

施工

隣接する I 期線トンネルへの影響を考慮した割岩工法による施工

—鳥取自動車道 佐瀨トンネル—

国土交通省中国地方整備局岡山国道事務所工務課長 高橋 渉
(株)大本組土木本部工務部次長 浅井 律宏

1 はじめに

中国横断自動車道姫路鳥取線は、兵庫県姫路市を起点とし、鳥取市に至る延長約87kmの高速自動車国道である。このうち、鳥取自動車道の区間については2013(平成25)年3月に暫定2車線で全線供用し、現在、大原IC～西粟倉ICの一部区間において付加車線の整備を進めている。

佐瀨トンネルは、当該区間に2008(平成20)年に竣工した佐瀨トンネル I 期線と並行して計画されたトンネル(II期線)である。本トンネルの地山は花崗岩を主体とする中硬岩～硬岩で形成される。このため、地山条件からは、標準的には発破掘削が選定される。しかしながら、発破による振動や衝撃的な発破音による隣接する I 期線トンネルへ

の影響が懸念されるため割岩工法による掘削を選定した。

本稿は、I 期線の安全を確保するためにトンネル掘削に採用した割岩工法ならびに I 期線の挙動を計測した結果について報告する。

2 工事概要

佐瀨トンネルは岡山県英田郡西粟倉村の吉野川右岸に位置する。この付近は頂部に小平坦面を有し、背後に鞍部を有する400m以下の尾根が連続する地形となっている。トンネル付近の地質は図-2に示すとおり基盤岩である中生代白亜紀の「花崗岩」とこれを貫く新第三紀の「ひん岩」から構成される。トンネル地表部には風化が進んだD級岩盤相当の地山(マサ化した地山)が分布するが、



図-1 工事位置

表-1 工事概要

工事名	鳥取自動車道佐瀨トンネル工事
施工場所	岡山県英田郡西粟倉村長尾地内
工期	(自)2015(平成27)年1月17日～ (至)2016(平成28)年7月29日
トンネル延長	L=201.1m
掘削断面積	A=72.368～76.975m ² (インバート含む)
掘削工法	上半先進ベンチカット工法、補助ベンチ付き全断面工法
掘削方式	機械掘削(自由断面掘削機)、割岩掘削

