

Non-SC型泥土圧シールド機の開発

三澤孝史・稲葉金正・畑山栄一

泥土圧シールド工法における坑内作業環境の改善と生産性の向上を目的に、スクリュコンベヤを使用しない新たな排土システムを備えた泥土圧シールド機として、Non-SC型泥土圧シールド機を開発した。各種の要素実験により新排土システムの性能を確認した後、現場に適用した。その結果、シールド機テル部の作業性が向上するとともに、初期掘進時の施工性にも優れていることが確かめられた。

キーワード：トンネル、泥土圧シールド、スクリュコンベヤ、排土

砂質土までの適用が可能

1. まえがき

シールド工法において、密閉型シールドの代表工法に泥土圧シールドがある。「トンネル標準示方書（シールド工法編）」¹⁾によれば、泥土圧シールドは、「添加材を注入しながら回転カッターヘッドで掘削した土砂と添加材を強制的に攪拌して土砂を塑性流動化させ、土圧シールドと同様に切羽の安定を図りながら、スクリュコンベヤ等で排土するシールドである。」と定義している。

しかし、中小口径断面ではスクリュコンベヤのサイズはシールド機長に比べて長く、これがシールド機後方の作業性を著しく悪くしており、初期掘進時や急曲線施工時の施工性も悪くしている。

このような状況を改善するために、スクリュコンベヤ(SC)を使用しない新しい排土システム（以下、新排土システムという）を備えた「Non-SC型泥土圧シールド機」の開発を行った。

新排土システムについて、各種要素実験、性能確認実験によりその性能を確認した後、泥土圧シールドの工事現場に適用し、最終的な検証を行った。

その結果、セグメントの搬入・組立作業が改善され作業性が向上するとともに、初期掘進時における施工性も向上することが明らかになり、本システムの有用性を実証することができた。

