

多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と試験適用

Development and Trial Application of a Face Safety Monitoring System Based on Multi-point Simultaneous Displacement Measurement

熊谷 幸樹^{*1}

Koki Kumagai

小川 勲^{*3}

Isao Ogawa

松田 浩朗^{*2}

Hiroaki Matsuda

藤本 克郎^{*4}

Katsurou Fujimoto

寺島 佳宏^{*3}

Yoshihiro Terashima

金子 伸^{*4}

Shin Kaneko

【要旨】

日本の地質構造は複雑で断層破碎帯等の脆弱部が多数分布するため、山岳トンネルの施工では、掘削作業中に切羽が崩壊することがある。切羽の崩壊を予測して適切な対策工を実施し、掘削作業の安全性を向上させるためには、切羽全体の挙動を連続に監視し、その安定性を評価することが重要である。そこで、筆者らはレーザ距離計を用いた多点同時変位計測による切羽安全監視システムを開発した。まず、室内実験を行って測定対象物の凹凸が測定精度に及ぼす影響を検討した。さらに、不良地山のトンネル現場において切羽挙動計測に試験適用し、その実用性を検証した。各種実験や試験適用の結果、切羽押し出し量を最小1秒間隔で、測定精度1mm以内で連続多点計測できることを明らかにした。

【キーワード】 切羽 崩壊 モニタリング リアルタイム レーザ距離計

1. はじめに

日本は複雑な地質構造であるため、山岳部でのトンネル施工において、不安定で崩壊しやすい地山に遭遇する場合がある。NATMでは、1掘進長の掘削、ずり処理後に一次支保工を施工完了するまでの間、鏡面や素掘り面が自立している必要がある。そのため、切羽付近においてこれら一連の作業を安全に施工するには、切羽挙動を常時監視しながら、その挙動に応じた適切な対策を行うことが合理的にかつ安全に施工を行う上で重要となる。そこで、筆者らは、切羽全体の挙動をレーザ距離計によりリアルタイムに多点同時計測し、切羽挙動の変化を切羽付近にいる作業員に即座に警告する切羽安全監視システムの開発を行った。

本論文では、開発した切羽安全監視システムの概要および不良地山における切羽の安全監視への試験適用結果について報告する。

2. 切羽挙動監視技術と課題

2.1 監視対象地山の特徴

ここでは、トンネル掘削で遭遇する地山の種別を、塊状地山、層状地山、軟質地山の3つに大別し、地山性状を表-1に示すように設定した。塊状地山はランダムな亀裂が発達し、切羽の安定性は割れ目の方向と性状に左右される。層状地山は層状、片状の連続した割れ目が分布

し、切羽の安定性は層理や片理の性状と走行傾斜に左右される。軟質地山は潜在的な割れ目が分布する軟岩で、切羽の安定性は地山強度や潜在的な割れ目に左右される。

これらの地山が切羽で崩壊する場合、一般に塊状地山では崩壊前の変位は小さく、湧水を伴い突発的に崩壊が発生する(写真-1,玄武岩)。軟質地山では掘削後に変位の発生と増加が見られたのちに崩壊する(写真-3,軽石凝灰岩)。層状地山では、塊状地山と軟質地山の両方の性状を有するものとした(写真-2,メランジュ)。これらの地山に対し、地山変位計測により切羽崩壊を予測する場合、塊状地山では変位計測にもとづく予測が困難で、軟質地山では予測可能であると考えられる。

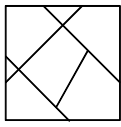
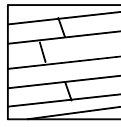
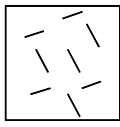
2.2 現状の切羽挙動監視技術と課題

切羽の挙動を計測、評価し、その崩壊を予測する技術としては、ひずみや変位を計測する技術や物が破壊するとき発生するアコースティック・エミッション(AE)を計測してその発生頻度の変化により崩壊の可能性を判断する技術¹⁾等があるが、ここでは、トンネル技術者が計測し、その結果を即座に評価できる地山変位計測技術に着目した。既存計測技術の概要と特徴を表-2に示す。

