

連続繊維シートによるトンネル覆工補強に関する研究

EXPERIMENTAL STUDY ON REINFORCEMENT OF TUNNEL LINING WITH CONTINUOUS FIBER SHEET

朝倉俊弘* 小島芳之** 高橋 徹** 呉智深*** 吉澤弘之****

Toshihiro Asakura, Yoshiyuki Kojima, Toru Takahashi, Zhishen Wu, Hiroyuki Yoshizawa

This report aims at investigating experimentally the reinforcement effects of tunnel linings strengthened with continuous fiber sheet both on loading capacity and deformation performance, at the ultimate limit state.

The fiber sheets were externally bonded to the inside of tunnel lining specimens as inner reinforcement. A vertical loading and a spring units which is considered to model the ground-lining interaction were applied on specimens.

The following conclusions are obtained up to this stage of our study:

- 1) As for carbon fibers, the effect of reinforcement of the high strength type is higher than the ones of high-modules higher type.
- 2) As for different types of fiber, reinforcement materials, the effect of reinforcement are remarkable by using carbon fiber and aramido fiber but low with fiberglass
- 3) It has confirmed that the quick hardening adhesives have satisfactory high-level reinforcing effect.

Key words: Tunnel Lining, Tunnel Model Test, Continuous Fiber Sheet, Carbon Fiber, Inner Reinforcement

1. はじめに

現在、老朽化や土圧の作用により変状したトンネルは少なくなく、多くのトンネルで対策工が施工されている。しかしながら、建築限界を確保するために、内巻工など内空断面を大幅に侵す工法を採用できないの現状である。そのため、筆者らは、内面補強工¹⁾によるトンネル覆工の補強効果について、覆工模型実験や解析的研究などにより検討を行ってきた。一方、内面補強工の中でも連続繊維シート接着工法²⁾は、シートの種類も、いわゆる、高強度炭素繊維シート³⁾の他、高弾性炭素繊維シート、アラミド繊維シート、ガラス繊維シートなど多種にわたる材料が開発されており、高架橋の補強等に使用されている。アラミド繊維、ガラス繊維については、電気伝導性が無く、今後、炭素繊維が適用しにくい電気伝導性が問題となる箇所の補強についての適用などが期待されている。

また、繊維シートの接着に使用されている接着樹脂についても、低温時の硬化性や硬化時間に問題があり接着樹脂の改良が進められてきたが、最近になり、低温時においても短時間で硬化する接着樹脂が開発され、今後の展開が期待されている。

しかしながら、内面補強工の研究においては、筆者らの、実験³⁾により、高強度炭素繊維シートについての成果は得られているが、他の連続繊維シートによるトンネル内面補強工の実験的研究は行われていない。

本報告は、繊維シートの材質、繊維の補強量、接着樹脂をパラメータとして、補強効果および覆工挙動に着目して行ったトンネル覆工模型実験を行うことにより、得られた知見を報告する。

* 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部
** 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 トンネル担当
*** 正会員 茨城大学 工学部 都市システム工学科
**** 正会員 東燃株式会社 トウシート事業室

2. 実験装置

実験には図1に示すような、新幹線標準断面（道路トンネル2車線相当）を想定した直接荷重方式の立体模型実験装置（縮尺 1/30）を使用した。この装置は、荷重用部材、反力フレーム、側壁脚部ストッパー、脚部沈下機構、底板等からなる。荷重用部材は覆工模型断面に放射状に11組設置され、これらが軸方向にも11列配置されている。荷重用ボルトは2重構造になっており、内側ボルトによりゴムの圧縮・解放を行うことが可能で、ゴムの弾性力により地盤反力を表現できる。荷重箇所は円筒形ゴムを鋼製円筒管に交換して外側のボルトをねじ込むことにより荷重板を介して、直接覆工に変位を与える装置である。

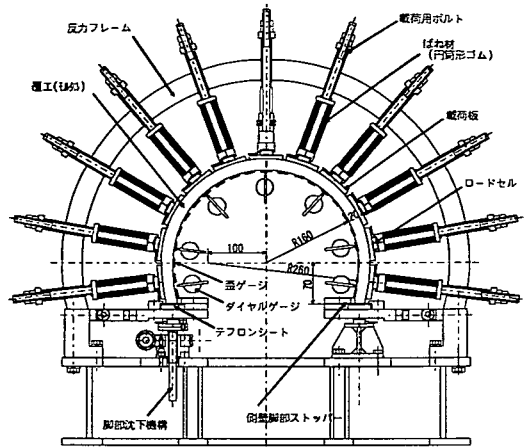


図1 実験装置の概要図（断面図）

3. 実験概要

3.1 実験ケース

実験は、①繊維の材質、②繊維の目付量、③接着樹脂をパラメータとして、表1に示す9ケースについて実施した。供試体のモデルは、トンネル軸方向に長さ6cmの2次元モデル（荷重版1列のみの長さのモデル）を用いた。

