

山岳トンネルのインバート変位分布計測技術の開発

インバート多点連続式変位計「T-Invert MonitorSM」

坂井 一雄^{*1}・市来 孝志^{*1}・長谷川 知^{*2}・渡辺 貴之^{*2}

Keywords : mountain tunnel, invert, heaving, swelling, multi-point displacement meter

山岳トンネル, インバート, 盤膨れ, 膨張性, 多点連続式変位計

1. はじめに

脆弱な地山区間を掘削する山岳トンネルでは、しばしば施工時にインバート（トンネル底部）下部の地山が隆起し、その対策工に多くの労力を要すること、工費増大と工期遅延の原因の一つとなることがある。また、供用後にも長期間にわたって路盤が隆起し、インバートが破損するケースも発生している。供用後の変状の場合には、道路トンネルでは車線規制や通行止めを実施し、インバートコンクリートの補修や改築といった対策工が講じられる。一方、鉄道トンネルでは列車の往来の無い夜間の限定的な時間で施工可能なロックボルトによる対策工が講じられる事が多いとされる。インバート部が隆起するメカニズムは主にスクイージング（地山の塑性化に伴う押し出し）とスウェリング（岩盤の吸水膨張）であると考えられている¹⁾が、いずれの場合でも、交通への支障が大きい供用後の変状を未然に防ぐために、少なくとも施工時におけるインバートの安定性確認が求められるようになっている。

このような背景を踏まえて、鉄道建設・運輸施設整備支援機構が示す山岳トンネル設計施工標準・同解説では、特に一次インバート吹付けコンクリートを施工する場合には、変位の収束を上半・下半だけでなく極力インバート部でも直接確認することを求めている²⁾。その安定性確認の目安としては、本インバートの打設基準である2mm/月という変位速度が挙げられている。

インバート部の変位計測を実施する既往手法としては、路盤上部のレベル測量による手法³⁾、一次インバートから立ち上げた鉄筋棒頭部のレベル測量による手法⁴⁾、高感度水圧計を用いる手法⁵⁾⁶⁾が実用化に至って

いる。また、電気センサを用いずに比重の異なる2種類の液体のインバート隆起に伴う変位差を評価して安価な計測を実現しようとする手法も検討されている⁷⁾⁸⁾。しかし、これらの既往手法は、基本的に単点の隆起量または沈下量を計測する手法であるため、必ずしも計測点が最大変位箇所と合致するとは限らず、変状に至る挙動を見逃す可能性が危惧される。また、トンネル横断方向の変位分布を確認し、適切な要対策範囲を検討することが難しいという課題もある。支保の変状対策として実施される早期閉合での一次インバートや、本インバートの施工後のいずれにおいても、インバート部は後続の施工のために埋め戻されることから、目視での変状確認が困難である。したがって、インバート下部の地山の硬軟状況や地形に伴う偏圧の影響次第では、変位分布を把握する必要があると考えられる。このような背景から、これまでに一次インバート施工時の変位分布を取得する目的で、一般的な測定間隔を500mmとする挿入式傾斜計を、インバート隅角部の急曲線形状に対応できるよう測定間隔を200mmに改造して、インバート変位分布を取得する方法を試行した。しかし、上記手法では計測タイミング毎に計測器挿入者やデータロガー操作者等、複数人が必要とされ作業性の観点で課題を残していた（図-1）。また、既存の3D地中変位計を用いた変位分布の計測も研究的には実施されている⁹⁾が、設置や回収の施工性に課題があると考えられ、実用化に至っているとは言い難い。

そこで、本研究では図-2に概念的に示すような、インバート変位分布の自動取得を目的とした多点連続式変位計「T-Invert Monitor」を開発すると共に、計測ガイド管が埋設された状態で設置と回収を実現する、施

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 地盤研究室

*2 東北支店 土木工事作業所

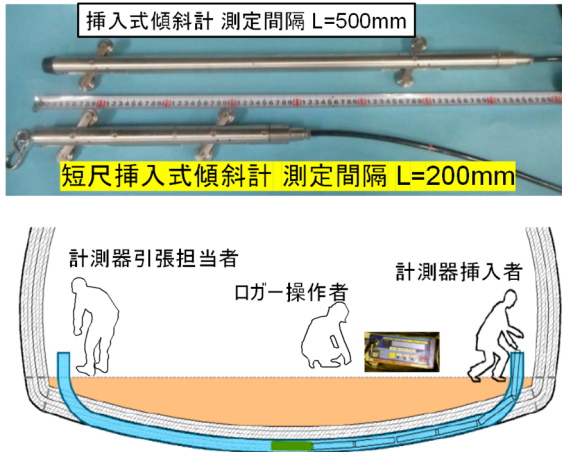


図-1 短尺挿入式傾斜計によるインバート変位分布計測
Fig.1 Displacement distribution measurement with specially shortened inclinometer

