

鋼繊維補強コンクリートを用いた大断面TBM用ライナーの設計検討

A STUDY ON THE DESIGN OF STEEL FIBER REINFORCED CONCRETE USED FOR LARGE DIAMETER TBM TUNNEL LINING

城間 博通¹⁾・赤木 渉¹⁾・団 昭博²⁾・山口 聡也²⁾・斉藤 正幸²⁾

Hiromichi SIROMA, Wataru AKAGI, Akihiro DAN, Toshiya YAMAGUCHI and Masayuki SAITOU

Japan Highway Public Corporation has a plan to use reinforced concrete lining in collapse-prone sections of a long tunnel to be excavated with a full-section TBM for two lanes. The lining for the TBM will be manufactured on the site. In order to save in-situ processing and assembly of reinforcement for higher productivity, adoption of steel fiber reinforced concrete was studied. As a result, the lining made of steel fiber reinforced concrete have proved safe under expected loads.

Key Words : TBM, Concrete lining, SFRC, limit state design method, numerical analysis

1. はじめに

日本道路公団では、山岳トンネルの構築工法としてNATMを標準工法として採用しているが、一方で、TBM導坑先進の拡幅掘削工法や長大な避難坑にTBM施工が試行されている。また、それらの成果は、今後適用性拡大の方向を示しており、2車線全断面長大トンネルへの適用も計画されている。

TBM工法で崩壊性の地山を掘削する場合、安定した施工速度を確保するためにライナーを支保構造にする例が多い。2車線全断面掘削TBM工法の場合、経済性・安全性等から鉄筋コンクリート製ライナー(RCライナー)の適用が計画されている。このRCライナーは、現場の立地条件等から現地製作されるが、その製作性を向上させることが望まれる。そこで、近年、吹付けコンクリートや覆工コンクリートに採用事例のある鋼繊維補強コンクリートをコンクリート製ライナーに適用することによって、現地における鉄筋の加工・組立てを省略し、コンクリート製ライナーの製作性を向上させることを検討した。

鋼繊維補強コンクリート製ライナー(SFRCライナー)の適用性は、構造・強度、製作性および経済性から検討し、その効果を確認した。ここでは、このうちの構造・強度に関する適用性の検討結果を報告する。

2. SFRCライナー構造の検討

2.1 基本条件

TBM用ライナーは、地山の支保を期待することはもちろんのこと、グリッパーによる推進反力が確保できない地山区間においては反力部材の役割を果たすことになる。本検討では既往の検討結果¹⁾に基づいて、表-1および図-1に示すライナーの構造とした。

なお、既往の検討ではライナーの製作方法として現地製作が計画されていることから、現地での製作性および経済性を考慮して、SFRCライナーの鋼繊維混入率 V_f を0.5%、0.75%および1.0%として検討を行うこととした。各繊維混入率に対する強度特性は、鋼繊維補強コンクリートに関する既往の研究²⁾に基づいて標準値を設定している。

1) 正会員 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室

2) 正会員 日本シビックコンサルタント(株) 技術本部 技術研究部 トンネルグループ

2.2 断面性能

構造物に対する安全性の照査は、一般に許容応力度設計法を用いる。しかし、SFRCの特性を評価するためには限界状態設計法が適切であると考えられることから、本検討では限界状態設計法を採用することとした³⁾。なお、道路トンネルにおいては、通常、二次覆工を施工することから、ライナーに対するひび割れの照査（使用限界状態）は省略できるものと考え、終局限界状態に対して部材耐力の照査を行うこととした。

(1)部分安全係数

材料係数、部材係数および構造物係数については、各基準等に準拠してその値を設定している（表-2）。

ここで、本検討では構造解析モデルとして、シールド用セグメントの設計で実績の多いはりばねモデルを適用するが、トンネルと地山の相互作用あるいはライナーの継手ばね定数の評価に含まれる不確定な要因に対して、構造解析係数 $\gamma_s=1.1$ を考慮することとした。また、ライナーに作用する地山荷重については、小崩落の規模を適切に評価することが困難であることから、鉛直および水平荷重それぞれに対して荷重係数を考慮している。

