

TBMにおける一次支保工用SFRCライナーの開発

DEVELOPMENT OF SFRC LINERS AS PRIMARY SUPPORT IN TBM TUNNELING

植松澄夫¹⁾・丸山雄次²⁾・関口康生³⁾・河野定⁴⁾
Sumio UEMATSU, Yuji MARUYAMA, Yasuo SEKIGUCHI, Sadamu KONO

In TBM tunneling one of the most important subjects to achieve the rapid completion is how to excavate smoothly in bad rock conditions where rock fall or small scale of rock collapse would occur. In order to settle the theme we've developed SFRC liners, steel fiber reinforced concrete light segments, in which a short-time of framing by adopting completely bolt less joints, etc, are characteristic. This paper describes the outline such as structure, the support design, concrete mixture, and the full scale break down tests about SFRC liners.

Key Words: TBM, SFRC, Tunnel Lining

1. はじめに

最近、トンネルの急速施工といった観点からTBMの採用事例が増えている。その最大の理由はTBMの高速掘進性にあるが、掘削・ずり出し・支保工といった一連のサイクルを見たとき、不良地山区間で支保工を迅速、安全、且つ確実に行って進行の低下を防ぐことも急速施工を実現するための大きな要因である。そこで、岩塊の肌落ちや小崩落に対して、従来の鋼製あるいはRC製のセグメントと同様の支保機能を有し、しかも組立時間の短縮化を図るスチールファイバー補強の簡易なコンクリートセグメント（以後、SFRCライナー）を開発した。本報告は、掘削径3,370mmのTBMトンネルへ適用するSFRCライナーの概要、支保設計、コンクリート配合、実大実験（曲げ・継手せん断・推力）について述べる。

2. SFRCライナーの概要

2. 1 構造

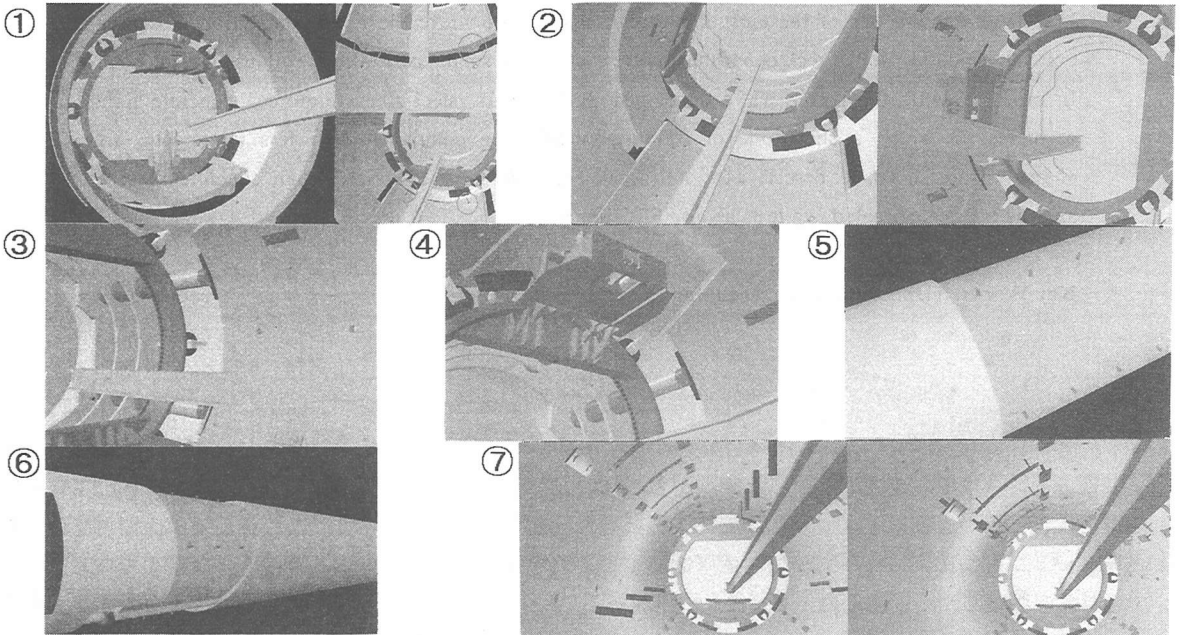
SFRCライナーはスチールファイバー補強コンクリートを本体部材とし、1リング4ピースで構成される。その大きさは、厚さ100mm、外径3,150mm、内径2,950mm、1リング長さ1,000mmである。ピース間継手はナックルジョイント構造を採用しており、これに伴ってキーライナーの設置は軸方向挿入方式で行う。また、リング間は端部が平面形状でボルトレス接合となっており、各リングはそれぞれが独立している。

