

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：82114

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760385

研究課題名(和文) 崩壊寸前のトンネルにおける残存耐力の活用に関する研究

研究課題名(英文) Utilization of remaining load-bearing capacity on almost collapsing tunnel

研究代表者

日下 敦 (Kusaka, Atsushi)

独立行政法人土木研究所・その他部局等・主任研究員

研究者番号：60414984

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、トンネルに施工された当初支保に大きなひずみが発生した後に補強工を施工した場合の全体の力学挙動について、模型実験や数値解析により検討を行ったものである。その結果、既にひずみが発生している当初支保も補強後にある程度の荷重を分担することにより、全体の耐力は当初支保単体や補強工単体の耐力を上回る可能性があること等、補強後の構造全体の耐力に関する力学挙動を解明した。

研究成果の概要(英文)： Severely-damaged tunnel support is often reinforced by additional members including secondary lining; however, the reinforcing mechanism has not yet been clarified. In this study, laboratory loading tests and numerical analyses are conducted to examine the total load-bearing capacity of the reinforced support and the mechanism of reinforcing. Major conclusions include that damaged tunnel support can bear the load to some extent after installation of additional lining even if the original support has already suffered severe damages.

研究分野：トンネル工学

キーワード：トンネル 模型実験 数値解析 非線形解析 耐力 補強

1. 研究開始当初の背景

(1) 外力を受けるトンネル

我が国における山岳トンネル工法の適用範囲は拡大の一途を辿っており、地すべり地帯、膨張性地山、土砂地山など、トンネル構造に多大な外力が作用する条件における施工事例が増加している。このようなトンネルの掘削現場では、通常の支保工（吹付けコンクリート、H形鋼、ロックボルト等）と補助工法だけでは地山の变形を抑制することができず、さらに吹付けコンクリートやH形鋼を施工する二重支保工が採用されたり、覆工にも荷重を負担させたりすることがある。また、既に施工されたトンネルの数は国内だけでも膨大な数となり、老朽化したトンネルの対策が今後必要となるであろうことは論を待たないが、その中には過大な土圧や地震力を受けて覆工に外力性の変状を生じ、トンネル構造の安定性がほとんど失われている事例がある。

(2) トンネル補強に関するこれまでの考え方

このような外力による変状が発生したトンネルでは、内空断面に余裕があれば、H形鋼や内巻きコンクリート等による内巻き補強が採用されることが多い。

これらの補強工に共通するのは、既に設置されている支保工あるいは覆工（ここでは、これらを含めて「当初支保」と呼ぶ）に外力性の変状が生じているところに、新たに無垢の支保部材を設置して補強することであり、設置後に全体として力学的安定性が確保できるよう、補強工の規模を選定することとなる。

しかし、既に発生している変状の規模や形態によっては、補強工の施工後にも当初支保が外力を分担できる可能性があるにもかかわらず、残存する当初支保の構造耐力が明らかにされていないため、経験的に補強工の規模を決定しているのが現状である。

(3) 既往の研究

外力性の変状が発生した覆工に対して内巻き補強を行った場合の構造耐力については、実大規模の載荷実験が行われており、例えば、構造耐力を超過する外力が作用した覆工に対してH形鋼による補強を行うと、構造耐力が元を上回るまで回復する場合があること等が知られている。一方で、H形鋼単体の構造耐力は覆工単体に比べて半分程度しかなく、覆工とH形鋼がともに力学的効果を発現することによって構造耐力が増加していることは明白である。ただし、既往の覆工載荷実験は、実験の安全性等の観点から、覆工が崩壊寸前の状態で補強の作業を行うことができず、覆工の構造耐力超過後に一旦除荷した後に補強し、その後再度載荷したものであり、覆工にひずみが発生している状態で補強工を施工した場合の挙動と補強メカニズムについては明らかにされていない。

(4) 特性曲線法を用いた考え方

トンネルの力学的挙動を説明する概念として、特性曲線法がある。これは、地山とトンネル構造それぞれが力と変位の関係である特性曲線を持ち、両者の特性曲線の交点が変形の収束点となるという考え方である。当初支保だけでは地山の变形を抑えきれない場合は、図-1のように補強工を施工することになるが、既に多大な外力を受け、変状が発生している当初支保の耐力にどこまで期待できるか、すなわち構造全体としてどの程度の外力に耐え得るかは明らかになっていない。