2. 新排土システムの概要

(1) 開発目標

泥土圧シールド工法の坑内作業環境の改善と生産性の向上を目的として開発を行った。

開発目標を以下に示す。

- ① 切羽の土圧管理が可能
- ② 圧送距離は、後続台車までの約40mのパイプ搬送が可能
- ③ 適用地盤は、粘性土から50mm程度の礫を含む

(2) 新排土システムの機内設備

本システムは、スクリュコンベヤに代わりミキシング装置とディスク板を用いた土砂搬送装置から構成されている。

ミキシング装置は掘削土を均一に混練調整し、パイプ搬送を行いやすい性状に改質する。

土砂搬送装置はディスク板の回転数を無段階に制御することによって、排出土量の調節と切羽土圧管理を行う。

図-1に新排土システムのシールド機内設備例を示す。また、図-2に従来形式のスクリュコンベヤ設備例を示す。

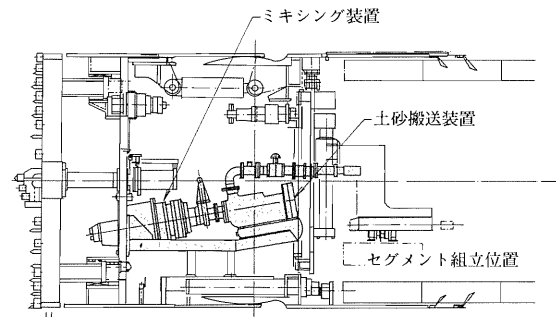


図-1 新排土システムのシールド機内設備

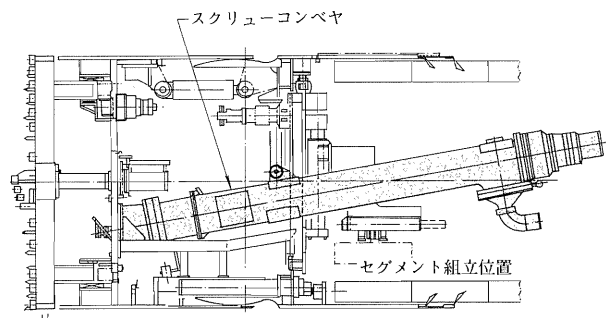


図-2 従来形式のシールド機内設備

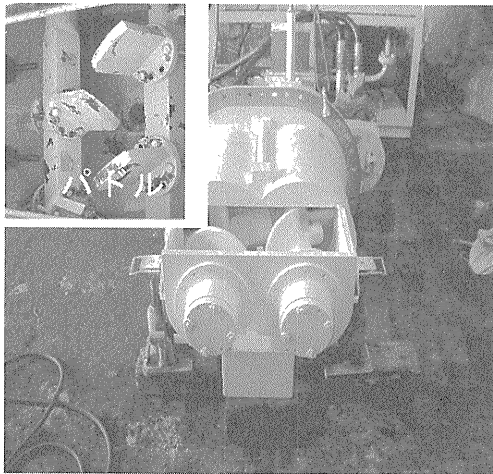
図-1、図-2を比較すると、新排土システムではスクリュコンベヤが無くなることにより機内作業スペースが大幅に広がっていることがわかる。

以下に、本システムの構成要素であるミキシング装置および土砂搬送装置の概要を述べる。

(a) ミキシング装置

写真一1にミキシング装置を示す。

ミキシング装置は水平2軸の強制攪拌式で、各軸は独立して油圧モータで駆動することができ、無段階変速である。



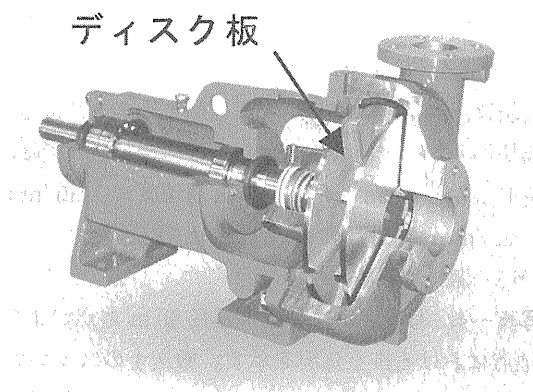
写真一1 ミキシング装置

この装置は、掘削泥土をスライス、粉碎、ミキシングすることで、パイプ搬送を行いやすい性状に改質する。一般の強制攪拌機より高回転数、高軸トルクであるので、粉碎能力が高い。要素実験では、一軸圧縮強度 20 N/mm² の固結物の粉碎も可能であった。

(b) 土砂搬送装置

土砂搬送装置を写真一2に示す。

本装置は、搬送材の粘着性と回転するディスク板の摩擦力、および微小の遠心力で搬送する。そのため、装置内部を通過する搬送材の流れがスムーズで急激な速度変化を伴わない。従来、搬送が困難とされていた高粘性の搬送材を搬送することができる。



写真一2 土砂搬送装置

作動原理は、二つの円盤を平行に繋げたディスク板が

回転を始めると、ディスク板と接している搬送材も、搬送材とディスク板との摩擦力により回転を始める。搬送材はディスク板に近いほど速く回転し、速度は徐々に隣り合う層に伝達していく。ディスク板から遠い中央部も次第に回転速度が増加していき、搬送材は遠心力によりディスク板の外側へと排出される。

(3) 新排土システムの特長

本システムの特長を以下に示す。

- ① シールド機内の作業空間が広く、セグメント搬入・組立や測定の作業性が向上する
- ② シールド仮掘進時の施工性、作業性が向上する
- ③ スクリュコンベヤとセグメントの干渉がなくなり、急曲線施工への対応が可能である

3. 搬送実験

新排土システムの開発に当たり、ミキシング装置および土砂搬送装置単体について要素試験により性能を確認した後、搬送実験によりシステムとしての性能を確認した。

搬送実験の主な目的は、切羽土圧を制御しながら、40 m以上の搬送が可能であるかを確認することである。

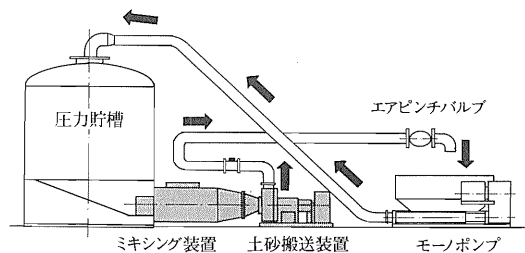
実験は、最初に予備実験として循環実験を行った後、搬送実験を行った。

(1) 搬送予備実験

(a) 搬送予備実験の概要

搬送予備実験では、新排土システムの切羽土圧制御性を確認することを目的に行った。

実験装置の概念図を図一3に示す。



図一3 搬送予備実験装置の概念図

実験は、モノポンプにより、想定したシールド機径の掘削速度に合わせた流量の搬送土を圧力タンク（シールド機のチャンバを模擬）に送り、そのタンク内の圧力（切羽土圧に相当）を土砂搬送装置のディスク板の回転数により制御しながら、再びモノポンプの土砂ホッパー内に循環させた。