なお、SFRCライナーとの耐力比較を行うために、RCライナーについてもコンクリート標準示方書⁴⁾に従って終局耐力を算定している。

(2)設計断面耐力の算定式

設計断面耐力の算定は、図-2に示す断面の応力分布に基づいて式(1)および式(2)により行うものとする。

また、引張側の応力状態は、ひび割れ深さ a までの範囲に補強繊維材料の受け持つ設計引張強度 f'_{cd} が等分布になっているものとする。

$$M_{ud} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma'(y) \cdot y \cdot b dy}{\gamma_b} \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

$$N'_{ud} = \frac{\int_{-h/2}^{h/2} \sigma'(y) \cdot b dy}{\gamma_b} \quad \dots\dots\dots \text{式(2)}$$

ここに、 M_{ud} : 設計曲げ耐力

N'_{ud} : 設計軸方向圧縮耐力

h : 覆工厚

b : ライナー幅

γ_b : 部材係数

k_f : 0.85

f'_{cd} : f'_{ck} / γ_c

表-1 TBM用ライナー構造諸元

		SFRC			RC
主鉄筋量 (cm^2)	アーチ	内縁側	—	—	7-D16=13.90
		外縁側	—	—	7-D19=20.60
	インバート	内縁側	—	—	7-D16=13.90
		外縁側	—	—	7-D16=13.90
繊維強化コンクリート	繊維混入率 V_f (%)	0.5	0.75	1.0	—
	曲げ強度 f_{tk} (kg/cm^2)	50	60	70	—
	引張強度 f_{ts} (kg/cm^2)	21.5	25.8	30.1	—
エンクリメント基準強度 f_a (kg/cm^2)		420			420
ライナー構造	外 径 (mm)	12,500			12,500
		幅 (mm)			1,000
	厚 (mm)	アーチ	250		250
		インバート	450		450

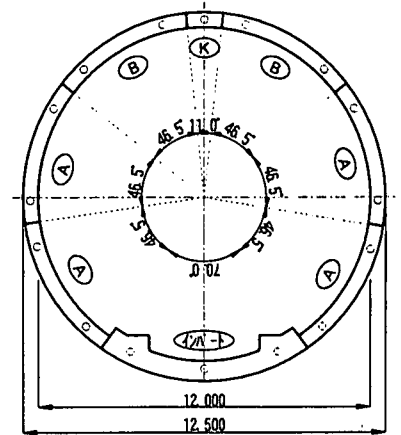


図-1 TBM用ライナー構造

表-2 部分安全係数一覧

安全係数			設定値
材料係数	コンクリート γ_c	圧縮	1.3
		曲げ	1.3
		せん断	1.3
	鉄筋 γ_s		1.0
部材係数 γ_b	圧縮		1.3
	曲げ		1.15
	せん断		1.3
荷重係数 γ_f	地山荷重	鉛直 γ_{fo}	1.3
		水平 γ_{fs}	0.7
	ライナー自重 γ_{ls}		1.0
構造解析係数 γ_s			1.1
構造物係数 γ_i			1.0

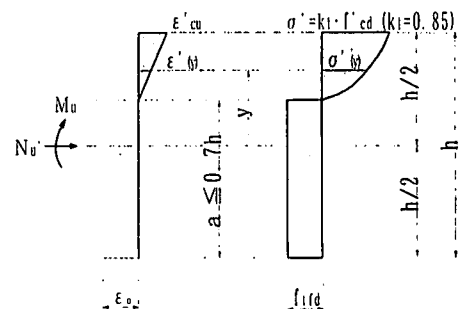


図-2 ひずみ分布と応力分布

(3)耐力比較

RCライナーおよびSFRCライナーの終局耐力算定結果を図-3に示す。

軸力の卓越する領域 ($M/N < h/6$) をみると、SFRCライナーの断面性能はインバートライナーおよびアーチライナーとともに、RCライナーと同等またはそれよりも優れた曲げ耐力を有していることがわかる。