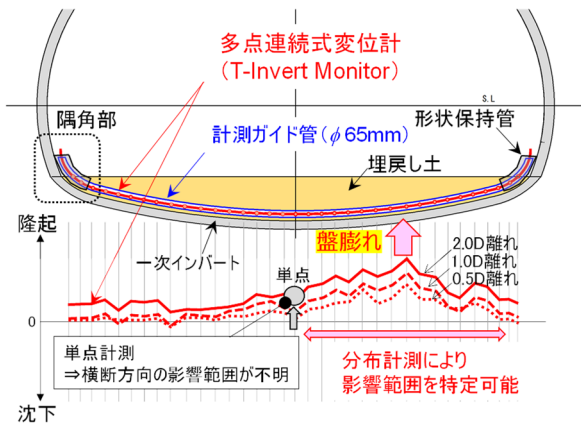


図-2 T-Invert Monitor による計測概念図
Fig.2 Schematic drawing of measurement with "T-Invert Monitor"

工性に優れた計測器の設置方法を検討した。本論文では一連の開発成果として、試作計測器を用いた室内曲げ試験による計測精度確認結果と、国道 7 号鼠ヶ関トンネルで実施した現場計測実験による施工性確認結果と既存計測手法による計測結果と比較した妥当性確認結果について報告する。なお、本論文は R6¹⁰⁾、R7 土木学会年次学術講演会¹¹⁾および第 16 回岩の力学国内シンポジウム¹²⁾にて既報の内容を取りまとめたものである。

2. T-Invert Monitor の仕様

T-Invert Monitor は、ある一定の長さ (L) の剛体ユニットを連結し、各ユニットに MEMS 加速度センサを内蔵するものとした。そして、式 (1) に示すように、初期位置からの各ユニットの重力加速度変化 (Δg_i) と剛体長さの積を端部から累積する事により、各ユニット接合部の鉛直変位量 (d_n) を計算するものとした。

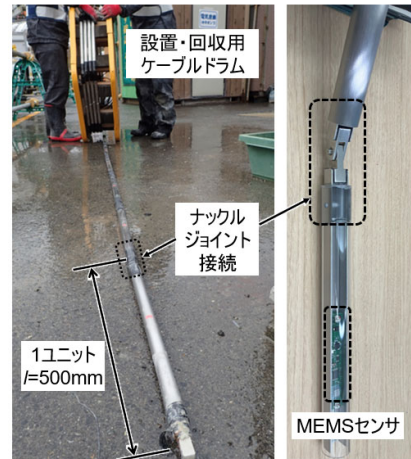


図-3 左：T-Invert Monitor の外観と、右：接続部の詳細
Fig.3 Left) appearance of T-Invert Monitor, right) detail view of joint between measurement units with 500 mm in length

$$d_n = \sum_{i=1}^n L \cdot \Delta g_i \quad (1)$$

T-Invert Monitor は、一次インバート施工時にあらかじめ設置した計測ガイド管の内部に挿入し、計測完了後には計測ガイド管は埋設した状態で、引き抜くように回収できる形態で運用する計測器を開発目標とした。そこで、特に図-2 に示すインバート隅角部での計測ガイド管に対する長尺の計測器の挿入性と回収性、センサ個数の増加に伴う製作コストの両方を考慮して、1ユニットの延長を $L=500\text{mm}$ とした。各ユニット接合部は 1 方向にのみ可動するナックルジョイントを介して、必要な計測延長だけ連結するものとした。挿入時には、可動する方向を鉛直方向に向けることにより、確実にインバートの隆起と沈下を捉える事が可能である。図-3 は現場実験に用いたトンネル全断面相当の延長を持つ T-Invert Monitor の外観と接続部の詳細図である。各ユニットの外装は外径 25mm のステンレスパイプ (図-3 は展示機として特別に外装を透明塩ビパイプとした) にて製作し、加速度センサはユニット中央部に配置しエポキシ樹脂で止水した。さらに、接合部のナックルジョイントは熱収縮チューブによる防水処理を施した。

