

鋼繊維補強コンクリートによるトンネル覆工の 長期的挙動に関する分析

前田 洸樹・坂本 昇・日下 敦・砂金伸治

1. はじめに

構造物のライフサイクルコストの低減や、昨今のコンクリート構造物の落下事故等への対応が求められており、トンネルに関しても、覆工コンクリート（以下「覆工」という。）の安全性及び耐久性の向上を図ることが課題となっている。

覆工で利用者被害につながる可能性もあるはく離、はく落の対策として、コンクリートの使用材料や配合等、覆工打設時の締固め方法、養生方法等の工夫が取られており、その中の一つとして繊維補強コンクリートがある。その中でも、耐久性に加えて耐荷力の向上を念頭に鋼繊維補強コンクリート（以下「SFRC」という。）を採用した事例もある。

実際のトンネルにおいて、はく離、はく落に発生しやすいひび割れの進行等に対するSFRCの効果について検証するため、覆工にSFRCを用いた試験施工区間において、土木研究所では、北海道開発局の協力のもと、打設から10年以上にわたり覆工に発生した変状や坑内環境の変化について長期計測を実施している¹⁾。

本稿では、SFRCを用いた覆工に発生したひび割れ等について、長期計測結果のうち、ひび割れの発生位置、発生時期、内空変位及び応力の変化等に着目し、進行の抑制効果を検証した結果を報告する。

2. 計測トンネル概要と計測方法

2.1 長期計測を実施したトンネル

本稿で対象としたトンネルは、2004年に完成したNATMで施工された2車線の道路トンネル（内空幅11.4m）であり、覆工の一部スパンに試験施工としてSFRCを用いている。覆工の打設は2004年11月に行われた。図-1に示すように当該トンネルの計測対象区間は、起点側坑口から16.5mの位置で覆工にプレーンコンクリート（以

下「プレーン」という。）を用いた区間が2スパン（A-1、A-2）、SFRCを用いた区間が1スパン（A-3）の3スパンである。支保パターンは、スパンA-1がCⅡ、スパンA-2、A-3がDⅠであり、覆工厚は30cmである。当該トンネルには、寒冷地に位置するため吹付けコンクリートと覆工の間に厚さ7cmの断熱材が設置されている。なお、試験施工区間では写真-1に示すような鋼繊維を混入した。本計測で使用した鋼繊維は、長さ60mm、直径0.75mm、混入率0.5%で、ベースコンクリートに直接投入して攪拌することでSFRCを製造した。

2.2 計測方法

当該トンネルでは、覆工打設完了後から近接目視を年2回程度で実施し、覆工に発生した変状やその進行の有無を確認し、概ね幅0.05mm以上のひび割れを対象に変状展開図を作成した。

図-2に計測機器配置図及び変状展開図を示す。SFRCとプレーンの代表的なひび割れにおいて、ひび割れ幅の最大箇所を設置したパイ型変位計によりひび割れ幅の自動計測を実施し、経年的変化を確認した。なお、計測値はその自動計測をひび割れ発生後に開始したため、変位量を相対的に表したものである。また、覆工内に温度計、有効応力計を設置し、覆工内部の温度と応力を自動計測した。内空変位については年2回測定を実施した。なお、内空変位の計測値は、覆工打設完了時から計測しているため、計測値が変位量となる。

