

# 外力性変状の発生したトンネルにおける補強後の全体耐力に関する研究

研究予算：運営交付金 基盤研究（萌芽）  
研究期間：平 26～平 28 年度  
担当チーム：トンネルチーム  
研究担当者：日下 敦

## 【要旨】

トンネル覆工に外力性の変状が発生した場合は、その対策として補強工を施工する機会が多いが、覆工と補強工を合わせた全体の耐荷力に関する知見について不明確な部分が多く、主として経験に基づいて補強規模を決定しているのが現状である。これは既に変状が発生している既存の覆工等の残存耐力が不明であることが要因と考えられる。本研究では、覆工に既に変状が発生している状態で補強を行った場合の、全体耐力の評価手法の提案に資する検討として、要素実験や数値解析を行った。その結果から、覆工に最大荷重レベルの荷重が作用している状態で補強した場合でも、その後の荷重に対して覆工がある程度荷重を分担できる可能性があること等が明らかとなった。

キーワード：トンネル、外力性変状、補強工、模型実験、数値解析

## 1. はじめに

我が国の山岳トンネル工法は、トンネルに多大な外力（地震力を含む）が作用する、極めて厳しい条件下にまで適用性が拡大しており、施工中のみならず供用後もトンネルに外力による変状が発生する事例も存在する。その対策として補強工を施工する機会が多いが、覆工と補強工を合わせた全体の耐荷力に関する知見について不明確な部分が多く、主として経験に基づいて補強規模を決定しているのが現状である。これは既に変状が発生している既存の覆工等の残存耐力が不明であることが要因と考えられる。

本研究では、覆工に既に変状が発生している状態（ひずみが発生している状態）で補強を行った場合の、覆工と補強工を合わせた全体耐力の評価手法の提案に資する検討として、要素実験や数値解析を行った。

## 2. 要素実験による検討

過大な外力により大規模な変状が発生したトンネルにおいては、覆工の圧縮破壊が卓越する機会が多いことが、現地調査等により明らかとなった。これを踏まえ、軸圧縮力が卓越する状況を再現した要素実験を行った。

要素実験<sup>1)</sup>は、図-1 に示すように、当初支保を想定した覆工と、荷重の安定性の理由から2分割した補強工により構成され、いずれも基準強度 18 N/mm<sup>2</sup> のプレーンコンクリート製の直方体である。荷重は

上面の載荷板より加えられるが、ケースによっては載荷板と覆工の間にスペーサー（鉄板）を設置することにより、荷重初期は覆工にのみ荷重が作用し、覆工に所定のひずみが発生した段階で補強工にも荷重が作用することになる。すなわち、押し出し性地山等で連続的に覆工に荷重が作用するような条件下で、覆工にある程度のひずみが発生した段階で内巻き補強を実施するといった状況を想定している。

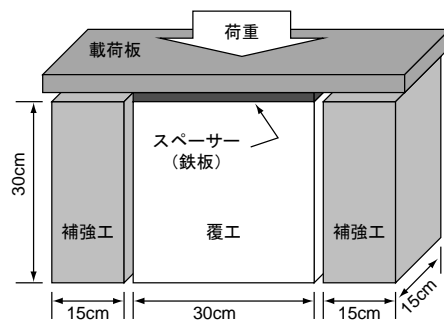


図-1 要素実験の概要

図-2 に、要素実験で得られた載荷荷重と載荷板変位の関係を示す。ケース 1 は覆工のみを想定したケース、ケース 2 はスペーサーを設置して、覆工に、降伏に近い約 2,000  $\mu$  のひずみが発生した段階で補強工にも荷重を分担させたケースである。実験結果から、覆工に降伏に近いひずみが発生している段階で補強工を施工した場合でも、損傷を受けている覆工の耐力も補強後の全体の耐力に考慮できる可能性があることが明らかになった。また、上述の要素実