-
- 1) 正会員 (株)熊谷組 土木本部土木技術部トンネルグループ
2) (株)熊谷組 土木本部土木技術部解析グループ
3) ジオスター(株) 技術開発部開発課
4) ジオスター(株) 開発営業部

2. 2 施工手順

SFRC ライナーの施工手順は以下のとおりである。なお、組立はシールドタイプ TBM のテール内で行う。

- ①インパートライナー設置。ジョイントピンと高さ調整ボルトにより所定の設置精度を確保する。
- ②Lライナー設置。エレクターでインパートライナー上に載せた後、シールドジャッキ圧と仮組ボルトで固定する。
- ③Rライナー設置。固定方法はLライナー設置と同じ。
- ④キーライナー設置。エレクターで軸方向に挿入した後、同様に固定する。
- ⑤ねじ式形状保持ピン設置。TBM 後胴を前進させるに伴ってライナーが同テールから出る際、地山に張り出して岩塊の崩落荷重に対して真円形状を保持する。
- ⑥裏込め注入。注入材の TBM 側への逸走を避けるため、TBM の後方 4～8 m 区間、4 リング分程度で行う。
- ⑦ねじ式形状保持ピンと仮組ボルトの撤去。裏込め注入完了区間について行う。



図ー1 施工手順図

2. 3 特長

SFRC ライナーの主な特長は以下のとおりである。

- ①ナックルジョイントの採用によりボルト接合の手間が省け、組立時間の短縮化が図れる。
- ②スチールファイバーが部材端部まで分散して補強効果が均一化するため、所定の地山荷重に対抗するだけでなく、ライナーの運搬・組立時の衝撃荷重に対して部材端部などの破損が防げる。
- ③ライナーの製作は、鉄筋組立の手間がなく省人化が図れる。

3. 設計

3. 1 設計手法

SFRC ライナーの設計は、岩塊の肌落ち・小崩落などの地山荷重を負担する一次支保機能、グリップ反力の不足を補うシールドジャッキ反力機能、を考慮して行う。このうち一次支保機能については、所定の地山荷重に対して、軸力と曲げモーメントを受ける本体部材が曲げ耐力を、またナックルジョイント構造のピース間継手がせん断抵抗力を、それぞれ確保する必要がある。検討手順としては、多ヒンジ系リングの計算法によるフレーム解析によって断面力を算定した後、「鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル（トン

ネル編) (社団法人鋼材倶楽部・SFRC 構造設計施工研究会編) から提唱されている方法のうち限界状態Ⅱ(限界ひび割れ幅 0.86mm で照査)で曲げ耐力を検討し、さらに継手せん断試験によりせん断耐力を検討する。特に、曲げ耐力の検討に際しては、まずコンクリート強度の想定値に基づく照査(試設計)を行い、次いでコンクリート配合の検討から得られた実際のコンクリート強度に基づいて精度のより高い照査(本設計)を行い、さらに単体曲げ試験により安全性を確認する。また、シールドジャッキ反力機能については、推力試験を行い、所定の反力を確認する。

3. 2 設計条件

- ・地山の単位体積重量： $\gamma_r=2.5\text{tf/m}^3$
- ・地山荷重の幅と作用形態：TBM 上部への岩塊の肌落ち・小崩落を想定し、上半部に表-1 に示す荷重を作用させる。
- ・水圧：考慮しない。
- ・SFRC の単位体積重量： $\gamma_f=2.4\text{tf/m}^3$
- ・SFRC の強度特性：試設計では、圧縮強度(f_{ck})を 400kgf/cm^2 、引張強度(f_{ti})を 14kgf/cm^2 とする。また、本設計では、配合試験より得られた特性値を、変動係数 10%、特性値の下回る確率を 5% とし、分布形を正規分布と仮定して、圧縮強度(f_{ck})を 470kgf/cm^2 、引張強度(f_{ti})を 23kgf/cm^2 とする。