これに対し、曲げモーメントの卓越する領域 ($M/N > h/6$) をみると、インバートライナーの曲げ耐力はSFRCライナーのほうが僅かながら小さいもののRCライナーとほぼ同等の曲げ耐力を有していると考えられるが、アーチライナーに関しては、SFRCライナーの有する曲げ耐力はRCライナーの40～80%程度しか確保することができない結果となった。この理由として、RCインバートライナーの主鉄筋量は0.4%程度であるのに対し、RCアーチライナーは1.0%程度と多く配置されていることによるものである。

なお、繊維混入率を0.5%から1.0%に増加させたとしても、SFRCライナーの曲げ耐力は繊維混入量が2倍になることによる製作性の悪化およびコストの増加に対して十分な効果が期待できないことから、SFRCライナーの繊維混入率は0.5%とすることとした。

3. 地山荷重に対するSFRCライナーの安全性

3.1. 解析モデル

先述のとおり、解析モデルにははりばねモデルを適用することとする。なお、ライナーの自重および落石荷重の作用時期が異なること、および実施工において裏込め注入材の充填方法が段階的に行われる計画であることから、これらの施工過程を考慮できる解析モデルを設定することが望ましいと考え、本検討では7リングモデルを基本モデルとして採用した。また、RCライナーの組立てがいつも継ぎであることを考慮して、主荷重（地山荷重）に対しては1リングモデルを採用した。それぞれの解析モデルを図-4に示す。

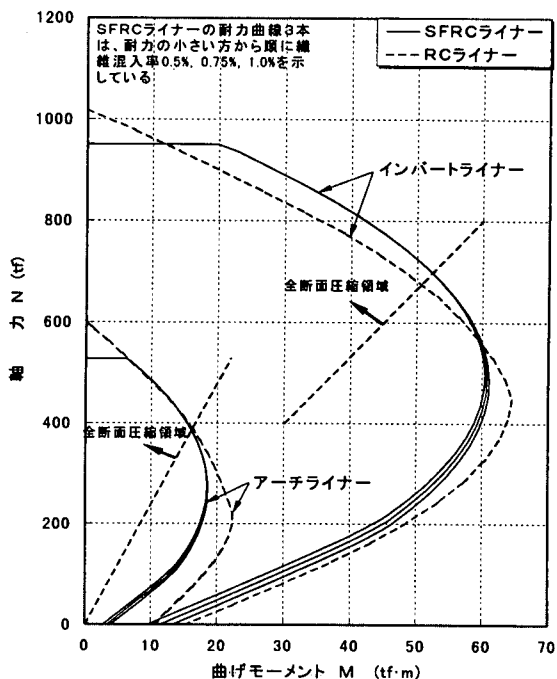
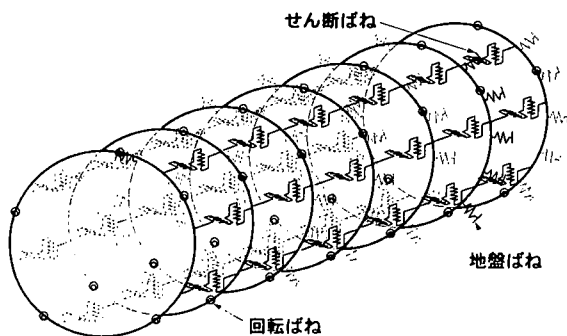
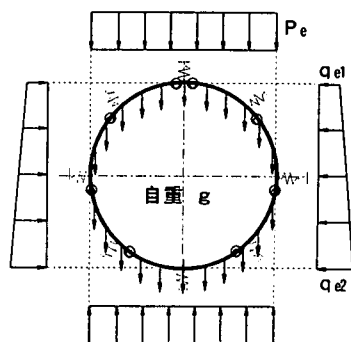


