

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04213

研究課題名（和文）道路トンネルのリニューアルに用いる覆工コンクリートのNSM-CFRP補強工法

研究課題名（英文）NSM-CFRP strengthening of lining-concrete for renewal of road tunnels

研究代表者

吉武 勇 (Yoshitake, Isamu)

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：10335771

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究はNSM-CFCCにより補強したトンネル覆工コンクリートモデルの耐荷性能を評価して、トンネル覆工のための補強システムの効果を調べた。載荷試験に用いた供試体は、無補強モデルに加え、炭素繊維シート接着モデルとNSM-CFCC補強モデルである。トンネル覆工のアーチ効果のために、無補強コンクリートモデルでさえ、部材を貫通するひび割れが生じないことを明らかにした。NSM-CFCCモデルの耐荷性能は他の試験モデルより著しく高いことを確認した。さらに有限差分法FLAC3Dによる解析を行い、ひび割れ特性を概ねよく推定できた。本研究は、NSM-CFCC補強システムがトンネル覆工に効果的と結論づけた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

道路トンネルには、床版取り替え工事のようなリニューアル技術が確立していないのが現状である。さらに将来にわたって老朽劣化していく覆工コンクリートをリニューアル（更新）と同等レベルにまで補強できる技術はほとんどみられない。これまで構造部材として建設されていないトンネル覆工コンクリートが、トンネル本体の使用性・安全性にまで影響してきていることから、これを適切に補修・補強していく技術が求められるようになっていく。現状では補修で延命化を図る技術はあるものの、リニューアル相当レベルまでのトンネル構造全体の安全性・耐久性を高める技術は未だ確立していない。

研究成果の概要（英文）：This study evaluated the load-carrying capacity of tunnel lining concrete (TLC) models strengthened by NSM-CFCC and investigated the effectiveness of the strengthening system for TLC. TLC models bonded with a carbon-fiber sheet (CFS), and NSM-CFCC-strengthened TLC models, and two types of NSM-CFCC TLC models were tested. The results revealed that the TLC member was not perforated by a flexural crack, even in non-strengthened concrete, owing to the arch effect. The load-carrying capacity of the NSM-CFCC TLC was remarkably higher than that of the reference and CFS strengthening models. A finite difference analysis (FDA) for the loading test was also performed using commercial software FLAC3D. The numerical simulation results were found to be in good agreement with the cracking behavior of the strengthened TLC members observed in the experiment. These results suggested that the strengthening system using NSM-CFCC is effective for the TLC.

研究分野：土木工学

キーワード：補強 トンネル FRP 覆工 コンクリート

1. 研究開始当初の背景

我が国は、超高齢化社会がますます進行し、生産年齢人口が減少することが必至である。その一方、現在の我々の生活基盤を支えているインフラは、高度成長期に建設されたものが多く、時々刻々と老朽劣化が進んでいる。平成25年には国土交通省より「社会資本メンテナンス元年」が提唱され、橋梁やトンネルといった社会基盤構造物の老朽化対策・長寿命化が全国各地で取り組まれるようになった。これからの少子高齢化社会における国家財政や労働人口の減少を考えれば、必然的に現存する社会基盤構造物をできるだけ長く活用することが望まれる。特に全国を網羅している道路ネットワークは、円滑な物流など経済活動の要であり、近年頻発する自然災害からの復旧においても、重要な役割を果たしている。時代とともに社会情勢が変化しても、安心・安全な暮らしを構築していくためには、現状の健全な道路ネットワークの維持は必要不可欠である。

現在、高速道路を中心に劣化した道路橋床版の取り替え工事(リニューアル)が全国的に進められている。これは、これから100年先の時代を見据えた大規模なリニューアル工事と位置づけられる。一方、道路構造物として橋梁とともに重要な役割を果たしているトンネルにおいては、床版取り替え工事のようなリニューアル技術が確立していないのが現状である。これは、道路橋に比べてトンネル内は作業空間などのスペースに制限が多く、覆工コンクリートの取り替えを行うことは容易でないことが一因である。また現存する覆工コンクリートを供用しながら補修する技術はいくつもあるが、将来にわたって老朽劣化していく覆工コンクリートをリニューアル(更新)と同等レベルにまで補強できる技術はほとんどみられない。

