博士論文

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）

2025 年 9 月

森本真吾

山口大学大学院創成科学研究科

目次

第5章　トンネル覆工の数値解析

第6章　結論

第１章　序論

1.1　研究の背景

近年，日本国内において，高度経済成長期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いる．山岳トンネルにおいても，建設後数十年を経過し，経年劣化による損傷が顕著になってきている．国土交通省の調査[1)]によると，トンネルの損傷事例として，覆工コンクリートのひび割れや，漏水，変状などが多く報告されている．このような損傷は，軽微なものであっても放置すると徐々に劣化するケースもあるため，道路トンネルにおいては，5 年に 1 回の頻度で定期点検が行われている．

山岳トンネルは，主に在来工法である矢板工法と NATM（New Austrian Tunneling Method）を用いて建設されている．

在来工法[2), 3)]は，地山からの荷重を直接覆工コンクリートが支える設計思想のため，内空断面 10m 程度のトンネルの場合，必要な覆工の厚さは地山種別に応じて 40～80cm となり NATM の覆工厚 30cm と比べ比較的大きい．施工上，上下半に打継ぎ目が生じやすく，打継ぎ目は構造上の弱点となりやすい．また，矢板工法では覆工背面において空隙が残りやすく，大きな土圧が作用すると曲げモーメントが不均衡となり，トンネルの変状の一因となる．そのため，定期点検において背面空洞が確認された場合，土圧を覆工に均等に分布させるために裏込め注入が実施されている．

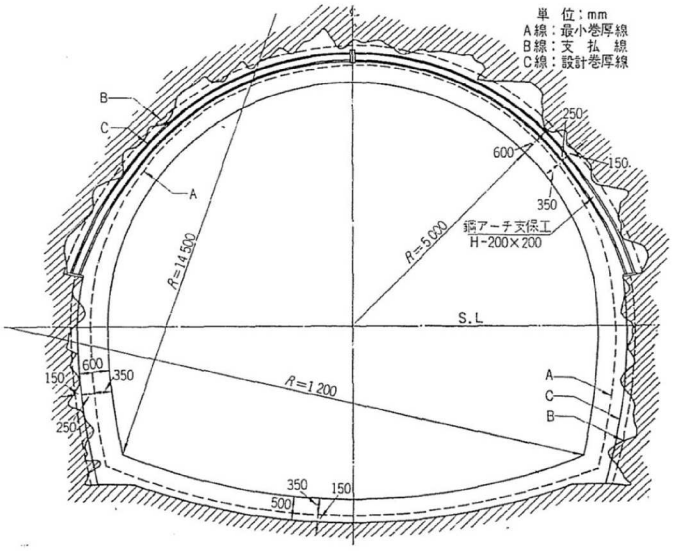


図-1.1.1　矢板トンネル断面図例[2)]

一方，NATM[3]は吹付けコンクリートとロックボルト，鋼製支保工で構成される支保工と地山とが一体となって地山の荷重を支える設計思想であり，掘削後，支保工により地山の変形が収束した後に覆工コンクリートを施工することを標準としている．そのため，ウォータータイトトンネルなどの特殊な条件や，土被りが低く外力の影響を受けやすい坑口部（DIII区）等を除いて，覆工コンクリートには外力が作用しないことが基本とされているため，覆工は無筋コンクリートで設計，施工される[3]（**図-1.1.3，1.1.4** 参照）．

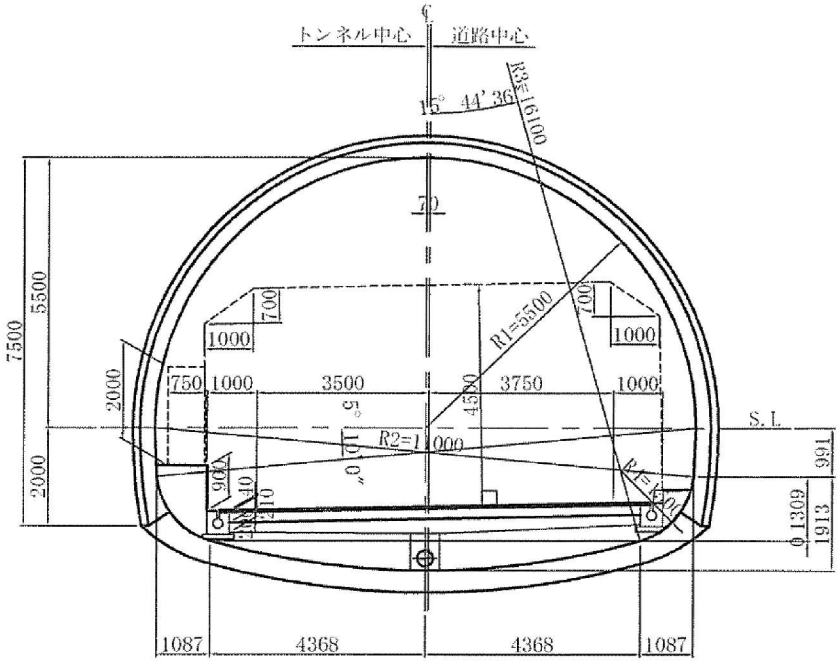


図-1.1.2　道路トンネルの標準断面図例[3]

図-1.1.3　覆工コンクリートイメージ図[4]

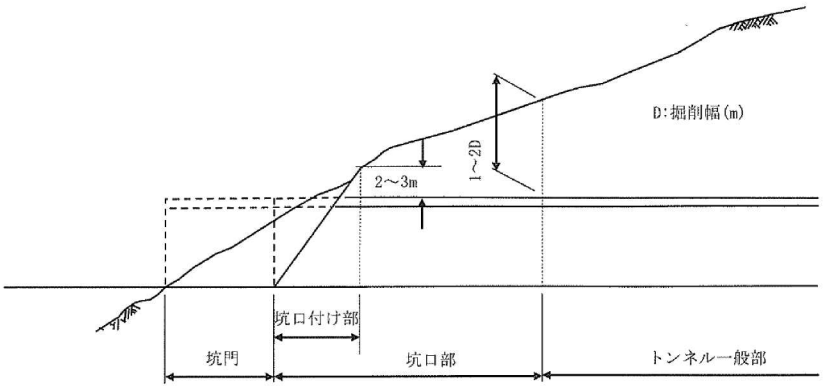


図-1.1.4　標準的な坑口部の範囲 [3)]

しかしながら，**図-1.1.5**，**図-1.1.6** に示すように，変状のあるトンネルは軽微なものも含めると 25～40%程度で決して少なくない．変状原因の割合をサンプリング調査 [5)]したものによると，変状の要因は「地圧」や「劣化」，「その他の外力（近接施工・地震・水圧など）」が 50%程度を占めている．

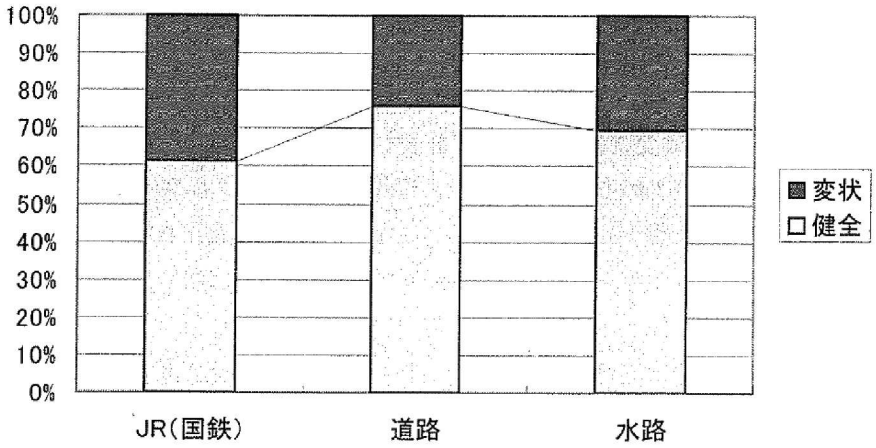


図-1.1.5　種類ごとの変状トンネルの割合 [5)]

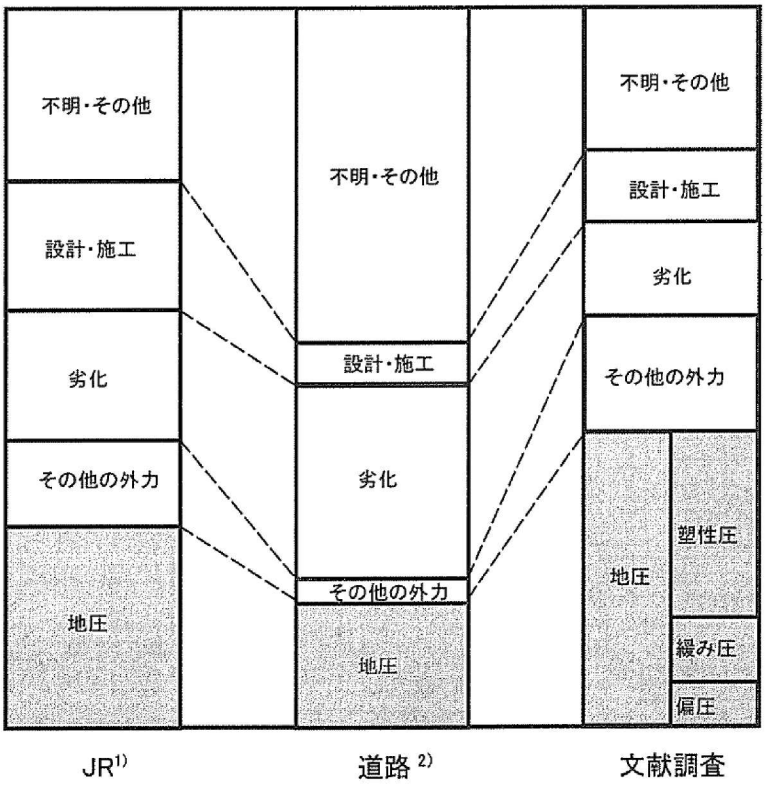


図-1.1.6　変状原因の割合 5)

また，近年では地震や盤ぶくれによる損傷被害も散見されるようになった．周辺地山の経年的な劣化や地震などの突発的な外力により，無筋の覆工コンクリートやインバートコンクリートに大きな被害が生じる場合がある[6]．このように，設計段階や施工時において予期せぬ現象である周辺地山の経年的な強度劣化，地下水の浸透，凍害，あるいは地震などの外力によって，覆工コンクリートにひび割れ，剥離，変状，路盤隆起などの損傷が生じることがある．

一般的な覆工コンクリートにおいて，外力に対する補強対策としては，覆工背面に空洞があれば背面空洞注入を行い，地山と覆工コンクリートを一体化させアーチアクション効果を期待できるようにする．その他の対策として，覆工コンクリート表面に薄肉であるシート状の内巻き補強工や，パネル状の内面補強工の施工が挙げられる．

さらに，変状に対して抜本的な延命対策が必要なものや，新たな機能付加が求められるものなど，構造物を大規模に改修する覆工再生といった対策[7]も推進されている．

しかしながら，補修材・補強材の剥落等の再劣化も顕在化しており，的確な補修・補強工法の選定と施工管理が求められている．例えば，覆工コンクリート表面への対策工は，シート材で覆うため，変状の変化・進展を検出困難にしてしまう欠点がある．さらに覆工背面に作用する外圧は，作用荷重が明確でないこともあり，補強対策工による均一な補強効果を得られることが難しい．さらに，厚みのあるパネル状の内巻き補強工は，トンネル内空断面の建築限界のクリアランス確保が難しく，建築限界を侵す可能性もあり，さまざまな課題を残している[8]．

また，コンクリートの打替えやインバートの改築といった大規模な工事においては，通行止めといった交通規制による社会的影響が大きく，それに伴い工期が長期化するなどの課題がある．

性能が低下しつつあるトンネルをいかに適切な時期に低コストで補修・補強を行い延命化させるかは喫緊の課題であり，より適切な補強対策が期待されるのが現状である．

1.2　研究の目的

前述のようにトンネル覆工コンクリートの補強には様々な課題を解決する必要があるが，その一解決策として，本研究では橋梁分野における既存構造物の補強技術として用いられている Near-Surface Mounted （NSM）工法に着目した．NSM 工法は，コンクリート部材の表面近くに FRP 補強材を埋設することで，構造物の耐荷性能を向上させる補強技術であり，主に床版や桁などの直線的な部材に適用されている[9]．

鉄筋と比べ FRP は腐食しない．被り厚を必要としないため，ごく表層の引張に最も効果的な位置に施工が可能となる．また，コンクリート表面を覆わないため，コンクリートの経年変化の観察も可能とする．

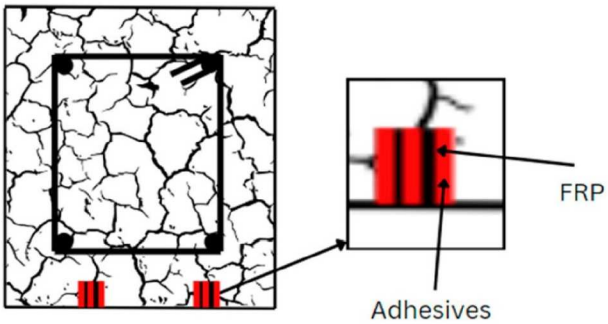


図-1.2.1　NSM 工法[9]

しかしながら，トンネル覆工のようなアーチ状のコンクリート部材に NSM 工法を適用する研究は，これまでにほとんど行われていない．これは従来の FRP 補強材は曲げに対する柔軟性が低く，アーチ状部材への適用が難しいことが一因である．

そこで本研究では，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ことを考えた．CFCC は，プレストレストコンクリート部材の緊張材として橋梁などの分野に広く使用されており，また，十分な可撓性も有していることから，様々な形状への曲げ加工も容易である．そのため，CFCC を用いることで，アーチ状のトンネル覆工コンクリートに対しても NSM 工法を適用することができるものと考えられる．

まず，アーチ型部材専用の載荷装置を製作し，可撓性を有する炭素繊維複合材ケーブル（Carbon-fiber Composite Cable: CFCC）を用いて NSM 補強したアーチ型コンクリート部材の載荷実験を行い，その補強効果を確認した．さらに，実験結果を数値解析で再現することで，解析モデルの入力値の同定を行うとともに，部材レベルにおける NSM-CFCC 補強工法の有効性を検証した．

これらの結果を踏まえて，再現解析で同定した入力データを用いて実スケールのトンネル数値解析を実施し，外力が作用した場合における実スケールモデルにおけるトンネル覆工補強効果を検証した．実スケールモデルの数値解析においても，NSM-CFCC 工法で補強した覆工コンクリートの耐荷性能を評価した．

1.3　本論文の構成

本論文は，計 6 章で構成されている．以下，各章の概説と**図-1.3.1** に本論文の構成フローを示す.

第1章　序論

本研究の背景と目的および論文の構成について記述している.

覆工コンクリートは，通常の土木構造物と異なり，アーチ形状であること，また，建築限界の制約により，補強対策には限界がある.

そこで本研究では，橋梁分野で用いられる NSM 工法に着目し，トンネル覆工への適用を検討した．可撓性を有する CFCC を補強材として用いた NSM-CFCC 工法の有効性について，載荷実験と数値解析により検証を行い，補強効果を評価することを目的とした.

第2章　既往の研究

橋梁などのコンクリート構造物の補強対策工である NSM 工法に関する既往の研究を調査・整理した．また，山岳トンネルの補強に関して，実験および解析を行った既往の研究を調査・整理した．これらの既往の研究を整理することで，本研究の位置づけを明確にした.

第3章　覆工コンクリートモデルの載荷実験

アーチ型部材専用の載荷装置を用いて，載荷実験を行った．比較のため補強材を埋設しない無補強のアーチ型コンクリート部材と，可撓性を有する CFCC を埋設したアーチ型コンクリート部材との比較実験を行った．なお，CFCC 材には，ϕ7.2～13.0mm と複数の種類の径のものを用い，それぞれのアーチ型コンクリート部材を作製した．埋設する CFCC の径による影響についても比較検討を行い，最も補強効果の高い工法を提案した.

第4章　モデル実験の再現解析

第 3 章の載荷実験で得られた知見の定量的評価を目的とし，有限差分法解析（FDM）による再現解析を行った．載荷実験で得られた各種データを用いて，数値解析モデルで逆解析を行った．逆解析により，数値解析モデルの入力値の同定を行うとともに，部材レベルにおける NSM-CFCC 補強工法の有効性を検証した.

第5章　トンネル覆工の数値解析

第 4 章の再現解析で同定された入力値に基づき，実スケールのトンネル覆工コンクリートをモデル化し，外力が作用した際のシミュレーションを実施した．外力として，塑性圧や局所的な地山のゆるみによる鉛直圧を作用するモデルとした．これらの数値解析によって，NSM-CFCC による補強効果を評価した.

第6章　　結論

本研究を通して得られた知見を整理し，今後の課題および展望についてまとめた．

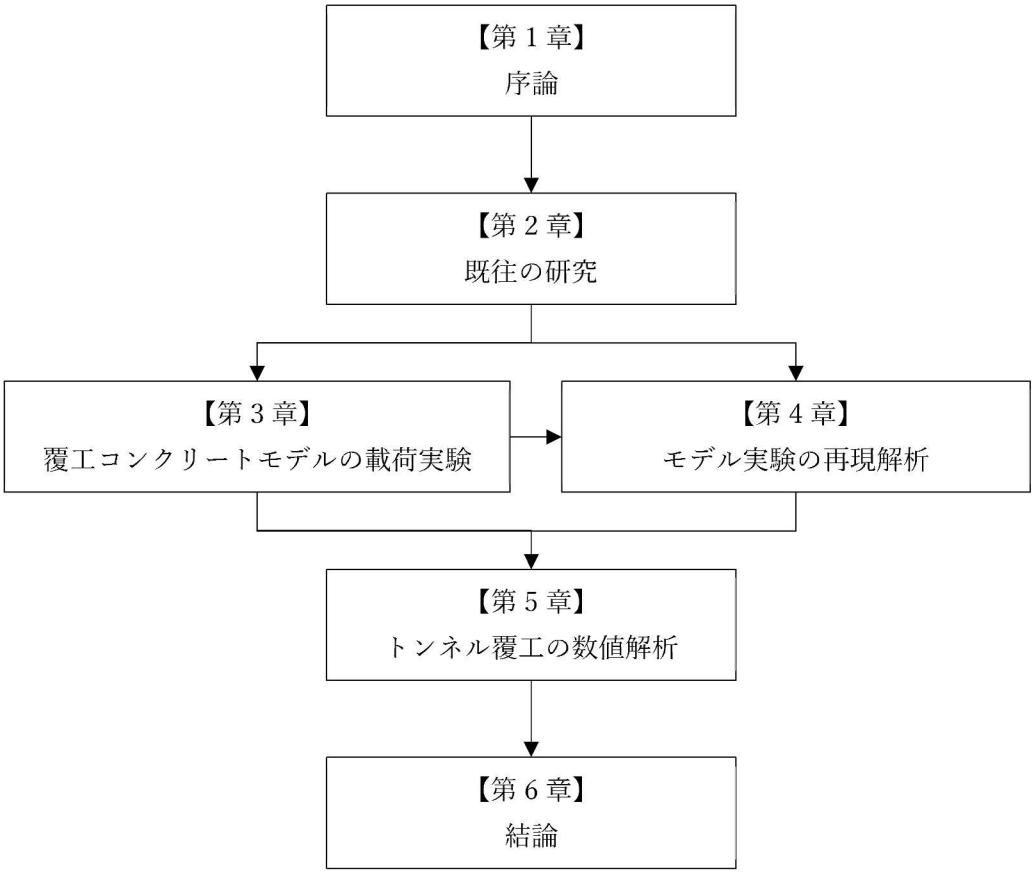


図-1.3.1　本論文の構成フロー

1.4　第 1 章の参考文献

1）道路トンネル定期点検要領，国土交通省道路局，2024.03.
2）トンネル標準示方書解説【昭和 44 年改訂版】，土木学会，pp.51-84，1969.11.
3）2016 年制定トンネル標準示方書［山岳工法編］・同解説，土木学会，pp.55-151，2016.05.
4）引用サイト: https://www.protan.no/gruver-og-tunneler/infraplan-vannsikringssystem/infraplan-tunnel_lining_typeIII/，閲覧日 25.04.11
5）トンネルの変状メカニズム，土木学会，pp.35-51，2004.03.
6）Asakura, T., and Kojima, Y. Tunnel maintenance in Japan, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.18, Issues 2-3, pp.161-169. 2003.
7）供用下における矢板工法トンネル覆工再生工に関する手引き（案），中日本高速道路株式会社金沢支社，2020.
8）トンネルライブラリー第 30 号，トンネルの維持管理の実態と課題，土木学会，pp.9-265，2019.
9）Al-Saadi, NTK., Mohammed, A., Al-Mahaidi, R., and Sanjayan, J., A state-of-the-art review: near-surface mounted FRP composites for reinforced concrete structures, *Construction and Building Materials*, Vol.209, pp.748–769, 2019.