図-3 TBM用ライナーの断面性能比較



(a) 7リングモデル



(b) 1リングモデル

図-4 解析モデル

3.2. 解析諸定数

ライナー継手部の回転ばね定数およびせん断ばね定数に関しては、原設計のライナー構造に基づいて設定する必要がある。また、トンネルと地山の相互作用モデルである地山反力についても、当該地山強度を反映することが望ましいことから、本検討では原設計に従って、ばね定数および地山反力係数を表-3に示すように設定した。なお、地山反力の作用範囲については実施工における裏込め注入材の充填段階を考慮して、その状態を図-5に示すように地山反力を期待しないリング、下半断面のみ作用するリングおよび全周に作用するリングに設定している。

作用荷重に関しては、その評価方法が不適切であると実施工におけるライナーの安全性が確保できない危険性がある。本検討では2種類の解析モデルを適用することから、7リングモデルにおいてはライナーがTBMテールより脱出直後に落石荷重が作用した場合を想定し、また、1リングモデルでは緩み高さを1.0Dとする地山荷重を適用することとした。

表-3 解析定数一覧

		設 定 値	
		原設計値	荷重係数考慮
ばね定数	回転ばね定数 (tf・m/rad)	テール内	0
		地山内	1,500
	せん断ばね定数 (tf/m)		1,000
	地山反力係数 (tf/m ³)	テール内	0
作用荷重		地山内	5,000
	落石荷重 (tf/m ²)	1,950	2,535
	側方土圧係数 λ	0.5	
	緩み荷重 (tf/m ²)	鉛直 p ₀	32,500
		頂部水平 q ₀₁	42,250
		底部水平 q ₀₂	11,489
	自重 (tf/m ³)	アーチ	32,338
		インバート	22,636
		0.650	1.170

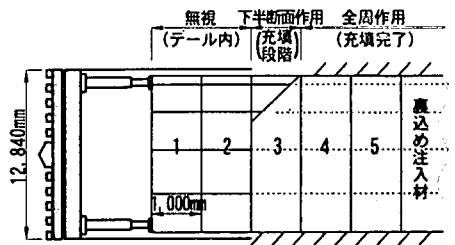


図-5 地山反力作用範囲

3.3. 解析ケース

本検討では2種類の解析モデルを用いるため、各解析モデルともに1ケース実施することとした。

ただし、7リング解析モデルに関しては施工過程を考慮して、対象リングの組立てに伴う自重作用の影響(ステージ1)、隣接リングの組立てに伴う自重作用の影響(ステージ2)および落石荷重の影響(ステージ3)の3段階について評価する必要があるが、各段階とも着目すべきリングが異なることから各段階単独で解析を行い、得られた各段階の発生断面力を合成することとした。表-4に解析ケースを示す。

表-4 解析ケース

	ケース1			ケース2
	ステージ1 7リングモデル	ステージ2 7リングモデル	ステージ3 7リングモデル	1リングモデル
想定	対象ライナーの組立時における自重作用解析	隣接リング組立時に自重作用による影響	対象ライナーがテールから離脱した直後に落石荷重が作用することによる影響	地山反力が期待できる状態での地山荷重作用による影響
施工状況				
作用荷重・地山反力				

4. 解析結果および考察

4.1. アーチライナー

落石荷重を想定した7リングモデル解析結果を表-5、図-6および図-8(a)に示す。これより、荷重係数 $\gamma_f=1.3$ を考慮した場合の設計断面力は荷重係数を考慮しない場合のそれと有意差は認められず、いずれも $M_{\max}=1.8\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度となった。この理由として、表-6に示す各段階の設計曲げモーメントをみると、自重作用に伴う発生曲げモーメント(ステージ1, 2)が支配的となっているのに対し落石荷重の作用に伴う発生曲げモーメント(ステージ3)の占める割合が1%以下と極めて小さいことから、落石荷重に対して荷重係数を考慮しても設計断面力に有意差がなかったものと考えられる。

一方、表-5、図-7および図-8(a)に示した、地山荷重を想定した1リングモデル解析結果をみると、原設計荷重による結果では設計曲げモーメントが $8.7\text{tf}\cdot\text{m}$ であるのに対し、荷重係数を考慮することによって約2倍の $16.3\text{tf}\cdot\text{m}$ にまで増加している。ただし、いずれの結果においても同等の軸力作用時においてSFRCAーチライナーが有する設計曲げ耐力 $M_{\max}=18\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度を下回っていることから、地山荷重の作用に対する安全性は確保できるものと考ええる。