3. 室内曲げ試験による計測精度検証

参考文献2)ではインバートの収束判断の時期として 2 mm/月の目安を示している。このため、インバート中央部での目標精度を $\pm 1\text{mm}$ とし、トンネル半断面分に相当する 7 m の試作計測器を用いた室内変位計測試験で精度検証を行った。本試験では、T-Invert Monitor を外

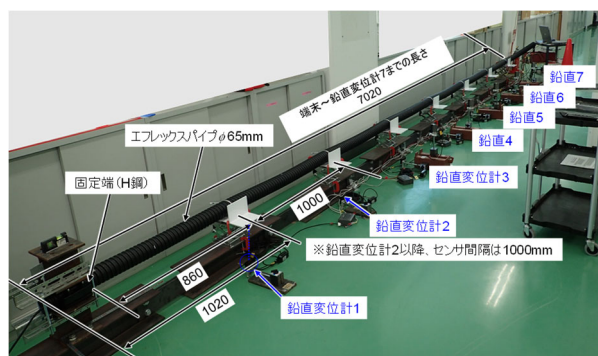


図-4 計測ガイド管の配置状況（水平配置）
Fig.4 Sensor guiding pipe setting for laboratory tests
(placement simulating flat invert)

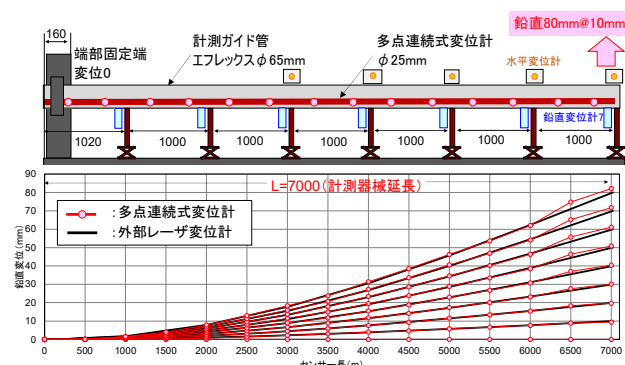


図-6 水平配置での試験結果
Fig.6 Results of laboratory bending tests
(placement simulating flat invert)

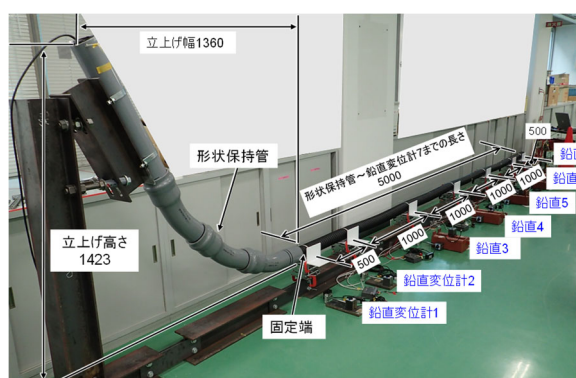


図-5 計測ガイド管の配置状況（端末部立上げ配置）
Fig.5 Sensor guiding pipe setting for laboratory tests
(placement simulating invert corner)

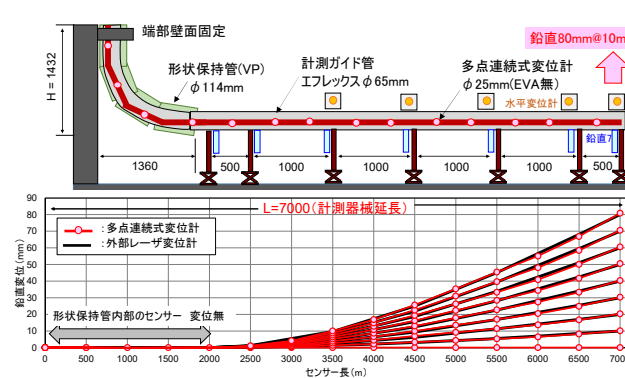


図-7 端末部立上げ配置での試験結果
Fig.7 Results of laboratory bending tests
(placement simulating invert corner)

径65 mmのエフレックスパイプ（計測ガイド管）内に挿入し、その下方から概ね1m間隔で配置した手動ジャッキで押し上げる事により鉛直変位を模擬した。変位量は計測ガイド管を下方より把持する7台の架台にレーザ変位計を取り付けて計測した。計測ガイド管の配置は水平配置（図-4）と、インバート隅角部を模擬した端末部立上げ配置（図-5）の2ケースで検証した。なお、端末部の立上げ配置では、VP直管とベント管で構成される形状保持管の内部に計測ガイド管が通っており、T-Invert Monitorは計測ガイド管内部に配置されている。

