覆工目地部の伸縮に対する網状の繊維シート工の適応性に関する実験的研究

前田　洸樹[1]・森本　智[2]・日下　敦[3]・石村　利明[4]・加古　昌之[5]

[1]正会員　国立研究開発法人 土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:maeda-k574bt@pwri.go.jp

[2]正会員　国立研究開発法人 土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:s-morimoto@pwri.go.jp

[3]正会員　国立研究開発法人 土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:kusaka@pwri.go.jp

[4]正会員　国立研究開発法人 土木研究所（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail: ishimura-t477bs@pwri.go.jp

[4]正会員　鉄建建設株式会社（〒101-8366 東京都神田三崎町2-5-3）
E-mail: masayuki-kako@tekken.co.jp

覆工目地は，年間の温度変化により年間2mm程度伸縮する計測結果が報告されている．このような覆工目地の伸縮に対し，覆工目地を跨いで繊維シート系当て板工によるはく落対策を行う場合，自由長を設けるなどの対応が必要となる．しかし，自由長を設けた施工でも覆工目地の伸縮によりシートにひび割れが発生する事例が確認されており，覆工目地の伸縮に対する繊維シート系当て板工の適用にあたり課題が残されているのが現状である．そこで，本研究では，繊維シート系当て板工の覆工目地部の伸縮に対する適用性に関する基礎資料を得ることを目的として，覆工目地の伸縮を模擬した繰り返し載荷試験を行った．本稿では，繰返し載荷による網状の繊維シート系当て板工の変形特性等を評価した結果を報告する．

Key Words : *road tunnel, lining concrete, lining joint, expansion and contraction of joint, fiber sheet*

1. はじめに

近年の山岳トンネル工法（NATM）により建設されたトンネルに発生する変状は，ひび割れやうきが多くを占める．その中で，材質劣化に起因するうきでコンクリート片の落下により利用者被害のおそれがある場合は，早急に補修・補強対策を実施する必要がある．

材質劣化に起因するうきの発生部位は，覆工目地や天端に多くが発生している[1)]とされており，これら変状は利用者被害のおそれがあり，はく落対策が実施されることが多い．ただし，覆工目地では年間の温度変化により年間2mm程度伸縮することがある[2)]ため，このような覆工目地の伸縮に対し，道路トンネル維持管理便覧[3)]では，覆工目地を跨いで繊維シート系当て板工によるはく落対策を行う場合，覆工目地の伸縮の影響を緩和させるため，20cm程度以上の自由長を設け，その外側に15cm程度の定着長をとることが必要としている．しかし，自由長を設けた施工でも覆工目地の伸縮によりシートにひび割れが発生する事例が確認されており，覆工目地の伸縮に対する繊維シート系当て板工の適用にあたり課題が残されているのが現状である．

そこで，本研究では，繊維シート系当て板工の覆工目地部の伸縮に対する適用性に関する基礎資料を得ることを目的として，覆工目地の伸縮を模擬した繰返し載荷試験を行った．本稿では，繰返し載荷試験による網状の繊維シート系当て板工の変形特性等を評価した結果を報告する．

