

コンクリートを併用したロックライナーの 実大載荷試験と合理的設計法

中山隆義¹・奥野三郎²・浜田 元³・吉武 勇⁴・進士正人⁵・中川浩二⁶

¹正会員 株式会社奥村組 技術本部 土木部 (〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1)
²正会員 工修 株式会社奥村組 関西支社 土木技術部 (〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-6)
³正会員 工修 株式会社奥村組 技術本部 技術研究所 (〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)
⁴正会員 博(工) 山口大学講師 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
⁵正会員 学博 山口大学助教授 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
⁶フェロ-会員 工博 山口大学教授 臨床トンネル工学研究所 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

不良な地山における TBM 掘削時の主要支保部材として開発した TBM 用鋼製ライナー(ロックライナー)の適用範囲の拡張を図る目的から、ロックライナーにコンクリートを併用する RC ロックライナーの開発を行った。本報告は、RC ロックライナーの設計法の確立を目的に実施した実大載荷試験から得られた知見を示すものである。その結果、主桁部を鉄筋とみなして RC 断面計算を行ったところ、理論計算値は実験値によく整合し、耐力向上・変位量抑制効果が確認された。

Key Words : RC rock-liner, rock-liner, TBM, full scale model test, rational design method

1. はじめに

TBM工法における従来の支保は、①リング支保工の組み立て後、支保工〜地山間に矢板を挿入する方法や、②吹付けコンクリートおよびロックボルトにより地山を抑える方法、また③テール内でセグメントを組み立てる方法などが用いられている。しかしながら①や②の方法では、支保構築時に岩塊が崩落することもあり危険な作業となるばかりでなく、岩塊の処理作業にも時間を要することから、TBMの稼働率低下を招く問題を有する。一方、③の方法では確実な施工が行えるが、セグメントに要するコスト高の問題があった。

このような課題に対する一解決策として、これまで筆者らは、TBM施工をなるべく早く、且つ安全に作業が行えるように、TBM用の簡易鋼製ライナー(以後、「ロックライナー」と称す)を開発し¹⁾、複数のトンネルで実用化している。しかしながら現状では、これまでよりさらに不安定な地山においてもTBMが適用されるトンネル建設事例が増加しており、これまでのロックライナーの機能以上にTBM掘削後できるだけ早期に地山と密着し安定させる合理的な支保構造の開発が望まれてきた。

本研究では、このロックライナーの適用範囲の拡大を図る目的から、ロックライナーにコンクリート

を打設・併用する方法(以後、RCロックライナーと称す)を考案した。これは、近年の建設コスト縮減の趨勢に対し、無水圧導水路トンネル等で用いられる一次覆工のみ(二次覆工なし)による運用や、不良な地山におけるTBM適用を念頭においたものである。

RCロックライナーの実用化に向け、その設計法の基礎的資料を得る目的から、実大規模の供試体を用いた載荷試験(以後、実大載荷試験と表す)を実施した。本論文では、実大載荷試験により得られたRCロックライナーの力学的な性質を示すとともに、その合理的な設計法について述べる。

2. ロックライナーとRCロックライナー

(1) ロックライナー

写真-1に示すロックライナーは、TBM用の仮設支保に位置づけられるものであり、その開発目的には、①組み立ての容易性、②組み立て直後からの荷重負担(岩塊崩落の防止)、③地山との密着によるゆるみ増大の抑止、④効率的な支保作業によりTBMの稼働率向上、を掲げている¹⁾。このロックライナーは、二次覆工施工までの仮設支保部材であるため(写真-2参照)、このままでは併用できないが、大断面トンネルの本坑幅までの導坑用支保としての用途もある。

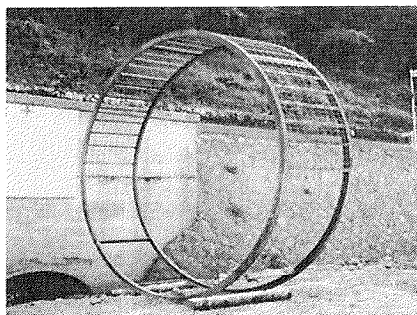


写真-1 ロックライナー

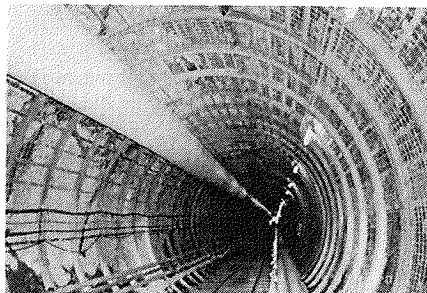


写真-2 ロックライナーの施工状況

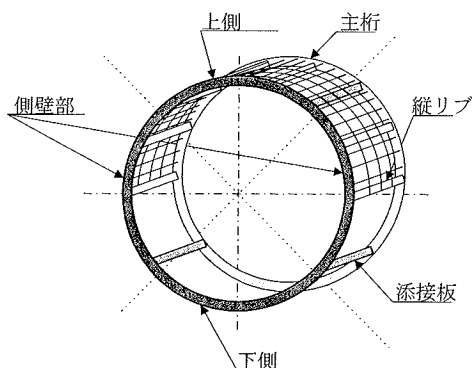


図-1 ロックライナーの構造

図-1に示すように、ロックライナーは、リング支保(溝型鋼)間の上半180°に継ぎ材として山形鋼(縦リブ)を取付け、金網を溶接した構造となっている¹⁾。一般にロックライナーは、①TBMの鋼殻サポート内においてエレクターにより組み立て、ピース間の継手板を短ボルト(M-16)で仮締結し、②掘進に伴いロックライナーが鋼殻サポートから坑壁に出ると同時に低圧の油圧ジャッキを用いて拡張し、坑壁にライナーを密着させる、③拡張部をスペーサで固定後、拡張部に(早強)セメントモルタルを充填あるいは鋼材を添接、といった流れで施工する。すなわちこの工法は、ロックライナーの拡張により地山に内圧を