両配置ケースともに、先端の鉛直変位計7の位置で上向きに10mmずつ、80mmまで変位を付与した。それ以外の変位計位置では、固定端を変位0とする片持ち梁形状の変形モードとして、手動ジャッキを制御した。

図-6に水平配置でのT-Invert Monitorの計測結果、図-7に端末部立上げ配置の計測結果を示す。図-6に示す水平配置では、端部固定端から6.5～7m位置において変位量が大きくなると、レーザ変位計から推定される変形モード（黒線）よりもT-Invert Monitorによる計測結果（赤線）は局所的に大きな浮き上がり形状を示した。

可撓性に優れるエフレックスパイプを計測ガイド管に採用したために、1m間隔の支持点である場合、計測器の挿入時点で目視でも支持点中間で重力によるたわみが見られた。このため、付与変位量が大きくなると、たわみの解消に伴い付与した変位量以上の変位をT-Invert Monitorで観測したと考えられる。上記は、室内実験における反省点ではあるものの、実計測時にも意図しない計測ガイド管の曲がりや浮き上がりを防止するため、比較的密な間隔で一次インバートに固定する方が望ましいと考えた。上記計測ガイド管のたわみを修正後に実施した端末部立上げ配置では80mmまでのいずれの変位量も、付与した変形モードを多点連続式変位計により正しく計測できている（図-7）。先端部での計測誤差は1.3mmであり、概ね目標とする計測精度を達成することができた。また、先端部に80mmの変位を与えた状態で1週間程度保持し、経時的な計測値の変化を検証したが、先端部での変位量のばらつきは0.2mm程度であり、静穏な環境ではあるものの経時的な計測データの安定性も併せて確認することができた。