2. 試験概要

(1) 試験概要

繰返し載荷試験は，覆工目地を模した打継ぎ目（以下，目地と称する）を設けたコンクリート供試体を作成した

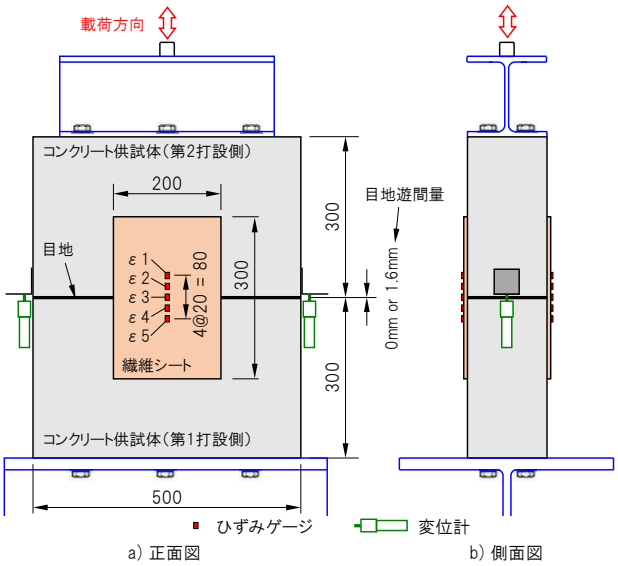


図-1　繰返し載荷試験概要図（単位：mm）

写真-1　繰返し載荷試験状況

後，その正面および背面に目地を跨ぐように繊維シートを設置し，第 2 打設側のコンクリート供試体を上方から油圧ジャッキを用いて変位制御により載荷した（**図-1**, **写真-1**）．

供試体寸法は，縦 600mm×横 500mm×厚さ 150mm とした．供試体製作は，はじめに，第 1 打設側のコンクリート供試体（縦 300mm×横 500mm×厚さ 150mm）を打設し，一定の養生期間を経てから第 2 打設側のコンクリート供試体（縦 300mm×横 500mm×厚さ 150mm）を打設した．また，目地の幅（以下，目地遊間量と称する）の大きさの違いによる繊維シートの挙動を確認するため，目地遊間量は 0mm，1.6mm の 2 種類とし，繊維シートにのみ荷重を作用させるように目地間は不連続となるよう処置を施した．

計測項目は，繊維シートに作用する荷重，載荷方向の目地変位（各側面 1 点ずつ），繊維シートに発生するひずみ（目地を中心に 20mm 間隔で正面側，背面側それぞれ 5 点ずつ）とした．

(2)　繰返し載荷

繰返し載荷は，1 年間の温度変化による覆工目地の伸縮を 1 サイクルとし，その目地伸縮量が最大 6mm まで発生すると仮定して試験ケースを設定した．また，目地伸縮量，サイクル回数の違いによる繊維シートの挙動を確認するため，目地伸縮量 1mm→2mm→3mm→4mm の順にそれぞれ 10 サイクル繰り返すケースと，目地伸縮量 1mm→2mm→3mm→4mm→5mm→6mm の順にそれぞれ 5 サイクル繰り返すケースを設定した．

載荷速度は，既往の押抜き試験等を参考に，1 サイクル目は 0.1mm/min，2 サイクル目以降は 1.0mm/min とした．さらに，目地の伸縮に対し繊維シートが追従しやすくするために，サイクルの中で目地伸縮量到達時および目地伸縮量 0mm 到達時はホールド時間を 2 分設けた．試験ケースを**表-1** に示す．なお，いずれのケースも繰返し載荷終了後，変位制御による単純引張載荷を行い，最大荷重を確認した．

表-1　試験ケース

ケース	目地遊間量　mm	目地伸縮量　mm	サイクル回数	載荷速度 mm/min	
				1サイクル目	2サイクル目以降
Case.1	0	1,2,3,4	10	0.1	1.0
Case.2	1.6	1,2,3,4	10	0.1	1.0
Case.3	0	1,2,3,4,5,6	5	0.1	1.0
Case.4	1.6	1,2,3,4,5,6	5	0.1	1.0

表-2　網状シートの材料特性

網状シート	繊維目付（g/m²）	設計厚さ（mm）	引張強度（N/mm²）	引張弾性率（N/mm²）
規格値	150	0.35	34.7	452.6
含浸・接着樹脂	エポキシ樹脂	曲げ強さ（JIS K7171）	引張強さ（JIS K7161）	引張せん断強さ（JIS K6850）
		40.0N/mm²	30.0N/mm²	10.0N/mm²

