。各ブロックの損傷評価を表-4に示す。対策工の検討では、損傷評価で補強を要する75ブロックを対象とした。

対策工の選定に際しては、本トンネルの構造、施工条件から、想定される外力に対する耐荷力、長期的にトンネル機能を維持する耐久性および建築限界の許容性が重要と考え、さらに施工性、美観、工程、経済性、実績などを考慮した。今回の微小変位による長期残留荷重の影響の場合は、覆工の耐荷力を向上させる方法が妥当な対策と考えられた。また、施工中のトンネルであり、耐荷力を有する覆工の打ち直し（全面改築工法）が最も有利であると判断した。

###### (2) 変状区間Bの覆工損傷リスクの検討

STA.34+10 (TD 1,470m) 以降は切羽が徐々に不安定化し、D I-b, D IIパターンで掘削した。また、STA.34+70 (TD 1,530m) 以降は軽石凝灰岩の半固結優勢区間から弱耐水性の粘土化した地山（浸水崩壊度D）が占めるようになり、切羽も一層不安定化して鏡面の崩落などの変状が多発し、補助工法を併用しながらの掘削となった。弱耐水性地質（粘土）の分布範囲の多くは、湧水発生位

置の分布範囲に収まり、地山の強度低下が高い確率で予想された。さらに、湧水発生以外の箇所でも周辺地下水浸透により今後の湧水発生の可能性は否定できず、掘削時の緩み範囲に地下水が徐々に浸透していく可能性が高いと考えられた。また、インバート閉合された施工後も微小変位（1～2mm）が4ヶ月ほど継続している箇所が散見された。

以上より、内空変位の最終変位量が60mmを超えた変状区間Bでは、微小変位が継続した箇所が発生しており、長期残留荷重の発生要因が揃っているものと考え、覆工を補強構造とすることとした。

##### 4.2 覆工構造の検討

大笹生トンネルは覆工施工後に地山の強度が低下し、それに起因して長期残留荷重が覆工に作用すると想定された。作用荷重として、FEM解析により地山強度が低下した場合の長期残留荷重を算出し、これがすべて覆工に作用するものとして設計した<sup>3)</sup>。また、押し出し性地山における覆工補強のほとんどの施工事例では、高い靱性を有する鋼繊維補強コンクリートが採用されている<sup>3)</sup>。これは、押し出し性地山における覆工の損傷が点、線、面で作用する塑性地圧で覆工内面に生ずる曲げ引張りに起因するためである。

鋼繊維はひび割れの発生を完全に抑制することはできないが、ひび割れ発生後の開口幅の抑制効果が期待でき、ひび割れの発生の遅延効果とともに、ひび割れ発生後のひび割れの進展を抑制する効果も期待できることから、補強構造を鋼繊維補強コンクリートとすることとした。

表-4 各ブロックの損傷評価

BL	損傷状態の評価	判定結果*1
65	亀甲状のひび割れが密集し、広い範囲で分布している。発生原因は、長期残留荷重の影響。ひび割れの発生量から、今後増加する可能性が高い。進展が進めば、押し抜きせん断の可能性もある。また、仮に進展が止まっても地震時などに脱落する可能性が高い。何らかの補強対策が必要である。	2A
67	周方向のひび割れのみ。ひびわれ幅も小さい。発生原因は、長期残留荷重の影響。周方向のひび割れであり、直ちに危険な状態になることはない。今後、進展する可能性が有るため、当面監視を続ける。	B
69	同上	B
70	周方向のひび割れ、端部で閉合ひび割れ、ひびわれ幅は小さい。発生原因は、長期残留荷重の影響。今後、進展する可能性が有るため、当面監視を続ける。仮に進展がない場合は、端部が閉合しているため、剥落防止対策を施す。進展がある場合、その時の状態により判断する。	A
71	放射状のひび割れ、ひびわれ幅も小さい。発生原因は、長期残留荷重の影響。今後も進展する可能性が有るため、当面監視を続ける。進展がない場合は、剥落防止を施す。ひび割れの進展（複数本発生の場合）がある場合、押し抜きせん断に進展する可能性があるため、何らかの補強が必要である。	A