端末部立上げ配置では、計測器の挿入性を確認する

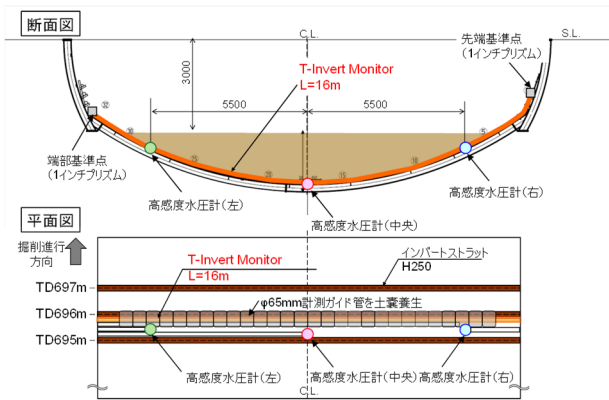


図-8 鼠ヶ関トンネルでの T-Invert Monitor の計測計画図

Fig.8 Measurement plan for T-Invert Monitor

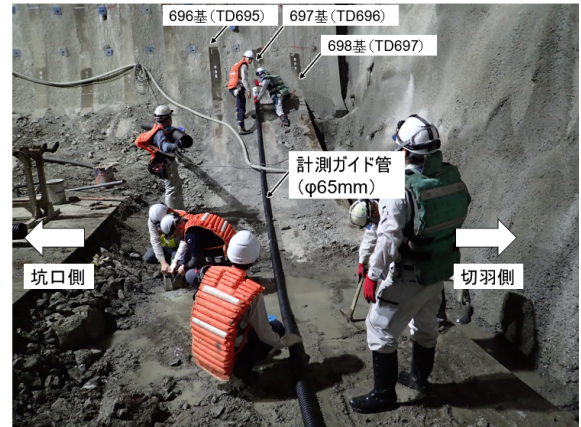


図-10 インバートへの計測ガイド管の設置

Fig.10 Placement of measurement guidance pipe on invert

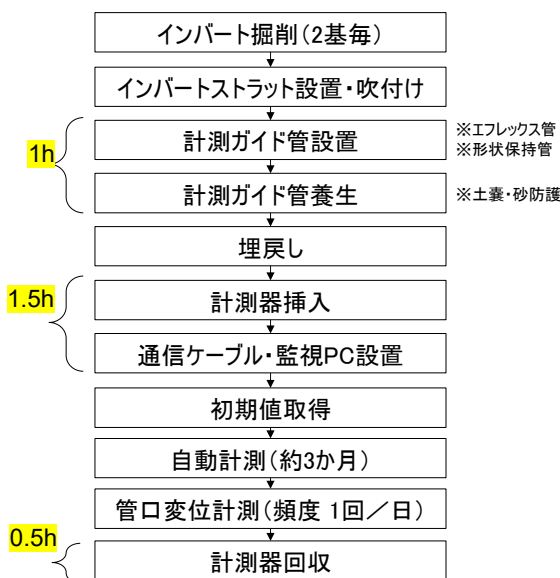


図-9 設置および計測フロー

Fig.9 Implementation and data collection procedures

と共に、計測後を模擬してエフレックスパイプにある一定の変形を与えた状態での回収作業を試行した。その結果、形状保持管で規定される計測ガイド管の曲がり形状であれば、挿入と回収を障害なくスムーズに実施できることを確認した。そこで、次章に示す現場計測実験では、インバート隅角部に図-5と同じ形状保持管（VP直管の延長はトンネル形状に合わせて調整）を設置して、挿入と回収の実現性も確認するものとした。

4. 現場計測実験

現場計測実験は、国道 7 号鼠ヶ関トンネルにて、T-Invert Monitor の施工性検証、ならびに既存手法の浮き上がり計測と比較することによる計測値の妥当性検証を目的に実施した。鼠ヶ関トンネルでは、掘削時にス

メクタイトを多く含有する変質泥岩に遭遇し、掘削済の一部区間で支保や本設インバートの変状をきたしたため、本設インバートの撤去、インバート形状の変更と一次インバートの施工を含む修正掘削（縫い返し）を余儀なくされた。そこで、修正掘削以降の膨張性地山区間では、支保の仕様変更とトンネル断面の早期閉合が実施された。この際、支保設計の妥当性を確認するため、支保応力測定その他、横断面内の 3 か所で高感度水圧計を用いた浮上がり計測が計画された。そこで、T-Invert Monitor も併設して計測結果を比較した。

4.1 施工性確認結果

図-8 に T-Invert Monitor の計測計画図を示す。T-Invert Monitor の設置および計測は、図-9 に示すフローで実施した。まず、インバート部の掘削および支保工の設置は、上半切羽より 6m 後方（下半切羽より 2m 後方）で、2 基（2m）毎に実施された。計測器設置断面（TD695m）では、切羽側の支保工設置断面（TD695m）と併せて掘削作業を行った。一次インバートとしてインバートストラットの設置と吹付けコンクリートを施工した後、T-Invert Monitor を挿入するための計測ガイド管を全断面に敷設した（図-10）。計測ガイド管は、埋戻し時の岩塊が直接計測ガイド管にあたり管が損傷を受けることを防止するため土嚢で防護した。トンネル両側の隅角部には、計測器の挿入を容易にするため、室内実験でも用いた形状保持管で計測ガイド管の曲がり形状を規定した（図-11）。計測器械の挿入は埋戻しが終わった後に、設置用ケーブルドラムを用いて左側側壁より挿入する（図-12）と同時に、先端側ではパイロットワイヤーで張力を与えることにより、管内でたわみを生じないように設置した。形状保持管で計測ガ



図-11 計測ガイド管の土嚢養生と形状保持管

Fig.11 Damage prevention with sandbags and shape retaining assistant pipe



図-12 T-Invert Monitor の挿入状況

Fig.12 T-Invert Monitor insertion to guidance pipe

イド管を挿入可能な形状に規定しているため、計測器械の挿入作業は容易で 5 分程度で終了し、配線や監視モニターの設置も含めて 1.5 時間程度で設置を完了した。

次節に示す 3 か月間の連続計測後には、設置時に使用したケーブルドラムで計測器械を回収し、損傷等がないことを確認した。回収時間は概ね 30 分程度であった。本実験により、設置・回収ができることを実証できたため、一次インバート施工時に、変状の懸念がある際には計測ガイド管のみ設置しておけば任意のタイミングで T-Invert Monitor を挿入できると考えられる。

