

# CFRP スtrandシートを用いた水路トンネル補強の実験再現解析 Experimental reproduction analysis of water-way tunnel reinforced with CFRP strand sheet

○櫻井俊太\* 小森篤也\* 森充広\*\* 堀越直樹\*\*\* 石井将幸\*\*\*\*

Shunta SAKURAI, Atsuya KOMORI, Mitsuhiro MORI, Naoki HORIKOSHI, Masayuki ISHII

## 1. はじめに

農業用水路トンネルの覆工コンクリートへの補強工法として、トンネル内面へすだれ状の炭素繊維ストランドシート（以下、CFSS という）を接着する工法の有効性が既往の研究により確認された<sup>1)</sup>。そこで本稿では、覆工厚の異なる2種類の実物大供試体試験結果に基づく解析的検討のため、FEM解析により解析条件の妥当性を検証した。

## 2. 解析概要

### 2.1 解析ケース・モデル

解析には、3次元非線形解析プログラム DIANA10.2 を用いた。解析ケースを表-1に示す。解析モデルは図-1に示す。寸法は実験と同様に2R馬蹄形(R=900mm)、トンネル軸方向長さ300mmとした。コンクリートはソリッド要素、CFSSはシェル要素でモデル化した。コンクリートとCFSSの界面はクーロン摩擦モデルとし、底面は地盤ばねにより拘束した。

### 2.2 材料構成則

#### (1) コンクリート

コンクリートは全ひずみひび割れモデルを採用し、材料構成則は図-2に示すように、圧縮軟化特性には圧縮破壊エネルギー $G_{fc}$ を考慮した放物線モデルを、引張軟化特性には引張破壊エネルギー $G_{ft}$ を考慮したHordijkモデルを用いた。各Caseの材料特性値は表-2に示す値を用いた。

#### (2) CFSS

本実験では剥離により終局するため、CFSSは線形弾性材料としてモデル化し、弾性

表-1 解析ケース

Table-1 Analysis cases

試験体名	形状	頂部覆工厚 (mm)	シート補強
Case1	標準馬蹄形	250	有
Case2	薄型馬蹄形	183	有

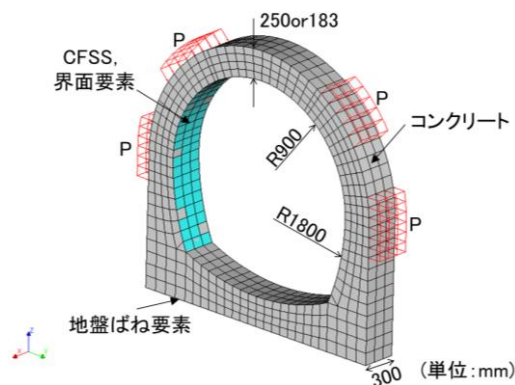


図-1 解析モデル

Figure-1 Analysis model

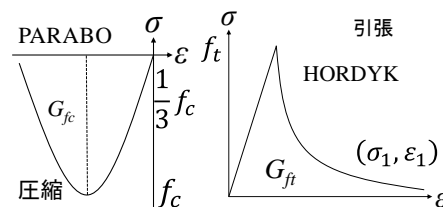


図-2 コンクリート構成則

Figure-2 Constitutive law of concrete

表-2 コンクリートの材料特性値

Table-2 Material property of concrete

試験体名	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{fc}$ (N/mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{ft}$ (N/mm)
Case1	44.4	58.4	2.88	0.0961
Case2	43.6	57.9	2.84	0.0955

\* 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 NIPPON STEEL Chemical & Material Co., Ltd.

