

膨圧現象が発生したトンネルの変状対策と 長期計測に基づく効果の検証

近藤 英治¹・水野 光一郎²・野澤 伸一郎³・山崎 崇⁴・丸山 修平⁵

¹正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター
(〒141-0031 品川区西五反田 3-5-8 JR 目黒 MARC ビル 4 階)
E-mail: e-kondo@jreast.co.jp

²正会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター
(〒141-0031 品川区西五反田 3-5-8 JR 目黒 MARC ビル 4 階)
E-mail: kou-mizuno@jreast.co.jp

³フェロー会員 東日本旅客鉄道株式会社 構造技術センター
(〒141-0031 品川区西五反田 3-5-8 JR 目黒 MARC ビル 4 階)
E-mail: s-nozawa@jreast.co.jp

⁴東日本旅客鉄道株式会社 新潟支社 新潟土木技術センター
(〒950-0086 新潟県新潟市中央区花園 1-1-4)
E-mail: y-takashi@jreast.co.jp

⁵東日本旅客鉄道株式会社 新潟支社 新潟土木技術センター
(〒950-0086 新潟県新潟市中央区花園 1-1-4)
E-mail: shiyuuhei-maruyama@jreast.co.jp

膨圧現象が発生した鉄道の山岳トンネルの変状に対してインバートの設置や裏込め注入, ロックボルトの打設, SFRC の吹付けといった対策工を実施した. これらの対策工について, 内空変位測定 of 長期計測結果に基づき効果を検証した. 検証にあたっては, 実トンネルの現象を捉える手法として, 内空変位測定に着目し, 約 50 年にわたる長期計測の結果を活用した. その結果, 本トンネルで実施した一連の対策工は, 変状の程度や時期に応じて適切であったことや, 対策の効果は長期間にわたり持続することがわかった. 一連の検証を通じて, 外力の影響を受ける鉄道の山岳トンネルの変状の対策について, 対策工の選定の要点や対策工の効果, 効果の確認方法の例を示した.

Key Words: mountain tunnels, convergence measurement, counter measure, invert, railway

1. はじめに

山岳トンネルは地質や地形, 構造の条件によっては供用後に土圧の作用をはじめとする外力の影響により覆いのひび割れや変形, 内空断面の縮小といった変状が発生することがある¹⁾. 外力の影響を受けるトンネルは慎重な監視とともに対策が必要となり, ロックボルトの打設やストラット, インバートの設置をはじめとした対策工^{例えば2)~5)}を実施することがある.

山岳トンネルへの外力の影響は, トンネル周辺の地質の力学特性や水利特性, 地形によって生じることが多く^{1)~6)}, トンネルへの作用として継続することも多い. そのため, 対策を実施した後のトンネルに対する状態の監視は, 確認された変状の原因に関する推定結果の検証や

対策工の効果の検証が必要となると思われる. また, 対策後の監視により, 対策によっても変状の進行が収束しないと判断される場合もあり, 追加の対策を実施することがある^{例えば7)~9)}. 以上の観点から, 対策後の慎重な監視はトンネルの維持管理において重要であると思われる.

対策後の監視の手法は, 変状を確認した後と同様に, トンネルの内空断面の変位の測定 (以下, 内空変位測定) によって行われ, 内空断面の変位 (以下, 内空変位) の速度で進行性を評価し, 内空変位の大きさと合わせて安全性を検討することが一般的であるように思われる^{1)~9)}.

対策工の効果の検証に関しては, 各種の研究が行われている. 解析的な検討の事例では, トンネル周辺の地山の力学特性や時間依存性を考慮した解析手法が提案され^{例えば10)~15)}, これらの解析的な手法は, 個別の変状に対し

て変状の原因の推定や対策を検討する際の有用な手法の一つと思われるが、対策後の効果については検討事例が少ない。補強効果を解析的な検討をしている事例においても、地山の劣化の予測や作用の評価は課題^{14,15)}とされている。

模型実験によって効果を検証した事例も報告されている^(例えば 17~20)。これらの研究では、山岳トンネルを模擬した模型の載荷試験により対策工の効果の検証を行っており、対策工の効果について有用な知見を与えている。