\*1 判定結果2A, A, Bは「道路トンネル維持管理便覧」に準ずる

## 5. 室内試験における防錆効果の検討

補強構造を鋼繊維補強コンクリートとすることを受けて、鋼繊維の欠点である、点または線状に赤褐色の浮錆が生じて美観が損なわれる点を解決することとした。その方法として、海外で実績のある亜鉛メッキ処理をした鋼繊維について、その防錆効果および力学的特性に関する検討を実施した。

### 5.1 実験概要

#### (1) 使用材料および配合

実験は、単位セメント量を  $340\text{kg/m}^3$  とした繊維補強覆工コンクリートで実施した。使用した材料を表-5に、検討配合を表-6に示す。

表-5 使用材料

材料種別	記号	名称または諸元
セメント	N	普通ポルトランドセメント, 密度 $3.15\text{g/cm}^3$
	BB	高炉セメントB種, 密度 $3.02\text{g/cm}^3$
水	W	水道水
細骨材	S	田川市弓削田産砕砂, 表乾密度 $2.66\text{g/cm}^3$ 粗流率2.66, 吸水率0.91
粗骨材	G	田川市弓削田産砕石, 表乾密度 $2.70\text{g/cm}^3$ $G_{\text{max}}20\text{mm}$ , 吸水率0.32
AE減水剤	Ad	リグニンスルホン酸化合物とポリオール の複合体
鋼繊維	SF1	亜鉛メッキ加工鋼繊維 L=40mm 直径 d=0.62mm
	SF2	普通鋼繊維 L=40mm 直径 d=0.62mm
表面含浸材	Si	シラン系表面含浸材

表-6 検討配合

配合 種別	W/C (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )						
		W	セメント		S	G	SF	Ad
			N	BB				
SF1-N	51.5	175	340	—	858	944	40	0.85
SF2-N				—				
SF1-BB			—	340	852	937		
SF2-BB			—					

#### (2) 実験要因, 水準および試験項目

実験要因, 水準, 試験項目を表-7に示す。亜鉛メッキによる防錆効果を把握するため、促進発錆試験を実施した。また、従来の鋼繊維(以下、普通鋼繊維)と防錆鋼繊維において、力学的性能に違いがないことを確認するために、圧縮強度試験および曲げタフネス試験を実施した。

表-7 実験要因, 水準および試験項目

実験 ケース	セメント 種別	鋼繊維 の種別	表面 含浸材	促進発錆 試験	曲げじん 性試験	圧縮強度 試験
SF1-N	N	SF1	なし	○	○	○
SF2-N		SF2	なし	○	○	○
SF2-N-Si		SF2	有	○	—	—
SF1-BB	BB	SF1	なし	○	—	—
SF2-BB		SF2	なし	○	—	—

#### (3) 試験方法

JIS A 1153「コンクリート促進中性化試験方法」を参考に、促進発錆試験を実施し、鋼繊維の促進腐食環境下における発錆状況を比較した。促進発錆は、温度  $20^\circ\text{C}$ 、相対湿度  $60\%\text{RH}$ 、炭酸ガス濃度  $5\%$  の環境下で、コンクリートの中性化を促進させ、同時に、 $3\%$ 濃度の塩水に浸した湿布で試験体を覆うことで塩分の供給を行った。なお、塩水による湿布は、2日置きに交換し、1サイクルを4日間(湿布交換2回)として、26サイクル実施した。促進発錆過程のうち2, 4, 8, 16, 26サイクル終了時点にて、発錆面積率、錆の内部への進行深さ、中性化深さを測定した。また、26サイクル終了時点において、塩化物イオン浸透深さを測定した。これら試験の手順および方法を図-4に示す。