実験は、掘進速度（流量）を一定として、1 ケースの中で目標切羽土圧を 0.10 → 0.05 → 0.15 MPa と変化させて、土砂搬送装置の切羽土圧制御性を確認した。また、開発目標の搬送距離に相当する搬送抵抗をエアピンチバルブに圧力をかけることにより模擬的に表現した。

(b) 搬送予備実験結果

搬送予備実験結果の一例として、掘進速度 3 cm/min, エアピンチ圧 0.3 MPa とした場合の圧力タンクの圧力と土砂搬送装置のディスク板の回転数を図-4 に示す。

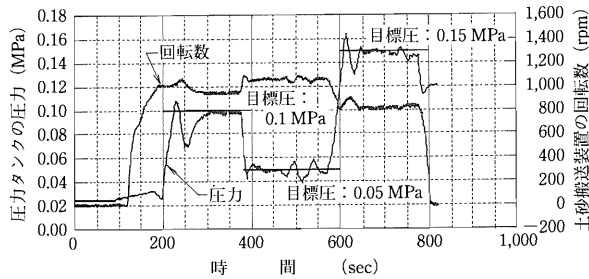


図-4 搬送予備実験結果の一例

図より、目標圧力に対して、初期は比較の変動が大きいですが、即時に目標値に収束し、いったん収束してからの圧力変化は小さく安定している。

また、土砂搬送装置のディスク板の回転数は、目標圧力を 0.05~0.15 MPa まで変化させるのに、700~1,100 rpm の範囲で制御が行われている。

以上のように、新排土システムにより、切羽土圧を制御可能であることを確認した。

(2) 搬送実験

(a) 搬送実験の概要

実験装置の概念図を図-5 に示す。

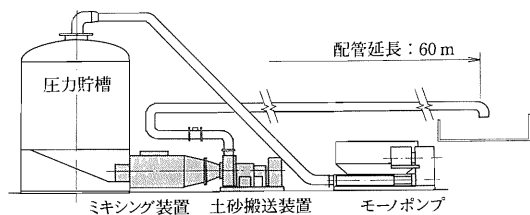


図-5 搬送実験装置

実験は、搬送予備実験と同様にモノポンプにより、想定したシールド機の掘削速度に合わせた流量の搬送土を圧力タンクに送り、そのタンク内の圧力を制御しながら、ミキシング装置により搬送しやすい性状に改質し、土砂搬送装置により圧送した。搬送土は、シールド工事現場の掘削土を用いた。

表-1、表-2 に、実験に用いた掘削土の粒度および

表-1 実験に用いた現場掘削土の粒度分布

礫分 (2~75 mm) (%)	砂分 (75 μm~2 mm) (%)	シルト分 (5~75 μm) (%)	粘土分 (5 μm 未満) (%)	最大粒径 (mm)
0	9	42	49	0.425

表-2 実験に用いた現場掘削土の物性

湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	自然含水比 (%)	間隙比	飽和度 S_r (%)
1.746	1.233	2.671	41.6	1.166	95.3

