

シールドトンネルの長距離・急速施工技术

ー石岡トンネルでのシールド機の点検整備例ー

THE SHIELD TUNNEL TECHNOLOGY FOR LONG DISTANCE AND RAPID CONSTRUCTION - INSPECTION AND MAINTENANCE OF SHIELD MACHINE AT ISHIOKA TUNNEL-

藤生 和也¹⁾ ・ 西尾 誠高²⁾ ・ 明神 和夫³⁾ ・ 藤井 茂男⁴⁾

Fujiu KAZUYA, Masataka NISHIO, Kazuo MYOUJIN, Sigeo HUIJI

For the purpose of the shortening in the construction period and cost reduction, the development of shield tunneling technology for long distance and rapid construction (Tunnel length:5km, 10km in total with diversion, Excavation speed:20m/day) was examined from 1989 for the Kasumigaura water-conveyance project in the Ministry of Construction, which has 36.1km long shield tunnel.

The technology was applied Ishioka tunnel as the pilot project and constructed from 1997 to 1998.

We pulled up the shield machine after the completion of shield tunnel in 1999 and executed the inspection and adjustment to verify the design specification and diversion of shield machine.

This paper reports the results of the inspection and maintenance and the evaluation of them.

Key word: headrance tunnel, Slurry shield, long distance, cutter bit, maintenance

1. はじめに

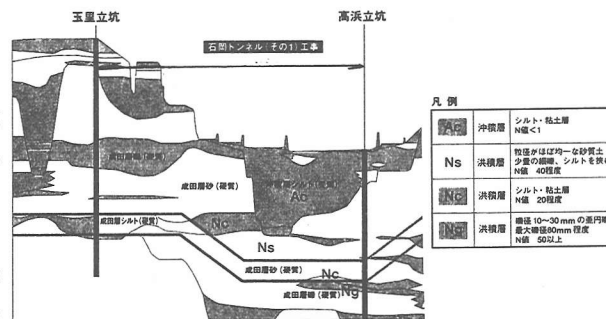
建設省関東地方建設局の霞ヶ浦導水事業における石岡トンネル(その1)工事において長距離・急速施工シールドシステムが採用された。本システムは、長距離トンネルの工期の短縮、立坑数の減少によるコスト縮減等を目的として開発されたものである。シールド掘進機とセグメントストック装置、及びセグメント自動搬送システムより構成され、本工事において初めて実施工に適用されたところである。

本稿では、主として本工事(延長 2.4km)で使用したシールド掘進機を次工事(延長 4.4km)に転用するに当たり、実施した点検結果と整備について報告する。

2. 工事概要

(1)霞ヶ浦導水事業の概要

霞ヶ浦導水事業は、利根川下流部、霞ヶ浦および那珂川下流部を結ぶ流況調整河川を建設し水の広域的かつ有効利用を図ることにより①河川・湖沼の水質浄化、②既得用水の補給、③新たな都市用水の確保を目的としている。本導水路は総延長 45.5km に及び、地下 20m から 50m の深さに建設されるわが国では例を見ない長距離かつ大深度のトンネルである。



図ー1 石岡トンネル(その1)工事地質縦断面図

- 1) (前)建設省 関東地方建設局 霞ヶ浦導水工事事務所 所長
- 2) 正会員 (財)先端建設技術センター 研究第二部 主任研究員
- 3) 大成・鴻池・若築建設工事共同企業体 所長
- 4) 石川島播磨重工業(株) 油機・シールド事業部 設計部 課長

(2)石岡トンネル(その1)工事の概要

本工事は、那珂導水路の内、高浜立坑から玉里立坑までの 2.4km のトンネル工事である。本掘進は平成 10 年 3 月～10 月まで行われた。工事諸元を表－1に示す。

シールド路線は、沖積低地および東茨城台地に位置し、上部より沖積層、成田層上部砂層、成田層上部シルト粘土、成田層上部砂礫層から構成される。

シールド掘進機は、発進部で成田層上部砂層および成田層上部砂礫層、到達付近で成田層上部シルト・粘土層を掘進する。地下水位は地表面近くに分布し、シールド掘進機中心での地下水压は、0.24～0.29MPa 程度である。