第 2 章　既往の研究

本研究で対象とする NSM 工法は，主に橋梁分野においてコンクリート構造物の補強技術として発展してきた．そのため，山岳トンネルへの適用を考える際に，橋梁分野における NSM 工法に関した既往の研究を参考にすることが重要である．

一方，山岳トンネル分野における覆工の補修・補強に関する研究事例は，数多く存在する．これらの研究は，実験と解析に大別される．

本章では対象となる研究事例として

2-1　NSM 補強に関する研究

2-2　トンネル補強に関する実験研究

2-3　トンネル補強に関する解析研究

に分類して事例を紹介する．

2.1　NSM 補強に関する研究

NSM 工法は，FRP などをコンクリート部材の表面近くに埋め込むことで，補強効果を得る技術である．NSM 補強に関する研究は，コンクリート構造物の老朽化対策技術として発展してきている．その多くは，橋梁の床版や橋脚などの構造物を対象とした研究がなされ，軽量，高強度，耐食性などといった FRP の材料特性を活かした補強方法が検討されている．FRP 補強の有効性が示される一方，はく離破壊や付着性能の課題も明らかになり，複数の補強材を組合せた新たな補強方法や設計法の開発につながっている．

ロッドやプレート状に成形された FRP 材は，柔軟性や施工性の観点から直線的な構造物を主対象としているケースが多く，トンネル覆工などのアーチコンクリート構造物への適用には，補強材の適用性について検討する必要がある．

a)　吉岡ら[1)]による応力履歴を与えた RC 柱に展張格子筋を配置した接着剤塗布型 NSM 増厚補強法の耐荷力性能

老朽化した RC 柱を対象に，ひび割れ補修と展張格子筋を用いた増厚補強工法の有効性を実験的に検証している．コンクリートで RC 柱を作製し，一軸圧縮載荷実験によりひび割れ損傷を与え，浸透性接着剤によるひび割れ注入補修を施し，高耐久型エポキシ接着剤を塗布したうえで，厚さ 40mm の無収縮モルタル中に展張格子筋を配置して増厚補強を行っている．応力履歴時の最大耐荷力に対し 2 倍以上の補強効果が得られ，帯筋の拘束作用や接着剤塗布による一体性向上が大きく寄与しすること，理論耐荷力との比較では，帯筋による拘束効果を考慮していないため差異がみられるが，ひび割れ損傷部材の補強法として実用的であること，が述べられている．

b)　長谷川ら[2)]による GFRP リブを付けた高弾性 CFRP ロッドの付着特性に関する実験的研究

高弾性 CFRP ロッドを道路橋張出床版などの曲げ補強に用いる NSM 工法を対象とし，ロッドとコンクリートまたはモルタル間の付着性能を向上させるため，ガラス繊維（GFRP）リブを装着した CFRP ロッドの引抜き試験を実施した．その結果，リブ長 75mm 前後・リブ厚 1.5mm 程度が最適であり，コンクリート割裂破壊やロッド抜け出し破壊に至るまで十分な付着強度を示すことを確認した．本成果は切削深さの制限がある床版補強にも有用で，量産化により広範なインフラ補修へ適用できる可能性が高いことが示された．適用事例をさらに蓄積し，ロッド・リブの大量生産技術や施工法の標準化を進めることで，インフラ老朽化対策に寄与すると期待される．また，高弾性 RC 部材全般への適用に関しても，付着性能向上を図る有効な知見を提示している．

c)　小林[3)]による既設コンクリート部材に対する接着型 FRP 補強材の研究開発動向

既設コンクリート部材の FRP 補強に関する研究開発動向を概説している．軽量・高強度かつ耐食性を有する FRP は，曲げ・せん断・耐震など多岐にわたる補修・補強工法で活用が進んでいる．特に曲げ補強では，FRP シートやプレートなどに対しエポキ

シ樹脂を介してコンクリート表面へ貼り付ける方法が主流だが，はく離防止や付着強度向上が重要課題として挙げられる．FRP シートでは，現場含浸を要するため工程が増える一方，FRP プレートは成形済みで施工が比較的容易だが，継手部や端部でのはく離対策が必要となる．施工性や付着耐久性を高める技術の開発も報告している．

d) 吉岡[4]によるメタルグリッド筋を用いた橋梁 RC 部材の補修・補強に関する実験的研究

橋梁の RC 部材を対象に，メタルグリッド筋を開発・適用して補修・補強を行い，実験的な検証を行っている．メタルグリッド筋は鋼板を格子状に加工し主筋と配力筋を一体化したもので，従来の鉄筋に比べて補強範囲を薄く抑えられ，施工の省力化や工期短縮が期待できる．RC はりや床版，柱などにメタルグリッド筋を用いた増厚補強の供試体に，静的載荷や輪荷重走行疲労実験，ひび割れ補修後の補強実験などを実施し，耐荷力の向上や耐疲労性の改善，一体性の向上について示されている．

e) 小林[5] による FRP により補強された鉄筋コンクリート部材の構造性能評価

コンクリート構造物に対して，軽量・高強度・耐食性に優れる FRP を用いた補強技術を検討し，構造性能を評価した研究である．FRP 材料の特性と施工法を整理し，曲げ補強やせん断補強，道路橋 RC 床版の疲労寿命向上など様々なケースにおける実験・解析を実施している．従来工法と比較し，FRP 接着技術の付着特性や高伸度弾性樹脂の効果，U 字型補強材を用いたあと施工差込補強の有効性などを検証した．さらに疲労損傷機構のモデル化を行い，FRP 補強により RC 床版の疲労寿命の増加に寄与することが報告されている．

f) Fatigue Analysis of CFRP-Reinforced Concrete Ribbed Girder Bridge Deck Slabs by Shuai Tian[6]

鉄筋コンクリート橋床版の長寿命化に寄与する研究として，炭素繊維強化ポリマーなどで補強した床版の疲労解析を実施している．16m スパンの桁橋に基づき，3 つの補強（CFRP クロス，CFRP メッシュ，帯鋼板），および非補強の 5 つの試験体を対象とした．橋梁床版の実際に作用する力をシミュレートするために，静的荷重破壊試験や定点定振幅疲労荷重試験を実施した．荷重サイクル数が疲労寿命の 90%を超えた時点で主疲労き裂が生じた．CFRP クロスまたはメッシュで補強した橋梁床版の疲労寿命は，帯鋼板で補強したものより 20%程度長くなり，CFRP クロスによる橋梁床版補強対策が最適であると述べられている．

g) RC Columns Strengthened with NSM-CFRP Strips and CFRP Wraps under Axial and Uniaxial Bending Experimental Investigation and Capacity Models by Jamal A. Abdall[7]

鉄筋コンクリート柱を補強するために，表面近傍に取り付けた炭素繊維強化ポリマー（CFRP）ストリップを CFRP ラップと組み合わせて使用することの効率性について，実験的および解析的に検討されている．NSM-CFRP ストリップと CFRP ラップで補強した RC 柱を合計 15 本作製し，偏心荷重を負荷した試験が行われた．NSM-CFRP ストリップ，CFRP 層の数，偏心率が供試体の耐力におよぼす影響について検討された．

2.2　トンネル補強に関する実験研究

山岳トンネルの補強に関する研究のうち，主として実験を実施した論文についてとりまとめた．主に，地震による被害と，地圧などの地山特性に起因する変状について述べられているものが多い．

地震に関する研究では，低土被りや地質不良区間における損傷形態，被害メカニズムの解明が述べられており，また，様々な覆工材料についても実験で再現し，変形・破壊挙動を評価された文献もある．

また，地圧などの地山特性に関する研究では，塑性化（スクイージング）や吸水膨張（スウェリング）に伴う盤ぶくれ（路盤隆起）について研究されており，トンネル覆工の背面空洞の有無による影響についても言及されている．

補強対策工として，ロックボルト工やインバート対策工について比較検討されている．

なお，実験と解析と両方記載された文献については，本節で取り扱う．

a)　宮林ら[9]による小土被り山岳トンネル覆工の耐震性能と耐震設計手法に関する基礎的研究

小土被り条件にある山岳トンネル覆工の耐震性能を定量的に評価し，性能規定に基づく設計手法の構築を目的としたものである．現地計測により，小土被り山岳トンネルは地震時にせん断変形しやすく，アーチ肩部を中心にひび割れや剥離が生じやすいことが確認された．模型実験では二次元せん断土槽を用いて地盤の変形を再現し，トンネルが地震に伴い楕円形に変形し，ひび割れや圧ざを引き起こすメカニズムを明らかにした．また，数値解析により地盤剛性の変化が激しい場合にトンネルの変形が顕著になり，損傷リスクが高まることを定量的に示している．特に，無筋コンクリート覆工に対してはアーチ肩部の損傷が顕著となるが，繊維補強コンクリートを用いることで圧ざの抑制効果が示されている．

b)　松尾ら[10]による山岳トンネルの裏込め注入に関する研究

山岳トンネルの裏込め注入工において，覆工背面の空隙がトンネル耐震性能に与える影響を定量的に評価し，適切な注入圧および施工方法について述べられている．地震時に生じるせん断波の作用により，覆工背面の空隙が天端部を中心として 60～90°の範囲では耐震性能が顕著に低下する．また，覆工巻厚が不足する場合においては，裏込め注入時の圧力によって覆工の破壊が生じる可能性があることが解析と実験により示されている．

また，注入圧力の作用位置や注入管の配置ピッチを調整することで，覆工に作用する圧力を低減できる手法も提案されている．三次元数値解析と実験を組み合わせた結果，巻厚不足部位への直接的な注入圧の作用は避ける必要性が示唆されている．

c)　小島ら[11]による地圧の作用による山岳トンネルの変状対策のあり方

山岳トンネルに作用する地圧，塑性圧および地山の緩みによる鉛直圧が引き起こす

変状に対する対策のあり方を，事例分析，模型実験，数値解析を通じて体系的に検討されている．塑性圧に関しては，経年的に変状が進行する事例を取り上げ，背面空洞や巻厚不足などの構造的な弱部が変状を加速させることを示し，インバートや裏込め注入などの補強対策工の有効性が確認されている，

地山の緩みによる鉛直圧では，施工時に生じた覆工背面空洞が経年で崩落に至る要因となることを複数の崩落事例から明らかにし，ひび割れ等の初期兆候の監視と計画的な補修の重要性を指摘している．また，模型実験ではトンネル断面の変形特性や補強効果を評価し，数値解析では地山劣化モデルを用いて将来の変状を予測可能としている．

d)　朝倉ら[12]による山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム

山岳トンネルにおける地震被害の実態とそのメカニズムを明らかにすることを目的として，被災トンネルの事例調査，数値解析，模型実験の分析が行われた．

1923 年以降の地震により被災した約 100 本の山岳トンネルのうち，損傷パターンは「坑門部の損傷」・「断層通過部での損傷」・「地すべり・斜面変動による損傷」の 3 種に大別できることが示された．断層通過部では地山のせん断変形によりアーチ天端部やスプリングラインに顕著なひび割れが集中し，損傷が拡大しやすいと報告されている．また，地震波の入射方向がトンネル軸に対して 45°となる場合，被害が著しくなる傾向も明らかとなった．断層滑りに伴う変形については縮小模型による再現実験と三次元解析により被害挙動が検証され，損傷発生メカニズムの定量的把握が可能であることが示されている．

e)　野城ら[13]による地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム

山岳トンネルの地質不良区間における地震被害メカニズムを解明するため，模型実験および数値解析により被害の再現と要因分析を行ったものである．過去の被害事例を分析した結果，地質不良区間では圧ざ，ひび割れ，剥落，盤膨れなどの被害が集中し，その原因として覆工背面空洞や覆工の巻厚不足が指摘されている．

模型実験では，変形やひび割れの発生パターンを検証した．せん断波が鉛直方向に対し 45 度で入射する場合，天端やスプリングライン部にひび割れが集中し，覆工の被害形態が大きくなることが確認された．また，背面空洞や巻厚不足がある場合，覆工の耐力が著しく低下することが実証された．

f)　野城ら[9]による種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究

山岳トンネル覆工の限界状態を明らかにするため，れんが，無筋コンクリート，短繊維補強コンクリート，鉄筋コンクリートなどを対象に，1/5 スケールの模型実験および数値解析を通じ，変形破壊挙動の比較検討を行っている．実験では，材料ごとに荷重-変位関係やひび割れの進展，剥離状況を観察している．特に，れんがは層間ひび割れによる破壊，RC は斜めひび割れによるせん断破壊，短繊維補強材は剥落抑制に有効であることが確認された．鋼繊維等を用いた覆工では，圧ざが生じた際の剥離が抑制された．

構造的な耐荷性能は無筋コンクリートと同等ではあるものの，変形性能が優れることが示された．また鉄筋コンクリートは耐荷性能に優れるものの，早期に剛性低下が生じ変形性能は限定的であったと報告されている．

g）　小林ら[15]による完成後の盤ぶくれを防ぐ新たなインバートの抑制効果

山岳トンネルにおける完成後の盤ぶくれを未然に防止するため，新たに採用されたインバート構造の盤ぶくれ抑制効果を模型実験および数値解析により検証したものである．従来の標準的なインバートでは中央通路部にひび割れが発生しやすく，盤ぶくれへの耐性が限定的であるのに対し，新しいインバート構造は中央集水管部を巻き込んだ厚肉構造となるため，剛性が高く，盤ぶくれに対する耐性を向上させる設計となっている．模型実験では，膨張モルタルにより盤ぶくれを模擬し，新しいインバート構造の方が隆起抑制効果に優れることが確認された．また，数値解析においても，盤ぶくれ時のひび割れ集中を抑制し，インバート隆起量を大幅に低減できることが示されている．

h）　嶋本ら[16]による地山の塑性化に伴う山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究

山岳トンネルにおいて供用後に発生する路盤隆起現象のメカニズムを明らかにし，合理的な対策工の設計指針を確立することを目的としている．国内の変状事例を分析し，膨潤性粘土鉱物やインバートの有無といった要因が隆起に関与することを確認した．隆起の主な原因として，地山の塑性化によるスクイージングと，膨潤性粘土のスウェリングが想定されている．模型実験では，地山に側圧を加えることでスクイージングを再現し，インバートや下向きロックボルトの有効性を検証している．対策工のロックボルトについては，本数，長さ，配置，角度等が路盤隆起の抑制に影響することを明らかにした．数値解析により隆起抑制効果を定量的に評価し，ボルト配置や設計条件の最適化に関する知見が報告されている．

i）　嶋本ら[17]による含水比変化に着目した山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムの推察

山岳トンネルにおける完成後の盤ぶくれ現象のメカニズムを明らかにすることを目的とし，事例分析・文献調査・岩石試験・模型実験を通じて考察を行ったものである．スクイージングおよびスウェリングに加え，完成後に水が地山へ供給されることが盤ぶくれ発生の要因であることを示している．建設時に湧水が少ない場合においても，完成後に結露水や排水管からの漏水が地山に浸透することで，周辺地山の強度低下や，膨潤性鉱物による体積膨張を引き起こすことが確認された．

文献調査では，盤ぶくれはグリーンタフ地域の新第三紀泥岩や凝灰岩で多く発生し，インバートの有無や地山強度比，スレーキング指数が盤ぶくれ顕在化に関係することが示唆された．これらのことから，含水比変化が盤ぶくれを誘発する重要な因子であると結論付けられた．設計段階や維持管理段階において含水条件の長期的な変化に対する配慮の必要性が示されている．

j）　嶋本ら[18]による地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関

する研究

山岳トンネルにおける地山の吸水膨張に起因する路盤隆起現象のメカニズムを解明し，有効な対策工を検討することを目的としている．実際の変状事例の分析により，膨潤性鉱物を含む地山において吸水による体積増加が生じると，トンネルの路盤面に局所的な隆起が進行することが確認された．

膨潤モルタルを用いた模型実験では，ロックボルトの有無が隆起抑制に大きな影響をおよぼすことが示された．また解析では，ロックボルトによってインバートの剛性を高め，ひび割れ発生時の急激な応力集中を緩和し，路盤の隆起速度を低減する効果が認められた．また，ロックボルトの本数や打設ピッチ，ボルトへのプレストレスの有無などの違いによる定量的な評価について述べられている．

る配慮の必要性が示されている．

k)　Fail-safe function for cast-in-place permanent lining of rock tunnel as a measure against lining collapse during earthquake by Kusaka[19)]

日本の山岳トンネルは地震に強い構造であるものの，2016 年熊本地震や 2024 年能登半島地震では覆工コンクリートの崩落被害が発生した．著者らは覆工崩落時も地山や支保工がトンネル空間を維持していることに着目し，覆工の落下防止が利用者の安全確保に繋がると示唆している．大地震時に覆工が破損しても，鉄筋が「フェールセーフ機能」として覆工ブロックの落下を防ぐ可能性を提案するものである．実物大載荷試験や室内実験，計算による検証の結果，単一の鉄筋でも覆工の自重を支える潜在能力が示され，10 cm 以上のせん断変位においても鉄筋が破断せず，覆工全体の一体性が保たれることが確認された．通常の 2 車線道路トンネルにおける D19 の鉄筋を 20cm 間隔で設置することで，覆工が 10～15cm 変位しても，覆工ブロックの自重落下を防ぎうることを示唆している．

2.3　トンネル補強に関する解析研究

当節では，山岳トンネルの補強に関する研究のうち，主として解析を行っている論文についてとりまとめた．

覆工の破壊形態をシミュレーションするため，非線形解析が用いられることが多く，覆工コンクリートの限界状態は破壊メカニズムの定量的な評価が行われている．前節の実験研究と同様，覆工コンクリートの対策工やインバート工の補強効果の研究も行われている．また，連続体解析だけではなく，個別要素法による解析や，力学のつり合い計算以外として温度応力解析や地震応答解析といった高度な解析手法もあり，今後の研究の方向性が示されていると考える．

a)　日下ら[20]による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

地震時に山岳トンネルの覆工が受ける天端部や側壁部の圧縮破壊に着目し，これを再現する数値解析手法を構築するとともに，発生外力の大きさを静的荷重に換算して評価したものである．FLAC3D を用いた非線形有限差分解析により，地山の水平方向あるいは鉛直方向の圧縮変形が卓越する場合の変形挙動をシミュレートし，地山条件やインバートの有無を変化させた検討が報告されている．覆工に適用したひずみ軟化・硬化モデルを用いることで，実際のひび割れや崩壊を反映した挙動の再現が可能であることが示された．CII から E 地山までの条件において，天端や側壁に 3000μ を超えるひずみ集中と圧縮破壊が確認されている．

b)　木谷ら[21]による個別要素法を用いた山岳トンネル覆工の破壊シミュレーション

山岳トンネル覆工の破壊挙動を詳細に解析するため，従来の連続体力学に基づく手法とは異なる不連続体解析手法（個別要素法，DEM）の適用を試みたものである．

覆工に生じるひび割れ，浮き・剥離，そして最終的な剥落へと進行する一連の破壊過程を，個別要素法を用いてシミュレーションが行われた．数値解析には，軸力と曲げが作用する条件，および曲げが卓越する条件を想定した実大載荷実験のデータを基に，ブロック体個別要素法と粒状体個別要素法を用いた．その結果，ひび割れの発生や進展，覆工の構造的な分離，さらには全体の破壊過程を再現することが可能であることが示された．不連続体解析手法は，覆工の破壊進行を評価する上で有用であるものの，適用に際しては解析精度や計算コストなどの課題も示された．

c)　白岩ら[22]による覆工コンクリートひびわれ対策への部分パイプクーリングの適用

トンネル覆工コンクリートの貫通ひび割れを抑制するため，局所的かつ短期間の冷却を行う「部分パイプクーリング」効果を三次元 FEM 温度応力解析および実構造物での計測により検証したものである．解析では側壁下部中央の冷却によりコンクリートの最高温度を約 7℃低減し，ひび割れ発生確率を最大 37%抑制できることが示された．現場施工では，冷水を循環させるパイプを設置し，実測した内部温度と拘束ひずみを用

