

走向・傾斜測定システムの開発と現場実証実験

辻本 壮太郎*1・舟橋 孝仁*1・中原 法久*2・宇田 誠*3

概 要

トンネルを安全に掘削するためには、切羽観察を実施し、掘削直後の岩盤の性状等から前方の地質状況を予測することが重要である。従来、切羽観察において、岩盤の不連続面を把握する走向・傾斜の測定は、クリノメーターを用いて行われてきた。しかし、この方法には、切羽を直接測定するため肌落ち等の危険があると共に、切羽上部の測定は困難という欠点があった。そこで筆者らは、日常の切羽観察時に、任意の箇所の走向・傾斜を安全かつ容易に測定することができるシステムを開発し、実証実験を行った。その結果、本システムにより走向・傾斜測定時の安全性が格段に向上し、容易に素早く正確な結果が得られることを確認した。

キーワード：山岳トンネル、走向・傾斜測定、不連続面、切羽観察、安全性向上

DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO MEASURE STRIKE AND DIP AND A DEMONSTRATION EXPERIMENT ON SITE

Sotaro TSUJIMOTO *1, Takahito FUNAHASHI *1, Norihisa NAKAHARA *2, Makoto UDA *3

Abstract

In order to bore a tunnel safely, it is important to observe the geological characteristics of a fresh tunnel face immediately after excavation and to predict the geological conditions ahead of the face. Conventionally, the clinometer has been used for this observation to measure strikes and dips for discerning discontinued faces in the rock formation. This method, however, involves some risks such as rock collapse because workers are forced to directly observe the cutting face, as well as a certain difficulty in the measurement of the upper section of the face. To solve his problem, we have developed a unique system which is able to measure strikes and dips at any place, safely and easily, and performed a feasibility test. The experiment confirms that the system is helpful in greatly improving the safety at the time of measurement of strikes and dips, and in obtaining accurate results easily and promptly.

Keywords: Mountain tunnel, Measurement of strike and dip, Discontinued faces, Observation of the tunnel face and improvement of safety

*1 Tunnel Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*2 Manager, Tunnel-Geology Group, Tunnel Technology Department, Civil Engineering Division

*3 Executive Officer, Deputy Executive General Manager, Civil Engineering Division

走向・傾斜測定システムの開発と現場実証実験

辻本 壮太郎*1・舟橋 孝仁*1・中原 法久*2・宇田 誠*3

1. はじめに

山岳トンネル工事では、掘削するたびに変化する不均質な地山に対応しなければならない。そのため、切羽観察として、掘削直後の地山の状態を観察し、切羽の自立性、地質とその分布、風化・変質の状態、割れ目の間隔・状態・方向性、湧水状況等について調査するとともに、切羽状況のスケッチや写真撮影を行い記録する。切羽観察の結果は、切羽観察記録として日々取りまとめられ、設計や施工に問題がないか、安全な施工が可能かどうかの判断材料の一翼となる。そのため、トンネル施工中に行うこの切羽観察は、トンネルを安全に掘削するうえで重要な調査である。

また、岩盤の性状を把握するためには、節理や層理等の不連続面の走向・傾斜（不連続面が延びる方向と傾き）を把握することが重要である。しかし、従来のクリノメーターを用いて切羽に近づいて計測する方法は、切羽の肌落ち等に遭遇する危険を伴う。さらに、切羽上部の不連続面の走向・傾斜の測定は容易でないこともあり、實際上走向・傾斜の測定は頻繁には行われていないことが問題であった。

ここで、労働安全衛生総合研究所の調査報告によると、トンネル施工中に坑内で発生する災害のうち「落盤（肌落ち）」は高い割合を占めていることが報告されている¹⁾。切羽面の崩壊（肌落ち）発生の要因²⁾は、

- ① 不連続面の発達に起因する崩落
- ② 湧水に起因する崩落
- ③ 地圧や低地山強度に起因する崩落

の三つのパターンに分けられ、このうち、「①不連続面の発達に起因する崩落」では、地山の不連続

面の状態や姿勢により、切羽面からの肌落ちが著しく生じやすい状況となる場合もある。そのため、切羽面に顕在化した不連続面を的確に把握し、蓄積された切羽観察記録を分析することで、切羽前方地質の予測が可能となり、起こり得る切羽崩壊現象の予測や事前の安全対策が図れ、肌落ち災害の防止に繋がるものと考えられる。