切羽付近では削孔、装薬、発破、ずり出し、支保施工等の一連の作業が連続的に実施されるため、切羽の挙動計測は、表-2に示す非接触での変位計測が可能な光学的計測技術が適用されている²⁾。ノンプリズム自動追

1. 建設事業本部 企画統括部 2. 建設事業本部 技術研究所 3. 東北支店 建設事業部 4. 首都圏土木支店 土木事業部

表一 監視対象地山の性状と切羽崩壊の特徴

対象地山	塊状地山	層状地山	軟質地山
項目			
地山の性状	ランダムな亀裂が発達 切羽安定性は、割れ目の方向・性状に左右される	層状、片状の割れ目 切羽安定性は、層理・片理の性状と走行傾斜に左右される	潜在的な割れ目 切羽安定性は、地山自体の硬さ、潜在クラックの頻度に左右される
岩片の硬軟	中硬岩から硬岩	軟岩から中硬岩	軟質
崩壊前の変位	変位は微小	変位は微小から中程度	変位は中～大程度
崩壊の突発性	突発性は大	突発性は小から中程度	突発性は小さい
地山変位計測による崩壊予測の可能性	困難	可能性あり	可能性大

表二 地山変位計測技術の概要と特徴

計測方法	①ノンプリズム自動追尾型TS	②レーザ変位計	③レーザ距離計
概要	専用ターゲットを設置しなくても任意箇所での3次元変位を計測する。	ノンターゲットで測定器から被測定物までの距離をレーザ光線を用いて高精度に測定する。	ノンターゲットで測定器から被測定物までの距離をレーザ光線測定する。
3次元計測	可能	困難	困難
測定精度	±数mm	数μm	±1mm
測定距離の範囲	最大100m程度	最大1m程度	最大200m程度
測定頻度	5～10秒程度/点	数十ms/点	1秒/点
同時多点計測	測点数が増えると同時計測はきわめて困難	サイクルを通じての連続的な同時計測が困難	測点数が増えても同時計測が可能



写真一 塊状地山の崩壊例



写真二 層状地山の崩壊例



写真三 軟質地山の崩壊例

尾型トータルステーション (TS) は測点の3次元変位を計測できるが、1測点の計測に5~10秒程度の時間を要し同時に多点計測ができない。レーザ変位計は測定精度が数μmと高精度であるが、測定範囲が最大1m程度であり、切羽に接近して計測する必要がある。一方、レーザ距離計は測定精度は±1mm程度とレーザ変位計よりも劣るが、測定範囲は最大100mと大きい。本開発では、崩壊前の変位量が数mmから数10mm以上と想定される軟質地山での崩壊挙動を監視することを目的とし、レーザ距離計を用いた切羽安全監視システムの開発を行うこととした。

3. 切羽安全監視システムの概要

3.1 開発目標

レーザ距離計を用いた切羽安全監視システムの開発に際し、装備すべき機能として以下の4項目を設定した。

- ①切羽全体が監視できるよう、多点同時計測ができること
 - ②計測データを指定した時間間隔 (最小1秒間隔) で逐次保存し、その経時変化を把握できること
 - ③計測値が管理値を超えると、警報、警告灯で切羽作業員に警告できること。同時に、システムに接続されたカメラでデジタル画像が保存できること
 - ④切羽全体の変位挙動を視覚的に把握できること
- 機能①および②は、得られた計測データを一元管理し、

変位量や変位速度を逐次算定することにより切羽の安定性評価をリアルタイムに実施することを目標としている。機能③および④は、切羽で作業中の作業員に評価結果を迅速に周知し、適切な行動 (作業中止、切羽から退避等) をとるように注意喚起することを目標としている。

