

坑内天端傾斜計測による切羽前方地山評価システムの開発

トンネル天端傾斜計「TT-Monitor (Tunnel Tilt Monitor)」の現場適用

谷 卓也*¹・工藤 直矢*²・青木 智幸*¹

Keywords : mountain tunnel, field measurement, forward prediction, inclinometer at tunnel crown, information-oriented construction

山岳トンネル, 現場計測, 地山予測, 天端傾斜計, 情報化施工

1. はじめに

トンネルの計画段階においては、地質調査の技術的な限界や費用面の制約等から、限定された情報で支保が設計され施工が開始される。そのため、施工段階に行われる観察・計測で、設計を合理的に確認・修正していく「情報化施工」が行われる。特に、土かぶりの大きいトンネルにおいては、施工の効率性や安全性を確保するために、情報化施工はその重要性を増す。

著者らは、切羽近傍のトンネル天端に設置する小型傾斜計により、容易かつ精度の良い地山評価手法を提案してきた¹⁾。この手法は、日常の計測管理の一つとして天端傾斜計測を実施し、切羽前方地山の硬軟の変化を予測するものであり、数値解析検討のみならず、現場における実証試験においても、その予測可能性が確認されている^{1) 2)}。

昨年度より、トンネル天端傾斜計「TT-Monitor」の普及を進めるために、開発済みの傾斜計に対し現場運用に適した仕様変更、改良を施してきた。本報では、普及型傾斜計の改善点と、本年度から現場運用を開始した普及型による計測データを初期型の計測結果と比較し、その適用性を確認した結果について述べる。

2. 普及機「TT-Monitor III」の開発

2.1 初期型「TT-Monitor I」の概要と運用結果

はじめに、初期型のトンネル天端傾斜計「TT-Monitor I」(以下「初期型」と称す)について、機器の特徴および現場運用結果を述べる。

初期型は、図-1 に示すように、円筒部の外径が60mm、長さが40cmのロケット型の計測装置である。

*1 技術センター 土木技術研究所 地盤・岩盤研究室

*2 関西支店 土木工事業所

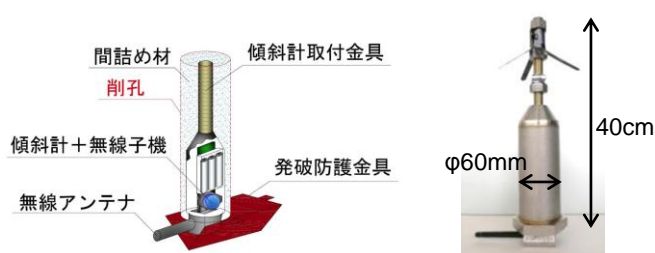


図-1 トンネル天端傾斜計(初期型)の概要²⁾

Fig.1 Outline of the original inclinometer "TT-Monitor I" for measuring the inclination angle at the tunnel crown

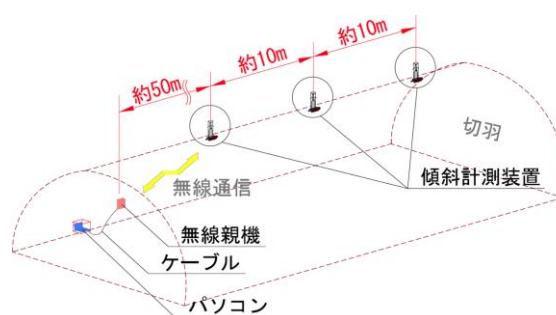


図-2 傾斜計の配置と初期型データ転送システムによる計測機器の配置²⁾

Fig.2 Instrumentation and data transfer system layouts before improvement

ステンレス製の筐体内には、傾斜計、駆動回路、バッテリー、データロガー、無線装置が納められている。計測したデータは、無線LANによりリアルタイムで転送できるようになっている。アンテナを発破による飛石から防護するために、センサ設置後に防護金具を備える必要があるものの、設置に要する時間は10分程度である。設置のために地山に設けられた直径約70mmの孔に本機を挿入し、発泡ウレタンで固定する。坑内には、傾斜計からのデータを受信するための無線LANの親機とパソコンを電源台車に設けた。傾斜計は一つの切羽に対し約10m毎に3機設置して、切羽の進行に

