

# 網状の繊維シートを用いたはく落防止対策工の耐力評価に関する一考察

森本 智<sup>1</sup>, 前田 洸樹<sup>2</sup>, 日下 敦<sup>3</sup>, 石村 利明<sup>4</sup>, 加古 昌之<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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

<sup>2</sup>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

<sup>3</sup>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

<sup>4</sup>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

<sup>5</sup>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

本研究では、従来から適用実績が多い炭素繊維と比較して、網状に形成した繊維の目付量が少ないシート系当て板工の耐力評価に関する基礎資料を得ることを目的として押抜き試験を実施するとともに、押抜き試験の結果について、変形特性や耐荷特性、破壊形態等の分析および単位繊維荷重に着目したシート耐力の評価方法について分析した。その結果、網状に形成した繊維の目付量が少ないシート系当て板工は、従来工法と比べ変形特性や耐荷特性、破壊形態等が異なること、網状シートのような繊維の編込み構造を有するシートでは、各層の繊維が独立した挙動を示し、繊維それぞれの破壊形態が異なること等が知見として得られた。これらの結果から、このような破壊形態を示すシート系当て板工に対しては、単位繊維強度に着目することにより、シート耐力を評価できる可能性等が示唆された。

**Key Words:** road tunnel, lining concrete, maintenance, repair sheet

## 1. はじめに

国内の道路トンネルは2017年4月には箇所数10,600, 総延長4,490kmに達し、供用後30年以上経過したトンネルは約60%存在している。このような状況のなか、道路トンネル定期点検要領<sup>1)</sup>に基づいた点検による既往の点検結果の分析によれば、早急に補修・補強といった対策が必要なトンネル(健全性がⅢまたはⅣ相当)は全体の3割以上存在する報告<sup>2)</sup>もある。

山岳トンネル工法(いわゆるNATM)により建設された道路トンネルに発生するうき・はく離の面積は、0.2m<sup>2</sup>以下の小規模のものが多く報告<sup>3)</sup>されている。はく落防止対策工においては、対象とするはく落塊の規模を限定して適切に設定することにより、経済性や施工性等の向上が期待される。一方、使用する材料の強度特性や繊維の構造等によっては、変形特性や耐荷特性、破

壊形態等について従来工法とは異なる特性を示す可能性が考えられる。

本研究では、従来から適用実績が多い炭素繊維と比較して、網状に形成した繊維の目付量が少ないシート系当て板工の耐力評価に関する基礎資料を得ることを目的として押抜き試験を実施した。本稿では、押抜き試験の結果について変形特性や耐荷特性、破壊形態等の分析および単位繊維荷重に着目したシート耐力の評価方法について分析した結果を報告する。

## 2. 試験方法

押抜き試験は、はく落塊を模した押抜き部を設けたコンクリート供試体(押抜き部はφ500mmまたはφ100mmで、5mm厚の型枠を設けて打設しコンクリート供試体と分離している)の上面に、はく落防止対策工

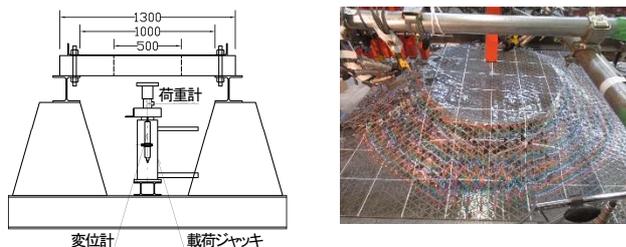


図-1 試験治具

写真-1 試験状況

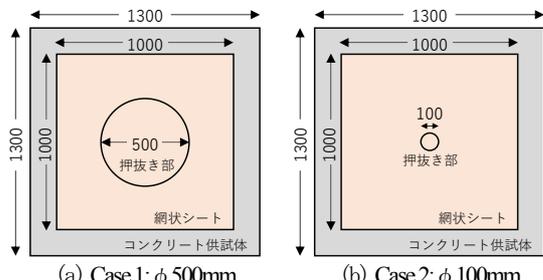


図-2 各ケースの供試体寸法 (単位: mm)

表-1 網状シート

網状シート	繊維目付 (g/m <sup>2</sup> )	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張弾性率 (N/mm <sup>2</sup> )
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/mm <sup>2</sup>	30.0N/mm <sup>2</sup>	10.0N/mm <sup>2</sup>