3.2 監視システムの概要

図一に、複数台のレーザ距離計による、多点同時計測が可能な切羽安全監視システムの構成例を示す。レーザ距離計はドリルジャンボもしくは切羽近傍の鋼製支保工に設置し (写真一4、写真一5)、計測データはドリルジャンボ内に設置した制御用PC (図一1参照) にワイヤレスでデータ送信する。制御用PCで演算処理を逐次行い、計測値が管理値を超える場合には、有線もしくは無線で接続されたカメラや警告灯が作動する。

使用するレーザ距離計の仕様は以下のとおりである。

- ・メーカー、製品名: Leica DISTOTM D8
- ・測定範囲: 0.05m~200m
- ・測定精度: ±1.0mm (標準偏差の2倍)
- ・測定頻度: 最小1秒間隔
- ・備考: 制御用PCへのデータ送信は、BLUETOOTH[®]が使用可能

3.3 計測結果の評価方法

切羽安全監視システムにより得られる計測データは、

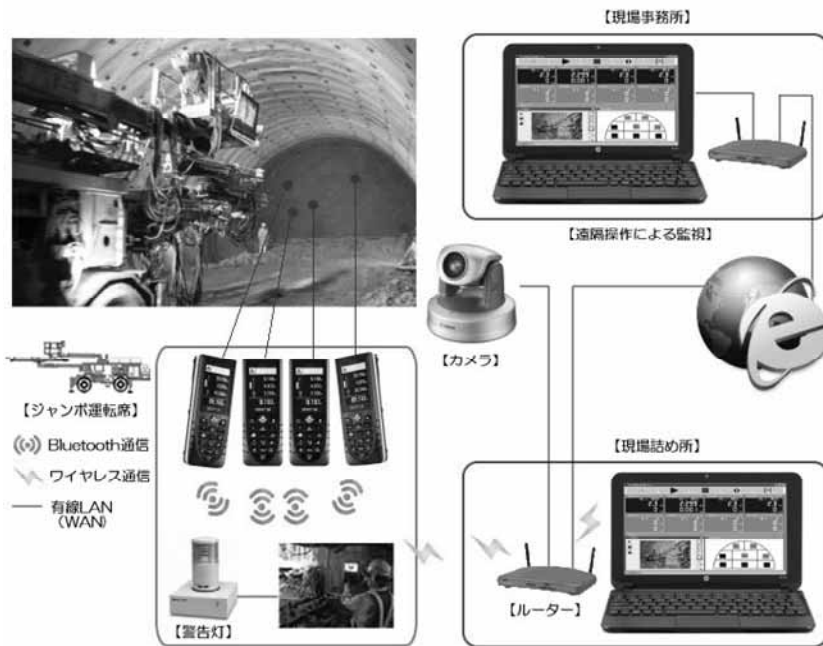


図-1 切羽安全監視システムの構成例

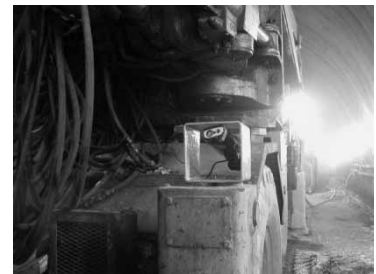


写真-4 ドリルジャンボへの設置例



写真-5 鋼製支保工への設置例

レーザ距離計から測点までの距離であり、この距離を連続的に計測することで、レーザ光の光軸方向の変位量を測定できる。ここで、レーザ距離計は切羽面に対し法線方向に設置されるとは限らないため、測定値は厳密には切羽での変位量と一致しない。しかしながら、切羽から20m後方で道路2車線断面（幅10m）の側壁にレーザ距離計を設置した場合、切羽中央で100mmの変位量が発生すると測定値は103mmとなる。このように、両者の差は3%程度と小さいため、実用上は問題ないと判断した。