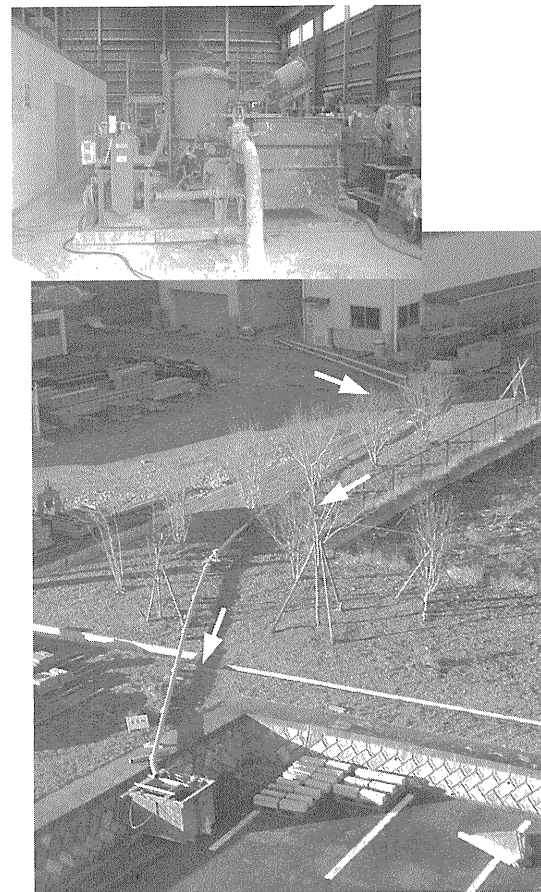


写真-3 搬送実験状況

物性を示す。

搬送実験状況を写真-3 に示す。写真に示すように、4 インチ管を 60 m 配管した。

実験は、掘進速度に相当する掘削土をタンクに送り、目標切羽土圧を維持するように土砂搬送装置の回転数で制御しながら 60 m 圧送した。掘進速度は 1 cm/min から 5 cm/min まで段階的に変化させて行った。

(b) 搬送実験結果

写真-4、写真-5 に、配管延長 40 m 地点および 60 m 地点における排土状況を示す。搬送土のスランプは、最小が 13.5 cm であった。

切羽土圧の制御性に関しては、目標切羽土圧 0.05 MPa とした場合において、切羽土圧（タンク内の圧力）

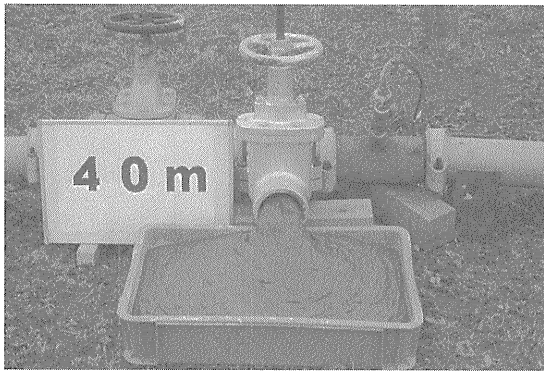


写真-4 排土状況 (圧送距離 40 m 地点)



写真-5 排土状況 (圧送距離 60 m 地点)

(2) 適用した新排土システム

新排土システムの設備配置を図-6に、同システムの仕様を表-3に示す。

(3) 適用結果

(a) 施工性・作業性

写真-6に新排土システムの機内設備状況を、写真-7に初期掘進区間以降にスクリュコンベヤに入替えた後の機内設備状況を示す。

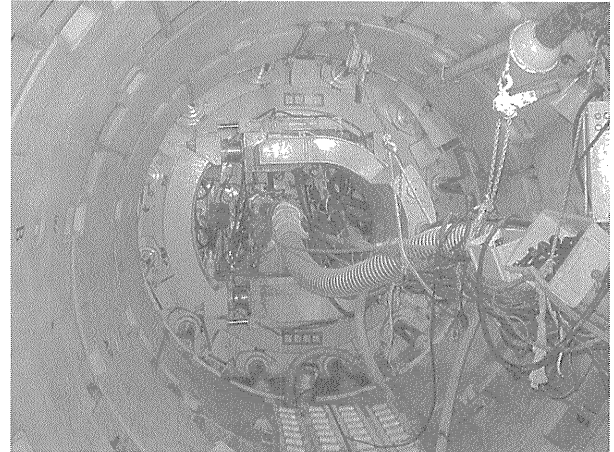


写真-6 新排土システムの機内設備状況

の変動は 0.03~0.05 MPa であった。

4. 現場適用

(1) 概要

新排土システムを下記のシールド工事現場に適用し、システムの最終的な検証を行った。

〔工事概要〕

- ・シールド外径：φ 3,290 mm
- ・セグメント内径：φ 2,600 mm
- ・土質：砂質土 (砂分率 60~70%)

