

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

寺島 佳宏¹・小川 勲¹・熊谷 幸樹²・松田 浩朗³・檜岡 民幸⁴

¹飛島建設(株) 東日本土木支社 東北土木事業部 (〒981-8540 宮城県仙台市青葉区柏木1-1-53)

E-mail:yoshihiro_terashima@tobishima.co.jp

²飛島建設(株) 土木技術部 トンネル技術グループ (〒102-8332 東京都千代田区三番町2番地)

³飛島建設(株) 技術研究所 第一研究室 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)

⁴国土交通省 東北地方整備局 福島河川国道事務所 (〒960-8153 福島県福島市黒岩字榎平36)

日本の地質構造は複雑で断層破砕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、不良地山の切羽挙動計測に試験適用してその有効性を検証した。本報告では、監視システムの概要と不良地山での検証結果について報告する。

Key Words : tunnel face , collapse , monitoring , real time , laser distance meter

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進めている。

本論文では、開発中の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

(1) 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)。軟質地山では崩壊前に変位の発生と増加が見られたのちに崩壊する(写真-2, 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-3, メランジュ)。これらの地山に対し、地山変位計測にもとづき切羽崩壊を予測する場合、塊状地山では崩壊前の変位が微小であるため予測困難であるが、軟質地山では変位が大きいため予測可能であると考えられる(表-1参照)。

(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に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

表-1 対象地山ごとの性状と切羽崩壊の特徴

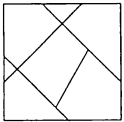
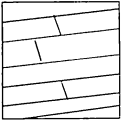
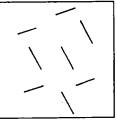
対象地山	塊状地山	層状地山	軟質地山
項目			
地山の性状	・ランダムな亀裂が発達 ・切羽安定性は、割れ目の方向・性状に左右される	・層状、片状の割れ目 ・切羽安定性は、層理・片理の性状と走行傾斜に左右される	・潜在的な割れ目 ・切羽安定性は、地山自体の硬さ、潜在クラックの頻度に左右される
岩片の硬軟	中硬岩から硬岩	軟岩から中硬岩	軟質
崩壊前の変位	変位は微小	変位は微小から中程度	変位は中～大程度
崩壊の突発性	突発性は大	突発性は小から中程度	突発性は小さい
地山変位計測による崩壊予測の可能性	困難	可能性あり	可能性大

表-2 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の三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
測定頻度	10秒程度/点	数十ms/点	1秒/点
同時多点計測	測点数が増えた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-1 塊状地山の崩壊例



写真-2 軟質地山の崩壊例



写真-3 層状地山の崩壊例

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、既存計測技術の概要と特徴を表-2に示す。

切羽では削孔、装薬、発破、ずり出し、支保工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。そこで本研究では、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

(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、多点同時計測できる
- 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

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画像の静止画が保存できる

④切羽全体の変位挙動を視覚的に把握できる

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、切羽からの退避等)をとるよう注意喚起することを目標としている。

(2) 監視システムの概要

図-1に、レーザ距離計を2台利用した同時多点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-4、写真-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-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し、作業員に注意喚起する。

