

# トンネル縦断方向に続く断層破碎帯 における変状対策

巽 義知<sup>1</sup>・三上 英明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 戸田建設株式会社 広島支店 (〒730-0044 広島県広島市中区宝町1-20)  
E-mail:yoshitomo.tatsumi@toda.co.jp

<sup>2</sup>正会員 戸田建設株式会社 広島支店 (〒730-0044 広島県広島市中区宝町1-20)  
E-mail:hideaki.mikami@toda.co.jp

本工事は、山口県長門地区から俵山地区を結ぶ自動車専用道路である長門俵山道路(L=5.5km)のうち工事延長1,980m、トンネル延長1,243m、内空断面積91.7㎡の道路トンネルを築造するものである。事前調査結果によると掘削対象の地山は、一部の推定断層区間や坑口部を除き、概ねCM級程度の岩盤から構成されており、トンネル延長の60%程度がCⅡ、CⅠパターンで設計されていた。トンネル掘削時、事前調査では予測されていない断層破碎帯が、切羽で幅5mの範囲で出現し、縦断方向に3箇所、合計730mに渡り続いて見られた。施工済みの支保工に変状が生じ、対策工が必要となった。本稿では、変状の状況、変状原因の考察、変状対策工の選定、および対策工の施工結果について報告する。

**Key Words** :mountain tunnel , fault fracture zone ,invert ,early closure

## 1. はじめに

長門俵山道路は、山口県長門地区から俵山地区を結ぶ自動車専用道路で、災害時の俵山地区の孤立を回避し、救急医療活動の支援など、地域の安全・安心の確保を可能とし、山陰地方の高規格幹線道路網の一部を形成する道路として、広域交流の促進及び地域活性化に寄与する重要な役割を期待されている。

長門俵山道路大寧寺第1トンネル工事は、この自動車専用道路のうち、工事延長1,980m、トンネル延長1,243m、内空断面積91.7㎡の道路トンネルを築造するものである(図-1)。

本稿では、トンネル掘削時に出現した事前調査では予測されていない断層破碎帯の出現により生じた支保工の変状について、変状状況と変状原因の考察、変状対策工の選定、および対策工の施工結果について報告する。