ここで、山岳トンネルをはじめとした地下・トンネル構造物の変状について考えると、各種の変状は建設時の情報をはじめとした個々の構造物に特有の条件により分析する必要があるといわれている¹⁶⁾。また、実際の山岳トンネルの変状は地質や地形、構造に加え、背面空洞や覆工の設計厚に対する覆工厚の不足といった構造的な欠陥などの様々な要因が複雑に関連していると考えられる。よって、対策後のトンネルの監視という個々のトンネルの現象を対象とした場合には、既往の研究による数値解析や模型実験の知見を適用することには慎重な検討を必要とするように思われる。

計測に基づく検証の事例もみられる^(例えば 21,15),21)~23)が、検討事例は少なく、特に、計測期間が 20 年を超えるような長期の事例は極めて少ない。また、対策工を実施した後の数年間の計測で効果を検証しているものが多く、変状の進行が緩やかである事例もある山岳トンネルの特徴を捉えた計測に基づく検証は極めて少ないように思われる。

よって、本稿では、変状が確認され、対策工を実施した鉄道の山岳トンネルを対象として、実施された対策工の妥当性や対策工の効果について長期的な観点で検証を行う。検証にあたっては、実トンネルの現象を捉える手法として、内空変位測定に着目し、約 50 年にわたる長期計測の結果を活用する。

以上を背景に、本稿では、まず、対象としたトンネルで確認された変状と実施された対策について、文献^{7), 8)}に記載された内容をレビューし、変状の原因や対策工の選定の要点について考察する。次に、対策実施後から近年までの内空変位測定による長期計測結果に基づき、当該トンネルで実施された対策工の効果の検証の結果を示す。そして、一連の検証を通じて、外力の影響を受ける鉄道の山岳トンネルの変状の対策工について、対策工の効果や効果の確認方法について示す。

2. 対象としたトンネルの概要^{7), 8)}

(1) トンネルの諸元

対象としたトンネルは、経年約 55 年の鉄道の山岳ト

ンネルで、矢板工法で構築された複線断面のトンネルである。土被りは最大で 150m 程度で、覆工は無筋コンクリート造である。覆工の設計厚は 50~60cm 程度で、建設時にインバートは両坑口部を除き設置されていなかった。排水設備は湧水量の多い出口付近のみ中央排水管となっており、その他の区間は変状箇所も含めて側溝となっていた。

(2) トンネル周辺の地質と地形

トンネル周辺の主な地質は新第三紀鮮新世の西山層の泥岩、砂岩などにより構成されている。変状が確認された区間の土被りは 60m 程度であり、泥岩の箇所位置している。

建設時のボーリング調査の結果から、変状が確認された区間の地山強度比 G_n^0 は $G_n=2\sim4$ であり、地山強度比による地圧の評価⁹⁾では「軽度な押し出し性～地圧が大きいと推定される」に分類された。

3. 変状と対策の経緯^{7), 8)}

本トンネルでは変状の程度の大きな変状が 2 度確認されている。そのため、供用直後から約 18 年の間に発生した変状を「第 1 次変状」とし、その後確認された 2 度目の変状を「第 2 次変状」と表現することとする。

(1) 第 1 次変状

a) 変状の概要

供用開始から約 4 か月後に、待避所内にひび割れが確認された。覆工は内空側に押し出され、トンネル本体と待避所が分離する形となった。また、側壁が押し出されたことに伴い、側溝の変形も広い範囲で確認された。変状が発生した後に慎重な監視が始められ、内空変位測定として施工基面付近の高さでの側壁間隔の測定を開始した。当時の内空変位測定では、年間で約 36mm の内空断面の縮小が確認された。また、アーチ部には圧ぎによる覆工のはく離やはく落、ひび割れといった変状が確認された(図-1)。路盤部では列車荷重が路盤部に繰り返し作用することにより、噴泥現象が発生していた(図-2)。

