

繊維シートを適用したトンネル覆工 コンクリートのつま部のはく落現象の防止

Prevention of an exfoliation phenomenon of tunnel cover lining concrete
joint part which applied fiber sheet

山本一也¹, 木村定雄², 宇野洋志城³

Kazuya Yamamoto, Sadao Kimura, Yoshiki Uno

¹ 金沢工業大学大学院 工学研究科環境土木工学専攻 (921 - 8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7 - 1)

E-mail:kazurera-y@eagle-net.ne.jp

² 金沢工業大学教授 環境・建築学部環境土木工学科 (921 - 8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7 - 1)

E-mail:s.kimura@neptune.kanazawa-it.ac.jp

³ 佐藤工業株式会社 技術研究所 (243 - 0123 神奈川県厚木市森の里青山 14 - 10)

E-mail:uno@satokogyo.co.jp

Between cover mechanic concrete joint parts of mountains tunnel, it is reported that there are some crescent exfoliation phenomenon. Therefore, I considered undergrounding fiber sheet in the outer layer of each cover mechanic concrete to prevent exfoliation. This report examined performance to prevent exfoliation of concrete with fiber sheet by various experiments.

Key Words: Prevention of an exfoliation phenomenon, Operational risk, Fiber sheet, Mountains tunnel,

1. はじめに

トンネルの供用年数の増加にともなって、覆工コンクリートの一部がひび割れやはく離・はく落するなどの現象が生じる可能性が高まっている。とりわけ、山岳トンネルの覆工コンクリートでは、継目部のつま部において、三日月形のはく落現象の事例が幾つか報告されている¹⁾。図-1 はつま部を模式的に示したものである。つま部のはく落現象の原因は、コンクリートの経年劣化のみならず、コンクリートの強度が十分に発現していない状態でセメントを移動し、覆工コンクリートの自重によってひび割れが生じること¹⁾や型枠移動による偏荷重が作用すること²⁾などによって初期欠陥が内在することによるものと想定される。一方、道路や鉄道などの有人トンネルにおいては、利用者の安全性を確保する観点から、はく落現象の防止はとくに

重要³⁾と考えられ、はく落を確実に防止することが課題となってきた。さらに、トンネル安全問題検討会報告書⁴⁾では目視・打音の両検査から打継目のつま部にはく落のおそれがあるため、点検しなければいけないとしている。これらのことから、本研究では山岳トンネルの覆工コンクリートのつま部のはく落を防止するためのリスク低減技術を考察することを目指した。

はく落の対策方法のひとつとして、著者らは繊維シートをあらかじめ埋設する工法を開発⁵⁾している。東京メトロ地下鉄13号線では、セグメント内表面にあらかじめ埋設したガラス繊維シート付きセグメント(EXPセグメント)によりはく落を防止する新技術の実施工⁶⁾がなされている。そこで、本研究では、これを参考に、無筋覆工コンクリートのつま部のコンクリート片のはく落を確実に防止することを目的として、覆工コンクリートの表層部に繊維シートをあらかじめ埋設するこ

とを考えた。

本報告は繊維シートによるコンクリート片のはく落に対する防止性能について、各種実験(曲げ靱性試験、押抜き実験)により確認した結果を述べたものである。

2. 実験概要

(1) 実験概要

表 - 1 に曲げ靱性試験および押抜き実験の実験項目とその目的を示す。繊維シート補強の基本特性を曲げ靱性試験から確認し、押抜き実験によって覆工コンクリートのつま部のはく落を防止するための性能を確認した。

(2) 繊維シートの性能および覆工コンクリートコンクリートの配合

本実験で使用した繊維シートの素材は耐アルカリガラス繊維シート（以下、繊維シートとよぶ。）とした。表 - 2 は実験に使用した繊維シートの概略特性を示したものであり、写真 - 1 はその状況を示したものである。この繊維シートはシールドトンネルのコンクリート系セグメントですでに実績^{6),7)}があることから、本実験においてもこれを採用した。また、繊維シートの格子サイズは、筆者らが過去に押抜き実験で繊維シートのはく落防止性能⁷⁾を確認しており、本実験においても同じサイズの7mm×5mm（芯10mm×10mmの格子）を採用した。