初期掘進区間の約 45 m に新排土システムを適用した。以降の本掘進では、従来のスクリュコンベヤに入替えている。

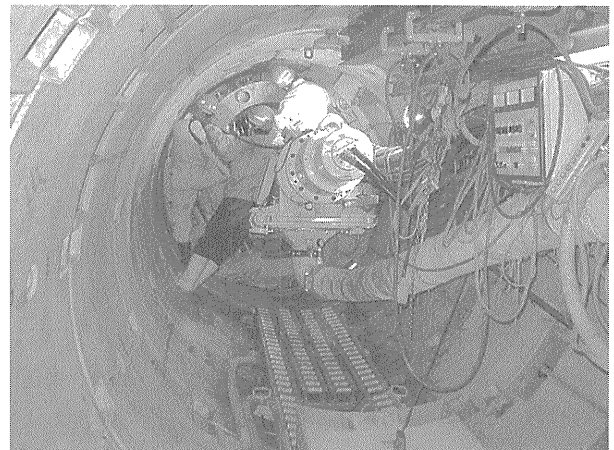


写真-7 スクリュコンベヤの機内設備状況

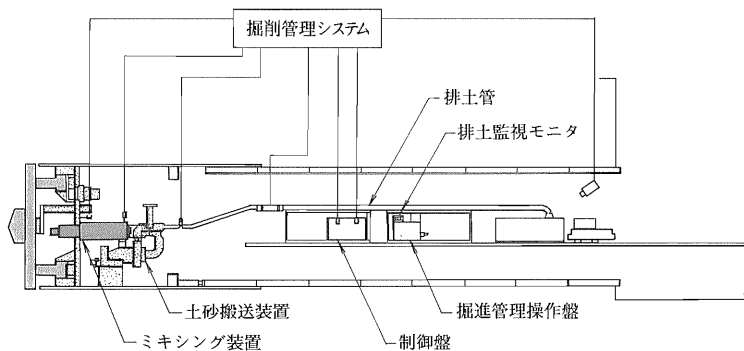


図-6 新排土システムの設備配置

表-3 新排土システムの仕様

・ミキシング装置	
形式	2軸強制攪拌ミキサ
回転数	0~60 rpm
駆動トルク	No.1軸 1.9 N・m×21 MPa
	No.2軸 1.9 N・m×9 MPa
・土砂搬送装置	
形式	ディスク回転型
電動機	37 kW×4 P×440 V
回転制御	インバータ制御
搬送量	48 m³/h

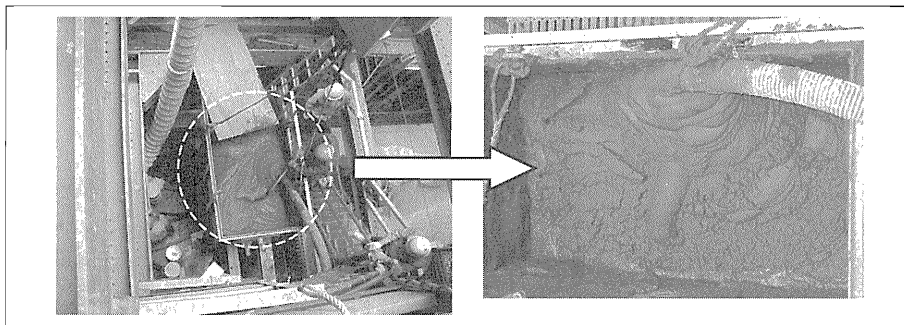


写真-8 排土状況



写真-9 搬送土の性状 (スランプ: 11 cm)

表-4 搬送土の粒度および物性

リング No.	礫分 (2~75 mm) (%)	砂分 (75 μm~2 mm) (%)	シルト分 (5~75 μm) (%)	粘土分 (5 μm未満) (%)	最大粒径 (mm)	土粒子の密度 ρ _s (g/cm ³)	自然含水比 (%)
8	0.5	56.4	29.1	14.0	4.75	2.681	32.2
15	12.2	53.4	24.5	9.9	9.5	2.696	31.4

写真からもわかるように、新排土システムではセグメント搬入・組立等のシールド機テール部の作業空間が大幅に改善されている。

(b) 土砂の搬送性

新排土システムにおける排土状況を写真-8に、搬送土の性状を写真-9に示す。表-4に搬送土の粒度および物性を示す。

適用した初期掘進区間における最大搬送距離は45 m程度であったが、従来形式と比べ、加泥率等をほとんど変えることなく土砂の搬送が可能であった。

(c) 切羽土圧制御

施工データの一例として、新排土システムの掘進1リング中の切羽土圧および掘進速度を図-7に、スクリュコンベヤを使用した場合を図-8に示す。

切羽土圧制御については、土砂搬送装置の回転数を調整することにより、スクリュコンベヤによる従来システムとほぼ同等であることが確認できた。

5. まとめ

今回開発した泥土圧シールド機用新排土システムは、ミキシング装置と土砂搬送装置から構成された新たなシステムであり、スクリュコンベヤを全く使用しないことが大きな特長になっている。φ2.0 m級のシールド機でも機内にコンパクトに収納できるため作業空間が広くなり、作業性が向上する。

