

既設トンネル断面拡幅掘削時の 地山挙動計測結果事例

高橋 裕之¹・高山 慎介²・廣松 直人³・
巽 義知⁴・伊藤 和生⁵・三幣 亮⁶

¹正会員 青木あすなろ建設(株) 建設技術本部 (〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町 1)
E-mail: HiroyukiTakahashi@aaconst.co.jp

²正会員 青木あすなろ建設(株) 建設技術本部 (〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町 1)
E-mail: Shinsuke.Takayama@aaconst.co.jp

³正会員 青木あすなろ建設(株) 建設技術本部 (〒101-0053 東京都千代田区神田美土代町 1)
E-mail: naoto.hiromatsu@aaconst.co.jp

⁴正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
E-mail: tatsumi-y173bt@pwri.go.jp

⁵君津市建設部道路整備課 (〒299-1192 千葉県君津市久保 2-13-1)
E-mail: douro-k@city.kimitsu.lg.jp

⁶君津市建設部道路整備課 (〒299-1192 千葉県君津市久保 2-13-1)
E-mail: douro-k@city.kimitsu.lg.jp

供用後 50 年以上経過するトンネルが増加しており, 狭隘な断面による周辺交通への影響や, 材質劣化や漏水が生じるなどの老朽化のため更新が必要となるケースの増加が見込まれる. 従来の更新工法では経済性や施工時の制約等に課題が多い. これらの課題の解決策として, トンネル拡幅時の地山の力学特性に適応した支保構造の合理化や, 安全性と施工性を考慮したプロテクタの合理化が検討されているが, 現状では断面拡幅工事の実績や計測データが少ない. そのため, 今回, 実際の拡幅工事において断面拡幅時の既設トンネルへの影響, 新設トンネルに作用する応力に関して計測を行ったので報告する.

Key Words: re-excavation, widening cross section, measurement

1.はじめに

供用後 50 年以上経過した古いトンネルが増加しており, 材質劣化や漏水が生じる等の老朽化の進行や, トンネル断面が狭隘なことに起因した大型車両のトンネル壁面への接触, 交通渋滞, 歩行者への危険等の懸念により更新が必要なケースの増加が見込まれる. トンネル断面が狭隘な場合, 更新時には既設トンネル断面を拡げる拡幅掘削が実施されている. このような拡幅掘削は, 工事実績が少なく技術的な知見の少ない現状では, 新たにトンネルを掘削する場合の既存の基準類を参考に設計・施工されることが多い. しかし, 既設トンネル掘削による応力再配分が発生した後の地山を掘削すること等により, 設置する支保構造に生じる変位や応力が新たにトンネルを掘削する場合とは異なる

可能性がある. また, 迂回路がなく車両を通しながら拡幅掘削する活線施工では, 作業スペースが狭隘で作業効率が大幅に低下することや, 通行車両の安全を確保するプロテクタによる工事費の増大等の課題がある.

そのため, 既往の研究において, 解析的検討が行われており, 拡幅掘削時は, 新たにトンネルを掘削する場合に比べて支保構造に余裕があることが示唆されている¹⁾. また, 狭隘な施工スペースにおける効率的な設計・施工方法や, 安全性と施工性を考慮したプロテクタの合理化が検討されている²⁾. しかしながら, これらを検証する拡幅掘削の計測データは少ない. そこで, 今回, 拡幅掘削時の支保構造, プロテクタ等の合理化に向けて, 実際の拡幅工事において拡幅掘削時の既設トンネルへの影響, 新設トンネルに作用する応力に関して計測を行ったので報告する.