b) 変状の原因推定

トンネル建設時に泥岩の区間では少量の湧水が確認されていた。この湧水が路盤部に浸透し、列車通過によって路盤部分の泥岩が泥濘化した。これにより、側方からの土圧に対する抵抗力が小さくなり、待避所および側壁の変状、覆工のひび割れ、圧ぎの発生へと進展したと推定された(図-3)。

c) 第 1 次変状対策

路盤下の水位の低下を目的として、道床の交換や中央



図-1 アーチ部の変状

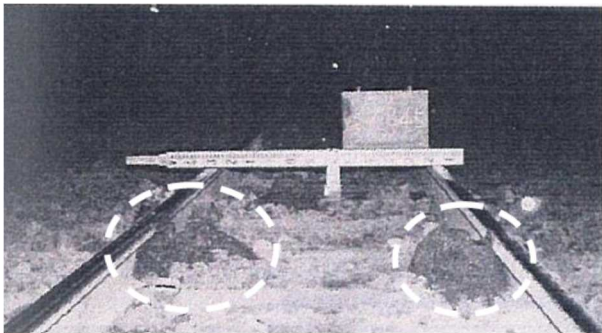


図-2 路盤部の噴泥

排水溝の新設、溜枳の新設などの対策を行った。また、クラウン部で覆工背面に空洞が確認された箇所はモルタルの裏込め注入を実施した。圧ざによってはく落した覆工の表層部については金網を設置したうえで、モルタルの吹付けによる補修を実施した。その後、内空断面の縮小に対する抜本的な対策として路盤部にインバートまたはストラットを設置し、側方からの土圧に抵抗する構造とした。

d) 対策の効果

対策実施前後における内空変位測定の結果を図-4に示す。図-4において、縦軸の内空変位は、負の値が内空断面が縮小することを示し、正の値が拡大することを示している。対策を実施する前の内空変位の速度は約36mm/年および約28mm/年の縮小と進行性が非常に大きいことが確認されていた。第1次変状対策後は、内空変位測定の結果で多少の揺らぎがみられるものの、インバートを設置したことにより、対策から約2年程度で内空断面の縮小が緩やかになっていることがわかる。また、対策実施後も15年以上にわたり内空変位測定を継続しており、計測期間中に大きな変動はみられなかったことがわかる。

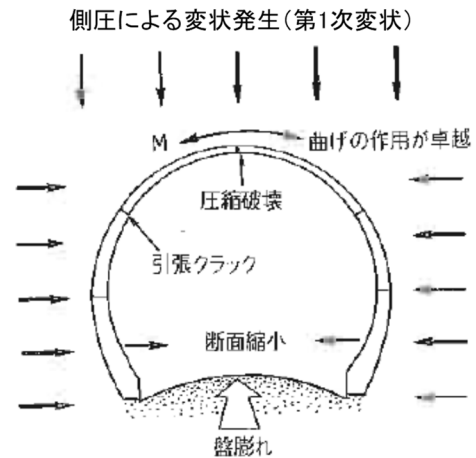


図-3 第1次変状のイメージ

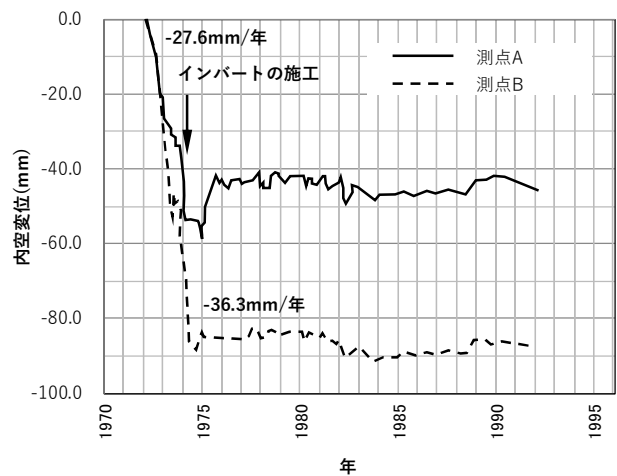


図-4 内空変位の推移 (1972~1992年)