4.2 計測結果の妥当性検証

計測は、設置直後から約 3 か月にわたって 5~30 分間隔で自動計測した。計測データは坑内 Wi-Fi を利用し

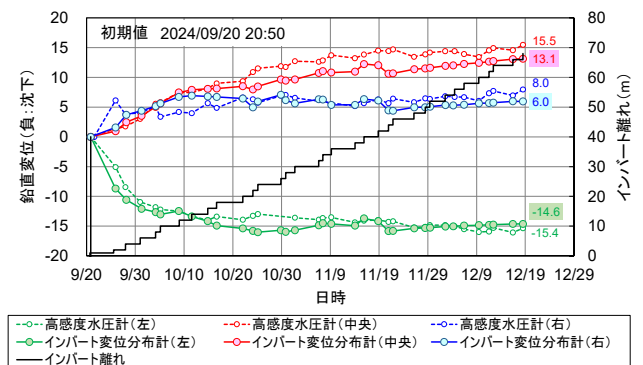


図-13 高感度水圧計データとの比較

Fig.13 Comparison measurement results from T-Invert Monitor and hydraulic pressure gauges

て坑内の計測タブレットにリモートアクセスし、事務所等の遠隔地から常時監視した。図-13 はインバートの施工進捗毎に評価した高感度水圧計の計測結果と、同位置の T-Invert Monitor による結果を比較したものである。高感度水圧計の計測結果は、基準水槽近傍に取り付けた測量ターゲットの計測結果を使って補正し、絶対変位量とした。一方、T-Invert Monitor の計測結果も、両端部に取り付けた測量ターゲットの計測結果を使って補正した。両計測データともに、中央と右側は隆起傾向を示し、左側測点では顕著な沈下を示す結果となり整合的であると判断できる。高感度水圧計位置での最大隆起量はトンネル中央部で 15.5mm (T-Invert Monitor では 13.1mm) であった。一方で、T-Invert Monitor で計測される変位分布を描画すると図-14 のように表現される。インバートの施工進捗に応じて、全体の変位分布は収束傾向を示すが、最大隆起量は中心から右側に 2.8m 離れた点で 24.6mm であり、中央の計測値に比べると約 1.9 倍 (24.6/13.1) に至った。このような、左右非対称なインバート変位分布を計測した理由は、膨張性粘土鉱物を多く含有し、変状の原因となった変質泥岩と脆弱な黒色泥岩を有する地層がトンネル横断方向に傾斜し、インバートでは右側半断面に顕著に出現していたことであると考えられる (図-15)。このように、脆弱な岩盤の分布状況によっては、トンネル上半部と比較して扁平なインバート部で、浮上がりに対する支保剛性が相対的に小さく、たわみやすいインバート中央部の変位量が必ずしも変位最大量とならないと考えられる。このような場合、中央部等の単点の計測だけでは、インバートの全体安定性を十分に確認できないと想定される。したがって、B 計測等を実施する重要な計測断面においては、T-Invert Monitor を活用した変位分布計測が有効であると考えられる。

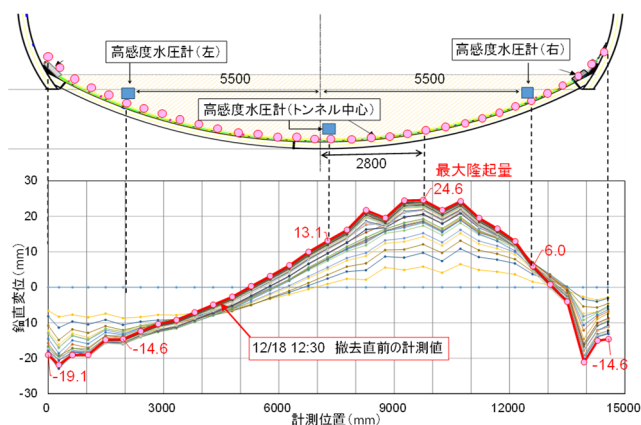


図-14 インバート変位分布の経時変化
Fig.14 Invert displacement distribution over time

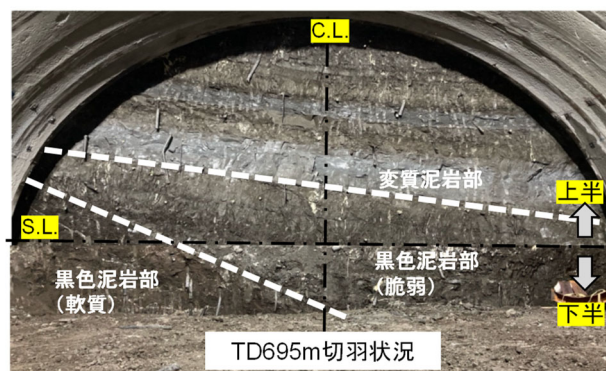


図-15 計測断面 (TD 695m) での岩盤状況
Fig.15 Rock mass condition at the measurement cross section (TD 695m)

