

トンネル内空変位計測の効率化～スマートプリズムの実証実験～

Enhancing the efficiency of tunnel convergence measurements: a demonstration study of the smart prism system

味噌作 知樹*	日比 康貴**
Tomoki Misosaku	Yasutaka Hibi
船木 隆史*	目崎 浩二*
Takashi Funaki	Koji Mesaki

要 約

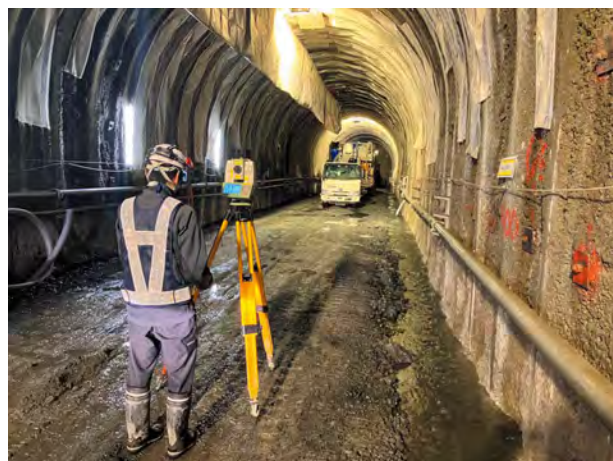
内空変位計測作業に関する課題を解決するためにスマートプリズムの導入・実証実験を行った。実験の結果、施工による計測装置の破損リスクが大幅に低下し、従来プリズムより1断面当たり計測時間を約80%、人員を1人削減できることを確認した。このことからスマートプリズムを全面的に採用することで内空変位計測作業に関する大幅な省力化、省人化の可能性を確認できた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 導入目的
- §4. 技術的課題（従来プリズム）
- §5. 課題に対する工夫
- §6. 計測結果
- §7. まとめ

§1. はじめに

トンネル掘削工事において地山の安定性の確認および安全に施工を進めていく上で重要な計測が内空変位計測である。内空変位計測とは山岳トンネル等の掘削において、トンネル内壁面に設置したターゲット間の距離変化を定期的に測定し、変位量を把握する計測である。一般的な計測手順として壁面にプリズムを設置し、トータルステーション等の光波計測機を用いて計測作業を行うが、プリズムをつけ外す手間がかかる、トンネル天端に設置するため高所作業車を用いなければならない等、計測に時間と労力がかかるのが現状である(写真一1)。また、山岳トンネル掘削の施工サイクルは削孔、装薬、発破、ずりだし、こそくあたり取り、支保工建て込み、コンクリート吹付、ロックボルト打設が一般的なサイクルである。施工



写真一1 従来の内空変位計測状況

サイクルを維持するため、限られた時間内で効率よく計測を行う必要がある。そこで現場の計測作業の負担を軽減するため、当社で開発されたスマートプリズムを導入した。本稿では、トンネル内空変位計測にスマートプリズム（新技術）を使った実証実験の報告を行う。

* 北日本（支） 鳴瀬川トンネル（出）

** 技術研究所土木技術グループ

§2. 工事概要

鳴瀬川ダムは、洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい、発電を目的として、新たに建設する多目的ダムである。現場位置を図一1に示す。宮城県が計画していた筒砂子ダムを国が規模を拡大して建設することになった。鳴瀬川ダムは、ダム高 107.5m、堤頂長 358m、総貯水量 45,600 千 m^3 の台形 CSG ダムである。当工事はダム転流工の仮排水トンネル工事である。仮排水トンネル位置を図一2に示す。本トンネルは全長 997m、全高 4.9m、全幅 4.9m、掘削断面積約 30 m^2 の小断面トンネルである。掘削方式は発破工法タイヤ方式で 2 ブーム 1 バスケットのドリルジャンボでの削孔・装薬発破で、ずり出しはロードホウルダンプ(3 m^3 級)を採用し、2025 年 10 月に 997m の掘削を完了している。