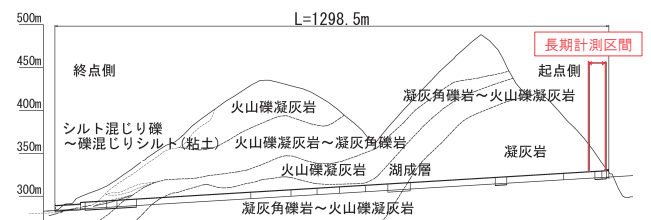


図-1 計測位置図

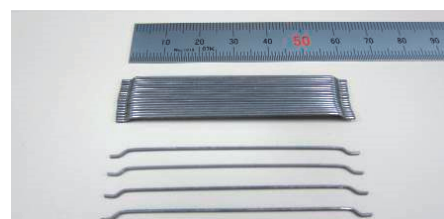


写真-1 鋼繊維の例

3. 長期計測結果

3.1 ひび割れ

(1) ひび割れの発生

図-2に2017年2月時点の変状展開図を示す。アーチ天端部の縦断方向ひび割れは、SFRC、プレーンともに、コンクリート打設後1～2年程度で確認された。また、側壁部の横断方向ひび割れは、プレーンでは2年以上経過して確認し、SFRCでは6年経過後に確認した。以上より、プレーンとSFRCでひび割れの発生時期に違いがあったものの、鋼繊維を混入してもひび割れの発生自体を防ぐ効果はみられなかった。また、本区間では漏水もみられておらず、漏水に起因する鋼繊維自体や覆工の劣化（発錆等）は確認されなかった。また、3スパンともひび割れ確認から9年後にアーチ天端部のひび割れ沿いのうきが確認されたことから、SFRCによる局所的なうきの発生自体を防止する効果までは確認できなかった。

(2) ひび割れの進行

図-3にひび割れ幅の変位量の計測結果（覆工打設後11年目に計測開始）を示す。ひび割れ幅の変化量は、スパンA-2、A-3とも季節的変動に合わせ、±1mmの範囲で伸縮を繰り返し、毎年の変位量がほぼ一定である。また、ひび割れ幅の変化量は、SFRCの方がプレーンに比べて小さい。

図-4にひび割れ密度（覆工スパン内に発生している幅0.05mm以上のひび割れの総延長／覆工スパンの表面積）の経過を示す。ひび割れ密度は、覆工打設後5年以降で一定あるいは増加する場合でもわずかである傾向がみられたが、SFRCの方がプレーンに比べてひび割れ密度の進行は小さく、進行する期間も短い傾向であった。これは、前述したように、SFRCの方がプレーンに比べてひび割れ幅の変化量が小さいことも影響していると考えられる。これらのことから、SFRCはひび割れ発生後の進行を抑制する効果があると考えられる。

3.2 内空変位

図-5に天端沈下、上半水平変位、脚部沈下（計測位置は図-5に示すように側壁部）の計測結果を示す。SFRC、プレーンともに、天端沈下が計測開始から進行し、季節的変動をしながら約16mmの沈下が確認されたのに対し、上半水平変位は、季節的変動が確認されているが変位量の経年的変

化は確認されていない。また、脚部沈下も天端沈下と同様の傾向であることから、トンネルが全体的に沈下している傾向があると推定される。なお、SFRCの方がプレーンよりもやや変位が大きいが、最終的な変位量は大きく差がないことに加え、経時的な変動もほぼ同様の傾向であるため、両者に大きな差はないと考えられる。