表-3に、レーザ距離計による測定で得られる評価指標と評価基準を示す。地山の変位量を評価指標とする場合、地山の限界ひずみ³⁾から求められる変位量や事前の数値解析で予測された変位量と大小比較することで評価できる。本開発で対象となる軟質地山では、切羽の変位は図-2に示すクリープ曲線に従うと仮定できるものとする。変位速度を評価指標とし、変位速度がゼロになる場合には「安定」（図-2下図のケースI、ケースII）、変位速度が増大する場合には「不安定」（図-2下図のケースIII）と判断できる。

さらに、変位速度の逆数⁴⁾を評価指標とすれば、切羽崩壊までの時間を予測できる可能性がある。

開発したシステムでは、現在のところ、1台の制御用PCで最大8測点までの変位計測が可能である。掘削幅10m程度のトンネルでは、図-3に示すように切羽を8つにゾーニングし、ゾーンごとに安定性を色で識別してリアルタイム表示できる。これによって、目視では確認できない脆弱部の分布やその推移が視覚的に定量的に確認でき、切羽安定対策工の施工段階での設計および施工に活用できる。

表-3 計測結果の評価指標と基準

評価指標	1. 変位量	2. 変位速度	3. 変位速度の逆数
評価基準	限界ひずみにより算出した変位量や数値解析による変位予測値と比較して地山の安定性を判断する	変位速度の増減で地山の安定性を判断する	変位速度の逆数がゼロになる時刻から崩壊予測する

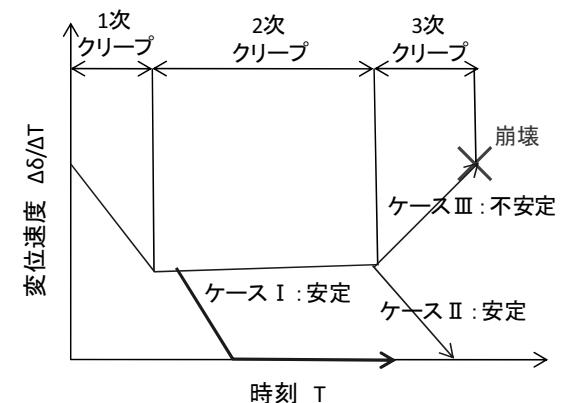
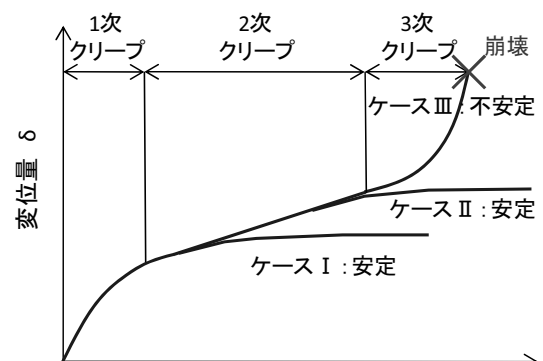