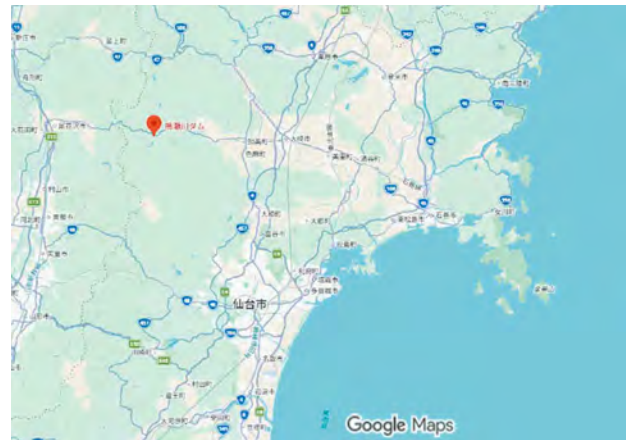
§3. 導入目的

3-1 内空変位計測について

トンネル工事における内空変位計測は、トンネルの安定および支保効果の確認、支保工の施工時期の判定、覆工の打設時期の判定等の資料を得ることを目的とした、重要な計測の一つである。計測位置は地山条件や施工の段階に応じて 10m～30m の間隔で決定し、計測頻度は計測位置と切羽までの距離や変位速度に応じて 2 回 / 日から 1 回 / 週である。図一3が一般的なトンネルの計測設置位置である。主に天端と左右側壁にプリズムを設置し、測線の変位量と各点の沈下量をトータルステーションで計測する。プリズムの設置時にはハンマードリルで孔をあけアンカーを固定しプリズムを設置するが、天端への設置や大断面トンネルの場合は高所作業車での作業が必須なため、時間を要する。また、プリズムの計測自体はトータルステーションで自動追尾するため時間はかからないが、限られた時間で計測する必要があるため、多くの人員が必要であるなどトンネル現場職員の日常業務の中で負担がかかる業務である。

3-2 スマートプリズムの概要

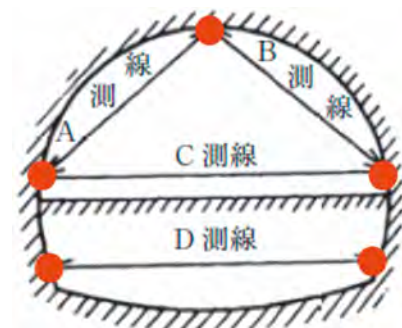
従来のプリズムの設置では発破による飛び石や重機との接触によってプリズムが破損するのを防ぐために、切羽からの離隔によっては計測のたびに付け外しが必要になるが、日常的なプリズムの付け外し業務を解消するため開発された技術がスマートプリズムである(写真一2)。常時、360°プリズムを地山内に格納し、計測時のみ遠隔操作で送出することで、日常的な付け外し業務を不要にすることができる計測装置である。スマートプリズムはドリルジャンボの削岩機で直径 45mm、深さ 60cm 以上削孔し、固定筒を取り付け、隙間にくさびを入れ固定する。固定筒の中にプリズム伸縮装置を設置後、リモコンで遠隔操作することで自動送出・格納が可能となる。設



図一1 現場位置



図一2 仮排水トンネル位置



図一3 プリズム設置位置



写真一2 スマートプリズム構成物

置は固定筒の端部にロックファスナー（ロックボルトが落下しないようにするための器具）を取り付けることにより、スマートプリズムが地山固定される仕組みとなっている（図－4）¹⁾。

(1) プリズム伸縮装置

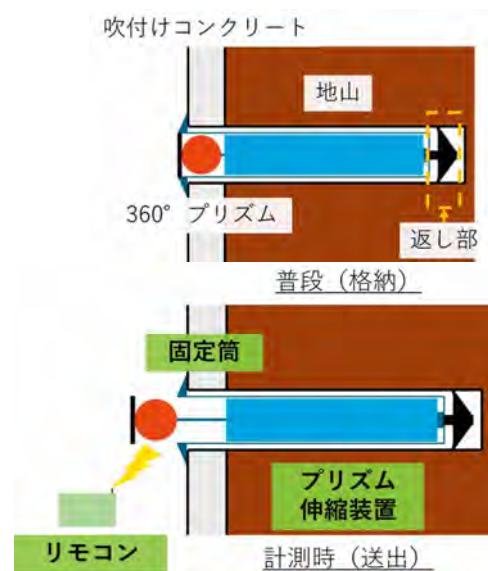
プリズム伸縮装置は、リモコンより送信された信号を受信することで、精度よく 360°プリズムの送出・格納が可能である（写真－3）。また、緑色の LED が坑内側についており、暗い坑内においても、目視にて稼働状況の確認が可能である。さらに本装置は、2 回 / 日の計測を 3 か月程度実施しても稼働できるバッテリーを内蔵し、取り外して充電することで繰り返しの使用が可能である。今回の実証実験では 3 週間継続して使用したが、1 度も充電が切れることはなく稼働していることを確認した。