験をモデル化した数値解析を行い、耐荷力の評価が数値解析により可能であることを確認した。

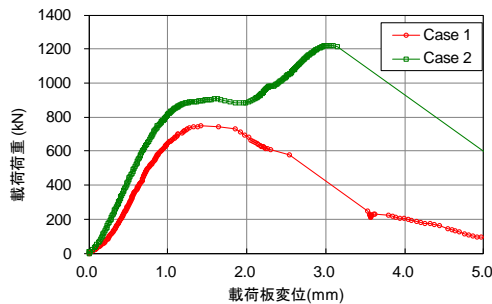


図-2 要素実験における荷重-変位図

### 3. 模型実験による検討

続いて、約 1/20 スケールの二次元載荷実験<sup>2)</sup>により、検討を行った。模型実験の概要は図-3 に示すとおりで、水平方向が卓越する荷重が作用する覆工の力学的挙動を検討した。

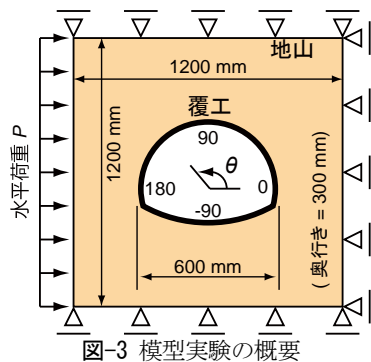


図-3 模型実験の概要

覆工模型の破壊状況は図-4 に示すとおりであり、まず天端に圧縮破壊が生じ、続いて脚部から側壁部の圧縮破壊が生じる過程を経る結果となった。このような実験において、重ねばり（2cm 厚の覆工と 2cm 厚の補強工の 2 層構造）と合成ばり（4cm 厚の覆工の 1 層構造）の破壊時荷重を比較すると、重ねばりのケースでも合成ばりと同等のものを有する可能性があることが明らかとなった<sup>3)</sup>。また、このような模型実験についても、数値解析により概ね再現が可能であることが明らかとなった<sup>4)</sup>。

なお、同様の荷重条件を実大規模にスケールアップした数値解析により、地震による覆工の被害を概ね再現できることを確認した<sup>5)</sup>。



図-4 模型実験における覆工の破壊状況

### 4. 実大規模のトンネル覆工載荷実験の再現解析

要素実験や模型実験のレベルで、覆工の非線形領域まで考慮した耐荷力の評価が概ね可能であることが分かったことを踏まえ、実大規模のトンネル覆工載荷実験<sup>6)</sup>の再現解析を行った。

覆工載荷実験の概要は図-5 に示すとおりで、地山からの反力が確保できている状態で上方からの荷重が作用している覆工を想定したものであり、軸力と曲げモーメントがともに作用する条件下において構造全体の破壊に至る経過をたどるケースである。上述の要素実験や模型実験において数値解析による再現性を確認できた材料モデル等を適用して、この覆工載荷実験の再現解析を行ったところ、図-6 に示すように天端部外側と両肩部内側の圧縮破壊により構造全体の破壊に至るとい過程を再現することができた<sup>7)</sup>。

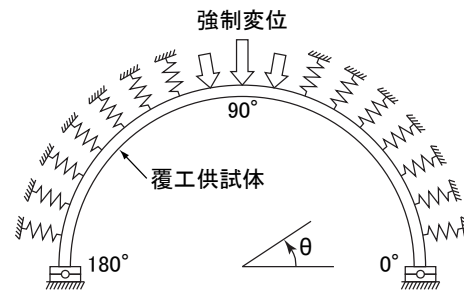


図-5 覆工載荷実験の概要



図-6 数値解析による覆工載荷実験の再現（破壊領域図）

## 5. まとめ

以上の検討の結果から、覆工に最大荷重レベルの荷重が作用している状態で補強した場合でも、その後の荷重に対して覆工がある程度荷重を分担できる可能性があることが明らかとなった。また、実大規模でも数値解析上、覆工の変状発生後の残存耐力に期待した評価を行うことで、補強工が単体で外力に対抗するよりも合理的な補強工の設計ができる可能性がある。