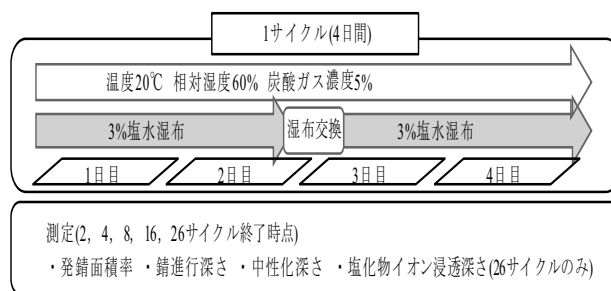


図-4 促進発錆試験の手順, 方法

## 5.2 実験結果

### (1) 圧縮強度, 曲げ強度および曲げじん性試験結果

普通鋼繊維と防錆鋼繊維を使用したコンクリートの材齢28日における圧縮強度, 曲げ強度, 曲げじん性試験結果を表-8に示す。

表に示すように、普通鋼繊維を使用したコンクリートと防錆鋼繊維を使用したコンクリートの圧縮強度, 曲げ強度, 曲げじん性係数は、ほぼ同等の値である。

したがって、普通鋼繊維と防錆鋼繊維には、力学的性能に違いがないと評価される。

表-8 圧縮強度、曲げ強度および曲げじん性試験結果

実験ケース	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げじん性係数 (N/mm <sup>2</sup> )
SF1-N	36.3	6.07	4.06
SF2-N	39.0	6.43	3.91

## (2) 促進発錆試験結果

26 サイクル終了時における塩化物イオン浸透深さと中性化深さを図-5に示す。塩化物イオン浸透深さは、普通ポルトランドセメントを使用した SF2-N が 9.4mm に対して、高炉セメント B 種を使用した試験体 (SF1-BB, SF2-BB) は 1~2mm 程度小さい結果であった。また、表面含浸材を塗布した SF2-N-Si は、塩化物イオンの浸透は見られなかった。中性化深さは、いずれの試験体も 1mm 以下と小さな値であった。

コンクリート内部への錆の進行深さ(最大値)の推移を図-6に示す。錆の進行深さは、普通鋼繊維と高炉セメント B 種を使用した SF2-BB で 3.6mm であり、防錆鋼繊維と普通ポルトランドセメントを使用した SF1-N では 0mm であった。

促進発錆試験 26 サイクル終了時のコンクリート表面の状況の一例を、写真-4に示す。写真から防錆鋼繊維を使用したコンクリートは普通鋼繊維と比較して、コンクリート表面の赤褐色の浮錆は明らかに少なく、防錆鋼繊維の防錆効果が確認できる。

コンクリート表面積に対する、発錆面積率の推移を図-7に示す。最終 26 サイクルの発錆面積率は、防錆鋼繊維を使用した SF1-N が最も小さく 1.1% であり、SF2-N が 3.1%、SF2-N-Si が 2.2% であることから、防錆鋼繊維の防錆効果が確認された。また、高炉セメント B 種を使用した場合の発錆面積率は、SF1-BB が 2.3%、SF2-BB は 9.3% であり、普通ポルトランドセメントを使用した場合に比較すると、発錆面積率は大きな結果であった。

