

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

宮沢 一雄¹・木梨 秀雄²・秋山 剛史³・伊藤 哲⁴

¹正会員 東日本高速道路(株) 東北支社 山形工事事務所 (〒990-2226 山形県山形市西越42-2)

E-mail:k.miyazawa.aa@e-nexco.co.jp

²正会員 (株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:kinashi.hideo@obayashi.co.jp

³正会員 (株)大林組 東北支店 三吉山トンネル工事事務所 (〒999-3221 山形県上山市関根字三島648-8)

E-mail:akiyama.takashi@obayashi.co.jp

⁴正会員 (株)大林組 生産技術本部 トンネル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

E-mail:ito.s@obayashi.co.jp

供用中のトンネルにおいて、長期間にわたり路盤が隆起し、インバートが破損するケースが発生している。その場合、インバートの改築が必要となり、交通への支障をきたすことになる。施工中のトンネルでは、通常水平内空変位を計測して管理している。本来は鉛直方向の内空変位も監視するべきであるが、施工中は重機等の通行があるために、路盤の変位を計測することは困難である。そのため、アーチ部の内空変位などからインバートの収束を間接的に予測し判断していた。そこで、施工時にインバート部の変位を計測できるインバート変位計を開発した。このシステムを複数の現場に適用し、インバート部の変位収束確認やインバート構造の補強対策に活用した。

Key Words : invert, squeezing, heving, swelling, displacement sensor

1. はじめに

山岳トンネルのインバートは、道路ではD級の脆弱な地山や膨張性を有するような岩種において適用されており、鉄道ではインバートが軌道の基盤となるため必須となっている。しかしながら、これまでに道路・鉄道ともに、供用中のトンネルにおいて路盤が長期間にわたって隆起したため、補強対策やインバートの改築が必要となるケースが発生している。高速道路トンネル内で盤ぶくれにより路盤にき裂が生じた例を写真-1¹⁾に示す。道路トンネルではインバートの改築や新設が必要となり、車線規制・通行止めなど利用者へ影響が及んでいる²⁾。また、鉄道の場合、夜間の極めて限られた時間で補強工が施工されたり³⁾、軌道下のインバートを改築した事例がある⁴⁾。このような盤ぶくれ現象を実験や解析により解明し、予測を試みている研究事例もある⁵⁾。

供用後のインバートの変状を未然に防止するためには、トンネル施工中にインバートの隆起を把握し、補強対策を実施する必要がある。そのためには、通常の計測Aで実施している天端沈下・水平内空変位計測に加え、



写真-1 盤膨れで路面に発生したき裂¹⁾

図-1のように鉛直方向の内空変位も観測して、インバートの変位を把握し補強の要否を判断するべきである。しかし、施工中は重機等の通行があるため、通常の基準点を設けての変位計測は困難となる。また、これまでは計測Aによるアーチ部の内空変位と天端沈下などからトンネル全体の変位収束を判断していた。しかし今回報告するように、計測Aで収束が確認されていても、イン

バートの変位だけが著しく進展する現象を把握した。供用後に路盤の変状が顕在化するケースの多くは、施工中にも潜在的にインバートの変位が進行していたことが推定される。このようなことから、施工時に工事車両の通行に支障なくインバート部の変位を計測できるシステムを開発した。本報では、インバート変位計を用いた種々のケースにおける路盤隆起の計測事例、およびその結果を活用した補強対策の検討事例について述べる。

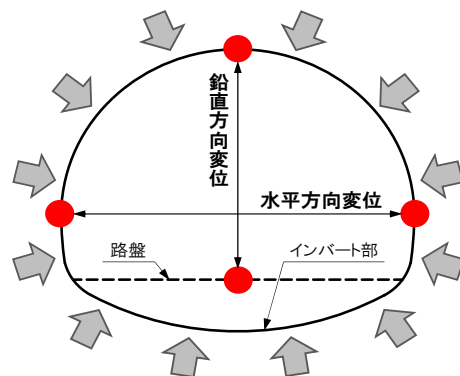


図-1 内空変位計測の概念

2. 計測システムの概要と適用条件

(1) システムの概要

図-2に示すように、施工中の路盤下に水圧計と接続した水管を防護管内に埋設し、地上部に設置した基準水槽の水面との水頭差で隆起量を計測する。本システムにより、インバート部の鉛直変位を常時自動計測できる。計測データは、坑内無線LANを通じて工事事務所に転送され常時状況を確認できるようにした。また、基準水槽をトータルステーションによって三次元計測することで、インバートの絶対変位を把握できる。