道路トンネルの覆工コンクリートは、もともと外力等を負担しない「化粧巻き(支保本体を保護する部材)」という位置づけである。そのため、坑口部や地山が悪い箇所を除いて、鉄筋等の補強材を含まない無筋コンクリート構造として設計・施工されてきた。しかしながら、コンクリートのひび割れや老朽劣化に起因する変状もみられており、それによってしばしばコンクリート片がはく落するなど、道路構造物として安全性・耐久性を強く求められるようになってきた。このように構造部材として建設されていないトンネル覆工コンクリートが、トンネル本体の使用性・安全性にまで影響してきていることから、これを適切に補修・補強していく技術が求められるようになってきた。現状では補修で延命化を図る技術はあるものの、劣化した覆工コンクリートを適切に補強することで、リニューアル相当レベルまでのトンネル構造全体の安全性・耐久性を高める技術は未だ確立していない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、道路トンネルのリニューアル工事に活用できるような効果的で高い耐久性を保持できる補強技術を確立することである。トンネル覆工コンクリートを内面から補強する場合、モルタルなどの増し厚補強も考えられるが、その長期にわたる接着性能が懸念されるばかりか、トンネル内空の縮小化に伴い、大型トラックなどの衝突事故の原因にもなりかねない。そこで道路トンネルを補強する方法として、道路橋の補強技術として欧米等で確立している Near-Surface-Mounted (NSM) 工法をトンネル覆工コンクリートに応用することを考えた。多くの NSM 工法では、補強材として繊維補強ポリマー (FRP) 製のプレートやロッドをコンクリート表層(鉄筋かぶり厚相当)に設置して、エポキシ樹脂やセメント系材料で埋設している。しかしながら、これまでトンネル覆工コンクリートの NSM 工法はみられない。

これまで橋梁などに用いられてきた FRP 補強材は、はりや床版など直線的な部材に埋設するため、可撓性は必要ではなく、比較的剛な補強材が用いられてきた。一方、トンネル覆工コンクリートはアーチ構造のため、FRP 補強材を埋設する場合、適当な可撓性が必要となる。そこで本研究では、近年プレストレストコンクリート構造の鋼製緊張ケーブル材の代替として使用される炭素繊維複合材ケーブル (Carbon Fiber Composite Cable: CFCC) に着目し、これをトンネル覆工の NSM 工法における埋設補強材として用いることを考案した。本研究は、トンネル覆工コンクリートの実用的・効果的な補強方法を構築するため、NSM-CFCC 補強技術の開発を主な目的とした。

3. 研究の方法

本研究では、道路トンネルのアーチ構造を模擬した実部材レベル (300mm 厚相当) の試験体を作製し、荷重実験を行った。製作

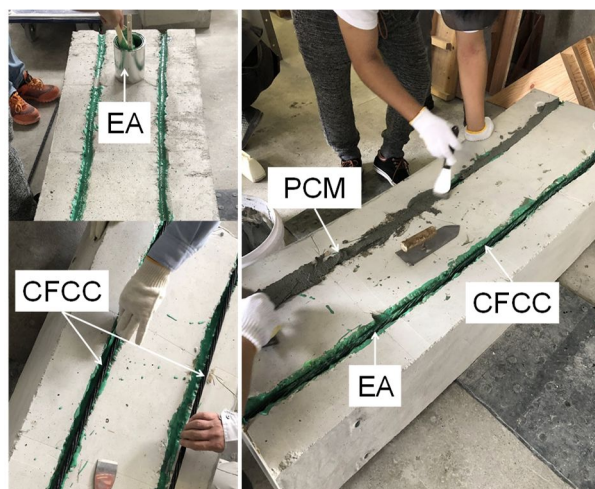


図-1 NSM-CFCC 補強供試体の製作

したコンクリート供試体は、曲率半径 5 m × 長さ 1500 mm × 幅 500 mm × 覆工厚 300 mm とした。供試体作製には一般的なトンネル覆工に用いられる呼び強度 18 (設計基準強度 18 MPa) のレディーミクストコンクリートを使用した。図-1 に示すようにコンクリート供試体の内空面に 20 mm 深の溝を設け、エポキシ接着剤 (EA) およびポリマーセメントモルタル (PCM) を用いて CFCC を埋設定着させた。

本研究では図-2 に示す専用の荷重フレーム・治具を製作し、アーチ状のコンクリート試験体の両端を回転支持で支えた上で、曲げ荷重試験を行った。コンクリート上縁部が圧壊するまで荷重を行い、ひび割れ～破壊挙動や終局破壊荷重を調べた。

