飛島建設	東北支店	正会員	寺島	佳宏
飛島建設	建設事業本部	正会員	田村	琢之
飛島建設	建設事業本部	正会員	○熊谷	幸樹
国土交通省	東北地方整備局	正会員	吉田	良勝
国土交通省	東北地方整備局	正会員	楢岡	民幸

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(図-1)である.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,すなわち,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で発生した(図-2).そこで,トンネル掘削時の変位・変状状況, 覆工の損傷状況を踏まえた上で変状・損傷の発生原因を推定し,対策工の検討を行い,亜鉛メッキ処理した鋼 繊維補強による覆工補強を設計施工した¹⁾.

本稿では、2つの変状区間で採用した亜鉛メッキ鋼繊維補強覆工コンクリートについて、適用までの検討概要、現場適用結果、および効果検証結果について報告する.

2. 工事および地形・地質の概要

表-1 に工事概要を示す.図-1 に標準断面図を、図-2 に地質および施工実績縦断図をそれぞれ示す.

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状の山であり,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 貫入した流紋岩類よりなる.当初の想定では流紋岩類がルートの約7割を 占め,比較的硬質で良好な地山が分布するとされていた.しかし,実際は, 熱変質を受け粘土化した流紋岩や軽石を含む脆弱な凝灰岩が連続して出 現した.特に変状区間A付近のSTA.25+0~STA.26+0では,流紋岩と軽石 凝灰岩の境界部にあたり,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 部では脆弱であった.

3. 掘削時に覆工に生じた変状・損傷

(1)変状区間 A の掘削時の変状と対策

CII-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.そのため,支保工のランクアップ(DI-b(1),DII(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



表-1 工事概要

工事名称	東北中央自動車道大笹生トンネル工事
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	飛島建設株式会社
トンネル延長	2,089m
掘削断面積	$77m^2$
	DI-b:上半先進ベンチカット工法
掘削工法	DⅡ:ミニベンチカット工法
	CⅡ-b:補助ベンチ付き全断面掘削工法
掘削方式	発破掘削
ずり出し方式	連続ベルトコンベヤ

キーワード 塑性地山,変状,亜鉛メッキ鋼繊維,覆工,FBG 光ファイバセンサ,長期モニタリング 連絡先 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP R&D棟2F 建設事業本部土木事業統括部 TEL044-829-6713



図-2 地質縦断図と施工実績

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 DII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. しかしながら, 掘削の進行に伴い, 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, 空洞充塡および小口径鋼 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.

以上に示した変状区間 A における変状は、当該区間の一軸圧縮強度 が q_u=1.8MPa 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推察された.

(2)変状区間 A で発生した覆工の変状

変状区間 A では、トンネル施工中に打設完了区間の覆工にひび割れ 変状が発生した.表-2 に覆工ブロック毎の損傷形態を、写真-3 に覆工 変状状況の例をそれぞれ示す.

覆工の複数ブロックで発生した変状は、①鉛直方向の塑性圧の 作用しやすいトンネル形状である、②地山強度比が小さく収束確 認後に微小変形が発生している、③地下水の浸潤により局所的に 塑性化している、ということから、塑性圧による外力(長期残留荷 重)に起因する可能性が高いと判断された.

表−2	覆工の損傷形態	(変状区間 A)
-1X -	復工*/長的///心	

		掘削時期		最終変位(mm)		指復確認		
BL パターン	打設時期		天端 沈下	内空 変位	時期	損傷形態		
65	DΠ	H20.9.17~24	H21.3.31	-61.1	-67.5	H21.12.15	天端:放射状~亀甲状 複数閉合、幅0.3mm	
67	DI-p	$H20.10.20 \sim 24$	H21.4.23	-17.6	-1.7	H21.12.15	天端:周方向、単独 幅0.3mm、長さ2.0m	
69	DI-p	H20.11.10~12	H21.5.12	-22.8	-3.2	H21.12.15	天端:周方向、単独 幅0.2mm、長さ1.8m	
70	DI-p	$H20.11.12\!\sim\!14$	H21.5.14	-28.2	-10	H21.12.15	天端:周方向、端部閉合 幅0.2mm、長さ2.0m	
71	DI-p	H20.11.14~18	H21.5.16	-40.9	-16.6	H21.12.15	天端:放射状、 幅0.2mm	