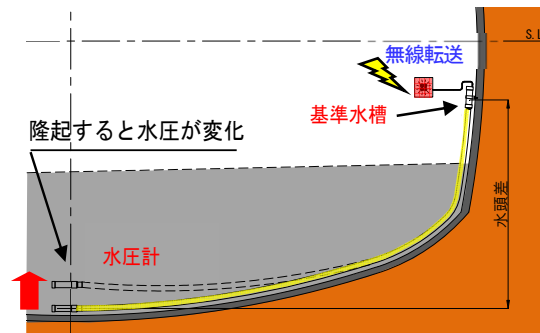


図-2 インバート変位計の概要

(2) 計測器設置手順と計器の精度

インバート部の掘削を行い、地山もしくは吹付けコンクリートなどに埋設用の防護管を設置する。埋戻し後、防護管の中に計測器を挿入し、配線を行う。計測完了後は、掘り返さずに計器を抜き取れるため、容易に転用できる。写真-2は、インバート吹付けに設置した例である。

微小な鉛直変位を上下できる装置を用いて計測精度について検証した。高精度の CPD 変位計を真の変位とみなし段階的に変位を増加させたところ、100mm の変位に対し、インバート変位計の誤差は0.5mm未満であった。



写真-2 インバート吹付け上への設置状況

(3) 適用するケースと実施フロー

インバート変位計は、通常下半掘削後の路盤下に設置しているが、適用する条件としては、主に以下のように分類できる。

① 設計にインバートのあるケース

当初の計測Aで想定外の大きな変状が観測された場合などに、インバート部の変位の有無や収束を確認するために設置する。計測結果から、吹付けコンクリート等による一次閉合の可否を検討できるとともに、インバート設置時期を判断できる。

② 設計にインバートのないケース

計測Aで想定外に大きな変位が発生した場合に、インバート変位を計測し、一次閉合やインバートの可否を判断する。インバート変位計実施のフロー例を図-3に示す。

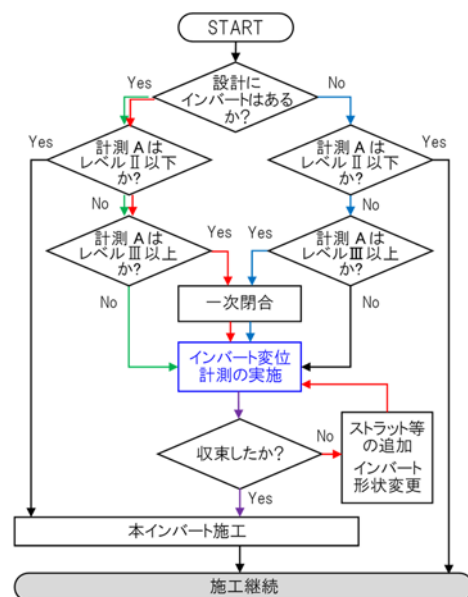


図-3 インバート変位計測のフロー例

矢印の色に関しては後述する。この事例では、管理レベルⅡをインバート変位計測実施のしきい値と仮定し、管理レベルⅢを一次閉合要否の境界としている。一次閉合はストラットの有無や曲率形状を検討して補強することになる。なお、ここではインバート部の変位収束確認後にインバートを施工するものとしている。

3. 現場計測結果

これまでに7現場での計測事例があり、そのほとんどは、一次閉合やインバート打設後の収束確認であった。以下では、収束確認事例2ケースと、著しい隆起計測とその対策例について述べる。

(1) インバートストラット閉合の収束確認事例

道路トンネルの花崗閃緑岩熱水変質部において、掘削時の内空変位が大きく、インバートストラットと吹付けコンクリートで一次閉合を実施した際の計測事例であり、図-3のフローでは青～紫色の矢印の経路に該当する。設置状況を写真-3に示す。インバート変位の経時変化を図-4に示す。開始後3日間に約5mmの隆起が発生しているが、これは隣接する箇所を掘削してインバートストラットと吹付けを施工した影響と考えられ、その後は収束傾向にあることを確認できた。したがって、剛な支保構造での断面閉合効果が確認でき、インバートおよび覆工コンクリートを施工することが可能と判断された。



