

## トンネル覆工コンクリート部材の載荷実験シミュレーション

ドボクリエイト株式会社 正会員 ○森本 真吾  
 山口大学大学院 学生会員 大西 崇司  
 山口大学大学院 学生会員 柳木 大河  
 山口大学大学院 正会員 吉武 勇

## 1. はじめに

トンネル覆工コンクリートに適用可能な補強工法の開発の一環として、海外の道路橋補強技術として実績の多い Near-Surface-Mounted (NSM) 工法により補強したトンネル覆工コンクリート部材の載荷実験を行った。

本研究では、NSM 工法に用いる補強材として炭素繊維複合材ケーブル (CFCC) を用い、充填材には高い接着性を有する早強ポリマーセメントモルタル (PCM) を使用した。試験体は、図-1 に示すように、 $D \approx 10\text{m}$  の二車線道路トンネルの天端部付近を模擬し、無補強および覆工コンクリート内空側表層の 20mm 深に溝加工、または、表層 20mm を切削し CFCC を埋設した試験体を各 2 体、計 6 体作製した。なお、CFCC はトンネル軸方向に対し 250mm 間隔での配置を想定し、1 試験体当たり 2 本埋設した。

載荷実験状況を図-2 に示す。上載荷重は天端中央から左右 10cm 位置の二点載荷とし、終局破壊に至るまで載荷した。

試験体各 2 体の平均終局耐力を表-1 に示す。NSM 技術を活用した補強工法では、無補強のケースに比べ 8~9 倍もの極めて高い耐荷性能を得られることが分かった。本研究は、数値解析を用いて載荷実験を再現し、NSM 工法による補強効果を確認した。

## 2. 解析条件

本解析では三次元 FDM ソフトウェア (FLAC3D ver.7) を用い、図-3 に示すように試験体を solid 要素でモデル化した。試験体の構成則は等方弾性体とした。また、CFCC は beam 要素とし、試験体と同様に弾性体とした。

回転支点部を鋼材とし、境界条件は、両端の鉛直方向を固定、片側の水平方向を固定した。なお、回転支点の鋼材-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。表-2 に示すように解析の入力物性値は、材齢 28 日の強度試験結果などを用いた。

## 3. 解析結果

表-1 の荷重 (終局耐力) 載荷時における水平方向応力分布

キーワード トンネル、覆工コンクリート、NSM 工法、三次元数値解析

連絡先 〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 ドボクリエイト株式会社 TEL 090-2094-4603

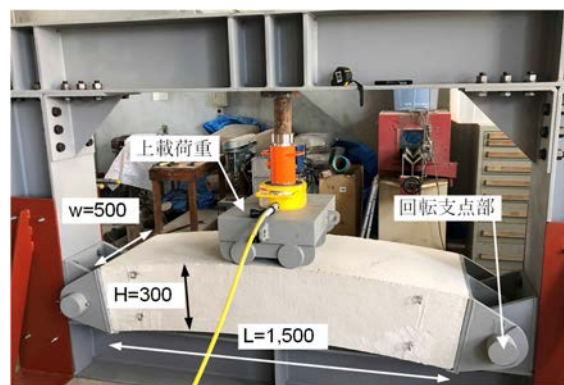
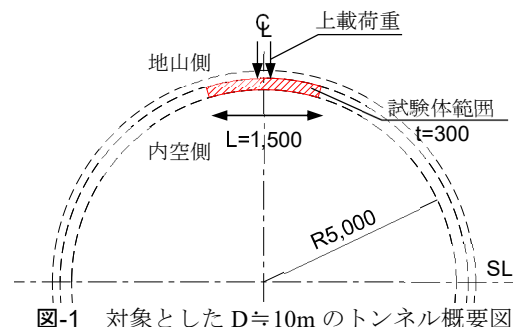


図-2 載荷実験状況

表-1 終局耐力 (平均値)

	耐荷重 (kN)	無補強との比較
無補強	49.0	—
NSM 溝加工	447.5	約 9 倍
NSM 表面切削	397.2	約 8 倍

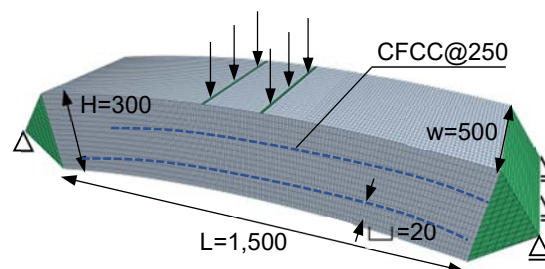


図-3 解析モデル

表-2 入力物性値

	要素	単位体積重量 $\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 E (GPa)	ポアソン比 $\nu$
コンクリート	solid	2,300	32.5	0.20
PCM	solid	2,300	19.7	0.20
CFCC	beam	1,870	152	0.30

を図-4 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-4 a)の無補強は、引張破壊領域は内空側にわずかに生じるものの、水平方向の発生応力は小さく、アーチ構造の特徴である軸力はほとんど機能していない。一方、図-4b), c)の NSM 工法は、中立軸より内空側に大きな引張破壊領域が生じ、上面の荷重位置周辺にも圧縮破壊領域が生じている。中立軸より地山側の領域は、圧縮強度を超過しておらず、覆工コンクリートの一部は概ね健全と考えられる。ただし、覆工コンクリートが引張を負担しているため、CFCC に生じる軸力は破断荷重の6% (8.9kN/147.8kN) 程度に収まっている。