3.3 覆工応力

図-6、図-7にAトンネルの覆工応力の計測結果

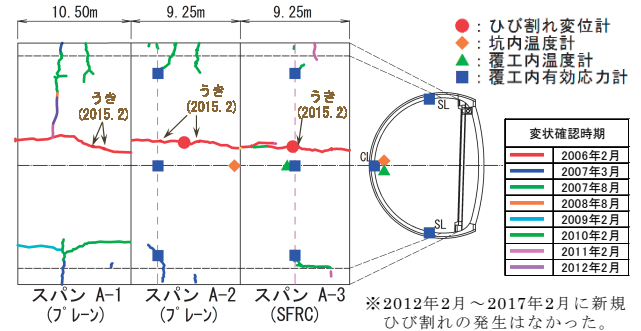


図-2 計測機器配置図と変状展開図

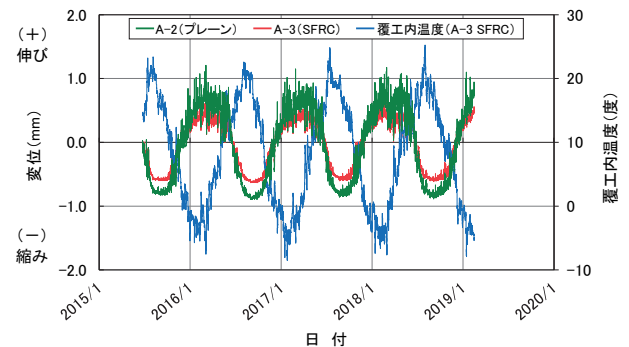


図-3 ひび割れ幅計測結果

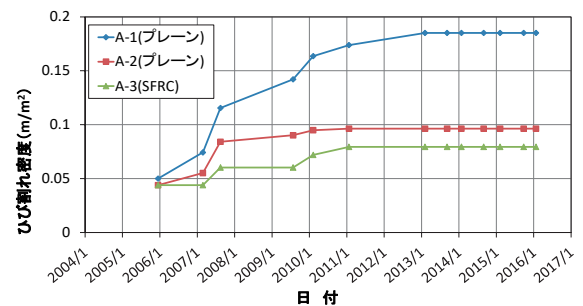


図-4 ひび割れ密度の経時変化

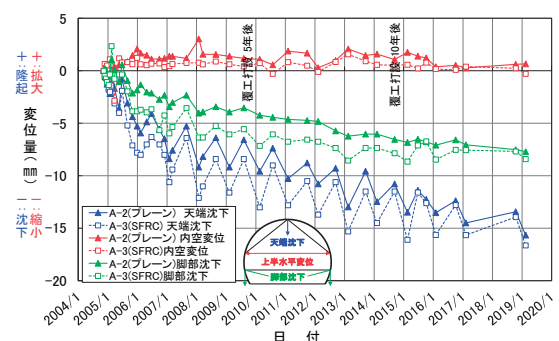


図-5 内空変位計測結果

を示す。これをみると、覆工応力は季節的変動に合わせ増減を繰り返している。覆工打設から、SFRCのスパンでは約6年後、プレーンでは約8年後までは温度変化及び乾燥収縮と見られる圧縮ひずみが増加傾向にあり、その後、収束傾向が確認された。以上より、覆工応力の発生傾向はSFRCとプレーンで大きな差はみられなかった。

4. 骨組み構造解析による再現解析

スパンA-2及びA-3では、乾燥収縮が収束すると考えられる5年程度²⁾を超えても、トンネル全体の沈下量が増加傾向にあることから、外力の作用の可能性が考えられる。そこで、スパンA-2及びA-3の計測結果を骨組み構造解析により再現し、覆工に外力として作用する荷重の大きさ、側圧係数、地盤反力係数の推定を行った。

4.1 解析条件

(1) 再現変位

本解析では、計測開始以降の変位がすべて外力によるものと仮定し、計測開始から2018年10月15日まで（コンクリート打設後13年後）の鉛直及び内空変位量を、鉛直荷重 P_v （土被り高さ H ）、側圧係数 k 、地盤ばね定数 Kn の条件でパラメータスタディを行い骨組み構造解析により再現する。

(2) 解析モデル

作用荷重はスパンA-2、A-3の天端部に縦断方向ひび割れが発生していることから、緩み荷重として鉛直方向の等分布荷重 P_v を想定し、側圧として等分布荷重 $Ph (= kP_v)$ も考慮する。さらに、トンネル周方向に地盤ばねを与え、インバートはモデル化せず、脚部は地盤ばね支点とする。

(3) 解析物性値

地山の変形係数は、地山等級D I より一般値の 500 N/mm^2 とする。覆工は、設計基準強度 18 N/mm^2 相当となる変形係数 $22,000 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.15 とする。