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

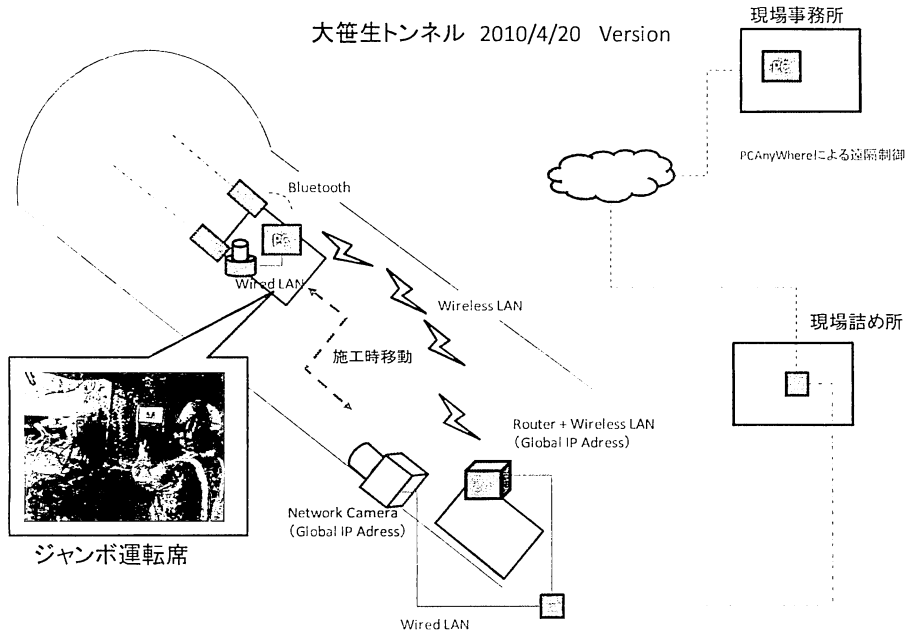


図-1 切羽安全監視システムの構成例

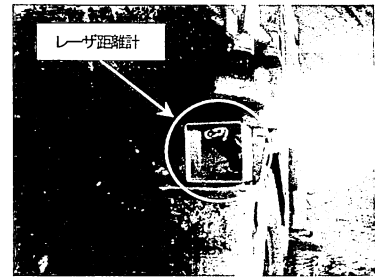


写真-4 ドリルジャンボの設置例

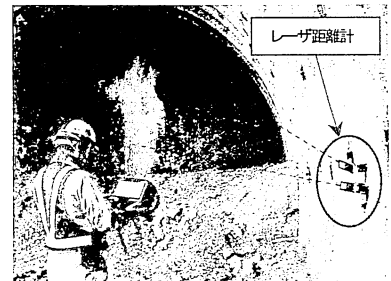


写真-5 鋼製支保工の設置例

(3) 計測結果の評価方法

得られる計測データは、レーザー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、レーザー光の光軸方向の変位量を測定できる。ここで、レーザー距離計は切羽面に対し垂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。例えば、切羽から20m後方で道路2車線断面(幅10m)の側壁にレーザー距離計を設置した場合、切羽中央で100mmの変位量が発生したとすると測定値は103mmとなる。しかしながら、両者の差は3%程度と小さいため、軟質地山の切羽監視においては実用上問題ないと判断した。

表-3に、レーザー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数値解析による変位予測値と大小比較することで地山の安定性を評価できる。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想定できることから、変位速度を評価指標とし、掘削終了後の変位速度がゼロになる場合には「安定」(図-2の下図ケースⅠ、ケースⅡ)、変位速度が増大する場合には「不安定」(図-2の下図ケース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に活用できる。

表-3 計測結果の評価指標と評価基準

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定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

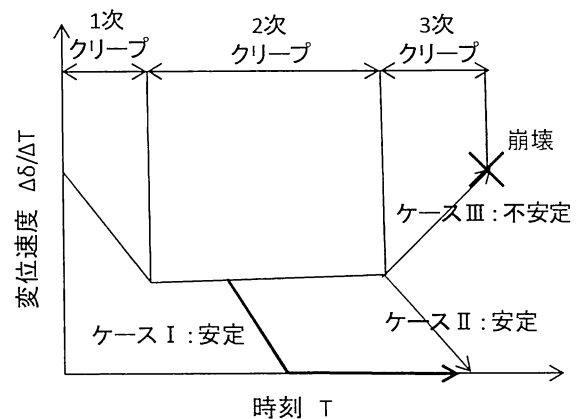
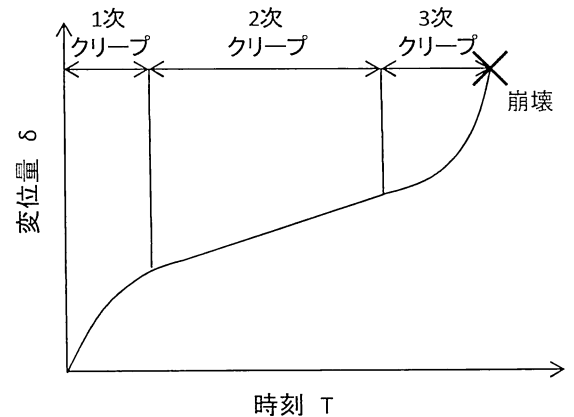