表 - 3 は供試体作成に用いたコンクリート配合を示したものである。使用したコンクリートの配合は、覆工コンクリートの配合実績⁸⁾を参考にして、水セメント比が60%、設計基準強度を21N/mm²とした。なお、使用したセメントは高炉セメントである。また、曲げ靱性試験および押抜き実験に用いる供試体寸法の違いからG_{max}はそれぞれ40mm および20mm とした。

(3) 曲げ靱性試験概要

繊維シート補強の基本特性を調べるため、曲げ靱性試験を実施した。図 - 2 は曲げ靱性試験の載荷状況を示し、図中の赤線は繊維シートの埋設位置を示す。曲げ靱性試験に用いた供試体の形状寸法は150×150×530mm であり、供試体下面部に繊維シートを埋設した。また、中央の鉛直変位を精度よく測定するため、供試体にコマを接着させて変位計をとりつけた。

曲げ靱性試験方法は繊維補強覆工コンクリートの曲げ靱性試験方法⁹⁾を採用した。ただし、供試体底面に繊維シートを配置しているため、載荷面はコンクリー

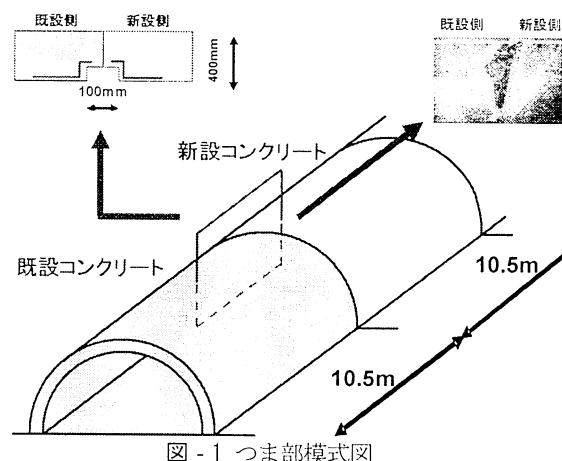


図 - 1 つま部模式図

表 - 1 曲げ靱性試験および押抜き実験の確認項目

実験項目	実験目的	測定項目	試験後の項目
曲げ靱性試験	基本特性の把握	荷重と補正中央たわみ	破壊状況
押抜き実験	はく落防止性能の把握	荷重と抵抗の変位	耐荷力

表 - 2 実験に使用した繊維シートの概略特性

引張強度 (kg/mm ²)	引張弾性率 (kg/mm ²)	破断伸度 (%)	単繊維直径 (%)	密度 (%)
350～360	7400～7500	4.8	8～12	2.6

表 - 3 供試体作成に用いたコンクリート配合

	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						
					W	C	S				Ad
							S1	S2	G1	G2	
曲げ靱性試験	40	15±2.5	60	47.1	166	277	690	173	585	390	2.77
押抜き実験	20	15	60	49	165	277	634	265	692	232	2.75

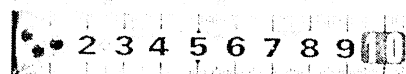


写真 - 1 耐アルカリ繊維ガラスシート

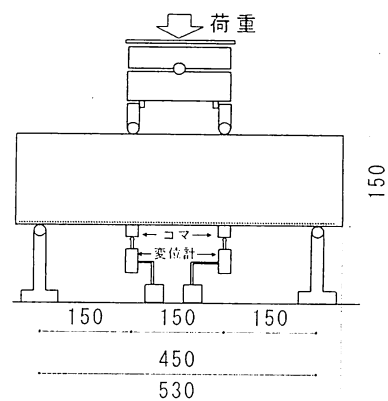


図 - 2 曲げ靱性試験の載荷状況

ト打設面とした。なお、コンクリートの平均圧縮強度は 24.6N/mm^2 であった。

(4) 押抜き実験の概要

山岳トンネルの覆工コンクリート天端のつま部周辺のはく落に対して、繊維シートの効果を確認するために、押抜き実験を実施した。押抜き実験に用いた供試体の形状寸法は $710\times500\times60\text{mm}$ であり(写真-2参照)、覆工コンクリートのつま部天端を想定したことから覆工内表面を想定した下面部に繊維シートを埋設した(写真-3参照)。写真-4に繊維シートの埋設状況を示す。

