

# シールドトンネルの長距離・急速施工技術

## —石岡トンネルシールド掘進機の点検・整備実績—

鈴木 勇喜・西尾 誠高・石野 智文

国土交通省関東地方整備局の実施する霞ヶ浦導水事業では、シールド区間が、36.1 kmと長いと、工期短縮とコスト削減を目的とし、シールド工事の長距離（連続5 km）・急速施工（日進20 m）のための技術開発に平成元年度から取組み、その技術を石岡トンネル区間にてパイロット事業として導入し、平成9～10年にかけて施工を行い、平成11年に次工事へ転用するために整備を行った。ここでは、シールド掘進機的设计仕様の妥当性と転用に向けた評価のために実施した、掘進後のシールド掘進機の点検整備と評価結果について報告する

キーワード：導水路、長距離、急速施工

### 1. はじめに

国土交通省関東地方整備局の実施する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（シールド掘進機とセグメントストック装置、およびセグメント自動搬送システムより構成される）が採用された。

長距離・急速施工シールドシステムは、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削減等を目的として開発されたものであり、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。

本報文では、本工事で使用したシールド掘進機を次工事に転用するに当たり、実施した点検整備と評価結果について報告する。

### 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。

本事業は、茨城県水戸市渡里町地先の那珂川から、同県石岡市三村地先の霞ヶ浦高浜を経て、同県土浦市湖北地先の霞ヶ浦に至る那珂導水路と、茨城県稲敷郡東町結佐地先の利根川から、同町上須田地先の霞ヶ浦麻生沖に至る利根導水路から成っている。導水路は総延長45.5 kmに及び、地下20 mから50 mの深さに建設される我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。

#### （2）石岡トンネル（その1）工事の概要

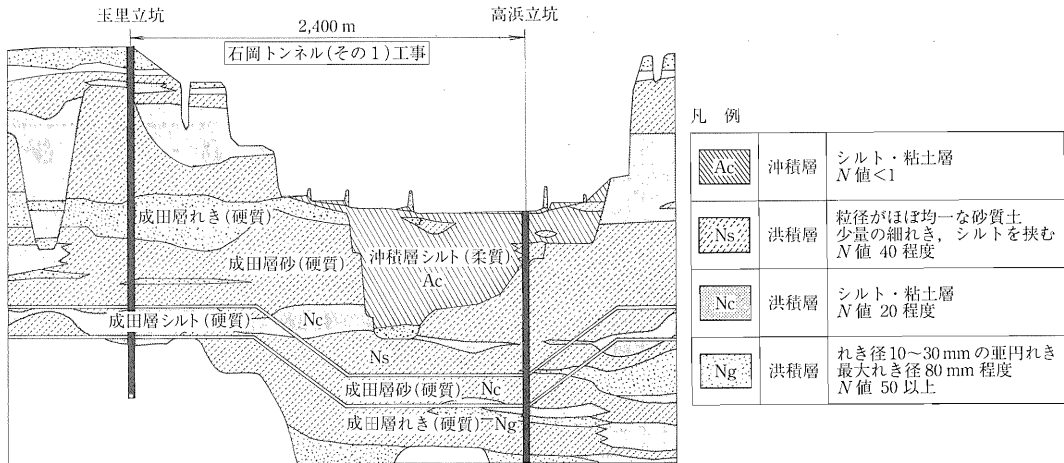
本工事は、那珂導水路の内、高浜立坑から玉里立坑までの2.4 kmのトンネル工事である。工事諸元を表-1に示す。

表-1 工事諸元

工 法	泥水式シールド工法
シールド外径	φ5,810 mm
セグメント	RCセグメント(6等分割) 外径：5,650 mm 内径：5,200 mm 桁高：225 mm 幅：1,200 mm
延 長	2.4 km
土 被 り	21.6～33.0 m
地下水圧	0.24～0.29 MPa
平面線形	直 線
勾 配	0.2～20‰
シールド発進・到達工法	NOMST工法