表-1 ロックライナーの設計の考え方

設計方法	<ul style="list-style-type: none"> 慣用設計法に準拠
荷重設定条件	<ul style="list-style-type: none"> 上載荷重を考慮しない ゆるみ土圧 0.6D (D:掘削径) 水圧は考慮しない 自重を考慮 自重反力・地盤反力を考慮
断面力算定	<ul style="list-style-type: none"> 側方土圧係数 $\lambda = 0.5$ 地盤反力係数 $\kappa = 5 \text{ kN/m}^3$
応力度照査	<ul style="list-style-type: none"> 主桁およびボルトは短期許容応力度(長期の1.5倍)で照査 他の部材は降伏点耐力で照査

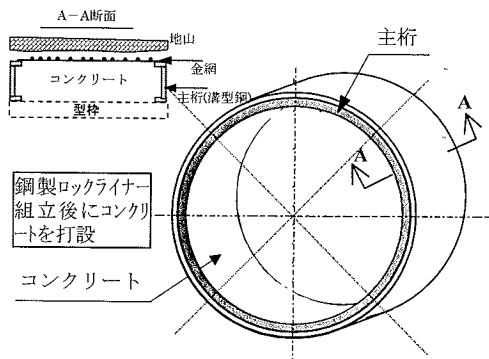


図-2 RCロックライナーの構造

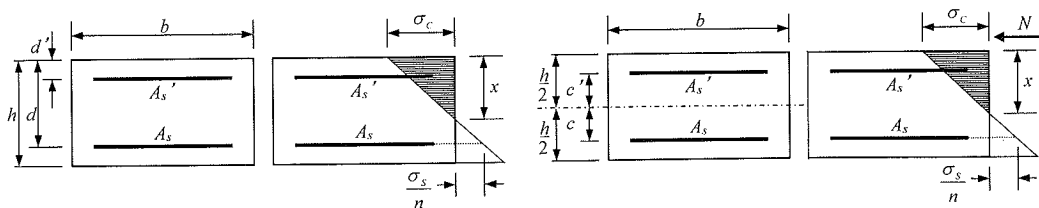
与え、地山内に潜在するキープロックを固定させるところにひとつの特徴がある。

前報¹⁾において示したように、ロックライナーの設計は、シールドトンネルにおけるセグメント設計の考え方²⁾に準ずるものであり、岩盤用に荷重設定や応力度の照査方法を修正している(表-1参照)。

(2) RCロックライナー

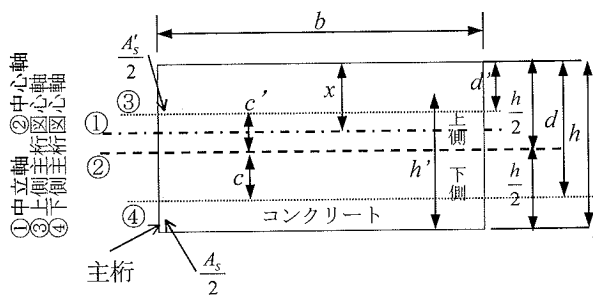
ここで、RCロックライナーの場合、その構造はロックライナー同様に主桁が溝型鋼、縦リブは山形鋼を等間隔に配置したものであり、その鋼製枠内に型枠を配置してコンクリートを打設するものである(図-2参照)。その施工手順は、ロックライナーを組み立て、拡張することにより支保を構築後、余掘り部も含め地山から主桁内面までコンクリートで打設・充填するものである。なお施工条件によって、コンクリートの打設・充填作業を掘削と並行にする場合や掘削完了後に行う場合などがある。

このコンクリート打設により、ロックライナー以上の耐力が見込めるばかりでなく、水路トンネル等では内表面の平滑性を利用して本設としても使用できる利点を併せ持つこととなる。すなわち、このRCロックライナーは、必ずしも仮設支保としてではな



a) 支承部自由状態(曲げモーメント M のみ) b) 支承部ヒンジ状態(曲げモーメント M + 軸力 N)

図-3 支承部自由・ヒンジ状態の応力算定法



【断面諸量】

- 上側主筋断面積 $A_s = 13.9\text{cm}^2$
- 下側主筋断面積 $A_s' = 9.9\text{cm}^2$
- 幅 $b = 100\text{cm}$, 高さ $h = 14\text{cm}$
- 主筋高さ $h' = 10\text{cm}$
- 下側主筋の有効高さ $d = 12.0\text{cm}$
- 上側主筋の有効高さ $d' = 5.7\text{cm}$
- 中心軸と下側主筋図心の距離 $c = 5.0\text{cm}$
- 中心軸と上側主筋図心の距離 $c' = 1.3\text{cm}$
- コンクリートと主筋のヤング係数比 $n = E_s/E_c = 15$

図-4 RCロックライナーの断面模式図

く、トンネル条件に応じてコンクリート強度や補強鉄筋を適宜選定することで、本設構造として円形断面のトンネルにも適用できるものと考えられる。

3. RCロックライナーの設計法

(1) RCロックライナーの設計に対する考え方

RCロックライナーの設計は、主として表-1に示すロックライナーの設計法に準ずるものであるが、応力度照査のレベルにおいてはRC断面計算法^{3,4)}に基づき行うこととした。このRC断面計算法は、シールドのRCセグメントでしばしば用いられるものであり、曲げ引張応力を鉄筋で負担・抵抗させる考え方である。請川ら⁵⁾は、矩形シールドトンネルに用いる合成部材の設計にあたり、主桁部を鉄筋とみなした許容応力度設計法の妥当性について報告している。本研究においても同様に、RCロックライナーの設計では、主桁部を鉄筋とみなした複鉄筋矩形断面として計算を試みるものとする。