佐測トンネル（下り線） L=201.1m

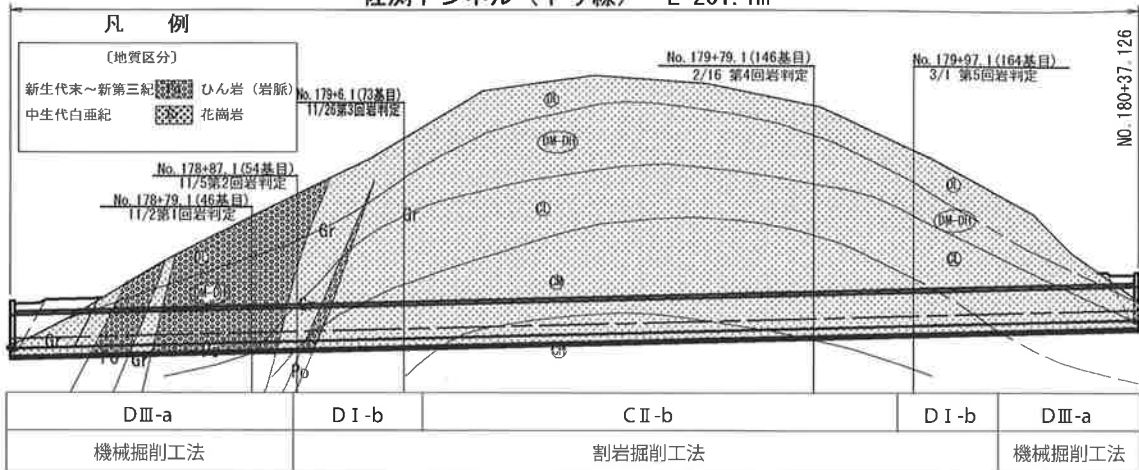


図-2 地質縦断面

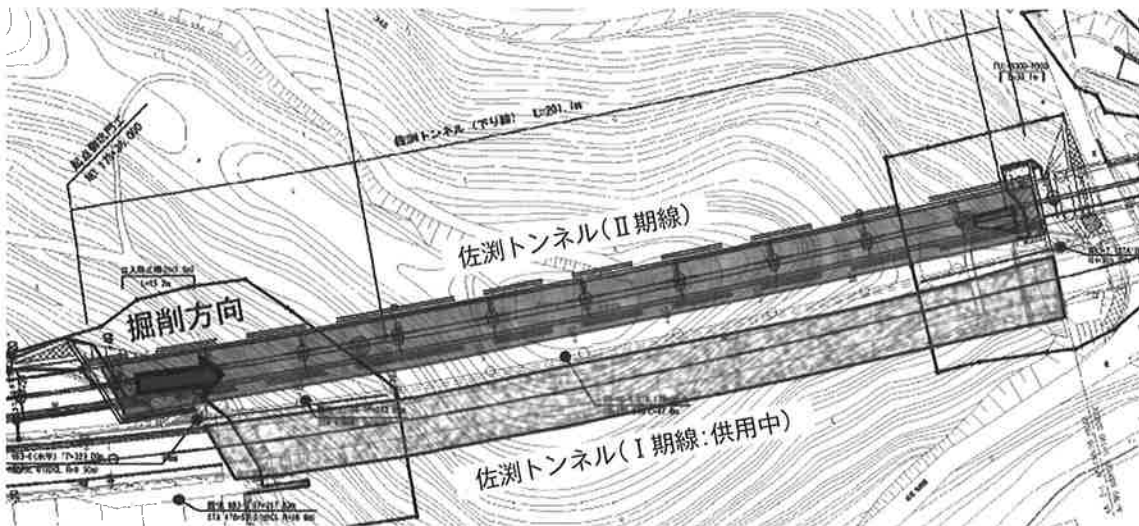


図-3 工事位置平面図

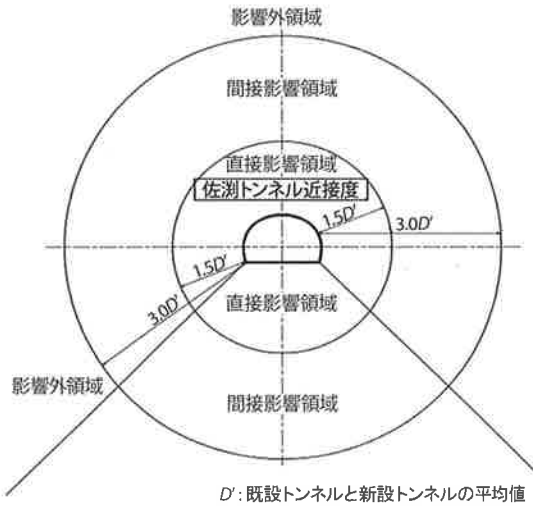


起点側坑口から鳥取方面



終点側坑口から佐用方面

写真-1 坑口部着手前写真

図-4 近接度の区分¹⁾

山体中心部に向かって岩盤状況は良好となり、トンネル中心部付近にはCH級相当の新鮮硬質な花崗岩(最大で一軸圧縮強度 $150\text{N}/\text{mm}^2$ と推定される)が分布している。

Ⅰ期線とⅡ期線の両者の純離隔距離は図-3および写真-1に示すとおり、最小で5m程度である。近接度は図-4に示す直接影響領域の $1.5D'$ (D' : 両トンネルの平均外径)を大幅に下回る $0.5D'$ 程度であり、非常に慎重な施工が要求される。このため、Ⅰ期線への影響が最小限となる施工方法として、無発破による掘削を計画した。なお、Ⅰ期線は竣工後8年ということもあって、点検の結果、覆工コンクリートの機能低下は認められなかった。

3 無発破掘削工法

3-1 掘削工法の選定

図-5に示す「掘削方式の選定フロー」によると、地山の一軸圧縮強度が $50\text{N}/\text{mm}^2$ 以上では発破掘削が経済的であるが、Ⅰ期線への発破振動の影響が懸念されたため機械掘削を選定した。しかしながら、機械掘削は花崗岩の堅硬な区間での自由断面掘削機による掘削能率の低下が想定されたため、自由断面掘削機と割岩掘削の併用とした。