(2) 固定筒

固定筒は、45mm ビットを用いて削孔された孔に挿入し、孔内にプリズム伸縮装置を固定することができる（写真－4）。本装置は、挿入・固定後のずれや抜け落ちを防止するための返し部、プリズム伸縮装置を固定するためのねじ状の接続部、装置を所定の深さで止めるための突出部がある。そのため、設置孔の長さが固定筒の長さを上回れば、おおむね設置可能であるとともに、例えばモルタル等の材料も不要であり、本装置のみで確実に固定ができる。固定筒の上部にくさびを入れてずれ防止を図るが、くさびを入れすぎると固定筒が変形して伸縮装置がうまく作動しない場合があるため注意が必要である。

(3) リモコン

リモコンは、プリズム伸縮装置と通信を行い、360°プリズムの送出・格納の遠隔操作が可能である。通信距離は 15m 以上であり、切羽付近に設置されたプリズムを計測する際に切羽から離れた安全な位置で操作可能であるとともに、天端等の高所に設置されたプリズムを計測する際に高所作業が不要となる。また、リモコンのモニタ上では、通信中のプリズム伸縮装置の動作状態やバッテリー残量等の確認ができるため、近づいて直接目視確認する必要はない（写真－5）。さらに、新規でプリズム伸縮装置を設置する際、リモコンで設置断面と設置位置の登録が可能であるため、管理が容易である。



図－4 スマートプリズム仕組み



写真－3 プリズム伸縮装置



写真－4 固定筒

§ 4. 技術的課題（従来プリズム）

内空変位計測時に使用する従来プリズムの技術的課題を以下に述べる。

4-1 施工によるプリズムの破損

従来のプリズム（以下、従来プリズムとする。）を設置する場合、常に壁面から突出しているため発破による飛石での破損や重機との接触による破損の恐れがある（写真－6）。そのため、計測毎の付け外しが必須である。



写真－5 リモコン

4-2 限られた時間内での計測作業

天端部に設置されたプリズムの計測では高所作業車を使用してプリズムを付け外す必要がある。また、一般的な道路トンネル断面であれば高所作業車を1か所に設置し、旋回することで2～3断面程計測可能であるが、本トンネルは断面が小さいため、旋回ができず高所作業車をその都度移動する必要がある（写真-7）。そのため、通常より労力と時間を要する。プリズムの破損、天端部のプリズムを設置するための労力低減の課題を解決するため、試験的にスマートプリズムを導入し、検証を行った。

§5. 課題に対する工夫

5-1 破損対策

施工による計測装置の破損対策としてスマートプリズムによる360°プリズムの自動格納を実施した。従来プリズムは計測時にプリズムの付け外しが必要であり、写真-6のように重機との接触によりプリズムが破損する場合がある。スマートプリズムを使用した結果、計測時毎のプリズムの付け外しが不要となった。また、切羽より2基程度手前（約1.5m手前）に設置し（写真-8）、昼夜勤務で6基発破掘削実施後、正常に稼働していることを確認した（写真-9）。以降の計測時も問題なく正常に稼働していた。

5-2 限られた時間内での計測作業

当現場は小断面トンネルのため、各施工のサイクルが短く、削孔からロックボルト打設までの1サイクルが約3時間である。そのため、重機や大型車両の移動がほぼ絶え間なく続く。トラックミキサー車やドリルジャンボ、吹付機などの大型車両の通行時は安全のために坑内での各種計測作業が制限されるため、限られた時間内での計測作業が求められる。従来プリズムでは1断面当たりの計測に要する時間は約5分で、プリズムの付け外しを行う人と計測を行う人の2人で計測を行っていた。天端のプリズムを計測する際、高所作業車を用いてプリズムの付け外しを行うため、計測時間を要した。