そこで筆者らは、トンネル現場に従事する技術者が日常の切羽観察時において、切羽から離れて任意の箇所での走向・傾斜を測定できる安全な方法で、かつ容易に測定ができる方法について検討を行った。

本稿では、筆者らが開発した走向・傾斜測定システムの概要と現場実証実験の結果について報告する。

2. 走向・傾斜測定の現状と問題点

現在、切羽面に出現した不連続面の走向・傾斜を把握する方法としては、以下のものが用いられている。

2.1 クリノメーター

地質調査で従来から用いられている、方位磁石の付いた測定器である。測定値の記録は、野帳や図面に手書きで記載するのが一般的である。

2.2 3次元測量

切羽から離れた箇所において、3次元レーザースキャナーにより切羽面の3次元形状を取得し、3次元形状から走向・傾斜を間接的に得る方法や、デジタルカメラによる簡易的な写真測量による方法等がある。

2.3 各測定方法の利点と問題点

クリノメーターによる方法は、一般的に用いら

*1 土木本部 トンネル技術部 トンネルグループ

*2 土木本部 トンネル技術部 トンネル地質グループ グループリーダー

*3 執行役員 土木本部 副本部長

れる確実で簡易な方法であるが、素掘り状態の切羽面に最接近または接触して測定を行うため、測定者は常に肌落ち災害の危険にさらされた状態となる。また、切羽観察は施工サイクル内で行うことが多いため、測定時間や測定場所に制約があり、不連続面の走向・傾斜測定が十分に実施できているとは言い難い。さらに、切羽上部の不連続面は測定自体が難しい。そして、測定は地質学の専門知識を有する技術者が行うことが多く、トンネル現場に従事する土木技術者にとっては不慣れな点が多い。

次に、レーザースキャナーによる3次元測量や写真測量による測定方法は、切羽に近寄る必要がないため、クリノメーターによる方法に比べ安全性は格段に向上する。しかしながら、これらの方法は測定に際しての準備や専用の測定機器が必要であり、3次元形状から不連続面の走向・傾斜を抽出する過程が必要となる。

これらのことを考えると、測定時の安全確保が容易で正確な測定が迅速に行える方法が望まれる。そこで筆者らは、現場に従事する土木技術者が日常的に使用しているトータルステーションを走向・傾斜測定に用いることで、扱い方も容易となり、切羽面に近づくことなく測定ができ、安全性の向上も図れると考えた。また、多くのトンネル現場で導入しているトータルステーション

を使用した坑内計測、掘削管理等のシステムには、座標や路線の線形が設定されているため、不連続面の正確な位置や座標及び正確な走向・傾斜データが瞬時に得られるという利点もある。

3. システムの概要

走向・傾斜測定システムによる測定概念図を図-1に示す。測定に使用する測量機器は、トンネル坑内の変位計測や測量、掘削管理、支保工建込み管理等に使用するトータルステーションである。測定は、測定者が専用のタブレット端末を操作することにより次の手順で行う。まず、タブレット端末に表示される図-2のような操作画面でトータルステーションから照射されるレーザー光を切羽面へ誘導し、測定対象とする不連続面上で任意の3点をそれぞれ指定する。その後、指定した3点を計測することにより、図-3に示すように、それぞれの点の3次元座標を取得する。なお、計測する3点は自由に指定できるため不連続面の形状や大きさ等に応じて測定することが可能である。走向・傾斜はタブレットで内部演算され、取得した3次元座標を用いて面構造を自動算出する。算出結果は、図-4のように、即座にタブレット画面に表示され、その場で結果が確認できる。同時に測定時の基本情報（測定日時、測点、測定位置、座標等）と共にシステム内に保存