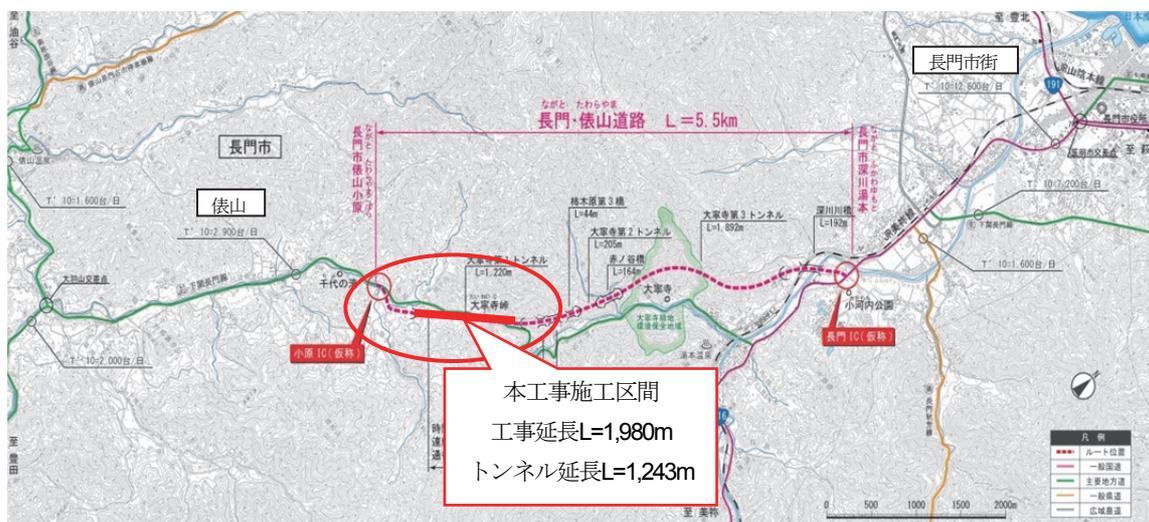


図-1 本工事施工位置図

## 2. 工事概要

本工事の諸元を表-1に示す。

### (1) 地形概要

本トンネルは、長門市の市街地に北流する深川川の中流、湯本温泉付近にて東流する大寧寺川の2.5km程度上流に位置する(図-2)。トンネル起点側の一部が扇状地性低地にあたるものの、大部分が起伏量200~400m程度の小起伏山地に区分される範囲内に位置する。北西-南東方向の沢が多く見られることが特徴である。また、大寧寺川~深川川沿いの斜面は、急傾斜地崩壊および土石流の警戒区域に指定されている箇所が多く、本施工箇所付近には、堰堤などの砂防関連施設が多く存在している。

### (2) トンネル概要

長門俵山道路大寧寺第1トンネルは、延長1,243m、内空断面積91.7㎡、起点側坑口からおよそ3.5%の勾配で長門市街側を下る2車線の山岳トンネルで、発破掘削によるNATM工法で設計されている(図-3、図-4)。

表-1 工事諸元

工事名	長門俵山道路大寧寺第1トンネル工事
工事場所	山口県長門市小原地先
発注者	国土交通省中国地方整備局 山口河川国道事務所
施工者	戸田建設株式会社
工期	2015年5月1日~2018年10月31日
トンネル延長	L=1,243m
内空断面積	A=91.7㎡
掘削方式	発破掘削方式



図-2 地質区分図

## 3. 地質概要

### (1) トンネル地質概要

トンネル周辺部を構成する地質は、中生代白亜紀前期の関門層群下関亜層群上部層と白亜紀後期の阿武層群長門層からなり、両層の境界部付近には、白亜紀後期の火山活動に伴い貫入した石英斑岩が分布している(図-4)。トンネル周辺の地表部にはリニアメントが多数見られる(図-5)。

トンネル掘削対象の地山は、一部の推定断層区間や坑口部を除き、概ねCM級程度の岩盤から構成されており、トンネル延長の60%程度がCII、CIパターンで設計されている(図-4)。

### (2) 断層破碎帯

トンネル掘削時、事前調査では予測されていない破碎帯が、切羽で幅約5mの範囲で出現し(写真-1)、縦断方向に3区間で合計730mに渡り続いて見られた(図-4、図-6)。地表面に見えるリニアメント位置(図-5)と連動することから破碎帯は断層であると判断した。この断層破碎帯は、主に粘土化した凝灰岩で占められ、被圧した湧水が見られた(写真-1、写真-2)。

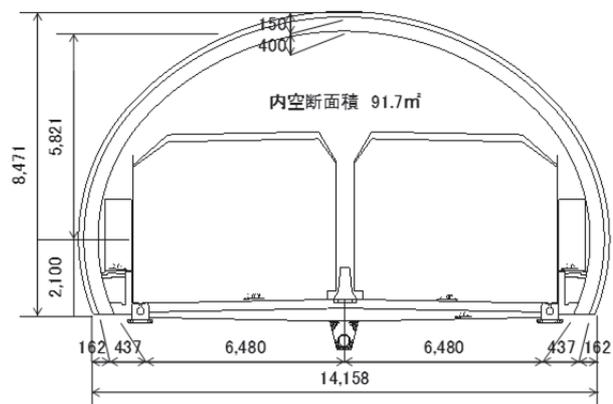


図-3 トンネル断面図 (C I, C II)



