

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	炭素繊維複合材ケーブルを用いたトンネル覆工コンクリートの補強に関する研究 (Study on Tunnel Lining Concrete Strengthened with Carbon Fiber Composite Cables)
氏 名 (Name)	森本 真吾
我が国では高度経済成長期を中心に建設された社会インフラの老朽化が深刻な問題となっており，山岳トンネルにおいても経年変化に伴う劣化損傷が顕在化している．地山からの外力に起因した覆工コンクリートの変状もみられ，これに対する効果的な補強技術が求められている．そこで本研究は，山岳トンネル覆工の補強技術として，NSM-CFCC 工法を考案し，その有効性について載荷実験および数値解析を用いた検証を行った．老朽化が進行する社会インフラ，特に覆工コンクリートのひび割れや変状が顕著な山岳トンネルに対する効果的な補強策が求められている背景を踏まえ，橋梁分野で実績のある NSM 工法に着目し，可撓性を有する CFCC を補強材として用いる NSM-CFCC 工法のトンネル覆工への適用性を検討した．本研究を通じて，NSM-CFCC 工法はトンネル覆工コンクリートの補強技術として適用可能であり，特に局所的な外力作用下における耐荷性能向上に有効であることが示唆された．本研究は，NSM-CFCC 工法が山岳トンネルの安全性向上に寄与する可能性を示す基礎的な知見を与えるものである． 本論文は計 6 章から構成されている．各章の主な要旨と結論を以下に述べる． 第 1 章では，本研究の背景として，高齢化の進む社会インフラの現状を述べるとともに，老朽化した山岳トンネルの覆工コンクリートの補強を行う上での課題についてまとめた． 第 2 章では，本研究で主対象とする NSM 工法およびトンネル覆工コンクリートの補強に関する既往の研究についてレビューした． 第 3 章では，NSM-CFCC 工法のトンネル覆工コンクリートへの適用性評価のため，トンネル天端部を模擬したアーチ型コンクリート供試体に対する載荷実験についてまとめた．無補強ケースに加え，異なる径（$\phi 7.2\text{mm}$，$\phi 9.7\text{mm}$，$\phi 13.0\text{mm}$）および配置間隔（250mm，500mm）の CFCC を表層近傍に埋設した計 5 ケース（各ケース 2 体）の供試体を作製し，外力作用下における挙動について比較検討した．実験結果より，CFCC 補強は無補強ケースと比べ，供試体の耐荷性能および延性の向上に寄与することが実証された．特に，$\phi 13.0\text{mm}$ の CFCC を 250mm 間隔で配置したケースにおいて，ひび割れ発生荷重および終局耐力に顕著な増加が認められ，最も効果的な補強配置であることが示唆された．一方，500mm 間隔での配置では補強効果が限定的となる可能性が生じた．また，細径の CFCC では，付着耐力が充分ではなく充填材とのすべりの発生可能性が確認された．NSM-CFCC 工	

法における CFCC の諸元および配置の最適化について定量的に評価した。

第 4 章では，第 3 章で得られた载荷実験結果のシミュレーション可能な数値解析モデルの構築を目的として，三次元有限差分法（FDM）に基づく再現解析についてまとめた．解析コードには FLAC3D を用い，コンクリートのひび割れ発生後の非線形挙動を表現するため，ひずみ軟化モデルを構成則として適用した．载荷実験データを基にした逆解析により解析モデルの入力パラメータを同定し，実験結果との比較検証を行った．解析結果は，ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生に至るまでの荷重－ひずみ関係において，実験結果と良好な一致を示した．また，破壊状況についても，実験で観察された引張破壊および圧縮破壊領域を概ね再現することが可能となった．しかしながら，ひび割れ進展に伴う開口幅の拡大といったひび割れ発生後の非線形的な挙動の完全な再現には，連続体モデルの限界が存在することも確認された．本解析は，NSM-CFCC 補強された覆工コンクリートの構造挙動を解析的に評価するための基礎を提供するとともに，将来的な解析モデルの改良に向けた課題を明確にした．