2.工事概要

(1)既設トンネル概要

千葉県君津市の清水トンネルは、約 50 年前の 1970 年頃に幅員約 5m、内空断面積約 30m²で矢板工法で新設されたが、詳細な工事データは残っていない。その後、1987 年に総延長 246.2m（補強拡幅後総延長 247m）のうち起点側 108.5m を、矢板工法で断面拡幅したが、終点側 137.7m は幅員約 5m のまま未施工で、車両のすれ違いができない 1 車線トンネルとなっており、円滑

な交通の妨げとなっていた（図-1、写真-1）。また、拡幅未施工区間の覆工コンクリートは、平成 28 年度トンネル調査業務において、外力と材質劣化で早期に対策が必要である対策区分「Ⅲ」の判定を受けている（次頁図-2）。さらに、事前調査において、拡幅未施工区間の覆工背面に空洞が存在しており、拡幅未施工区間中間部では、縦断方向斜めに断層が横断していることが確認されている。断層がトンネル上部を横断している区間と外力による対策区分「Ⅲ」と判定された範囲は一致していた。

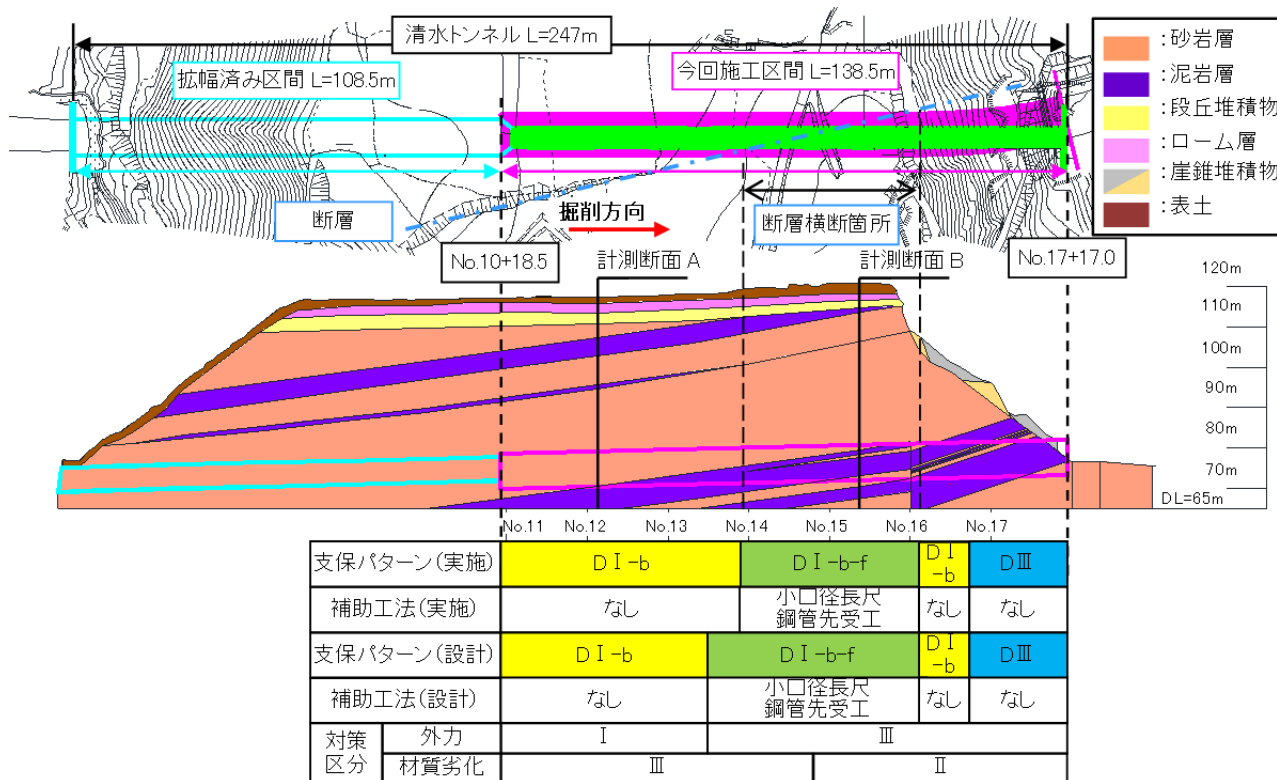


図-1 清水トンネル平面・縦断図



写真-1 清水トンネル拡幅未施工区間

3.計測概要

計測概要を図-1、図-4、表-2に示す。

(1)計測目的

①は、施工前の既設覆工コンクリートの応力状態把握を目的とした。新設トンネルで実施する計測②～⑦は主に、拡幅掘削時における周辺地山の挙動、支保効果の把握を目的とした。既設トンネル内で実施する計測⑧～⑩は主に、拡幅掘削による既設トンネルへの影響把握を目的とした。