3. 3 解析モデル

- ・SFRC ライナー：はり部材
- ・ピース間ジョイント：ヒンジ
- ・地山への設置点：X 方向のローラー支点およびヒンジ支点。
- ・地盤反力：SFRC ライナーが地山側に変形する箇所にウインクラー地盤に基づく地盤バネをセットし、地盤反力係数を $237,000\text{tf/m}^3$ とする。

3. 4 解析結果

1) 断面力

例として、ケース 1 の断面力を図-3 に示す。

2) 設計断面耐力(曲げ耐力)の照査

設計断面耐力に対する安全性の照査は、下式に示す安全率を用いる。

$$Rd/Sd/\gamma_i \geq 1.0$$

γ_i ：構造物係数 (=1.0)

Sd ：設計断面力(フレーム解析結果)

Rd ：設計断面耐力(原点と設計断面力を結ぶ直線が M-N 性能曲線と交わる値)

M-N 性能曲線を図-4 に示す。

すべてのケースにおいて最大断面力はインバート部に発生している。しかし、一般的に TBM 掘削では、インバート部は堅固な岩盤であること、本解析は岩塊の肌落ちや小崩落を想定して上半部に荷重を作用させていることから、

表-1 地山荷重の想定

荷重範囲が比較的大きい場合 (m)			
ケース	タイプ	鉛直方向	水平方向
1	上載荷重	1.0	
2		2.0	
3		3.0	
4	偏荷重	1.0	0.5
5		1.0	1.0
6		2.0	1.0
7		2.0	2.0
8		3.0	1.5
9	等分布 荷重	3.0	3.0
10		1.0	0.5
11		1.0	1.0
12		2.0	1.0
13		2.0	2.0
14		3.0	1.5
15		3.0	3.0
岩塊の肌落ち程度の場合			
16	天端荷重	1.0(m)	
17	斜め荷重	1.0(m)	
18	側方荷重	1.0(m)	

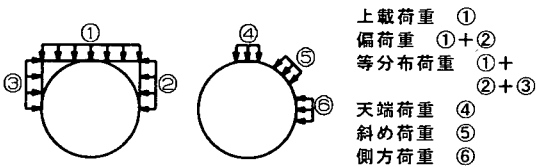


図-2 荷重の作用状態

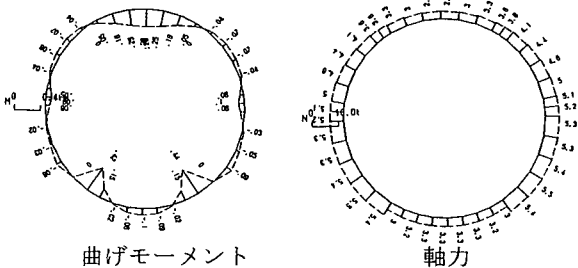


図-3 断面力図(ケース1)

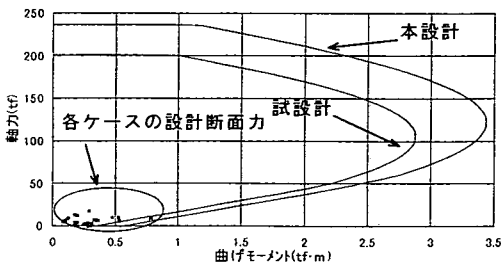


図-4 M-N 性能曲線

ここでの安全性の照査はアーチ・側壁部の最大断面力に着目する。表－２に安全率の結果を示す。

3. 5 考察

1) 荷重範囲が比較的大きい場合

荷重条件が厳しくなるにつれ、安全率が低下する。
試設計では、上載荷重時のアーチ側壁部では、垂直荷重高さ 2 m までは安全率が 1 以上であるが、同 3 m のときには 1 を下回り、同荷重条件下では SFRC ライナーのみでは対応が困難であり、薬液注入などの補助工法が必要なが示唆される。しかしながら、本設計では、すべてのケースにおいて安全率が 1 以上という結果を得た。