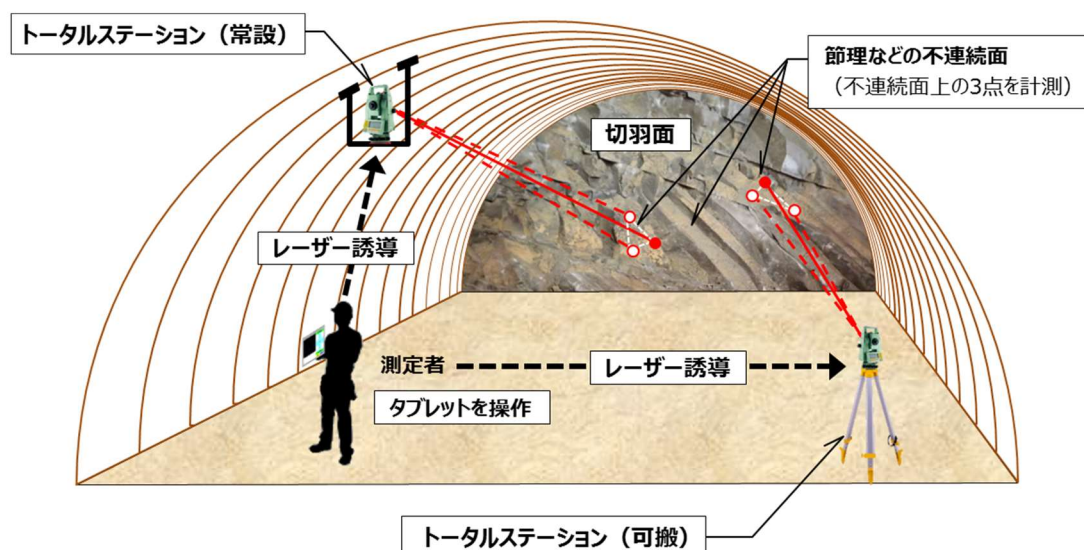


図-1 走向・傾斜測定システムの概念図

され、これらのデータは CSV 形式で出力することができる。

タブレット上に表示される走向・傾斜の測定結果は、以下の 2 パターンで表現される。それぞれの見方を図-5 に示す。

- (a) 地質学分野で従来から用いられる北（真北）を基準とした表現方法（図-5(a)）
- (b) トンネルセンター方向（トンネル掘削方向）を基準とした表現方法（図-5(b)）

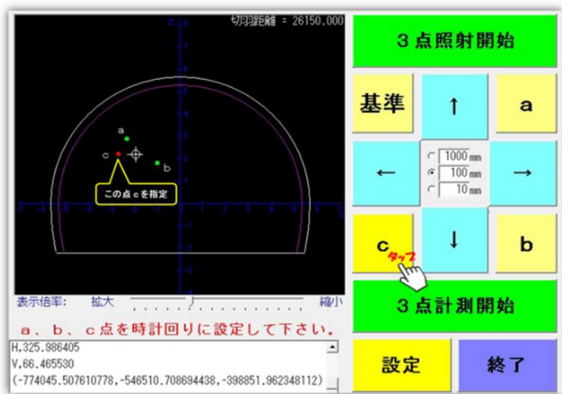


図-2 タブレット操作画面

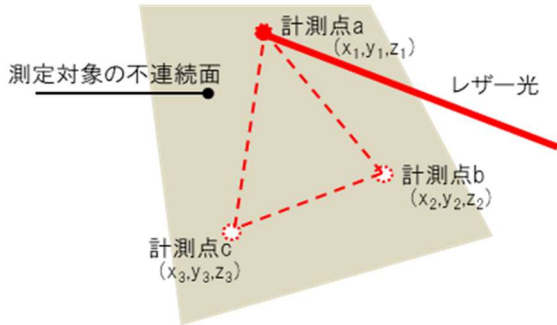


図-3 計測点指定と座標取得

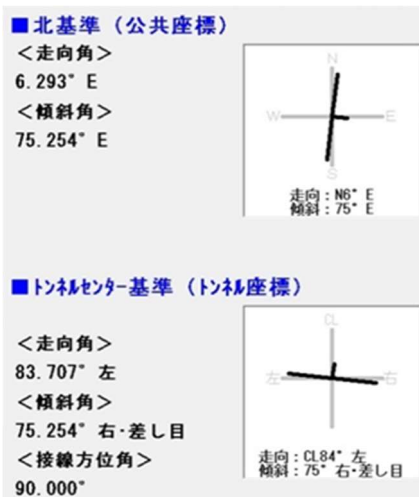
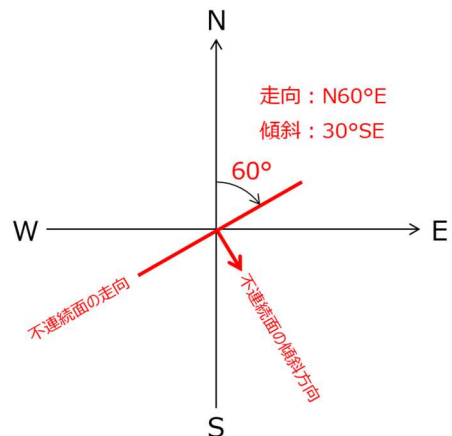