(2) 応力度の計算方法

本研究では、RC断面計算法に準拠し、RCロックライナーの主桁部を鉄筋とみなした際の、a) 支承部自由状態、b) 支承部ヒンジ状態、に分けて計算を行った。この場合の前者は、断面に曲げモーメント M のみ作用する状況であり、後者では断面に曲げモーメント M と軸力 N が作用するものとなる。

これら2種類の応力状態は、後述するようにRCロックライナーに荷重(主にゆるみ土圧)が作用した際の側部の保持状態を模擬するものである。

a) 支承部自由状態

図-3のa)に示されるような応力作用下にある支承部自由状態においては、下記の(1)式を用いて中立軸位置 x を求め、式(2)および(3)により、各々コンクリートの曲げ圧縮応力 σ_c と主筋の曲げ引張応力 σ_s を算定するものである。

$$x = -n \frac{(A_s + A_s')}{b} + \sqrt{\left\{ \frac{n(A_s + A_s')}{b} \right\}^2 + \frac{2n}{b} (d \cdot A_s + d' \cdot A_s')} \quad (1)$$

$$\sigma_c = \frac{M}{\frac{b \cdot x}{2} \left(d - \frac{x}{3} \right) + n \cdot A_s' \cdot \frac{x - d'}{x} (d - d')} \quad (2)$$

$$\sigma_s = n \cdot \sigma_c \cdot \frac{d - x}{x} \quad (3)$$

b) 支承部ヒンジ状態

図-3のb)に示されるような応力作用下にある支承部ヒンジ状態においては、式(4)を基に中立軸位置 x を計算するとともに、支承部自由状態と同様に、式(5)と(6)を用いてコンクリートおよび主筋の曲げ応力を求めるものである。なお、これらの式中にお

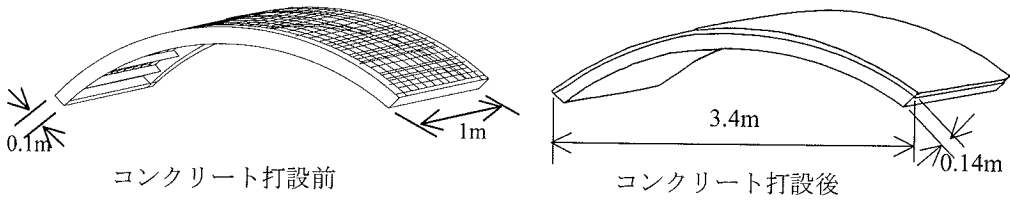


図-5 供試体模式図

る e は偏心量を表し、曲げモーメント M と軸力 N の比($=M/N$)によって定義される。

$$x^3 - 3\left(\frac{h}{2} - e\right)x^2 + \frac{6n}{b}\{A_s(e+c) + A'_s(e-c')\}x - \frac{6n}{b}\left\{A_s\left(c + \frac{h}{2}\right)(e+c) + A'_s\left(\frac{h}{2} - c'\right)(e-c')\right\} = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_c = \frac{M}{\frac{bx}{2}\left(\frac{h}{2} - \frac{x}{3}\right) + \frac{nA'_s}{x}c'\left(c' - \frac{h}{2} + x\right) + \frac{nA_s}{x}c\left(c + \frac{h}{2} - x\right)} \quad (5)$$

$$\sigma_s = \frac{n \cdot \sigma_c}{x} \left(c + \frac{h}{2} - x\right) \quad (6)$$

4. RCロックライナーの実大載荷試験

(1) 載荷試験の目的

筆者らは、これまでロックライナーの設計に関する基礎的資料を得るため、ロックライナーの一部を想定した部材による実大載荷試験を実施し、その研究成果を報告している¹⁾。なお、ここで対象に取り上げた試験要因は、ロックライナーの重要な応力部材である主桁と金網であり、それぞれ独立した試験を通じてその耐荷性能の評価を行っている。しかしながら、本論文で主に扱うRCロックライナーの力学的性質の評価、ひいてはそれに基づく合理的な設計手法の構築は未だなされていない。RCロックライナーは、従来のロックライナーに比べ、主桁の耐荷性能に付与する形で、コンクリートとの合成効果が現れるものと予想される。すなわち、従来のロックライナー以上に、その耐荷性能は期待できるものと考えられ、実大載荷試験を通じて、その定量的評価を行うことは実務上、大きな意義を有するものと考えられる。

なお、前報においてロックライナーの耐荷性能評価に用いた実験要因を踏襲し、本研究においても①支承部自由状態と②支承部ヒンジ状態について実大

表-2 コンクリートの配合と材料試験

W/C		56.0%
s/a		45.7%
スランブ		12 cm
コンクリートの配合		単位量 kg/m ³
水 W	-----	163
セメント C	普通ポルトランド ^o	291
細骨材 S	$\rho = 2.61\text{g/cm}^3$ F.M=2.78	835
粗骨材 G	$\rho = 2.70\text{g/cm}^3$ Gmax = 20mm	1026
試験材齢	圧縮強度	27.5N/mm ²
28 日	ヤング係数	*22kN/mm ²