5. まとめ

本論文では、山岳トンネルのインバートの変位分布を監視する事ができるT-Invert Monitorの開発成果について報告した。以下に得られた知見を整理する。

- ・インバートに埋設した計測ガイド管への挿入および回収性を確保するため、多点連続式変位計にはMEMS加速度センサを用いて細径（外径25mm）の計測器械を開発した。また、1ユニット長は500mmとし、接合部はナックルジョイントを用いて、設置後にはインバートの隆起と沈下方向にのみ可動する構造とした。
- ・室内曲げ試験を実施し、インバート隅角部を模擬した端末部立上げ配置において、インバート中央部で±1mm程度の計測精度を概ね満足する結果を得た。
- ・現場計測実験では、全断面分のT-Invert Monitorを設置し、約3か月間の連続計測を実施した。比較対象とした3箇所の高感度水圧計による計測結果とほぼ整合する計測結果を得られたため、T-Invert Monitorも一次インバートの変形挙動を適切に計測したと考えられる。
- ・T-Invert Monitorでは、岩盤状況に応じた左右非対称の変位分布を取得できることを確認した。

山岳トンネルのインバート部は、後続の施工または供用段階においては、埋戻して利用され、目視による変状監視が困難であることから、上半・下半に比べて密な変位分布計測が必要とされる場合もある。既往技術であるインバート中央部を代表とする単点計測を基本としながら、B計測が実施される等、より詳細な検討を要する断面では、T-Invert Monitorを用いた変位分布計測を実施するといった運用方法も想定される。今後は、盤膨れの影響が特に懸念される日本海側沿いのトンネル工事を中心に積極的な実務展開を図りたい。

参考文献

- 1) 嶋本敬介, 野城一栄, 小島芳之, 塚田和彦, 朝倉俊弘: 地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.68, No.3, pp.1_65-1_79, 2012.
- 2) 独立行政法人 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008.
- 3) 三浦貴幸, 柿崎昌志, 湊敦之, 田湯正孝: 開業直前にインバート盤膨れ対策を施工-北陸新幹線飯山トンネル板倉工区-, トンネルと地下, Vol. 46, No. 6, pp. 7-16, 2015.
- 4) 小原寛士, 石川大輔, 浅野彰夫: 弾性波探査を活用した一次インバートの施工合理化に関する検討, トンネル工学報告集, Vol. 32, I-39, 2022.
- 5) 伊藤哲, 木梨秀雄, 藤岡大輔, 畑浩二, 辻村幸治: 路盤隆起監視のためのインバート変位計の開発と適用, 土木学会第 71 回年次学術講演会, VI-420, pp. 839-840, 2016.
- 6) 宮沢一雄, 木梨秀雄, 秋山剛史, 伊藤哲: インバート変位計による施工中の路盤隆起観測と対策工, トンネル工学報告集, Vol.27, I-23, 2017.
- 7) 谷卓也, 金子哲也, 野口美咲, 藤井宏和: 液柱式インバート変位計の開発, 土木学会第 73 回年次学術講演会, VI-049, pp. 97-98, 2018.
- 8) 藤井宏和, 水野史隆, 谷卓也: 液柱式インバート変位計測装置の室内検証試験, 土木学会第 76 回年次学術講演会, III-06, 2021.
- 9) 北澤剛: 性状変化が激しい泥岩を前方探査にて事前に評価し掘削-九州新幹線(西九州), 俵坂トンネル(西)他工事, 第 76 回(山岳)施工体験発表会, トンネルと地下, Vol. 46, No. 12, pp. 76-81, 2015.
- 10) 坂井一雄, 市来孝志, 西菌成人, 川原涼太: インバート変位分布計測装置の室内実験, R6 年度土木学会全国大会第 79 回年次学術講演会, III-09, 2024.
- 11) 坂井一雄, 市来孝志, 長谷川知, 渡辺貴之, 西菌成人, 芝原義和, R7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演会, 2025 (投稿中)
- 12) 坂井一雄, 市来孝志, 長谷川知, 渡辺貴之: 多点連続式変位計を用いたインバートの変位分布計測技術の開発, 第 16 回岩の力学国内シンポジウム講演集, pp.114-119, 2025.