(2)計測測点・計測時期

計測箇所は、先受け工を実施しない測点 No.12+2.5（以後、計測断面 A）と小口径長尺鋼管先受け工を採用する測点 No.15+7.5（以後、計測断面 B）の2断面とした。

①は拡幅掘削開始前に3軸ひずみゲージを用いて測

定した。②、④～⑥は支保工完了時に計測器を設置して計測を開始し、インバート完了後まで計測を行った。③、⑧、⑨は、拡幅掘削に伴う既設覆工掘削開始前に既設トンネル内に計測器を設置し、施工開始から切羽前方10mに近づくまで計測した。これは、既設覆工コンクリートは1スパン約10mであり、拡幅掘削に伴い、既設覆工コンクリート崩落の危険性があるためである。なお、③は切羽到達後、拡幅した断面に盛替えてインバート完了後まで計測を行った。これにより、トンネル掘削開始前から切羽通過後の切羽進行に伴う変位を計測している。⑦は、計測断面A、Bそれぞれ10m手前まで拡幅掘削した後、AGF鋼管（φ114.3mm、6mm、12.5m）を前方へ約10度の角度で打設し、端末管撤去後の管内に水平傾斜計を1m間隔で8個設置した。⑩は振動速度計、振動レベル計の2種類の計測器を用いて、切羽の前方15m～25mの既設覆工コンクリートに発生する振動を計測した。