写真-3 インバートストラットへの設置

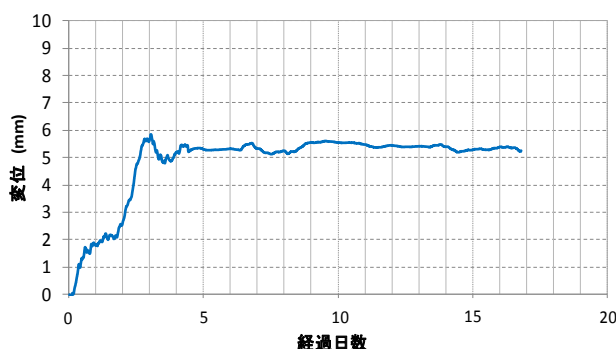


図-4 計測結果（一次インバート施工後）



写真-4 路盤下への設置

写真-5 インバートへの設置

(2) インバート施工前後の計測事例

頁岩地山の道路トンネルにおいて、掘削時の内空変位が大きいため、対策工として増しロックボルトで補強した。増しロックボルト施工後の内空変位は、1mm/週末満を2週連続で確認し安定したが、路盤の隆起が懸念されたため、インバートコンクリート施工前後に計測を実施した。図-3のフローでは緑～紫色の矢印の経路に該当する。インバート施工前は、写真-4のようにインバート部にトレンチを掘削し、インバート変位計を設置した。計測結果を図-5に示す。インバート施工前までの1.5カ月間に約2mmの隆起が発生しているが、収束傾向にあり吹付け閉合等は不要と判断された。その後、一旦計測器を撤去し、インバート施工後に写真-5のように再度インバート変位計を設置した。図-5に示されるように、3カ月以上にわたり有意な変位はなく、インバート打込み後は、変位が収束したものと確認された。

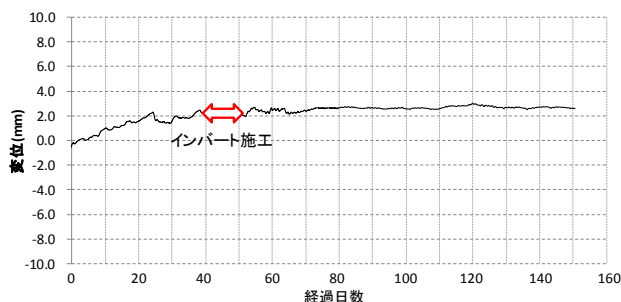


図-5 計測結果（インバート施工前後）

(3) 著しい隆起とその対策事例

現場は東北中央自動車道三吉山トンネル（東日本高速道路）である。当該区間は安山岩が主体であり、発破で

施工していたが、局所的に膨張性の凝灰角礫岩がトンネルと交差し、約50m区間で内空断面を冒す変状が発生した。内空変位は最大380mm（片側）に達し、インバート吹付け（厚さ200mm）により断面を閉合後、縫い返しを実施した。その後、内空変位は10mm以内で収束したものの、インバート部の隆起の懸念があるためインバート変位計を2か所に設置した。図-3のフローでは赤～紫色の矢印の経路に該当する。計測結果を図-6に示す。約50日間に60mm超の隆起を観測した。インバート吹付け

のための掘削時には湧水が見られたことから、変状の原因は膨張性地山の応力解放と湧水による膨潤の複合的要因によるものと考えられる。計測開始から隆起速度が大きかったため、湧水の影響を低減するため変状区間の両端路盤下レベルで排水を実施したところ、変位速度が低減する傾向が認められた。

つぎに、本システムの保護管内に加速度式変位計を併せて設置し、0.5mごとの鉛直変位を計測を試みた。その結果、図-7のようにインバートのスパン中央部ほど変位が大きく分布していることが分かった。すなわち、本システムのように変位が最大となる中央部にセンサを設置して計測することは、妥当であることが分かった。

対策としては、インバート部に作用している荷重に対抗できる構造に修正することが必要となる。まず、過去の同様なインバート変状対策の実績を考慮し、図-8のようにインバート形状を深型に改良し、高規格支保工 HH-100 と吹付けコンクリート（厚さ 150mm）で閉合したうえで、最大厚約 1m のインバートコンクリートの重量で変位を抑制する構造とした。

つぎに、本構造の妥当性について、フレーム解析により以下の手順で検証した。

- ① フォークト型の近似式を用いて対策前のインバート吹付け閉合構造での残留変位を求める（図-9）。なお、予測は図-6 で変位が大きい方を選択した。
- ② フレーム解析において、アーチ部とインバートに等分布荷重を外力として作用させて隆起を発生させて、①の残留変位が発生する荷重値を求める。
- ③ 対策後の構造モデルに②で求めた荷重を作用させて部材の発生応力を照査する。