図-2 クリープ破壊を仮定した評価方法の概要

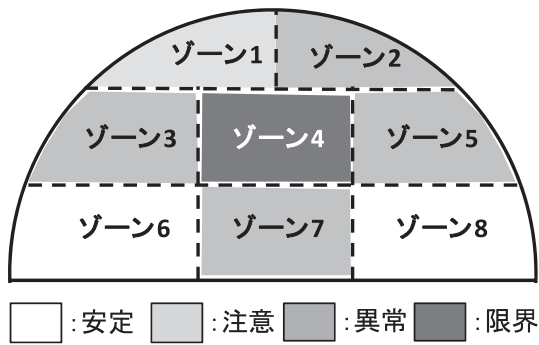


図-3 切羽安定性のゾーン表示例



写真-7 上半切羽状況：軽石凝灰岩



写真-6 測定対象物の外観

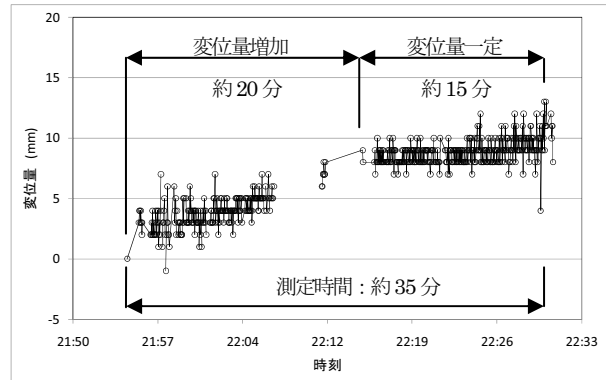


図-6 切羽押し出し量の経時変化（正：押し出し）

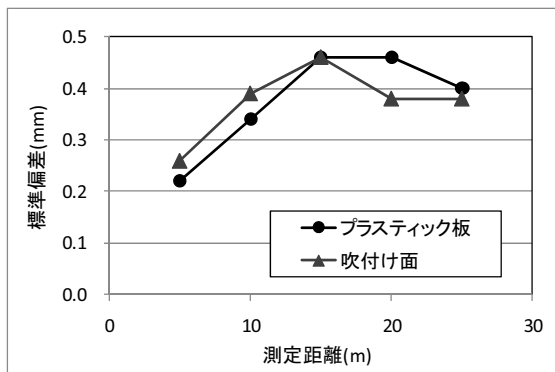


図-4 測定面の凹凸の影響

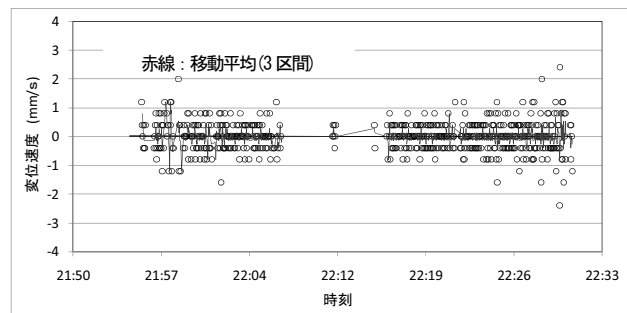


図-7 変位速度の経時変化

3.4 室内精度試験結果

レーザが照射される測定対象物の凹凸が測定精度に及ぼす影響を把握するため、平坦面と吹付け面を対象とした室内精度実験を行った。写真-6に測定対象物を、図-4に実験結果を示す。平坦面はプラスチック製の板であり、測定距離の範囲は5mから25mである。

図-4より、今回実験した測定距離では、測定値の標準偏差は照射面の種別に関係なくとも0.5mm未満で、両者の差異が小さいことから、照射面の凹凸は測定精度に影響しないと判断した。

4. 試験適用

4.1 軟質化した軽石凝灰岩地山での事例⁵⁾

(1) 適用トンネル現場の概要

変質劣化により軟質化した軽石凝灰岩の地山で、切羽崩壊がたびたび発生した道路トンネルにおいて、切羽安全監視システムを試験適用し、その有効性を検証した。

トンネル工事の概要は下記の通りである。

工事名：東北中央自動車道 大笹生トンネル工事

工期：平成19年3月20日～平成23年2月28日

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

トンネル延長：2,089m

掘削断面：約89m² (D I-b)