いた逆解析において良好な一致が得られた．また，冬期における覆工コンクリート打設でも深刻なひび割れは確認されず，長期耐久性の観点からも有効性が示されている．

d）白岩ら[23]による坑口付近覆工コンクリートの温度ひび割れ抑制および表層品質向上対策に関する検討

トンネル坑口部の覆工コンクリートに発生しやすい温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れ，凍害・塩害に対する対策として，部分パイプクーリングとシート吸引方式給水養生工法を実構造物に適用し，その有効性を現場計測と三次元 FEM 温度応力解析により定量的に評価したものである．部分パイプクーリングでは側壁下部を局所的に冷却し，最高温度を低下させて温度応力を緩和し，ひび割れ発生確率を最大で約 40%低減することが示された．給水養生では，吸引により養生シートを密着させた状態で水を供給し，乾燥収縮や塩分浸透の抑制，透気係数を大幅に改善した．膨張コンクリートとの比較では，部分パイプクーリングの方が応力低減効果に効果的で，施工性・経済性にも優れていることが示された．

e）鈴木ら[24]による覆工を再生したトンネル構造体の耐震性能の検討

矢板工法により建設された覆工に対し，繊維補強コンクリートを用いた再生覆工体による耐震性能の向上を目的とした性能評価を行ったものである．評価手法には応答変位法および時刻歴応答解析法を用い，再生覆工体の導入が構造的健全性に与える影響を検討した．その結果，地山のせん断弾性波速度 Vs が 400m/s 以上であれば，耐震性能 2 の確保が可能であることが示された．

f）野城ら[25]による圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究

無筋コンクリート覆工の耐震設計に向け，圧縮破壊後の軟化挙動を考慮した数値解析手法を提案されている．引張および圧縮破壊後のひずみ軟化をモデル化した非線形 FEM 解析手法を構築し，1/5 スケールの模型実験および実トンネルの地震被害の再現解析を行った．解析結果より，軟化を考慮することで実験と同様にひび割れおよび圧ざの発生挙動が再現され，圧ざの限界状態の定量的評価が可能であることが示された．

g）野城ら[26]による供用後の変状山岳トンネルの補強工の効果の評価と簡易な設計法に関する研究

供用中に変状が生じた山岳トンネルを対象に，補強工の変形抑制効果を定量的に評価し，簡易な設計法の構築を目的としている．対象とした補強工は，裏込注入工，ロックボルト工，内巻工，インバート工であり，それぞれの単独効果および組合せ効果について FLAC3D を用いた数値解析により検証した．時間経過に伴う地山劣化を模擬することで，対策工の有効性について報告されている．ロックボルト工は単独でも効果が顕著であることが示された．また，内巻工やインバート工は裏込注入工との併用により効果が増大すると示された．内巻工の効果は背面空洞の有無に大きく影響されることも明らかとなった．

h）　棗ら[27]による施工の省力化を図る新たなインバート形状の成立性に関する考察

供用中トンネルにおけるインバート補強工の省力化を目的に，新たなインバート形状について評価したものである．従来の円形インバートに代わり，三角形状や平底厚底形状などを検討し，模型実験および数値解析を用いて盤ぶくれに対する補強効果を検討した．三角形や厚底平面形状は円形に比べ施工の簡略化が可能でありつつ，一定の補強効果を示すことが確認された．一方で，靭性の面では従来の円形形状に劣る傾向も示された．平底形状はインバート中央部に曲げモーメントが集中しやすく，補強効果が限定的となる可能性が示唆された．底盤を厚くすることで剛性の向上とともに，補強効果を高めることが可能であると示された．

i）　藤井ら[28]による変状予測を考慮した山岳トンネル維持管理に関する研究

山岳トンネルの合理的な維持管理を実現するため，変状の予測を取り入れた計画的な補修時期の決定手法を提案している．長崎県のトンネルを対象に補修データの収集・分析を行い，塑性圧や施工起因の変状が時間経過とともに複合的に進行する傾向を明らかにした．また，有限差分法による数値解析を用いて，地山と覆工の劣化を考慮した内空変位の予測を行い，補修の有無や補修のタイミングに応じた変位抑制効果と維持管理コストについて示されている．補修を早期に実施することで，変位抑制とコスト削減の両面で有効であることが示されている．内巻工や炭素繊維シート工の施工時期や施工頻度を変えた場合の効果も比較し，強度の高い補修を初期に実施することが最適な選択肢となる可能性を示唆している．

j）　斎藤ら[29]による目地板引抜きにより形成した目地による覆工コンクリートのひび割れ誘発特性

山岳トンネル覆工コンクリートの急速施工を目的に一打設長を延長する新工法を開発し，発生が懸念されるひび割れに対処するため，中央部にひび割れ誘発目地を形成する手法の有効性について検証されている．実大施工実験では，目地板の深さや材質を変えた複数ケースにおいて 2 年間の経時変化を測定した．目地部では温度変化や乾燥収縮によりひび割れが誘発される一方で，目地部以外ではひび割れが抑制されることを確認した．三次元 FEM 解析により，目地深さが増すほどひび割れ誘発効果が高まることや，目地部の変位が気温と連動して変化することが示された．目地形成による打継目の数が減少させることで，維持管理上のリスクも低減可能と結論づけられている．

k）　保田ら[30]による 3 次元弾性波動論に基づいた山岳トンネルの地震被害メカニズムに関する考察

山岳トンネルに対する地震被害のメカニズムを解明するため，三次元弾性波動論に基づいた円形トンネルに斜めに入射する地震波の影響を解析している．解析の結果，トンネル横断方向の変形は地盤と覆工の剛性比に依存し，入射波の波長の影響は小さいことが示された．しかし，縦断方向の変形は剛性比とともにトンネル軸方向の見かけの波長に強く影響されることが示された．S 波がトンネル軸方向に成分を持つ場合，従来

の二次元横断面解析では再現できない被害が生じる可能性があることが明らかになり，実際の被害事例にもその傾向が確認された．このことから，山岳トンネルの耐震設計においては縦断方向の変形も含めた三次元的な解析が不可欠であることが示唆され，現行の二次元的評価法の限界と改善の必要性が提起されている．

2.4　第２章の参考文献

1）吉岡泰邦，阿部　忠，水口和彦，師橋憲貴：応力履歴を与えたRC柱に展張格子筋を配置した接着剤塗布型NSM増厚補強法の耐荷力性能，セメント・コンクリート論文集，75巻，１号，pp.340-347，2021.

2）長谷川泰聰，吉武　勇，加藤貴久：GFRPリブを付けた高弾性CFRPロッドの付着特性に関する実験的研究，土木学会論文集E2（材料・コンクリート構造），76巻，２号，pp.89-97，2020.

3）小林　朗：既設コンクリート部材に対する接着型FRP補強材の研究開発動向，土木学会論文集A1（構造・地震工学），77巻，５号，pp.II_9-II_24，2020.

4）吉岡泰邦：メタルグリッド筋を用いた橋梁RC部材の補修・補強に関する実験的研究，日本大学博士論文，2023.

5）小林　朗：FRPにより補強された鉄筋コンクリート部材の構造性能評価，早稲田大学博士論文，2020.

6）Shuai Tian：Fatigue Analysis of CFRP-Reinforced Concrete Ribbed Girder Bridge Deck Slabs. *Polymers*, 14(18), 3814, 2022.

7）Jamal A. Abdalla：RC Columns Strengthened with NSM-CFRP Strips and CFRP Wraps under Axial and Uniaxial Bending: Experimental Investigation and Capacity Models, *Journal of Composites for Construction*, Vol. 25, Issue 2, 2021.

8）Amir Mohammad Bakhtiari and Ali Harati：Assessment of Composite Bars and FRP Panels for Seismic Bridge Decks, *Journal of Civil Engineering Researchers*, Vol. 5, No. 4, 2023.

9）宮林秀次，井浦智実，小島芳之，野城一栄，朝倉俊弘：小土被り山岳トンネル覆工の耐震性能と耐震設計手法に関する基礎的研究，土木学会論文集F1（トンネル工学），67巻２号，pp.126-143，2011.

10）松尾知明，嶋本敬介，朝倉俊弘，内藤　繁，田川謙一：山岳トンネルの裏込め注入に関する研究，土木学会論文集F1（トンネル工学），68巻，３号，pp.I_39-I_49，2012.

11）小島芳之，太田岳洋：地圧の作用による山岳トンネルの変状対策のあり方，応用地質，54巻，６号，pp.251-263，2014.

12）朝倉俊弘，志波由紀夫，松岡　茂，大矢敏雄，野城一栄：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム，土木学会論文集，No.659，III-52，pp.27-38，2000.

13）野城一栄，小島芳之，深沢成年，朝倉俊弘，竹村次朗：地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム，土木学会論文集C，65巻，４号，pp.1045-1061，2009.

14）野城一栄，平田　亮，岡野法之，小島芳之：種々の材料からなる山岳トンネル覆工の変形破壊挙動に関する研究，土木学会論文集F1（トンネル工学），71巻，２号，pp.78-94，2015.

15）小林寛明，上野　光，磯谷篤実，嶋本敬介，岸田　潔：完成後の盤ぶくれを防ぐ新たな

インバートの抑制効果, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), 75 巻, 1 号, pp.116-129, 2019.

16) 嶋本敬介，野城一栄，小島芳之，中西祐介，塚田和彦，朝倉俊弘：地山の塑性化に伴う山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究，土木学会論文集 F1（トンネル工学），69 巻，1 号，pp.54-72，2013.

17) 嶋本敬介，川越健，野城一栄，小林寛明，磯谷篤実：含水比変化に着目した山岳トンネルの盤ぶくれメカニズムの推察，土木学会論文集 F1（トンネル工学），76 巻，1 号，pp.34-48，2020.

18) 嶋本敬介，野城一栄，小島芳之，塚田和彦，朝倉俊弘：地山の吸水膨張による山岳トンネルの路盤隆起現象とその対策工に関する研究，土木学会論文集 F1（トンネル工学），68 巻，3 号，pp.I_65-I_79，2012.

19) A Kusaka, K Kikuchi, N Isago, K Kawata：Fail-safe function for cast-in-place permanent lining of rock tunnel as a measure against lining collapse during earthquake, *Tunnelling into a Sustainable Future – Methods and Technologies* (*Proceedings of the ITA-AITES world Tunnel Congress 2025*), pp.1563-1570，2025.

20) 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，74 巻，2 号，pp.I_1-I_17，2014.

21) 木谷　努，中川光雄，真下英人，砂金伸治：個別要素法を用いた山岳トンネル覆工の破壊シミュレーション，土木学会論文集，80 巻，19 号，24-19001，2024.

22) 白岩誠史，川中政美，庄野　昭，佐藤　正，牧　剛史：覆工コンクリートひびわれ対策への部分パイプクーリングの適用，土木学会論文集 F1（トンネル工学），72 巻，3 号，pp.I_36-I_46，2016.

23) 白岩誠史，栗原浩彦，三沢良太，土屋　徹，川中政美：坑口付近覆工コンクリートの温度ひび割れ抑制および表層品質向上対策に関する検討，土木学会論文集 F1（トンネル工学），73 巻，3 号，pp.I_32-I_45，2017.

24) 鈴木　健，鯨井　巧，鈴木俊雄，木村定雄：覆工を再生したトンネル構造体の耐震性能の検討，土木学会論文集，80 巻，12 号，24-00023，2024.

25) 野城一栄，小島芳之，新井　泰，岡野法之，竹村次朗：圧縮破壊後の軟化を考慮した無筋コンクリート山岳トンネル覆工の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集 C, 65 巻，4 号，pp.1024-1038，2009.

26) 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効果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), 77 巻, 1 号, pp.1-16，2021.

27) 棗　拓史，中里倫子，河田皓介，砂金伸治，日下　敦，小泉　悠，大津敏郎：施工の省力化を図る新たなインバート形状の成立性に関する考察，土木学会論文集，79 巻，19

号，pp.1-17，2023.
28）藤井崇博，棚橋由彦，蒋　宇静，竹下揚子：変状予測を考慮した山岳トンネル維持管理に関する研究，地盤工学研究発表会発表講演集，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1691-1692，2003.
29）齋藤隆弘，浜田　元，目黒　緑，千々和伸浩，岩波光保：目地板引抜きにより形成した目地による覆工コンクリートのひび割れ誘発特性，土木学会論文集 F1(トンネル工学)，78 巻，1 号，pp.40-54，2022.
30）保田尚俊，塚田和彦，朝倉俊弘：3 次元弾性波動論に基づいた山岳トンネルの地震被害メカニズムに関する考察，土木学会論文集 F1（トンネル工学），70 巻，1 号，pp.1-14，2014.

第３章　覆工コンクリートモデルの載荷実験

3.1　概要

本研究[1),2)]では，NSM-CFCC 工法（Near Surface Mounted - Carbon Fiber Composite Cables）のトンネル覆工コンクリートに対する補強効果を明らかにするために，トンネル覆工コンクリートの天端部を模擬した供試体を作製し，載荷実験を実施した．

トンネルに作用する“ゆるみ圧”の一例を**図-3.1.1** に示す．ゆるみ圧はトンネル上方のゆるみ領域（塑性領域）内の地山が落下することにより生じる地圧のことで，重力がその支配的要因となる．トンネル施工時だけでなく，供用後においても，ゆるみ領域の拡大や覆工背面に空洞が存在し地震や豪雨等で岩塊が覆工に作用する場合がある．このような荷重が作用した場合，**図-3.1.2** に示すように，天端付近の内空側に引張が生じ，開口ひび割れがみられる．

本載荷実験は，天端部直上の外力を模擬し，天端部の開口ひび割れを再現したものである．このような条件下において，CFCC（炭素繊維複合材ケーブル）の有無による変状の発生状況や，異なる CFCC を用いて比較実験を行い，最適な CFCC の径と配置を検討した．

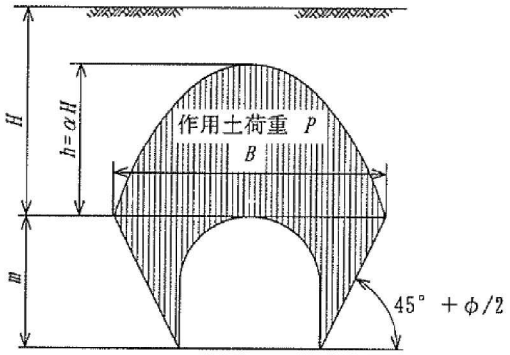


図-3.1.1　トンネルに作用するゆるみ圧の一例[3)]

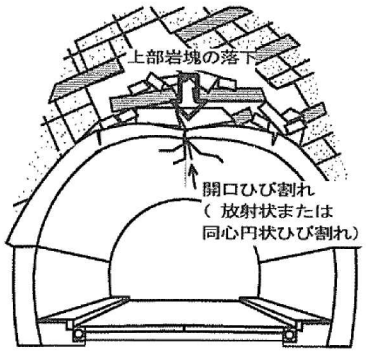


図-3.1.2　外力による代表的な変状形態模式図[3)]

3.2　実験モデル

本研究で対象としたトンネル断面は，２車線の道路トンネル（曲率半径 5m，1D=10m）を想定した．**図-3.2.1**，**写真-3.2.1** に示すように天端部の 1.5m 範囲を模擬した供試体を作製した．コンクリート供試体の寸法は，曲率半径 5m のアーチ状で，トンネル軸方向に奥行き（W）500mm×横断幅（L）1500mm×覆工厚さ（t）300mm とした．

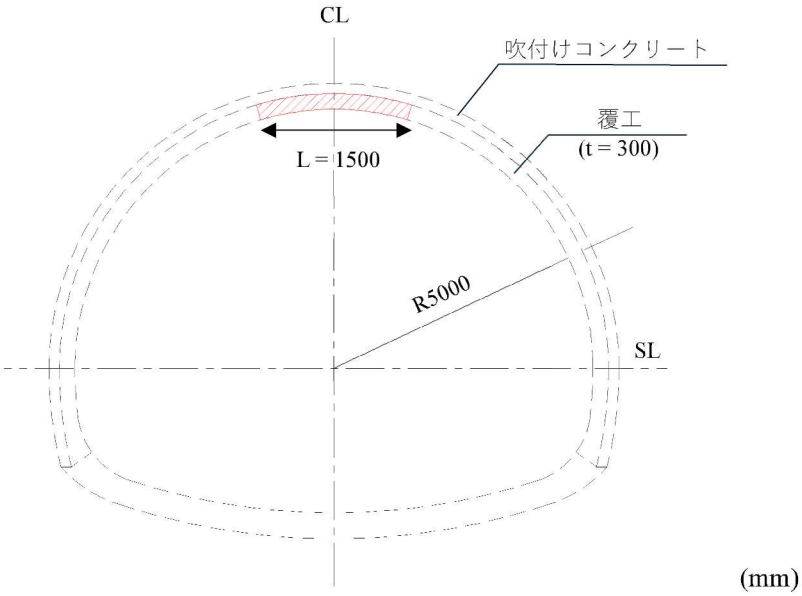


図-3.2.1　トンネル断面

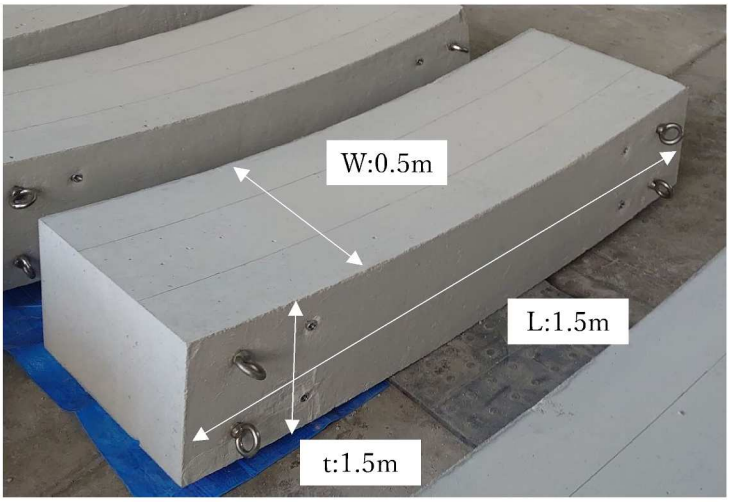


写真-3.2.1　供試体サイズ

トンネル覆工モデルには坑口部を除いた中間部で用いられる一般的な設計基準強度18N/mm^{2}のコンクリートを採用した[4)]．本研究で使用したコンクリート，早強ポリマーセメントモルタル（PCM）の圧縮強度，ヤング係数を**表-3.2.1**に示す．PCMはCFCCを埋設する充填材として用いた．

写真-3.2.2に示すCFCCについて，その材料特性を**表-3.2.2**に示す．プレストレストコンクリートの緊張材，補強筋への適用されているCFCCは，鋼材の1/5程度の密度で，同時に可撓性を有しており，トンネル覆工のようなアーチ状の構造に対して容易に埋設が可能である．

図-3.2.2の覆工補強鉄筋図の一例に示すように，一般的に横断方向にD19，縦断方向にD16が用いられるケースが多い．このため，D19相当のϕ13.0mmのCFCCを**表-3.2.3**に基づき選定した．また，断面積の小さいϕ7.2mmおよびϕ9.7mmのCFCCも実験ケースとして採用した．

なお，本研究で使用したCFCCは写真に示すようにϕ7.2mm，ϕ9.7mmは単線であり，また，ϕ13.0mmは7本のより線からなっている．

表-3.2.1　コンクリートの強度特性（材齢28日）

コンクリート（材齢28日）	圧縮強度（MPa）	Ave. 22.0 (18.9-27.1)
	曲げ強度（MPa）	Ave. 3.1 (2.5-3.6)
	ヤング係数（GPa）	Ave. 32.1 (29.8-35.2)
PCM	圧縮強度（MPa）	Ave. 28.4 (22.8-37.3)
	曲げ強度（MPa）	Ave. 5.3 (4.4-5.7)
	ヤング係数（GPa）	Ave. 18.5 (15.9-20.1)

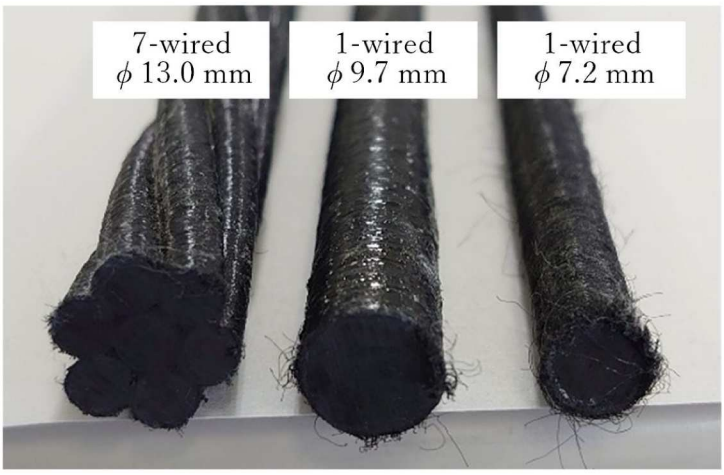


写真-3.2.2　炭素繊維複合ケーブル

表-3.2.2　CFCC の材料特性

直径（mm）	7.2	9.7	13.0
単位質量（g/m）	63	115	159
保証破断荷重（kN）	58.1	105.6	147.8
ヤング係数（GPa）	160	160	150
引張強度（GPa）	2.68	2.52	2.42

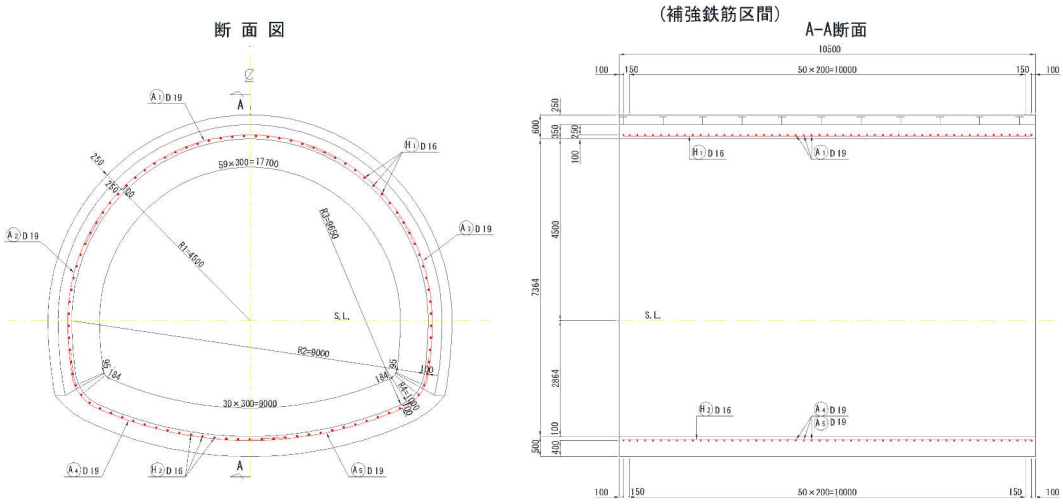


図-3.2.2　覆工補強鉄筋図の一例

表-3.2.3　鉄筋と CFCC の強度比較 [5)]

鉄筋等に用いる主要サイズと強度比較

鉄筋の許容引張荷重とCFCC-DRの許容引張荷重(0.4×保証破断荷重)の対比表

鉄筋(SD345)					CFCC-DR			CFCC-DR/鉄筋
呼び名	公称断面積 (mm²)	許容引張応力度 (N/mm²)	許容引張荷重 (kN)	単位質量 (g/m)	呼び名	許容引張荷重 (kN)	単位質量 (g/m)	重量比
D10	71.33		12.8	560	U 5.3φ	12.7	34	0.06
D13	126.7		22.8	995	U 7.2φ	23.2	62	0.06
D16	198.6		35.8	1560	U 9.7φ	42.2	112	0.07
D19	286.5	180	51.6	2250	1×7 13.0φ	59.1	159	0.07
D22	387.1		69.7	3040	1×7 15.9φ	88.7	238	0.08
D25	506.7		91.2	3980	1×7 18.4φ	118.2	317	0.08
D41	1340		241.2	10500	1×7 26.8φ	251.3	675	0.06

3.3　実験方法

天端背面から外力が作用すること想定し，載荷実験方法は安定的な実験をするため二点載荷曲げ試験とした．境界条件として，供試体両端は周方向の軸力伝達を考慮し，固定端ではなく回転支点とした．計測データは，載荷荷重，鉛直方向変位，およびコンクリートのスパン中央のひずみ（高さ方向に５か所）の計測を行った．載荷装置を**図-3.3.1** に示す．