2) 肌落ち程度の場合

天端荷重、斜め荷重および側方荷重いずれの場合も、安全率 1 以上が確保される。

表－２ 安全率

ケース	試設計	本設計
1	2.1	3.5
2	1.1	1.8
3	0.7	1.2
4	5.3	8.5
5	24.7	29.2
6	3.0	4.8
7	12.8	15.1
8	2.1	3.3
9	8.7	10.2
10	7.8	12.3
11	31.1	36.6
12	4.6	7.1
13	18.9	22.2
14	3.3	5.1
15	13.0	15.3
16	1.6	2.6
17	3.4	5.6
18	2.0	3.2

4. コンクリート配合

4. 1 試験方法

SFRC ライナーの実大実験に先立ち、コンクリート配合を決定して同強度を同定するため、水セメント比、スチールファイバー長さ (SF 長さ) およびスチールファイバー混入率 (SF 混入率) をパラメータとして、圧縮強度試験と曲げ強度試験を実施した。

供試体の寸法はφ 10×20 及び 15×15×53 (いずれも cm) とし、養生方法は打設後前置 2 時間・昇温 20℃/H・最高温度 60℃・2 時間の蒸気養生とし、以後、気乾養生とした。

曲げ試験は支間長 4 5 cm, 載荷スパン 15 cm, 中央 2 点載荷とした。

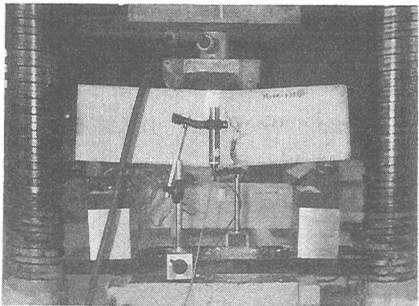
4. 2 試験結果

圧縮強度・曲げ強度試験結果を表－３に示す。コンクリート配合の決定にあたっては、圧縮強度・曲げ強度試験結果が試設計に用いた各強度を満足することだけでなく、一般的にコンクリート 2 次製品の脱型強度が 150kgf/cm² 程度といわれていることも考慮した。

荷重とひび割れ幅の関係の代表的な例を図－５に示す。SF 混

入率が同じ場合、SF 長さ 60mm の方がより高い曲げ強度が確保される。また、SF 長さ 30mm では最大荷重に達した後、0.86mm 幅のひび割れが発生しているが、SF 長さ 60mm では最大荷重に達する前に 0.86mm 幅のひび割れが発生しており、SF 長さが長いほど、ひび割れ幅に余裕があるといえる。

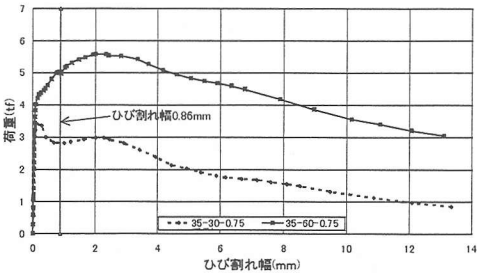
以上より、コンクリート配合は、35-60-0.75 (水セメント比 35%, SF 長さ 60mm, SF 混入率 0.75%) に決定した。



写真－１ 試験状況

表－３ 圧縮強度・曲げ強度試験結果

	圧縮強度 (kgf/cm ²)		引張強度 28 日 (kgf/cm ²)
	脱型時 (7h)	28 日	
40-30-1.0	121	487	21.1
40-60-1.0	123	506	28.0
40-30-0.75	118	462	19.0
40-60-0.75	113	470	27.3
40-30-0.5	101	459	11.6
40-60-0.5	110	455	21.3
35-30-0.75	194	553	15.9
35-60-0.75	215	565	27.6
45-30-0.75	85	400	17.4
45-60-0.75	92	398	21.8
ブレーン	116	476	-