さらに有限差分解析コード FLAC3D を用いて試験体のモデル化 (図-3) を行い、ひび割れ発生挙動や CFCC に作用する力を詳細に調べた。

4. 研究成果

Φ13.0mm の CFCC を 250 mm 間隔で埋設補強した NSM-CFCC モデルの荷重 - 変位関係を図-4 に例示する。このグラフには、比較のため無補強モデル (Control) および炭素繊維シートをエポキシ接着剤で貼付けたモデル (EB-CFS) における荷重 - 変位関係も記載する。この結果に示すように NSM-CFCC 補強モデルが高い荷重保持性能を示した。一方、一般的にトンネル内壁面に貼付け補強材として使用される炭素繊維シートを模擬した EB-CFS モデルは、ひび割れ発生荷重こそ最も高いが、ひび割れ発生後はほとんど荷重増加がなく、ひび割れ部から端部に向かって繊維シートのはく離が進行する破壊形態を示し、その終局耐力は無補強モデルと同じレベルのものであった。また単線の 7.2 mm および 9.7 mm の CFCC を 250 mm 間隔で埋設補強した NSM-CFCC モデルでは、無補強モデルや EB-CFS モデルよりも高い曲げ耐力を示したが、7.2 mm のモデルに至っては、定着端部の CFCC すべりが生じるなど、定着性能に課題が残った。

両端を回転支点で支えるアーチ状コンクリート供試体の曲げ荷重試験のため、NSM-CFCC 補強の有無に関わらず、図-5 に示すように鉛直ひび割れが発生進展し、その後、複数の水平ひび割れが発生し、最終的には上縁コンクリートの圧壊によって破壊に至った。この結果から、このようなアーチ部材の耐力維持のためには、地山と覆工コンクリート間が十分に密着していること、上縁部に空洞がないことが重要であることが示唆された。覆工コンクリート天端の密実な充填施工は、地震などの突発的な外力が作用する場合において、その安全性を担保するためにも不可欠な要素となることが分かった。なお本研究で実施した FDM 解析により、覆工コンクリートのモデルのひび割れおよび圧壊状況を再現することに成功した (図-6)。