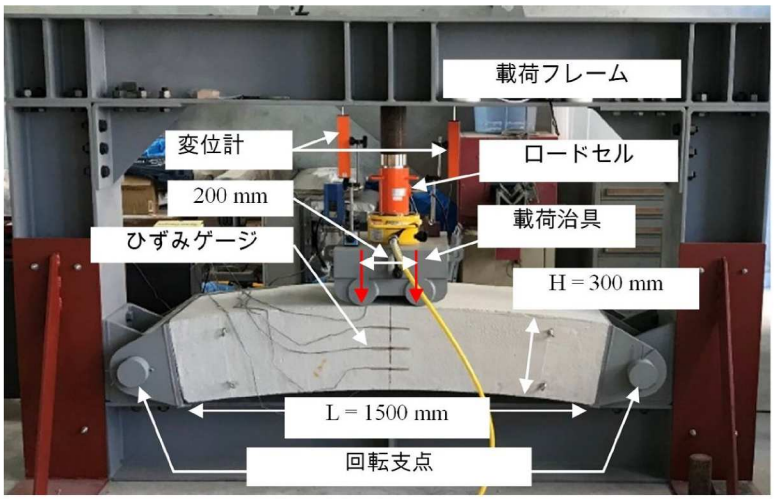


図-3.3.1　載荷装置および供試体

検討ケースは，無補強，NSM 工法を参考に CFCC を内空側表面に設けた溝に埋設したもの（ϕ7.2mm，ϕ9.7mm，ϕ13.0mm）を各２体作製した．CFCC はトンネル軸方向に対し，250mm 間隔で２本埋設し，ϕ13.0mm のみ中央に１本埋設した供試体（トンネル軸方向に対し 500mm 間隔で CFCC 埋設に相当）も作製し，計 10 体とした．

検討ケース一覧表を以下に示す．

表-3.3.1　検討ケース一覧表

No.	ケース名	CFCC	打設間隔
1	無補強	―	―
2	NSM-CFCC（1ϕ13.0）	1@ϕ13.0	500mm
3	NSM-CFCC（2ϕ13.0）	2@ϕ13.0	250mm
4	NSM-CFCC（2ϕ9.7）	2@ϕ9.7	250mm
5	NSM-CFCC（2ϕ7.2）	2@ϕ7.2	250mm

CFCC の供試体の作成手順は，既設トンネルの補強工を想定し，**写真-3.3.1** に示すように，以下のステップとした．

Step1：トンネル周方向に溝加工

Step2：CFCC を埋設

Step3：PCM にて充填

CFCC を埋設する溝加工のサイズは，幅 20mm×深さ 20mm 相当とした．写真に示すように，CFCC は可撓性を有しているため，施工時には手作業による簡易な押さえのみでアーチ構造に埋設可能であった．また，CFCC の端部の固定処理は行っていない．

写真-3.3.1　NSM-CFCC 供試体の作製状況例（CFCC：2 本，250mm 間隔）

試験体製作から載荷試験に至るまでの一連の状況を**写真-3.3.2** に示す.

a)打設状況

b)供試体養生状況

c)載荷状況

写真-3.3.2　載荷試験の様子

3.4　実験結果と考察

図-3.4.1 にケース NSM-CFCC（2φ13.0）におけるコンクリート上縁のひずみと荷重の関係図を示す．**写真-3.4.1** に最大耐荷重時（≒破壊荷重）の破壊状況の一例を示す．

載荷に伴いコンクリート上縁のひずみは圧縮が生じ，ひび割れ発生までの荷重－変位関係は，一定の傾きを示しながら弾性体的挙動を示す．64.0kN 程度まで載荷した際に，写真に示すようにトンネル内空側から上方に向かって，鉛直方向のひび割れが生じ，荷重－変位関係は，弾性域とは異なる傾きとなった．なお，鉛直ひび割れは概ね中立軸より若干上側まで到達するものの，貫通はしていない．その後，圧縮ひずみが 2000μ程度で載荷点付近のコンクリート上縁部で圧壊が生じるとともに，上縁部付近で水平ひび割れが卓越し，最大荷重 385.1kN で荷重が減少した．なお，トンネル内空側から生じる鉛直のひび割れは最大荷重時においても貫通することはなかった．

ひび割れ発生時や最大耐荷力の荷重値，グラフの傾きは異なるものの，他の供試体においてもひずみ－荷重の関係は概ね同様な傾向を示した．しかしながら，ひび割れの発生位置等は供試体によって異なっており，**写真-3.4.2** に示すように天端部付近から鉛直ひび割れが 2 か所に入るケースもあれば，供試体の前後で異なる位置にひび割れが生じたケースもあった．これは，コンクリートはバイブレーター等により均一化されているものの，アーチ状で弱部の存在しない構造物においては，骨材配置の不均一性がひび割れの進展方向や発生位置に関与しているものと考えられる．

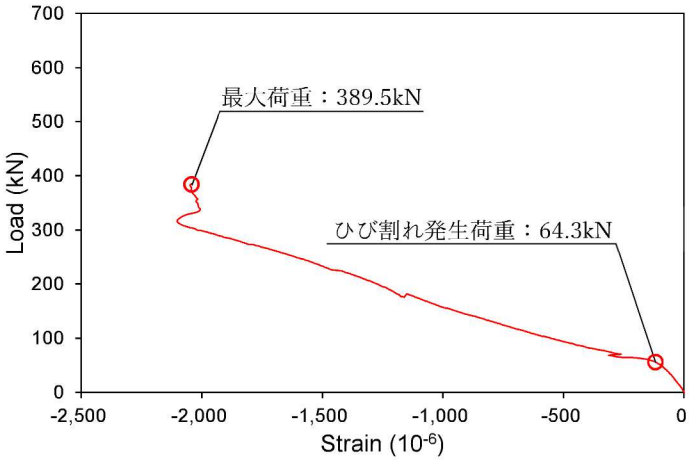
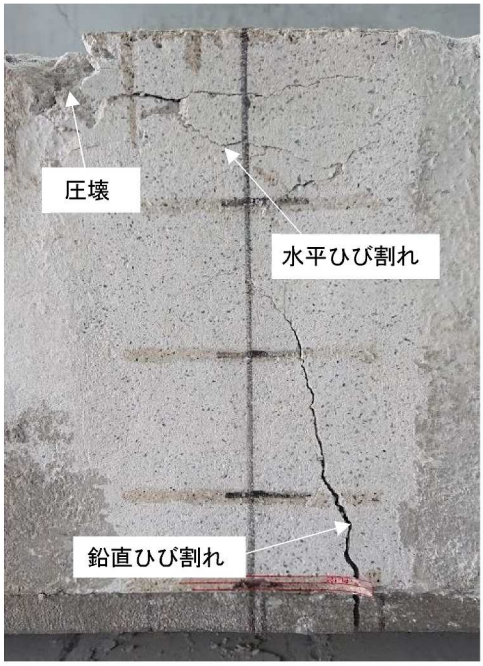


図-3.4.1　コンクリート上縁のひずみと荷重の関係（NSM-CFCC（2φ13.0））



(a)側面からみた損傷状況

(b)上縁の圧壊状況

写真-3.4.1　コンクリートの破壊状況の一例

写真-3.4.2　ひび割れ例

ケース NSM-CFCC（2φ13.0）におけるひずみの推移を**図-3.4.2** に示す．横軸はひずみを，縦軸はコンクリート内空側を 0 としたときのひずみ位置を示している．高さ 0 はコンクリート下縁を示し，高さ 300mm は上縁位置である．グラフはひび割れが生じる直前の載荷重 61.0kN までのひずみの推移を示している．

図に示すように，上縁（地山）側は圧縮を示し，下縁（内空）側は引張を示している．また，高さ 150mm 位置の供試体中央部のひずみはわずかに引張を示していることから，中立軸は供試体中央よりも上側に位置していると考えられる．先に示した鉛直ひび割れは貫通せず中立軸付近で留まるのは，中立軸よりも地山側で圧縮力が作用していることを裏付けている．

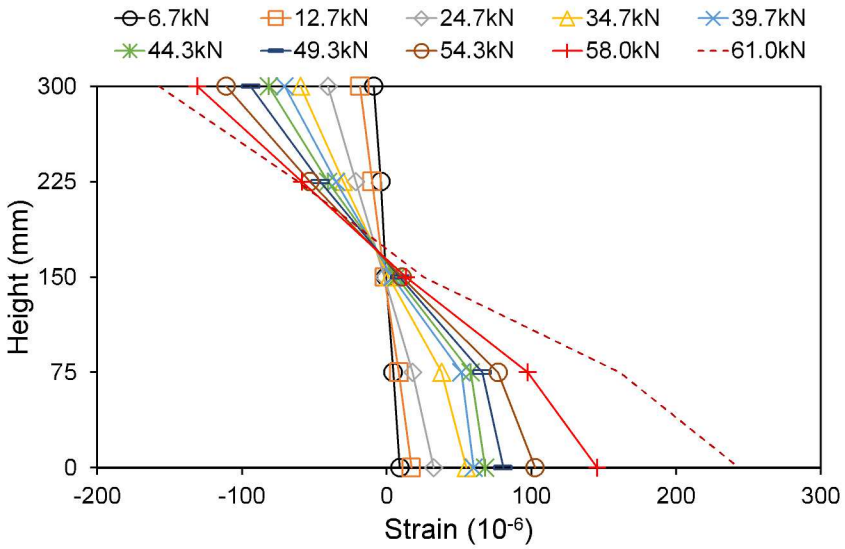


図-3.4.2　ひずみの推移（NSM-CFCC（2φ13.0））

全ケースのひび割れ発生荷重を**図-3.4.3** に示す．CFCC を埋設しない無補強の供試体におけるひび割れ発生荷重の平均値 55.3kN に対し，CFCC を 2 本埋設した供試体は 58.2～64.0kN といずれも高いひび割れ発生荷重を示した．

しかしながら，ϕ13.0mm の CFCC を 1 本埋設した供試体 NSM-CFCC（1ϕ13.0）のひび割れ発生荷重は 44.5kN に留まり，無補強に比べ低い値を示した．ϕ13.0mm の CFCC を 1 本のケースでは，**図-3.4.4** に示すように，供試体底盤部のひずみ分布が大きく異なっている．これは，CFCC を 500mm ピッチで埋設した場合，上方からの応力が供試体全体に均等に伝達されず，コンクリート内に局所的に不均衡な応力が作用した可能性が示唆される．このことから，トンネル軸方向 500mm に対し，CFCC の埋設間隔 500mm では，適切な補強効果が得られないと判断した．

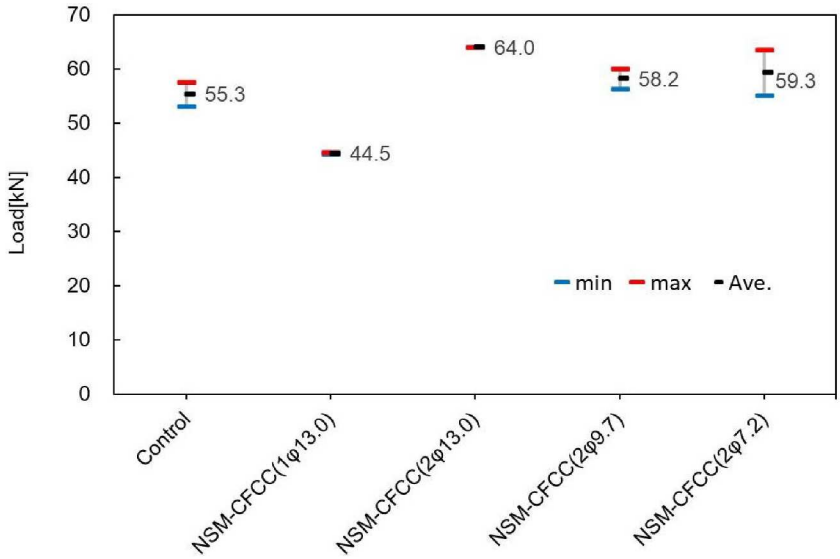


図-3.4.3　ひび割れ発生荷重

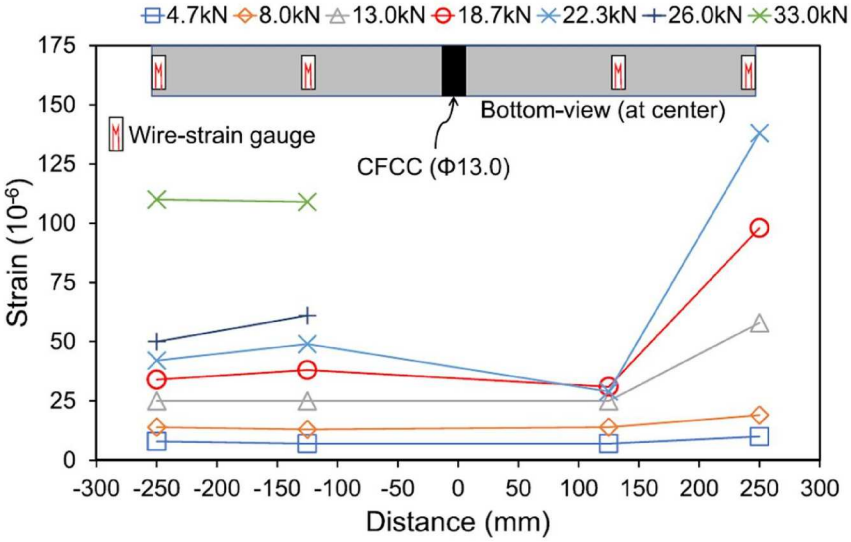


図-3.4.4　NSM-CFCC（1φ13.0）のケースにおける供試体底盤部（内空側）のひずみ推移

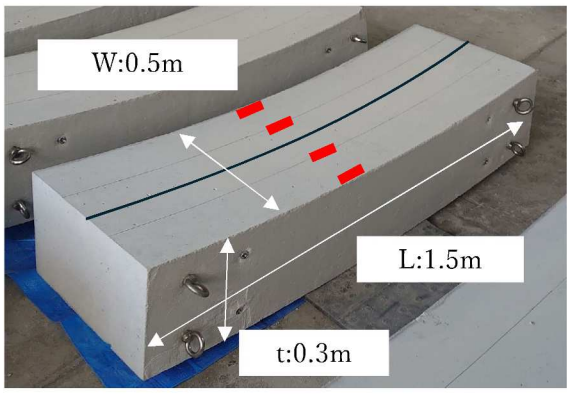


写真-3.4.3　ひずみ計測位置

全ケースの終局荷重を**図-3.4.5** に示す．φ7.2mm で補強した供試体のうち 1 体は，ひびわれ発生後～圧壊に至る過程で，**写真-3.4.4** に示すように最大 8mm 程度の端部すべりが生じた．一方，φ9.7mm・φ13.0mm の CFCC では端部すべりはみられなかった．CFCC と PCM の付着強度は両者間の摩擦抵抗性に依存しており，単線状の CFCC（φ7.2mm や φ9.7mm）では，PCM との付着面積が比較的小さくなるため，十分な付着性能を確保することが困難と考えられる．

また，φ13.0mm の CFCC を 2 本埋設補強した NSM-CFCC(2φ13.0)ケースは，図に示すように，無補強の供試体 370kN と比べ 1.2 倍となる 450kN 程度の終局荷重を示した．また，コンクリート上縁部が圧壊した際，鉛直ひび割れの最大ひび割れ幅は 10mm 程度まで拡がっていたが，徐荷後にひび割れ幅が 5mm 程度まで回復するなど，高い復元性を示した．なお，コンクリート上縁部が圧壊に至っても，いずれの径においても CFCC の破断はみられなかった．

これらの実験結果から，より線状で表面凹凸もあり付着面積の大きい φ13.0mm の CFCC を，トンネル軸線方向に対し 250mm 間隔で埋設する NSM-CFCC 補強工法が最も妥当と結論づけられる．

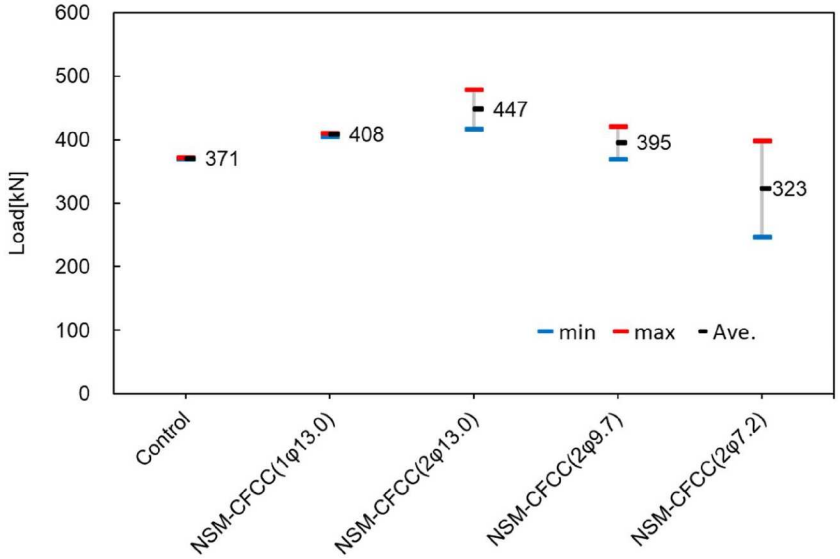


図-3.4.5　最大荷重（上縁圧壊）

写真-3.4.4　端部すべり（最大すべり量：8.4mm）

3.5　まとめ

本章では，トンネル覆工コンクリートの天端部を模擬した供試体を用いた載荷実験を通じ，NSM-CFCC 工法による補強効果を検証した．供試体は，無補強に加え，異なる径（ϕ7.2mm，ϕ9.7mm，ϕ13.0mm）の CFCC を埋設したケースを設定し，ひび割れ発生状況，耐荷力，および破壊形態について比較検討を行った．実験結果より，以下の知見が得られた．

- 無補強供試体の平均ひび割れ発生荷重が 55.3kN であったのに対し，CFCC を 2 本（250mm 間隔）埋設した供試体は 58.2～64.0kN と高いひび割れ発生荷重を示した．
- ϕ13.0mm の CFCC を 1 本（トンネル軸方向に対し 500mm 間隔）埋設した供試体ではひび割れ発生荷重が 44.5kN に留まり，500mm 間隔の埋設では十分な補強効果が得られないことが示唆された．
- 終局荷重については，NSM-CFCC(2ϕ13.0)ケースが無補強供試体の約 1.2 倍となる約 450kN を示し，最も高い耐荷力を有することが確認された．
- 載荷時において，コンクリート上縁部の圧壊が先行し終局荷重を迎えるものの，いずれの径の CFCC においても CFCC の破断は観察されなかった．
- CFCC と充填材である PCM との付着性能に関しては，ϕ7.2mmCFCC を用いた供試体の一部に最大 8mm 程度の端部すべりがみられたが，ϕ9.7mm および ϕ13.0mmCFCC ではすべりは生じなかった．少なくとも本条件下では，ϕ9.7mm 以上は必要と判断される．また，ϕ13.0mmCFCC はより線構造であり表面に凹凸を有するため，PCM との付着面積が大きくなり，良好な付着性能を確保できるため，より線構造のϕ13.0mm が望ましい．

以上の実験結果を総合的に判断すると，トンネル覆工コンクリートに対する NSM-CFCC 補強工法においては，より線状で付着性能に優れる ϕ13.0mm の CFCC を，トンネル軸線方向に 250mm 間隔で埋設する配置が最も効果的と結論付けられた．

3.6　第３章の参考文献

1) Isamu YOSHITAKE, Shingo MORIMOTO, Takashi ONISHI, and Taiga YANAGI: Load Capacity of Tunnel Lining Concrete Strengthened with Carbon-Fiber Composite Cable (CFCC), *Proceedings of ASEA-SEC-6*, STR-04, 2022.11. (doi.org/10.14455/ISEC.2022.9(2).STR-04)
2) Isamu YOSHITAKE, Shingo MORIMOTO, Shinji UENO, and Hisashi HAYASHI: Flexural Loading Test of a Tunnel Lining Concrete Model Strengthened with Carbon-Fiber Composite Cables, *Structures*, Vol.65, 106656, 2024.7. (doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106656)
3) トンネルの変状メカニズム，土木学会，pp.90-93，2004.
4) 2016 年制定トンネル標準示方書［山岳工法編］・同解説，土木学会，pp.107-108，2016.
5) CFCC-DR カタログ，カタログ No.23-12-SA，東京製綱インターナショナル

第 4 章　モデル実験の再現解析

4.1　概要

本章における数値解析は，第 3 章において示した覆工コンクリートモデルの載荷実験の再現解析を行い，載荷実験結果を精度良く表現可能な解析モデルの確立を目的とする．

第 3 章の実験により，NSM-CFCC 工法がトンネル覆工コンクリートの耐荷力向上に有効であることが実証された．特に ϕ13.0mm の CFCC を 2 本，トンネル軸線方向に対し 250mm 間隔で配置した場合に最大の補強効果が得られた．コンクリートのひび割れ発生後の挙動や補強効果を検討するため，実験結果と整合性の高い数値解析モデルが必要となる．

本解析では，非線形挙動の表現に優れる有限差分法（FDM）コードである FLAC3D ver.7[1] を用いた三次元解析を実施した．解析モデルは，第 3 章で供試体として用いられたトンネル覆工コンクリートの天端部を模擬した形状とし，実験において最も効果的であった NSM-CFCC(2@13.0)ケースを再現対象とした．モデル化にあたり，コンクリートをソリッド要素，CFCC を線形弾性ビーム要素として構築した．

数値解析における主要な課題の一つとして，コンクリートの複雑な応力－ひずみ関係，特にひび割れ発生後の引張軟化挙動の適切なモデル化である [2]．初期検討における弾性体モデルでは，実験で観察されたコンクリートのひび割れパターンや CFCC の応力状態を十分に再現することが困難と想定された．このため，本解析ではコンクリートモデルにひずみ軟化特性 [3] を導入し，引張強度超過後の応力低下を表現することで，ひび割れの発生とその後の構造挙動を模擬的に表現することを試みた．

4.2　解析条件

4.2.1　解析手法

本研究で実施した三次元数値解析には市販の FDM ソフトウェア（FLAC3D ver.7，Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions：Itasca 社製）[1] を用いた．

FLAC3D は有限差分法に基づく解析手法であり，これまでのトンネル問題における解析手法として主要であった有限要素法（FEM）と比較し，塑性化するようなモデルを表現しやすい利点があることから，トンネル分野において使用される事例が増加している [4]．

当解析において，ひび割れによる破壊を模擬する上で FEM では解が収束せず発散すること可能性があるため，塑性域の進展状況を再現できる FDM を採用した．

表-4.2.1　各種解析手法の特長 [4] 一部加筆修正

名称	手法	特徴
FEM (Finite Element Method) 有限要素法	ある領域を単純な要素に分割し，それぞれの要素の特性を方程式で表現し，全ての方程式が成り立つ解を求める方法.	物性の不連続な変形を含む非均質な構造を扱いやすい．連続体モデルであるため亀裂性岩盤など適用が難しい.
FDM (Finite Difference Method) 有限差分法	有限要素法と同様，連続体を細かく分割し，偏微分方程式を差分方程式（代数方程式）に置き換え，これを解いて近似解を求める手法.	塑性域の進展状況を把握する場合に有効. 連続体モデルであるため亀裂性岩盤など適用が難しい.
DEM (Distinct Element Method) 個別要素法	不連続な岩石ブロックの組み合わせからなる岩盤を個々のブロックから差分的に解く動的解析手法.	要素・分割・地山定数の設定が難しい. 沈下や緩みのみではなく，破壊の連続的減少を表現できる.