以上のことから、SFRCAーチライナーは想定荷重の作用に対して安全性を確保できるものと考ええる。

4.2. インバートライナー

落石荷重を想定した7リングモデル解析結果(表-5、図-6、図-8(b))をみると、アーチライナーと同様、表-6に示したように設計曲げモーメントに対してライナーの自重作用に伴う発生曲げモーメントが支配的となっていることにより、荷重係数 $\gamma_f=1.3$ を考慮した場合の設計断面力は荷重係数を考慮しない場合のそれと有意差は認められず、 $M_{\max}=5.8\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度となった。

一方、地山荷重を想定した1リングモデル解析結果(表-5、図-7、図-8(b))をみると、原設計荷重による結果では設計曲げモーメントが $1.2\text{tf}\cdot\text{m}$ であるのに対し、荷重係数を考慮することによって約7倍の $7.9\text{tf}\cdot\text{m}$ にまで増加している。ただし、いずれの結果においても同等の軸力作用時においてSFRCAイン

表-5 設計断面力一覧

解析モデル		7リングモデル		1リングモデル	
作用荷重の適用種類		原設計荷重	荷重係数考慮	原設計荷重	荷重係数考慮
アーチライナー	曲げモーメント $M_{\max}$ (tf·m)	1.810	1.802	8.666	16.315
	軸力 N (tf)	4.561	4.324	223.345	289.522
インバートライナー	曲げモーメント $M_{\max}$ (tf·m)	5.840	5.843	1.151	7.913
	軸力 N (tf)	2.456	2.176	246.475	280.498

※構造解析係数 $\gamma_s=1.1$ を考慮している

表-6 落石荷重解析における設計断面力成分内訳(7リングモデル)

解析モデル		stage-1 対象リング 自重作用時	stage-2 隣接リング 自重作用時	stage-3 落石荷重 作用時	設計断面力
アーチライナー	曲げモーメント $M_{\max}$ (tf·m)	4.750(81.3)	1.075(18.4)	0.019(0.3)	5.843(100)
	軸力 N (tf)	1.126(51.8)	0.389(17.9)	0.660(30.3)	2.176(100)
インバートライナー	曲げモーメント $M_{\max}$ (tf·m)	1.482(82.2)	0.326(18.1)	-0.006(-0.3)	1.802(100)
	軸力 N (tf)	2.899(67.0)	0.726(16.8)	0.670(16.2)	4.324(100)

※()内は、設計断面力に占める割合を示す。

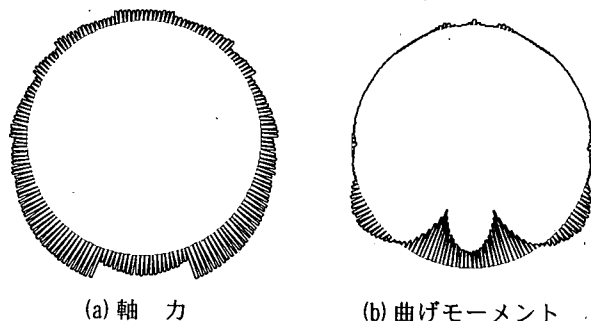


図-6 落石荷重解析断面力分布図(7リングモデル)