※圧縮強度からの換算値⁷⁾

載荷試験を実施した。

ここで前者は、ゆるみ土圧を受ける際に、側方土圧が寄与しない場合を想定したものであり、試験においては上載荷重を受けても軸力が作用しないよう支承部にはローラーを設けている。これは、シールドトンネルにおけるセグメント本体の耐荷性能評価試験においても同様の試験方法が採用されており⁶⁾、RCロックライナーにおける1ピースの性能を評価するための試験と位置づけられる。

これに対して、後者の支承部ヒンジ状態では、ロックライナーが鋼殻サポートを出てゆるみ土圧が作用した時に、側方部からの支持反力が得られる場合を想定した試験である。このため、支承部には載荷に伴う回転は許容できるものの、横方向への広がりや抑止するストッパーを設けて載荷試験を行っている。

本研究で採用した2種類の実大載荷試験は、前述の応力度の設計方法に対応したものであり、この設計方法による計算値と実大載荷試験より得られる実験値を比較することで、RC断面計算法に準拠した設計方法の妥当性について評価を行うものである。なお、これらの試験を通じて、RCロックライナーが外荷重を受ける際の最低限の保証値として、支承部自由状態におけるデータが位置づけられ、同最大に発揮できる能力として、支承部ヒンジ状態における挙動が与えるものと考えられる。実際は、側方部等の支持

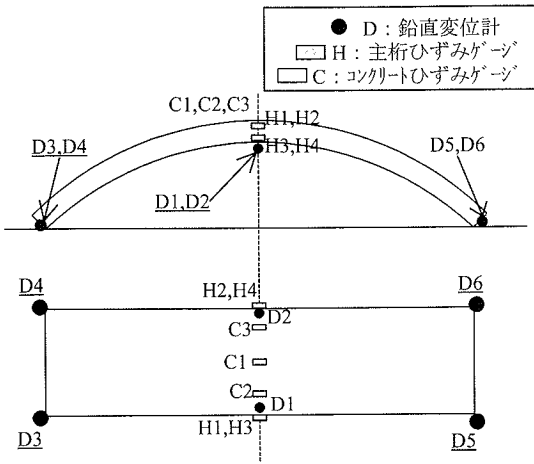


図-6 ひずみゲージの貼付箇所

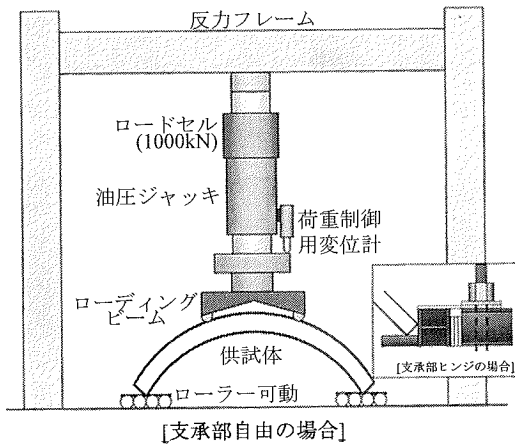


図-7 荷重状況模式図

反力が100%(例えば、剛な坑壁に完全密着した場合など)といかないまでも、地山条件に応じてある程度の反力作用が発揮されるものであるから、両試験で示すデータの範囲内にあるものと考えられる。

(2) 試験供試体

ここで、実大荷重試験に用いた実験供試体(リングの1/5パーツ)の模式図を図-5に表す。この模式図に示されるように、スパン長は3.4mとし、100mm厚のロックライナーにコンクリートを打設し、厚さ140mm(金網背面のコンクリート充填厚さ40mm)とした。ここで打設したコンクリートの配合条件とその材料試験結果を表-2にまとめて示す。

荷重に伴う変形特性を求めため、図-6に示す計6箇所鉛直変位を計測し、スパン中央部の変位(D1, D2)を支承部変位(D3~D6)を用いて補正を行った。

さらに、RCロックライナーのリング方向(周方向)に生じる応力ならびに変形特性を求めため、図-6に示すような箇所において、主桁およびコンクリートのひずみを計測した。

(3) 試験装置

本研究では、図-7に示す大型の反力フレームおよび油圧ジャッキ(最大ストローク500mm)を用いて、実大規模の供試体に対して荷重試験を行った。ここで与えた荷重荷重は、同図に示すようにロードセル(1000kN用)および治具を介し、2点集中荷重となるようローディングビーム(支点間距離600mm)を用いて供試体を与えた。また支承部は、前述のようにローラーあるいはストッパーを設置し、荷重試験を行った。

(4) 試験方法

本研究における各種計測は、主桁の降伏まで荷重制御の1kNごとに行い、主桁降伏後において荷重制御の計測が困難となつてからは、変位制御による計測を行った。なお、本研究では、比較的大型の供試体を用いる実大荷重試験であることから、各種計測には、自重の影響も及ぼされるものであるが、以降に示す計測値においては、構造計算に基づいて自重に伴う変形量を計算し、これを初期値として差し引くことで、その影響を取り除いている。

5. 荷重試験結果および考察

(1) 破壊状況

本論文では、RCロックライナーにおける各部位の変位やひずみ計測値の意義を明確にするため、先ず各供試体の破壊状況について述べる。実大荷重試験後における各供試体の破壊状況を表すひび割れ概観図を図-8に示す。

図-8のA)に示す支承部自由状態における試験では、供試体全スパンが正の曲げ応力を受ける状態となる。この試験では、荷重荷重80kNを与えた時点で、曲げ応力が最大となる荷重点近傍において先ず曲げひび割れ(試験後のひび割れ幅2.5mm)が発生し、その後も荷重を続けると荷重荷重90kN時において外面側のコンクリートが圧壊に至った(写真-3参照)。この荷重方法は、前報¹⁾で用いたローディングビームの支点間距離(荷重幅)が900mmに対して、本報では600mmと異なるものの、前報¹⁾におけるロックライナーの耐力46kNに比べて約2倍の強度性状を示したことになる。