また、側壁脚部の拘束条件は、インバートがある場合を想定し、側壁脚部に鋼製ストッパーを接触させ内側への水平変位を拘束した。

荷重方向については、緩み地圧を受けているモデルを想定してトンネル鉛直方向からの荷重を行った。

また、シート接着範囲は、覆工内面全周とした。

表1 実験ケース

N o	繊維の名称	弾性率E (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	目付量 (g)	使用樹脂
1	(無補強)				
2	高強度炭素繊維	2.3×10 ⁵	3550	20	I ¹ °キ
3	高強度炭素繊維	2.3×10 ⁵	3550	40	I ¹ °キ
4	高強度炭素繊維	2.3×10 ⁵	3550	80	I ¹ °キ
5	超高弾性炭素繊維	6.5×10 ⁵	1900	40	I ¹ °キ
6	アラミド1繊維	1.2×10 ⁵	2750	40	I ¹ °キ
7	高弾性炭素繊維	5.0×10 ⁵	2500	40	I ¹ °キ
8	ガラス繊維	7.4×10 ⁴	1500	40	I ¹ °キ
9	高強度炭素繊維	2.3×10 ⁵	3550	40	速硬化性

3.2 実験材料

トンネル覆工供試体は、図1に示す寸法で、モルタルにて作成した。表2に配合、表3に物性値を示す。

また、地盤ばね材は沖積層程度に相当する硬質円筒ゴム（ばね定数 $K_1=0.08\text{ kN/mm}$ ）を用いた。

繊維シートは、高強度炭素繊維、高弾性炭素繊維、超高弾性炭素繊維、アラミド1繊維、ガラス繊維の5種類である。接着樹脂については、エポキシ樹脂を基本とし、1ケースのみ高強度炭素繊維にMMA系の速硬化性樹脂を用いて、速硬化樹脂の早期強度特性についての効果の確認を行った。

3.3 計測項目

測定項目は、載荷重・反力を小型ロードセル、覆工法線方向内面変位量を棒状変位計にて、また、覆工縁歪み、繊維シート歪みの4項目について測定し、目視観察にてひび割れの進展を記録した。土圧計、変位計、歪みゲージの取付け位置を図2に示す。

3.4 実験手順

- 実験手順を下記に示す。
- ①図3に示すとおり、供試体を打設後4週養生した後、歪みゲージを貼付、実験装置に供試体をセットし、計測機器を配置する。
 - ②載荷は、載荷板押し込み量 δ に基づく変位制御方式による段階的載荷とし、 δ は自動載荷装置により1STEP0.05mm ずつの載荷を行った。
 - ③載荷後、観察を行いながら2分間放置し、その後計測データを測定した（載荷重反力、覆工変位量、覆工歪み、補強材歪み）。
 - ④天端部に初期ひび割れを導入したのち繊維シートを接着し、補強材にひずみゲージを貼付、載荷を継続した。
 - ⑤載荷の終了は、次の項目のいずれかの該当するまで継続した。
 - ア）覆工模型の終局的破壊（圧さ部の剥落、せん断破壊の発生）
 - イ）載荷用ボルトのストローク限界
 - ウ）載荷重値限界（載荷版1枚で10kN）

3.5 相似率

相似率は、構造物の変形、変位、応力について試験する場合、構造物の幾何学的相似（縮尺 α ）を満足させれば、弾性範囲内であれば同一荷重強度に対し、変形変位は1/ α 、応力は、1：1に相当する。本実験では、ひび割れ発生後に補強材を接着し、その後の覆工挙動を観察するた

表2 モルタルの配合 (単位 kg)

ポルトランドセメント (早 強)	フライアッシュ	細骨材 (砂)	水	ポゾリス
1.98	2.98	3.97	2.18	0.011

表3 覆工モルタルの物性

試験種類	供試体No	1~4	5~9
		平均	平均
一軸圧縮強度(N/mm ²)		38.4	39.1
圧裂引張強度(N/mm ²)		3.4	3.5
弾性係数 $E \times 10^4$ (N/mm ²)		1.60	1.67
ポアソン比		0.2	0.2