表-4に押抜き実験の供試体名および諸元を示す。表中の赤線は繊維シートを表している。繊維シートの配置は、実際の埋設イメージから定めた。表中に示すように繊維シートの配置パターンは、継目部の溝を囲むものと、そうでないものを設定した。また、つま部の形状は導水溝を考慮したことから箱型を採用した。なお、比較のために繊維シートのないケース(SN)、既設と新設に跨がって繊維シートが埋設されるケース(SA)を設けた。なお、本実験ではつま部を跨ぐ既設と新設のコンクリートは同時に一体化して打設した。

押抜き形状は円形および三日月形をモデル化した半円形とした(写真-2参照)。また、その寸法は表-4中に示したとおりである。

コンクリートを部分的に押し抜くため、供試体作成時に、所定の形状に応じた切込みを設けた。すなわち、型枠内のコア導入部にプラスチック板とそれを固定する型を設置(写真-5参照)し、型枠内にコンクリートを投入した。次に、時間を置いて型を引抜き、その部分にコンクリートを投入した。その後、プラスチック板を引抜くことで上方から5mmのかぶりを残し、円形型および半円形型の切込みを設けた。

写真-6は押抜き実験の載荷状況を示したものである。支間長は550mmとし、コア部を上方から押抜いた。押抜き実験方法は、はく落防止の押抜き試験方法¹⁰⁾を参考にした。押抜き実験では荷重と抵抗変位量を計測して、これら両者の関係から、はく落防止性能を評価した⁷⁾。載荷速度は 0.5mm/min とし、変位制御で荷重がゼロになるまで載荷した⁷⁾。その際、押抜き抵抗変位量が5mm増すごとに下面の状況を確認し、最終的なはく落段階で繊維シート表面からのはく落面積の周長を測定した。ここで、抵抗変位量とは、コンクリートの押抜き部の鉛直変位量のことであり、繊維シートの抵抗力によって計測できる変位量である。なお、押抜き実験時のコンクリート平均圧縮強度は 34.3N/mm^2 であった。

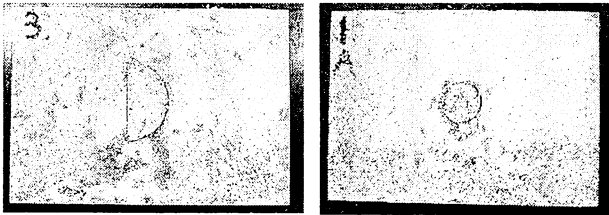


写真-2 供試体上面の状況

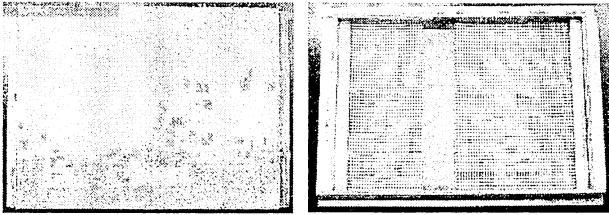


写真-3 供試体下面の状況

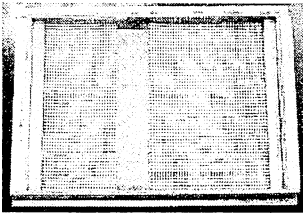


写真-4 繊維シートの埋設状況

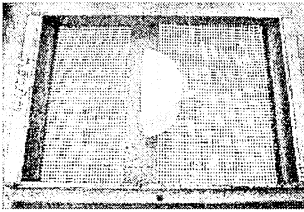


写真-5 コア導入状況

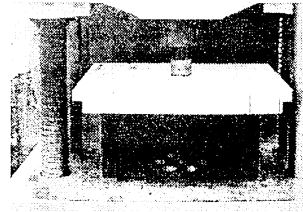


写真-6 押抜き状況

表-4 押抜き実験の供試体名および諸元

供試体	つま部繊維シート配置イメージ図	供試体側面および上面	供試体	つま部繊維シート配置イメージ図	供試体側面および上面
SN			SC		
SA			SD		
SB			SE		