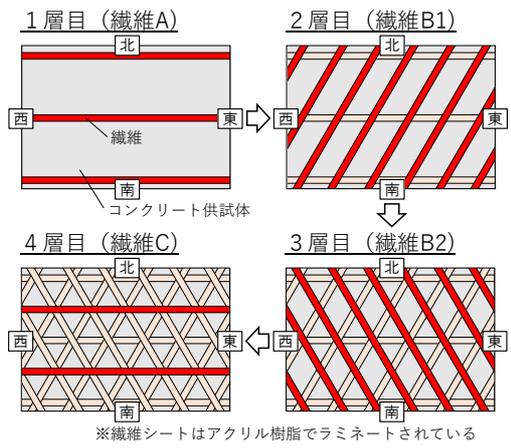


図-3 網状シートの編み構造



写真-2 網状シートの貼付け状況

を設置し、下側から油圧ジャッキを用いて変位制御により荷重した (図-1, 写真-1)。

試験条件は円形の押抜き部の直径 (押抜き径: φ) を 2 種類設定し、Case.1 は φ 500mm, Case.2 は φ 100mm とした (図-2)。荷重速度は、変位量 2mm までは 0.2mm/min とし、変位量 2mm 以降は 1.0mm/min とした。

本実験で用いたはく落防止対策工は、繊維が 3 方向 4 層に網状に積層 (図-3) 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 (以下、「網状シート」と称する)。網状シートの材料特性を表-1 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 (写真-2)。計測項目は押抜き部の荷重 (押抜き荷重: P(kN)) と押抜き部の変位 (押抜き変位: δ (mm)) とした。観察は網状シートのはく離状態等について変位量が 2mm 増加する毎に 2 分間で行い、その間には変位量を保持した。

### 3. 試験結果

#### (1) 荷重と変位関係と破壊形態

押抜き変位と荷重の関係を図 4 (Case.1), 図-5 (Case.2) にそれぞれ示す。これらの図には有効繊維本数と網状シートの挙動を 4 つの段階に区分してあわせて示す。有効繊維本数とは、押抜き部と供試体をつなぎ、耐力として有効に機能している繊維の本数であり、目視

観察により破断を確認した場合はその本数を減じた。網状シートの挙動の段階とは、【段階 1】は荷重開始から繊維と接着材のはく離を確認するまでの段階、【段階 2】は繊維と接着剤が一体となってはく離している段階、【段階 3】は繊維がはく離している段階、【段階 4】は荷重が大きく低下し実験を終了するまでの段階とした (写真-3)。

Case.1 における押抜き変位と荷重の関係 (図-4) は、段階 1 で最大荷重値を示したが、この値は押抜き部と供試体の隙間に接着剤が流入したためと考えられることから考察からは除外する。段階 2 での荷重値は 4.0kN から上昇し 6.0kN で最大値となった。これは、接着剤の塗膜厚が均一でなくムラが発生してしまい部分的に多く塗布されていた箇所において繊維と接着剤が一体となって抵抗したためと考えられる。段階 3 での荷重値は、押抜き変位の増加に伴い荷重は微増あるいは横ばいとなった。網状シートの挙動を確認すると、変位量が 55mm で一部の繊維の破断が押抜き部の近傍や繊維の中間等で確認され、変位量が 92mm で一部の繊維が端部まではく離し、変位量が 110mm で多くの繊維が端部まではく離し試験を終了した。Case.2 においても図-5 に示すとおり、挙動の傾向は概ね同様の結果となった。

網状シートの特徴として、押抜き変位量の増加により繊維が独立して挙動する変形特性を示し、はく離が進展しても荷重の変化は限定的となる耐荷特性を示した。ま

た、破壊形態は表-2に示すとおり、繊維の部分的な破断が確認され、その位置は押抜き部の近傍や繊維の中間等であった(破壊①)。また、一部の繊維は先行してはく離が進展(破壊②)する形態を示した。これらの挙動は、炭素繊維を用いた従来工法とは異なる結果となった。既往の研究<sup>9)</sup>では、変位量の増加に伴い、炭素繊維シートのはく離が概ね均等に進展し、荷重が増加していく挙動が確認されていることから、網状シート of 破壊形態は従来工法と異なっているといえる。

## (2) 単位はく離強さによる評価

図-6に単位はく離強さと変位の関係を示す。単位はく離強さは押抜き荷重をはく離周長で除した値とし、はく離周長は繊維のはく離が確認された箇所を結んだ周長とした。両ケースとも押抜き変位の増加とともに単位はく離強さが減少する傾向に加え、減少の程度はCase.1と比較しCase.2が大きく、押抜き径の大きさによって単位はく離強さの値が異なる結果となった。従来工法では単位はく離強さによる耐力評価が示されている<sup>9)</sup>が、網状シートでは単位はく離強さにより耐力を評価することが難しいことがわかった。さらに、網状シートの破壊形態は、繊維の編み込み構造によっても異なると想定されることから、従来工法と異なる新たなシート耐力の評価方法について検討するため、繊維の編み込み構造の違いによる破壊形態について分析した。