ジェオフロンテ研究会の資料にトンネル掘削を対象に解析を実施した国内の論文に関して，解析手法別に年度ごとの物件数の推移が掲載されている．解析手法の推移を**図-4.2.1** に示す．1991 年～1996 年までは全て有限要素法（FEM）による解析が行われていたが，その後，有限差分法（FDM）による解析手法が多くなり，半数以上は有限差分法（FDM）による解析が行われている．

本解析においても有限差分法（FDM）による解析が有効な手段と考え，実施した．

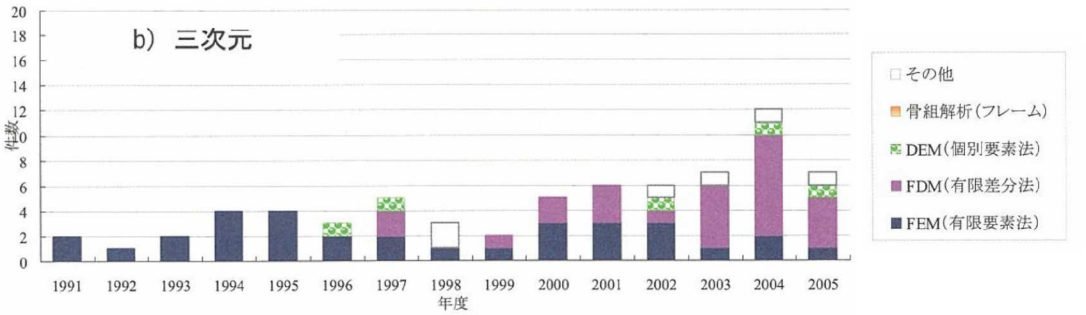


図-4.2.1　解析手法の推移 [4)]

4.2.2　解析モデル

解析モデルを**図-4.2.1** に示す．図に示すように試験体を solid 要素でモデル化した．再現解析では，載荷実験において最も高い効果が得られた NSM-CFCC(2@13.0)を対象とした．供試体の構成則は後述する．

コンクリートにはソリッド要素を，CFCC には線形弾性モデルのビーム要素を用いた．CFCC は載荷実験において破断等見られなかったため，CFCC の構成則は弾性体とした．

回転支点部は鋼材とし，境界条件は，両端の鉛直方向および水平方向を固定した．なお，回転支点部の鋼材－試験体間，および覆工コンクリート－PCM 間，CFCC－PCM 間は固定し，すべりを考慮しないものとした．載荷実験を模擬するため，実験同様に上載荷重は 2 点載荷とし，荷重を徐々に増加させた．

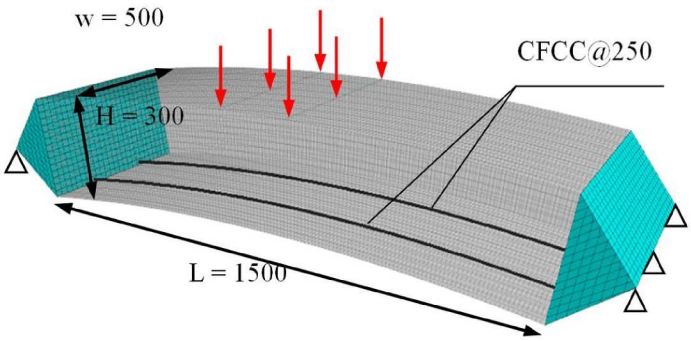


図-4.2.1　解析モデル

4.2.3　コンクリートの特性

本解析において，重要な項目の一つがコンクリート特性の再現性である．先の章で示したように，ひび割れ発生後にも CFCC の効果が発揮されるため，破壊後（塑性後）の挙動も着目可能なモデル化が必要となる．

弾性体モデルと仮定して求めた解析結果を**図-4.2.2** に示す．引張強度（2.77MPa）および圧縮強度（-22.0MPa）を超過する範囲を破壊領域と仮定し，ハッチングしている．図に示すように，中立軸より内空側に引張強度を超過する領域（破壊領域相当）が生じ，また，上縁の載荷位置周辺に圧縮強度を超過する領域（破壊領域相当）が生じている．中立軸より地山側の領域は圧縮強度・引張強度ともに超過しておらず，アーチコンクリートの一部は健全と考えられる．

しかしながら，中立軸より内空側の覆工コンクリートが引張を負担しているため，適切にモデル化しているとは言い難い．さらに，CFCC に生じる軸力は破断荷重の 6％（8.9kN/147.8kN：破断荷重）程度にすぎず，この点においても再現性が高いとは言い難い．そのため弾塑性体によるモデル化の必要性が高いと考えられる．

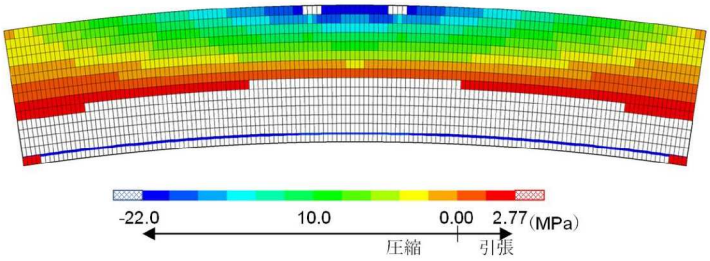


図-4.2.2　最大荷重載荷（終局耐力）時の水平方向応力分布図（弾性体）

弾性体によるひび割れ発生荷重載荷時の荷重－たわみ関係を**図-4.2.3** に示す．図に示すように，コンクリートのヤング係数は，実験で得られる一軸圧縮強度から換算した 32.1GPa で計算すると，実験データとの乖離が大きい．そこでヤング係数については，実験値から算出される値ではなく，設計上のみかけのヤング係数[5)] を採用した．

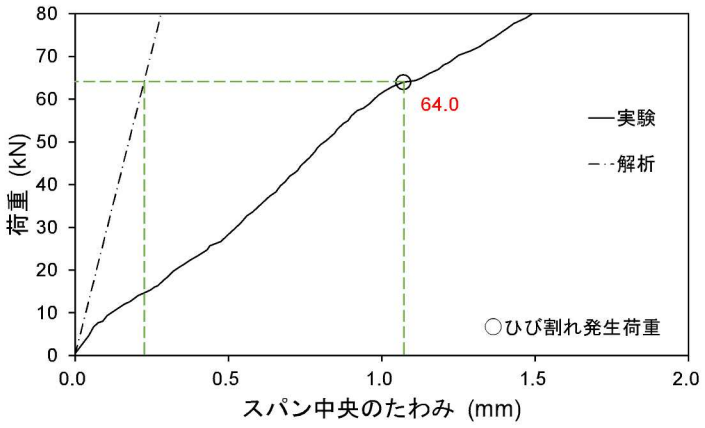


図-4.2.3　ひび割れ発生荷重載荷時の荷重-たわみ関係（弾性体）

コンクリートの構成則として，**図-4.2.4** に示すように，圧縮側は非線形とし，また，引張側はひずみ軟化モデル[6)]を用いた．なお，引張強度（1.88N/mm²：逆解析により算出）を超過すると引張軟化させるモデルとすることで，ひび割れを疑似的に表現した．そのため，引張応力が引張強度を超過し塑性化した範囲をひび割れと判断した．

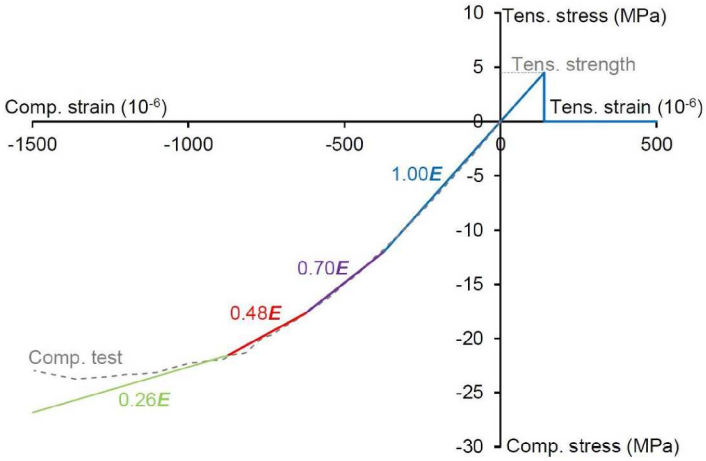


図-4.2.4　コンクリートの応力ひずみ関係[6)]

4.2.4　入力物性値

解析モデルの入力物性値を**表-4.2.2** に示す．

表-4.2.2　入力物性値

	コンクリート	PCM	CFCC φ13.0
要素	Solid	Solid	Beam
単位重量（kg/m³）	2300	2300	1370
ヤング係数（GPa）	22.0[5)]	28.0	152.0
ポアソン比	0.2	0.2	0.3
引張強度（MPa）	1.88	1.88	2420

4.3　解析結果と考察

図-4.3.1 は，載荷実験と数値解析におけるコンクリート上部のひずみを比較したものである．実験および数値解析におけるひび割れ発生荷重は，それぞれ 64.0kN, 62.8kN であり，ひび割れ発生までのひずみ挙動を概ね再現できた．

しかしながら，ひび割れ発生後においては，実験では荷重に応じてひずみが線形的に増加したが，解析では非線形挙動を示した．これは，実験では荷重増加に応じてひび割れ幅も進展するが，本研究で行った有限差分法に基づく数値解析では連続体解析のため，荷重増加に伴うひび割れ幅の拡大を再現することができず，ひび割れ発生後に生じるひずみを過小評価することが主な原因と考えられる．

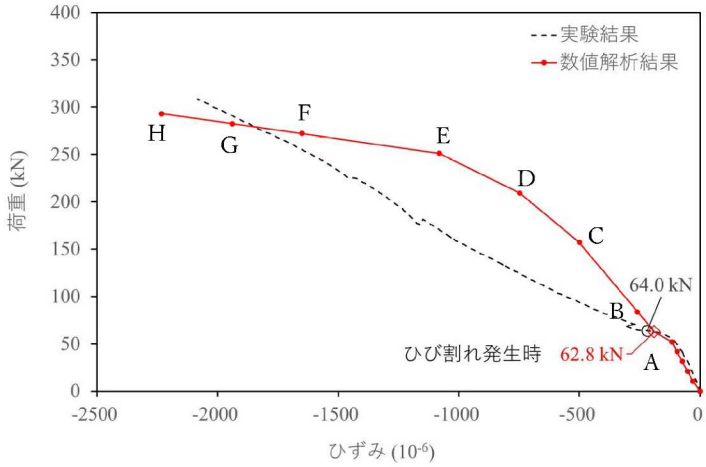


図-4.3.1　コンクリート上部における圧縮ひずみの比較

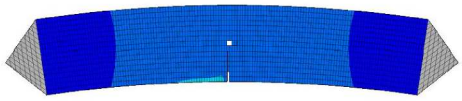
図-4.3.1 内の各点（A～H）における変位分布，変位ベクトル，ひずみ，塑性領域，主応力図を次ページ以降に示す．変位分布図，変位ベクトル図からは，F 点以降に変位量が大きくなっている．**図-4.2.4** に示す変形係数が最も小さい 0.26E での計算範囲に該当する．

この結果より，天端内空側に大きなひずみが生じている．同様に，塑性領域からは，鉛直方向のひび割れだけでなく，中立軸付近で水平方向にひびわれが生じるとともに，天端内空側に引張破壊領域が生じている．また，天端部地山側には，実験結果と同様に，圧壊が生じている．

主応力分布図からは，点 A～B 付近では大きな応力は生じていないものの，荷重が大きくなるにつれ，アーチ状に応力の伝達が窺える．また，点 C 以降では，天端内空側から生じたひび割れにより，中立軸より内空側の応力は生じにくい状況となっている．また，点 E 付近以降で，天端部地山側に一軸圧縮強度 18N/mm^2 を超える圧縮応力が生じている．

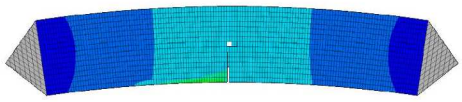
表-4.3.2　変位分布図

A）ひずみ：189.8×10^{-6}

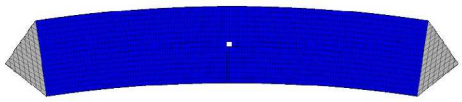


E）ひずみ：1080.8×10^{-6}

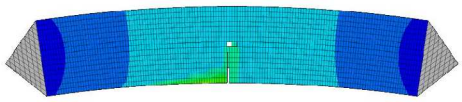
B）ひずみ：259.2×10^{-6}



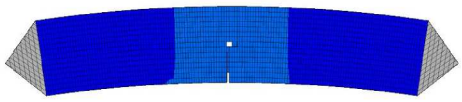
F）ひずみ：1650.0×10^{-6}



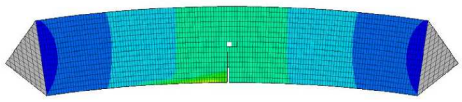
C）ひずみ：500.5×10^{-6}



G）ひずみ：1939.4×10^{-6}



D）ひずみ：747.7×10^{-6}



H）ひずみ：2231.5×10^{-6}

表-4.3.3　変位ベクトル図

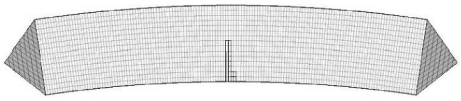
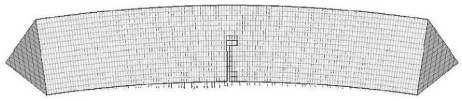
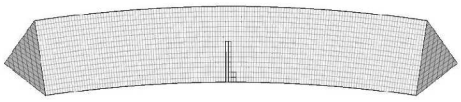
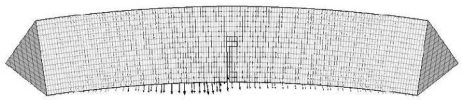
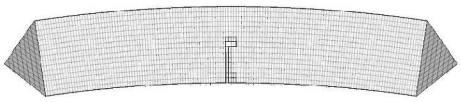
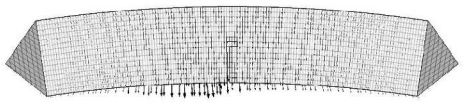
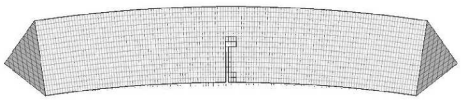
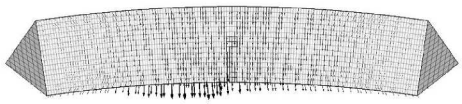
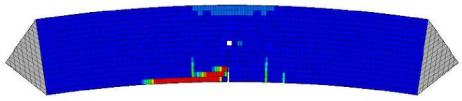
 A）ひずみ：189.8×10^{-6}	 E）ひずみ：1080.8×10^{-6}
 B）ひずみ：259.2×10^{-6}	 F）ひずみ：1650.0×10^{-6}
 C）ひずみ：500.5×10^{-6}	 G）ひずみ：1939.4×10^{-6}
 D）ひずみ：747.7×10^{-6}	 H）ひずみ：2231.5×10^{-6}

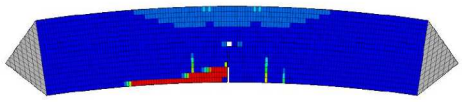
表-4.3.4　ひずみ分布図

A）ひずみ：189.8×10^{-6}

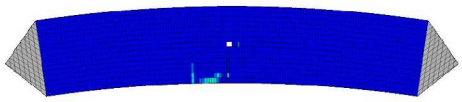


E）ひずみ：1080.8×10^{-6}

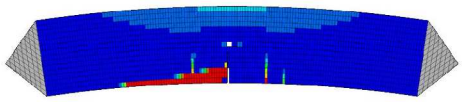
B）ひずみ：259.2×10^{-6}



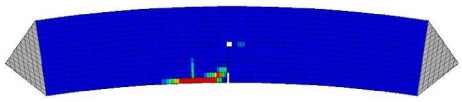
F）ひずみ：1650.0×10^{-6}



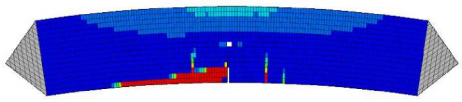
C）ひずみ：500.5×10^{-6}



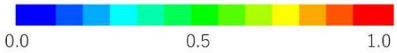
G）ひずみ：1939.4×10^{-6}



D）ひずみ：747.7×10^{-6}

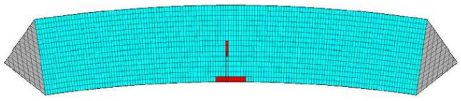
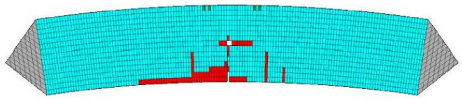
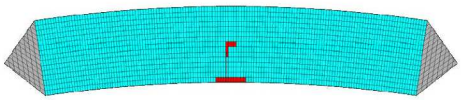
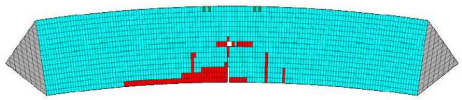
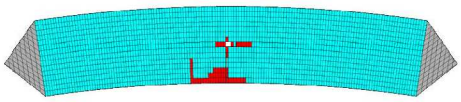
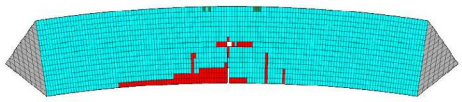
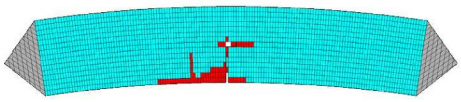
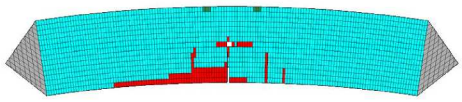


H）ひずみ：2231.5×10^{-6}



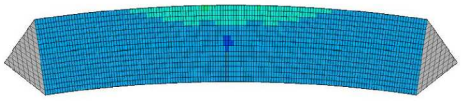
（単位：%）

表-4.3.5　塑性領域分布図

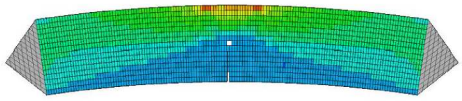
 A）ひずみ：189.8×10^{-6}	 E）ひずみ：1080.8×10^{-6}
 B）ひずみ：259.2×10^{-6}	 F）ひずみ：1650.0×10^{-6}
 C）ひずみ：500.5×10^{-6}	 G）ひずみ：1939.4×10^{-6}
 D）ひずみ：747.7×10^{-6}	 H）ひずみ：2231.5×10^{-6}

■：弾性体，　■：せん断破壊，　■：引張破壊

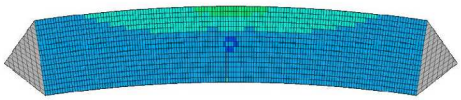
表-4.3.6　最小主応力分布図



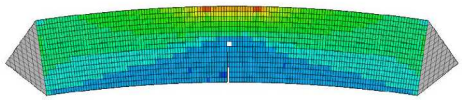
A）ひずみ：189.8×10^{-6}



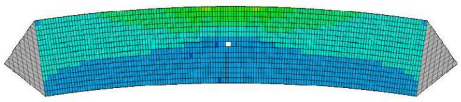
E）ひずみ：1080.8×10^{-6}



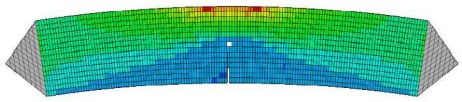
B）ひずみ：259.2×10^{-6}



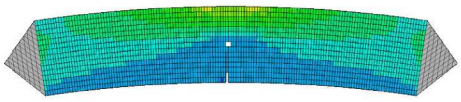
F）ひずみ：1650.0×10^{-6}



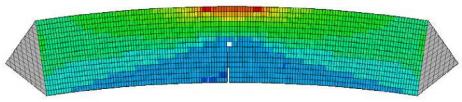
C）ひずみ：500.5×10^{-6}



G）ひずみ：1939.4×10^{-6}



D）ひずみ：747.7×10^{-6}



H）ひずみ：2231.5×10^{-6}

4.4　まとめ

本章では，第 3 章の覆工コンクリートモデル載荷実験の再現解析を行い，実験における現象を再現可能な解析モデルの構築を試みた．解析には有限差分法プログラムである FLAC3D を用い，コンクリートのひび割れ発生後の挙動を模擬するため，構成則はひずみ軟化モデルとした．本解析により得られた知見を以下に示す．

- 載荷実験と数値解析におけるひび割れ発生荷重は，それぞれ 64.0kN および 62.8kN であり，両者は良好な一致を示した．また，ひび割れ発生荷重に至るまでのコンクリート上縁部における圧縮ひずみ挙動についても，解析結果は実験結果を概ね再現することが可能であった．
- ひび割れ発生後のひずみ挙動に関しては，実験で観察された荷重増加に伴う線形的なひずみ増加に対し，解析結果は非線形的な傾向を示した．これは，連続体解析である有限差分法では，実際のひび割れ進展に伴う開口幅の拡大を十分に表現することが困難であり，ひび割れ発生後のひずみを過小評価したことが主な原因である．
- 破壊性状については，解析結果から天端部内空側に発生する引張破壊領域，中立軸付近の水平方向ひび割れ，および，天端部地山側の圧縮破壊領域が確認され，これらは実験で観察された破壊モードと整合性が高いと判断できる．
- ひび割れ発生後に天端の内空側の覆工コンクリートの応力が低下し，天端部地山側に大きな圧縮応力が発生するといった応力再配分の状況も再現できた．

以上のことから，構築した解析モデルはひび割れ発生までの線形的な挙動については精度良く再現可能である一方，ひび割れ発生後の非線形的な挙動，特にひび割れ幅の進展を伴う現象の再現には連続体モデルの限界があることが示された．本解析結果は，NSM-CFCC 補強工法における覆工コンクリートの挙動を解析的に評価する上での基礎的な知見を与えると同時に，今後の解析モデルの改良に向けた課題も明確にした．

4.5　第 4 章の参考文献

1) FLAC3D ver.7，Itasca，2019.
2) 吉田秀典，宇田圭一：圧縮荷重下におけるコンクリートの破壊領域の形成に関する一考察，構造工学論文集，Vol.50A，pp.935-942，土木学会，2004.3.
3) 森本真吾，菅原健太郎，田部美月，林久資，数値解析を用いたトンネル覆工における繊維シート接着工の適用性検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第 27 巻，pp.51-56，2022.
4) 山岳トンネルにおける三次元解析の現状と課題, ジェオフロンテ研究会, pp.14-16, 2006.
5) 【2022 年制定】コンクリート標準示方書：設計編，土木学会，p.45，2022.
6) Isamu YOSHITAKE, Shingo MORIMOTO, Shinji UENO, and Hisashi HAYASHI: Flexural Loading Test of a Tunnel Lining Concrete Model Strengthened with Carbon-Fiber Composite Cables, *Structures*, Vol.65, 106656, 2024.