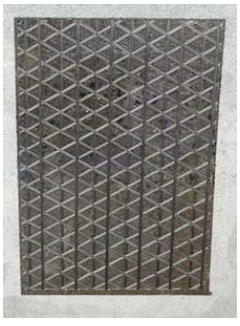


写真-2　貼付状況

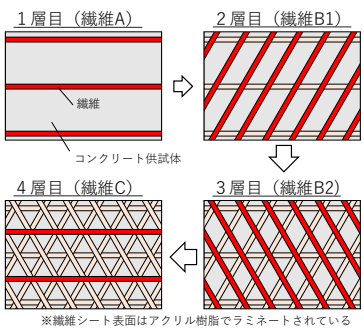


図-2　繊維の積層構造

(3)　本試験で用いる繊維シート系当て板工の概要

本試験では，繊維（単繊維をより合わせた束）が 3 方

向 4 層に網状に積層され，繊維をアクリル樹脂でラミネートした構造を有している繊維シート系当て板工（以下，網状シートと称する）を用いた．網状シートの材料特性を**表-2** に示す．施工工程はコンクリート供試体の下地処理後，接着剤を塗布し，網状シートを貼付する 3 工程で完了する．網状シートの貼付状況と繊維の網状構造をそれぞれ**写真-2**，**図-2** に示す．