## (3) 繊維の編み込み構造による破壊形態

図-3に示す繊維A~Cそれぞれの剥離を、図-7に示すはく離A~Cと定義し、それぞれのはく離長さ(押抜き圧子境界から繊維はく離先端位置までの距離)を算定することで、各繊維のはく離挙動を分析した。以下に図-7におけるはく離A~Cの設定について詳述する。

【はく離A】①層目(繊維A)の横断方向のはく離長さ(東方向、西方向)の平均はく離長さ

【はく離B】②, ③層目(繊維B)の縦断方向のはく離長さ(南方向、北方向)の平均はく離長さ

【はく離C】④層目(繊維C)の横断方向のはく離長さ(東方向、西方向)の平均はく離長さ

図-8にはく離長さを示す。Case.1では、繊維Aの破断に伴いはく離Aの進行が止まり、その後、はく離Cが進行して繊維Cが端部はく離、やや遅れてはく離Bが進行した。Case.2では、繊維A,Bの破断が生じ、それぞれはく離A,Bの進行が止まるが、はく離Cは試験終了まで進行した。また、いずれのケースも、はく離C>はく離B>はく離Aの順ではく離長さおよびはく離の進行度合いが大きく、繊維Cは破断に至らなかった。

以上より、各繊維が独立した挙動を示し、編み込み構造の違いによって破壊形態が異なることがわかった。

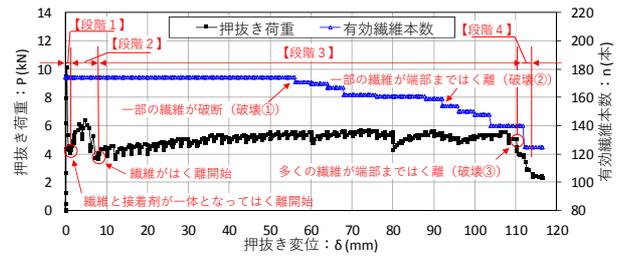


図-4 押抜き変位-荷重等の関係 (Case.1: φ 500mm)

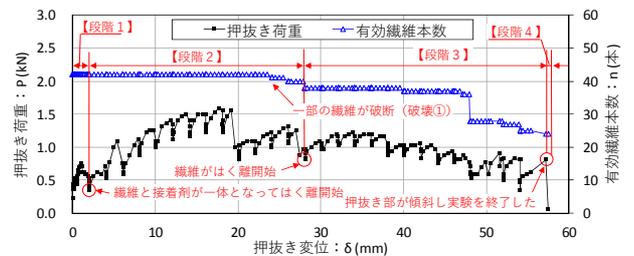


図-5 押抜き変位-荷重等の関係 (Case.2: φ 100mm)



(a)段階2の状態 (b)段階3の状態

写真-3 はく離状況

表-2 破壊形態

破壊① 一部の繊維が破断	破壊② 一部の繊維が端部まではく離	破壊③ 多くの繊維が端部まではく離

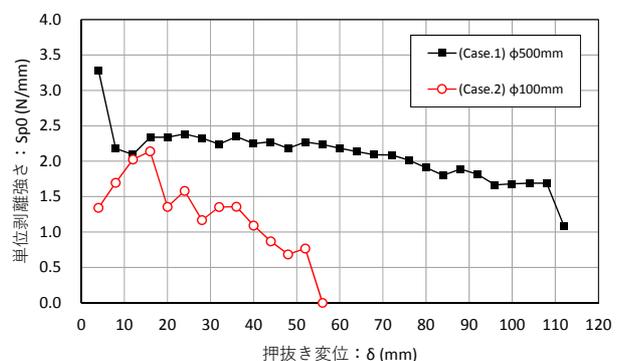


図-6 単位はく離強さと変位の関係

#### (4) 単位繊維荷重によるシート耐力評価

上記のような破壊形態より、各繊維が独立して挙動し荷重を受け持つことから、繊維強度×繊維本数でシート耐力を評価できると考え、単位繊維荷重（押抜き荷重  $P$  / 有効繊維本数  $n$ ）を算出して各ケースで比較を行った。ここで、有効繊維本数は前述したとおり、押抜き部と供試体をつなぐ繊維の本数であり、1本破断あるいは端部はく離するごとにマイナス1本となる。すなわち、耐力力として有効に機能している繊維の本数である。

図-9に単位繊維荷重と変位関係を示す。繊維のみはく離進展する区間では、いずれのケースも概ね 20~35 N/本で推移しており単位はく離強さの結果（図-6）とは異なりケース間で大きく差が生じていない結果となった。