図-2 クリープ破壊する場合の計測結果の評価

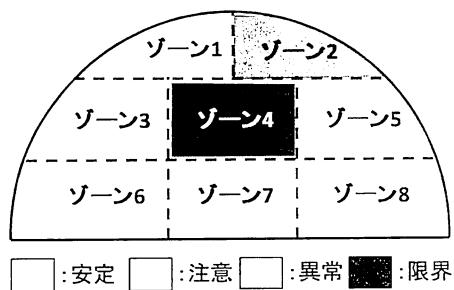


図-3 切羽安定性のゾーン表示例



写真-6 適用地山の上半切羽状況

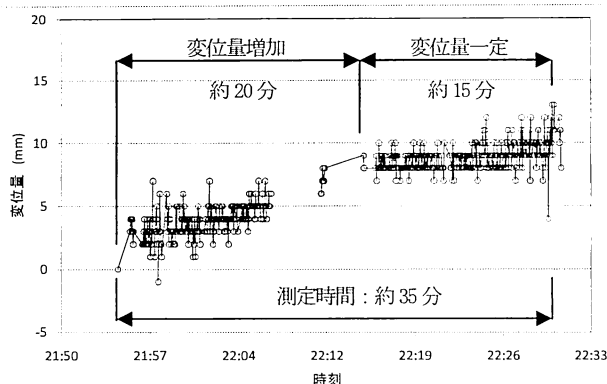


図-5 変位量の経時変化(正: 押出し)