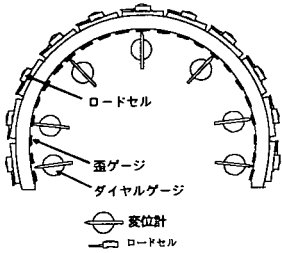


図2 測定機器位置図

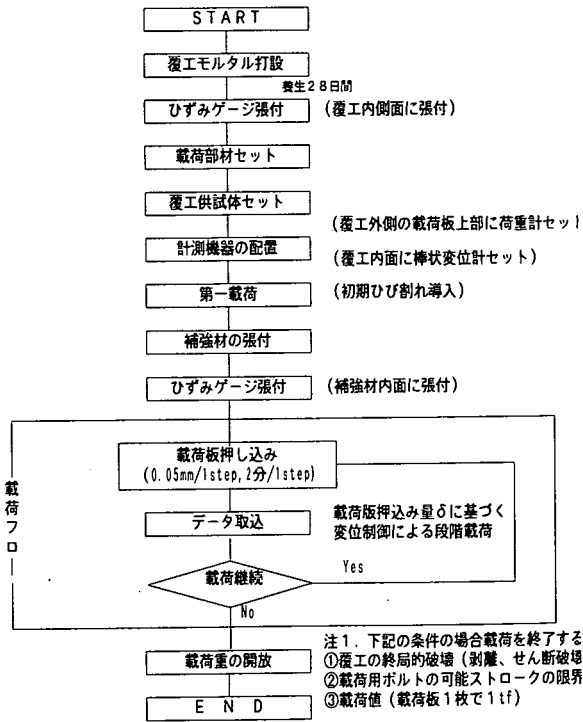


図3 実験手順

め、ひび割れの変形挙動が、変位に大きな影響を与え、相似率が大きく変化する。そのため、実験結果から実現象を評価する場合には、十分注意が必要である。

4. 実験結果

データの整理は、天端部の荷重と変位について整理した。表4に覆工の破壊形態と破壊時の荷重と変位をまとめて示す。図4～図7に、各パラメータ毎に整理した荷重変位曲線を示す。

表4 実験結果

No	補強材	目付量 (g)	破壊形態	荷重 P kN	変位 u mm
1	無補強		覆工曲がり破壊	0.72	1.04
2	高強度炭素繊維	20	炭素繊維シート破断	1.50	1.90
3	高強度炭素繊維	40	分散ひび発生後、シート破断	3.00	2.76
4	高強度炭素繊維	80	シートが剥離と同時に、覆工せん断破壊	3.33	2.86
5	超高弾性炭素繊維	40	低い荷重にて、シート破断	1.02	1.20
6	アラミド1繊維	40	大变形後、覆工せん断破壊	2.70	4.50
7	高弾性炭素繊維	40	シート破断	2.05	2.16
8	ガラス繊維	40	シート破断	1.10	1.91
9	高強度炭素繊維 速硬化接着樹脂	40	剥離破壊	2.13	3.15

* 荷重はシート破断、覆工破壊時

(1) 全ケースを通じた傾向

- ①初期ひび割れが発生するまでは弾性的に挙動し、初期ひび割れ発生後は構造系が変化し、肩部ひび割れの閉合や新たなひび割れの発生が見られた。
- ②覆工外側両肩部に引張ひび割れが入った後、荷重が増加し、繊維が破断、剥離または覆工がせん断破壊し荷重が低下した。さらに変位を与えると天端外側に圧縮ひび割れが発生した。
- ③シート破断または剥離後の挙動は全ケースで概ね一致した。
- ④繊維シートが破断する場合においては、シートの剥離を起こさなかった。

(2) 炭素繊維の種類による比較 (図4)

変形性能、補強耐力は、引張強度が高い繊維の方が大きく、高弾性繊維、超高弾性繊維で補強した場合の剛性改善効果はなかった。

(3) 繊維の目付量による比較 (図5)

目付量を40gまで増加させた場合は、補強量に比例して耐力が増加したが、破壊状態はシートが破断する結果となった。これに対し、補強量を80gまで増加させると、シートは破断せず、剥離と同時に覆工がせん断破壊する結果となり耐力の増加は40gの場合と比較すると少なかった。これは、覆工のせん断耐力によって補強後の構造耐力が決まるので、繊維の補強量に比例して構造耐力が増加しないからであると考えられる。

(4) 繊維材質による比較 (炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維) (図6)

- ・繊維の引張強度が高い高強度炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維の順で補強耐力が高い結果となった。
- ・アラミド繊維は、炭素繊維に比較して破断伸び度が2倍程度あり、大きな覆工の変形を許容するため、変位の進行性が予想される箇所についての適用が良いと考えられる。