3-2 割岩工法(FONドリル工法)の概要

割岩工法は、トンネル切羽に削孔した割岩孔に油圧クサビを挿入して割岩孔周辺地山に引張応力

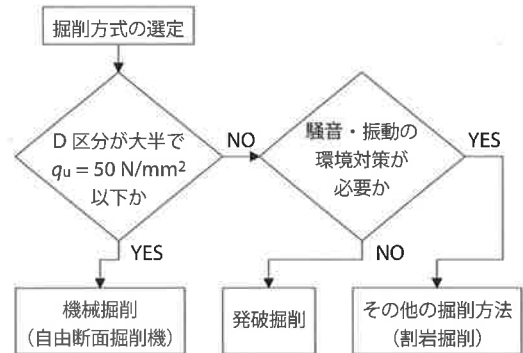
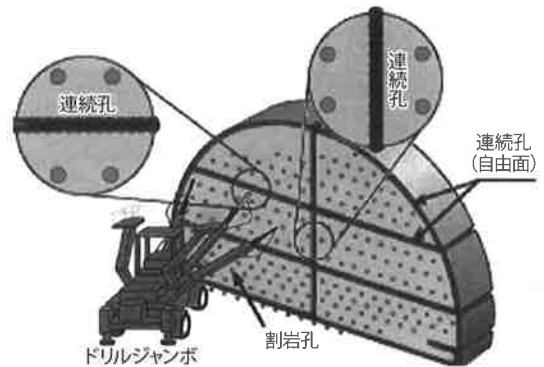
図-5 掘削方式の選定フロー²⁾

図-6 連続孔と割岩孔の関係

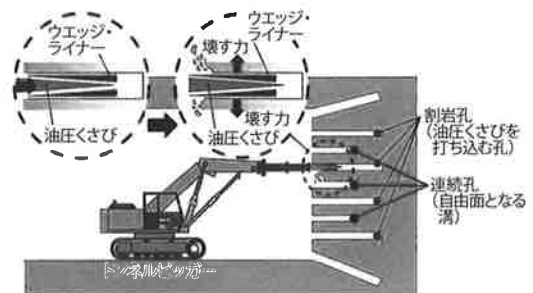


図-7 1次破碎の概要

を発生させることにより、亀裂を発生させ、この亀裂を利用してブレイカーで掘削する工法である。このとき、連続孔を削孔して自由面を形成する。自由面形成、割岩孔削孔および1次破碎に時間を要するが、振動や騒音の抑制効果は非常に大きく確実性の高い工法である。

本トンネルで採用した「FONドリル工法」は、図-6.7に示すとおり切羽の外周およびその掘削箇所単一孔を連続的に削孔して自由面を形成する工法である。本工法の特徴は、通常のドリルジャ

ンボに、図-8に示す「SABロッド」と呼ぶガイドロッドを取り付けるだけで連続孔削孔による自由面形成が可能になり、同作業用の専用機を必要としないことにある。

3-3 割岩工法の施工実績

実施工では、坑口からの掘進長が52mを超えた位置から一軸圧縮強度が50N/mm²を超え、自由断面掘削機から割岩掘削に切り替えた。図-9に示すとおりDI-b区間の一軸圧縮強度はおおむね

60~100N/mm²であるのに対し、地山の中心部となるCII-b区間の一軸圧縮強度はおおむね100~160N/mm²とかなり硬質であった。

実際の割岩孔間隔、自由面の位置や数は地山状況に応じて適切に設定することが必要であるが、標準的には図-10のように設計している。割岩削孔長は「掘進長+油圧クサビのシリンダースト