図－５ 荷重とひび割れ幅の関係

5. 単体曲げ試験

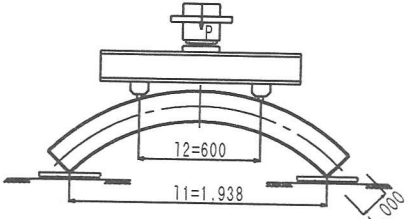
5. 1 試験方法

供試体の寸法および載荷装置を図－6に示す。また、試験状況を写真－2に示す。

載荷は鉛直2点集中載荷とし、両端可動支持とした。

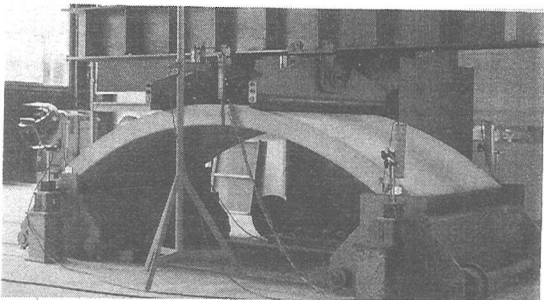
5. 2 試験結果

ひび割れ発生時と荷重最大時の上載荷重および曲げモーメントを表－4に示す。No.1とNo.2では、いずれも最大荷重時において、引張り強度23kgf/cm²から算定した上載荷重および曲げモーメント（以後、上載荷重等という）と同等以上の値が得られた。しかし、No.3ではこれらを下回った。これについては、①単体載荷試験とリング載荷試験とでは、モデルの相違上、前者の試験の方が得られる値が小さくなるはずであること、②下回った値はごく僅かであること、③設計上の上載荷重等は、引張り強度23kgf/cm²から算定した上載荷重等に安全係数を考慮して低く見積もった値であること、の理由により実際上は特に支障がないと類推される。



図－6 供試体の寸法および載荷装置

写真－2 試験状況



表－4 単体曲げ試験結果

		荷重(tf)	モーメント(tf・m)
設計値 ^{注)}		2.31	0.89
No.1	クラック発生	2.23	0.86
	最終値	2.53	0.97
No.2	クラック発生	2.31	0.89
	最終値	2.31	0.89
No.3	クラック発生	2.23	0.86
	最終値	2.23	0.86

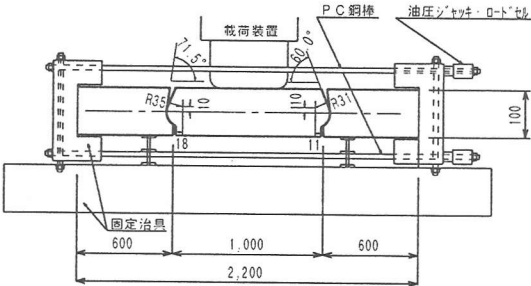
注) 本設計に用いた引張強度からの算定値

6. 継手せん断試験

6. 1 試験方法

供試体の寸法および載荷装置等を図－7、写真－3に示す。また、試験ケースを表－5に示す。

試験は、直線部材に置き換えた供試体を用い、中央部に載荷して行った。図－7に示す継手配置を正とし、その上下逆配置を負とする。その際、フレーム解析から得られた継手部での軸力15tfを初期導入した。また比較のため、軸力がゼロのケースも実施した。

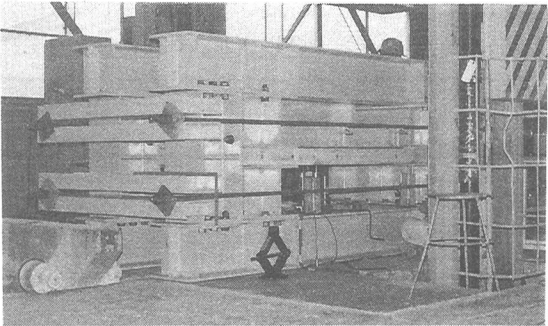


図－7 供試体の寸法および載荷装置

表－5 試験ケース

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
せん断力載荷方向	正	正	負	負
作用軸力 N (ton)	0	15	0	15