写真-1 切羽に見られた断層破碎帯

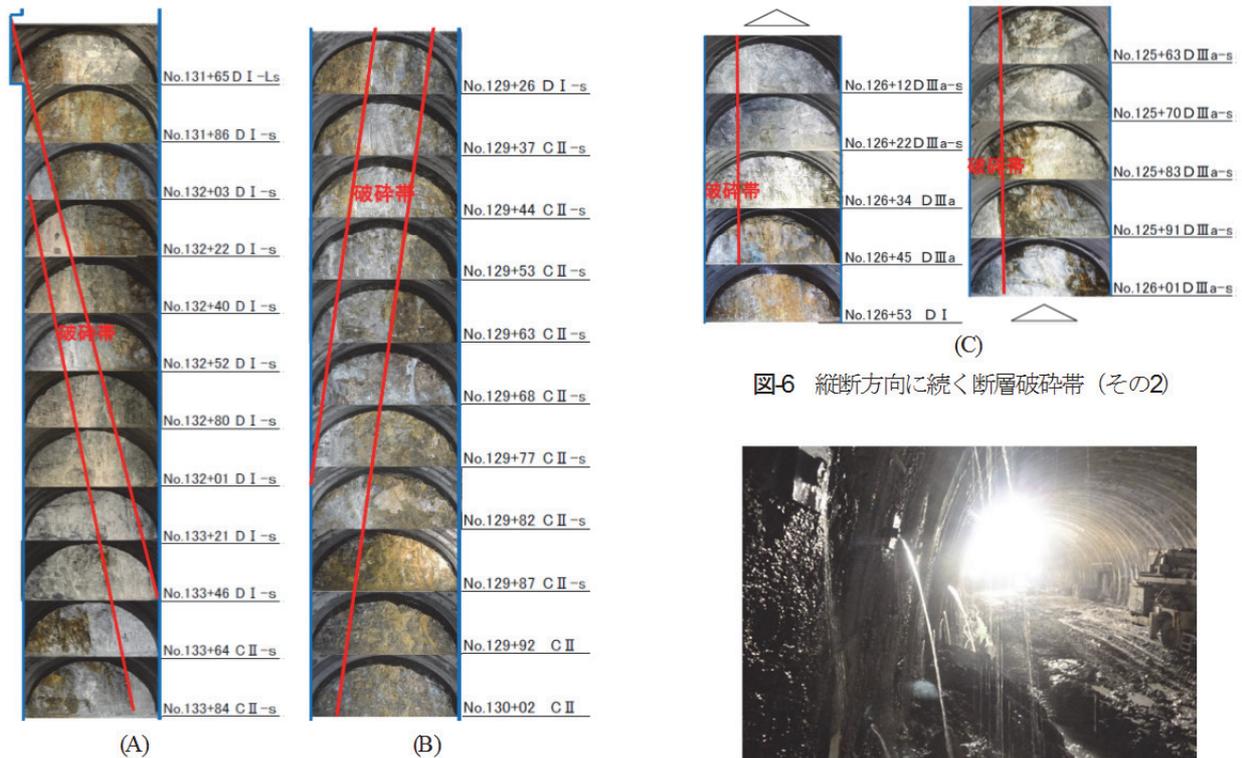