これを特性曲線の概念に当てはめて記すと、図-7 のようになると考えられる。特性曲線法は、地山特性曲線と覆工の特性曲線の交点の変位の収束点となるという考え方で、①のように覆工の耐荷力に対して地山からの外力が過大である場合は両者が交差せず、破壊に至ることとなる。これに対して、補強工のみで対抗すると仮定すると、②のような小規模対策工のみでは十分ではなく、③のような大規模な対策工が必要になることとなる。一方、本研究で検討したように、覆工の残存耐力を補強後の構造全体の耐力に加味することが期待できれば、④のように小規模な対策工でも十分な対策工として設計が行えることとなる。これは、覆工と補強工の問題のみに適用されるのではなく、施工時の支保工における鋼アーチ支保工と吹付けコンクリートの荷重分担の考え方や、二重支保工の全体耐力の考え方といったトンネル分野における力学的諸問題に対して合理的な解を与えるための基礎データが得られたものと考えられる。

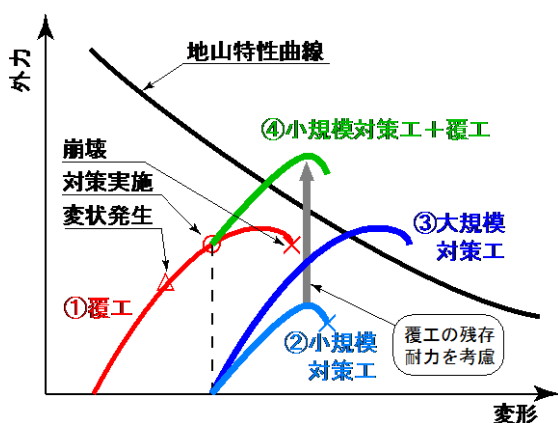


図-7 特性曲線法による補強の概念

ただし、覆工に大規模な変状が発生した状態で、除荷することなく補強工を設置した場合の構造全体の耐荷力については、実大規模の実験や試験施工による検証が必要であり、実際の現場における適用性

については今後検討していきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) Atsushi Kusaka, Nobuharu Isago, and Hideto Mashimo: Laboratory tests on total load-bearing capacity of tunnel's damaged permanent lining reinforced with additional lining, *Proceedings of 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, No.13-482, pp.1-5, 2013.
- 2) Atsushi Kusaka, Kosuke Kawata, Nobuharu Isago, and Hideto Mashimo: An Evaluation on Load-Bearing Capacity of Rock Tunnel Lining against Earthquake-attributed Loading, *Proceedings of IIA-AITES World Tunnel Congress 2015*, No.1.84, pp.1-10, 2015.
- 3) 日下敦, 河田皓介, 砂金伸治: 内巻き補強した山岳トンネル覆工の耐荷力に関する二次元載荷実験, *トンネル工学報告集*, 第25巻, No.I-6, pp.1-6, 2015.
- 4) 日下敦, 河田皓介, 砂金伸治, 真下英人: 二次元静的載荷実験の再現解析による山岳トンネルの耐震対策工の効果に関する一考察, *岩盤力学に関するシンポジウム講演集*, 第43回, pp.93-98, 2015.
- 5) 日下敦, 河田皓介, 砂金伸治, 真下英人: 地震による地山の変形を想定した山岳トンネル覆工の耐荷力評価に関する数値解析的考察, *トンネル工学報告集*, 第24巻, No.I-14, pp.1-8, 2014.
- 6) 真下英人, 日下敦, 砂金伸治, 木谷努, 海瀬忍: トンネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する実験的研究, *土木学会論文集F*, Vol.64, No.3, pp.311-326, 2008.
- 7) 日下敦, 砂金伸治, 河田皓介, 真下英人: 軸力と曲げモーメントが作用するトンネル覆工の耐荷力に関する数値解析的検討, *土木学会年次学術講演会概要集*, 第69回, 第3部門, No.III-220, pp.439-440, 2014.