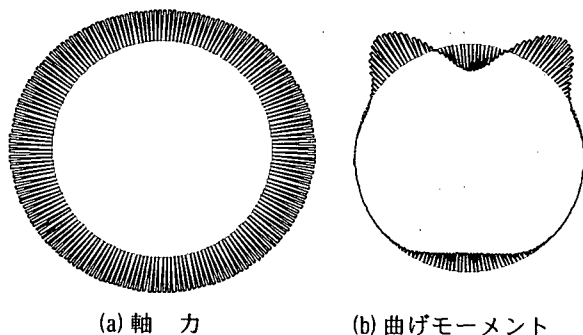
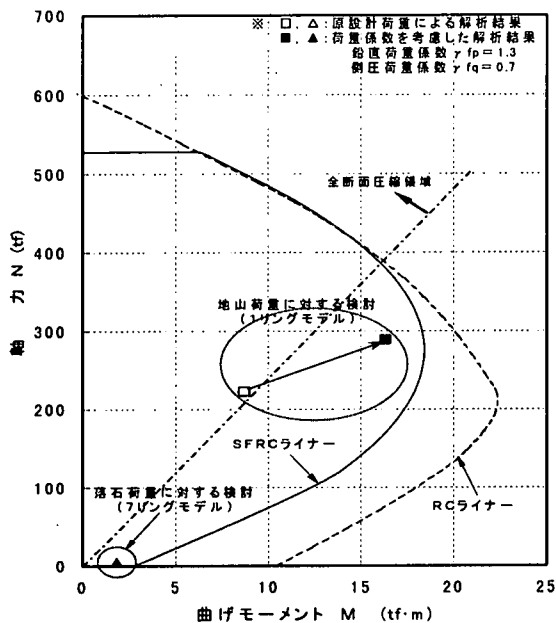
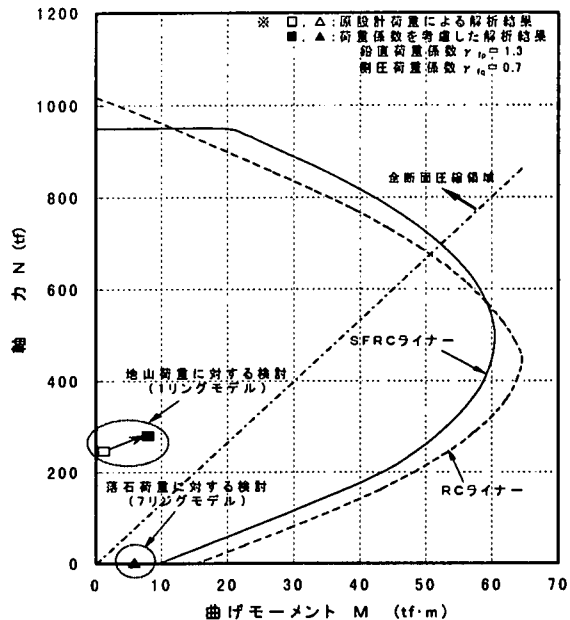


図-7 地山荷重解析断面力分布図(1リングモデル)



(a) アーチライナー



(b) インバートライナー

図-8 設計断面力とライナー耐力の比較

パートライナーの有する設計曲げ耐力 $M_{max}=50\text{tf}\cdot\text{m}$ 程度を十分に下回っていることから、地山荷重の作用に対する安全性は確保出来るものとする。

以上のことから、想定した作用荷重に対してSFRCインバートライナーの安全性は確保できるものとする。

5. まとめ

本検討により得られた知見を以下に列挙する。

- ・SFRCライナー ($V_f=0.5\%$) の断面性能は、RCライナーに比べて軸力の卓越する領域では同等またはそれ以上の曲げ耐力を有するのに対し、曲げモーメントの卓越する領域ではSFRCライナーの耐力は低くなる傾向が認められる。
- ・自重および落石荷重の作用に伴う設計曲げモーメントは、自重の作用に伴う曲げモーメントが支配的であり、想定した落石荷重の影響は1%以下と極めて小さい。
- ・落石荷重および地山荷重を想定して解析を行った結果、曲げモーメントの卓越する領域においてもSFRCライナー ($V_f=0.5\%$) の有する断面性能で安全性は確保できる。

最後に、本検討を実施するにあたり、SFRCに関する各種試験データの提供など多大なるご協力を頂きましたジオスター㈱をはじめ、その他関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 1)財団法人高速道路技術センター：2車線全断面TBM RCライナー構造検討報告書，1998.3.
- 2)日本道路公団試験研究所：平成8年度 繊維補強コンクリート性能試験報告書，1996.8.
- 3)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
- 4)土木学会：[平成8年制定] コンクリート標準示方書（設計編），1996.3.