(2) 第2次変状

a) 変状の概要

第1次変状対策の実施により、トンネルの状態は安定したと考えられていた。しかしながら、インバートの設置から約17年後に、一部の箇所において、クラウン部に施工した吹付けモルタルに圧ざが発生し、これによるはく離が確認された(図-5、図-6)。はく離箇所を中心に放射状のひび割れも確認された。確認された変状の内容から、当該箇所では外力の影響を受けていると判断された。

調査の結果、覆工には部分的に覆工厚が薄い箇所が確認されたほか、地山や建設当時の胴木、変形したセンターなどが部分的に露出していることが確認された。

b) 変状の原因推定

本トンネルへの外力の大きさなどの詳細や変化は不明であるが、当該箇所には第1次変状対策後も外力は作用し続けたと思われる。第1次変状対策による構造の変化に着目して、以下に記載する。



図-5 クラウン部周辺の第2次変状の発生状況

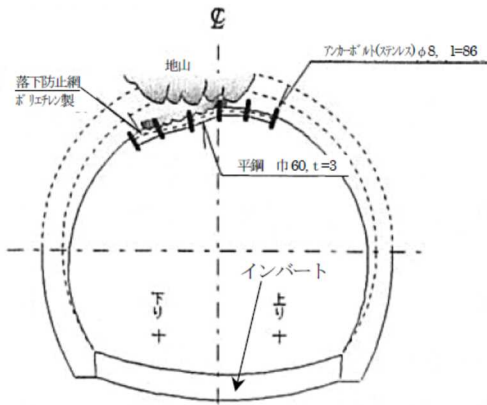


図-6 第2次変状の発生状況⁸⁾

当該箇所では、第1次変状対策のインバートの設置によりトンネルの構造が閉合された構造に変化して、側圧に対する抵抗力と鉛直支持力は増加し、図-4の計測結果のように内空変位も小さくなったと思われる。一方で、覆工には閉合構造の内力として軸力が大きくなったと思われる。覆工には部分的に覆工厚が小さいという構造的な欠陥を有していたため、その箇所が結果として構造上の弱部となり、変状が発生したと考えられる(図-7)。

また、覆工には放射状のひび割れが確認されたことから、上部の地山の緩み領域が拡大し、当該部に鉛直圧も作用したことも考えられる。

c) 第2次変状対策

はく離に対する応急対策では、はく離したモルタルを除去したのちに、落下防止網を設置した。外力への対策として、覆工の全周にロックボルト(L=5.0m)を1.5m間隔で打設した。ロックボルトの打設後、セントル(H-150)を1.5m間隔で設置した。

また、モルタルがはく落したクラウン部にはFRP板を取り付け、その背面にはウレタン系の発泡材を注入した。その後、SFRCを吹付けた(図-8)。

(3) 考察

第2次変状の観察より、インバートの設置は、覆工に作用する力を大きく変化させると推定された。この構造

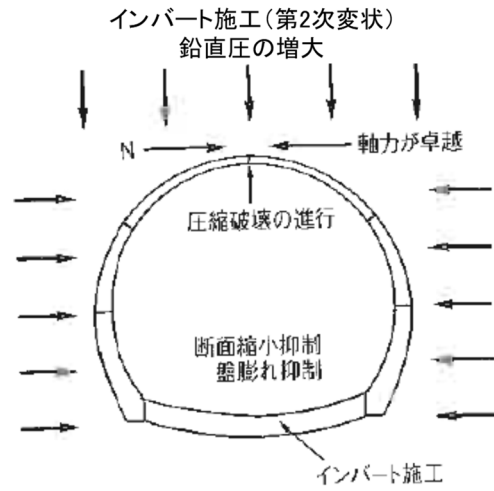


図-7 第2次変状のイメージ⁷⁾

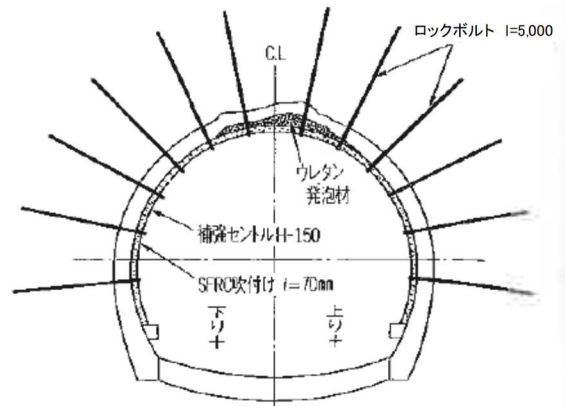


図-8 第2次変状の対策工⁷⁾

の変化により、覆工に作用する力を大きく変化させることになり得る。そのため、対策工の設計段階において、覆工厚の不足や覆工背面の空洞といった構造的な欠陥の有無を十分に確認することが重要である。