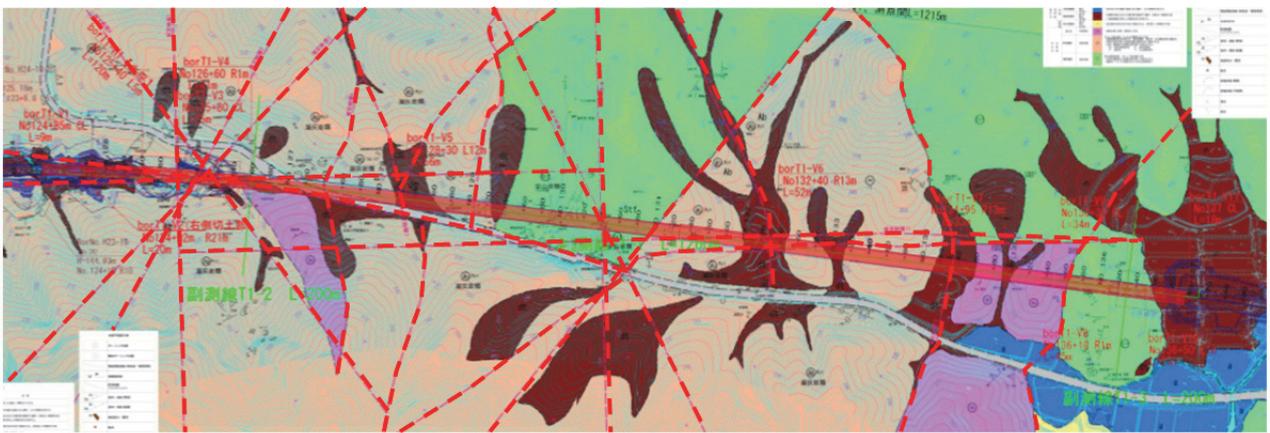
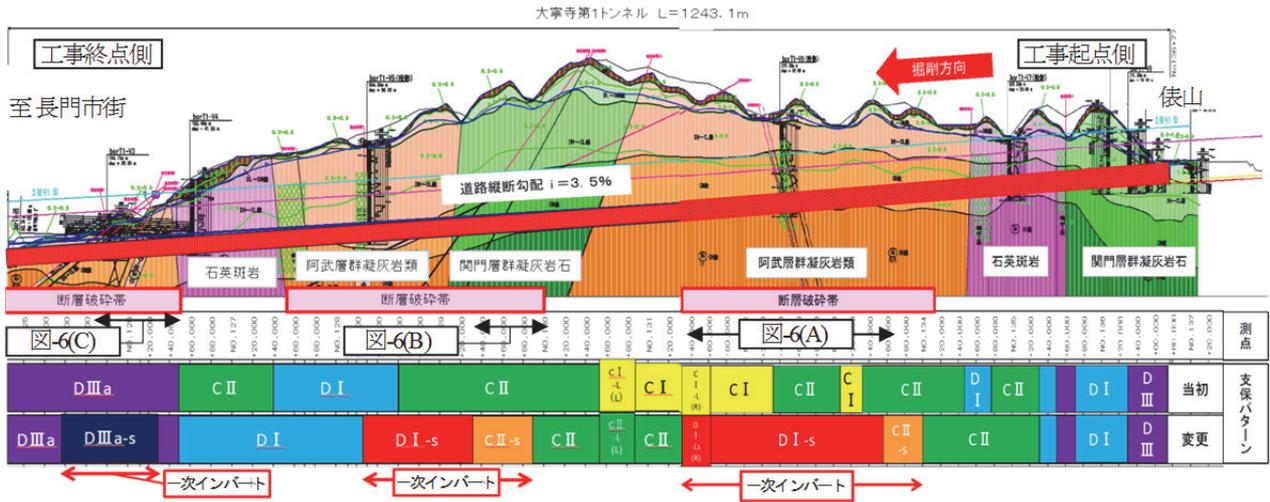