3. 長距離・急速施工システムの概要

(1)シールド掘進機の概要

本工事で使用したシールド掘進機は、耐摩耗性ビットを採用して長距離施工を可能としている。また、シールド掘進機のエレクターを本体から切り離し、セグメントにて支持させることにより、掘進とセグメントの組立を同時に行えるようにし、急速施工を可能としている。

図－2に本機の構造図を、その主要目を表－2に示す。また本トンネルにおける採用工法と従来工法との比較を表－3に示す。

(2)シールド掘進機の転用

本システムを石岡トンネル区間にて適用するに当たり、建設省は平成8年度から石岡トンネル施工検討委員会(委員長:東京都立大学今田教授、事務局:(財)先端建設技術センター)を設置し、施工結果の検証をおこなった。¹⁾ また、本機を1回転用し全延長 6.8km の掘進を行うことを前提に施工された。

なお、その1工事でのマシンの設計耐用距離はカッタビットについては2.4km、シールド・ベアリング等交換対象機器については5.0km、カッタ面板・胴体等交換しない機器については7.5kmとした。特に、シールド掘進機器の長距離掘進における耐久性の調査実績例が少ないことから、現場での転用可否の判定が困難である。そのため、2.4km 掘進・到達後のシールド掘進機を工場へ持ち帰り、平成 10 年11月より各機器の点検を行い、その上で転用先での使用に耐えられるように整備を実施した。

表－1 工事諸元

1) 工法	泥水式シールド工法
2) シールド外径	φ5,810mm
3) セグメント	RC セグメント (6 等分割) 外径: 5,650mm、内径: 5,200mm 桁高: 225mm、幅: 1,200mm
4) 延長	2.4km
5) 土被り	21.6～33.0m
6) 地下水压	0.24～0.29MPa
7) 平面線形	直線
8) 勾配	0.2～20‰
9) シールド発進・到達工法	NOMST 工法

表－2 シールド掘進機主要目

シールド外径	φ5,810mm
スキンプレート全長	9,480mm (真円保持装置を含まない)
シールドジャッキ	1,700kN×28.9MPa×2,550mm×30 本
シールドジャッキ伸長速度	(最大) 100mm/min
カッタ駆動方式	電動駆動
装備トルク	(常用) 2,647.8kN・m (α=13.7) (最大) 3,177.4kN・m (α=16.5)
カッタ回転数	1.6rpm/0.8rpm
カッタ駆動用電動機	45/22.5kW×4/8P×400V×10 台
推進用パワーユニット	(ポンプ) 90l/min×34.3MPa×2 台 (電動機) 75kW×4P×400V×2 台

表-3 シールド長距離・急速施工技術の特質

	項 目	シールド長距離・急速施工技術	一般的なシールド工法の場合
急速施工対応	シールド掘進とセグメント組立	①ジャッキストロークはセグメント2リング分の長さにする②同時施工中にエレクターが掘進機と共に前進しないように、真円保持機によりエレクタをセグメント側に固定	シールド掘進後にセグメント組立(1リング長毎)
	セグメント組立作業	ホイストにより供給されるセグメントを空中で受け渡す。セグメントの受け取り・把持・位置決めは自動	人力による位置決め・ボルト締結作業
	シールドの方向制御	自動方向制御システム	状況に応じたジャッキ選択
	掘進速度と設備能力	平均掘進速度 5CM/分、カッタ回転数を2段階に切り替え可能(設備は 24M/日、7.5CM/分で計画)	2～3cm/分程度 6M～8M/日程度(設備は2倍で計画)
	セグメント搬送	高速走行(8KM/H)	バッテリー運転による搬送(4km/h程度)
長距離対応	稼働日平均掘進量	目標 20M/日(1日2交代・10時間拘束)	3M～4M/片番程度
	目標施工延長	5000M	1500～2500M
	カッタビットの材質	耐摩耗性に優れた超合金(E3種)の採用	E5種
	ビット摩耗対策	2重差し歯方式(許容摩耗量 30MM)	一般的にはなし