(2) 計測結果と考察

図-5に、土被り100m弱の軽石凝灰岩が分布するD I-bの上半中央部切羽（写真-7）で測定した計測データ

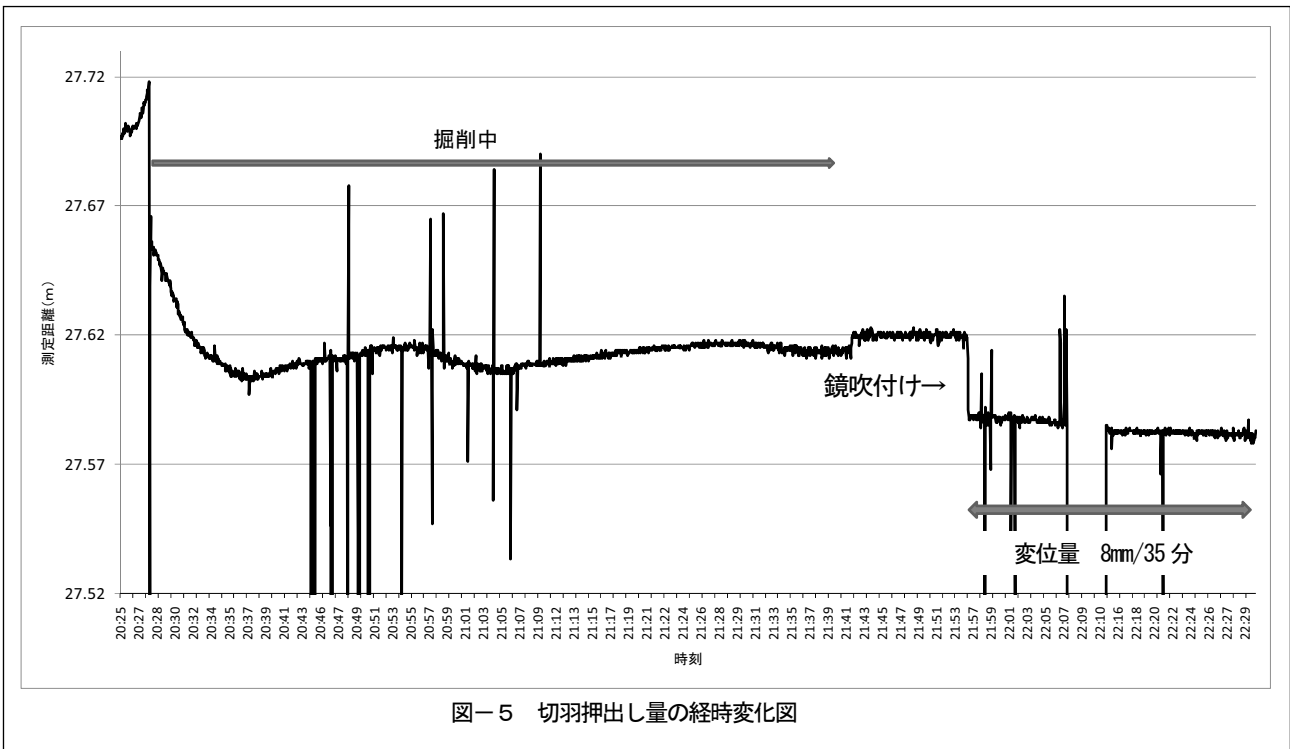


図-5 切羽押し出し量の経時変化図

を示す。また、図-6、図-7には、それぞれ鏡吹付け完了後約35分間の変位量および変位速度の経時変化を示す。

図-5より、掘削、1次吹付け中および吹付け完了後の切羽の挙動が連続的に計測できていることがわかる。また、計測箇所にて鏡吹付けが施工された前後で約30mm距離が変化していることから、鏡吹付けの厚さ管理にも活用できる。なお、図中の計測データにおいて測定値が大きく変動しているのは、レーザ距離計設置箇所と切羽測点間に掘削機械や作業員が立ち入ったことに起因していた。現状のシステムでは、測定データの変動にしきい値を設け、そのしきい値を越えた変動があった場合には計測データを自動的に破棄する機能を付加している。

次に、図-6より、鏡吹付け完了後の切羽の変位量は約20分で8mm程度発生したのち、収束していたことがわかる。これは、図-7に示す変位速度の経時変化を見ても同様のことが読み取れる。本測定断面では、切羽の変位量が10mm未満と小さいため、初期変位速度は小さかったが、切羽挙動は図-2の下図に示す「ケースII」に分類でき、測定箇所の地山は安定していたと判断できる。