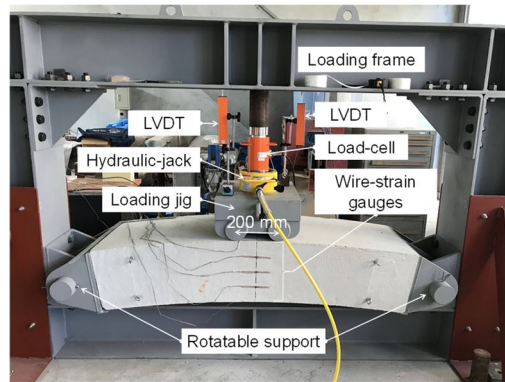


図-2 荷重試験状況

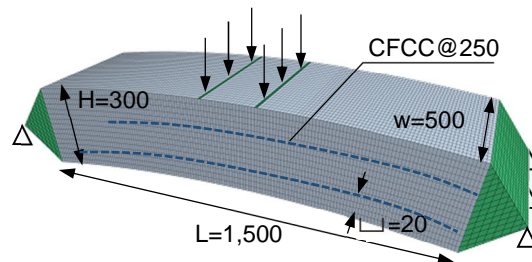


図-3 FDM モデル

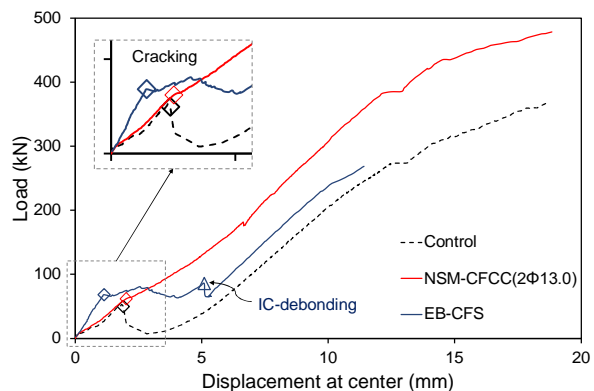


図-4 荷重 - 変位の例

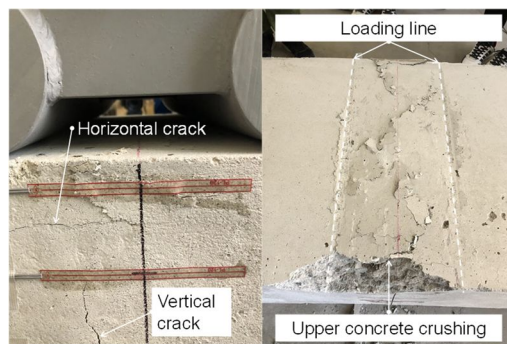


図-5 ひび割れと圧壊状況例

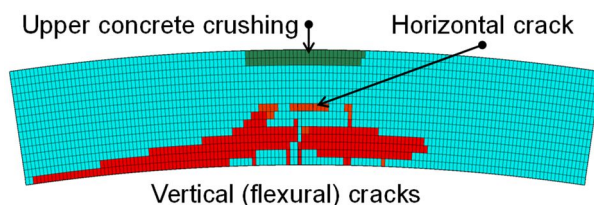


図-6 FDM 解析の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 YOSHITAKE ISAMU、MORIMOTO SHINGO、ONISHI TAKASHI、YANAGI TAIGA	4. 巻 9
2. 論文標題 LOAD CAPACITY OF TUNNEL LINING CONCRETE STRENGTHENED WITH CARBON-FIBER COMPOSITE CABLE (CFCC)	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of International Structural Engineering and Construction	6. 最初と最後の頁 STR-04
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14455/ISEC.2022.9(2).STR-04	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoshitake Isamu、Morimoto Shingo、Ueno Shinji、Hayashi Hisahi	4. 巻 10
2. 論文標題 COMPARATIVE STUDY ON TUNNEL LINING CONCRETE STRENGTHENED WITH CARBON-FIBER COMPOSITE CABLES AND SHEETS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of International Structural Engineering and Construction	6. 最初と最後の頁 STR-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.14455/ISEC.2023.10(1).STR-13	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yoshitake Isamu、Morimoto Shingo、Ueno Shinji、Hayashi Hisashi	4. 巻 65
2. 論文標題 Flexural loading test of a tunnel lining concrete model strengthened with carbon-fiber composite cables	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Structures	6. 最初と最後の頁 106656
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.istruc.2024.106656	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件／うち国際学会 4件）

1. 発表者名 YOSHITAKE ISAMU、MORIMOTO SHINGO、ONISHI TAKASHI、YANAGI TAIGA
2. 発表標題 LOAD CAPACITY OF TUNNEL LINING CONCRETE STRENGTHENED WITH CARBON-FIBER COMPOSITE CABLE (CFCC)
3. 学会等名 ASEA-SEC-SEC-6（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 森本真吾, 大西崇司, 柳木大河, 吉武 勇
2. 発表標題 トンネル覆工コンクリート部材の載荷実験シミュレーション
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大西崇司, 森本真吾, 柳木大河, 吉武 勇
2. 発表標題 トンネル覆工コンクリート部材の載荷装置の試作および載荷実験
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 柳木大河, 森本真吾, 大西崇司, 吉武 勇
2. 発表標題 NSM-CFCC 補強したトンネル覆工コンクリートモデルの載荷実験による効果の検証
3. 学会等名 土木学会中国支部第74回研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ISAMU YOSHITAKE, SHINGO MORIMOTO, SHINJI UENO, HISAHI HAYASHI
2. 発表標題 COMPARATIVE STUDY ON TUNNEL LINING CONCRETE STRENGTHENED WITH CARBON-FIBER COMPOSITE CABLES AND SHEETS
3. 学会等名 ISEC-12 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上野真嗣, 森本真吾, 林 久資, 吉武 勇
2. 発表標題 炭素繊維補強材を用いたトンネル覆工コンクリートモデルの耐荷性能
3. 学会等名 土木学会第78回年次学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Isamu Yoshitake
2. 発表標題 NSM-CFCC Strengthening for Tunnel Lining Concrete
3. 学会等名 BEI-NCKU-NCREE International Workshop on Structural and Infrastructure Engineering (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Isamu Yoshitake
2. 発表標題 CFCC Strengthening Techniques for Concrete Structures
3. 学会等名 第7回新リスボン大学ー山口大学合同ワークショップ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	森本 真吾 (Morimoto Shingo)	トボクリエイト株式会社・代表取締役	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	林 久資 (Hayashi Hisashi) (30633614)	西日本工業大学・工学部総合システム工学科・准教授 (37110)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関