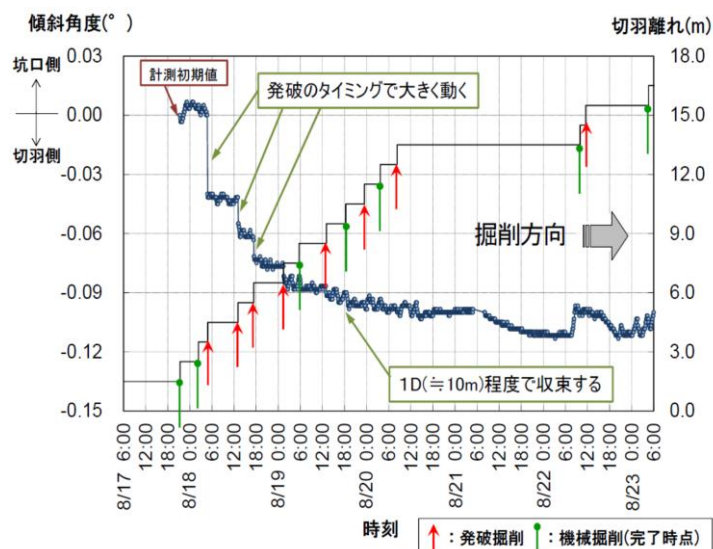


図-3 初期型システムによる計測例²⁾

Fig.3 An example result of measurement using the original system “TT-Monitor I”

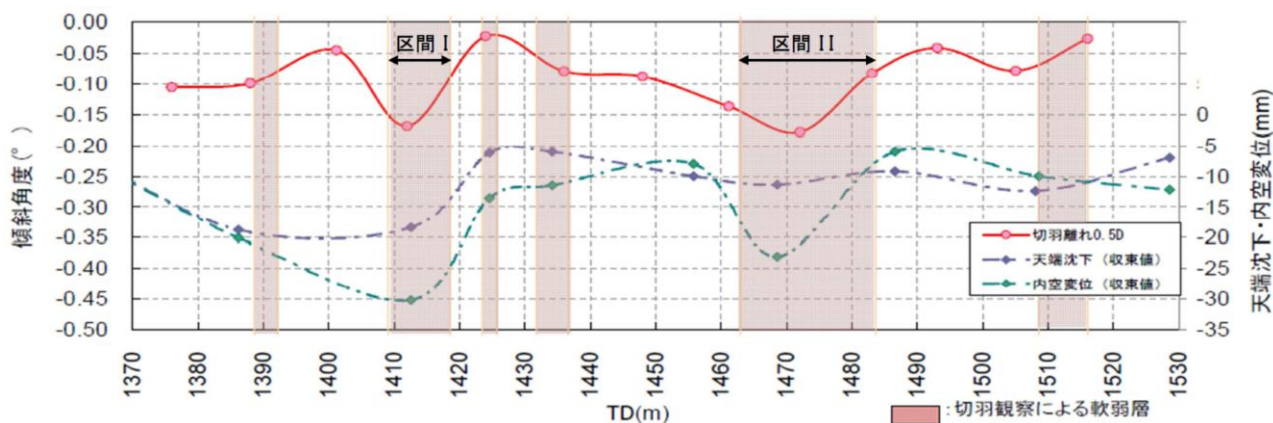


図-4 傾斜角度の分布(切羽離れ5mにおける予測グラフ)と坑内変位計測結果³⁾

Fig.4 Distribution of the inclination angle 5m away from the tunnel face and the results of measurements of tunnel convergence and crown settlement

合わせて切羽から遠い装置を取り外して、切羽近傍の所定の位置に順次盛替えてゆく。各傾斜計からは、図-3に示す経時変化図を得²⁾、切羽進行の情報と合わせて、図-4に示すような「予測グラフ」を作成する³⁾。