上記のフレーム解析で作用させる等分布荷重を複数実施すると、図-10 のように作用荷重と変位、およびストラットの発生応力はほぼ線形関係にあることがわかる。この結果、予測した残留変位 46mm に対しストラットに発生する応力は降伏応力の 6 割程度であることが分かった。また、吹付けコンクリートの応力は 4N/mm² で設計基準強度の 2 割程度と小さくなった。

その後、図-8 の構造により対策工を施工した。初回のインバート吹付けの掘削時に発生していた湧水は、排水により地下水が低下した効果で、二度目の掘削では見られなかった。この対策工完了後にもインバート変位、およびインバートストラット（鋼製支保工）の応力を計測した。図-11 は図-6 に示した当初の著しい隆起に対策後のデータを追記したものである。対策の結果、インバート変位が当初に比べると大きく抑制されていることがわかる。ストラットの内縁応力は 100N/mm² 程度の曲げ引張応力が作用しているが、降伏応力の 1/4 未満であり、

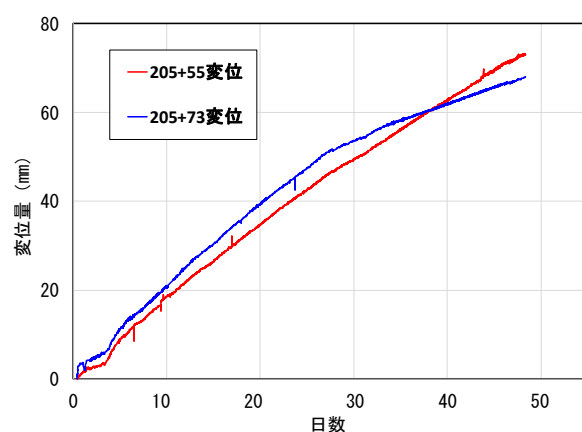


図-6 インバート変位計測結果

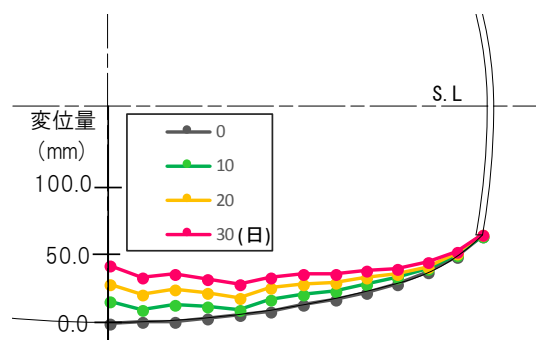


図-7 インバート部鉛直変位の分布

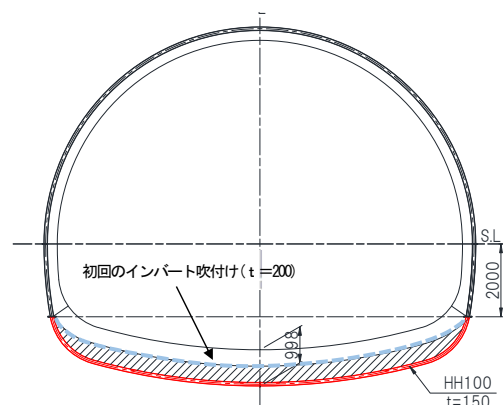


図-8 インバート構造の変更

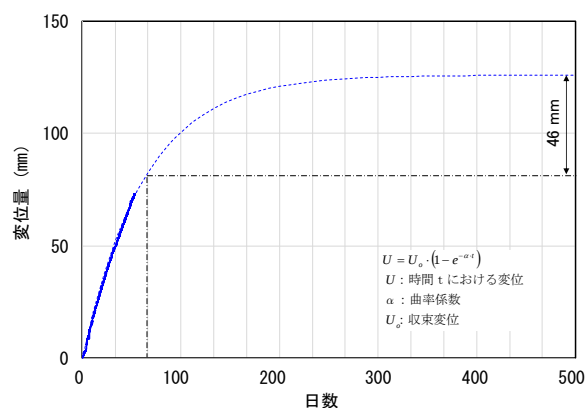


図-9 残留変位の予測

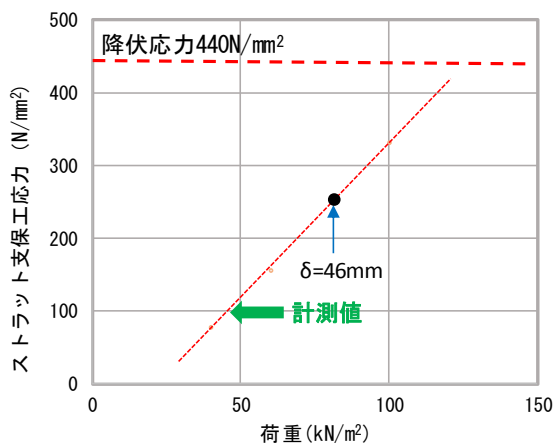


図-10 ストラットの応力（解析値）

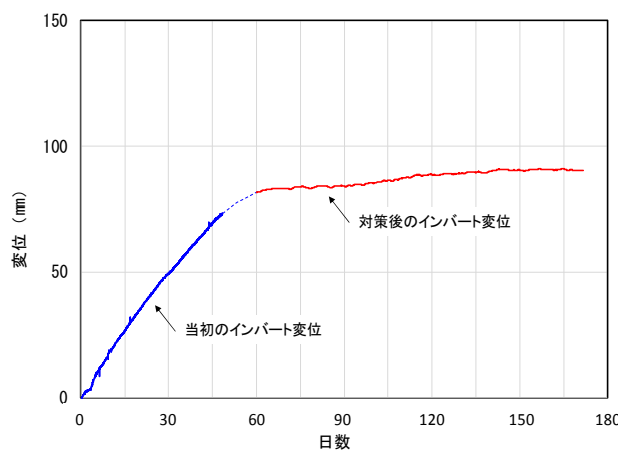


図-11 対策前後のインバート変位比較

かつ、この値は図-10 の予測値の 38%程度である。現在も計測を継続中であるが、これまでのところ対策工の効果が十分得られたものと評価できる。

4. まとめ

開発したインバート変位計を用いて膨張性地山における著しい路盤隆起を施工中に計測した。当該箇所は掘削時に大きく変状したため、縫い返しを行い内空変位を収束させたが、その後もインバートのみが大きく隆起していることが計測により判明した。従来は計測Aから地山変位の収束を判断しているが、今回の事例によりインバート変位計測の重要性が明らかになった。

供用後の路盤変状を防止するためには、掘削中大きな変位が発生した箇所ではインバート変位を計測し、その結果を反映させた対策を実施して隆起を収束させることが重要である。その際、図-3に示したようなフローに従ってインバートの安定性を確認しながら施工することも重要となる。対策工としては、インバートストラットの適用やインバート形状の修正が有効と考えられる。今後も適用事例を増やし対策に役立てたい。

参考文献