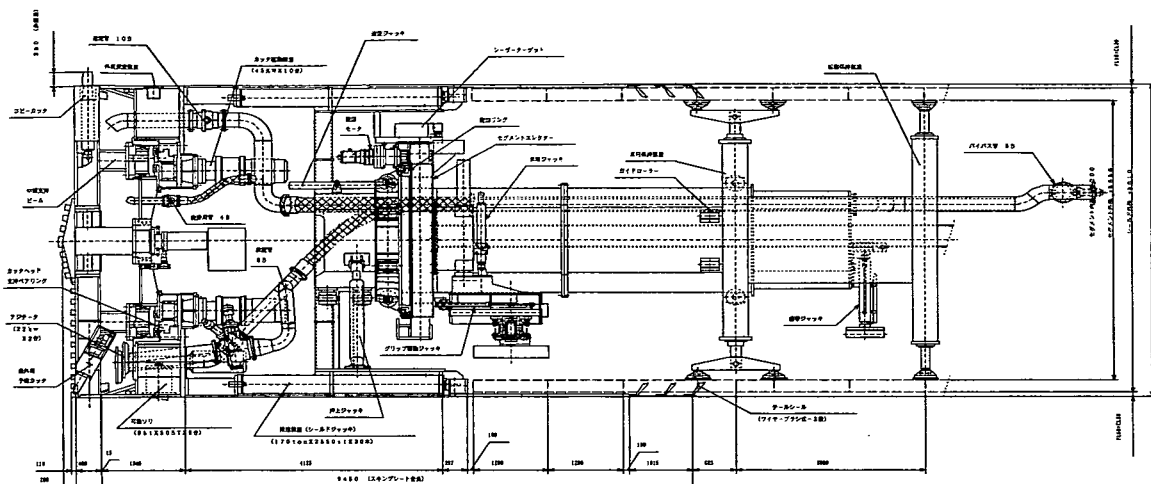


図-2 シールド掘進機全体組立図

4. シールド掘進機の点検結果と整備内容

(1) カッタフレーム

カッタフレーム・面板の摩耗量は、1.35～1.55mm であった。これは、カッタビットが異常摩耗することなくカッタフレーム・面板を保護していたためと考えられる。カッタフレーム外周リングの摩耗量は、1.8～3.6mm であった。カッタフレーム外周リングの硬化肉盛りに付加して保護ビットを取付けた効果があったので、摩耗が少なかったと考えられる。

板厚測定結果から、次工事でも十分な板厚が残存すると考えられるので、問題はないと考えた。なお、外周リングには、リング全幅にわたって摩耗保護ビットを取付けており、大きく摩耗しないものと考えられる。

(2) カッタビット

カッタビットの配置を図-3に、主なビットの摩耗計測結果を表-4に示す。本工事では、長距離施工と礫が出現することを考慮して、カッタビットのチップの材質はE3種とし、母材は工具鋼とした。そして、洪積層をティースビットに先行して掘削することによる目入れ効果と礫からティースビットを保護することを目的として先行ビットを装備した。さらに、立坑のNOMST掘削対応として、NOMST用の先行ビットを装備し、最外周にはシェルビットを配置した。

1) ティースビット

ティースビットの摩耗計測結果を図-4に示す。カッタビットの摩耗量は、シールド掘進機の機種、土質、カッタビットの形状や材質等により決まるが、一般的にカッタビットの摺動距離に比例することがわかる。

カッタビットの摩耗量が摺動距離に比例することから、摩耗量 δ は、次式で表わすことができる。

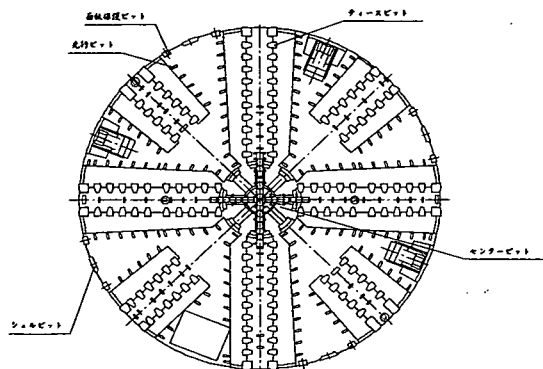


図-3 カッタビット配置図

表-4 ビットの摩耗計測データ

No	ビット名称	面状からの高さ (mm)	最大 摩耗量 (mm)	最小 摩耗量 (mm)	最大 摩耗係数 (mm/km)	最小 摩耗係数 (mm/km)
1	ティースビット	110	4	0.1	0.0034	0.0002
2	先行ビット	130	10.4	2.5	0.0102	0.0025
3	センタービット	80	2.25	0.4	0.0091	0.001
4	外周リング保護ビット	0	2	0.5	0.00126	0.00032
5	シェルビット	160	24.02	20.52	0.0151	0.0129
6	面状保護ビット	60	1.12	0	0.0007	0