図-3からは、傾斜角度が継続的に、発破のタイミングで不連続に値が変化する場合も含め、計測値が収束する約1週間、データが安定して取得されていることが分かる。また、図-4からは、軟弱層部で坑内変位が大きくなった区間(IとII)において、傾斜角度の値が大きくなっており、傾斜計設置箇所の地山の軟弱化または切羽前方地山箇所を含む地山の軟弱化に対応した結果を得ている。また、軟弱層が20m程度ある区間IIでは、軟弱層の手前から傾斜角が大きめに変化し始めており、硬い層の掘削中に前方の軟弱化の予兆を天端沈下のトレンドよりも鋭敏に捉えている。日常管理で天端傾斜計測を行えば、傾斜角度の傾向を分析するこ

とで、切羽前方地質の評価が可能であることが示唆されている。

2.2 普及型「TT-Monitor III」の概要

普及型「TT-Monitor III」(以降「普及型」と称す。)の開発に当たり、試験運用で確認された初期型の課題、普及型の開発方針と具体的な対策を以下に述べる。

(1) 初期型運用時の課題

初期型の運用では、切羽前方地山の地質を事前に把握するという期待された成果を得られたが、本技術の普及を図るためには、以下の課題があることが分かった。

- ①設置時間：傾斜計の設置自体は短時間で行えるものの、設置孔の削孔のためにビットを交換する必要がある。また、発破防護金具の設置もハンマードリルを天端付近に上げて、不安定な中アンカーを施工しなければならない、作業時間も要する。

表-1 天端傾斜計の仕様比較

Table 1 Comparison of specifications between original and optimized crown inclinometers

	初期型	普及型	備考
外径(mm)	60	42(外管) 34(内管)	初期型は地山挿入部の外径
長さ(cm)	40	60(外管) 37(内管)	初期型は無線 LAN 部を含む
質量(kg)	4.0	0.8	普及型は外管と内管の合計
測定範囲(°)	±5	±15	
測定分解能(°)	0.001		
動作温度(°C)	0~80	-10~80	湿度: 0~100%RH, 防塵・防水構造
電源	単三乾電池	Li-ion 充電電池	
動作電圧(V)	3.1~4.4		
メモリ	EEPROM		
記録容量	2,000 件		データ構造: FIFO
測定インターバル	1, 2, 3, 5, 10, 20, 30min		
無線規格	無線 LAN	Bluetooth (Class 2)	

②設置角度の範囲：予測精度向上のために切羽近くの設置が必要であるが、切羽離れ 1m 程度では、切羽の核残しのため削孔機のガイドが地山に当たって、±5° 以内の計測範囲への設置が難しい。

③坑内計測装置のメンテナンス：連続した計測データ受信のために、無線 LAN によるデータ取得システムを採用したが、切羽付近ではデータ保存および分析用のパソコン、無線 LAN の親機の電源の確保が難しい。そのため、電源台車に受信および分析のための機器を備える必要がある。

④無線信号の安定性：電源台車は図-2 に示したように切羽から約 70m 後方に位置する。そのため、重機の配置や坑内環境により、受信できない時間帯がある。もちろん、傾斜計の内部にデータロガーがあるためデータは欠損しないものの、傾斜計の回収まで取得データの確認ができない。これはリアルタイムに情報を分析して切羽前方の地質を評価するには不利な状況である。また、設置直後に電波が受信できない場合は、動作の確認が容易ではない。無線の中継器も導入したが、通信状態の顕著な改善は得られなかった。