図6 縦断方向に続く断層破砕帯 (その1)

#### 4. 支保工変状

##### (1) 変状概要

##### a) 変状パターン

断層破碎帯掘削時、施工済みの支保工に以下のパターンの変状が生じた。

- A.ロックボルトのプレートの曲り (写真-3)
- B.吹付けコンクリートのひび割れ (写真-4)
- C.ロックボルトのプレートの破断 (写真-5)
- D.ロックボルトのせん断破壊 (写真-6)

##### b) 変状に至るまでの状況

支保工建込み直後、地山の押出しにより、50mm程度の初期変位が生じた。支保工脚部では沈下が確認された。変位は収束傾向を示さず、概ね1D~2D(15m~30m)切羽進行後に支保工に変状が生じた。変位の模式図を図-7、展開図を図-8に示す。変位は最大で200mm程度に及んだ。覆工の設計巻厚が侵された区間では、縫い返しを施した。



写真3 A.ロックボルトプレートの曲り



写真4 B.吹付けコンクリートのひび割れ



写真5 C.ロックボルトのプレートの破断



写真6 D.ロックボルトのせん断破壊

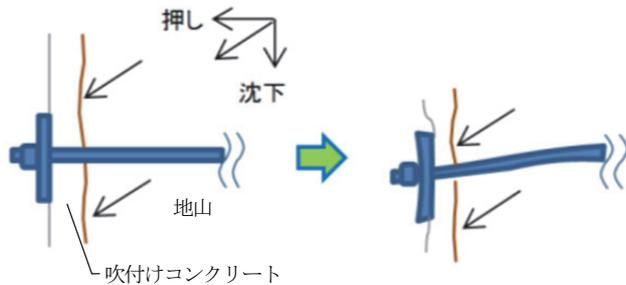


図-7 変状発生模式図

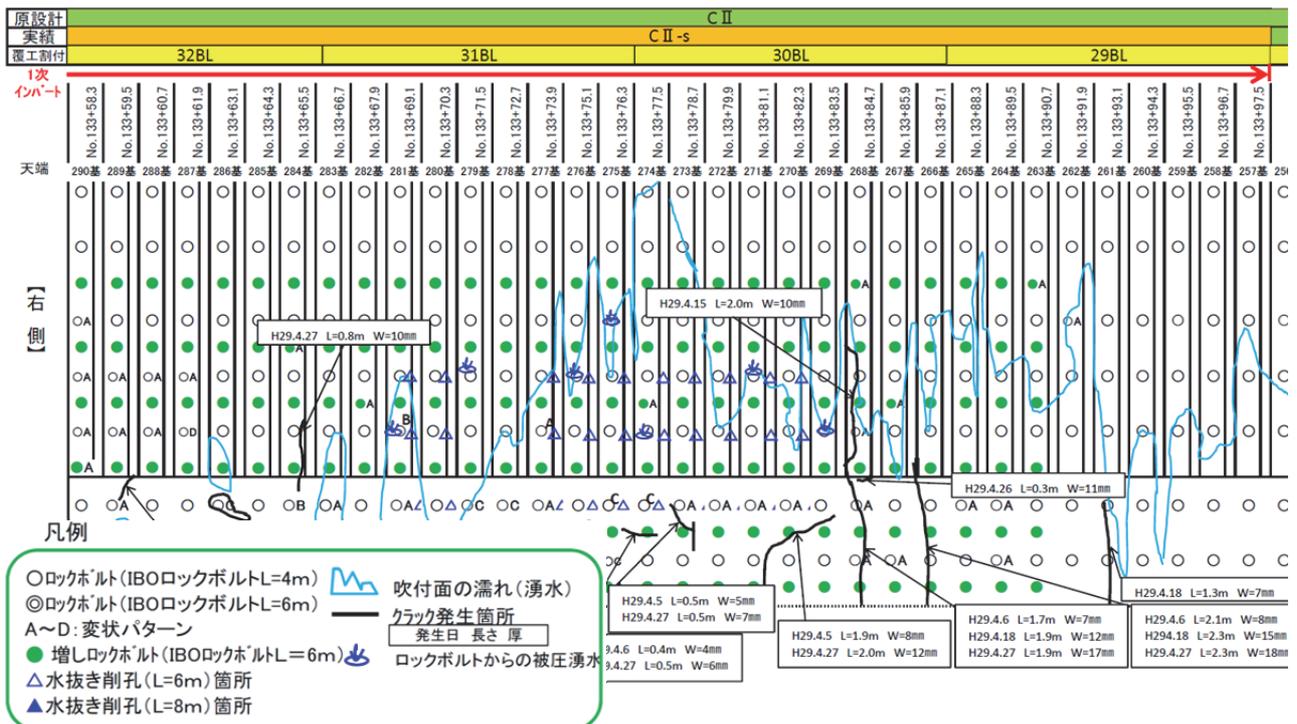


図-8 変状展開図

(2) 変状原因

a) 破碎帯岩石の成分分析

トンネル断面の変状事例には地山の膨張性によるものが報告されている<sup>1)</sup>。そこで、破碎帯の岩石の成分分析を行った。分析に用いた試料は、支保工の変状が見られたNo.133+30とNo.133+60の2地点より採取した。分析項目は参考文献2)に示される地山の膨張性を示す指標の例(表-2)を参照し、X線回折分析(定性)、陽イオン交換容量、浸水崩壊度、2μm以下粒子含有率、塑性指数とした。