以上、検討した促進発錆試験の結果においては、普通ポルトランドセメントと防錆鋼繊維を使用した SF1-N が最も防錆効果が高いことが確認された。

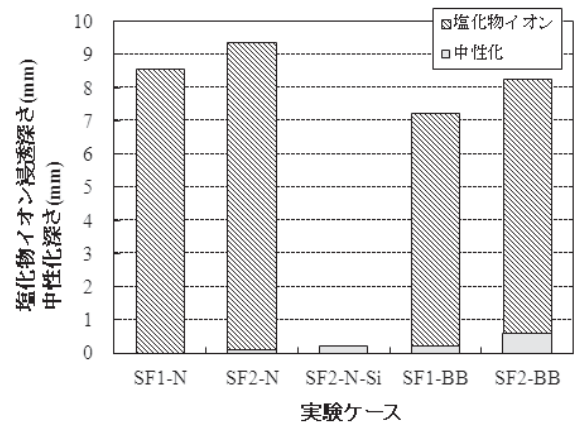


図-5 塩化物イオン浸透深さと中性化深さ

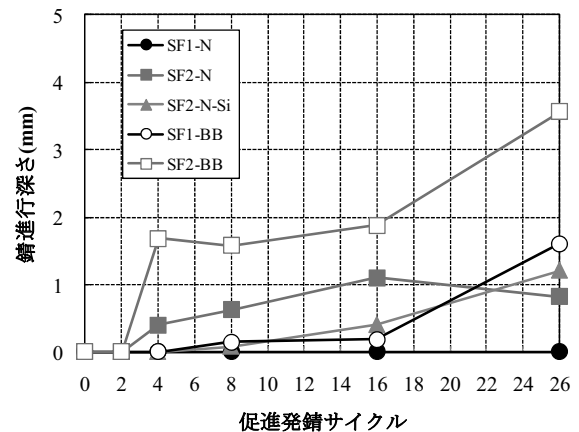
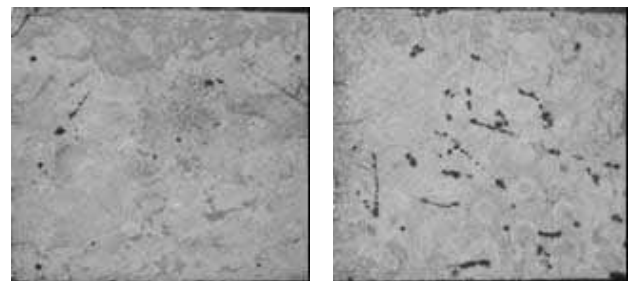


図-6 コンクリート内部への錆進行深さ



防錆鋼繊維 : SF1-N

普通鋼繊維 : SF2-N

写真-4 促進発錆させた鋼繊維コンクリート表面

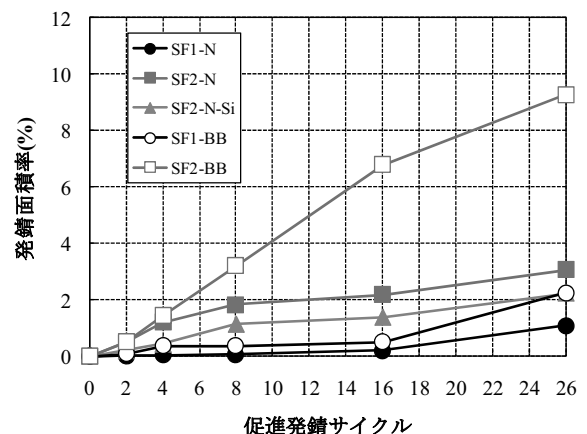


図-7 コンクリート表面の発錆面積率



## 6. 亜鉛メッキ鋼繊維補強による覆工の施工

室内試験の結果より、鋼繊維は亜鉛メッキ処理をした鋼繊維とし、セメントは中性化抵抗性の観点から普通ポルトランドセメントとした。配合を表-9に示す。なお、繊維混入率は鋼繊維補強コンクリートの耐力検討から、所定の曲げ靱性が確保できる混入率0.5vol%とした。

繊維の混入方法は生コン工場で製造したベースコンクリートをアジテータ車で現場搬入し、坑内にて毎分32kgで繊維投入した(写真-5)。繊維投入後にアジテータを2分間高速回転して混合攪拌して5分間待機後に練り上がり完了とした。



写真-5 坑内での鋼繊維投入状況

覆工打設において、鋼繊維の分散状況は良好であり、スランプの低下やワーカビリティの変化も認められなかった。また、6ヶ月以上経過した覆工表面には、鋼繊維による錆の発生は認められていない。

## 7. まとめ

大笹生トンネルにおけるトンネル変状と覆工補強に関する検討で得られた知見を、以下にまとめる。

- 1) 覆工損傷の発生原因は、覆工施工後の長期残留荷重である塑性圧が原因と考えられる。
- 2) 本トンネルで広く分布した軽石凝灰岩は、浸水崩壊試験がD(24時間以降原形を留めない)で、地下水の影響で強度低下を起し、それが塑性圧発生の原因となる。
- 3) 長期残留荷重は、地質条件、一次支保施工時の変位および湧水の発生などの要因がすべて揃うことによりその発生確率が高くなる。
- 4) 長期残留荷重は、点、線および面で作用し、覆工内面に引張応力による亀甲状、放射状および線上のひび割れを発生させる。このひび割れでコンクリートが直ちに剥落することはないが、今後の損傷の進展や地震の影響により押し抜きせん断破壊に至る可能性もある。
- 5) 施工済みの覆工を補強する場合、トンネルが施工中であれば全面改築工法(打ち直し)が最も合理的であり、経済性に優れていた。亀甲状ひび割れが発生している65ブロックでは鋼繊維補強による打ち直しを実施し、他の損傷が発生しているブロックでは、損傷の進展状況を確認の上、対策工の適用を判断した。
- 6) 覆工の補強対策として、鋼繊維補強コンクリートを適用する。発錆対策として亜鉛メッキを施した鋼繊維を採用し、発錆リスクを低減した。
- 7) 覆工補強の設計にあたっては、有限要素法で地山の強度低下に伴う長期残留荷重を算出し、これを覆工コンクリートに作用させ、構造の安全性を検証した。
- 8) 防錆鋼繊維と普通鋼繊維を使用したコンクリートでは力学的性能に違いがなく、促進発錆試験による検討では亜鉛メッキによる防錆効果が確認された。