(5) 接着樹脂による比較 (図7)

速硬化樹脂の性能を確認するため、炭素繊維貼付後3時間後の載荷を行った。エポキシ樹脂のケースと比較すると、分散ひび割れが数本発生したのちに炭素繊維が剥離する延性的な破壊形態となった。また、最大荷重は炭素繊維に比べると約2/3程と低い結果となった。これは、接着樹脂のせん断接着強度がエポキシ接着樹脂と比較すると若干低下するからではなかと考えられるが、短い養生時間で十分な効果があることが確認できた。

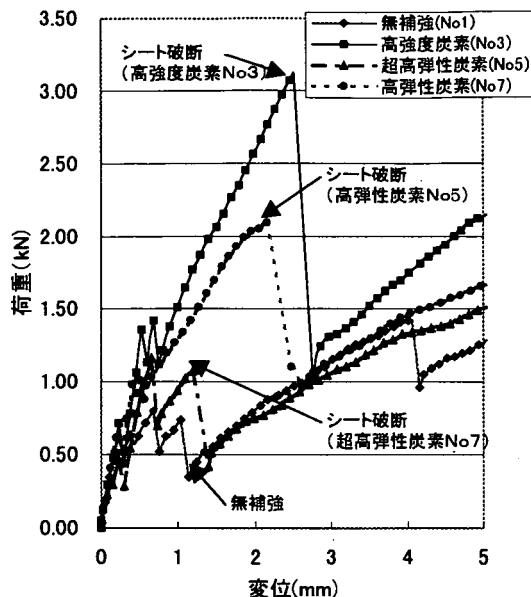
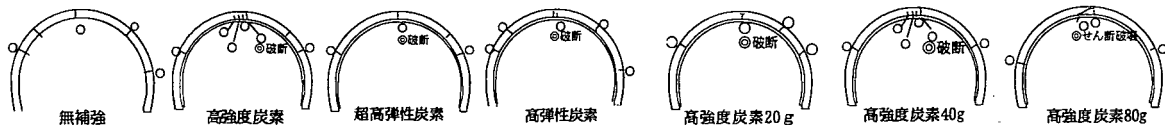


図4 炭素繊維弾性率による比較

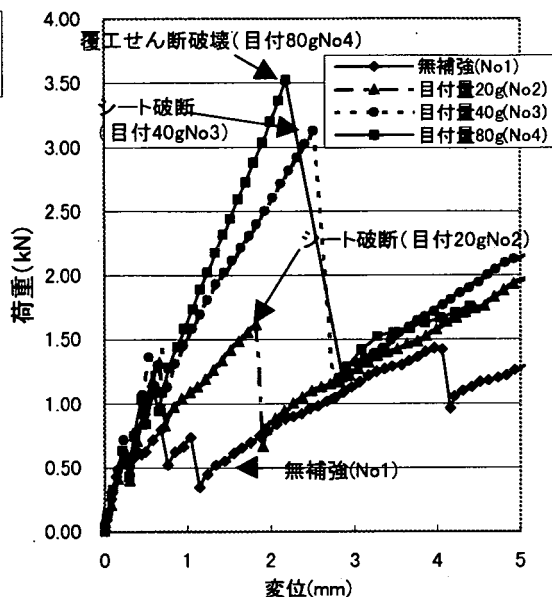


図5 高強度炭素繊維目付量による比較

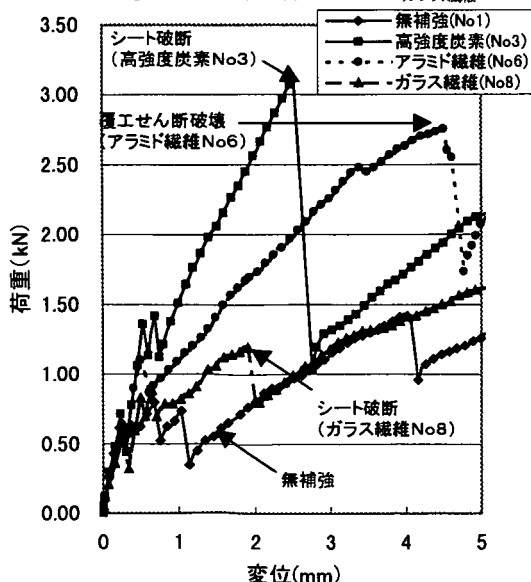
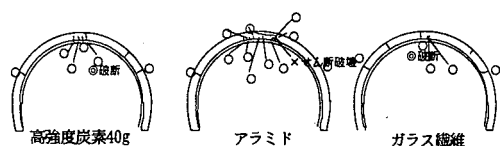