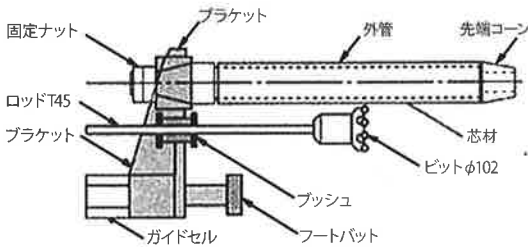


図-8 SABロッド構造部

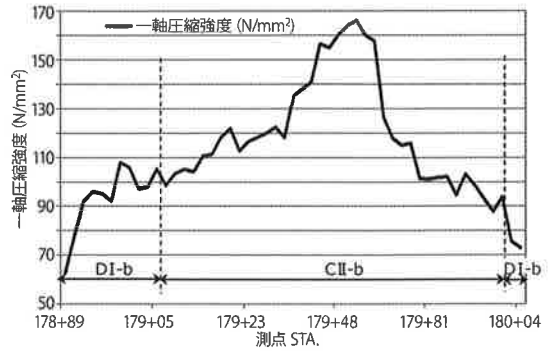


図-9 切羽岩石の一軸圧縮強度推定値

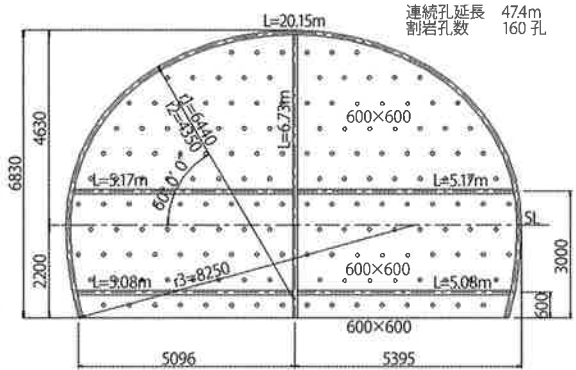
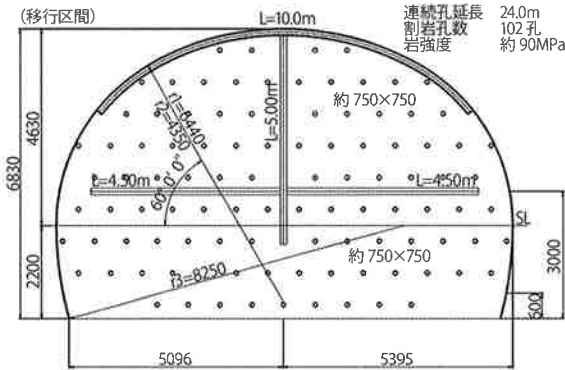


図-10 標準削孔パターン(左: DI-b, 右: CII-b)



写真-2 連続孔・割岩削孔状況(ドリルジャンボにSABロッドを付けて孔や溝を掘削)



写真-3 連続孔・割岩孔完了



写真-4 1次破碎状況(掘削した孔に油圧くさびを差し込んで岩を破碎)



写真-5 2次破碎状況(割岩された岩盤を大型ブレイカーでさらに破碎)

ローク長50cm+10cm」,自由面となる連続孔の削孔長は「掘進長+10cm」であり,掘進長1.0mに対してそれぞれ1.6mと1.1mである。また,割岩孔間隔の標準値は50~60cmである。

写真-2~5に示すように,実施工では切羽全面が同一状態ではないため,比較的割れ目が多い範囲では自由面の延長を短くし,割岩孔の間隔を広げることによって掘削効率を上げている。

4 FEM解析

本解析は,Ⅱ期線施工がⅠ期線に与える影響を把握し,安全性を評価する目的で実施したものである。解析にあたっては,トンネル周辺地山の安定(変位,せん断ひずみ,破壊領域)およびⅠ期線覆工コンクリートの増加応力の検討を行っている。このうち,せん断ひずみと破壊領域については局所的かつ非常に小さい数値であり,地山の安定が損なわれる危険は小さいものであった。