図-4 計測結果表示例

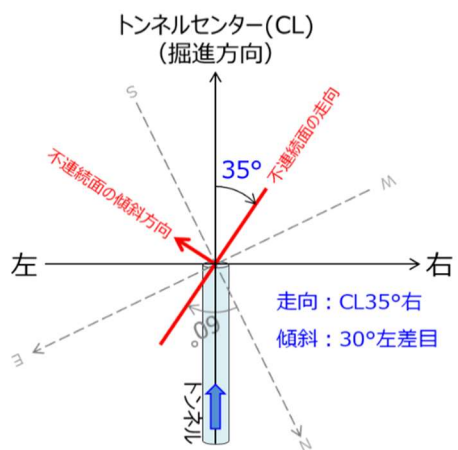
図(a)は、いわゆる「走向・傾斜」で、地質縦断図や平面図の作成、トンネル全体の地質構造の把握等に用いることができる。図(b)は、トンネルセンター方向（掘進方向）を基準とした表示となっている。現場で従事するトンネル技術者や作業員でも直感的、容易に岩盤面の姿勢（流れ目や差し目・方向）が理解しやすい表現として設定した。

4. 実証実験概要

開発した本システムを現場環境で使用した場合に問題が生じないか実証実験を行った。実験は、トンネル切羽で実施し、クリノメーターによる結果との差異を確認するために切羽手前に鏡面に見立てた硬質発砲ウレタンボード（以下、「ウレタンボード」とする）を置いた場合と、実際の切羽面を直接測定する場合を検証した。ウレタンボー



(a) 北基準



(b) トンネルセンター基準

図-5 本システムの走向・傾斜表示の見方

ドは、本システムで測定が難しいと思われる姿勢の不連続面モデルとして、クリノメーターでも測定できる切羽下部で使用した。

走向・傾斜の測定は、ウレタンボードではクリノメーターと本システムの両手法で測定を行い、双方のデータの比較を行った。その際のウレタンボードはそれぞれの設置位置において、ボードの向きや傾きを変化させた。切羽面を使っての測定では本システムのみで実施し、操作性、有効性等について検証を行った。

なお、いずれの場合も測定は切羽から約43m離れた箇所にトータルステーションを設置し、タブレット操作は切羽から約10m離れた箇所より実施した。

本実験の状況として、写真-1に走向・傾斜の測定に使用したウレタンボードの設置位置(①~②)および切羽面の測定位置(③~⑤)を示す。ウレタンボードの設置例を写真-2に、クリノメーターによる測定状況を写真-3に、本システムによる測定状況を写真-4に示す。



写真-3 クリノメーターによる測定状況



写真-4 本システムによる測定状況



写真-1 ウレタンボード及び切羽測定位置



写真-2 ウレタンボード設置例

5. 実証実験結果

5.1 ウレタンボードを用いた場合

表-1にウレタンボードを用いた走向・傾斜の測定結果を示す。なお、クリノメーターの読み値は磁北を基準とするため、測定を行った地域周辺の偏角(8°)により補正を行っている。

トンネルセンター位置における測定結果(①-1~①-3の北基準)より、本システムによる測定結果の走向・傾斜とクリノメーターによる測定値は概ね一致しており、本システムでもクリノメーターと同等の測定結果が得られることが確認できた。

一方、トンネル右端位置(鋼製支保工の近傍)における測定結果(②-1~②-3の北基準)は、走向の値に5°程度の誤差が生じた。これは、測定が鋼製支保工近傍で行われたため、少なくとも鋼製支保工(鋼材)の磁性の影響を受けたことによるものと考えられる。このことは、現地でクリノメーターを持って鋼製支保工に近づくと大きく

方位磁石の針が振れることから確認できた。これに対し、本システムによる測定値は、座標値 (x, y, z) を用いて算出するため、磁性の影響を受けず、正確な走向・傾斜が得られることも確認することができた。

また、トンネルセンターを基準とした走向・傾斜の値は、ウレタンボードの設置姿勢（方向・傾き・差し目・流れ目）を定量的に分かりやすく表示できていることも確認した。

5.2 切羽面を直接測定した場合

切羽面で測定した走向・傾斜結果を表-2に示す。タブレット操作は切羽から離れた箇所より行ったが、それぞれの測定面③、④、⑤において面の形状に応じて任意の3点を指定することができ、走向・傾斜を得ることができた。また、同時にトンネルセンター基準表示で測定面の姿勢が定量的に把握でき、目視確認によっても不自然に感じ