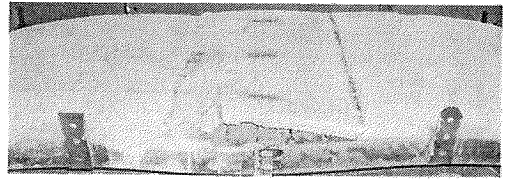
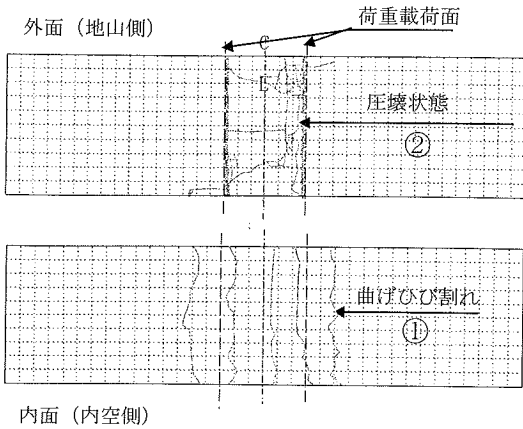


写真-3 支承部自由状態における破壊状況

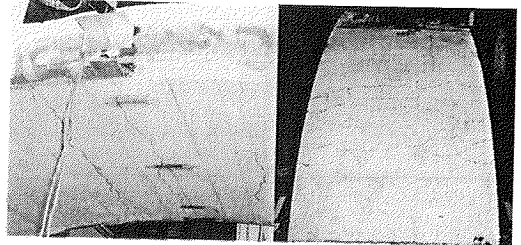


写真-4 支承部ヒンジ状態における破壊状況 (写真左: 内面, 写真右: 外面)

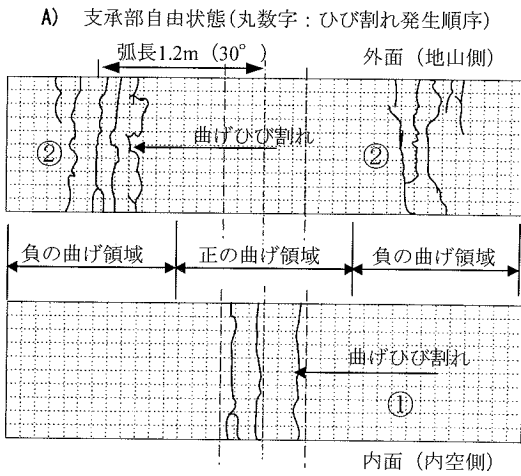


図-8 試験後のひび割れ概観図

一方、支承部ヒンジ状態では、全スパンが正の曲げ応力状態となる支承部自由状態の応力分布とは異なり、支承部からの反力によって軸力と負の曲げ応力が作用する。そのため図-8(B)に示すように、供試体には載荷点近傍の正の曲げ領域とその両片部における負の曲げ領域が生じることとなる。実験においては、支承部自由状態における曲げ耐力と比べ、大幅に大きい500kNの載荷荷重によって、正の曲げ領域の内面に曲げひび割れが発生した。さらに、その後の加力1000kNを与えた時点で、負の曲げモーメントが最大となる30°(弧長: 供試体中心より約1.2m)近傍において、今度は外面側に曲げひび割れが発生した。

なお最終的には、外面コンクリートの圧壊は生じず、両肩部の負の曲げ領域において約0.8mmのひび割れが複数本生じて破壊に至る結果となった(写真-4参照)。しかしながら、前報¹⁾において支承部ヒン