また、対策工の設計段階において、構造的な欠陥を有している場合は、対策によって新たな変状を誘発させるおそれがあることから、変状の対策と併せて機能を回復させることを十分に検討し、構造的な欠陥が変状に与える程度により対策を実施することが重要である。

4. 第2次変状対策後の効果の検証

(1) 効果の検証方法

本トンネルで実施した対策工の効果を検証した。効果の検証は、2箇所で行った。当時は第1次変状対策の実施後に変状は収束したと判断され、測点Aおよび測点Bは存在しなかった。そのため、第2次変状対策を実施した箇所として、測点Aより13m離れた測点(以下、測点C)と第2次変状の類似箇所として対策が実施されたと考えられる箇所として、測点Bより10m離れた測点

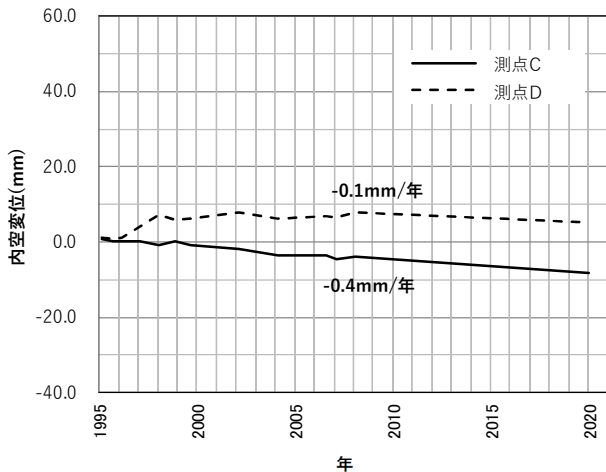


図-9 第2次変状対策後の内空変位の推移 (1995～2020年)

(以下、測点D)で行った。内空変位測定の間は、第2次変状対策の実施後の約25年間である。また、内空変位測定の側線に限られるため、目視による覆工の表面の状態の確認を併せて行い、トンネル断面全体での変化に着目するようにした。

(2) 内空変位測定

図-4に示した計測位置近傍における第2次変状対策後の内空変位の推移を図-9に示す。図-9において、縦軸の内空変位は、負の値が内空断面が縮小することを示し、正の値が拡大することを示している。図-9をみると、第2次変状対策後の3年程度は内空断面が拡大する傾向がみられたものの、その後は内空断面の縮小は緩やかになったことがわかる。また、近年までの長期間で考えると、内空変位の速度は0.5mm/年未満の縮小となっていることがわかる。第2次変状対策後の長期間での内空変位の量を考えても、複線断面であることや他のトンネルでの計測事例¹⁷⁾から図-9の内空変位の量はトンネル構造の安定性が失われるような大きな値ではないと考えられる。

(3) 覆工の状態

覆工の状態を外観からの目視により継続的に確認している。第2次変状対策後には顕著なひび割れや圧ざといった外力に起因する新たな変状は確認されていない。

(4) 考察

内空変位測定の結果から、第1次変状対策で実施したインバートの設置による対策と第2次変状対策で実施した一連の対策は、継続的に内空断面の縮小を抑制していると思われる。また、覆工の状態から、第2次変状対策後、外力の影響による変状程度の大きい新たな変状は発生していない。

以上より、本稿は約50年にわたる長期計測により本トンネルで実施したインバートの設置や裏込め注入、ロックボルトの打設、SFRCの吹付けといった一連の対策工が外力の影響を受ける鉄道の山岳トンネルの変状の対策工として、変状の程度や時期に応じて適切であったこと、また、対策の効果が数十年にわたって持続されていることがわかった。