写真-7 曲げ靱性試験状況



写真-8 試験終了後の状況

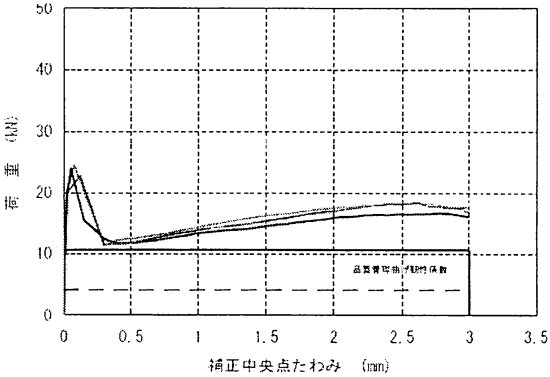


図-3 曲げ靱性試験結果

3. 曲げ靱性試験結果および考察

曲げ靱性試験の実施状況と試験後の繊維シートの変形状況を写真-7,8に示す。また、曲げ靱性試験結果を図-3に示す。覆工コンクリート塊のはく落に対して有効な曲げ靱性係数を 1.40N/mm^2 以上を基準¹⁰⁾とした。本試験から得られた曲げ靱性係数は、平均で 2.02N/mm^2 であった。また、すべてのケースで 1.40N/mm^2 以上を満足していた。さらに、曲げ最大荷重以降においても耐荷力を有していた。したがって、繊維シートを埋設したコンクリートの曲げ靱性は、コンクリート塊のはく落を防止するための素材として十分な効果があると考えられる。

4. 押抜き実験の結果および考察

(1) 繊維シートのはく離状況

写真-9は繊維シートの鉛直変位段階ごとのはく離状況を示したものである。また、写真中には押抜き段階時の抵抗変位量もあわせて示してある。なお、抵抗変位量 33.612mm は荷重が抜け、ゼロになった抵抗変位量である。

押抜き実験ではコンクリートコアが傾いた状態で押し抜かれたことによって、コンクリートコアが新設コンクリートに接触し、新設コンクリートにはく離がみられた。これはコンクリートコアが偏心したためだと考えられる。そこで、抵抗変位はこれを考慮し、載荷装置で計測された平均的な変位量としている。

(2) 押抜き荷重に対する抵抗変位と耐荷力

押抜き実験により得られた荷重と抵抗変位量の関係を図-4～図-6に示す。図中の赤線は荷重 1.5kN 、水色線は荷重 0.5kN を示す。また、図中には押抜き後の最終的な抵抗変位量、荷重が 0.5kN の抵抗変位量および繊維シートのはく離面積をあわせて示してある。また、必要なのはく落防止性能を判断するための基準は連続繊維シート接着の押抜き試験方法によるものとし、変位 10mm で最大荷重 1.5kN 以上⁹⁾とした。

繊維シートのないケース(SN)はコンクリートコアが押抜かれると同時に耐荷性を失った。一方、つま部を跨いで繊維シートを埋設したケース(SA)は、繊維シートの効果で耐荷力が大きく、かつ抵抗変位量が 50mm 程度得られた。なお、繊維シートのないケース(SN)では連続繊維シート接着の押抜き試験方法の基準⁹⁾を満足しなかったが、繊維シートを埋設したケース(SA)では満足した。このことから、つま部に繊維シートを埋設することがはく落に対して有効であると考えられる。図-5は繊維シートの配置パターンが異なるケース、

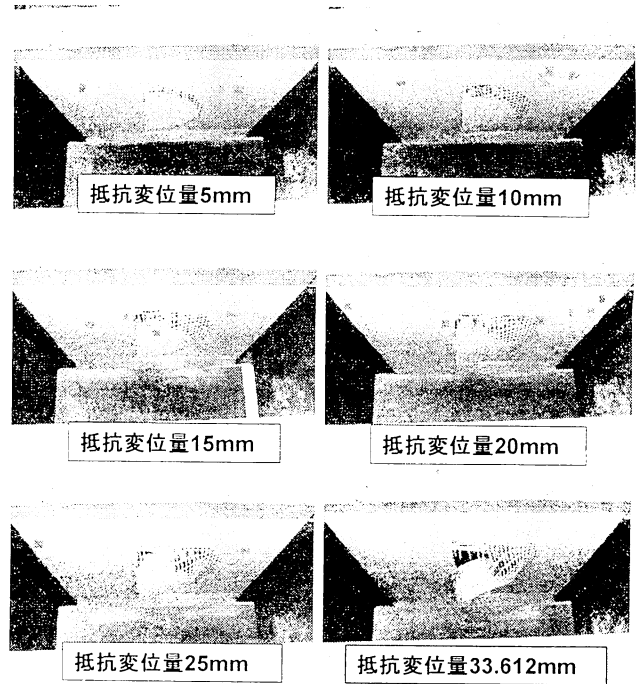


写真-9 はく離状況 (SC)