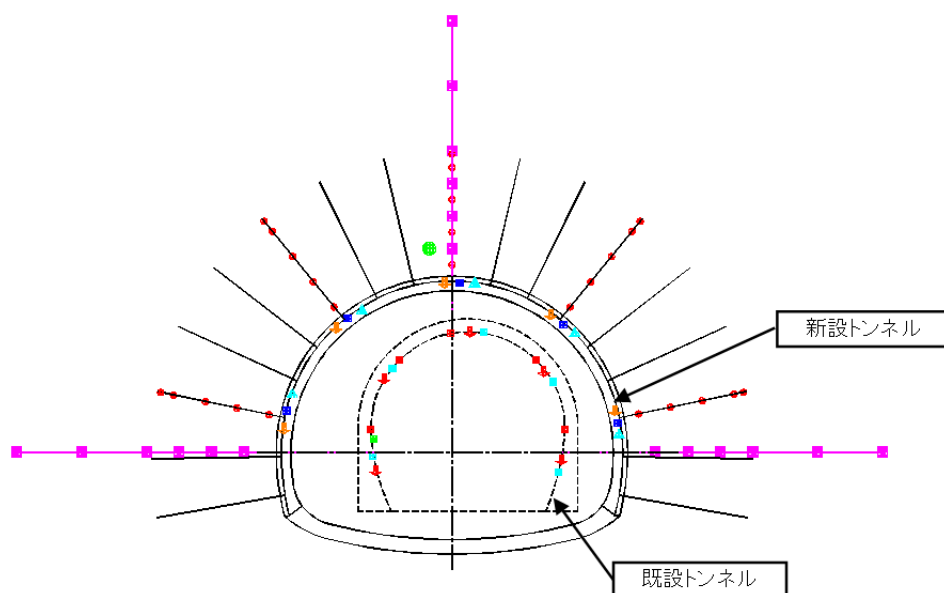


図-4 計測工図

	番号	計測項目	計測箇所	計測断面	計測時期	記号
初期応力	①	既設覆工コンクリート初期応力測定	既設トンネル天端部・左右肩部・左右側壁部	A, B	掘削開始前	■
新設トンネルでの計測	②	天端沈下・内空変位測定	天端部・左右肩部・左右SL部	A, B	インバート完了まで	↓
	③	地中変位測定	天端部・左右SL部（深度1m, 2m, 3m, 4m, 6m, 8m）	A, B	インバート完了まで	—■—
	④	吹付けコンクリート応力測定	天端部・左右肩部・左右SL部	A, B	インバート完了まで	▲
	⑤	鋼アーチ支保工応力測定	天端部・左右肩部・左右SL部	A, B	インバート完了まで	■
	⑥	ロックボルト軸力測定	天端部・左右肩部・左右SL部 （深度0.5m, 1.5m, 2.5m, 3.5m, 3.9m）	A, B	インバート完了まで	●
	⑦	先行沈下測定	トンネル上部	A, B	切羽通過時	●
	⑧	既設覆工変位測定	既設トンネル天端部・左右肩部・左右側壁部	A, B	切羽手前10mまで	↓
既設トンネルでの計測	⑨	既設覆工ひずみ（周方向）測定	既設トンネル天端部・左右肩部・左右側壁部	A, B	切羽手前10mまで	■
	⑩	既設覆工振動測定	既設トンネル左SL部	A, B	切羽手前15mまで	■

表-2 計測項目一覧

4. 計測結果

(1)既設覆工コンクリートの初期応力

既設覆工コンクリートの初期応力は、掘削開始前に測定した周方向応力の計測値と別途行った骨組構造解析（自重のみ作用）の解析値を比較すると、計測値の方が、全体的に圧縮側となっており、大きな土圧が作用していたことが想定される（表-3）。

表-3 初期応力測定結果と解析値

既設覆工コンクリート初期応力(N/mm ²) (+: 引張, -: 圧縮)					
	左SL部	左肩部	天端	右肩部	右SL部
計測断面A	-24.6	-6.4	-5.3	-7.8	-22.6
計測断面B	-11.3	-1.3	-1.1	-0.4	-13.8
解析値	-0.9	-0.1	0.8	-0.1	-0.9

表-4 天端沈下・内空変位計測結果まとめ（最終値）

天端沈下・内空変位	天端沈下 (mm)	SL左部沈下 (mm)	SL右部沈下 (mm)	SL部内空変位 (mm)
計測断面A	-0.8	-1.2	-1.5	-0.2
計測断面B	-0.9	-2.1	-1.6	-1.0

(2)新設トンネルでの計測結果

a)②天端沈下・内空変位, ③地中変位, ⑦先行沈下

天端沈下・内空変位は、計測断面 A・B とともに掘削直後からほぼ動きがなく、1～2mm 程度で収束した。限界ひずみにより設定した天端沈下の 1 次管理値 8.2mm に対して非常に小さい結果となった（表-4）。

地中変位は、計測断面 A の天端では掘削面近傍において、掘削直後に内空側に約 6mm の変位が発生し、その後ほぼ変化はなく、6.2mm で収束した（図-5）。計測断面 B の天端では全体に 1mm 未満の変位となった（図-6）。計測断面 B では先受け工が施工されており、変位が抑制されたことが考えられる。SL 部の地中変位は、計測断面 A・B 共に全体に 1mm 未満で掘削直後からほぼ変化はなかった。

先行沈下は、新設断面の天端上方 1.5m で計測した計測断面 A で 0.1mm 以下、計測断面 B で 0.3mm 程度と非常に小さい結果となった。また、新設断面の天端上方約 0.3m で計測した No.11+7.5, No.12+2.5 の先行沈下も 0.5mm, 0.4mm と小さい結果であった（図-7）。掘削に先行した緩みは、ほぼ生じていなかったと考えられる。