以上のことから、切羽崩壊前に比較的大きな変位が発生する軟質地山においては、切羽を複数のゾーンに区分し、ゾーンごとに切羽の変位量や変位速度の変化を捉えることで切羽安定性を評価できる可能性が示された。

4.2 未固結砂質地山での事例

(1) 適用トンネル現場の概要

地下水位下での未固結地山で、切羽安定対策として注入式長尺先受け工法が適用されている道路トンネルにおいて、注入時の切羽挙動監視に試験適用し、その有効性

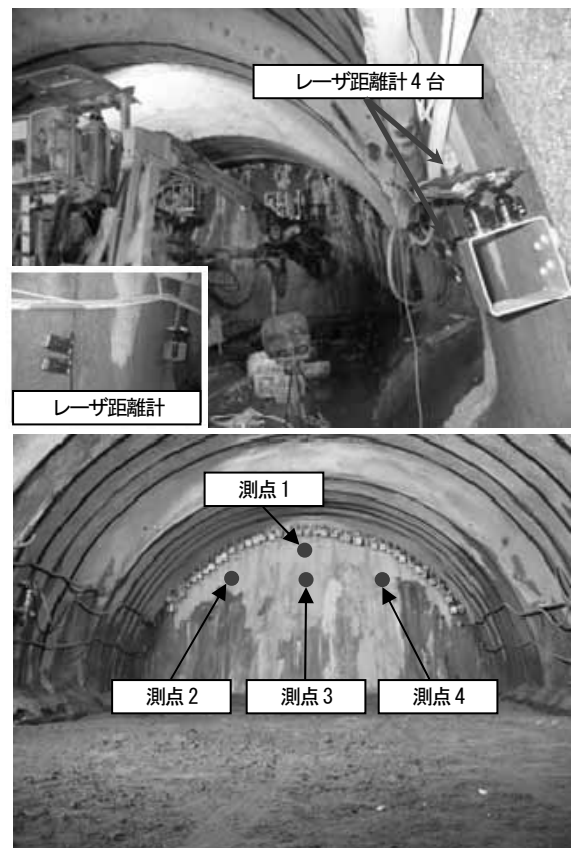


写真-8 切羽押し出し量の監視状況

を検証した。

トンネル工事の概要は下記の通りである。
 工事名：圏央道 笠森トンネルその4工事
 工期：平成22年2月26日～平成24年2月29日
 工事場所：千葉県長生郡長南町岩撫～市原市田尾
 発注者：国土交通省 関東地方整備局

トンネル延長：全長2,420m, 上半掘削
628.3m, 下半掘削690.6m, 覆工・
防水工 1,354.5m

掘削断面：約102.86m² (W-D I F)

(2) 計測結果と考察

切羽押し出し量計測は、写真-8に示す切羽安定対策工施工中に、4台のレーザー距離計を用いて実施した。図-8に測点No.3の切羽押し出し量の経時変化図を示す。

図-8より、鏡吹付けで補強された切羽は、ウレタン系注入材の注入により数mm程度押し出された後、一定値に収束していることが分かる。特に、2回目の注入時には約2.5mm押し出されていることを明確に捉えているのが分かる。このことから、本システムを切羽対策工施工時に適用することにより、対策工中の切羽の安定性を監視・評価できると考えられる。

5. おわりに

山岳トンネルの施工において、掘削作業が集中する切羽での変位挙動を常時監視し、その安定性をリアルタイムに評価することは、掘削工事の安全性を向上させるために不可欠である。本論文では、土木建築工事の測量に利用されているレーザー距離計を用いて、比較の変位量の大きい軟質地山を対象とした切羽安全監視技術の開発概要と試験適用結果を示した。その結果、軟質地山ではレーザー距離計を用いて連続的に多点で切羽挙動を計測し、変位量の収束傾向や変位速度に基づき切羽の安定性が評価できる可能性を示した。今後は類似地山や異なる岩種での適用事例を収集し、管理基準の設定方法について検討を加え、本格的に切羽の安全監視に適用していきたい。また、鏡吹付けや鏡ボルト等の切羽安定対策工の施工段階での修正設計にも活用していく予定である。さらに、本システムは簡易に、非接触で地盤や構造物の変位挙動が遠隔監視できることから、立入りが困難な法面や構造物等の動態監視にも活用したいと考えている。