表-9 亜鉛メッキ鋼繊維補強覆工コンクリートの配合

骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad <sup>*1</sup>	繊維 S
25	15	50.0	48.4	170	340	851	942	3.23	40

※1: Ad は高性能 AE 減水剤を使用した。



## 8. おわりに

今回施工中に確認した覆工のひび割れは、発生箇所が天端アーチ部で幅が0.2mm以下と小さく、目視では確認しにくい状況であった。しかしながら、本トンネルの地山が長期残留荷重が発生する可能性がある押し出し性地山であったことから、施工済みの覆工に対し、打設1日後、1週間後、1ヶ月後、6ヶ月後で、計画的なひび割れ変状調査を行い、覆工損傷を早期に発見することができた。長期残留荷重が作用するトンネルでの損傷の発生並びにその推移については、報告された事例が少なく、対策工の選定、実施にあたっては、損傷の状況のみの検討で、荷重増加の状況など、その根拠を明確に示すことは難しい。今後は、今回も取り組んでいるような作用荷重のモニタリングなどから、実態を明らかにして行く必要があるものと考えている。本トンネルにおける変状、損傷状況並びに覆工補強事例が、今後の長期残留荷重が発生する可能性のある同種の地山でのトンネル設計・施工に役立てば幸いである。

**謝辞：**今回の一連の変状・損傷に対する原因の究明、対策の立案・実施を行うにあたり、国土交通省東北地方整

備局福島河川国道事務所の吉田工務第二課長、楢岡建設監督官、および、土木研究所道路技術研究グループの真下グループ長、砂金主任研究員には多大なるご指導を頂きました。また、新材料の適用、計測などの各種課題解決には神鋼建材工業(株)、(株)東横エルメスをはじめとし、多くの方々にご協力を頂きました。本誌面を借りまして、心より感謝の意を表します。

### 【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針（平成21年改訂版），p.36，2009.
- 2) 土木学会：2006年制定トンネル標準示方書[山岳工法]・同解説，pp.94-96，2006.
- 3) 岡崎準・小川淳・田村武：膨張性地山におけるトンネル覆工のひび割れ発生状況に関する考察，トンネル工学研究論文・報告集第13巻論文(9)，pp.53-60，2003.
- 4) 日本道路協会：道路トンネル維持管理便覧，pp.123-136，1993.
- 5) 日本鉄鋼連盟：2002年改訂鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル-トンネル編-（第2版），技報堂出版，2002.

**Summary** At the Oozasou Tunnel on the Tohoku-chuo Expressway, deformation occurred under plastic pressure during excavation and cracks occurred at the locations where lining concrete was placed that may have been caused by residual loads in multiple spans. The cause of damage was therefore estimated based on the displacement during excavation and the damage to the lining, and corrective measures were selected. Steel-fiber-reinforced concrete was adopted, which has frequently been constructed for reinforcing linings in thrusting ground.

Steel fibers have been used as effective reinforcing materials in lining concrete as they provide high ductility. Steel fibers, however, involve the risk of rusting. Reddish-brown spots or lines of projected rust on concrete surface are detrimental to aesthetics. At present, therefore, other materials than steel fibers are used in most cases for preventing the delamination or spalling of lining concrete. To compensate for the drawback of steel fibers, steel fibers are galvanized in other countries to provide anti-corrosiveness. Neither records nor data is, however, available in Japan on the use of galvanized steel fibers. This paper describes the results of examination of anti-corrosiveness in accelerated laboratory corrosion tests and the results of field application.

**Key Words:** Tunnel, Lining Concrete, Fiber Reinforced Concrete, Galvanization, Rust Accelerating Test