X線回折分析結果(表-3)から、No.133+60では膨潤性を示すスメクタイト質の混合層鉱物が見られたが、No.133+30では見られない。緑泥石が見られることから、熱水変質した地質と見られる(プロピライト変質作用)。

膨潤性粘土鉱物の含有量と関連のある陽イオン交換容量(CEO)の値は、No.133+60では9.3meq/100g、No.133+30では12.6meq/100gであり、膨圧発生の可能性があるとして20meq/100g以下であった(表-4)。膨潤性粘土鉱物の含有量は少ないものと推定される。

塑性指数の値(表-4)は、No.133+60で26.6%と膨圧発生の可能性があるとして25%を超える。

2μm以下粒子含有率は膨張性を示すとされる値を下回る。

浸水崩壊度試験の結果(表-4、写真-7)から、試験開始24時間経過後には、ほぼすべての試料が完全に泥状化しており、泥状化しやすい性質であることが分かる。

表-2 地山の膨張性を示す指標の例

	日本鉄道建設公団 (1977)	大塚ほか(1980)	佐藤ほか(1980)
膨張性を示す指標	膨圧発生の可能性が非常に大きいもの	①変形係数 ≤8 000kgf/cm <sup>2</sup>	①自然含水比>20%
	①岩石中の主要粘土鉱物がモンモリロナイト	②一軸圧縮強度 ≤40kgf/cm <sup>2</sup>	②単位体積重量(乾燥) <1.8gf/cm <sup>3</sup>
	②2μm以下粒子含有率 ≥30%	③単位体積重量 ≤2.05gf/cm <sup>3</sup>	③(第1回吸水量/自然含水比) >2.0
	③塑性指数≥70	④自然含水比≥20%	④浸水崩壊度C~D ○
	④陽イオン交換容量 ≥35meq/100g ×	⑤液性限界≥100%	⑤モンモリロナイト含有量 >30% ×
	⑤浸水崩壊度D ○	⑥塑性指数≥70	⑥RQD<30%
	⑥ボーリングサンプル中 破碎部多い	⑦流動指数≥20	
	膨圧発生の可能性あり	⑧2μm以下粒子含有率 ≥30%	
	①岩石中の主要粘土鉱物がモンモリロナイト	⑨陽イオン交換容量 ≥35meq/100g ×	
	②2μm以下粒子含有率 ≥15% ×	⑩膨張率≥2%	

× 基準値以下  
○ 基準に該当

※参考文献2)より抜粋、加筆

b) 変状原因の考察

試験結果と変状に至るまでの状況から、変状の原因は、地山の体積膨張を伴う膨張性の可能性は低く、熱水変質した粘性土を含む地山が被圧湧水により泥状化して耐力を失い、脚部沈下と側壁の押し出しが生じたスキージングによるものと考えられる。

表-3 粉末X線回折(定性分析) 鉱物同定結果

試料名 鉱物名	No.133+30		No.133+60	
	不定方位 (全試料)	定方位 (粘土鉱物)	不定方位 (全試料)	定方位 (粘土鉱物)
緑泥石/スメクタイト 混合層鉱物	-	-	tr	+++
雲母/スメクタイト 混合層鉱物	-	-	tr	+++
雲母鉱物	+	+++	tr	+
カオリナイト	tr	+	tr	+
緑泥石	+	+++	tr	+++
石英	+++	++	+++	+++
長石族	tr	-	-	-
方解石	++	-	tr	-
黄鉄鉱	tr	-	-	-