### 3. 地質概要

シールド路線は、沖積低地および東茨城台地に



図一 石岡トンネル (その1) 工事地質縦断面図

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圧は、0.24~0.29 MPa程度である。

#### 4. 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、掘進とセグメント組立てが同時にでき、急速施工を可能としている。図一2に本機の構造図

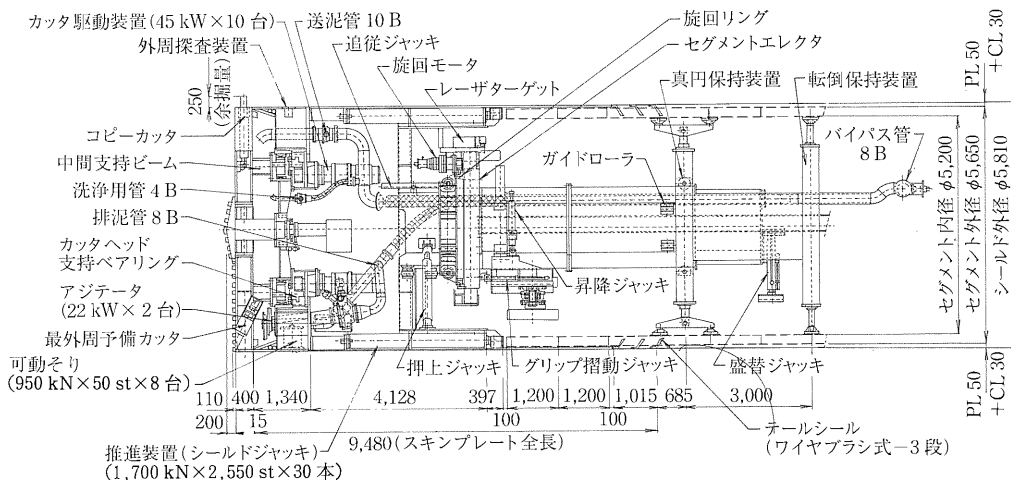
を示し、その主要目を表一2に示す。

表一2 シールド掘進機主要目

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

#### 5. シールド掘進機の転用

那珂導水路の施工に当たり、国土交通省は平成元年度から石岡トンネル施工検討委員会 (委員



図二 シールド掘進機全体組立て図

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，そのパイロット事業として石岡トンネル区間が選定された。その中で，本機は，1回転用することを前提に設計されたが，長距離施工については，機械の耐久性が課題であり，本工事施工後の検証で，機器単位で調査することとした。

特に，長距離掘進における耐久性の調査実績の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，到達後のシールド掘進機を工場へ持ち帰り，各機器の点検を行い，そのうえで転用先での使用に耐えられるように整備を実施した。

## 6. 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

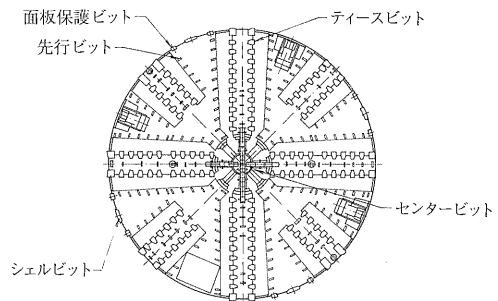
カッタフレーム面板の摩耗量は，1.35～1.55 mmであった。これは，カッタビットが異常摩耗することなくカッタフレーム面板を保護していたため，摩耗が少なかったと考えられる。カッタフレーム外周リングの摩耗量は，1.8～6.6 mmであった。これは，カッタフレーム外周リングの硬化肉盛りに付加して保護ビットを取付けた効果により，摩耗が少なかったと考えるが，一部流れ摩耗により6 mm摩耗しているところがあった。しかし，板厚測定結果から，次工事でも十分な板厚が残存すると考えられるので，問題はないと考えられる。

なお，外周リングには，リングの全幅にわたって摩耗を保護するための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—3に示す。

本工事では，長距離施工と礫の出現を考慮して，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 (Novel Material Shield-cuttable Tun-



図—3 カッタビット配置図

表—3 ビットの摩耗計測データ

ビット名称	面板からの高さ (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)
ティースビット	110	4	0.1	0.0034	0.0002
先行ビット	130	10.4	2.5	0.0102	0.0025
センタービット	80	2.2	0.4	0.0091	0.0010
外周リング保護ビット	0	2	0.5	0.0013	0.0003
シェルビット	160	24	20.5	0.0151	0.0129
面板保護ビット	60	1.12	0	0.0007	0

nel-wall System) 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。

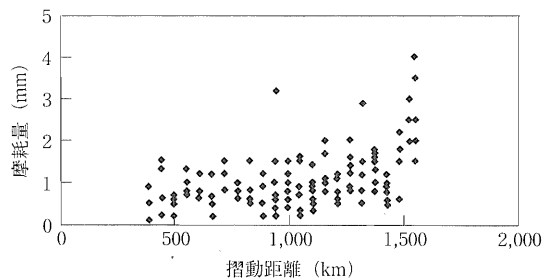
計測結果から，カッタ面板からの高さが高いビットほど摩耗量が多いという傾向がみられる。