ここでは,変位と覆工応力の解析結果を以下に整理する。

4-1 Ⅰ期線の変位

Ⅱ期線の施工によって生じるⅠ期線の変位は,最大でも3mm(水平変位),1.5mm(沈下)程度と小さい。トンネル周囲の地山が硬質岩であるため,変

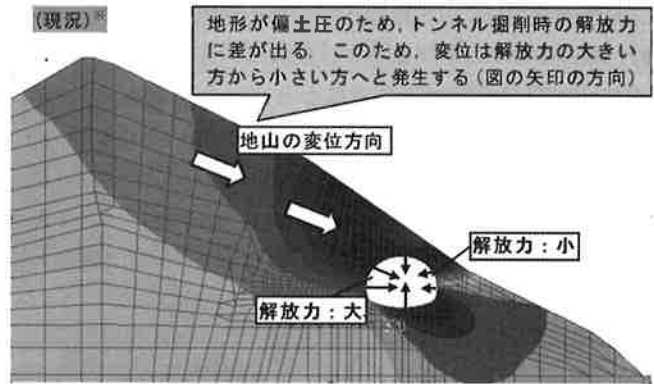


図-11 現況解析イメージ

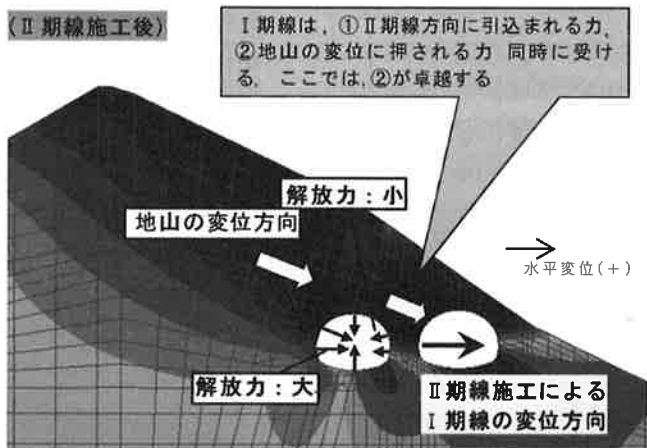


図-12 Ⅱ期線施工後解析イメージ

位も小さい結果である。

変位の方向は図-12に示すとおりである。変位は,Ⅱ期線が斜面地形の裾付近に位置していること,既に掘削完了のⅠ期線周辺地盤の応力状態や

剛性変化の影響を受けていることなどの可能性があるが、その影響は小さい。

4-2 I期線覆工の増加応力度

II期線施工によってI期線に発生する増加応力度は、設計基準強度に対する比率から求められた許容値¹⁾以内に収まる結果であった。また、増加応力がもっとも厳しくなる箇所は、アーチ部(II期線側)で外側圧縮と内側引張が、また外側引張がアーチ部(II期線と反対側)で発生する傾向となった。

5 I期線の計測

II期線掘削によるI期線への影響を管理するため、覆工コンクリート表面の目視観察に加えて表-2に示す計測を行い、表-3にもとづいた管理を

行った。

計測箇所については、図-13および表-2に示すNo.178+80のひん岩貫入箇所およびNo.179+40の土かぶり最大箇所の2か所を主計測断面とし、それを補完する6断面を副計測断面とした。

管理基準値は、FEM解析の結果および各種機関の基準¹⁾を参考として表-3に示すとおり設定している。

5-1 I期線覆工コンクリートの目視観察

I期線の目視観察は「車両巡回点検」と「覆工目地の段差計測」を実施した。「車両巡回点検」は主に落下物、漏水の有無の確認を目的とし、1日1回の頻度で実施した。「覆工目地の段差計測」は目地の段差を直接トンネル内で計測するもので、併せて覆工に生じた新たなひび割れの有無や計測

表-2 計測機器一覧(I期線)

計測項目	計測器	実施数量			
		主計測断面		副計測断面	
覆工コンクリート表面変位	レーザー距離計	天端沈下測定×1か所 内空変位測定×3測線	×2断面	天端沈下測定×1か所 内空変位測定×3測線	×6断面
覆工増加応力	ひずみ計	5か所	×2断面	—	—
温度	熱電対温度計	5か所	×2断面	—	—
振動速度	振動速度計	1か所	×2断面	—	—

表-3 I期線の計測値と管理体制一覧

管理区分	覆工変位(mm)	覆工応力(N/mm ²)		振動(cm/s)	主な対応/措置
		圧縮	引張		
通常体制	0~2.5未満	0~2.7未満	0~1.0未満	0~2.0未満	通常施工
準備体制	2.5~3.0未満	2.7~3.8未満	1.0~1.5未満	2.0~3.0未満	現場職員、作業員への周知
注意体制	3.0~4.0未満	3.8~5.4未満	1.5~1.9未満	3.0~4.0未満	掘削手順・補助工法などの検討
警戒態勢	4.0以上	5.4以上	1.9以上	4.0以上	トンネル掘削一時中止 I期線の剝落対策工の検討