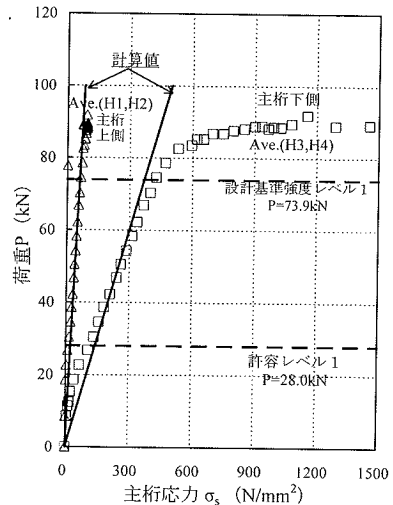


図-9 支承部自由状態における荷重-主筋応力

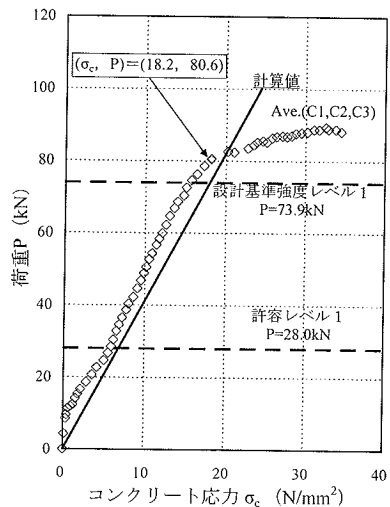


図-10 支承部自由状態における荷重-コンクリート応力

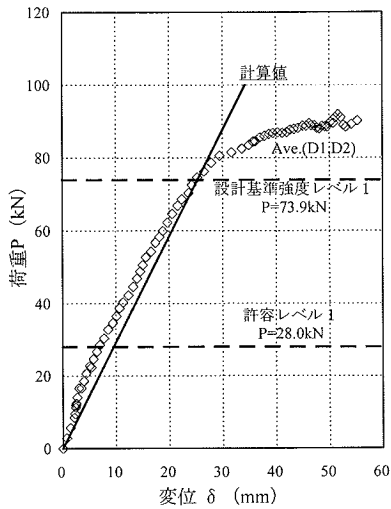


図-11 支承部自由状態における荷重-中央変位

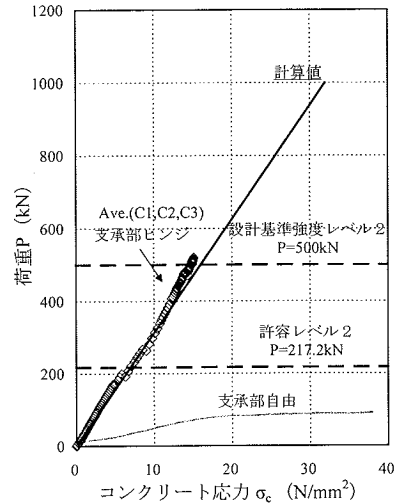


図-13 支承部ヒンジ状態における荷重-コンクリート応力

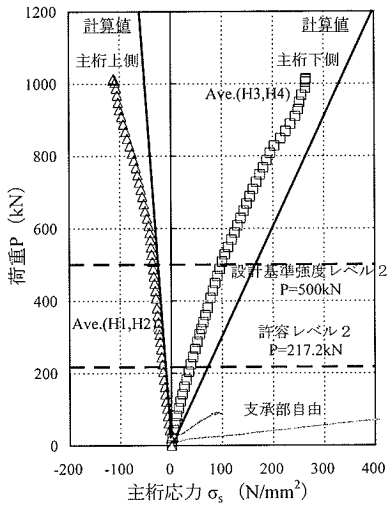


図-12 支承部ヒンジ状態における荷重-主桁応力

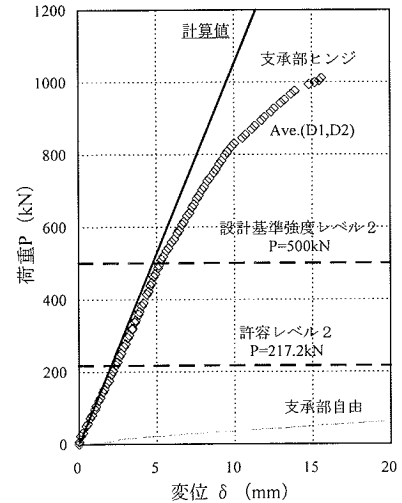


図-14 支承部ヒンジ状態における荷重-中央変位

ジ状態にあるロックライナー単身の破壊荷重(耐力)までは得られていないことから、RCロックライナーとの耐力比較は行えていない。これについては、今後の実工事の設計仕様で比較試験を行い、耐力等を確認する予定である。

(2) 支承部自由状態における挙動

ここで、支承部自由状態にあるRCロックライナーにおいて、その主桁の上下面におけるひずみ計測値(平均値)を基に、主桁(ヤング係数 210kN/mm^2 として換算)に生じる応力を求めた。さらに同様の手法を用いて、外面のコンクリートに生じる平均応力を換算した。載荷荷重に伴う各応力算定値をそれぞれ

図-9 および図-10 に示す。なお両図には、主桁の曲げ引張応力が設計上の許容曲げ引張応力 140N/mm^2 に達する荷重レベル(以下、許容レベル1)とコンクリートの設計基準強度レベル1の双方を記載している。

図-9 に示す主桁の応力は、図-4 に示される上下部とも引張応力側にあるが、これは式(1)から求まるRCロックライナーの中立軸が、上端から5.3cm位置にあるため、主桁上側の図心位置5.7cm(図-4 に示す有効高さ)では、主桁下側と同様に引張応力が卓越する状態になることによるものと考えられる。

また、このときの供試体中央変位は、図-11 で与えられるものであるが、コンクリートの設計基準強

表-3 許容レベルにおける実測値と計算値の整合性

項目	計測箇所	支承部自由状態				支承部ヒンジ状態			
		荷重	実測値E	計算値C	C/E	荷重	実測値E	計算値C	C/E
応力	コンクリート	28 kN	6.40 N/mm ²	6.80 N/mm ²	1.06	217 kN	6.50 N/mm ²	6.80 N/mm ²	1.05
	主桁上側		21.0 N/mm ²	23.0 N/mm ²	1.10		-10.8 N/mm ²	-11.1 N/mm ²	1.03
	主桁下側		139 N/mm ²	140 N/mm ²	1.01		52.0 N/mm ²	70.0 N/mm ²	1.35
変位	中央変位		6.84 mm	9.57 mm	1.40		1.98 mm	2.02 mm	1.02

表-4 設計基準強度レベルにおける実測値と計算値の整合性

項目	計測箇所	支承部自由状態				支承部ヒンジ状態			
		荷重	実測値E	計算値C	C/E	荷重	実測値E	計算値C	C/E
応力	コンクリート	73.9 kN	14.7 N/mm ²	18.0 N/mm ²	1.22	500 kN	14.8 N/mm ²	16.0 N/mm ²	1.08
	主桁上側		68.0 N/mm ²	60.0 N/mm ²	0.88		-26.0 N/mm ²	-25.6 N/mm ²	0.98
	主桁下側		410 N/mm ²	369 N/mm ²	0.90		100 N/mm ²	165 N/mm ²	1.65
変位	中央変位		23.05 mm	25.28 mm	1.10		4.69 mm	4.76 mm	1.01

表-5 ゆるみ高さによる部材応力の試算(掘削外径 D=5.0m)