\*\* 農研機構, Institute for Rural Engineering, NARO

\*\*\* オリエンタル白石(株) Oriental Shiraishi Corporation

\*\*\*\* 島根大学 Shimane University. キーワード: 水路トンネル, 炭素繊維, 補強, 数値解析

係数は接着用樹脂モルタルと CFSS を一体化させ、 $12,600\text{N/mm}^2$ とし、厚さは  $7\text{mm}$  とした。

### (3) 界面要素

コンクリートと CFSS の界面はクーロン摩擦モデルとし、法線方向とせん断方向の付着応力-すべり関係を図-3 に示す。本解析での各値は、法線方向は  $\sigma_u=0.49\text{N/mm}^2$ 、剛性= $7.36\text{N/mm}^3$  とし、せん断方向は  $\tau_u=3.36\text{N/mm}^2$ 、剛性= $7.36\text{N/mm}^3$ 、 $\delta_u=6.72\text{mm}$  とした。また、底面は地盤ばね要素とし、ばね剛性は法線方向せん断方向ともに剛とした。

### 3. 解析結果

表-3 に解析結果一覧を示す。最大荷重は Case1 では実験値、解析値ともに  $217\text{kN}$ 、Case2 では実験値は  $194\text{kN}$ 、解析値は  $200\text{kN}$  となり、差が 3%以内であり実験結果と解析結果がおよそ一致した。

図-4 に Case1 の CFSS 周方向ひずみコンター図を示す。Case1, Case2 とともに実験と同様の剥離位置（トンネル側面）の CFSS-コンクリート間の界面要素が法線方向破壊することにより CFSS の剥離が再現された。また、Case1, Case2 とともに同様のひずみ分布であり、トンネル頂部では圧縮、側面で引張が大きくなる分布となり、実験のひずみ分布と同様の結果が得られた。また、最大ひずみは Case1, Case2 とともに解析結果が実験結果より約  $1,000\mu$  大きい結果となったが、これは実験でのひずみ測定は、ひずみゲージによる測定であり、必ずしも最大ひずみが発生する部分に設置不可能であるため、最大ひずみは実験値との差異が生じたと考えられる。そのため、FEM 解析によりトンネル模型実験を再現でき、解析条件の妥当性が確認され、本条件で解析を行うことにより、本工法の解析的検討が可能となった。

### 4. まとめ

覆工厚の異なる 2 種類の実物大供試体試験結果に基づく FEM 解析により実験再現解析を行った。その結果、両 Case とともに最大荷重、ひずみ分布、CFSS 剥離位置が実験結果とおよそ一致し、トンネル模型実験が再現された。そのため、解析モデルの妥当性が確認され、本工法の解析的検討が可能となった。

謝辞：本研究は、官民連携新技術研究開発事業新規研究開発課題「無筋コンクリート水路トンネル覆工に最適化した補強工法の開発」によって実施しました。

参考文献：1) 堀越直樹，西須稔，石井将幸，川上昭彦，小森篤也，ひび割れを生じた水路トンネルに対する補強効果，農業農村工学会大会講演会講演要旨集，2019

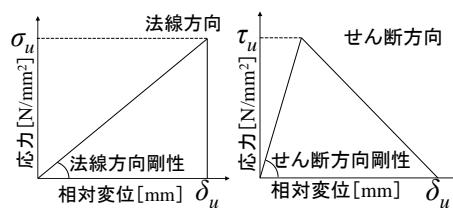


図-3 界面要素構成則

Figure-3 Constitutive law of interface

表-3 解析結果一覧

Table-3 Analysis results

試験体名	最大荷重 (kN)			CFSS		
	実験値	解析値	解析/実験	最大ひずみ(×10 <sup>6</sup> )	実験値	解析値
Case1	217	217	1.00	2220	3203	
Case2	194	200	1.03	2388	3280	

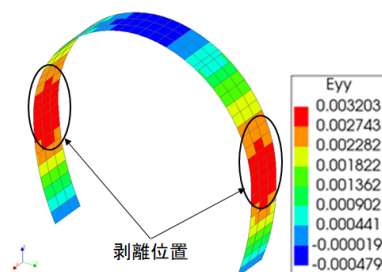


図-4 CFSS 周方向ひずみコンター図 (Case1)

Figure-4 Strain contour diagram in the circumferential direction of CFSS (Case1)