第 5 章　トンネル覆工の数値解析

5.1　概要

第 3 章で示した NSM-CFCC 補強によるトンネル覆工コンクリートモデルの載荷実験より，ϕ13.0mm の CFCC をトンネル軸線方向に対し 250mm 間隔で配置した場合に，ひび割れ発生後の顕著な耐荷力向上効果を実験的に確認した．続く第 4 章では，載荷実験結果を有限差分法（FDM）コードに基づく FLAC3D を用いた三次元数値解析により再現した．実験結果を比較的精度良く表現可能な解析モデルの構築と，コンクリートのひび割れ発生後の引張挙動を模擬するための構成則や入力物性値の同定を行った．その結果，構築した解析モデルは，ひび割れ発生までの挙動については高い再現性を示し，ひび割れ発生後においても進展挙動の概ね再現できるようになった．これらを通じて NSM-CFCC 補強工法の効果を解析的に評価する上での基礎的な知見を得ることができた．

本章では，これらの実験および再現解析を通じて得られた知見と解析手法を基に，実スケールのトンネル覆工コンクリートモデルについてシミュレーションを実施した．実際のトンネルで想定される複雑な荷重条件下における NSM-CFCC 補強工法の有効性を明らかにすることを目的とする．

まず，実スケールモデルへの展開に際して計算効率と解析精度を両立させるためのメッシュサイズの検討を行う（5.2 節）．次に，実スケールモデルを用いてトンネル全周に作用する塑性圧を模擬した外力条件下での覆工コンクリートの挙動を解析し，CFCC 補強の有無による影響を比較検討する（5.3 節）．さらに，トンネル天端部などに局所的な地山のゆるみによる鉛直荷重が作用する場合を想定した解析を行い，現実的な条件下での補強効果を検証する（5.4 節）．

これらの段階的な数値解析を通じ，NSM-CFCC 工法が山岳トンネルの覆工コンクリートの安全性向上に寄与する可能性を評価する．

5.2　メッシュサイズの検討

実スケールに展開した際，メッシュ数の増加に伴う計算時間の増大が懸念された．そのため，実スケールでの計算用に最適なメッシュサイズの検討を行った．

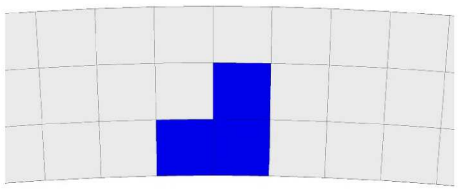
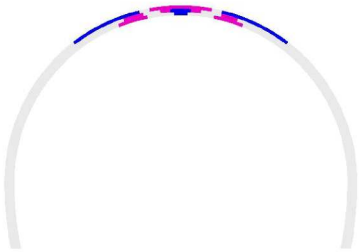
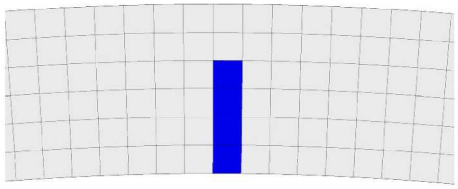
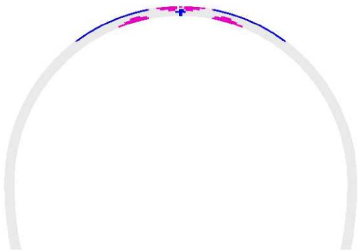
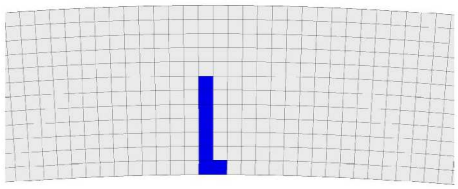
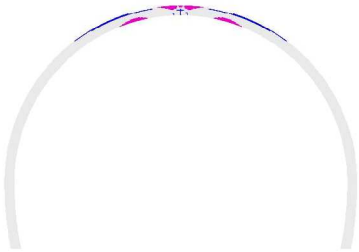
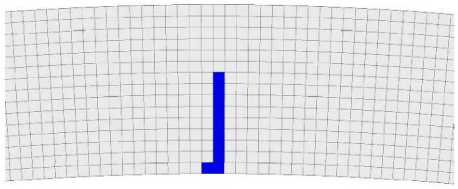
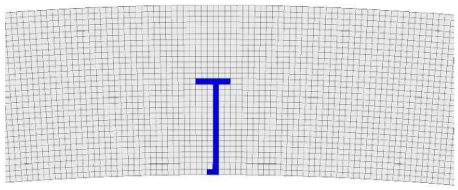
表-5.2.1 に示すように，メッシュサイズを 5 パターン用意し，実験と同一の物性・荷重条件による載荷解析を実施した．天端部におけるひび割れの発生状況等を考慮し，最も適切なメッシュサイズを設定した．

徐々に上載荷重を大きくすると，5 パターンともに，内空側の天端から地山側に向けて引張破壊を生じた．10mm のメッシュサイズのみ，鉛直方向のひび割れから水平方向のひび割れが生じた．また，ひび割れ発生時の荷重は，240～424kN とばらつきがあるものの，概ねオーダーは一致している．

また，崩壊時まで載荷したところ，10mm のメッシュサイズを除き，2,200～2,544kN の荷重時に解が発散傾向を示した．10mm のメッシュサイズは，変形が大きくなり，塑性化領域の拡大傾向は確認されたものの，数値解が発散する状態には至らなかったため，解析を終了した．

100mm のメッシュサイズでは，ひび割れ発生時の荷重が他のケースと比べ大きく，また，メッシュサイズが高さ方向に 3 分割しかないため，覆工コンクリートの破壊形態の把握には適さないと判断した．20mm から 50mm のメッシュサイズは概ね同程度の荷重であり，破壊傾向を示したため，計算時間を考慮し，最も大きい 50mm のメッシュサイズで検討を行うこととした．

表-5.2.1　メッシュサイズの比較

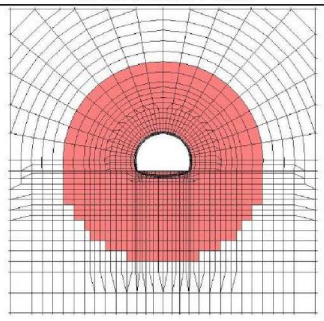
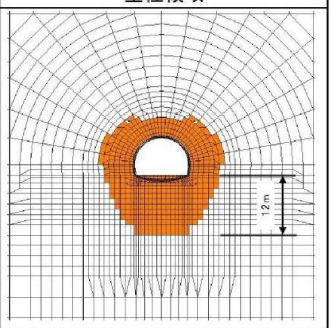
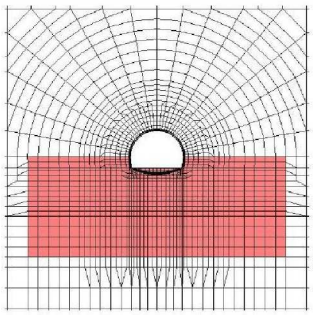
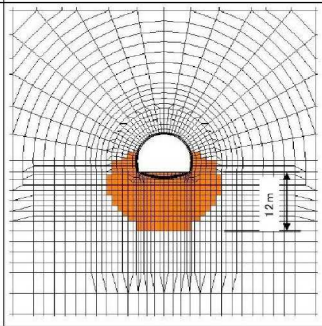
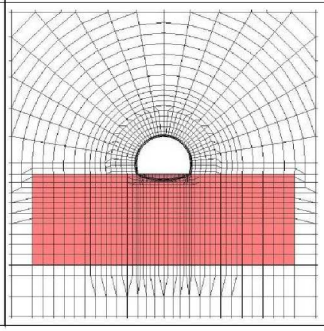
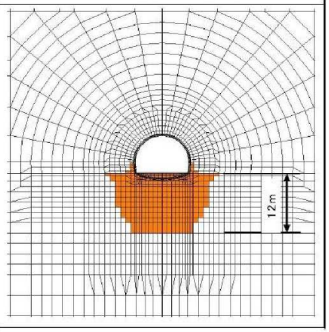
サイズ	ひび割れ発生時	崩壊時
100mm	 424kN(2N/mm²×106mm/m×2line)	 2544kN(12N/mm²×106mm/m×2line)
50mm	 318kN(3N/mm²×53mm/m×2line)	 2332kN(22N/mm²×53mm/m×2line)
25mm	 260kN(5N/mm²×26mm/m×2line)	 2288kN(44N/mm²×26mm/m×2line)
20mm	 240kN(6N/mm²×20mm/m×2line)	 2200kN(55N/mm²×20mm/m×2line)
10mm	 242kN(11N/mm²×11mm/m×2line)	 -kN(-N/mm²×11mm/m×2line) continue...

：弾性体,　■：せん断破壊,　■：引張破壊

5.3　塑性圧を考慮した外力に対する効果検証

変状が生じたトンネルを対象とした変状対策の設計検討に数値解析が実施される場合がある．現状の再現解析を経て，将来予測，対策工の効果検討を行われる場合が多い．その際に，下表に示すように，トンネル周辺地山の強度を低下させトンネル構造物に塑性圧（荷重）が作用するような解析がしばしば行われる．本検討では，覆工コンクリートに最も荷重が作用すると考えられるケース１相当の荷重を載荷させた．

表-5.3.1　塑性圧の例 [1)]

ケース	地山の強度低下領域	塑性領域
1		
2		
3		

5.3.1　解析条件

解析モデルを**図-5.3.1** に示す．本解析で対象とするのは，トンネル全周から塑性圧を受ける脆弱な地山に建設されたトンネルである．この条件下ではインバートによる構造安定性の確保が前提となるため，解析モデルにおいてもインバートは閉合しているとし，覆工コンクリート下端部を固定境界とした．作用させる荷重は，トンネル径 1D（D=10m）に相当する周辺地山からの塑性圧とし，覆工コンクリートに等分布載荷した．

覆工コンクリートは標準部とし，覆工厚 300mm の無筋構造とした．また，覆工コンクリート自身の挙動に着目するため，仮設と考えられている一次支保のモデル化は行わない．覆工コンクリートの物性値は，前述の載荷実験の再現解析の入力値と同様とした．

解析ステップは，

STEP1：トンネル覆工打設を再現

STEP2：覆工コンクリートに塑性圧を徐々に載荷する

という手順とした．

検討ケースは，CFCC 補強の有無の 2 ケースとし，採用した CFCC は実験結果を考慮して，ϕ13.0mm とし，その埋設間隔はトンネル軸線方向に対し 0.25m（250mm）ピッチとした．なお，CFCC の埋設範囲は天端を中心に 120°とした．

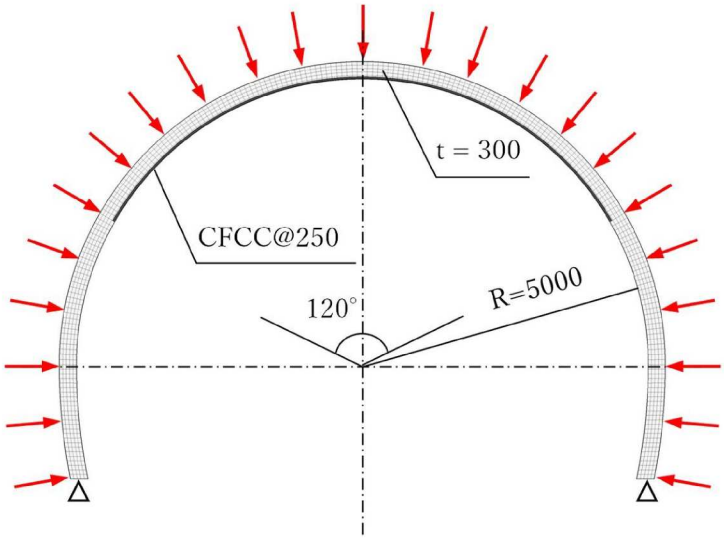


図-5.3.1　周辺地山からの塑性圧のモデル化（単位：mm）

5.3.2　解析結果

解析結果を**図-5.3.2** および**図-5.3.3** に示す．全周から荷重載荷しているため，鉛直方向より水平方向の外圧が大きくなり，天端部の圧縮応力が大きくなっている．また，天端部がわずかに上向きに挙動するものの，トンネル周辺からの塑性圧により覆工全体には引張応力が作用することなく，周方向の圧縮力が作用している．そのため，作用する引張力によるひび割れも生じず，主に引張力を負担する CFCC による補強効果は確認できなかった．

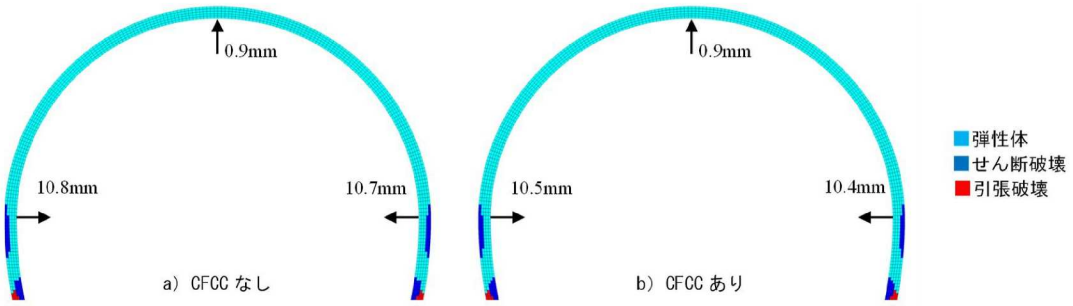


図-5.3.2　破壊状況と坑内変位

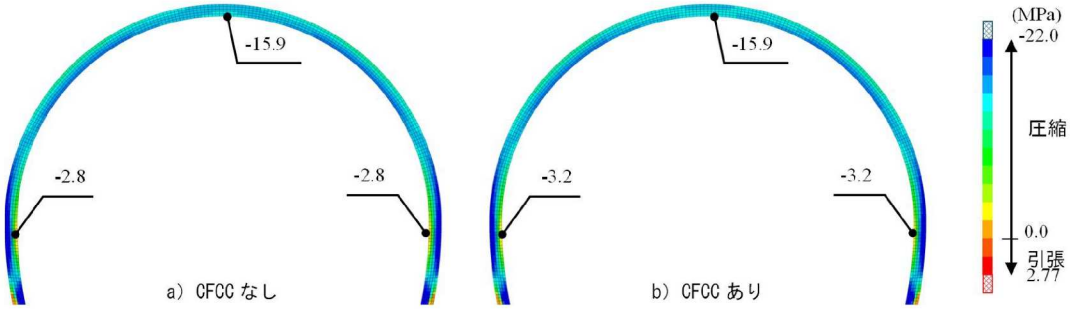


図-5.3.3　最大主応力分布図

健全なトンネル覆工に理想的に均等に外力が作用するような状況下では，NSM-CFCC 補強することなく，トンネル覆工に求められる要求性能を満足できる．そこで以降では，天端部や側壁などに局所的に荷重が作用すると想定されるケースについて数値シミュレーションを行った．

表-5.3.2　変位分布図

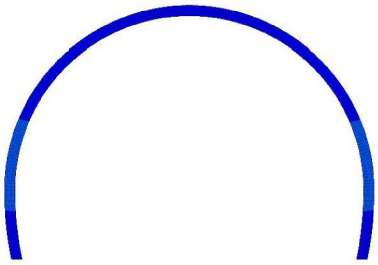
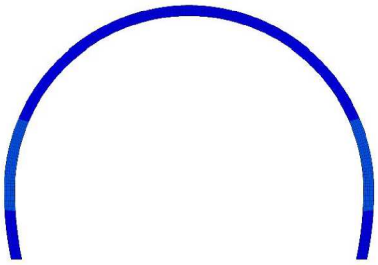
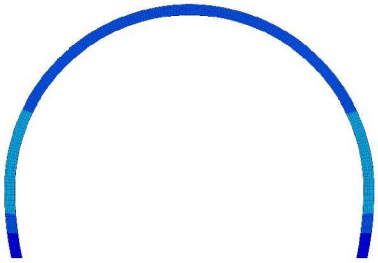
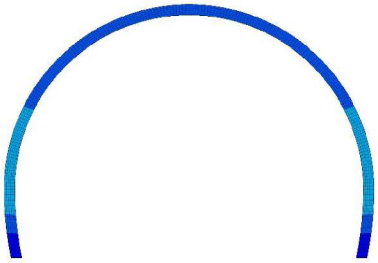
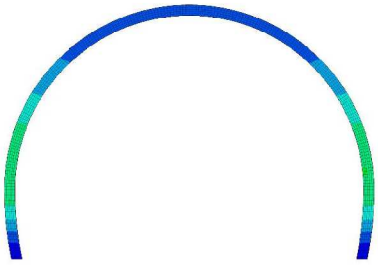
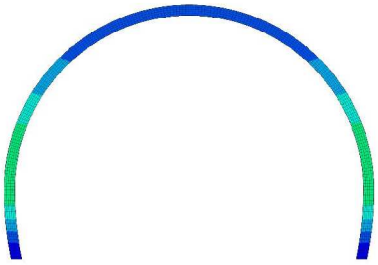
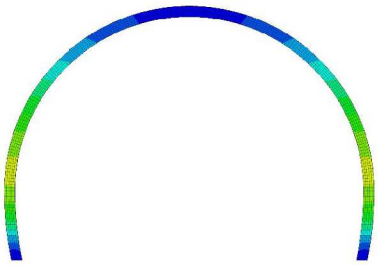
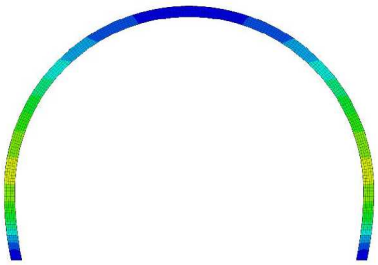
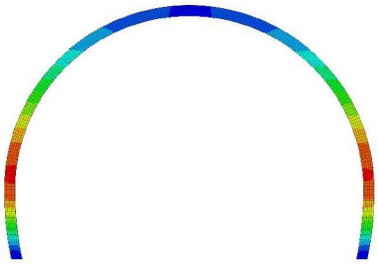
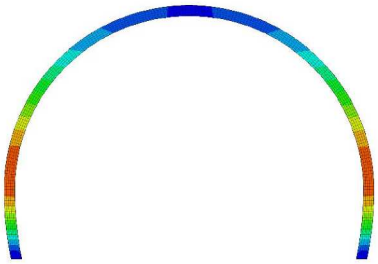
	CFCC なし	CFCC あり
Step2-1		
Step2-2		
Step2-3		
Step2-4		
Step2-5		