凡例 +++:多量 ++:中量 +:少量 tr:微量 -:不検出

表-4 分析結果一覧

試料名		No.133+30	No.133+60
陽イオン交換容量 (CEC) meq/100g		9.3	12.6
浸水崩壊度 (24時間後)		D-D-C (C:稜角部が崩壊するもの D:原形を止めないもの)	D-D-D (D:原形を止めないもの)
2μm以下粒子含有率 (%)		2.6	5.4
塑性 性 限 界	液性限界 %	34.3	38.1
	塑性限界 %	14.3	11.5
	塑性指数	20.0	26.6

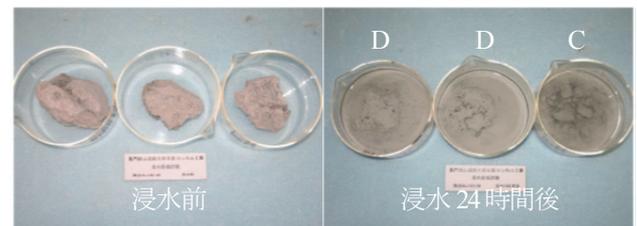


写真-7 浸水崩壊度試験結果 (No.133+30)

## 5. 変状対策工

支保工の変状を受け、①、②が施工上の課題となった。

①内空変位の挙動形態から推測される断層破碎帯による影響範囲の早期把握

②内空変位の経過に応じた適切な変状対策の選定および計画

これら課題に対し、本工事で採用した解決策について、以下に述べる。

### (1) 断層破碎帯の影響範囲把握

断層破碎帯の影響範囲については、明確な判断基準が既往事例にない。変状区間では、前述した通り、地山の押し出しと脚部沈下により変位が生じ、変位の収束傾向が見られない。覆工の巻厚不足が生じるまでに断層破碎帯の影響範囲を判断して対策を施す必要がある。

そこで、掘削と変位の関係を把握し、掘削が2D経過しても内空変位が収束せず、広げ越し量に対し50%を超過し、かつ押し出し範囲が掘削とともに前方に続くものを断層破碎帯の影響と判断し、対策工を追加することとした。

### (2) 変状対策工の選定

断層破碎帯の影響による押し出しが掘削とともに続く区間は増しロックボルトを打設し、縫い付け効果とせん断抵抗の向上を図った。さらに変位が継続し、収束しない区間について覆工が巻厚不足となる前に一次インバート（鋼製支保工+吹付け：設計インバート厚に含まない支保的インバート）を採用し、リング状構造の構築による変位抑制を図った（図-9）。なお、CⅡパターンで

施工済みの区間については、下半の鋼製支保工を追加して一次インバートをつなぎ、断面閉合させた。

## 6. 対策工の施工結果

### (1) 内空変位

内空変位の計測結果の一例を図-10に示す。変状の対策工を施工したすべての区間において、図-10のように変位の収束が見られた。施工後1年経過時において、覆工コンクリートに外力によるひび割れの発生はなく、対策工の選定方法は有効であると考えられる。

### (2) 工事費

内空変位の挙動形態から断層破碎帯の影響を判断し、押し出しの継続の有無によって対策工を決めることで、断層破碎帯区間730m中、対策工を施す区間が530mで済み、約30%の対策工費削減となった。