(2) 普及型の開発方針

初期型の課題を受けて、次ぎに述べる 3 つの方針で普及型の開発をすすめた。

①細径化：傾斜計を細径化し、ロックボルトと同じ径の孔に挿入できるようにする。そうすれば、セ

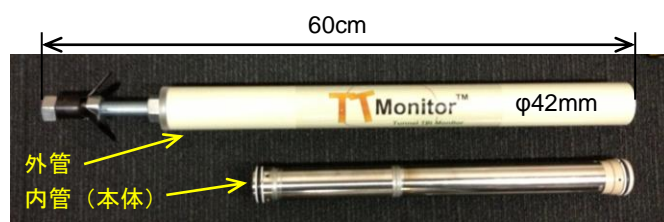


写真-1 普及型傾斜計の概観

Photo.1 View of the optimized inclinometer "TT-Monitor III" for field operation

ンサー設置のためにビットを交換する必要がない。また、機器が坑内に全て収まるようにし、発破防護を必要としない構造とする。

②設置角度の範囲に余裕を持たせる仕様とする。

③無線 LAN の親機および坑内パソコンを必要としないシステムとする。

④双方向対話型の制御プログラムとし、外部からの命令を受信してセンサーおよびデータロガー設定等の制御を行えるようにする。この対策により、設置後の動作チェックや測定のインターバルの変更、必要なデータの適宜取得等、施工状況に合わせて柔軟な対応ができるようにする。

2.3 普及型での改良点

普及型の仕様を表-1 に示す。表には、普及型の改良点ができるように、初期型の仕様に合わせて示されている。写真-1 は普及型の概観である。以下、普及型で改善を図った点について述べる。

(1) 細径化と設置方法の変更

細径化については傾斜計の外径を 60mm から 42mm (傾斜計本体の外径で 38mm) とした。この改良のために、傾斜計のセンサ部を MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイスを採用した。MEMS デバイスは温度変化に精度が大きく影響する性質があるが、普及型の筐体内には温度センサを配置し、その影響をキャンセルした出力が得られるようにしている。

また、細径化に伴い、設置方法も省力化できた。初期型では筐体の周りに縁切り用のシートを巻いて地山に挿入し、2 液式の発泡ウレタンで固定していたが、普及型では通常のロックボルトと同様に削孔した孔に早強性のモルタルを充填し、センサーを挿入するだけで固定できるようになった。回収もセンサーやデータロガー等の本体を含む内管のみを回収すれば良い構造とし、作業を迅速化できるようにした。

(2) 計測範囲の拡大

センサーの計測範囲については、±15° まで測ることが可能でかつ、分解能が初期型と同等な仕様の

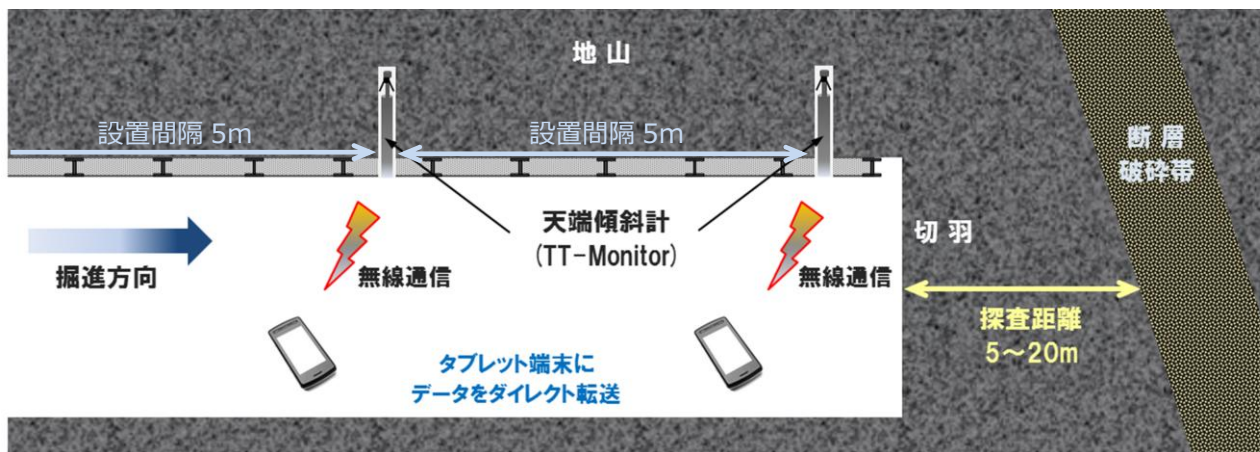


図-5 普及型トンネル天端傾斜計による運用状況
 Fig.5 Operation situation with optimized crown inclinometers