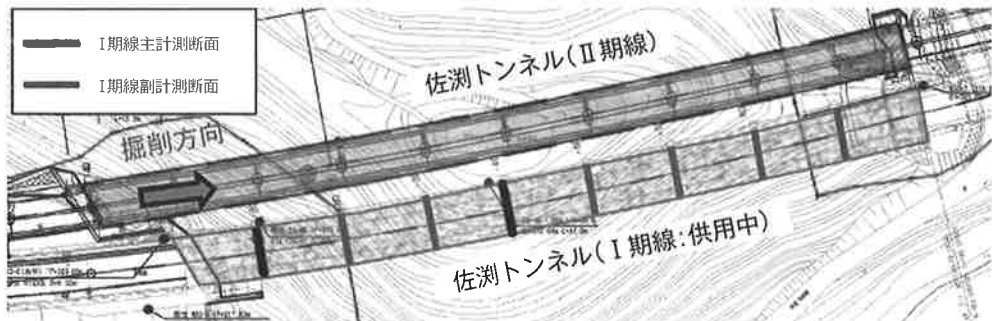


図-13 I期線計測器位置図

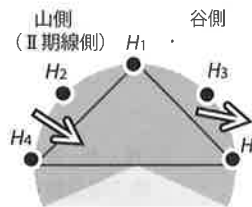
器のチェックも行った。段差計測の実施頻度は通常体制下で2回/週、準備体制下で3回/週の頻度である。両目視観察の結果、変状発生などの異常は認められなかった。

5-2 振動速度

本工事では発破掘削は行っていないが、ブレイカーにて割岩掘削での2次破碎を行うため振動速度の計測も行っている。振動速度計をⅠ期線のSTA.178+80とSTA.179+40の山側(Ⅱ期線側)覆工に設置し連続計測を行った結果を図-14に示す。STA.178+80で0.125cm/s、STA.179+40で0.149cm/s(いずれも最大値)であった。本地点では、上半切羽が計測点の1D距離まで接近した時点から0.5D距離を通過するまでの間、管理基準における「通常体制」の上限値(2.0m/s)よりもかなり小さい値であったことが確認されている。

5-3 覆工応力

図-15に覆工応力の収束値を示す。計測の結果、収束値は圧縮の場合で最大2.19N/mm²、引張の場合で最大0.92N/mm²であった。Ⅱ期線側が引張、Ⅱ期線反対側が圧縮となっており、山側から谷側への地山の変位に押されるというFEM解析と同様の傾向を示している。



5-4 覆工コンクリート表面変位

本工事ではⅠ期線が供用中であり、測点を坑外の不動点と直接関連づけることが困難であった。このため、不動点を設けることなく、計測精度も確保できる方法としてレーザー距離計を採用した。図-16に全測線で実施した変位計測の収束値を示す。計測の結果、もっとも大きな変位が認められたのはSTA.178+80で、伸長方向に3.09mm、収縮方向に3.03mmであった。

変位についてもⅡ期線側が伸長、Ⅱ期線反対側が収縮となっており、山側から谷側への地山の変位に押されるというFEM解析と同様の傾向を示している。

覆工応力計測結果(収束値: +引張, -圧縮(N/mm²))

測線 No.	計測点 No.				
	H1	H2	H3	H4	H5
STA.178+80	-0.87	-0.31	-2.19	+0.92	-1.11
STA.179+40	+0.13	-0.80	-0.90	+0.20	-1.03

図-15 覆工応力計測結果

変位計測結果(収束値: +伸長方向, -収縮方向(mm))

測線 No.	計測点 No.			
	S1	C1	C2	C3
STA.178+80	-2.64	+3.09	-3.03	+0.57
STA.179+00	-0.78	+0.54	-1.92	+0.83
STA.179+20	-0.33	-0.39	-0.84	+1.55
STA.179+40	-0.47	+0.71	-1.12	+0.80
STA.179+60	+0.07	+0.25	-1.12	-0.09
STA.179+80	-0.46	-0.68	-1.89	-0.52
STA.180+00	+0.77	+1.84	+0.78	+0.51
STA.180+20	-0.48	+0.17	+0.16	+0.16