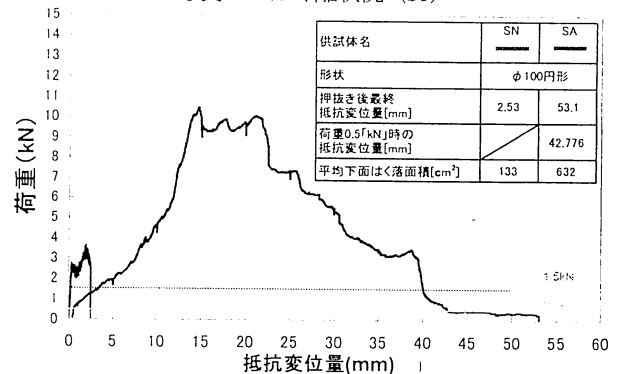


図-4 円形型押抜き形状の荷重と抵抗変位量の関係

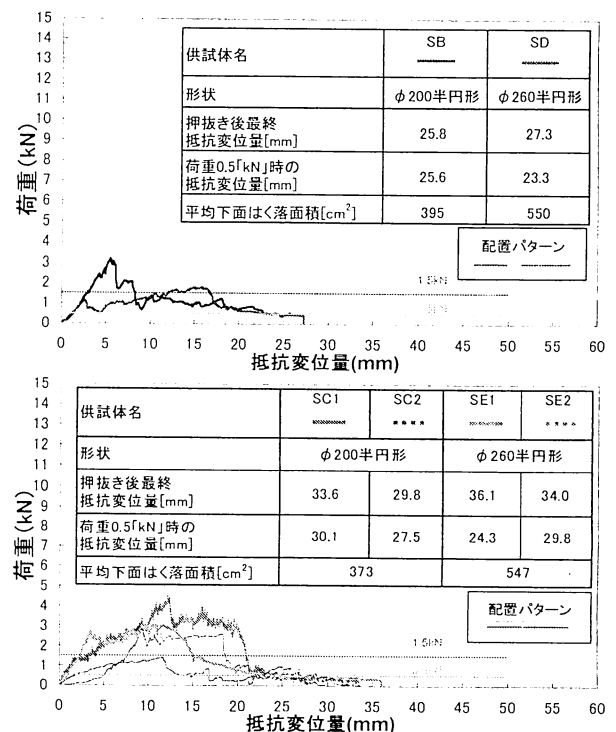


図-5 荷重と抵抗変位量の関係(繊維シート配置パターン)

図-6 は押抜き形状寸法が異なるケースをまとめたものである。図-5 をみると、つま部で分離されたケースのうち隙間が狭いケース (SC, SE) が隙間の広いケース (SB, SD) に比べて抵抗変位量が 5mm 程度大きくなった。

また、はく落段階前に 0.5kN を保持する能力は、隙間の狭いケース (SC, SE) の方が、隙間の広いケース (SB, SD) に比べて大きくなった。一方、図-6 をみると、形状や寸法の大きさにかかわらず、抵抗変位量および耐荷性に大きな差は認められなかった。

図-5、図-6 を総合的にみると、つま部の溝を繊維シートで囲むケース (SC, SE) は繊維シート接着の押抜き試験方法の基準⁹⁾を満足しているが、そうでないケース (SB, SD) は満足しなかった。したがって、コンクリートの押抜きに対する性能は繊維シート配置パターン、既設や新設となるコンクリートの打継目に配置するシートの隙間間隔の影響を受けると考えられる。