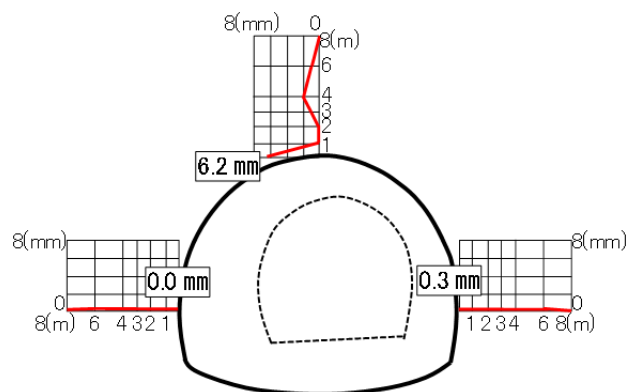


図-5 計測断面 A 地中変位計測結果（最終値）

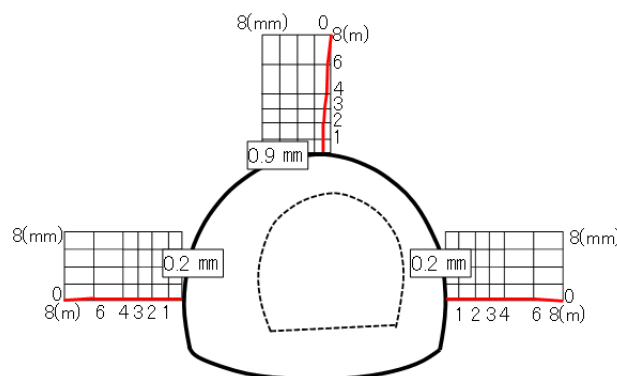


図-6 計測断面 B 地中変位計測結果（最終値）

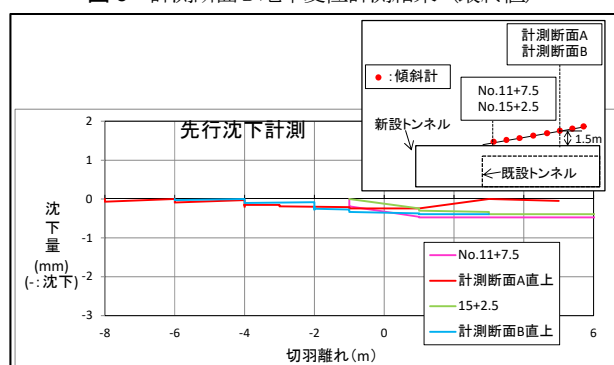


図-7 先行沈下測定経距変位図

b)④吹付けコンクリート応力、⑤鋼アーチ支保工応力、
⑥ロックボルト軸力

吹付けコンクリート応力の計測結果は、 1N/mm^2 以下で許容応力 18N/mm^2 に対して小さく、切羽進行に伴う変化も見られなかった（図-8、図-9）。

鋼アーチ支保工応力は計測断面 A の右肩部と右 SL 部、計測断面 B の天端と左肩部で $50\sim 60\text{N/mm}^2$ （圧縮側）とやや大きくなっており、切羽進行に伴い応力が増加する傾向が見られたが、許容応力 245N/mm^2 （SS400 降伏応力）に対して十分余裕のある範囲で収束している（図-10、図-11）。

ロックボルト軸力は計測断面 A・B 共に $0.5\text{m}\sim 2.5\text{m}$ 付近で最大となり、最大値は計測断面 A 左 SL 部の 20.8kN であった。また、 3.5m 以上では小さくなっていた（図-12、図-13）。ロックボルトの長さに関しては妥当であるが、軸力は降伏耐力 176.5kN に対して小さく余裕があった。

以上より、拡幅掘削時、新設トンネル断面に生じる変位、応力はともに小さく、支保構造に余裕がある結果となった。このことから、掘進長の延長や支保パターンの軽減、ロックボルト本数の削減の可能性が考えられる。