$\delta = K \times L$ ここで、 δ : 摩耗量(mm)、 K : 摩耗係数(mm/km) L : 摺動距離(km)

上式における摩耗係数は、主に掘削対象である土質により決定されるものである。つぎに、摩耗係数と摺動距離の関係を図-5に示したが、摩耗係数と摺動距離のプロットデータはほぼ水平に分布していることから、一定の値をとることがわかる。摩耗係数は、0.0002~0.0034 mm/kmの範囲にあり、設計段階での予測を下回るものであった。これは、先行ビットが設計で意図した以上の効果を発揮した結果であると考えられる。

ティースビットの摩耗は少なかったが、ほとんどのものが一部欠損していた。これは、想定した礫径を大きく上回る礫(300mm 程度)が出現したためと考えられる。

以上のことから、ティースビットの欠損状況より転用するのは好ましくないと判断した。また次工事は、本工事の2倍近い距離を掘削することから、ティースビットを高低差配置とし、寿命を本工事以上に長くすることとした。

2) 先行ビット

先行ビットの摩耗計測結果を図-6に示す。

図-6から先行ビットの摩耗量は、ティースビットと同様に、ビットの摺動距離の増加とともに増える傾向にあることがわかる。

摩耗係数は、0.0025~0.0102 mm/kmの範囲にあり、最大値は、ティースビットの約3倍である。これは、先行ビットがティースビットより地山の掘削を先行し、礫からの衝撃を防ぐ働きをしたためと推測できる。

本工事の最大摩耗量が 10.4 mmであることから、先行ビットを転用した場合、次工事の推定合計摩耗量は 39.2 mmとなる。これより、次工事の約半分の地点でティースビットと先行ビットの高さが同じとなり、先行ビットの先掘り効果が無くなることから先行ビットの転用は好ましくないと判断した。

また、本工事において、到達立坑のNOMSTを無事掘削できたのも先行ビットが機能していたからであると考えられるので、次工事でも同様な施工条件であることを考え、先行ビットを全て新品と交換した。なお、次工事の推定摩耗量から、先行ビットの高さを本工事より 10mm 高くした。

(3) カッタ軸受

本機は、カッタ軸受に3列ローラころ軸受を装備している。構造を図-7に示す。開放確認したところ、転動面には損耗や有害な傷は無く、摩耗量は、軸方向で 0.01~0.02mm であり、円周方向で 0.05~0.06mm でありごく僅かである。また、カッタギヤの歯面の状態も良好で、傷や損耗はみられなかった。