図-5 のひび割れ状況に示すように、実験において内空側には中立軸付近まで大きなひび割れが生じ、また、荷重面には局所的な圧壊が生じている。解析による破壊領域 (図-4 b), c) は実験で得られた破壊状況を概ね推定できている。

ひびわれ発生時における実験、および、解析結果の荷重-スパン中央のたわみ関係を図-6 に示す。解析の荷重-たわみグラフは3 ケースとも重なっており、補強対策工の有無による相違はみられなかった。また、実験の補強対策工のひびわれ発生時 (約 64kN) におけるスパン中央のたわみは 1.0~1.5mm を示しているのに対し、解析では 0.22mm 程度しかたわみが生じおらず、荷重-たわみ線の傾きは約 3~6 倍を示している。変形量が小さくなっている一因として、図-4 に示すように内空側の引張破壊を超過した領域も抵抗していると考えられる。

4. まとめ

D≒10m のトンネル覆工コンクリートを想定した荷重試験データを用い数値解析によるシミュレーションを行った。本研究で得られた結果を以下に示す。

- 本解析により実験上の破壊形態を概ね推定できた。
- 無補強のモデルでは、水平方向の発生応力が小さく、アーチ構造による軸力の効果は小さい。
- NSM 工法を実施することで、中立軸より内空側は引張強度を超過するものの、過大な荷重が作用しても覆工コンクリートの一部は健全性を保つことができる。

実験と比べ解析による変位量が小さくなったことが課題に挙げられる。これは、試験体内空側の引張応力が負担していることが一因と考えられる。CFCC に発生する応力を適切に評価できない可能性があるため、ひびわれ発生個所の評価が重要と考えられる。

謝辞：本研究は科研費 (21K04213) の助成を受けたものである。荷重装置・試験体製作にあたり、(株) 藤崎商会の片山典信氏・上野剛尚氏、東京製綱インターナショナル (株) の瀬尾利之氏・菅原公理氏、太平洋マテリアル (株) の石田学氏・保井渉氏に御協力を頂いた。ここに謝意を表す。

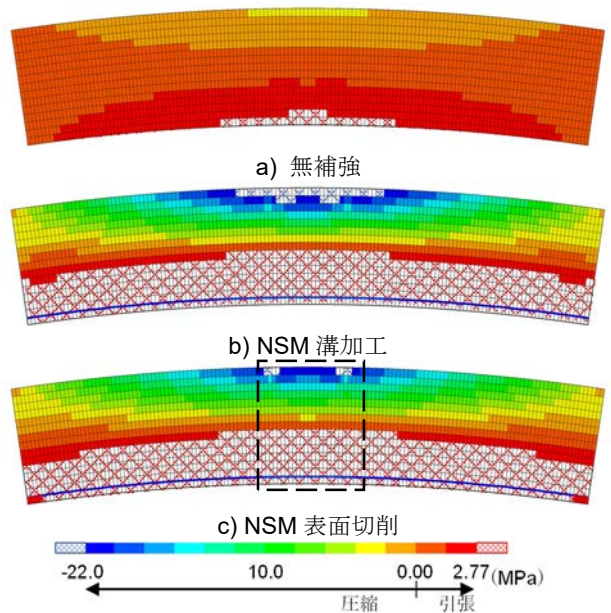


図-4 終局耐力荷重時の水平方向応力分布図

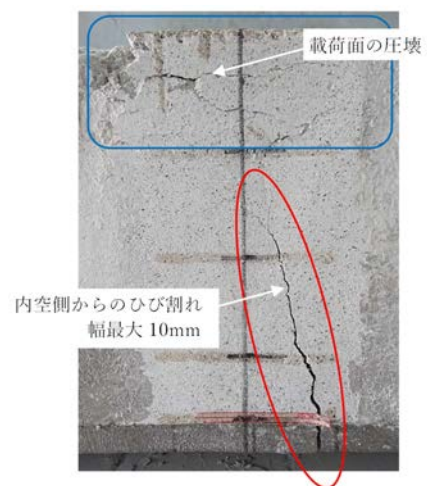


図-5 NSM 表面切削における破壊状況 (図-4c)黒枠内)

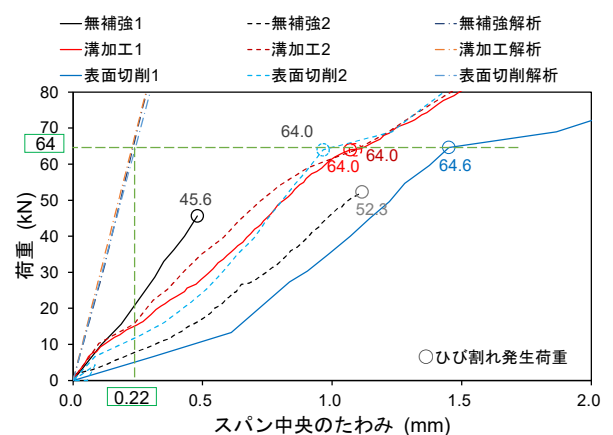


図-6 荷重-たわみ関係