- 1) 宮沢一雄, 安田賢哉, 須山恭三, 渡辺淳: 昼夜連続通行止めによる全断面連続片押し工法でインバートを新設, トンネルと地下, 第47巻8号, pp.7-18, 2016.
- 2) 丸山勝, 中野清人, 天野浄行, 下村哲雄: 61日間連続車線規制によるインバート再構築工事, トンネルと地下, 第44巻12号, pp.17-28, 2013.
- 3) 佐久間智, 菅原徳夫, 多田誠, 遠藤祐司: 供用中に発生した急激な盤ぶくれ変状を復旧する, トンネルと地下, 第40巻12号, pp.45-53, 2014.
- 4) 久保原猛, 若林秀明, 鈴木延彰, 齋藤貴: 供用中のトンネルで未収束の変位に挑む, トンネルと地下, 45-53, 2014.
- 5) 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ぶくれ対策を施工, トンネルと地下, 第46巻6号, pp.7-16, 2015.
- 6) 奥井裕三, 太田裕之, 早川泰史, 伊佐治晋: 緩慢に進行する盤ぶくれ現象の調査とトンネルの安定性評価に対する一考察, トンネル工学報告集, 第20巻, pp.85-92, 2010.
- 7) 小林寛明, 井浦智実, 上野光, 渡辺和之, 嶋本敬介, 伊藤直樹: 山岳トンネルの盤ぶくれとその対策に関する基礎的研究, 第25回トンネル工学研究発表会論文予稿集, 2015.

(2017.8.11 受付)

DISPLACEMENT MEASUREMENT OF HEAVING AND ITS COUNTERMEASURES IN MOUNTAIN TUNNELS

Kazuo MIYAZAWA, Hideo KINASHI, Takashi AKIYAMA and Satoshi ITO

In order to prevent the long-term floor heaving, it is necessary to take measures to observe the uplift during construction. The authors developed a system that can measure the displacement by burying under the tunnel floor. In this paper, we describe the case of roadbed displacement measurement during construction and the consideration of countermeasures. In the squeezing green tuff, significant uplift have been observed. Reflecting this measurement result, we investigated an inverted structure that can counteract the squeezing by numerical method.