なお，ひずみゲージの貼付位置は繊維の直上であるが，ひずみゲージの実際の貼付場所は表層のアクリル樹脂上となる．

3. 試験結果

(1) 荷重—変位関係

図-3に各ケースにおける荷重—変位関係を示す．荷重は引張を正とし，グラフには引張側のみ示す．なお，グラフ中の数値は各目地伸縮量における最大荷重の増減率を示している．また，供試体の両側面の変位計の平均値を目地変位として示す．

これをみると，いずれのケースも各目地伸縮量におけ

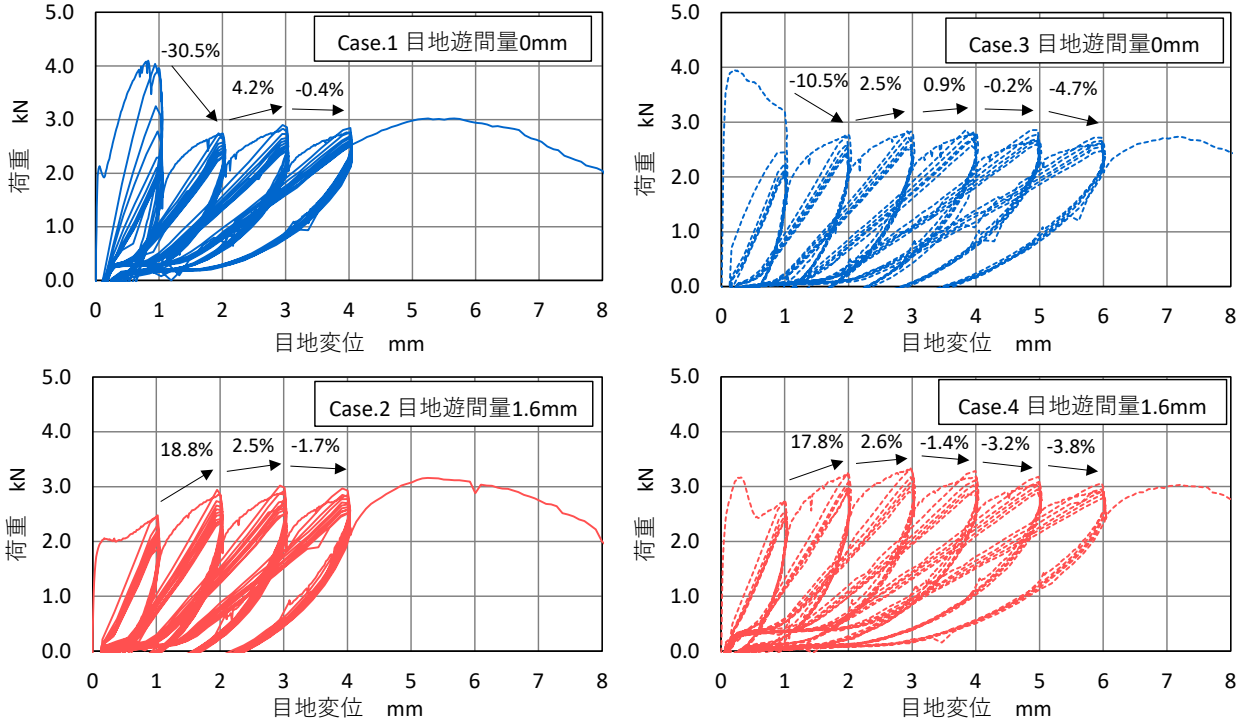
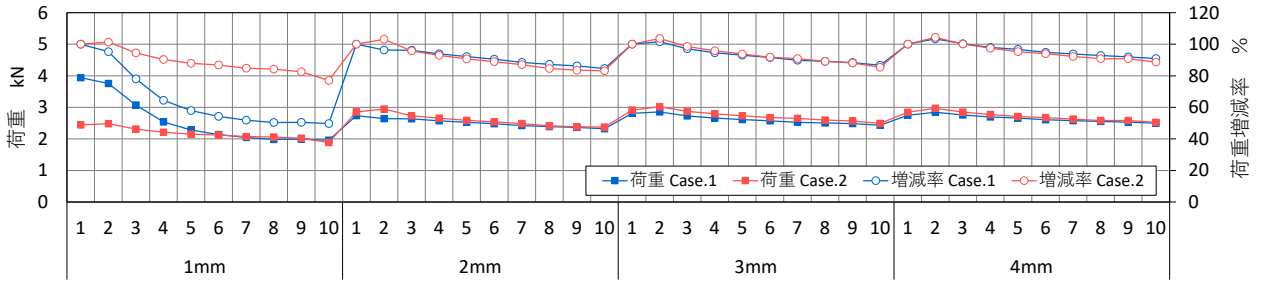
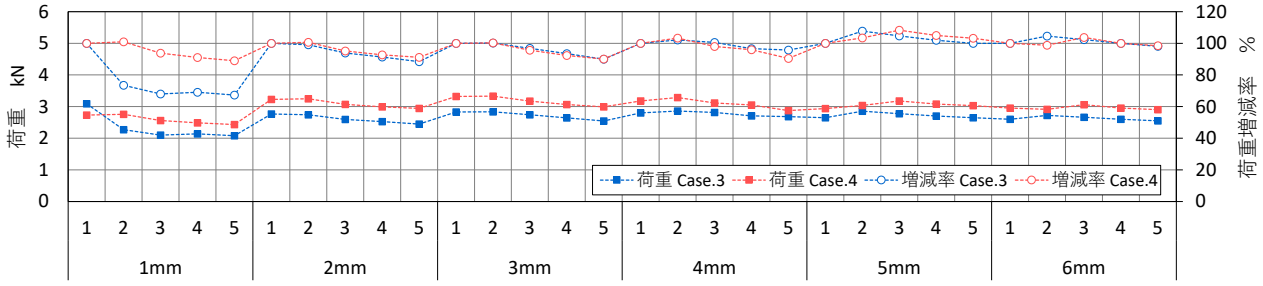