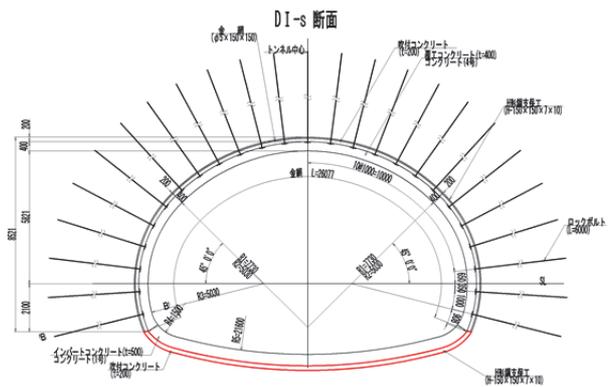


図-9 一次インバート

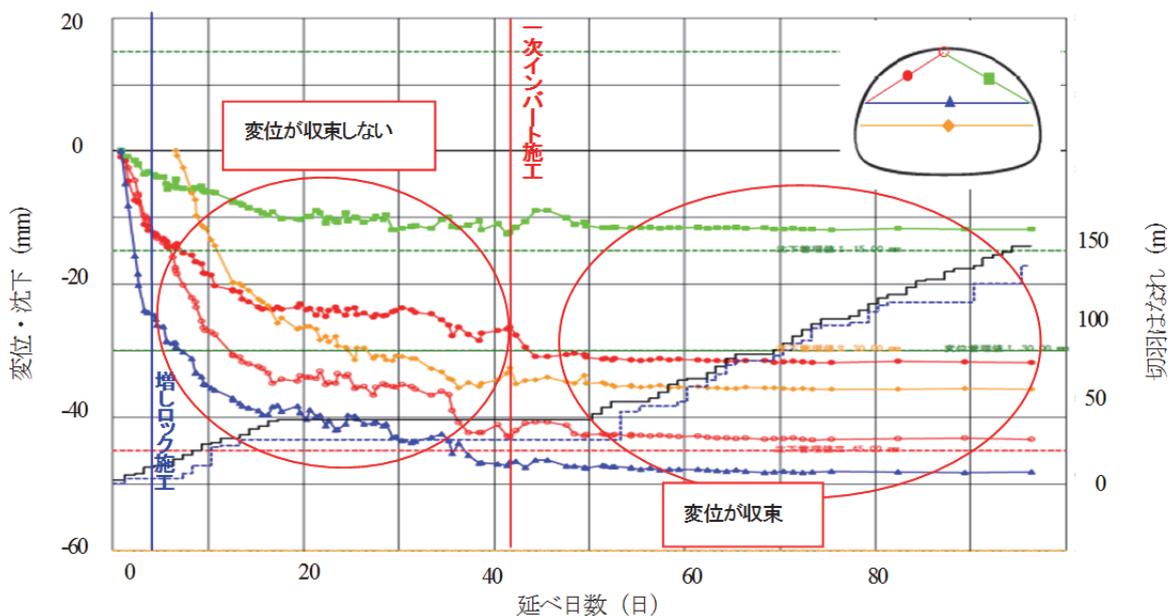


図-10 変位計測結果 (No.133+57)

## 7. おわりに

全区間の約 6 割の区間で、トンネル縦断方向に断層破碎帯が続いていたが、事前調査では見落とされていた。弾性波探査等の調査がトンネル縦断方向にのみ行われていたためと考えられる。地表面にトンネルと並行のリニアメントが見られる場合は横断方向にも調査が必要と考える。

施工後 1 年経過時において、覆工コンクリートに外力によるひび割れの発生はなく、今回設定した断層破碎帯の影響の判断基準、対策工は有効であったと考える。今後の同種地質における工事の参考となれば幸いである。

謝辞：本トンネルの施工ならびに論文作成にあたり、多大なるご指導、ご協力を頂いた関係者の皆様へ、ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，pp.315-320，2016.
- 2) 土木学会：トンネル標準示方書[山岳工法編]・同解説，pp.44-45，2016.

(2018. 8. 10 受付)

## COUNTERMEASURES AGAINST TROUBLES IN THE FAULT FRACTURE ZONES FOLLOWING PROGRESSING DIRECTION

Yoshitomo TATSUMI and Hideaki MIKAMI

According to the results of the preliminary survey, the ground of excavation was composed rock of about CM class except for some estimated fault sections and inlet sections, and about 60% of the tunnel extension was designed with CII and CI patterns. At the time of tunnel excavation, fault fracture zones that were not predicted by preliminary survey appeared in the range of 5 m in width at a working face, and were observed in progressing direction. Troubles occurred in the constructed support of the tunnel, and countermeasures were required. In this paper, we report the situation of the trouble, consideration of causes of the trouble, selection of countermeasures, and results of construction work on countermeasures.