写真-1 切羽崩壊(変状区間 A)



写真-2 支保変状(変状区間 A)



写真-3 覆工の損傷状況(65BL)

4. 覆工補強の検討

覆工補強方法の選定に際し、本トンネルの構造、施 工条件、および塑性圧が点、線、面で作用する外力で あることから、想定される外力に対する耐荷力や長期 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た.さらに施工性、美観、工程、 経済性、実績などを加味して覆工補強方法の選定を行 った.その結果、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 当な対策と考えた.また、施工中のトンネルであるこ とから、耐荷力を有する鋼繊維補強コンクリートによ 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.

5. 亜鉛メッキ鋼繊維の防錆効果の検討²⁾

補強方法を鋼繊維補強コンクリートとするに際して, 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 340kg/m³ とした繊維補強 覆エコンクリートで実施した.使用した材料を表-3に、 検討配合を表-4 にそれぞれ示す.

(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-5 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,防錆鋼繊維において従来の鋼繊維(以下, 普通鋼繊維と記す)と力学的性能に差異がないことを確認するた め,圧縮強度試験および曲げタフネス試験を実施した.

(3) 促進発錆試験の方法

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℃,相対湿度 60%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日毎に交換し、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-3に示す.

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

表-3 室内試験の使用材料

材料種別	記号	名称または諸元
4 2 2 1	Ν	普通ポルトランドセメント, 密度3.15g/cm ³
ピメンド	BB	高炉セメントB種, 密度3.02g/cm ³
水	W	水道水
細骨材	S	田川市弓削田産砕砂,表乾密度2.66g/cm ³
11 11	5	粗粒率2.66,吸水率0.91
粗骨材	G	田川市弓削田産砕石,表乾密度2.70g/cm ³
		G _{max} 20mm, 吸水率0.32
小口河小刘	٨d	リグニンスルホン酸化合物とポリオールの
ALION小门	Au	複合体
	网繊維 SF1	亜鉛メッキ加工鋼繊維 L=40mm 直径
鋼繊維		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-4 検討配合

配合	W/C	単位量(kg/m ³)								
種別	(%)	W	セメ N	ント BB	S	G	SF	Ad		
SF1-N		5 175	340		858	944	40			
SF2-N	E1 E									
SF1-BB	51.5			240	050	027	40	0.85		
SF2-BB							340	002	931	

表-5 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		SF1	なし	0	0	0
SF2-N	Ν	SF2	なし	0	0	0
SF2-N-Si		SF2	有	0	-	_
SF1-BB	DD	SF1	なし	0	-	_
SF2-BB	DD	SF2	なし	0	_	_



図-3 促進発錆試験の手順と方法

表-6 各種強度試験結果

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

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-6に示す.同表より,普通鋼繊維コンクリ ートと防錆鋼繊維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ことが分かる. したがって,普通鋼繊維と防錆鋼繊維には力学的性能 に差異はないと評価できる.

(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-4 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-5 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-6 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できた.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できた.

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-7 に示す.



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補強 コンクリートの表面





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、所定の曲げじん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 速回転して混合撹拌し,5分間待機 後に練り上がり完了とした. 表-7 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	マニンプ	水セメン	細母材家	単位水量(kg/m ³)					
大寸法 (mm)	(cm)	ト比 W/C(%)	лш н 17 1 s∕a(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	繊維
		W/ U(///)		W	С	S	G	$Ad^{\otimes 1}$	S
25	15	50	48.4	170	340	851	942	3.23	40

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ーの変化も認められなかった.また,約1 年9ヶ月経過した時点(平成24年8月末)で覆工表面には,鋼繊 維による錆の発生は認められていない.