なお，本工事におけるカッタビットは，砂質土または粘性土，砂礫において掘進延長2.4 kmの使用に耐えられるように設計したものである。

以下に主なビットの調査結果を報告する。

#### (a) 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。



図—4 ティースビットの摩耗量と摺動距離の関係

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

すると言われており、このことを裏付ける結果である。

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 $\delta$ は、次式で表すことができる。

$$\delta = K \times L$$

ここで、 $\delta$ : 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に示す。

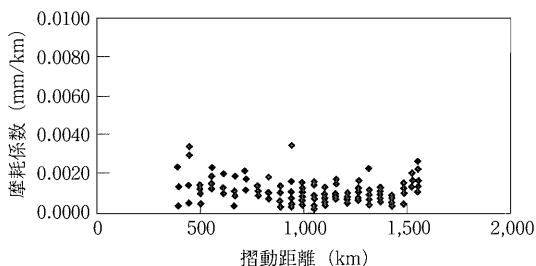


図-5 ティースビットの摩耗係数と摺動距離の関係

図-5に示すとおり、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。この理由としては、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、大半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(200~300 mm程度)が出現し、想定以上の厳しい礫層であったためと考えられる。

以上のことから、摩耗量の点ではティースビットを次工事に転用することは可能と考えられるが、ティースビットの欠損状況から、転用不可能であるので全数新規製作した。

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。また、掘削対象となる地質が洪積粘性土となるので、切削性を考慮して、形状も次工事での条件に適合するようにした。



写真-1 ティースビット

(b) 先行ビット

図-6に示す先行ビットの摩耗計測結果から、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するので、ティースビットの摩耗低減と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。このことは、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、次工事の約半分の地点から先行ビットの先掘り効果が無くなることを示し、カッタとしての掘削性能の低下が懸念されることから先行ビットは転用しないこととした。

また、本工事の到達立坑の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

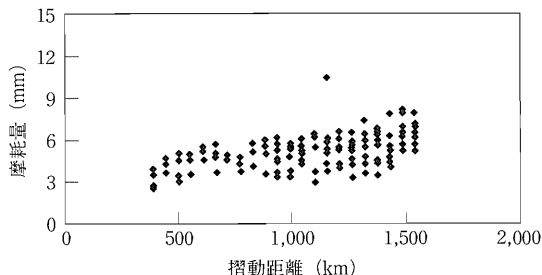


図-6 先行ビットの摩耗量と摺動距離の関係

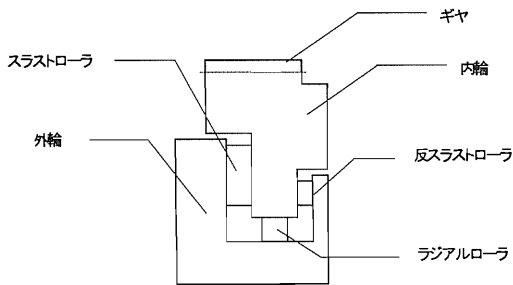
あると考えられるので、次工事も到達立坑のNOMST壁を先行ビットで掘削することを考えると、先行ビットの役割りの重要性から転用せずに、すべて新品と交換した。なお、次工事の推定摩耗量から、先行ビットの高さを本工事より10mm高くした。

(3) カッタ軸受

本機は、図一7に示すようにカッタ軸受に3列ローラころ軸受を装備した。

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。

このように、カッタ軸受は摩耗量が微小で、回転振れ量も非常に少ないことから、次工事への転用と使用に問題無いと考えられる。



図一7 3列ローラころ軸受の概略断面図

(4) 土砂シール及び摺動面

(a) 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。

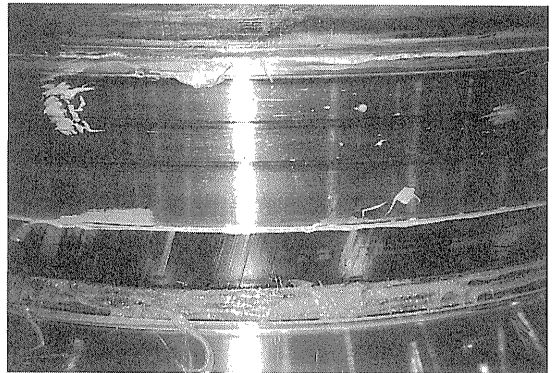
なお、本機は、製作後約5年経過していること、解体でシールの当たりが変わること、コーナシール部の摩耗が土砂の噛込み状況により大きく変わる場合があること、および掘削途中で交換するこ

とができない重要部品であるので新規交換した。

(b) 土砂シール摺動面 (写真一2参照)

本機は、高張力鋼を土砂シール摺動面に採用した結果、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。



写真一2 土砂シール摺動面

(5) スキンプレート

スキンプレートは、シールド掘進機外部から作用する荷重に対し内部を保護する鋼殻である。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る。

(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、測定結果から各部の摩耗量は0~0.05mmと微小であった。