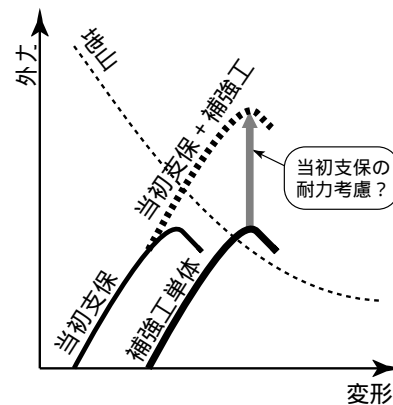


図-1 特性曲線法による補強概念

2. 研究の目的

我が国の山岳トンネル工法は、トンネルに多大な外力（地震を含む）が作用する極めて厳しい条件下にまで適用範囲が拡大してきており、施工中のみならず供用後にもトンネルに変状が発生する事例が増えつつある。このような場合には、支保工や覆工を補強してトンネル構造全体の耐力増加を図ることとなるが、その補強メカニズムは未解明の部分が多く、既存の支保工や覆工の残存耐力が適切に評価されることなく経験的に対策が行われているのが現状である。

本研究は、当初支保が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、補強メカニズムと当初支保の残存耐力の評価手法を明らかにすることを目的とするものである。

3. 研究の方法

(1) 要素実験による検討

要素実験は、図-2に示すように、当初支保を想定した覆工と、載荷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^2 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、載荷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。

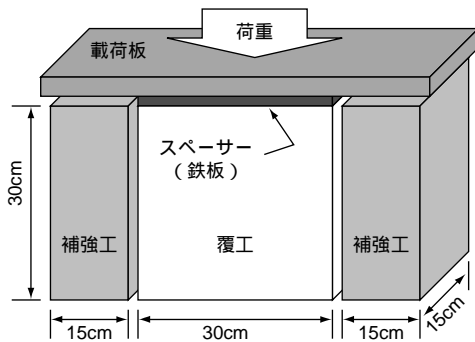


図-2 要素実験の概要

(2) 要素実験の再現解析

上記要素実験の再現解析は、図-3 に示すモデルを用い、非線形解析における解の収束において比較の有利な有限差分法プログラムにより行った。補強工については、載荷前に剛性0の要素としてモデル化しておき、所定のひずみが覆工に発生した時点で剛性を有する要素に変更することで、実験条件を再現した。供試体材料(覆工および補強工)はひずみ硬化/軟化モデルを適用し、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 、ダイレイション角 ψ については塑性ひずみの関数と仮定した。

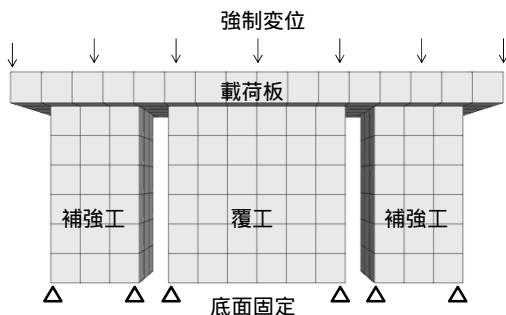


図-3 要素実験の再現解析の概要

(3) 実構造物を対象とした数値解析

既往の研究において、図-4 に示すような外径 9.7m の覆工を対象とした載荷実験が行われており、このような荷重条件においては、天端部と両肩部の3箇所の断面において、軸力と曲げモーメントによる圧ぎが発生することにより覆工構造全体の破壊に至ることが明らかになっている。

本研究では、実構造物を対象とした検討として、この載荷実験の再現解析を行い、破壊モード等について検討を行った。用いた数値解析手法や材料非線形モデル等は前述と同様のものとした。

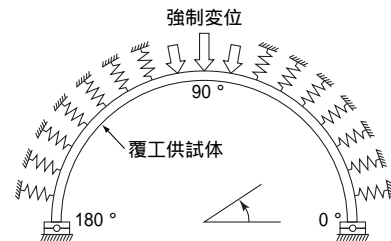


図-4 実大規模の載荷実験および数値解析

4. 研究成果

(1) 要素実験による検討

図-5 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 μ 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。

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。

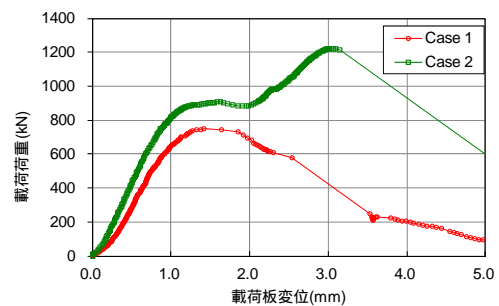


図-5 要素実験の結果

(2) 要素実験の再現解析

図-6 に、解析で得られた載荷荷重と載荷板変位の関係を示す。覆工単体で載荷したケース1、覆工が最大荷重(約 800kN)に達したところで補強工を設置し、そのまま載荷を継続したケース2、いずれも図-5 に示した実験の最大荷重値は良好に一致した。

すなわち、上述の解析モデルを用いることで、覆工にひずみが生じている状態で補強工を設置した場合の全体の耐力について、要素レベルで再現できる可能性があることが分かった。