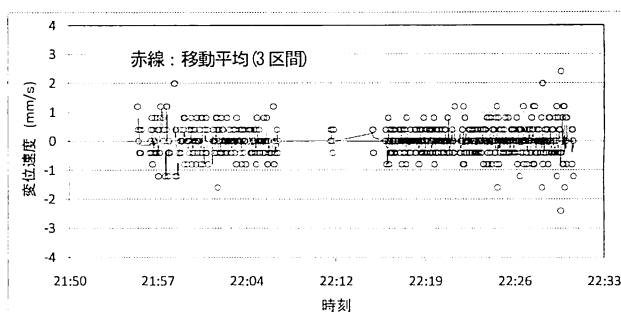


図-6 変位速度の経時変化

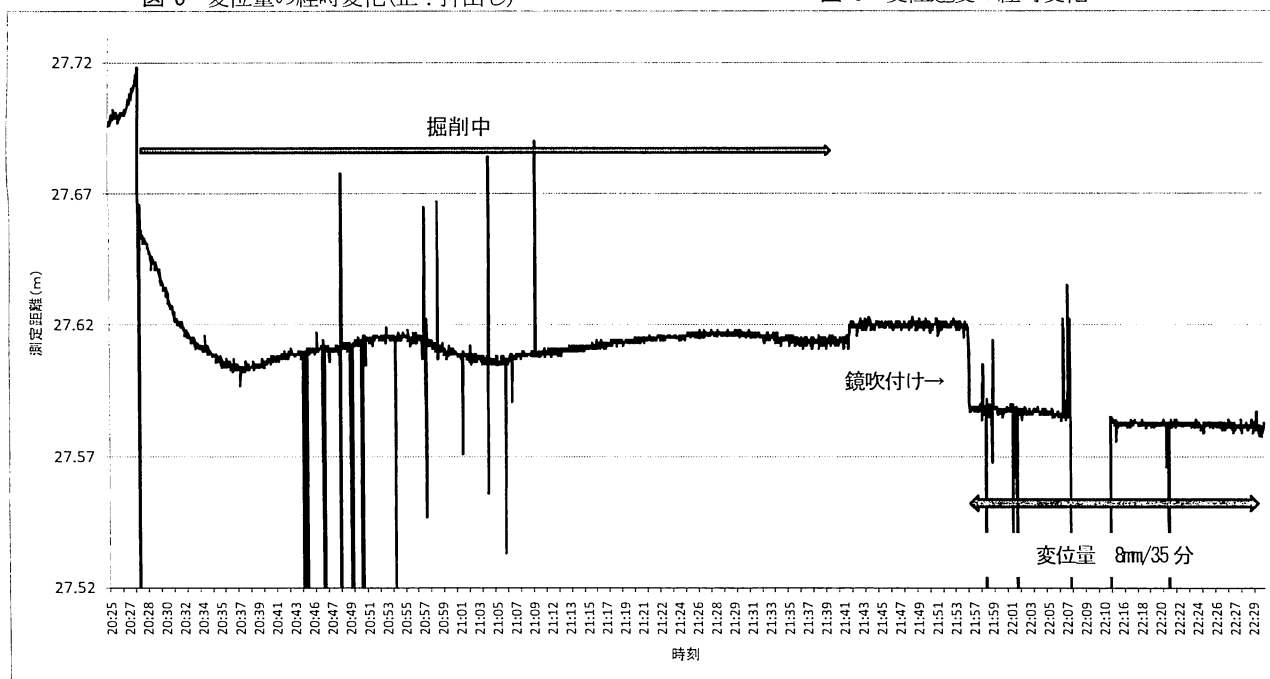


図-4 切羽の変位挙動の経時変化

4. 試験適用

(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、図-1に示した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とおりである。

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：2089m

掘削断面：約89m² (D I-b)

(2) 計測結果と考察

図-4に、土被り約93mの軽石凝灰岩が分布するD I-bの上半中央部切羽(写真-6)で測定した計測データを示す。

また、図-5、図-6には、それぞれ鏡吹付け完了後約30分間の変位量および変位速度の経時変化を示す。

図-4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おり、今後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する予定である。

次に、図-5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-6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の安定性を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、工事の安全性を向上させるため不可欠である。本論文では、土木建築工事等の測量に利用されているレーザ距離計を用いて、比較的大きな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もとづき切羽の安定性が評価できることを示した。今後は切羽作業に対する安全監視システムとして、異常値の処理方法やデータ欠測のない運用方法等に関して改良を加え、本格的に切羽の安全監視に適用していきたい。さらに、鏡吹付けや鏡ボルト等の切羽安定対策工の施工区間の設定や施工段階の設計に活用できるよう、計測結果の評価方法について研究を進めていく予定である。

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。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) 福岡輝旗：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.

DEVELOPMENT OF TUNNEL FACE MONITORING SYSTEM AND CASE STUDY ON POOR GROUND

Yoshihiro TERASHIMA, Isao OGAWA, Koki KUMAGAI, Hiroaki MATSUDA
and Tamiyuki NARAOKA

The geological structure of Japan is considered highly complicated and consists of many inherent weak zones. In the construction of mountain tunnel, collapses at tunnel face often occur due to the weak zones. It is therefore important to monitor continuously the deformation of the entire tunnel face and evaluate its stability. The purpose is to predict the time when collapse might take place, so that appropriate countermeasure can be carried out and the safety of excavation work can be improved. To monitor deformation, the authors have developed a tunnel face monitoring system by means of Laser distance meters. The effectiveness of the developed system was verified through case study on poor ground. This paper reports on the outline of the monitoring system and the result of the case study.