これらより、次工事への転用と使用に問題無いと考えられた。

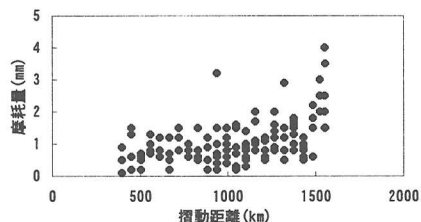


図-4 ティースビットの摩耗量と摺動距離

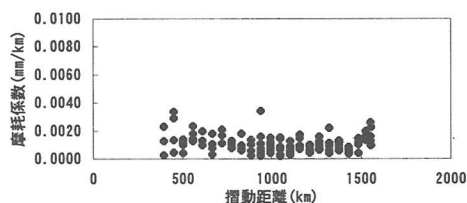


図-5 ティースビットの摩耗係数と摺動距離

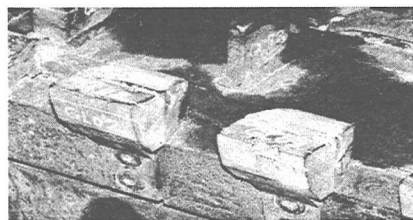


写真-1 ティースビット

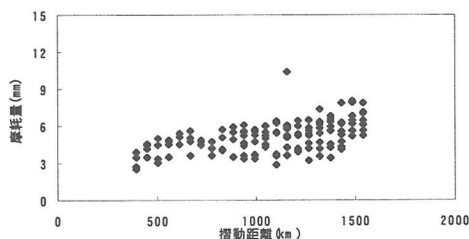


図-6 先行ビットの摩耗量と摺動距離

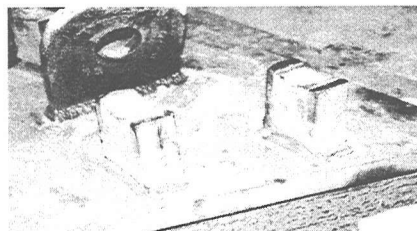


写真-2 先行ビット

(4)土砂シール及び摺動面

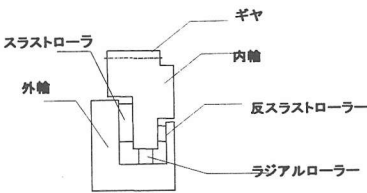
1) 土砂シール

土砂シールの摩耗は、ラビリンスのコーナシールの角部が最大4mm 摩耗していたが健全であった。リップシールは、取付けによる圧縮により、倒れ方向に僅かながら永久歪みが発生していた。点検結果から、土砂シールの摩耗は問題無く、若干の永久歪みも締め代としては十分確保されていることが確認できた。

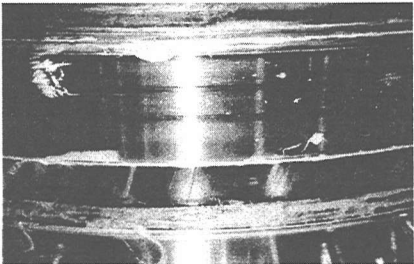
なお、本機は、製作後約5年経過しており、また解体でシールの当たりが変わること、コーナシール部の摩耗が土砂の噛み込み状況により大きく変わる場合があること等から新規交換した。

2) 土砂シール摺動面

本機は、高張力鋼を土砂シール摺動面に採用した。土砂シール摺動面の摩耗は極めて少なく、長距離対策、急速施工対策をした設計の効果が確認できた。なお、摩耗については問題無かったが、土砂シールと同様の理由から新規交換した。



図ー7 3列ローラころ軸受の構造断面図



写真ー3 土砂シール摺動面

(5)スキンプレート

スキンプレートの推定残存板厚は、スキンプレートの強度計算結果から、設計上必要とされる厚さ以上であるので、次工事での施工に問題はないと考えられた。

(6)シールドジャッキ

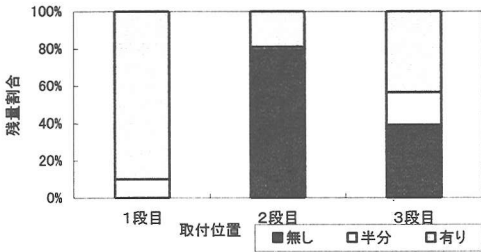
シールドジャッキのシリンダチューブ、ピストン、ピストンロッド、ロッドブッシュを点検したところ、各部の摩耗量は0～0.05mmと微少であった。ジャッキの使用限界は、油の漏れ量によって決まるが、これを考慮し、シールの締め代より摺動部の許容クリアランスを定めており、本工事の結果から次工事のクリアランス推定値を表ー5に示す。結果は、許容クリアランス以内に収まっており、次工事に転用してもシール性能を満足できると考えられる。

表ー5 シールドジャッキ摺動部のクリアランス

項 目	許容クリアランス	製作時の最大値	本工事	次工事
チューブとピストン	0.57mm	0.27mm	0.35mm	0.42mm
ロッドとブッシュ	0.53mm	0.23mm	0.27mm	0.30mm

(7)テールシール

本機では、実績として最も多く、また、その性能を評価されているワイヤブラシ式テールシールを採用した。(表ー6 参照) 本シールの止水性は、基本的にワイヤブラシに金網を挟み、繊維質の充填材注入による目詰まり効果を利用したものであり、長距離対応として装備段数を3段とし、材質にステンレスを採用した。



図ー8 テールシール取付け位置毎の内側鋼板残量

表ー6 ワイヤブラシ式テールシールの構成

名 称	材 質	構 成 図
①ワイヤブラシ	φ0.35 SUS 304 WPD	
②金 網	SUS 304 #40	
③内側保護板	SUS 631 0.5t	
④ワイヤブラシ 抜け止め芯線	SUS 304	
⑤外側保護板	SUS 631 1.0t	
⑥ベース プレート	SS 400	
⑦皿リベット	SS 400	