写真－3 試験状況



6. 2 試験結果

各ケースの荷重と変位の関係を図－8、図－9に示す。全ケースとも、フレーム解析における継手部のせん断力6.533tfを上回る結果が得られた。初期導入軸力がゼロの場合、載荷開始後しばらくの間は目違い(継

手の上下方向の差)の進行が顕著である。これはいわゆる継手が緩い状態にあるためと判断される。しかし、その後は目違いの進行に伴って軸力が受動的に導入される結果、載荷重が急勾配で伸びると判断される。

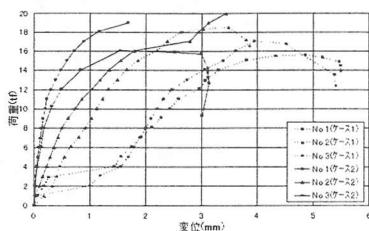


図-8 荷重と変位の関係(載荷方向正)

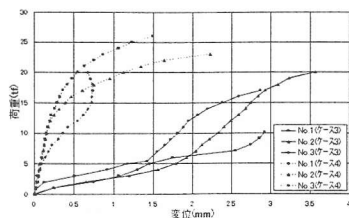


図-9 荷重と変位の関係(載荷方向負)

7. 推力試験

7. 1 試験方法

試験時の状況を写真-4に示す。

油圧ジャッキによってリング面に最大100tf 載荷した。

ジャッキの偏心量は $1 = 1.0 \text{ cm}$ とした。

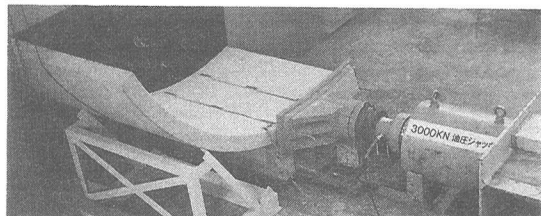


写真-4 試験状況

7. 2 試験結果

スプレッダー直下の荷重とコンクリート歪の関係を図-10に、100tf 時のコンクリート歪分布を図-11に示す。

載荷初期段階を除いて荷重とコンクリート歪は、概ね直線関係になっていること、コンクリートの最大歪が 600μ ($\sigma_c = 186 \text{ kgf/cm}^2$) 程度であることより、推

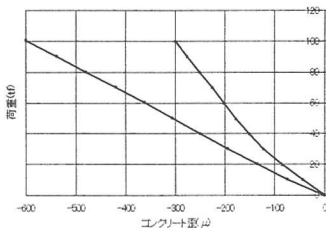


図-10 推力試験結果

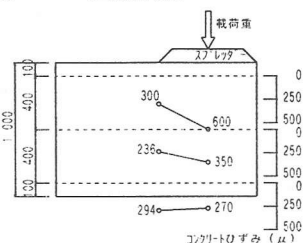


図-11 100tf 時コンクリート歪み分布

力100tf に対してSFRC ライナーは弾性範囲であると判断される。この結果は、シールドジャッキ反力機能としての所定の推力80tf を満足している。また100tf 時のコンクリート歪の分布は、スプレッダーから50cm離れた位置では、ほぼ均一となっていることが確認された。

8. おわりに

本SFRC ライナーを開発した結果、以下の知見が得られた。

- ①試設計、本設計および単体曲げ試験により、部材の所要強度は岩塊の肌落ちや小崩落に対する安全性を確保できる。
- ②コンクリート配合試験により、スチールファイバーの混入率は0.75% (60 kg/m^3) が適当である。
- ③継手せん断試験により、ナックルジョイントは必要な継ぎ手強度を満足する。
- ④推力試験により、シールドジャッキ反力機能は所定の推力80tf を満足する。

SFRC ライナーは、今後、継手部に止水機能を付加することなどにより、一次支保工と永久覆工を兼用する、いわゆるワンパスライニングへの適用も可能と思われる。

9. 参考文献

- 1) 社団法人鋼材倶楽部・SFRC 構造設計施工研究会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(トンネル編), 1995.
- 2) 土木学会：トンネルライブラリー第6号 セグメントの設計, 1994