ただし、内空変位測定の側線に限られるため、第1次変状対策と第2次変状対策で実施された各種の対策工の効果がそれぞれどのように発揮されているかを分析することは難しいように思われる。また、山岳トンネルへの外力の影響は緩やかかつ長期的に計測する場合もあり、外力対策として効果を発揮するインバートの設置による対策であっても、対策後も内空断面の縮小は緩やかに継続することがある。そのため、計測によって効果の確認を継続することや追加の対策工の必要性を検討することが重要である。

5. 得られた技術的知見

本トンネルで発生した変状と、約50年にわたる内空変位測定による長期計測の結果から、外力の影響を受ける鉄道の山岳トンネルの変状の対策工について効果を検証した。本稿で対象とした事例から、得られた知見は以下のとおりである。

- ・インバートの設置は、外力の影響を受ける山岳トンネルの対策として有効である。
- ・インバートの設置による対策工の効果は、長期間にわたり持続する。
- ・インバートの設置は、トンネルの構造を閉合した構造に変化させる。この構造の変化により、覆工に作用する力を大きく変化させることになり得る。そのため、対策工の設計段階において、覆工厚の不足や覆工背面の空洞といった構造的な欠陥の有無を十分に確認することが重要である。
- ・対策工の設計段階において、構造的な欠陥を有している場合は、対策によって新たな変状を誘発させるおそれがあることから、変状の対策と併せて機能を回復させることを十分に検討し、構造的な欠陥が変状に与える程度により対策を実施することが重要である。
- ・外力の影響を受ける変状の対策は、変状の程度や時期に応じて適切に実施することが重要である。これらの技術的な判断を誤ると、場合によってはトンネルの構造の安定性が失われることにつながりかねず、注意が必要である。
- ・山岳トンネルへの外力の影響は緩やかかつ長期的に継続する場合もあり、外力対策として効果を発揮するイ

ンバートの設置による対策であっても、対策後も内空断面の縮小は緩やかに継続することがある。そのため、計測によって効果の確認を継続することや追加の対策工の必要性を検討することが重要である。

- ロックボルトの打設や裏込め注入などの対策工も外力対策として効果を発揮すると思われるが、対策後の効果の確認を継続的に必要とすることはインバートの設置と同様である。
- 長期的な計測は、内空変位測定による方法が有用である。ただし、計測に限られた位置となる場合があることのほか、限られた測線での情報となることがあるので、トンネルの維持管理においては、トンネル技術者による変状の目視の確認などを加えて複数の方法でトンネルの状態を適切に判断することが重要である。

6. おわりに

本稿では、膨圧現象が発生したトンネルの変状に対して実施した対策工について、内空変位測定と長期計測結果に基づき効果を検証した。一連の検証を通じて、外力の影響を受ける鉄道の山岳トンネルの変状の対策工について、対策工の選定の要点や対策工の効果、効果の確認方法の例を示した。

一方で、約 50 年にわたる長期計測の結果を活用して、外力の影響を受ける鉄道の山岳トンネルの対策について効果を示したが、外力の影響を受ける変状は抑止することは難しく、本トンネルのように緩慢ながら数十年にわたって変位が継続し続けることが考えられる。

本稿の知見が今後のトンネルの維持管理の参考となれば幸いである。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，2007。
- 2) 鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998。
- 3) 鉄道総合技術研究所：トンネル補修・補強マニュアル，2007。
- 4) 東日本旅客鉄道株式会社：土木構造物等補修補強マニュアル，2022。
- 5) 土木研究所：道路トンネル変状対策工マニュアル（案），土木研究所資料第 3877 号，2003。
- 6) 土木学会：2016 年制定トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説，2016。
- 7) 片寄紀雄，松本武海，興石逸樹：緩やかな膨圧減少と付き合って 30 年，JR 信越本線塚山トンネル，トンネルと地下，第 28 巻 3 号，pp.7-15，1997。
- 8) 樺沢常昭：信越本線塚山トンネルの変状および対策，