4.2 解析結果

解析の結果、 $P_v=207\text{kN/m}^2$ ($H=9\text{m}$)、 $k=0.3$ 、 $Kn=210,000\text{kN/m}^3$ （地山の変形係数から求まる値の $1/2$ ）と設定すると、各節点における鉛直変位及び内空変位は、それぞれ図-8、図-9のようになり、解析結果と計測結果がおおむね一致した。また、図-10に断面力図、表-1に天端及び側壁の周方向応力を示す。解析による覆工断面中央の応

力値は、断面力から算出した地山側と内空側の縁応力を平均することで算出した。表-1に示すように、計測中央応力（図-6、図-7に示す測点B（天端）、測点A（側壁）の応力値）が、解析による中央応力と概ね一致したことから、解析により計測結果を概ね再現できたといえる。

なお、現地計測及び数値解析による応力値は引張応力が発生しておらず圧縮応力も設計基準強度

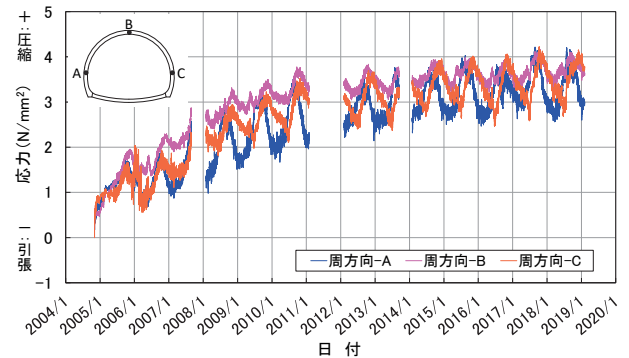


図-6 周方向応力 プレーン（スパンA-2）

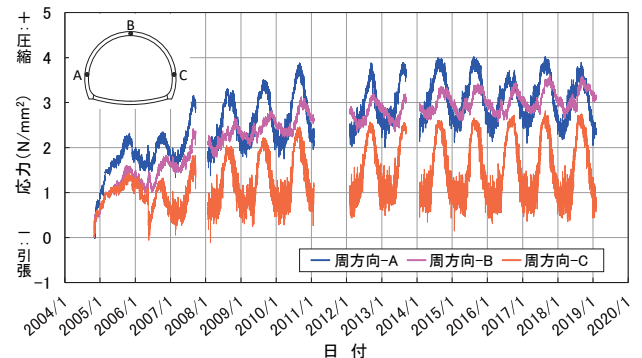


図-7 周方向応力 SFRC（スパンA-3）

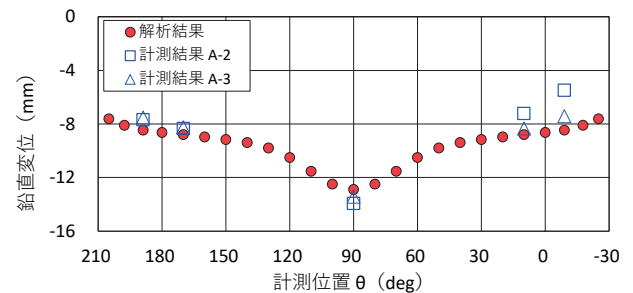


図-8 再現解析結果（鉛直変位）

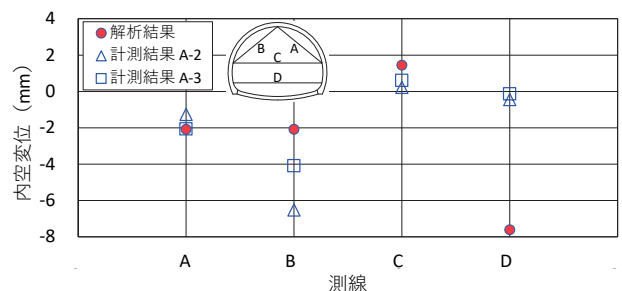


図-9 再現解析結果（内空変位）

と比べればかなり小さい値であるため、現時点で覆工の安全性に問題はないと考えられる。

このとき、荷重条件は土被り高さが20m程度であることや地山等級がD I であること、また、地盤ばねは、算定式が仮定を含み、地山も不均一であることに加え、支保工や断熱材の反映方法も未確立という不確実性を有することから、概ね妥当な範囲であると考えられる。