るものは確認されなかった。しかしながら、測定面④では、③、⑤に比べ測定面が小さく細長いうえ、レーザー照射方向（視準方向）と平行に近くなったため、任意の3点を指定するための誘導に若干の時間を要した。

5.3 測定結果

今回の実験結果で確認することができた事項として、以下の4点が挙げられる。

- ① 操作はタブレット画面で照射箇所を確認しながらレーザー誘導を行い、測定開始ボタンを押すのみであるため、測定に要する時間も短く容易であり、日常に行う切羽観察時にも十分活用できる。
- ② レーザー照射方向（視準方向）と平行に近い、小さく細長い測定面は、任意の3点を指定するための調整に若干の時間を要したが、問題なく測定することができる。

表-1 ウレタンボードを用いた測定結果

測定位置 (切羽～トータルステーションの距離：43m)		硬質発泡ウレタン ボードの姿勢		北基準		トンネルセンター基準	
				走向	傾斜	走向	傾斜
		ボードの向き (平面図)	差し目/流れ目	上段値 (システム値)		システム値	
①-1	トンネルセンター		差し目	N16°E	68°SE	CL87°右	68°左差し目
				N16°E	70°E		
①-2	トンネルセンター		差し目	N73°E	69°SE	CL36°左	69°右差し目
				N72°E	71°E		
①-3	トンネルセンター		差し目	N46°W	66°NE	CL24°右	66°左差し目
				N44°W	67°E		
②-1	トンネル右端 (鋼製支保工付近)		流れ目	N7°W	73°W	CL65°右	73°右流れ目
				N11°W	74°W		
②-2	トンネル右端 (鋼製支保工付近)		差し目	N53°E	77°SE	CL56°左	77°右差し目
				N48°E	80°E		
②-3	トンネル右端 (鋼製支保工付近)		流れ目	N90°E	40°N	CL20°左	40°左流れ目
				N88°E	37°N		

※クリノメーター値：クリノメーターにより測定した値（磁北基準）を偏角8°で補正した値

表-2 切羽面で測定した走向・傾斜結果

測定位置 [概略寸法] (切羽～トータルステーションの距離：43m)		北基準		トンネルセンター基準	
		走向	傾斜	走向	傾斜
③	切羽面 [1.5m×1.0m]	N15°E	87°NW	CL87°右	87°右流れ目
④	切羽面 [1.2m×0.3m]	N37°W	76°SW	CL35°右	76°右流れ目
⑤	切羽面 [0.9m×0.6m]	N22°E	81°SE	CL87°左	81°右差し目

- ③ 本システムによる測定値は、座標値により算出するため、磁性の影響を受けず正確な走向・傾斜が得られる。
- ④ トンネルセンターを基準とした走向・傾斜のタブレット画面の表現は、不連続面の姿勢(方向・傾き・差し目・流れ目)を、定量的に分かりやすく、実際の不連続面と視覚的に比較しても正しく表示することができる。

6. おわりに

開発した走向・傾斜測定システムを切羽面に顕在化した岩盤の不連続面の走向・傾斜測定に活用することにより、これまでのように切羽面に最接近してクリノメーターで測定していた方法に比べ、測定時の安全性を格段に向上させることができると考えている。また、これまで掘削完了後すぐにクリノメーターによる測定ができなかった高い位置や磁性の影響を受けやすい鋼製支保工の近傍においても、容易にかつ素早く正確な測定ができるようになった。そして、日常的にこれらの情報を取得、蓄積し、それらを活用することにより、「不連続面の発達に起因する崩落」に対し、施工時の安全対策が図れ、肌落ち災害のリスクを軽減できるものと考えられる。

今後、本システムを掘削中のトンネル現場に導入し実用性の検証を行う予定である。

謝辞

本システムの開発、実験に当たり、マック(株)の関係者ならびにトンネル現場の関係者に多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (独)労働安全衛生総合研究所：トンネルの切羽からの肌落ちによる労働災害の調査分析と防止対策の提案，労働安全衛生総合研究所技術資料，No.2，2012
- 2) (社)日本道路協会：道路トンネル観察・計測指針，pp.203-205，2009.2