ゆるみ高さ	曲げモーメントM kN・m/m	軸力N kN/m	コンクリート曲げ圧縮応力 σ_c N/mm ²	主桁曲げ引張応力 σ_s N/mm ²	コンクリート設計基準強度 f'_{ck} N/mm ²
0.6D	1.0	15.4	4.2	30	12 (4.3)
1.0D	1.7	25.7	6.4	50	18 (6.4)
1.2D	1.8	30.8	7.4	54	21 (7.5)
2.0D	3.3	51.3	13.8	98	39 (13.9)
2.7D	4.5	69.3	18.5	140	52 (18.6)

主桁の許容曲げ引張応力=140N/mm², ():設計基準強度に準拠した許容曲げ圧縮応力

度レベル1の範囲内では、荷重と(中央)変位がほぼ直線で近似されるものであった。また、以降の荷重増加に対しては、この直線から外れて、変位が増大する現象が得られた。これは、内面側にあるコンクリートのひび割れが進展することで、載荷荷重に対する部材としての変形抵抗性が小さくなったことを意味するものである。

図-9～図-11に示す結果より、許容レベル1以下においては、各応力や変位の実測値はRC断面計算法に基づく計算値より若干低い値となっているが、概ね設計基準強度レベルまでは両者はよく近似していることが分かる。さらにそれ以降の荷重レベルでは、荷重制御が困難となり、各種計測値は横ばい傾向に移行した。これは、コンクリート圧壊の進行する様子を示す現象と推察される。

(3) 支承部ヒンジ状態における挙動

支承部自由状態と同様に、載荷荷重の増加に伴う主桁・コンクリートの応力ならびに供試体中央変位の挙動を、それぞれ図-12～図-14に示す。なお、これらの図においては、コンクリートに作用する曲げ圧縮応力が許容曲げ圧縮応力6.8N/mm²(設計基準強度から算定)に達する荷重を許容レベル2とし、設計基準強度レベル2と併せて示している。

ここで、式(4)を用いて偏心量 $e(=M/N)$ および中立軸位置 x を求めたところ、それぞれ9.2cm、7.3cmが得られた。これは、図-4に示すように主桁上側の図心 d' は5.7cm位置にあることから、主桁上側が圧縮領域、同下側が引張領域となることを意味する。本試験においても、図-12に示すように主桁上側は圧縮応力が作用し、設計基準強度レベル2までほぼ計算値と一致していることが分かる。また主桁下側は、破壊に至るまでいずれのレベルにおいても計算値に比べ少し小さい傾向にあった。

また、コンクリート応力を示す図-13によると、ひずみゲージが破損するまで計測した載荷荷重500kN範囲内では、計算値と実験値がほぼ一致するものであった。さらに、図-14に示す供試体中央変位においても、設計基準強度レベル2の500kNを越え載荷荷重800kN程度まで、ほぼ計算値は精度良く推定できていた。載荷荷重800kN以降においては、支承部自由状態の場合と同様、計算値を示す直線を越えて変位が増大する現象が確認された。これは、RC断面計算法に基づく中立軸一定とした計算値に対して、内面側のコンクリートからひび割れが過度に進展することで中立軸位置が変化するための差異と推察される。

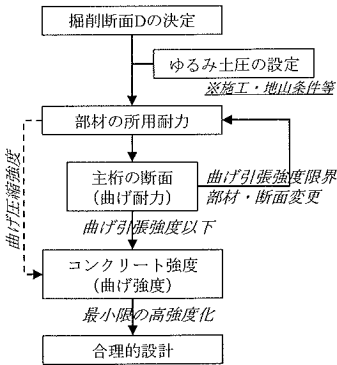


図-15 RCロックライナーの設計フロー(概念)

(4) 実測値と計算値の整合性のまとめ

図-9～図-14に示した結果を基に、実測値と計算値の整合性について、許容レベル(表-3)と設計基準強度レベル(表-4)に分けて示す。

支承部自由と支承部ヒンジ状態で許容レベルの考え方は異なるものであるが、これらの許容レベルを示す表-3によると、各部材に生じる応力の実測値と計算値の比(C/E)のほとんどが、1.1以下(10%以内)であり、両者の整合性が高いことが分かる。また中央変位においては、若干の差異は認められるが、計算値がより大きい値を示す傾向にあり、同計算法を用いれば安全側の指標になりえるものと考えられる。

また、より終局状態に近いコンクリートの設計基準強度レベルによる実測値と計算値の差異においては、表-4に示されるように、応力の実測値が計算値を10%ほど下回る場合もあった。しかしながら、中央変位においては、許容レベルと同様に、概ね両者間の整合性は確認され、計算値が実測値を僅かに上回る結果が得られた。

(5) RCロックライナーの合理的設計法

前述のように、ロックライナーはゆるみ土圧(高さ)を $0.6D$ として慣用設計法に準拠した設計を行っている。RCロックライナーにおいては、前節までに示したように、主桁を主鉄筋とみなすことで、RC断面計算法に基づく計算値が、実大試験による実測値とほぼ一致する事実から、応力度の照査には同理論を用いた評価が可能と考えられる。さらに、RCロックライナーは、通常のロックライナーに比べて剛性および強度が大きく向上しているため、設計荷重となるゆるみ土圧(高さ) $0.6D$ 以上とした際にも、その効果は発揮できるものと推察される。

表-5にゆるみ土圧(高さ) $0.6D$ ～ $2.7D$ までの各部材応力の試算結果を示すとともに、この要求性能に応じたコンクリートの設計基準強度を併記する。この