以上より、数値解析により推定される覆工作用外力の大きさとしては、覆工の安全性に問題を生じるようなものではないと考えられることが分かった。このような荷重条件においては、3章で述べたように、天端沈下、内空変位及び覆工応力の発生傾向はSFRCとプレーンで大きな差はみられず、鋼繊維を混入しても変位や応力の発生抑制する効果はみられないと考えられる。

5. まとめ

SFRCを用いた覆工の長期計測の結果、以下知見が得られた。

- ・ ひび割れやうきの発生は、SFRCとプレーンともにほぼ同時期に確認されたことから、鋼繊維を混入してもひび割れの発生自体を防ぐ効果は確認されなかった。
- ・ ひび割れ幅は、温度変化に伴って変動しており、その変動幅はSFRCの方がプレーンよりも比較的小さかった。さらに、ひび割れ密度の推移もSFRCの方がプレーンより小さい傾向であったため、SFRCはひび割れ発生後の進行を抑制する効果があると考えられる。
- ・ 数値解析から想定される外力は小さいものであり、そのような荷重に対して発生する天端沈下、

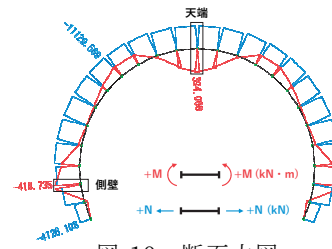


図-10 断面力図

表-1 覆工の周方向応力

応力値 ^{※1} (N/mm ²)	天端	側壁
地山側縁応力	6.40	3.58
中央応力 ^{※2}	3.56	3.98
内空側縁応力	0.72	4.38
計測中央応力	3~4 ^{※3}	3~4 ^{※4}

※1 圧縮：正、引張：負

※2 覆工断面中央の応力（縁応力の平均）

※3 図-6、図-7に示す測点Bの計測値

※4 図-6、図-7に示す測点Aの計測値

レーンで大きな差はみられず、鋼繊維を混入しても変位や応力の発生を抑制する効果はみられないと考えられる。

以上示したように、限られたトンネル数や地山条件下での計測による知見ではあるが、SFRCは、ひび割れの発生自体を抑制する効果までは期待しにくいことが明らかとなった。ひび割れが発生した場合で、特に漏水等の発生が伴い鋼繊維自体の劣化が促進された場合は、はく落防止や曲げじん性の向上といった鋼繊維補強に期待される効果も低下することにつながる恐れがあるため、留意が必要であるとともに、今後も長期的な耐久性に関する知見を蓄積していきたいと考えている。

謝 辞

本稿の長期計測結果は、国土交通省北海道開発局網走開発建設部及び遠軽開発事務所の協力により得られたものである。計測に携わった関係各位に深甚なる謝意を表す。

参考文献

- 1) 真下英人、砂金伸治、木谷努、遠藤拓雄：繊維補強コンクリートを用いたトンネル覆工のひび割れに関する研究報告書、土木研究所資料、第4000号、2006
- 2) 森本智、真下英人、角湯克典：トンネル覆工のひび割れの進展に関する一考察、第62回年次学術講演会講演概要集、pp.297~298、2007

前田 洸樹



土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム 交流研究員
MAEDA Koki

坂本 昇



研究当時 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム交流研究員、現 八千代エンジニアリング(株)
SAKAMOTO Noboru

日下 敦



土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム 上席研究員
KUSAKA Atsushi

砂金伸治



研究当時 土木研究所道路技術研究グループトンネルチーム上席研究員、現 東京都立大学教授、博士(工学)
Dr. ISAGO Nobuharu