(3) 繊維シート引張強度とはく落防止効果

繊維シートとコンクリートの付着性に着目して、載荷終了後の繊維シートのはく離状況(写真-10 参照)からはく離周長を求めた。また、図-7 は平均はく離周長を定量的に示したものである。

繊維シートのないケース (SN) は、円形の切込みに沿って脱落したことから、はく離周長 378mm と短かった。一方、既設と新設に跨がって繊維シートが埋設されたケース (SB) では押抜かれたと同時に繊維シートがコアに対して抵抗したため、はく離周長 932mm と大きくなった。

三日月型を模擬した半円形型コアの供試体 SB~SD は溝を囲むケースもそうでないケースも大きな差は認められなかった。一方、コアの寸法が増加すると同時にはく離周長も増加した。また、平均はく離周長が最も大きかった供試体 SE は抵抗変位量も最も大きくなった。

これらのことは、繊維シートを埋設することで、コンクリート片の押抜きに対して繊維シートそのものが破断せず、繊維シートとコンクリートの付着によって周長が大きくなること意味すると考えられる。また、繊維シートがコア部を包みこむか否かで付着領域が異なるものと考えられる。これらの要因により、はく離周長に変化が生じたと考えられる。以上の結果から、繊維シート自身が持っている引張強度とコンクリートの付着性から繊維シートの耐荷能力の傾向が見極められると考えられる。

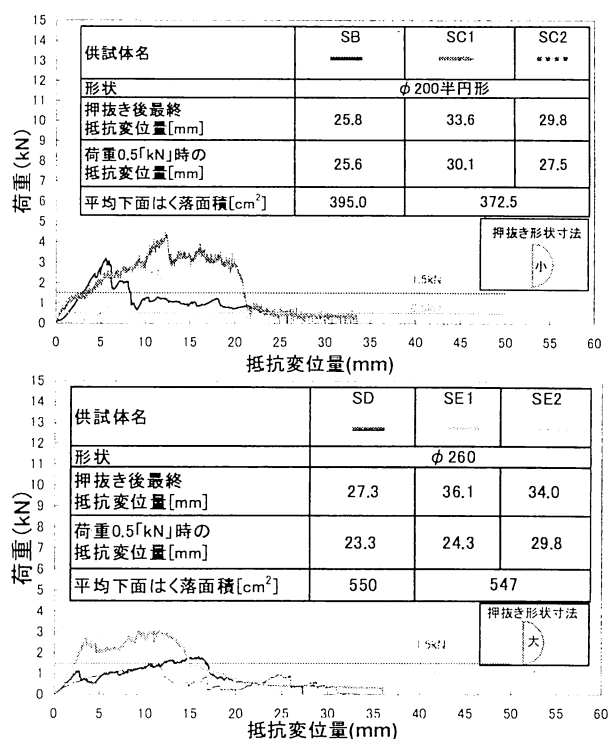


図-6 荷重と抵抗変位量の関係(押抜き形状寸法)