一方、スマートプリズムでの計測は1断面当たりの計測に要する時間は約1分で、プリズムがリモコンを用いた遠隔操作により自動送出・格納するためプリズムの付け外しが不要となり、1人で計測を行うことが可能となる。また、従来のプリズムと比較して360°プリズムのため、トータルステーションの計測位置を変える毎にプリズムの向きを変える手間がなくなった。以上のことから、スマートプリズムを用いたことで従来プリズムより大幅な省力化、省人化を確認した。



写真-6 従来プリズム破損状況



写真-7 従来プリズム設置状況

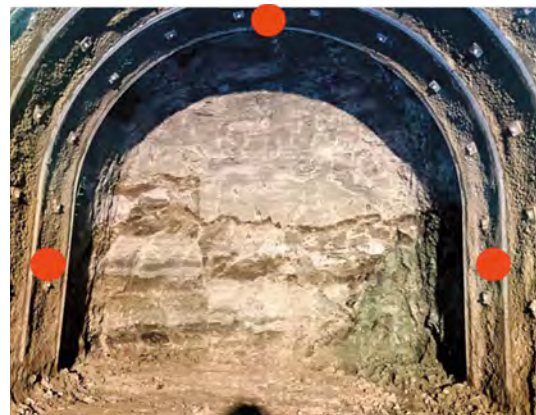


写真-8 プリズム設置位置

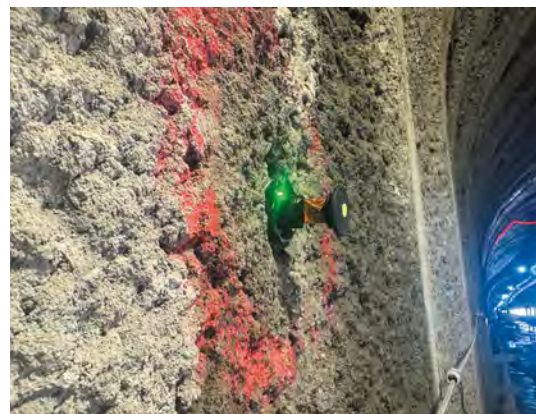
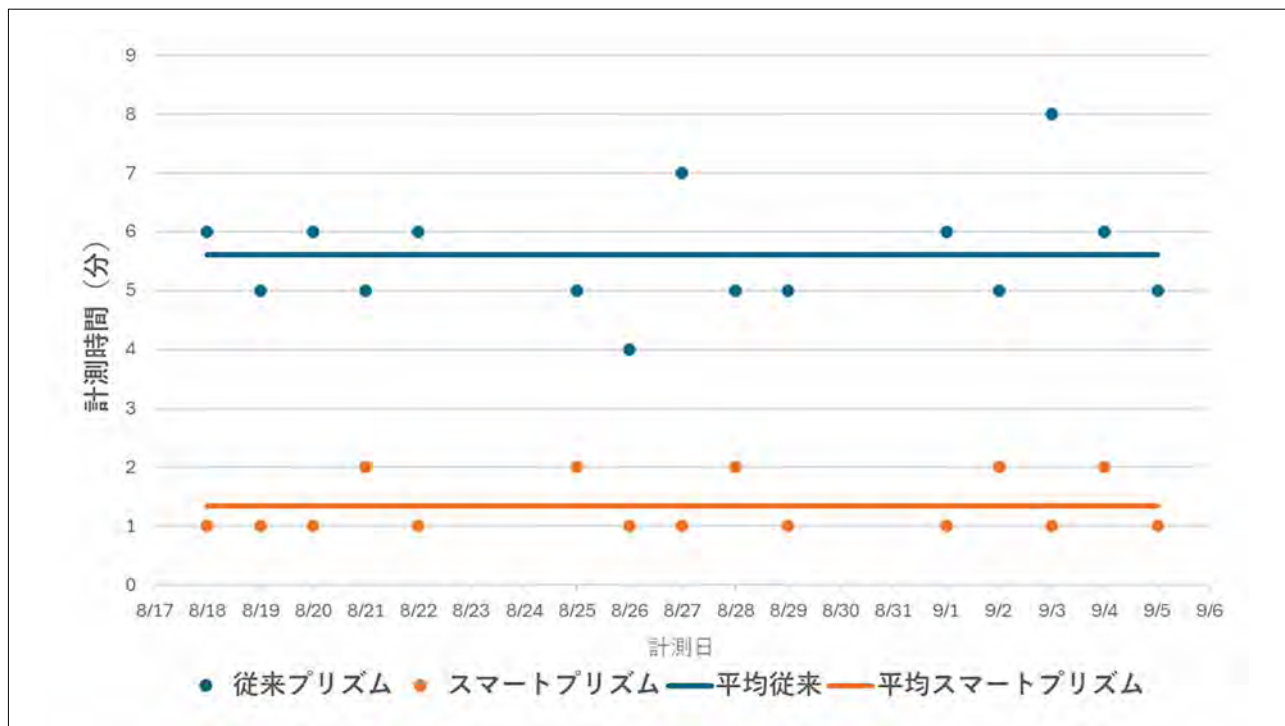