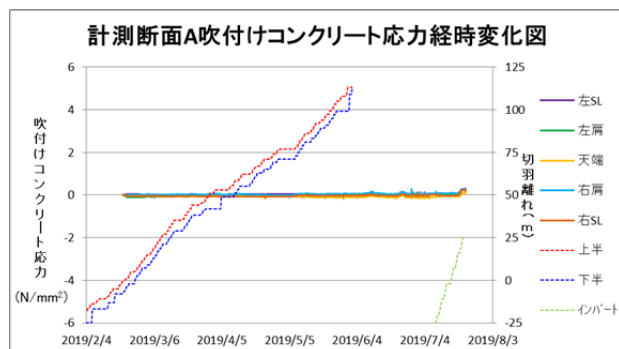


図-8 計測断面 A 吹付けコンクリート応力経時変化図

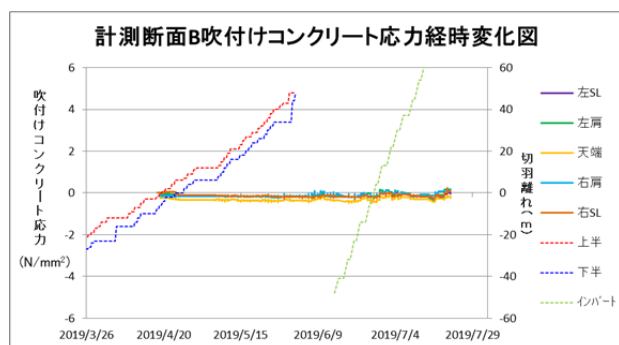


図-9 計測断面 B 吹付けコンクリート応力経時変化図

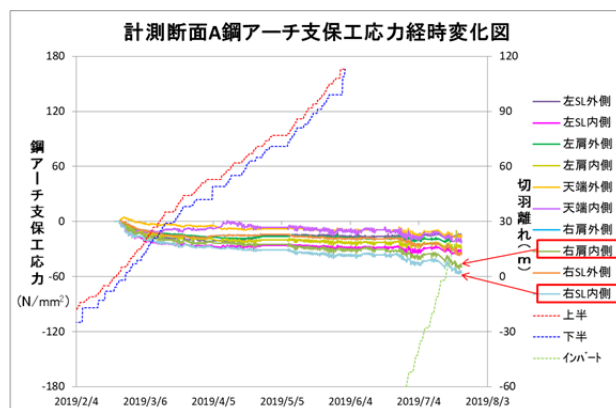


図-10 計測断面 A 鋼アーチ支保工応力経時変化図

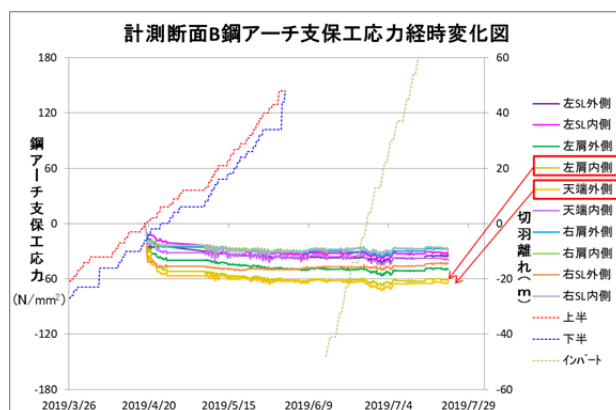


図-11 計測断面 B 鋼アーチ支保工応力経時変化図

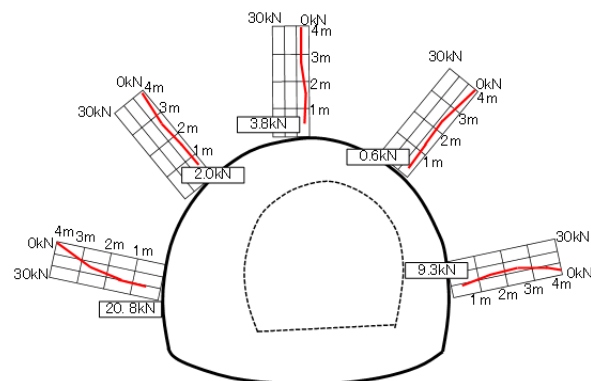


図-12 計測断面 A ロックボルト軸力（最終値）

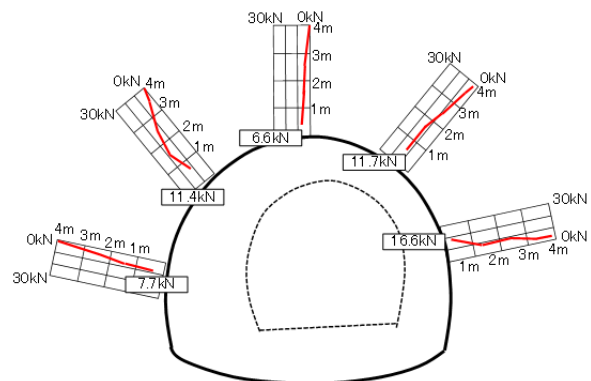


図-13 計測断面 B ロックボルト軸力（最終値）

(3)既設トンネルでの計測結果

a)⑧既設覆工変位測定, ⑨既設覆工ひずみ測定

既設覆工変位測定, 既設覆工ひずみ測定は, 前述の通り新設トンネルの切羽が 10m 手前に接近した時点で計測を終了している。

既設覆工変位は, 新設トンネルの切羽が 10m 手前に接近した時点で全て 2mm 以下(表-5)と小さい値であり, 切羽接近に伴う急激な変位の増加もなかった。

既設覆工ひずみは, 計測断面 A の右肩部において, 新設トンネル切羽が 18m 手前付近から掘削の影響を受け始め, 16m 手前と 13m 手前, 11m 手前掘削時において, 圧縮側に段階的に増加し, その他の測点は, 一時的に引張側へ増加した。新設トンネルの切羽が 10m 手前に接近した時点では, 右肩部で圧縮側に 60 μ 程度の増加であり, その他測点ではほぼ 0 と, 変状が生じるような大きな値には至らなかった(図-14)。