第 5 章では，第 3 章の载荷実験および第 4 章の再現解析により得られた知見と解析手法を用いて，実スケールのトンネル覆工コンクリートモデルに対する数値シミュレーションについてまとめている．本解析は，実際のトンネルにおいて想定される典型的な外力条件下における NSM-CFCC 補強工法の有効性を評価することであった．まず，実スケールモデル解析における計算効率と精度のバランスを考慮し，メッシュサイズの感度解析に基づき 50mm メッシュを採用した．次に，トンネル全周に均等な塑性圧が作用するケースの解析結果から，覆工全体的に圧縮応力状態となるこのような条件下では，引張応力に起因するひび割れが生じにくく，NSM-CFCC による補強効果は限定的であることが示唆された．さらに，トンネル天端部に局所的な地山のゆるみに伴う鉛直荷重が作用するケースを想定した解析を実施した結果，局所荷重が作用する場合，無補強ケースと比較して NSM-CFCC 補強ケースの終局耐力が大幅に向上することが確認された．これにより，NSM-CFCC が内空側の引張応力を負担することで覆工コンクリートのアーチ効果を維持することができ，局所的な外力に対する本補強工法の有効性を定量的に示した．これらの解析結果より，NSM-CFCC 工法が覆工コンクリートの耐荷性能向上に寄与でき，特に局所的な変状が懸念される箇所への適用が有効であることを示唆した．

第 6 章では，本研究で得られた知見をまとめるとともに，今後の課題と展望を示した．

学 位 論 文 要 旨 (Summary of the Doctoral Dissertation)	
学位論文題目 (Dissertation Title)	炭素繊維複合材ケーブルを用いたトンネル覆工コンクリートの補強に関する研究 (Study on Tunnel Lining Concrete Strengthened with Carbon Fiber Composite Cables)
氏 名 (Name)	MORIMOTO Shingo
Deteriorations have been observed in mountain tunnels in Japan. The deterioration due to external forces may cause significant damage to unreinforced tunnel linings. The purpose of this study is to investigate the effectiveness of the near-surface-mounted carbon fiber composite cable (NSM-CFCC) method for tunnel linings. First, the effectiveness of the strengthening method is verified through laboratory experiments. The NSM-CFCC strengthened lining concrete models exhibited excellent ductility and load-bearing capacity. The experimental results were verified by numerical analysis to identify the input conditions. Subsequently, a full-scale numerical analysis model of the tunnel was developed using data from the analysis. The NSM-CFCC strengthened lining concrete was found to have effective load-bearing properties in the full-scale numerical simulations. The thesis consists of 6 chapters. The contents and summary of each chapter are as follows: Chapter 1 summarized the social concerns in Japan, such as the present conditions of infrastructures. The chapter presented the research background in maintenance of mountain tunnels, and the research objectives. Chapter 2 shows the review of previous studies dealing with investigations on NSM techniques and strengthening of mountain tunnels. Chapter 3 describes loading experiments conducted on arch-shaped concrete specimens simulating the crown of a tunnel, aimed at evaluating the applicability of the NSM-CFCC method to tunnel lining concrete. Ten specimens were prepared: unreinforced specimens and two specimens each strengthened with CFCC embedded on the inner surface (7.2 mm, 9.7 mm, and 13.0 mm in diameter). In the specimens with CFCC embedded in 20 mm-deep grooves, two CFCC strands (7.2 mm and 9.7 mm in diameter) were embedded at intervals of 250 mm. Moreover, one strand was embedded in the center of the specimens using the ϕ13.0 mm CFCC. All specimens with two embedded CFCCs exhibited higher crack-initiation loads than the unreinforced specimens. However, the specimen embedded one 13.0 mm CFCC exhibited a lower cracking load of 44.5 kN compared to the unreinforced specimen. The observations implied that the ϕ13.0 mm CFCCs having adequate bonding due to the strand configuration is more effective for the NSM-CFCC strengthening.	