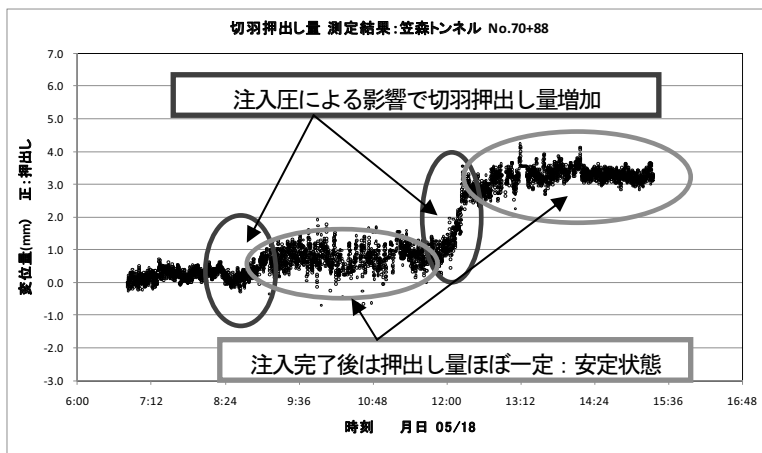


図-8 切羽押し出し量の経時変化図(測点 No.3)

謝辞：切羽安全監視システムの開発に際して、株式会社ムーヴには多くのご協力を頂いた。トンネル現場への試験適用に際しては、国土交通省東北地方整備局福島河川工事事務所、および関東地方整備局千葉国道事務所の皆様のご指導、ご鞭撻を頂いた。ここに記して謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 塩谷智基・青木朋也・藤井清司：AE斜面崩壊予測手法における基礎的研究，土木学会論文集 No.523／III-32, pp.163-173, 1996.
- 2) 瀬谷正巳：ノンターゲット式レーザー変位計を用いたトンネル地山評価について，佐藤工業(株) 技術研究所報, No.34, pp.37-42, 2009.
- 3) 桜井春輔：NATMにおける現場計測と管理基準値，土と基礎, Vol.34, No.2, pp.5-10, 1986.
- 4) 福囿輝旗：表面移動速度の逆数を用いた降雨による斜面崩壊発生時刻の予測法，地すべり, Vol.22, No.2, pp.8-13, 1985.
- 5) 寺島佳宏，小川勲，熊谷幸樹，松田浩朗，橋岡民幸：多点同時変位計測による切羽安全監視システムの開発と不良地山における試験適用，トンネル工学報告集 第20巻, pp.219-223, 2010.

Summary The cutting face sometimes collapses during the excavation of a mountain tunnel because the geological structure is complicated in Japan and numerous vulnerable sections are distributed such as fault fracture zones. Predicting the collapse of cutting face, implementing appropriate control measures and enhancing the safety of excavation work require continuous monitoring of the behavior of the entire face and assessment of face safety. Then, the authors have developed a face safety monitoring system based on the multi-point simultaneous displacement measurement using laser distance meters. First, the authors examined the effect of the unevenness of measurement objects on measurement accuracy by conducting laboratory tests. Then, the authors applied the system on a trial basis for measuring face behavior at a tunneling site in poor ground, and verified its practicality. As a result of various tests and pilot applications, it was found possible to make continuous multi-point measurement of the thrusting of the face at a minimum interval of one second and with a measurement accuracy of plus or minus 1 mm.

Key Words : Tunnel Face, Collapse, Monitoring, Real-time, Laser Distance Meter