b)⑩振動計測

振動計測は, 新設トンネル切羽が 15m 手前に接近するまで行った。振動速度の最大値は, 新設トンネル切羽が 15m 手前の掘削時, 約 1.2kine であった(表-6)。

これは, 大勢の人が感じる程度の揺れで, 戸障子がわずかに動く程度の振動³⁾である。覆工コンクリートの許容振動値を 4kine³⁾(安全率 5)と考えれば, 今回の計測値は十分小さな範囲であった。

振動レベルは, 最大値約 45dB と暗振動程度しか計測されなかった(表-7)。

⑧~⑩の計測結果より, 新設トンネル切羽が 15m 手前に近づくまでは, 断面拡幅掘削に伴う変状を発生させるような大きな既設覆工変位・応力の増加, 振動の

発生は認められなかった。切羽が 15m 手前に近づくまでは, 拡幅掘削の既設覆工への影響は小さいことが分かった。一般車両を通行させながら施工する活線施工時におけるプロテクタ延長の目安としては, 5m の余裕を考慮する場合は, 切羽から 20m 程度になると考えることができる(図-15)。

表-5 既設覆工変位測定結果(最終値)

	天端・脚部沈下(mm) (-:内空側,+:地山側)				
	左側壁部	左肩部	天端	右肩部	右側壁部
計測断面A	-1.1	-0.5	0.5	-1	-0.6
計測断面B	-1.9	0.6	0.1	-1.2	0.2

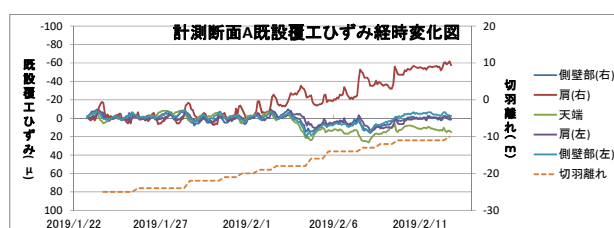


図-14 計測断面A既設覆工ひずみ経時変化図

表-6 振動速度(最大値)

方向	高さ方向	横断方向	縦断方向
単位:	kine	kine	kine
振動速度	1.183	0.003	1.117

表-7 振動レベル(最大値)