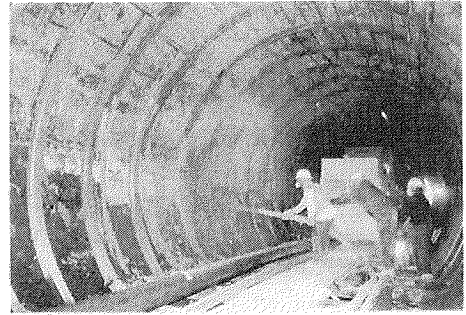


写真-5 吹付けコンクリートの施工状況

結果より、コンクリートの曲げ圧縮応力に対して十分な曲げ強度を有するコンクリート(配合)とすれば、主桁の許容曲げ引張応力 140N/mm^2 に及ぶまでのゆるみ土圧(高さ) $2.7D$ までは対応できることが分かる。これは、掘削外径 $D=5.0\text{m}$ としたときの試算結果であるが、図-15の設計フロー(概念)に示すようにコンクリート強度や主桁の断面や高さ等を考慮して、圧縮・引張のバランスをとった断面設定を行うことで、RC断面計算法に準拠した合理的な設計が可能になるものと考えられる。

6. まとめ

本研究では、不良地山等に対するロックライナーの適用範囲の拡大を目的に、RCロックライナーを開発し、その強度特性と合理的な設計法の構築について検討を試みた。特に、RCロックライナーの力学特性と設計計算値の整合性を評価する目的から、実大載荷を実施するとともに、主桁を主鉄筋とみなしRC断面計算法の適用性の評価を行った。本研究の範囲内において得られた知見を以下に列挙する。

- ① 支承部自由状態では、始めにスパン中央部においてコンクリートの曲げひび割れが生じ、その後の載荷によって、載荷点近傍のコンクリート外面部が曲げ圧縮破壊に至った。
- ② 支承部ヒンジ状態においては、最初にスパン中央に曲げひび割れが発生するものの、以降の載荷によって、負の曲げ領域にあたる両肩部において曲げ引張破壊が生じた。
- ③ 支承部自由状態における実験値と計算値は、コンクリートの設計基準強度レベルまでは概ね一致するものであり、以降において実測のひずみや変位は計算値に比べ増大する傾向にあった。
- ④ 支承部ヒンジ状態における計算値は、実験値に比べ若干小さいあるいはほぼ同等の傾向を示しながら、設計基準強度レベルまでは推定できる

ことが確認された。

- ⑤ ゆるみ土圧による要求性能に応じた曲げ圧縮強度のコンクリートと、主桁の断面・高さを適切に設定すれば、RC断面計算法に基づいて合理的な設計が可能となる。

7. あとがき

本論文においてRCロックライナーの高い耐荷性能とともに、従来のRC断面計算法に基づく設計法の合理性が確認された。実際のTBMトンネル施工では、吹付けコンクリートを用いることで、通常の打設コンクリートに比べ、より汎用性に優れた工法になると予想される(写真-5参照)。ここで施工されるトンネルは、仮設支保としての用途に加え、道路トンネルの避難坑や各種作業用トンネル(発電所等のケーブル用、機器搬入用および維持管理用)としての用途例も考えられる。さらに、水路トンネルとして用いる場合においても、集水・導水処理を施せば、コンクリート内の鋼材腐食も抑制できるため、その適用の可能性も考えられる。

この吹付けコンクリートを用いる場合においても、ロックライナー内に十分に充填できれば、用いる吹付けコンクリートの力学性状に応じた耐荷性能が得られることが予想される。さらに本研究で示した設

計法は、特殊な限定的な方法ではなく、他の構造物も含めて多くの実績を有する一般的な設計法であることから、吹付けコンクリートによるRCロックライナーの耐荷性能は、ここに示した方法に基づいて推定評価できるものと考えられる。この設計法を用いて吹付けコンクリートによるロックライナーの耐荷性能向上を図る方法は、ロックライナーの適用範囲拡大に貢献できるものと思われる。

参考文献

- 1) 中山隆義, 奥野三郎, 井上昭治, 中川浩二: TBM用ロックライナー(簡易ライナー)の開発と実用化, 土木学会論文集, No.679/VI-51, pp.21-31, 2001.6.
- 2) 土木学会: トンネル標準示方書[シールド工法編]・同解説, pp.31-110, 1996.
- 3) 土木学会・日本下水道協会共編: シールド工用標準セグメント, 2001.7.
- 4) 近藤泰夫, 小野竹之助, 田口文雄: 鉄筋コンクリートの設計, 国民科学社, pp.213-223, 1977.1.
- 5) 請川 誠, 元木 実, 吉武 勇, 中川浩二: 矩形要素を組合せた超大断面トンネル工法における合成部材の性能, 土木学会論文集, No.714/VI-56, pp.165-177, 2002.9.
- 6) 小泉 淳: トンネルを対象とした実験, コンクリート工学, Vol.39, No.9, pp.90-94, 2001.9.
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], pp.19-45, 2002.

(2003.5.20 受付)

FULL SCALE TEST AND RATIONAL DESIGN METHOD OF ROCK-LINER WITH CONCRETE

Takayoshi NAKAYAMA, Saburo OKUNO, Hajime HAMADA,
Isamu YOSHITAKE, Masato SHINJI and Koji NAKAGAWA

In order to extend the applicability of rock-liner for TBM construction, rock-liner with concrete (RC rock-liner) was developed. The purpose of the present study is to establish the rational design method for RC rock liner. As part of the purpose, the loading tests with full-scale model were conducted for obtaining the mechanical properties of segment in RC rock liner. Furthermore, the present study employed a former RC design method by regarding the main-girder as steel bar, and its utilization was confirmed by comparing the experimental data.