表-5.3.3　変位ベクトル図

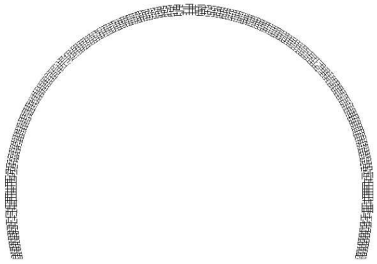
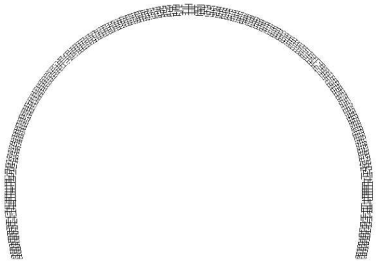
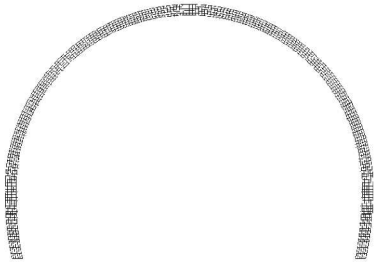
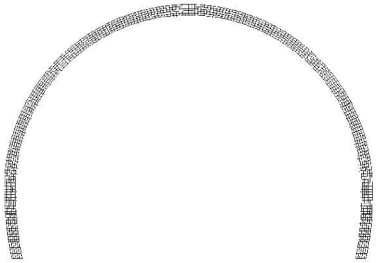
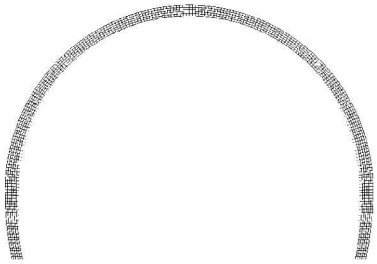
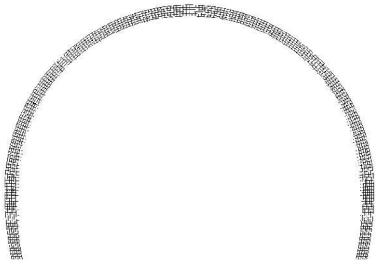
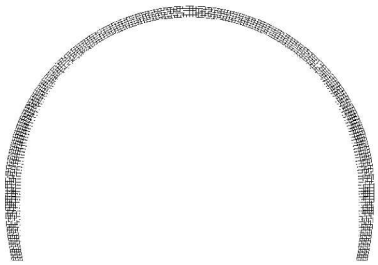
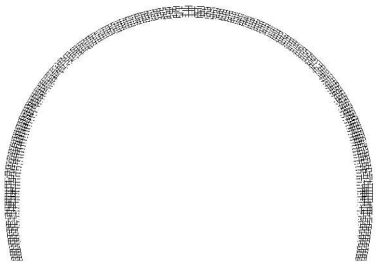
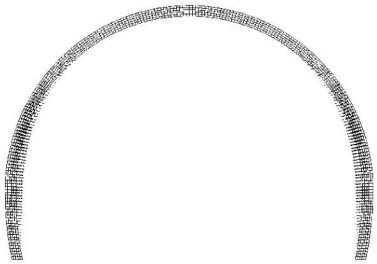
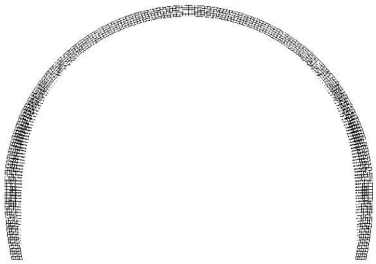
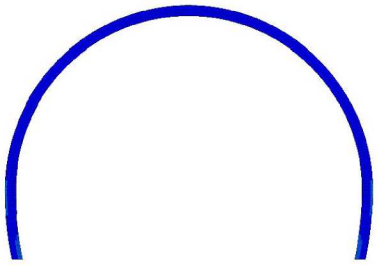
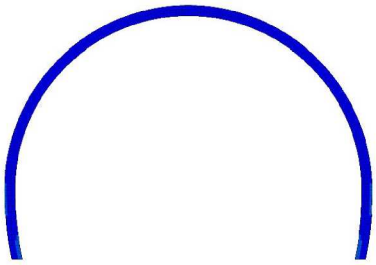
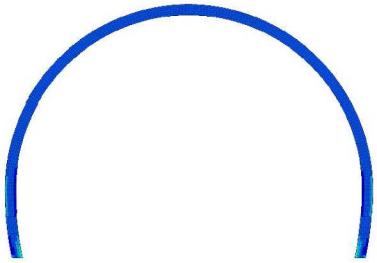
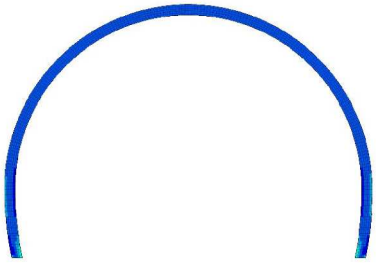
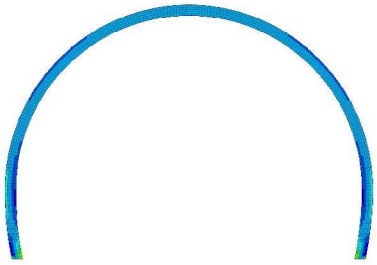
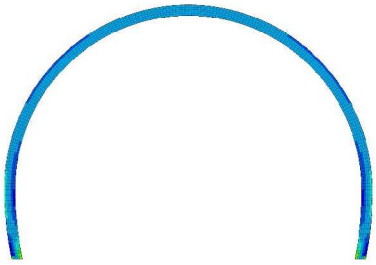
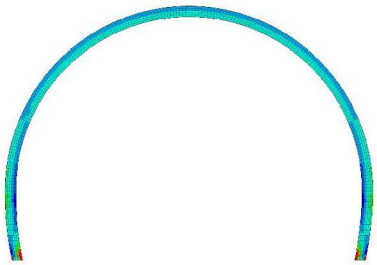
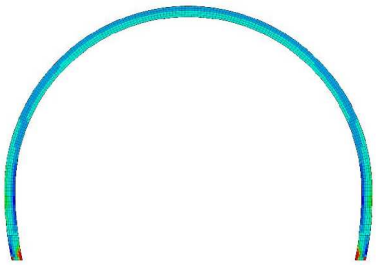
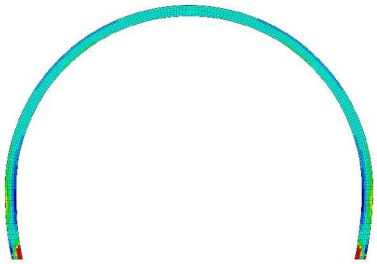
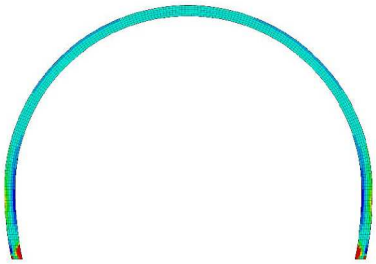
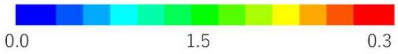
	CFCC なし	CFCC あり
Step2-1		
Step2-2		
Step2-3		
Step2-4		
Step2-5		

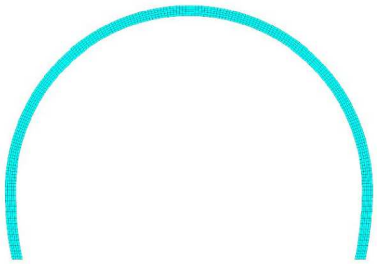
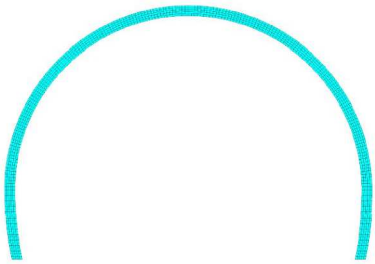
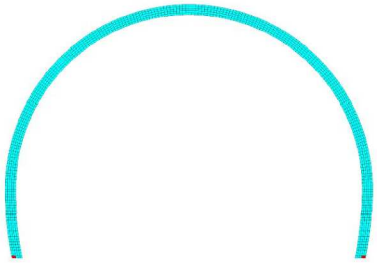
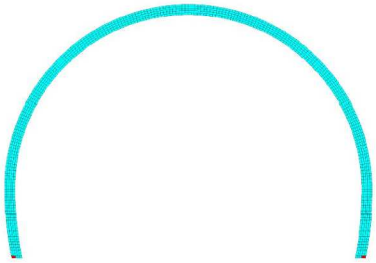
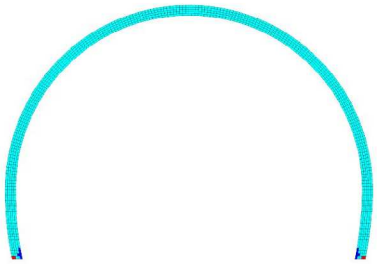
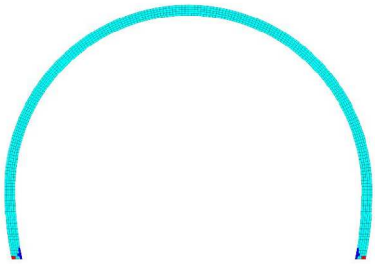
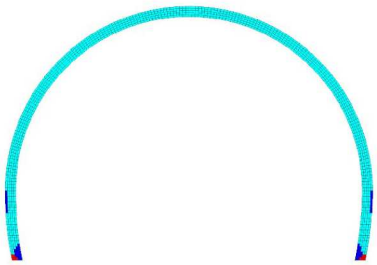
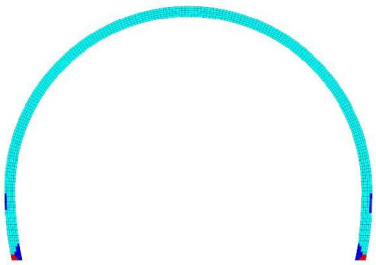
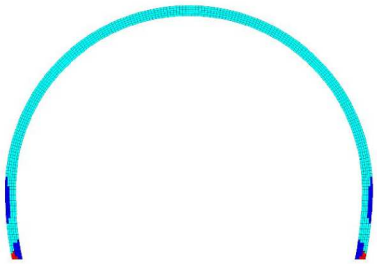
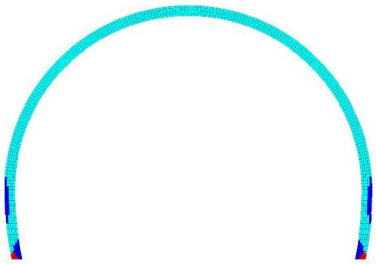
表-5.3.4　ひずみ分布図

	CFCC なし	CFCC あり
Step2-1		
Step2-2		
Step2-3		
Step2-4		
Step2-5		



（単位：%）

表-5.3.5　塑性領域分布図

	CFCC なし	CFCC あり
Step2-1		
Step2-2		
Step2-3		
Step2-4		
Step2-5		

■：弾性体，　■：せん断破壊，　■：引張破壊

表-5.3.6　最小主応力分布図

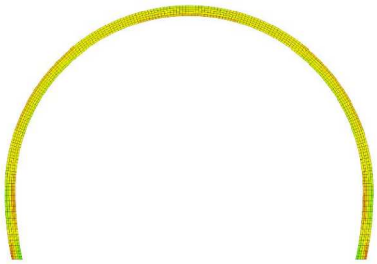
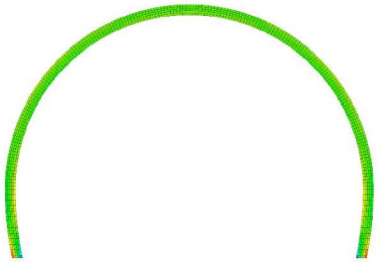
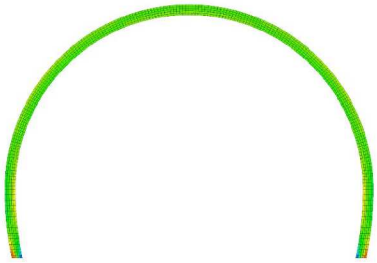
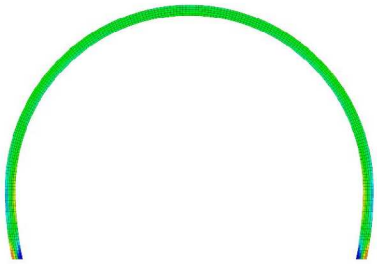
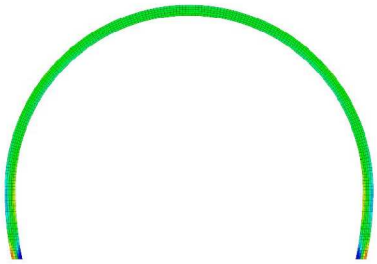
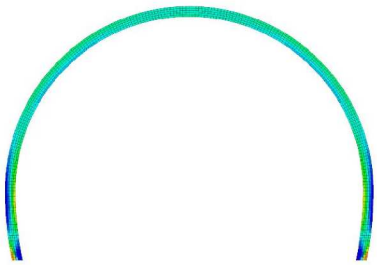
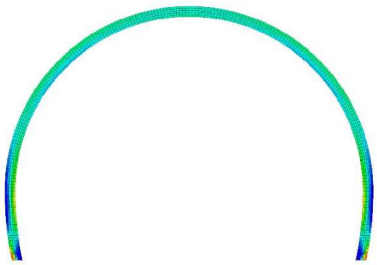
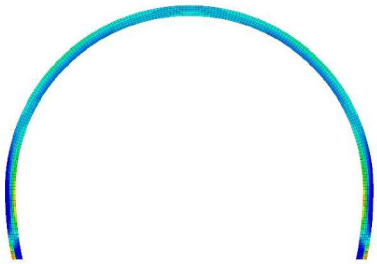
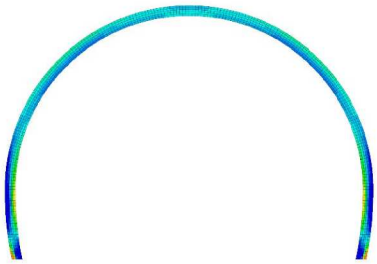
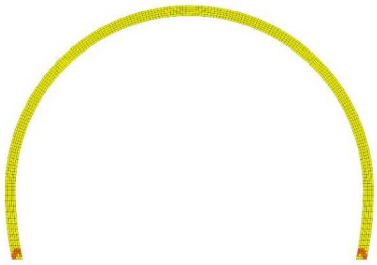
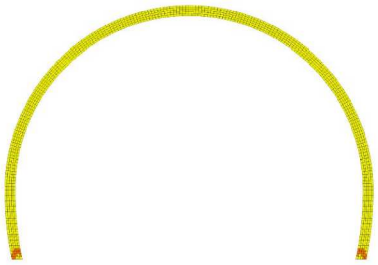
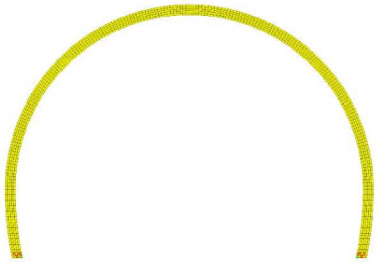
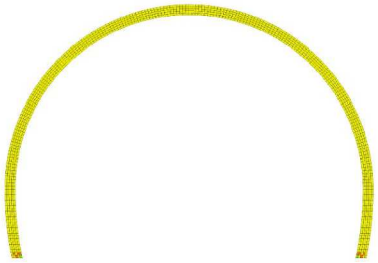
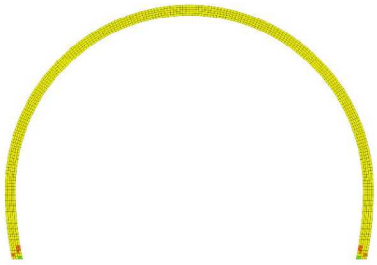
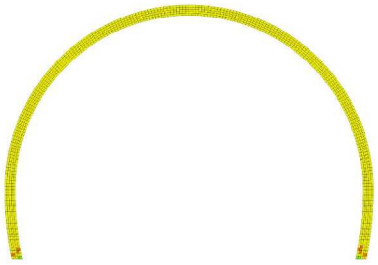
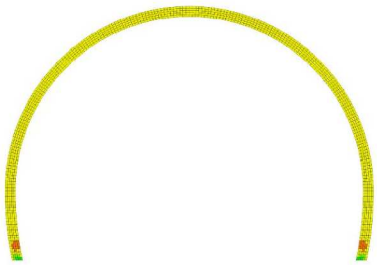
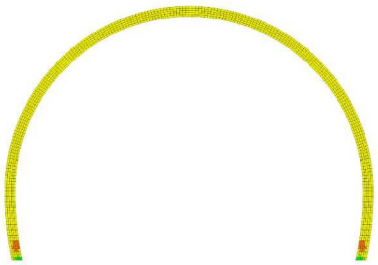
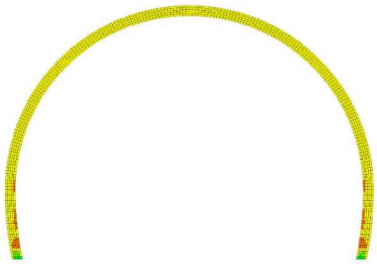
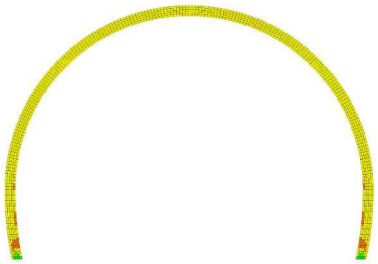
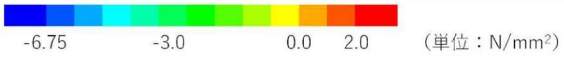
	CFCC なし	CFCC あり
Step2-1		
Step2-2		
Step2-3		
Step2-4		
Step2-5		

表-5.3.7　最大主応力分布図

	CFCC なし	CFCC あり
Step2-1		
Step2-2		
Step2-3		
Step2-4		
Step2-5		



5.4　局所的な地山のゆるみ荷重に対する効果検証

ここでは，トンネル施工時にトンネル周辺地山の不連続面が開口し，上部からトンネル構造に荷重として作用する場合を想定した．図に示すように，地山のゆるみによる鉛直圧が作用する場合には，覆工天端部分に縦断方向のひび割れが発生する．

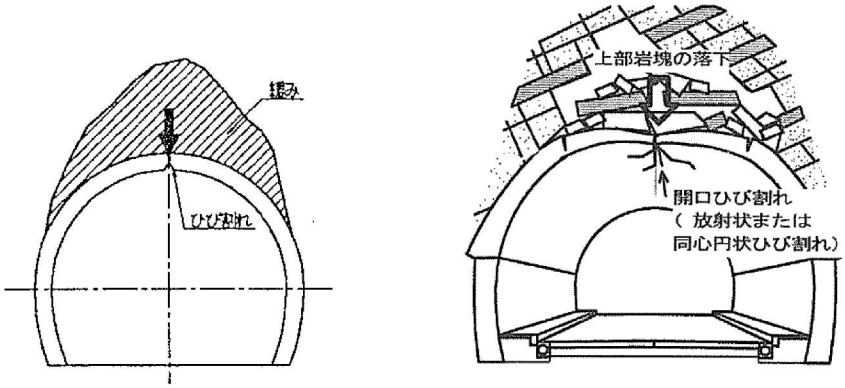


図-5.4.1　ゆるみによる鉛直圧の例 [2), 3)]

5.4.1　解析条件

覆工コンクリートおよび CFCC については**図-5.4.2** と同一モデルを使用した．図に示すように，天端部に局所的に鉛直圧が作用するモデルとした．なお，覆工背面の地山の地盤反力を考慮し，地盤反力についてはバネによるモデル化を行った．地盤ばねは圧縮方向のみに作用するものとし，覆工が内空側に変形する挙動の範囲については，影響しないものと仮定した．

解析ステップは，5.3 節と同様に STEP1 でトンネル覆工打設を再現した後，STEP2 で覆工コンクリートに鉛直荷重を徐々に増加させる手順とした．

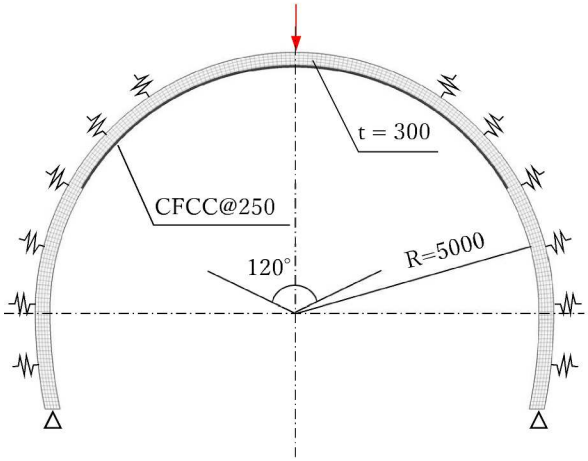


図-5.4.2　ゆるみによる鉛直圧のモデル化 [7)]

5.4.2　解析結果

解析結果を**図-5.4.3** および**図-5.4.4** に示す．CFCC なしのケースでは 9.5kN 載荷した際に，天端部に貫通ひび割れが生じ，CFCC ありのケースにおいては，10kN 載荷した際に天端部に貫通ひび割れが生じた．ひび割れ発生荷重は，CFCC の有無による差異は小さく，また，坑内変位も 1mm 程度の抑制効果にとどまっていた．

CFCC ありのケースでは，無補強ケースの約 3 倍に相当する 30kN を超える鉛直圧が作用した時に崩壊形態となった．CFCC に発生する引張力は，保証破断荷重の 21%（≒31.1kN/147.8kN）程度であった．