7. FBG 光ファイバセンサによる補強工の効果検証

亜鉛メッキ鋼繊維による覆工補強を実施した 65 ブロックの覆 エに対し,竣工後も,地下水による地山劣化に伴う塑性圧が作用 すると想定されることから,覆工打ち直し時に長期耐久性に優れ た FBG 光ファイバセンサ^{3),4)}を埋設しておき,施工後,外圧によ り鋼繊維補強覆工コンクリートに発生する応力を長期間監視す ることとした. 表-8 に FBG 埋設型ひずみセンサの仕様を示す.

補強設計の妥当性検証および覆工の 繊維補強効果の確認については,打設後 に得られる長期計測結果に基づき,外圧 の有無とその変化を把握し,コンクリー ト応力の管理基準値と比較することと した.図-7 に,覆工打ち直し(平成 22 年12月7日)以後の覆工コンクリート応 力の経時変化を示す⁵⁾.

同図より,覆工応力は右肩部を除き最



写真-5 坑内での鋼繊維投入状況

表-8 FBG 埋設型ひずみセンサの仕様

ひずみ測定範囲	±1,000µ
分解能	0.8µ
精度	5μ
寸法	φ 3mm(ロッド状)
許容動作温度	-30∼+70°C
消費電力	最大6W







大 3N/mm²程度の圧縮応力状態で安定しているのが分かる.右肩部の引張応力も最大 0.8N/mm²程度になった 後,圧縮側に推移しながら安定している.なお,計測期間中の平成 23 年 3 月 11 日に東北地方太平洋沖地震が 発生したが,その前後で計測値に変動は見られなかった.さらに,打設後 1 日,1 週間,1 ヶ月,6 ヶ月,1 年,および 1 年半後(平成 24 年 8 月末)に実施した目視による観察点検においても,覆エコンクリートにひび 割れ等の異常は発生していないことを確認している.

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により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こし、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がある.
- 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選定し、亜鉛メッキを施した鋼繊維を採用することで 発錆リスクを低減した。
- 7)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差異はなく、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できた.
- 8) FBG 光ファイバセンサによる覆工応力の計測監視体制を構築するとともに、約1年経過した時点で、計測 結果に基づき繊維補強の効果を確認できた.

本トンネルで実施した亜鉛メッキ鋼繊維による覆工補強対策と効果検証のための長期計測監視体制が今後 の同種工事の参考になれば幸いである.

最後に、今回の一連の変状・損傷に対する原因の究明、対策の立案・実施を行うに当たり、多大なるご指導 を頂いた土木研究所道路技術研究グループの真下グループ長、砂金主任研究員をはじめとし、多くの方々にご 協力を頂いた.ここに記して深く感謝する次第である.

参考文献

- 吉田良勝, 楢岡民幸, 寺島佳宏, 熊谷幸樹: 強変質地山における支保の変状対策と覆工補強, トンネルと 地下 Vol.42, No.2, pp.7-18, 2011.
- 2) 寺島佳宏,岡田朋道,小関均,小川勲,川端康夫,平間昭信,熊谷幸樹,松元和伸: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エコンクリートの適用-東北中央自動車道大笹生トンネルー,と びしま技報 No.60, pp.7-18, 2011.
- 3) 上明戸昇・田村琢之・松元和伸: FBG 光ファイバセンシング技術を用いた計測器埋設型(ひずみ計・温度計)の開発, 検査技術 Vol.15 No.9, pp.44-48, 2010.
- 4) 熊谷幸樹,田村琢之,上明戸昇,森山守:TDM 方式 FBG 光ファイバセンシングによるトンネル吹付け覆 工の長期健全性監視,第43回光波センシング技術研究会講演論文集,pp.155-160, 2009.
- 5) 寺島佳宏, 熊谷幸樹, 松元和伸, 田村琢之: 大笹生トンネルにおける覆工コンクリートの長期ひずみ計測, とびしま技報 No.60, pp.137-138, 2011.