ジャッキの使用限界は、油の漏れ量によって決まり、油の漏れ量は、摺動部の摩耗量による。本機においては、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

表一4 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	0.57 mm	0.27 mm	0.35 mm	0.42 mm
ロッドとブッシュ	0.53 mm	0.23 mm	0.27 mm	0.30 mm

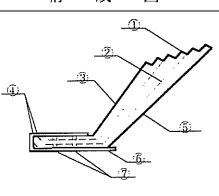
工事のクリアランス推定値を表—4に示す。

結果は、許容クリアランス以内に収まっており、次工事でもシール性能を満足できると考えられる。

### (7) テールシール

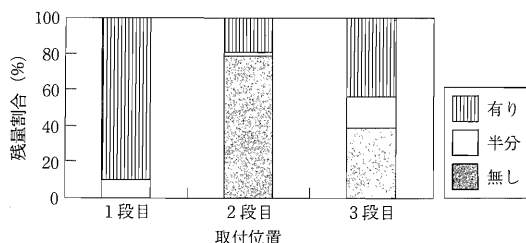
本機では、実績として最も多く、また、その性能を評価されているワイヤブラシ式テールシールを採用した(表—5参照)。

表—5 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 SUS304 WPD	
②金網	SUS304 #40	
③内側保護板	SUS631 0.5 t	
④ワイヤブラシ止め芯線	SUS304	
⑤外側保護板	SUS631 1.0 t	
⑥ベースプレート	SS400	
⑦皿リベット	SS400	

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、今回、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。

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ので、内側保護板の有無を調査した結果を図—8に示す。



図—8 テールシールの取付け位置ごとの内側鋼板残量

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、内側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、トンネル施工中に定期点検を行い、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。

## 7. 点検・整備結果の総括

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)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。さらに、機械の損傷の程度は、使用方法に大きく左右されると言われるが、今回の結果を見ると、施工者の機械に対する十分な配慮がうかがえた。

## 8. おわりに

長距離・急速施工シールドシステム対応のシールド掘進機は、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をすることができたと考える。

施工後のシールド掘進機を解体し、機器単位で点検計測を実施したというのは、これまであまり例のないことであり、この結果は今後の長距離・急速施工のシールド掘進機を検計するうえで、貴重な記録になるのではないかとと思われる。

最後に、本業務を進めるに当たり、ご協力いただいた関係者の皆様に心から感謝の意を表する。

〔筆者紹介〕

鈴木 勇喜 (すずき ゆうき)  
国土交通省関東地方整備局  
霞ヶ浦導水工事事務所  
機械課長



西尾 誠高 (にしお まさたか)  
財団法人先端建設技術センター  
先端建設技術研究所  
研究第二部  
主任研究員  
技術士



石野 智文 (いしの ともふみ)  
石川島播磨重工業株式会社  
油機・シールド事業部  
設計部シールド設計グループ  
課長代理

建設省建設経済局建設機械課監修

# 建設機械等損料算定表

——平成12年度版(全面改訂)——

建設省においては、「平成11年度版 建設機械等損料算定表」を全面改訂し、平成12年度の請負工事の予定価格の積算に使用する建設機械等の諸規格を全面的にSI単位に移行し、建設事務次官から全国の各地方建設局長宛に、また、建設経済局長から都道府県知事等に、平成12年4月1日以降の工事費の積算に適用するよう通知されました。

平成12年度版改訂のポイントは下記のとおりです。

- ① 基礎価格、残存率、標準使用年数等実態調査に基づき各数値とも全面的に改訂した。
- ② 近年普及が進み、公共工事等において使用される頻度が高くなった建設機械について新に損料を設定した。(例：超小旋回型及び後方超小旋回型バックホウ、自走式破碎機等)
- ③ 建設用仮設材の損料、建設機械の消耗部品の損耗費・補修費、及びウエルポイント施工機械器具損料等について改訂した。

平成12年度版主要目次

■建設省の関連通達	■建設機械の消耗部品の	基準別表
■算定表の見方・使い方	消耗費及び補修費	■無賠償と機械に係る現場
■建設機械等損料算定表	■ウエルポイント施工機	修理費率表
■ダム施工機械等損料算定表	械器具損料算定表	
■除雪機械等損料算定表	■建設用仮設材損料算定	

B5判、約520頁 平成12年4月発刊  
定価 会員 4,200円(本体4,000円) 送料600円(官公庁は会員価格です)  
非会員 4,725円(本体4,500円) 送料600円

## 社団法人 日本建設機械化協会

〒105-0011 東京都港区芝公園3-5-8 (機械振興会館)  
Tel.: 03(3433)1501 Fax.: 03(3432)0289