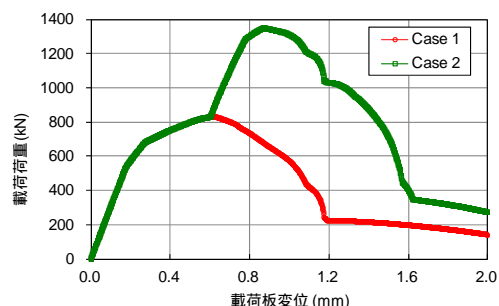


図-6 要素実験の再現解析の結果

(3) 実構造物を対象とした数値解析

図-7は、数値解析における最大荷重時の覆工のひずみ分布を示したものである。天端外側および両肩部内側の圧縮ひずみは、圧縮ひずみが3,000 μ を超えるか、それに近い値を示しているとともに、反対側は解析上で1,000 μ を超える引張ひずみが生じており、覆工構造全体の破壊が生じた段階ではこれらの断面で曲げ圧縮破壊が発生していることが分かる。また、図示していないが、最大荷重も実験と解析で良好に一致した。

これらの結果から、本研究で示した解析モデルを用いることで、実大規模の覆工で、軸力と曲げモーメントが作用する条件下での耐荷力に関する検討が可能となることが分かった。

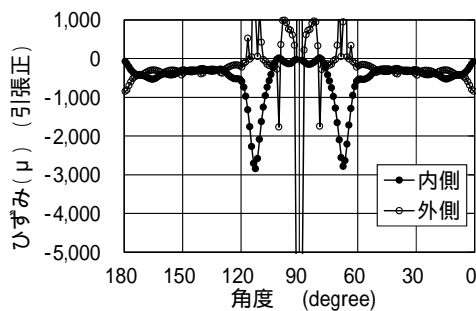


図-7 最大荷重時の覆工のひずみ分布（解析）

(4) まとめ

トンネルの当初支保に既にひずみが発生している状態で補強を行った場合の、補強メカニズムと当初支保の残存耐力の評価手法の解明を試みた結果、主として以下の知見が得られた。

当初支保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と考えられる
本研究で示した解析モデルを用いることで、当初支保に既にひずみが発生している状態で補強を行った場合の全体の耐荷力が検討できると考えられる

これまでではトンネルを補強する場合には、経験的に規模を決定するか、当初支保と補強工に対してそれぞれ個別に耐力を検討するか、実大実験により構造全体の耐力を検討するにしても無荷重下で補強を行った上で載荷した検討しか実施されてこなかった。本研究では、既にひずみが発生している当初支保に補強を行った場合の、当初支保の残存耐力を活用した補強メカニズムと構造全体の耐力を検討したことに最大の特色がある。

本研究の成果により、二重支保工の設計法のみならず、支保工のみでは地山の変形を抑制できない場合に覆工に荷重を負担させる場合の覆工の設計法、外力性の変状が生じて

いる覆工に対する補強工の設計法、さらには通常山岳工法の支保工と覆工の荷重分担率の考え方等、現代においてもトンネルで課題となってい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。また、我が国のトンネルの建設技術や維持管理技術の飛躍的な進歩に繋がるだけでなく、世界的にも我が国のトンネル技術の先駆性を示したものと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

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.

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.

日下敦, 砂金伸治, 真下英人: 外力性変状が発生したトンネルの補強後の全体耐力に関する要素の数値解析, 日本道路会議論文集, 第30回, CD-ROM, No.6024, 2013.

日下敦, 砂金伸治, 真下英人: 内巻き補強された覆工の全体耐力に関する要素実験の再現解析, 土木学会年次学術講演会概要集, 第68回, 第3部門, pp.499-500, 2013. 補強

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. 査読有

〔学会発表〕(計5件)

日下敦: 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, トンネル工学研究発表会, 2014年11月, 土木学会(東京都千代田区).

日下敦: 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, 2014年9月, 大阪大学(大阪府豊中市).

日下敦: 外力性変状が発生したトンネルの補強後の全体耐力に関する要素の数値解析, 日本道路会議, 2013年10月, 都市センターホテル(東京都千代田区).

日下敦: 内巻き補強された覆工の全体耐力に関する要素実験の再現解析, 土木学会年次学術講演会, 2013年9月, 日本大学(千葉県習志野市).

Atsushi Kusaka: Laboratory tests on

total load-bearing capacity of tunnel's damaged permanent lining reinforced with additional lining, 47th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, June 2013, San Francisco (U.S.A.).

6 . 研究組織

(1)研究代表者

日下 敦 (KUSAKA, Atsushi)

土木研究所・道路技術研究グループ・主任

研究員

研究者番号：6 0 4 1 4 9 8 4