Chapter 4 aimed to develop a numerical analysis model capable of accurately simulating the loading test results obtained in Chapter 3. FLAC3D was used as the analysis software, and a strain-softening model was employed as the constitutive law to represent the nonlinear behavior of concrete following crack initiation. Input parameters for the simulation model were identified through an inverse analysis based on the loading test data, and a subsequent comparative verification with the experimental results was performed. The analysis results demonstrated excellent agreement with the experimental data, both concerning the crack initiation load and the load-strain responses up to concrete cracking. Furthermore, the tensile and compressive failure zones observed in the experiments were generally reproducible. However, it was also noted that continuum models possess limitations in fully replicating the nonlinear behavior after cracking, such as the increasing crack width and crack propagation. This analysis provides a fundamental basis for analytically evaluating the structural behavior of NSM-CFCC strengthened lining concrete and highlights areas for future improvements in analysis models.

In Chapter 5, numerical simulations were performed by using a real-scale tunnel lining concrete model, leveraging the insights gained from the loading experiments presented in Chapter 3 and the reproduction analysis discussed in Chapter 4. This analysis primarily aimed to evaluate the effectiveness of the NSM-CFCC strengthening technique under typical external force conditions anticipated in actual tunnels.

To balance computational efficiency with accuracy in the real-scale model analysis, a 50mm mesh was adopted following a mesh size sensitivity analysis. A numerical simulation on the case where uniform plastic pressure acted around the entire tunnel circumference was performed. The result indicated that the tensile cracks are improbable, thus limiting the reinforcing effect of NSM-CFCC.

The study performed a further numerical simulation of the tunnel crown subjected to the localized vertical load from ground loosening. The result revealed a significant increase in ultimate load-bearing capacity of the NSM-CFCC strengthened tunnel. The simulation result confirmed that the NSM-CFCC sustains the arching-effect by bearing interior tensile stresses. The strengthening effect for localized external forces was thus quantitatively confirmed. These findings suggest the NSM-CFCC method enhances the load-bearing performance of lining concrete, making it particularly effective for areas prone to localized deformation.

Chapter 6 presents the remarkable conclusions of this study and presents further research for the practical application of the NSM-CFCC strengthening technique.

学位論文審査の結果及び最終試験の結果報告書

山口大学大学院創成科学研究科

氏 名	森本真吾
審 査 委 員	主 査：吉武 勇
	副 査：鈴木 素之
	副 査：河村 圭
	副 査：中島 伸一郎
	副 査：山田 悠二
論 文 題 目	炭素繊維複合材ケーブルを用いたトンネル覆工コンクリートの補強に関する研究 (Study on Tunnel Lining Concrete Strengthened with Carbon Fiber Composite Cables)
【論文審査の結果及び最終試験の結果】 我が国では高度経済成長期を中心に建設された社会インフラの老朽化が深刻な問題となっており、山岳トンネルにおいても経年変化に伴う劣化損傷が顕在化している。山岳トンネルにおいては、地山からの外力に起因した覆工コンクリートの変状に対する効果的な補強技術が求められている。そこで本研究では橋梁分野で実績のある NSM 工法に着目し、これに可撓性を有する炭素繊維複合材ケーブル (CFCC) を補強材として用いる NSM-CFCC 工法を考案した。本研究は、山岳トンネル覆工の補強技術として NSM-CFCC 工法の有効性を評価するため、載荷実験および数値解析を行っている。本論文は、これらの研究をまとめたものであり、全 6 章から構成されている。各章の要旨を以下に示す。 第 1 章では、本研究の背景として、高齢化の進む社会インフラの現状を述べるとともに、老朽化した山岳トンネルの覆工コンクリートの補強を行う上での課題についてまとめ、最後に本研究の目的を明らかにしている。 第 2 章では、本研究で主対象とする NSM 工法およびトンネル覆工コンクリートの補強に関する既往の研究をレビューしている。 第 3 章では、NSM-CFCC 工法のトンネル覆工コンクリートへの適用性評価のため、トンネル天端部を模擬したアーチ型コンクリート供試体を用いた載荷実験について報告している。この実験では無補強ケースに加え、異なる径 ($\phi 7.2\text{mm}$, $\phi 9.7\text{mm}$, $\phi 13.0\text{mm}$) および配置間隔 (250mm, 500mm) の CFCC を表層近傍に埋設した計 5 ケース (各ケース 2 体) について、ひび割れ荷重や終局耐力の比較を行っている。実験結果より、CFCC 補強は無補強ケースと比べ、供試体の耐荷性能および延性の向上に寄与することを確認している。特に、$\phi 13.0\text{mm}$ の CFCC を 250mm 間隔で配置したケースにおいて、ひび割れ発生荷重および終局耐力に顕著な増加が認められ、最も効果的な補強配置であることを報告している。	