ワイヤブラシは、内側保護板と外側保護板に保護されており、ワイヤブラシ式テールシールの止水性の低下は、ワイヤブラシが損耗することに起因する。特に、内側保護板の有無がワイヤブラシの損耗の程度に大きく影響すると考えられることから、内側保護板の有無を調査した結果を図-8に示す。最も損耗度合いが大きかったのは、2 段目のテールシールである。これは、3段装備したうちの中央に取付けられていたものである。今回、テールシール間に充填材を注入しており、この注入圧力により 2 段目のテールシールが拘束され、セグメントとの接触圧が高まった結果、セグメントとテールシール間の摩擦抵抗が大きくなり、保護板の損耗を招いたものと推測される。

次工事においては、トンネル延長がさらに長くなるので、テールシールの段数を増やし、全体でシールの長寿命化を図った。また、装備段数の増加により、機内側シールの交換が容易になるので、トンネル施工中に点検を行い、必要に応じてテールシールの交換を行うことが可能である。

5. 点検・整備結果の総括・課題

点検の結果、得られた計測データは、当初の設計時点での予測を下回るものが大半であった。この要因としては、装備した機器類の寿命時間に対する稼働時間の割合が小さいということがあげられる。それは、本機が、自動化技術を導入した急速施工（掘進速度とカット回転速度の高速化等）の実現によって、長距離掘進でも稼働時間を短縮することができたからであると考えられる。また、本機の形式が泥水式であることも、機械が受ける負担を軽減していると思われる。そして、掘削地盤が細砂を中心とするシルト分を含む砂質土が多かったため、結果的に、機械に致命的な損傷を与えなかったのではないかと考える。なお次工区への改善点を表-6に整理した。

表-6 次工区へ向けてのおもな改善点

検討項目	改善項目
カットビット	・次工区の粘性土地盤主体であることより、すくい角を 15°から 20°に変更
	・チップの背面・すくい面保護チップ欠損が多かったことを踏まえて、超硬チップの取付方法をインサートタイプから大型チッププレートタイプに変更
	・次工区の硬対策として、カットビット高低差配置の採用
	・先行ビットの摩耗実績を踏まえて、メインビットに対する先行量を 20mm から 30mm に変更
掘進機本体	・シールドビットの摩耗実績を踏まえて、側面に超硬チップを追加
	・テールシールの点検整備結果を踏まえて、3段ワイヤブラシから4段ワイヤブラシのテールシール機構に変更
後続設備	・メイン排泥管が閉塞したことを踏まえて、排泥バルブ前後を直管とした。

6 今後の課題

本シールド掘進機の構成機器単位での点検を行うことで、転用先での使用に耐えられる整備基準を策定することができた。またシールド機の摩耗についても予想以下であり、今回の材料の選定および設計法の

安全性が確認された。しかしながら、今回は限られた条件での 2.4km の掘進実績であり、次工区への機器の転用を評価する際に、安全性を重視し、当初計画仕様にもとづき新品へ交換した機器も少なくなく、課題として残った。

なお本工事では、急速施工についての当初の目標（日進20m）は達成できた。またセグメント側でエレクトーを支持し、掘進と同時にセグメントを組み立てる方法についても、施工性精度はほぼ満足行くものであった。

7. おわりに

近年、シールド工事のコストダウンに向けての長距離化、急速化が数多く実施されている。これにはカットビットをはじめとする耐久性のすぐれた材料開発や、エレクトー機能や覆工の改善等による施工能率向上による高速施工、また立坑施工法の改善によるコストダウン等が可能になってきたことによる。今後これらの施工実績データ等を総合的に分析することで、より効率的な「シールド長距離・急速施工技術」の検討を行うことが可能になると考える。

これらの成果は本業務を進めるに当たり、ご協力いただいた関係者特に「石岡トンネル施工検討委員会」の委員をはじめ建設省関連各部署のご指導・ご協力によるものと考えます。ここに改めて感謝の意を表する次第です。

参考文献

- 1) 斉藤孝志：日進 20m を越える急速施工シールドー石岡トンネル(その1)工事ー, 土木施工 40 巻 2 号, pp.17-24, 1999.