新線路 63 号，2009。

- 9) 野澤伸一郎，伊藤忠八，竹内定行：既設トンネルの膨圧を克服，只見線六十里越・田子倉トンネル，トンネルと地下，第 23 巻 10 号，pp.17-22，1992。
- 10) 里優，竹田直樹，亀村勝美：強度の時間依存性に着目した岩盤の解析，土質工学研究発表会，G-1，pp.817-820，1983。
- 11) 野城一栄，嶋本敬介，小島芳之，高橋幹夫，松長剛，朝倉俊弘：地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用，土木学会論文集 C，Vol.65，No.1，pp.107-119，2009。
- 12) 松長剛，野城一栄，朝倉俊弘：地山劣化モデルによるトンネル変状の進展予測に関する研究，土木学会論文集 C，Vol.65，No.2，pp.467-479，2009。
- 13) 奥井裕三，西村和夫：岩石の吸水膨張と強度低下を考慮した山岳トンネルの変状再現モデル，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，Vol.74，No.1，pp.40-51，2018。
- 14) 奥井裕三，西村和夫，砂金伸治：軟岩の膨潤と強度低下を考慮した弾塑性時間依存モデルと変状トンネルへの適用，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，Vol.76，No.1，pp.1-20，2020。
- 15) 野城一栄，嶋本敬介，大原勇，水谷真基：供用後の変状山岳トンネルの補強工の評価と簡易な設計法に関する研究，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，Vol.77，No.1，pp.1-16，2021。
- 16) 籠雅貴，水野光一郎，友利方彦，野澤伸一郎，露木寿，久保木利明：技術者の評価に基づいた地下・トンネル構造物の維持管理戦略の検討と制度の構築，土木学会インフラメンテナンス実践研究論文集 Vol.1，No.1，pp.514-520，2022。
- 17) 蒲田浩久・真下英人・石村利明：トンネル変状対策工の補強効果に関する実験的研究，トンネル工学研究報告集，Vol.12，pp.441-456，2002。
- 18) 箱石安彦・真下英人・石村利明・森本智：損傷トンネル覆工における内巻きコンクリートの補強効果に関する実験的研究，トンネル工学研究報告集，Vol.13，pp.349-354，2003。
- 19) 真下英人・森本智・木谷努・角湯克典：損傷を受けたトンネル覆工の内面補強対策の効果に関する実験的研究，トンネル工学研究報告集，Vol.18，pp.21-32，2008。
- 20) 嶋本敬介，中根利貴，水谷真基，野城一栄：地圧を受ける山岳トンネルへの対策工の効果，第 46 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集，No.39，2019。
- 21) アイダゲンオメール・赤木知之・伊東孝・川本眺万：スキューピング地山におけるトンネルの変形挙動とその予測方法について土木学会論文集，No.448III-19，pp.73-82，1992。
- 22) 奥井裕三・太田裕之・國村省吾・北村元・西村和夫：外力による変状を受けた山岳トンネルの変形速度と対策時期について岩盤力学に関するシンポジウム講演集，No.51，pp.283-288，2016。
- 23) 岩井聡，川越洋，加藤千典：検査実績を活用した帯金トンネルの変状対策工について，土木学会第 66 回年次学術講演会，IV-414，pp.827-828，20011。

(2022. 8.26 受付)

CASE STUDY ON EFFECTIVENESS OF COUNTERMEASURES AGAINST
EARTH PRESSURE OF RAILWAY MOUNTAIN TUNNEL
VERIFIED BY LONG-TERM MEASUREMENT

Eiji KONDO, Koichiro MIZUNO, Shin-ichiro NOZAWA, Takashi YAMAZAKI and
Shuhei MARUYAMA

In this report, the effectiveness of countermeasures to restrain the deformation due to earth pressure in a railway mountain tunnel constructed using the Timbering Support Method are evaluated based on the long-term measured data for about 50 years. Authors considered the cause and mechanism of defects through the past observed defects, long-term measurement on shrinkage of cross section, and observation of tunnel member. Additionally, we verified the effectiveness of countermeasure against earth pressure, the importance of long-term measurement, and essential points of election on countermeasure and observation of defects.