無補強モデル（CFCC なし）における最大主応力分布をみると，先に示した塑性圧の解析ケースと比べ，天端部における主応力は，ほぼ 0MPa 近傍の圧縮応力（軸力）であった．このように局所的に荷重が作用するケースにおいては，上部からの荷重が天端から覆工脚部まで軸力が伝達しておらず，アーチ効果はほとんど期待できないことがわかる．一方，局所的に内空側に覆工が変形するようなモードにおいても，NSM-CFCC 補強したモデルでは，最大主応力は 2.2～2.5MPa（圧縮応力）を示し，アーチ効果による軸力伝達が認められる．これらの解析結果から，トンネル天端近傍に対する NSM-CFCC 補強効果が確認された．

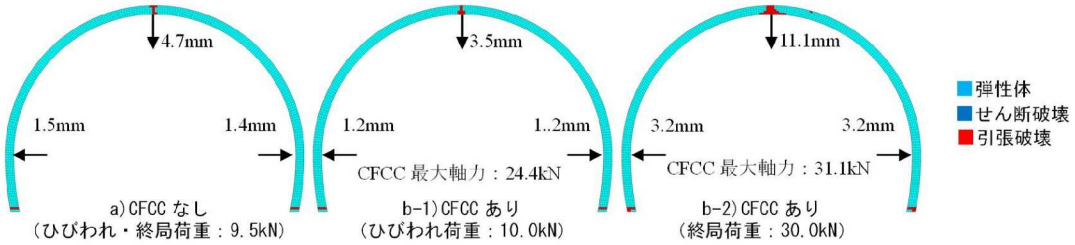


図-5.4.3　破壊状況と坑内変位

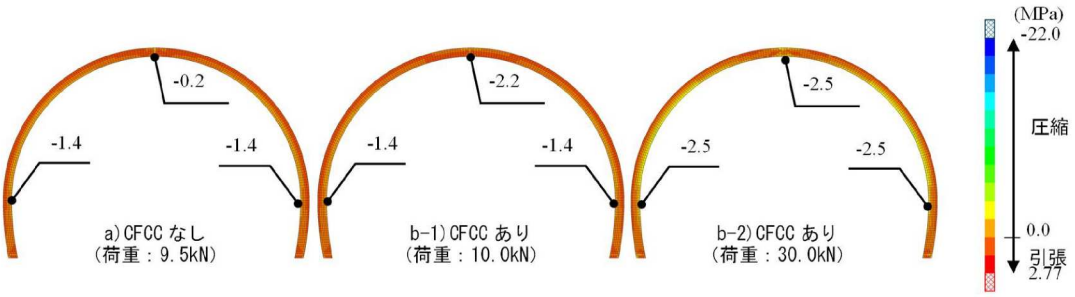


図-5.4.4　最大主応力分布（圧縮応力）

表-5.4.1　変位分布図

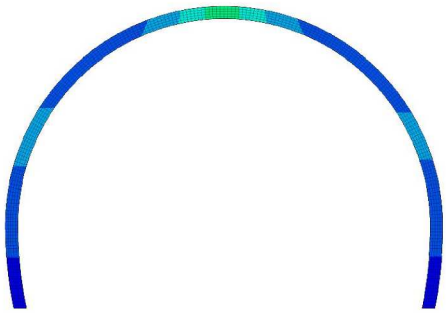
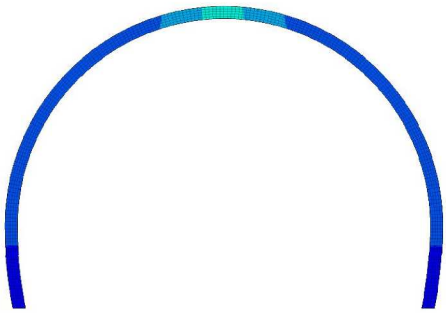
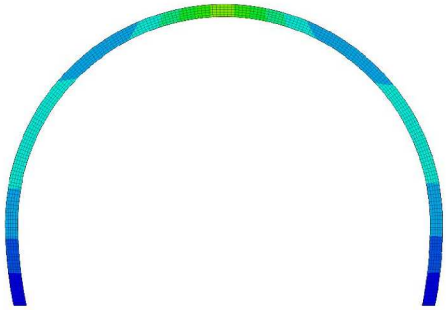
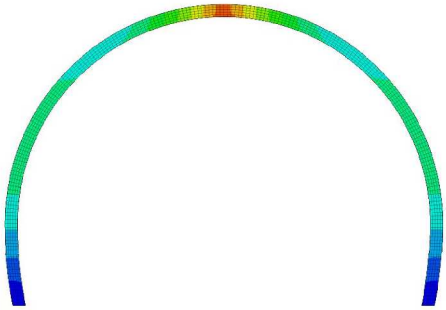
	CFCC なし	CFCC あり
ひび割れ発生荷重		
終局荷重		

表-5.4.2　変位ベクトル図

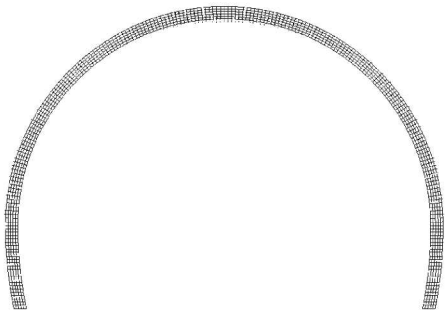
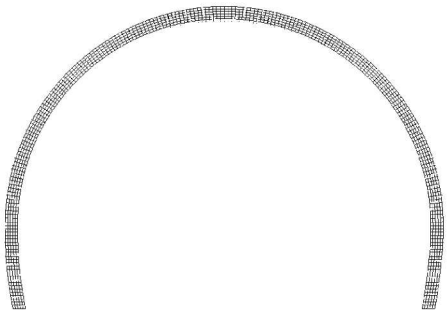
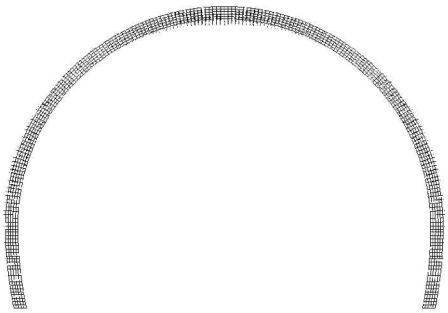
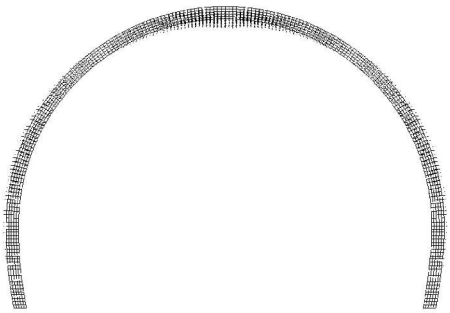
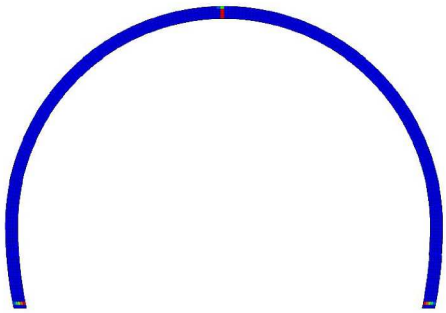
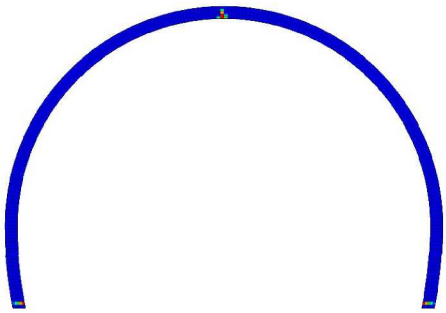
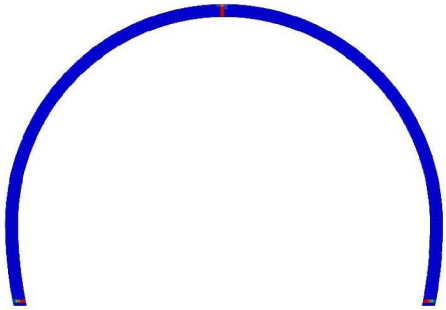
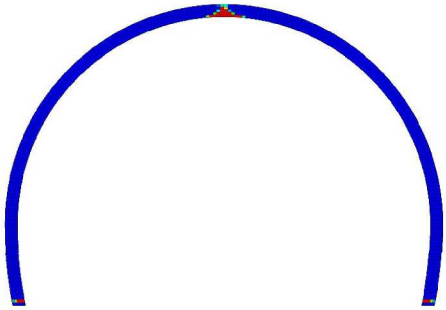
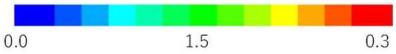
	CFCC なし	CFCC あり
ひび割れ発生荷重		
終局荷重		

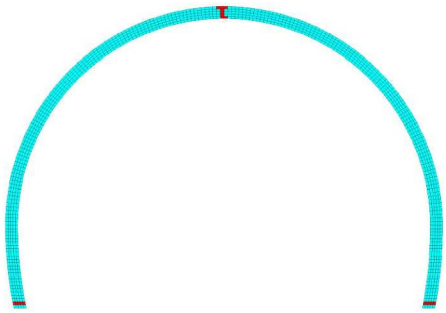
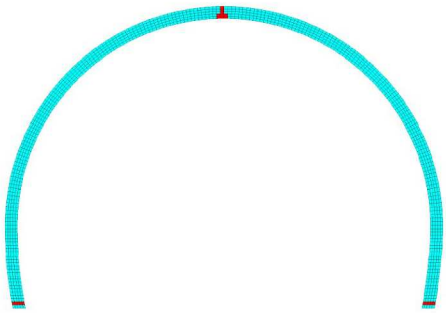
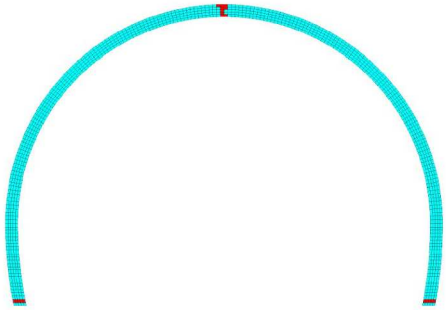
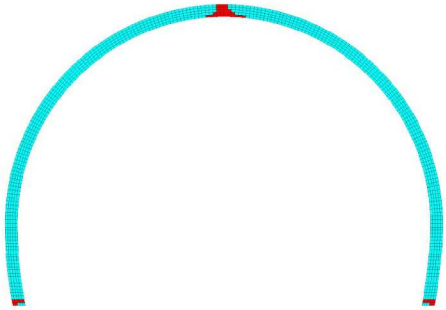
表-5.3.1　ひずみ分布図

	CFCC なし	CFCC あり
ひび割れ発生荷重		
終局荷重		



（単位：%）

表-5.3.1　塑性領域分布図

	CFCC なし	CFCC あり
ひび割れ発生荷重		
終局荷重		

■：弾性体，　■：せん断破壊，　■：引張破壊

表-5.3.1　最小主応力分布図

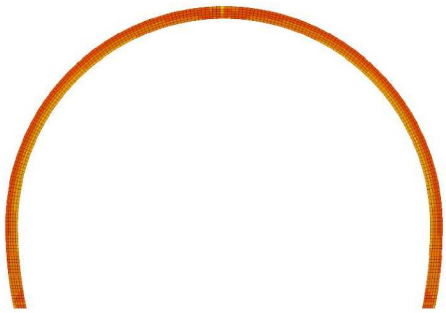
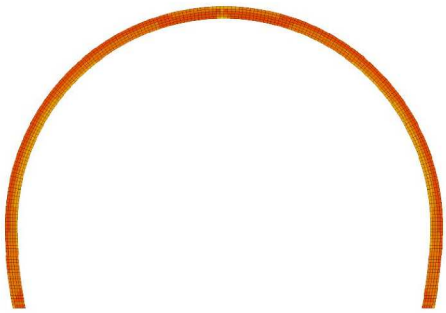
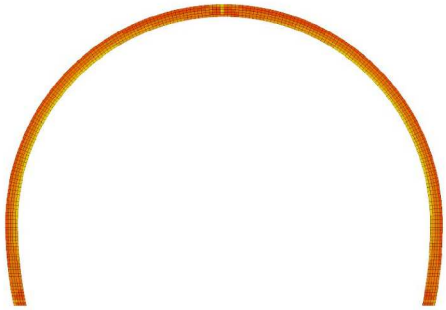
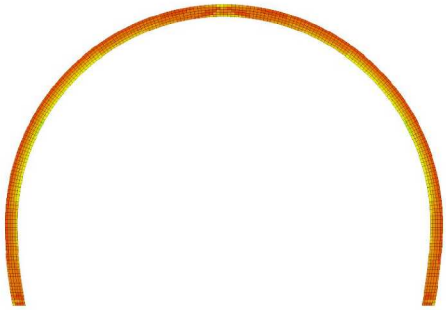
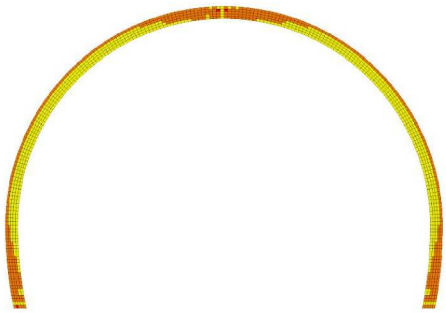
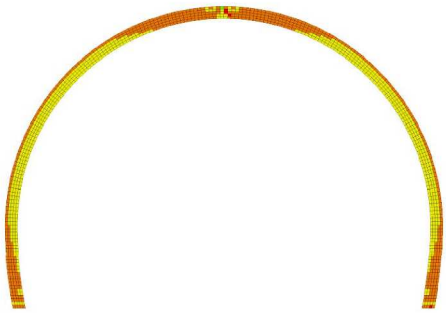
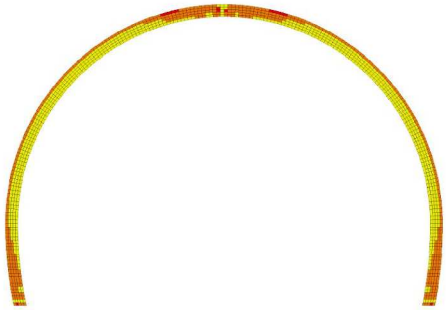
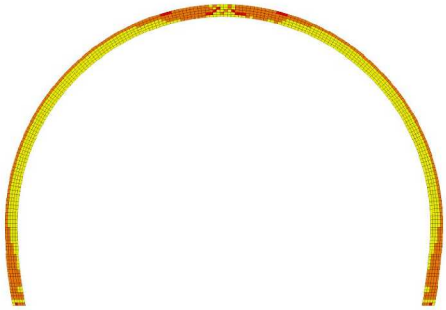
	CFCC なし	CFCC あり
ひび割れ発生荷重		
終局荷重		

表-5.3.1　最大主応力分布図

	CFCC なし	CFCC あり
ひび割れ発生荷重		
終局荷重		

5.5　まとめ

本章では，既往の載荷実験結果（第 3 章）およびその再現解析により得られた知見と解析手法（第 4 章）に基づき，実スケールのトンネル覆工コンクリートモデルを対象とした数値シミュレーションを実施した．

まず 5.2 節で，実スケールモデルにおける計算効率と解析精度の両立を図るため，メッシュサイズに関する検討を実施した．載荷実験と同様の入力物性値，荷重条件を用いた感度解析の結果，メッシュサイズの違いによるひび割れ発生荷重のオーダーは概ね一致したものの，崩壊時の挙動および破壊形態の再現性に差異が見られた．計算時間を考慮し，比較的良好な結果が得られた 50mm メッシュを実スケール解析に採用することとした．

次に 5.3 節で，トンネル全周に作用する塑性圧を模擬した外力条件下における覆工コンクリートの挙動解析を行い、CFCC 補強の有無による影響を比較検討した．本解析条件下では，トンネル周辺からの塑性圧により覆工全体に周方向の圧縮力が卓越することが示され，引張応力に起因するひび割れの発生はみられなかった．健全な覆工に対して理想的に均等な外力が作用する場合，NSM-CFCC による補強効果はほとんどみられないことが示唆された．

5.4 節では，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．局所的な鉛直圧作用下において，CFCC 補強の有無によるひび割れ発生荷重に大きな差異は認められなかったものの，終局耐力については CFCC 補強ケースが無補強ケースに対して大幅な向上を示した．無補強モデルにおけるアーチ効果による軸力伝達が限定的となるのに対し，NSM-CFCC 補強モデルでは軸力伝達が確認され，局所荷重作用下における NSM-CFCC 補強の有効性が確認された．

一連の数値解析を通じて，NSM-CFCC 工法が山岳トンネルの覆工コンクリートの安全性向上に寄与する可能性，特に局所的な荷重が作用し覆工コンクリートの応力状態がアンバランスとなるような条件下において有効であることを示す基礎的な知見が得られた．

5.6　第 5 章の参考文献

1)　トンネル数値解析ガイドライン，東日本高速道路株式会社，pp.5-9，2018.
2)　トンネル数値解析ガイドライン，東日本高速道路株式会社，pp.参 7-27～60，2017.
3)　トンネルの変状メカニズム，土木学会，p.93，2004.

第 6 章　結論

6.1　本研究の結論

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．

本論文の主な要点を以下に述べる．

第3章　覆工コンクリートモデルの載荷実験

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を行った．供試体は，無補強ケースに加え，異なる径（ϕ7.2mm, ϕ9.7mm, ϕ13.0mm）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）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，ϕ13.0mm 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　モデル実験の再現解析

第 4 章では，第 3 章で得られた載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）に基づく再現解析を実施した．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，引張側にひずみ軟化モデルを，圧縮側は非線形モデルを構成則として適用した．載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　トンネル覆工の数値解析

第 5 章では，第 3 章の載荷実験および第 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を実施した．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が発生し引張応力が発生しにくい理想的な条件下となり，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，アンバランス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，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.

以上の研究成果より，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.

6.2　今後の課題と展望

本論文では，載荷実験に基づく再現解析，および実スケールのトンネル覆工解析を実施し，覆工コンクリートに NSM-CFCC 工法を適用した際の補強効果に関する研究を行った．これにより，NSM-CFCC 工法は，局所的な外力が作用するような状況下において補強対策として有効であることが示唆された．

しかしながら，本研究における載荷実験および数値解析は，覆工に作用する外力を簡易的に模擬したものであり，実際の山岳トンネルにおける様々な外力を全て的確に表現できているものではない．また，特定の載荷条件に限定した補強効果の検証であったため，トンネル縦断方向に作用する荷重や地震といった動的な外力作用など様々な荷重条件における適用可能性を検証する必要がある．今後，さらに実験や解析的研究を進めるとともに，自動化・省力化が進む施工方法を踏まえつつ，信頼性の高い設計法を構築することが求められる．

NSM-CFCC 工法は，既設トンネルの延命化や耐震性能向上に貢献するだけでなく，将来的に外力が作用すると想定される新設トンネルの覆工施工へ組込むことよって，耐荷力の向上とともに，ライフサイクルコスト縮減にも寄与できると考えられる．上記に示したように実用化に向けて課題が多いものの，施工事例の蓄積等により，山岳トンネルのアーチ構造のような特殊な構造物や，薄肉コンクリートのような耐震補強が難しい構造物への適用範囲拡大も期待できる．

謝辞

本研究の遂行にあたり，多大なるご指導とご鞭撻を賜りましたみなさまに心より感謝申し上げます.

本研究の遂行，ならびに博士論文を取りまとめるにあたり，指導教員である山口大学大学院教授吉武勇先生には，研究全般にわたり懇切なご指導を頂きました．研究の進め方だけでなく，工学的な問題に対する捉え方や技術的な解決策など，多岐にわたるご教授を賜り，心より御礼申し上げます.

山口大学大学院教授　鈴木素之先生，同教授　河村圭先生，同教授　中島伸一郎先生，ならびに同講師　山田悠二先生には，博士論文の審査において本論文の構成および内容全般に関しまして，専門的なかつ的確なご助言とご意見を頂戴いたしました．深く感謝致します.

また，山口大学名誉教授中川浩二先生，山口大学理事進士正人先生には，学生時代に私がトンネルの世界へ進むきっかけを与えて頂きました．暖かく見守って頂き，心より御礼を申し上げます.

本研究の実験にご協力頂いた施設材料学研究室の大学院生，4 年生のみなさまに厚く御礼申し上げます．研究室総出でご協力頂いたおかげで，実験を円滑に進めることが出来ました．特に，大西崇司氏（現　株式会社建設技術研究所），上野真嗣氏（現　株式会社建設技術研究所），児玉稜氏（現　山口大学大学院博士前期課程）にはデータ整理や論文作成などで多くの協力を頂きました.

本論文をまとめる上で，松尾勉博士（株式会社ケー・エフ・シー），大谷達彦博士（西松建設株式会社），前田智之博士（五洋建設株式会社）．松田浩朗博士（飛島建設株式会社），青木宏一博士（株式会社熊谷組），菅原健太郎博士（株式会社地層科学研究所），岸田展明博士（ドボクリエイト株式会社），岡崎泰幸博士（広島工業大学），海瀬忍博士（中日本高速道路株式会社），坪郷浩一博士（徳山工業高等専門学校）には，激励の言葉や技術的なアドバイスだけでなく，博士としての心構えや社会人博士としての経験を教えて頂きました．大きな支えでありましたし，かけがえのない財産となりました.

岸田展明氏をはじめとするドボクリエイト株式会社のメンバーのみなさまにも感謝申し上げます．業務と研究が錯綜するような中，スケジュール調整や業務の分担など，多大なご配慮とご協力を頂きました.

本論文は多くの方々からのご支援とご協力があったからこそ完成に至ることが出来ました．ここに改めて，みなさまに心より感謝申し上げます.

そして，週末や深夜の仕事に文句も言わず陰で支え続けてくれた妻英里，宇音，光音，ゆきに心からの感謝を伝えます．ありがとう.

2025 年 8 月　森本真吾