写真-9 スマートプリズム送出状況



図ー5 1断面あたりに要する従来プリズムとスマートプリズムの計測時間

また、実証実験断面における従来プリズムとスマートプリズムの計測時間について比較した。図ー5は1断面あたりに要する従来プリズムとスマートプリズムの計測時間を示す。計測は1人で行い、計測時間については従来プリズムの場合、高所作業車設置、プリズム設置、計測、プリズム取外し、高所作業車アウトリガー格納までの時間、スマートプリズムの場合はプリズム送出、計測、プリズム格納までの時間を3週間計測し、その時間を比較した。結果は従来プリズムの平均計測時間は6分、スマートプリズムの平均計測時間は1分となり、1断面あたり5分の短縮、3週間で約1時間計測時間を短縮できることを確認した。

§6. 計測結果

従来プリズムとスマートプリズムを同一断面に設置し、変位量と沈下量について、計測誤差確認のための実証実験を行った。表ー1に最終沈下量、表ー2に最終変位量、図ー6に変位量と沈下量の凡例を示す。最終変位量と最終沈下量の誤差は0.1～0.2mm程度であったことを確認した。このことから、従来プリズムとスマートプリズムは同等の結果が得られると判断できる。しかしながら、今回の実証実験では現場の都合で検証する断面が少なくデータ量が不足していたため、今後別現場のトンネルで継続して検証していく必要があると考える。

表ー1 最終沈下量

	最終変位量 (mm)		
	従来プリズム	スマートプリズム	誤差
S1	-2.4	-2.4	0
S2	-2.5	-2.4	-0.1
S3	-3.6	-3.4	-0.2

表ー2 最終変位量

	最終沈下量 (mm)		
	従来プリズム	スマートプリズム	誤差
N1	-6.4	-6.6	0.2
N2	-4.6	-4.7	0.1
N3	-5.7	-5.9	0.2



図ー6 変位量 沈下量凡例

§7. まとめ

内空変位計測作業に関する課題を解決するためにスマートプリズムの導入・検証を行った結果、施工による計測装置の破損リスクが大幅に低下し、従来プリズムより1断面当たり計測時間を約80%、人員を1人削減できることを確認した（写真－10）。このことから、スマートプリズムを全面的に採用することで内空変位計測作業に関する大幅な省力化、省人化の可能性を得ることができた。今後の展望として当現場は地山の変位が小さく変化があまり見られないため、変位の大きい地山や大断面トンネルなど様々な条件下での追加検証を通して精度や省力化、省人化の程度を再確認し、将来的には多くの現場でスマートプリズムが採用されることを望む。

また、コストは従来プリズムと比較すると高価である。NETIS登録や省人化・省力化のアピールを発注者に行い、現場での採用数を増やすことで導入しやすい価格となることを期待する。

参考文献

- 1) 日比康貴ほか：山岳トンネル工事に用いる計測システムの開発，土木学会 第79回年次学術講演会，VI-348，2024.



写真－10 1人での内空変位計測作業状況