図-3 各ケースにおける荷重—変位関係



a) Case.1，Case.2（繰返しサイクル 10 回）



b) Case.3，Case.4（繰返しサイクル 5 回）

図-4 目地伸縮量毎のサイクル回数における最大荷重と荷重増減率

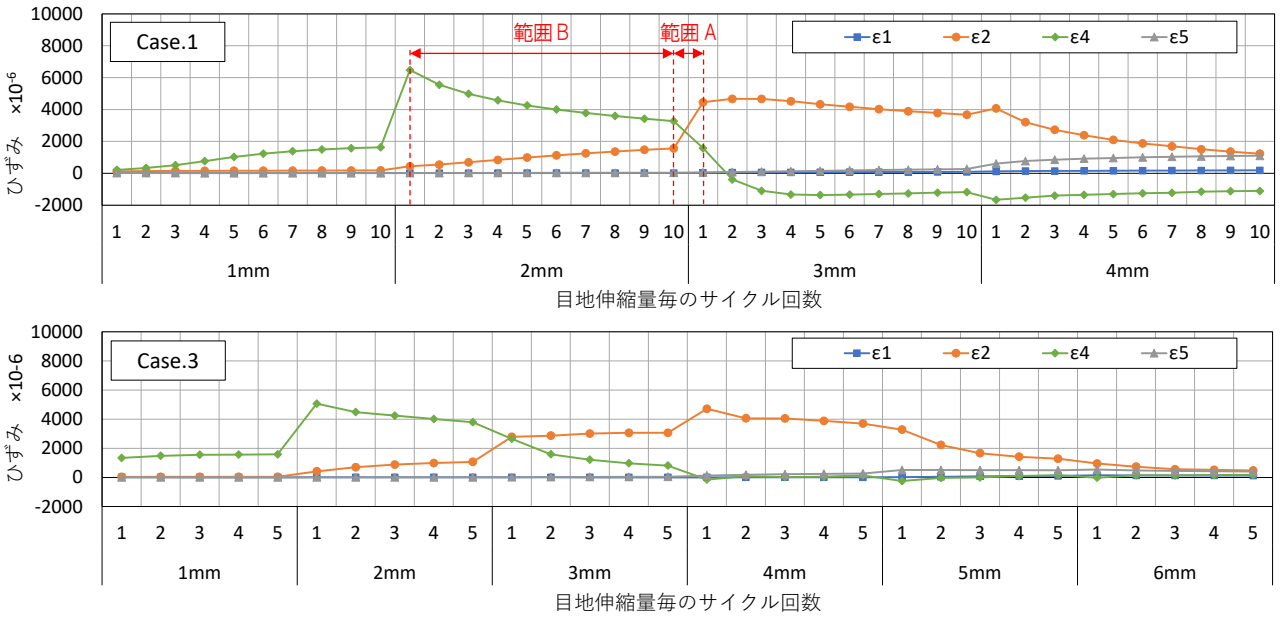


図-5　目地伸縮量毎のサイクル回数における最大ひずみ

る最大荷重は約3 kNを示した．また，繰返し載荷後の単純引張載荷における最大荷重は，いずれのケースも約3kNを示した．

目地遊間量が0mmのCase.1，Case.3では，目地遊間量が1.6mmのCase.2，Case.4よりも，初期荷重値が大きくなった．これは，目地遊間量が小さいため，繊維シートに発生するひずみ量が大きくなるためと考えられる．また，Case.1，Case.2，Case.4では目地伸縮量が3mmを超えると，Case.3では目地伸縮量が4mmを超えると各目地伸縮量における最大荷重値が数%減少する傾向にある．これは，目地伸縮量が大きく，あるいは，サイクル回数が多くなるにつれて，繊維シートの剛性が低下し荷重が小さくなったと考えられる．

したがって，本試験で用いた網状シートでは，目地伸縮量3～4mmが覆工目地部に対する適用範囲と想定される．

(2)　繰返し載荷における最大荷重と荷重増減率

図-4に目地伸縮量毎のサイクル回数における最大荷重と荷重増減率を示す．荷重増減率は，各目地伸縮量における1サイクル目の最大荷重を100%としたときの同目地伸縮量の2～10サイクル目の最大荷重の増減率を示している．

図-4より，各目地伸縮量における最大荷重は，1サイクル目もしくは2サイクル目をピークに，サイクル回数が多くなるほど荷重が減少する傾向がみられた．その減少率は，目地伸縮量1mmのサイクルを除けば，各ケース80～90%である．なお，2サイクル目の方が1サイクル目よりも最大荷重が大きくなるのは，2サイクル目の方が載荷速度が大きいことが影響していると考えられる．

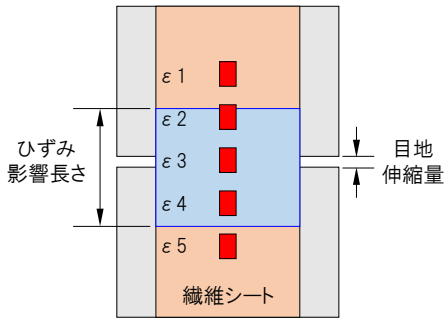


図-6　範囲 A におけるひずみ影響長さのイメージ図

(3)　繰返し載荷における最大ひずみ

図-5に目地伸縮量毎のサイクル回数における最大ひずみを示す．なお，正面側と背面側，サイクル回数が同じCase.1とCase2，および，Case.3とCase.4は，それぞれほぼ同様の傾向を示したことから，**図-5**では，Case.1とCase.3の正面側で計測したひずみを示す．また，**図-1**に示すように，ひずみゲージNo.を供試体の上側から ε 1→ ε 5とする． ε 3は目地の直上に位置し，実験開始とともにひずみ値が計測機器の適用範囲を超過し計測不可となったため，**図-5**には ε 3を除いたひずみを示す．