第 4 章では、数値シミュレーションモデルを構築するため、三次元有限差分法 (FDM) を用いて載荷実験の再現解析を行っている。解析コードには FLAC3D を用い、コンクリートひび割れ発生後の非線形挙動を表現するため、構成則としてひずみ軟化モデルを適用した。解析結果より、ひび割れ発生荷重およびひび割れ発生に至るまでの荷重-ひずみ関係において、実験結果と良好な一致を示すことが報告されている。また破壊状況についても、載荷実験でみられた引張破壊および圧縮破壊領域を概ね再現することに成功している。

第 5 章では、実際のトンネルで想定されるような外力が作用する覆工コンクリートに対して、NSM-CFCC 補強工法の有効性を評価するため、実スケールのトンネル覆工コンクリートモデルを用いた数値シミュレーションを行っている。トンネル全周に均等な塑性圧が作用する解析では、NSM-CFCC による補強効果はほとんどみられないが、トンネル天端部に局所的な地山のゆるみに伴う鉛直荷重が作用する場合、無補強ケースと比較して NSM-CFCC 補強ケースの終局耐力は著しく向上することを確認している。これらの解析結果より、NSM-CFCC 工法が覆工コンクリートの耐荷性能向上に寄与し、特に局所的な変状が懸念される箇所への適用が有効であると結論づけている。

第 6 章では、本研究を通して得られた成果と知見をまとめ、今後の課題と展望について述べている。

公聴会には、学内外から 50 名 (対面式 41 名、オンライン 9 名) の聴講者があった。公聴会における主な質問内容は、①試験体の寸法効果、②火災時の影響、③CFCC の埋設・施工方法、④コンクリート圧壊後の挙動について、などであった。いずれの質問に対しても発表者からの的確な回答がなされた。

以上より本研究は独創性、信頼性、有効性、実用性ともに優れ、博士 (工学) の論文に十分値するものと判断した。

論文内容及び審査会、公聴会での質問に対する応答などから、最終試験は合格とした。

なお、主要な関連論文の発表状況は下記のとおりである。(関連論文 計 3 編、参考論文 2 編)

- 1) Isamu Yoshitake, Shingo Morimoto, Shinji Ueno, Hisashi Hayashi: Flexural loading test of a tunnel lining concrete model strengthened with carbon-fiber composite cables, *Structures*, Vol.65, 106656, 2024.5.
- 2) ISAMU YOSHITAKE, SHINGO MORIMOTO, TAKASHI ONISHI and TAIGA YANAGI: LOAD CAPACITY OF TUNNEL LINING CONCRETE STRENGTHENED WITH CARBON-FIBER COMPOSITE CABLE (CFCC), *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 9(2), STR-4, 2022.11.
- 3) S. Morimoto, S. Ueno, I. Yoshitake, K. Sugawara, H. Hayashi: Numerical simulations on behavior of tunnel lining strengthened by near-surface-mounted carbon-fiber composite cable, *Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2025 (WTC 2025)*, pp.2319-2326, 2025.5.