図6 材質による比較

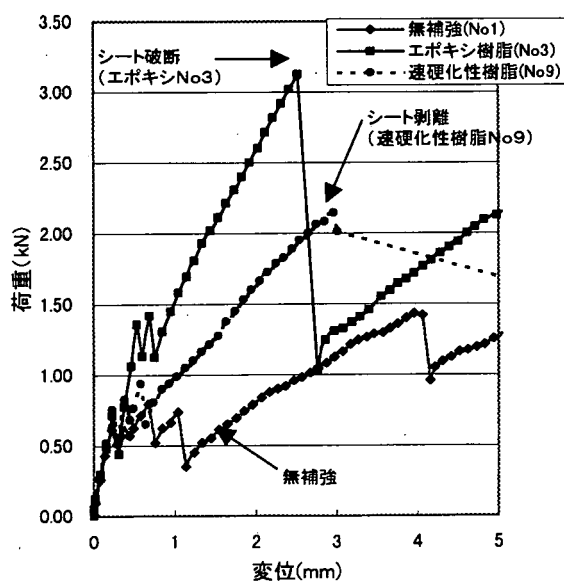
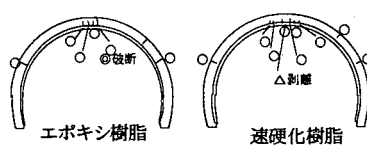


図7 接着樹脂による比較

凡例：○ひび割れ、◎シート破断、△シート剥離、×覆工せん断破壊

5. 結 論

本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- ①炭素繊維については、引張強度が高い高強度タイプの繊維の方が補強効果が大きく、引張強度が低い超高弾性タイプの補強効果は、今回の実験においては発揮できていない。
- ②補強量については、補強量が多い場合には、覆工のせん断耐力で補強耐力が決まるため、補強量を過度に増加させても耐力増加とはならない。
- ③繊維種類については、炭素繊維シート、アラミド繊維シートの補強効果が高くアラミド繊維については、炭素繊維と比較すると補強耐力は若干低下するが、変形性能が高く、変位の進行性が大きい場合などロックボルト等の他の補強工法との併用が考えられる。ガラス繊維については、補強効果が低く補強効果を期待しない剥落防止等への適用が考えられる。
- ④速硬化樹脂は、早期硬化性が高く弱材令時においても十分な補強効果があることを確認した。

なお、今回の 1/30 モデルの覆工模型実験においては、補強後の破壊形態として、①シート破断②シート剥離③覆工せん断破壊の 3 タイプが観察された。通常の実物大の梁曲げ試験等では、高強度の炭素繊維シートが破断をする現象は、ほとんど観察されない。1/30 のモデルではシートの強度に対して相対的に接着強度が高くなるため、繊維破断のモードが生じたものと考えられる。このような破壊メカニズムの相異を明らかにするため、現在解析的な検討を進めている。また併せて、本実験に伴う寸法効果の影響を把握し、実際のトンネル覆工の挙動を明らかにするため、実物に近い寸法の大型モデルを用いた実験を行っている所である。これらの結果については別の機会に報告したいと考えている。

6. おわりに

連続繊維シートによるトンネル覆工の補強特性を把握することを目的とした 1/30 覆工模型実験の結果について示した。今後は解析的検討と実物大実験により破壊メカニズムを解明し、連続繊維シートによる内面補強工の定量的な設計法を確立したいと考えている。なお、この研究は、通商産業省の補助金を得て、(財)石油産業活性化センターが実施しているピッチ系 CF を用いた補強材料製造技術の研究開発の一環として行われたものである。本実験の実施にあたっては、(財)鉄道総合技術研究所野城一栄氏、応用地質(株)太田裕之氏、清水建設(株)木内勉氏、ジョーボンド建設(株)若菜和之氏、大成建設(株)片岡邦昭氏、(財)鉄道総合技術研究所野城一栄氏、東燃(株)植村政彦、小林朗、斉藤誠の各氏、ダイヤコンサルタント川上義輝氏に多大なる御助言、御協力を頂いた。ここに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：変状トンネル対策工設計マニュアル、1998.2
- 2) 炭素繊維補修・補強工法技術研究会：炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強設計施工マニュアル(案)トンネル覆工編、1997.4
- 3) 朝倉俊弘、安東豊弘、小俣富士夫、若菜和之、松浦幸夫：欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果、土木学会論文集 No.493/III-27、1994