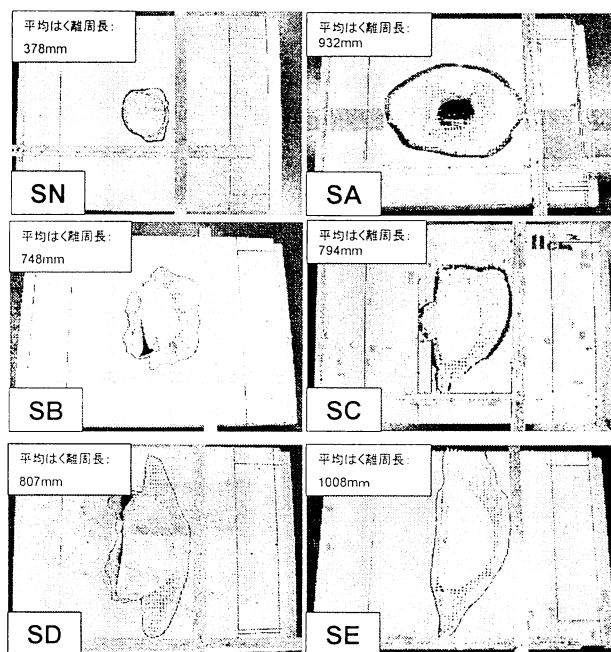


写真 10 載荷終了後の繊維シートのはく離状況

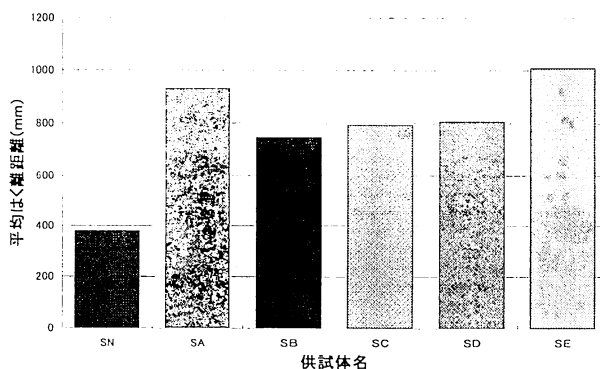


図7 平均はく離周長

5. まとめ

繊維シートによるつま部のコンクリートのはく落を防止する性能について検討した。以上の結果から得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

(1) 曲げ靱性試験

a) 繊維シートを埋設したコンクリートの基本特性としての曲げ靱性係数が保たれた。

(2) 押抜き実験

a) 基本的に、繊維シートを埋設することで、コンクリートの押抜きに対して、それを防止する効果が認められた。つま部を跨いで繊維シートが分離されると、コンクリート片のはく落形状寸法にかかわらず、分離された繊維シートの隙間を狭くすることではく落防止性能が高くなる。

b) コアの押抜きに対して、繊維シートの効果を十分に活かすためには、繊維シートとコンクリートの付着特性を考慮し、はく離周長などのはく落状況を把握する必要がある。

本報告でははく落に対する繊維シートの有効性を確認することを目的に検討した各種実験結果について報告した。なお、実際のトンネル覆工の施工において、型枠のつま部に繊維シートを埋設する方法など、施工性については別途検討を進めている。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネルライブラリー12号, 山岳トンネル覆工の現状と対策, pp. 30-46, 2001. 9.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル, pp. 137-139, 2007. 1.
- 3) 土木学会平成 19 年度全国大会研究討論会・研 - 14 資料：地下空間のライフサイクルデザイン/マネジメント - 時代に求められる良質な地下構造物のつくり方のトレンド-, pp. 8-9, 2007. 9.
- 4) トンネル安全問題検討会報告書-事故の原因推定と今後の保守管理のあり方-, pp. 49-69, 2000. 2.
- 5) Shuuji KURAKI, Hidenori HOSHI, Yukinori SHIMIZU, Sadao KIMURA : Development of high-quality concrete segment for life cycle cost reducing : *THE THIRD JAPAN-CHINA TECHNOLOGICAL EXCHANGE OF SHIELD-DRIVEN TUNNELING in 2005*, pp.21-26, 2005.8.
- 6) 沼澤憲二郎, 藤沼愛, 藤木育雄, 倉木修二：特殊セグメントを用いた地下鉄換気塔-地下鉄 13 号線雑司ヶ谷駅-, トンネルと地下, Vol. 37, No. 12, pp. 905-914, 2006. 12.
- 7) 玉井攻太, 木村定雄, 松浪康行, 倉木修二, 水上博之：コンクリート系セグメントの表面補強材としての繊維シートの適用, トンネル工学報告集, No.14, pp. 389-394, 2004. 11.
- 8) 木村定雄, 三村聡, 吉田行生, 水上優：未貫通ひび割れを有する覆工コンクリートの初期劣化進展とその考察, トンネル工学研究論文・報告集, Vol. 13, pp.45-52, 2003. 11.
- 9) 東日本高速道路, 中日本高速道路, 西日本高速道路編著：試験方法第 7 編(トンネル関係試験方法), Vol.7, pp. 85-93, 2006. 10.
- 10) 東日本道路公団, 中日本道路公団, 西日本道路公団：試験方法第 7 編(構造関係試験方法), No4, pp. 98-100, 2007. 10.
- 11) 馬場弘二, 伊藤哲男, 城間博通：覆工コンクリートのはく離・はく落抑制を目指した鋼繊維補強仕様の確立に関する研究, 日本道路公団試験研究所報告, Vol. 39, pp. 91-106, 2002. 11.