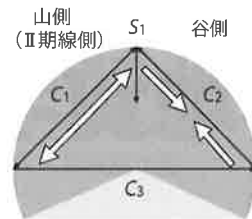


図-16 内空変位と切羽位置の関係図

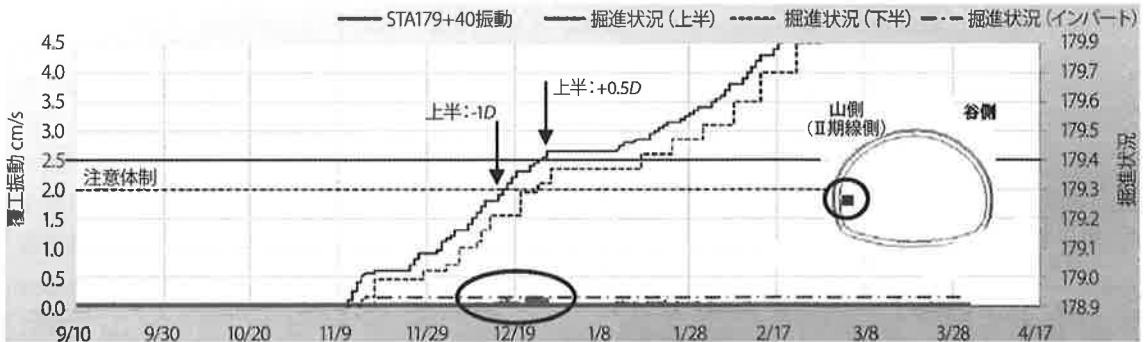


図-14 振動速度と切羽位置の関係図

している。

STA.179+00では12月23, 24日に警戒態勢に該当する4.0mmに近づく変位増加が生じたが、切羽が離れるに従い減少傾向に転じた。上記2測点は風化の進行したひん岩層に当たっており、II期線掘削においても比較的大きな変位を計測した区間である。これ以降の測点では、警戒を必要とする値は計測されていない。また、全測点を通じて応力と変位の両者が同時に警戒レベルに達することはなく、結果としてI期線に損傷もしくはその可能性を示唆する影響は生じなかったと考えられる。

6 おわりに

本工事では既設トンネルからの純離隔距離5mでのトンネル掘削を行った。既設トンネルは建設後8年であり、覆工コンクリートも健全な状態であったが、供用中であることから通行車両の安全を最優先として機械掘削と割岩掘削を併用した施



写真-6 起点側坑口全景

工を行った。また、各計測項目についておむねFEM解析で想定した傾向を示すとともに許容値以下に収まり、施工完了後のI期線点検においても変状などは発生していない。

参考文献

- 1) 西・中・東高速道路：設計要領，第三集 トンネル本体工保全編（近接施工）2016.8.
- 2) 国土交通省：第5章トンネル工，土木工事標準積算基準書2016.4.

わかりやすい 土木地質学

大島洋志 監修

B5判 209頁 本体価格2,500円

主要目次

序編 トンネルと地質の関わり

1. 地質学とは、応用地質学とは 2. トンネルと地質

第I編 トンネル工事に必要となる基礎的地質学

1. 地球の構造 2. 地層や岩石の分類 3. 地質作用 4. 地質構造 5. 地形と地質との関わり 6. 日本の地質 7. 地下水

第II編 トンネル工事と地質条件

1. 路線選定と地質条件 2. トンネル工法・掘削工法と地質条件 3. 掘削方式と地質条件 4. トンネル掘削に伴う地質的現象

第III編 地質調査法

1. 地形・地質調査一般 2. 既存資料調査 3. 空中写真判読 4. 地質路査 5. 弾性波探査 6. 電気探査 7. その他の物理探査法
8. ボーリング調査 9. ボーリング孔を利用して行う調査 10. 室内試験 11. 調査坑調査（施工・維持管理段階の調査含む）
12. 水文調査・地下水調査 13. 立地条件調査

第IV編 工事を対象とした地質調査の進め方

1. 調査の基本 2. 地山条件の調査の流れ 3. トンネル工事のための地山評価法 4. 調査の成果



株式 土木工学社

〒162-0832 東京都新宿区岩戸町16メイジャー神楽坂
電話 (03)3267-2888 (代) 振替00110-8-190072