方向	高さ方向	横断方向	縦断方向
単位:	dB	dB	dB
振動レベル	45.3	42.1	36.6

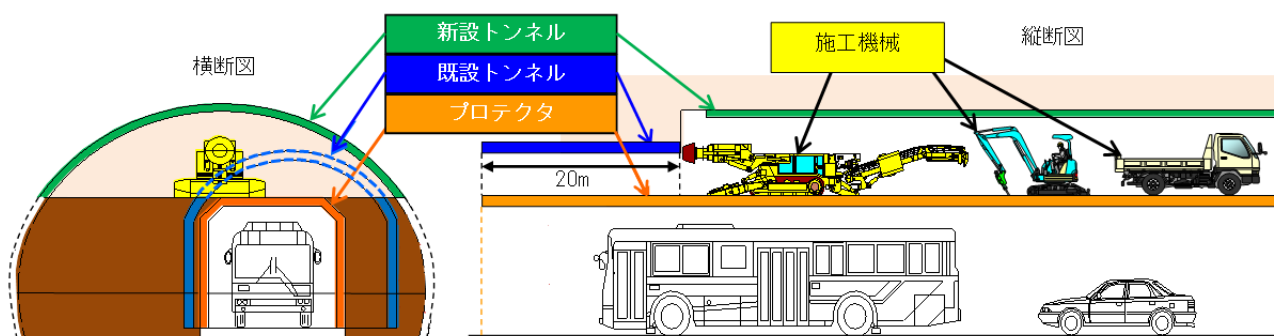


図-15 活線施工を行う場合のイメージ

5.まとめ

今回の計測対象としたトンネルは、トンネル調査業務において、外力と材質劣化で対策区分「Ⅲ」と判定される劣化の進んだトンネルであり、掘削開始前に測定した既設覆工の初期応力から、大きな土圧が作用していることが想定された。そのようなトンネルにおいても、今回の計測結果から、トンネルの断面拡幅掘削時の天端沈下、内空変位、地中変位、および先行沈下は小さく、また、鋼アーチ支保工、吹付けコンクリートに発生する応力、ロックボルトに発生する軸力は、新設トンネルで設計される支保構造に対して小さいという結果が得られた。このことから、断面拡幅トンネルにおいて、掘進長の延長や支保パターンの軽減、ロックボルト本数の削減の可能性が示された。また、既設覆工変位測定、既設覆工ひずみ測定、既設覆工振動測定結果から、切羽が 15m 手前に近づくまでは、拡幅掘削の既設覆工への影響は小さいことが分かった。一

般車両を通行させながら施工する活線施工時におけるプロテクタ延長の目安としては、5m の余裕を考慮する場合は、切羽から 20m 程度になると考えることができる。今後更に断面拡幅掘削時の計測データを収集、実現場での試験施工を行うとともに、3 次元解析等により支保工の軽減や 1 掘進長の延長の施工の安全性確認し、施工の合理化を検討する予定である。

参考文献

- 1) 小出孝明, 日下敦, 吉岡知哉, 砂金伸治: トンネル更新時の拡大掘削における支保構造に関する解析的検討, トンネル工学報告集, 第 28 巻, I -45, 2018.
- 2) 本庄武司, 高橋裕之: 1 車線を確保した活線下でのトンネル拡幅事例, 土木技術資料, 61-4, 2019.
- 3) 雑喉謙: 「発破振動の周辺への影響と対策」, pp.8-13, 鹿島出版会, 1984.

(2020.8.7 受付)

MEASUREMENT EXAMPLE OF GROUND BEHAVIOR WHEN EXCAVATING THE EXISTING TUNNEL WIDENING

Hiroyuki TAKAHASHI, Shinsuke TAKAYAMA, Naoto HIROMATSU,
Yoshitomo TATSUMI, Kazuo ITO and Ryo SANPEI

The number of tunnels that have been in service for more than 50 years is increasing, and it is expected that the number of cases requiring renewal will increase. In the old tunnels that need to be renewed, there are issues such as the influence on the surrounding traffic due to the narrow cross section, deterioration due to material deterioration and water leakage, and the occurrence of transformation into lining concrete. As one of the solutions to these problems, we are studying the rationalization of the support structure that adapts to the mechanical characteristics of the ground when the tunnel is widened and the rationalization of the protector considering safety and workability. There are few actual results and measurement data. Therefore, this time, we measured the effect on the existing tunnel and the stress acting on the new tunnel during the actual widening work.