図-5をみると，いずれのケースにおいても目地伸縮量が大きくなるにつれて， ε 4→ ε 2→ ε 5→ ε 1の順でひずみが増加している傾向がわかる．これは，目地伸縮量が大きく，あるいは，サイクル回数が多くなるにつれて，ひずみの影響範囲が目地部中心からシート端部方向に拡がったと考えられる．さらに，繰返し載荷終了までに発生した ε 1， ε 5の最大ひずみが小さいことから，本試験では，目地伸縮による網状シートに対するひずみの影響範囲は目地から40mm以内に留まっていると想定される．

ここで，繊維シートとコンクリート供試体の付着力で

荷重に抵抗する繊維シートの長さを「ひずみ影響長さ」と定義し，**図-5** Case.1の範囲Aについて考える．範囲Aにおけるひずみ影響長さのイメージ図を**図-6**に示す．このとき，ε2のように，ひずみ影響長さの進展がひずみゲージ周辺であるとき，繊維シートはひずみゲージ周辺で局所的に伸びる挙動となり，ひずみが増加傾向を示す．それに対し，ε4のように，ひずみの影響長さの進展がひずみゲージを通過した後は，ひずみ影響長さが大きくなるほど，ひずみの値は減少傾向となる．

また，一般的に，ひずみは物体の変形前の長さに対する変形量の割合で算出される．**図-5** Case.1の範囲Bにおけるε4に着目すると，サイクル回数が多くなるほど最大ひずみが減少傾向となっている．これは，繊維シートが繰返し伸縮されることでひずみ影響長さが大きくなったのに対し，目地伸縮量が一定であるため，その割合が減少したことから説明できる．

以上より，ひずみの計測結果から，目地伸縮量が大きく，あるいは，サイクル回数が多くなるほどひずみ影響長さが目地部中心からシート端部方向へ拡がっていくことがわかった．

(4) 単位繊維荷重による検討

網状シートは，シートを形成する各繊維が独立して挙動し荷重を受け持つ特徴を有している[4]ことから，繊維強度×繊維本数でシート耐力を評価できると考えられる．そこで，本試験とJIS A 1191[5]による引張試験（以下，JIS試験と称する）の荷重値を比較するため，単位繊維荷重（荷重／有効繊維本数）を算出した．ここで，有効繊維とは，載荷方向に挙動し荷重を受け持つ繊維の本数（目地を跨ぐ繊維の本数）であり，**図-1**におけるA繊維とC繊維にあたる．なお，B1繊維，B2繊維は荷重に対して与える影響が少ないと判断し有効繊維とみなさないこととした．このとき，有効繊維本数は，本試験は24本，JIS試験は2本である．

図-7に各ケースにおける繰返し載荷終了後の単純引張載荷による最大単位繊維荷重を示す． なお，グラフ中の数値はJIS試験の最大単位繊維荷重を100%としたときの各ケースの最大単位繊維荷重の割合を示している．これをみると，最大単位繊維荷重は，Case.1，Case.2，Case.4ではJIS試験と比べて91%以上の値を示したのに対し，Case.3ではJIS試験と比べて82.7%とやや値が小さくなった．

したがって，Case.1，Case.2のように目地伸縮量4mmまで繰返し載荷を行った後の最大単位繊維荷重は，JIS試験と同程度の値であったことが確認できた．ただし，JIS試験は，繊維シートの自由長が150mmであり，本試験の目地遊間量に対しかなり大きい値であることに留意が必要である．