以上より、シートの仕様によっては単位繊維強度に着目することによりシート耐力を評価できる可能性が示唆された。

#### 4. おわりに

従来工法と比較して、網状に形成した繊維の目付量が少ないシート系当て板工の耐力を評価することを目的に、押抜き試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 網状に形成した繊維の目付量が少ないシート系当て板工は、従来工法と比べ変形特性や耐荷特性、破壊形態等が異なることが明らかとなった。
- 2) 接着剤の塗膜厚が均一でなくムラが発生した場合は、はく離の挙動が異なるため、母材の表面を平滑に整えるなどの配慮が必要となる。
- 3) 網状シートのような繊維の編込み構造を有するシートでは、各層の繊維が独立した挙動を示し、繊維それぞれの破壊形態が異なる。このような破壊形態を示すシートに対しては、シートの仕様によっては単位繊維強度に着目することによりシート耐力を評価できる可能性が示唆された。

今後は、トンネル合理的な補修・補強工の設計方法の確立とともに、施工性・維持管理性の優れた技術の改良・開発および評価について検討していく必要があると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領，平成31年2月
- 2) 国土交通省道路局国道・技術課：道路トンネル定期点検要領，平成31年3月

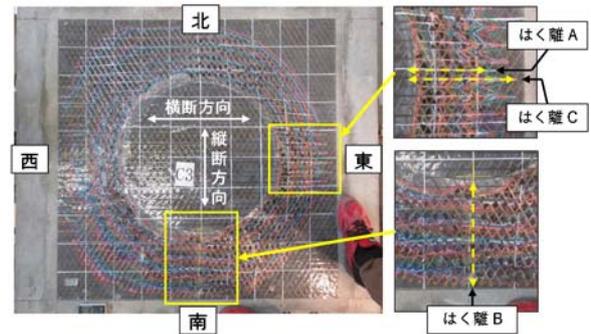
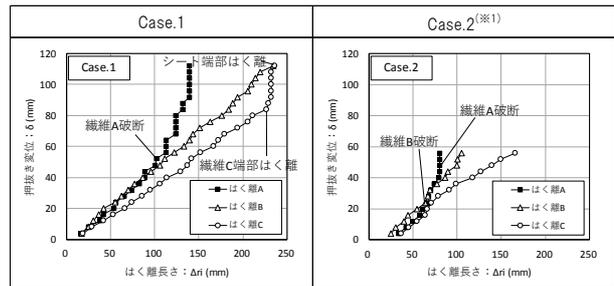


図-7 はく離の設定



※1：押抜き圧子が傾き、供試体に接触した時点で試験を終了した。

図-8 はく離長さ

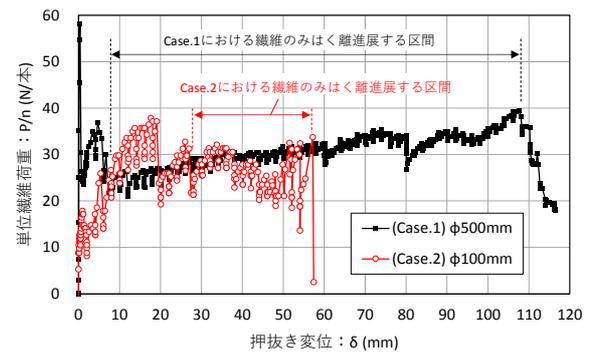


図-9 単位繊維荷重と変位の関係

- 3) 国土交通省道路局：道路メンテナンス年報【参考資料2】，平成28年9月  
[http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01\\_sg\\_000312.html](http://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/road01_sg_000312.html)(参照日令和元年8月)
- 4) 森本智，日下敦，吉岡和哉，長谷川慶彦：NATMにより建設された道路トンネルにおける材質劣化に起因する変状の実態，土木技術資料，第61-4巻，pp.24-27，平成31年4月
- 5) 石村利明，真下英人，箱石安彦：既設トンネルのはく離防止対策工の耐力評価に関する一考察，土木学会トンネル工学報告集，第14巻，pp.325-330，平成16年11月
- 6) TCS 研究会：FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル，平成15年5月

(2020. 8. 7 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON PERFORMANCE  
EVALUATION OF RETICULATED FIBER SHEET REPAIR MATERIAL

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

In this study, we carried out a punching test for the purpose of obtaining the basic data on the performance evaluation of reticulated fiber sheet repair material. As a result, it was found that reticulated fiber sheet repair material had different deformation characteristics, load-bearing characteristics, and fracture forms compared with the conventional fiber sheet. The reticulated fiber sheet repair material may be able to evaluate the sheet yield strength by focusing on the unit fiber strength.