MEMS のセンサーを採用した。この測定範囲は、初期型の現場試験の際に不良地山で施工される天端のロックボルトの傾きを参考に設定した。この角度であれば、切羽中央部の核残し岩塊により削孔が切羽前方方向へ多少傾いたとしても、計測範囲に収まる。

(3) データ転送システムの変更

トンネル内でのパソコンの管理の労力を省くため、携帯型のタブレット端末を採用し、データの転送を Bluetooth 規格の無線で行うこととした。データ転送時等の通信を必要とする場合のみ起動する工夫と合わせて、無線 LAN を採用した初期型と比較して、消費電力も大幅に削減した。普及型では、公称電圧 3.7V、容量 3000mAh のリチウムイオン電池で動作するが、通常の計測条件では 1 ヶ月以上電池の交換・充電を行わなくても、継続した計測が可能であることを確認している。

他の改良点としては、初期型では筐体内の電子回路のプリント基板上に実装されたディップスイッチにより測定間隔等の設定を行っていたが、普及型ではタブレット端末上のソフトウェアにより設定できるようにした。測定済みのデータについては、適宜センサー近傍にタブレット端末を持ち込んで、ロガーに蓄積されたデータを転送できるようにした。

2.4 普及型による現場運用

2013 年 9 月 12 日現在、新名神高速道路、箕面トンネル東工事（大阪府茨木市）で実施している、普及型の現場運用の概要と運用中に得られた傾斜角度の経時変化データを示す。

(1) 計測概要

普及型による運用の概要を図-5 に示す。また、センサーの設置状況を写真-2~4 に示す。

現場運用においては傾斜計測装置を 3 台（他予備 1



写真-2 ドリルジャンボによる削孔
 Photo.2 Drilling by the drill jumbo



写真-3 モルタルの充填
 Photo.3 Mortar injection



写真-4 天端傾斜計の設置
 Photo.4 Installation of the inclinometer

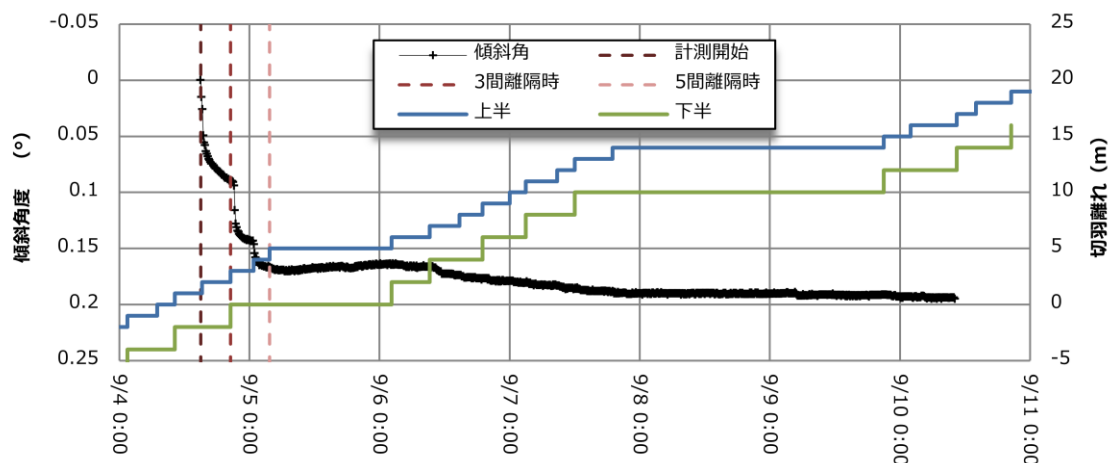


図-6 普及型システムによる計測例 (No.276)

Fig.6 An example result of measurement using the improved system “TT-Monitor III” at the measuring cross section No.276