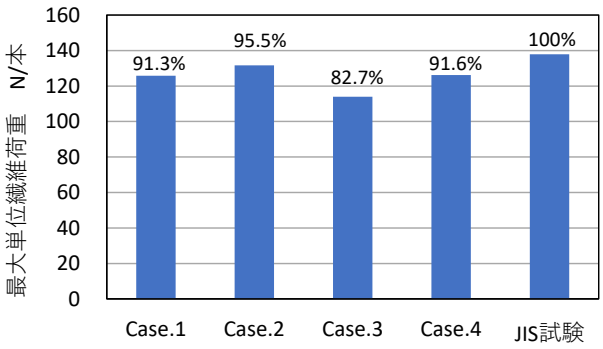


図-7 各ケースにおける繰返し載荷終了後の単純引張載荷による最大単位繊維荷重

4. まとめ

覆工目地部の伸縮に対する繊維シート系当て板工の適応性について，網状シートによる繰返し載荷試験を実施した結果，得られた知見を以下に示す．

- 各目地伸縮幅における最大荷重値はいずれのケースでも概ね同等となったが，目地伸縮量が3mm，4mmを超えると各目地伸縮量における最大荷重値が数%減少する傾向にあった．さらに，目地伸縮量4mmをまで繰返し載荷を行った後の最大単位繊維荷重は，JIS試験と同程度の値であったことから，本試験で用いた網状シートでは，目地伸縮量が3～4mm程度が覆工目地に対する適用範囲と想定される．
- 各目地伸縮量における最大荷重は，1サイクル目もしくは2サイクル目をピークに，サイクル回数が多くなるほど荷重が減少する傾向がみられた．
- ひずみの計測結果から，目地伸縮量が大きく，あるいは，サイクル回数が多くなるほどひずみ影響長さが目地部中心からシート端部方向へ拡がっていくことがわかった．
- 本試験の結果，目地伸縮による網状シートに対するひずみの影響範囲は目地から40mmの範囲と想定されるため，覆工目地部に対して網状シートを適用する場合の最低限必要な定着長は80mm程度と想定される．

今後，材料特性の異なる様々な仕様のシートでの実験，試験施工等によりデータを蓄積し分析を行っていく必要がある．

参考文献

1) 森本智，日下敦，吉岡知哉，長谷川慶彦：道路トンネルにおける材質劣化に起因する変状実態に関する一考察：トンネル工学報告集，第 28 巻，Ⅰ-17，2018.11
2) 坂本昇，日下敦，前田洸樹，砂金伸治，石村利明，森本智：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一考察，トンネル工学報告集，第 29 巻，Ⅰ-12，2019.11
3) 公益社団法人日本道路協会：道路トンネル維持管理

便覧【本体工編】，平成 27 年 7 月
4) 前田洸樹，森本智，日下敦，石村利明，加古昌之：破壊形態に応じたシート系はく落防止対策工の耐力評価に関する研究，土木学会第 75 回年次学術講演会，VI-740，2020.9
5) 日本工業規格 JIS A 1191：2004，コンクリート補強用連続繊維シートの引張試験方法

（2020 8.7受付）

AN EXPERIMENTAL STUDY ON ADAPTABILITY OF RETICULATED FIBER SHEET TO EXPANSION AND CONTRACTION OF LINING JOINT

Koki MAEDA, Satoshi MORIMOTO, Atsushi KUSAKA,
Toshiaki ISHIMURA and Masayuki KAKO

Most of the peeling caused by the deterioration of the material occur at the lining joint and the crown. The lining joint expands or contracts by about 2 mm per year due to annual temperature changes. In response to such expansion and contraction of lining joints, in the Road Tunnel Maintenance Manual in Japan, in the case of constructing a fiber sheet across the lining joints, in order to reduce the effect of expansion and contraction of the lining joint, it is necessary to provide a free length of about 20 cm or more and a fixed length of about 15 cm outside it. However, there are cases in which cracks occurred in the seat due to expansion and contraction of the lining joint even with a free length structure. Therefore, there remains a problem in applying the fiber sheet to the expansion and contraction of the lining joint. In this study, repeated loading tests were conducted to simulate the expansion and contraction of lining joints in order to obtain basic data on the applicability of the expansion and contraction of lining joints of fiber sheets. In this paper, we report the results of evaluating the deformation characteristics of reticulated fiber sheets under repeated loading.