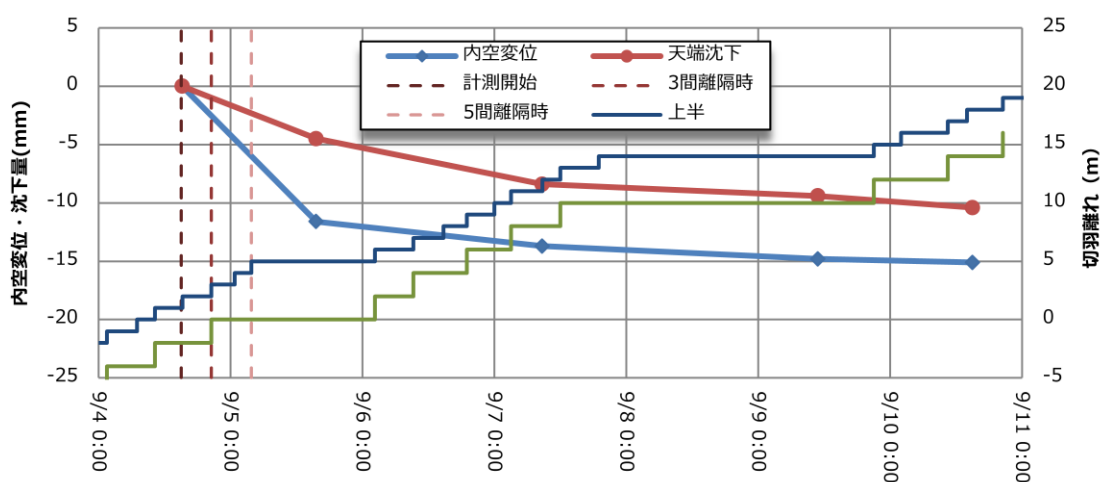


図-7 No.276における坑内計測結果

Fig.6 Variations of convergence and settlement at the measuring cross section No.276

台を準備) 使用し、切羽の進行に合わせて切羽から遠い装置を取り外して、切羽近傍の所定の位置に順次盛替えて傾斜角の連続計測を行っている。図-5 に示す様に、傾斜計はトンネル天端部に 5m 間隔で設置しており、常に一つの切羽に対して 3 台のセンサーからのデータが得られるようになっている。

写真-1 に示したセンサーの設置は、①天端部に設置孔を削孔 (写真-2 参照)、②設置孔へのモルタル充填 (写真-3 参照)、③設置孔へのセンサー挿入 (写真-4 参照) の順に行った。この作業は、パターンのロックボルトの作業と同一の手順と内容であり、センサー用の孔のためのビット交換も要しないため、センサー設置が施工サイクルに与える影響はほとんど無い。また、センサー質量は 1kg に満たず、上向きの設置においても安全に取り扱えることが確認できた。なお、取得したデータの分析のために、傾斜計の設置位置には坑内計測の計測断面も設定した。

(2) 計測結果

図-6 に、現場運用から得られた普及型傾斜計による傾斜角の経時変化を示す。当該箇所は発破ではなく、ブレイカにより掘削が行われている。図からは、切羽の進行に伴って、傾斜角度が増加し、切羽が離れると増加速度が小さくなっていく様子が分かる。図-3 に示した初期型の傾斜計による計測結果と比較すると、切羽が近い場合の 1 掘削毎に変化する角度の状況が異なっている。図-3 では、発破直後に角度が変化し、次の発破までには角度の増加がほとんど見られないが、図-5 では、掘削直後の角度変化は図-3 と同様に大きいものの、次の掘削までにも角度は徐々に大きくなる傾向がみられた。

(3) 考察

普及型のセンサーにおいても、図-3 に示した初期型のセンサーによる経時変化図と同様に、切羽進行に伴う角度変化が捉えられている。この結果より、普及型

においても図-4のような予測グラフを作成し、切羽前方の地質変化を予測することができると考える。

また、図-6に示した傾斜計による角度変化は、図-7に示した光波測距儀による坑内の結果と比較して、連続的にデータが取得できていることが分かる。坑内計測の場合、初期値を切羽離れ1mで取ってから1日後に計測しても、切羽が4間（掘進長1mとして4m）進んだ場合、切羽後方5mにおける計測データが変化量を確認できる最初の計測となってしまふ。切羽離れ3mにおける計測データを用いて切羽前方の地山評価を行なう場合、坑内変位ではデータを内挿してその値を評価するか、計測頻度を上げなければならない。一方、天端傾斜計による計測値は自動で継続的に取得されており、回収したデータからは、坑内変位計測では得ることが難しい掘削方法または地山の変形特性の違いに依ると思われる変位増加傾向の差異も確認できる。

3. 課題と展望

3.1 課題

トンネル天端傾斜計（TT-Monitor）による計測が、光波測距儀による坑内計測と比較して、データの連続性や評価に際して優位であることが確認できた。また、普及型の傾斜計の開発により、初期型よりも更にトンネルの施工サイクルに影響せず設置できること、坑内におけるデータ管理上の省力化が実現できることが分かった。しかしながら、現場運用により以下の点に課題があることが明らかになった。

- ①坑内では施工管理のためのトータルステーションがBluetooth通信に近い電波の周波数を使用している場合があり、電波の干渉やその他の理由から、センサー近傍でも通信ができない場合がある。
 - ②センサー設置後の次ぎのサイクルにおける吹付けコンクリートの施工により、センサー設置孔が塞がれてしまう、またはコンクリートがセンサーの表面に付着して、電波が弱くなってしまふことがある。
 - ③センサー出力自体の温度補正は行っているものの、センサー固定用の早強性のモルタルの固化熱により、筐体そのものが影響を受けていると考えられるような傾斜角の変化を観測することがある。
- ①と②の課題については、現状の計測において設置してから回収するまでの計測時間に余裕があることがら、消費電力は大きくなるものの出力のより強いタイプのモジュールを採用して、通信状況を改善したい。
- ②の課題については、センサー下端の口元にビニール

袋を施すことで吹付けコンクリートの付着を防止し、通信を確保できることを確認している。今後は、より確実な方法を考案して対応したいと考えている。③の課題については、内管と外管の固定方法を改善することや、センサーの地山への固定方法を機械式に変更するなどの対策を検討し、実施していきたい。

3.2 今後の展望

本手法では、不良化の度合いである地質変化のコントラスト（地盤の変形係数の比）が大きいほど、傾斜角度の変化が大きい事が数値解析検討で明らかになっている⁴⁾。傾斜斜角度の大きさは、そのまま地山の良し悪しを評価しない。特に、脆弱な地質区間では地質の不良化の程度（地盤の変形係数比）が相対的に小さくなり、傾斜角度の変化も小さくなるため留意すべきである⁵⁾。そこで、今後は、現場の坑内変位や切羽観察といった日常管理計測・観察結果と連携させ、総合的に地山状況の判定や予測を行えるようにしていきたい。また、計測結果や判定結果による切羽近傍および前方の地山状況を視覚的に分かりやすく表示するプログラムの開発を進めるとともに、現場運用によるデータの蓄積や分析をフィードバックすることで、本手法による地山評価の精度向上をはかっていきたい。

謝辞

現場運用については、NEXCO 西日本関西支社大阪西事務所および大成建設株式会社関西支店箕面東トンネル工事業所の協力を得て実施している。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 工藤直矢, 坂井一雄, 青木智幸, 他: トンネル天端傾斜計測による切羽前方地山予測, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.23-28, 2012.
- 2) 谷卓也, 工藤直矢, 青木智幸, 他: トンネル天端の傾斜計測による切羽前方地山の地質評価, 資源素材学会平成24年度春季大会講演集, No.2516, 2013.
- 3) 工藤直矢, 青木智幸, 坂井一雄: トンネル天端傾斜計測による切羽前方地山変化予測に関する数値解析検討, 第47回地盤工学研究発表会発表講演集, G-02, pp.1263-1264, 2012.
- 4) Tani, T., et al: Analytical study on the effectiveness of ground condition prediction ahead of a tunnel face by measuring the inclination at the tunnel crown, The 13th Japan Symposium on Rock Mechanics & The 6th Japan - Korea Joint Symposium, JKJS-13, pp.887-892, 2013.
- 5) 谷卓也, 工藤直矢, 青木智幸, 他: トンネル天端の傾斜計測による切羽前方地山の予測可能性, 第68回土木学会年次学術講演会講演概要集, III-244, pp.487-489, 2013.