ミキシング装置は、掘削土砂の粉碎、スライス、再ミキシングを行う役割があり、掘削土を均一に混練することで塑性流動化を促進させることができる。これにより土砂搬送装置による土砂のパイプ搬送性も向上する。また、土砂搬送装置の回転数制御により、安定した切羽土

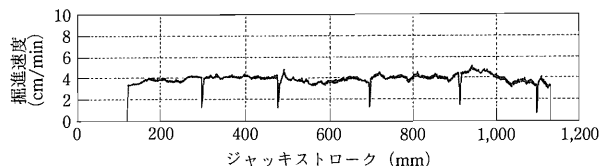
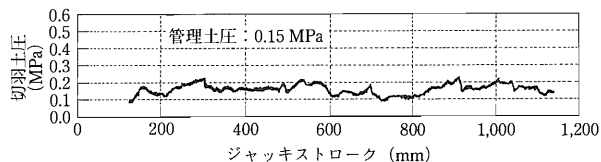


図-7 新排土システムの施工データ

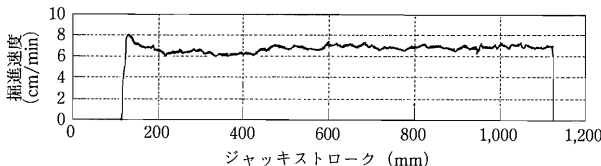
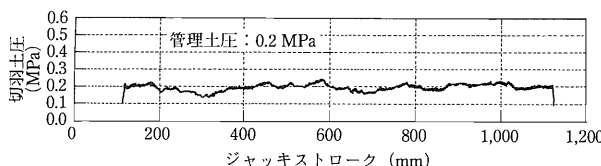


図-8 スクリュコンベヤの施工データ

圧の管理ができる。

現場適用の結果、確かめられたことを以下にまとめて示す。

- ① シールド機内の施工性や作業性が大幅に改善された
- ② スクリュコンベヤを使用した従来機と同様に切羽土圧制御が可能であった
- ③ 加泥材濃度と加泥率は、従来機とほとんど変わらなかった

今後、新排土システムを装備した「Non-SC型泥土圧シールド機」の特長を活かせる工事への適用を図っていきたく考えている。



《参考文献》

- 1) (社) 土木学会：トンネル標準示方書〔シールド工法編〕・同解説（平成8年版），p.20

【筆者紹介】

三澤 孝史（みさわ たかし）
株式会社奥村組
技術研究所
第4研究グループ
主席研究員



稲葉 金正（いなば かねまさ）
株式会社奥村組
技術研究所
第4研究グループ
主席研究員



畑山 栄一（はたやま えいいち）
株式会社奥村組
技術本部
技術開発部
主管



2001年版 日本建設機械要覧

本書は、国産および輸入の各種建設機械、作業船、工所用機械等を選択して写真、図面のほか、主要諸元、性能、特長等の技術的事項を網羅しております。なお、「環境保全およびリサイクル機械」を第10章にまとめ内容の充実をはかっており、建設事業に携わる方々には欠かすことのできない実務必携書です。

掲 載 内 容

- | | | |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ・ブルドーザおよびスクレーパ ・掘削機械 ・積込機械 ・運搬機械 ・クレーン、インクラインおよびウインチ ・基礎工事機械 ・せん孔機械およびブレーカ ・トンネル掘削機および設備機械 ・骨材生産機械 ・環境保全およびリサイクル機械 | <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート機械 ・モータグレーダ、路盤機械および締固め機械 ・舗装機械 ・維持修繕・災害対策機械および除雪機械 ・作業船 ・高所作業車・エレベータ、リフトアップ工法、横引き工法および新建築生産システム ・空気圧縮機、送風機およびポンプ | <ul style="list-style-type: none"> ・原動機および発電設備 ・建設ロボット、情報化機器、タイヤ、ワイヤロープおよび検査機器等 |
|---|---|---|

付 録

1. 建設機械関係日本工業規格
2. (社)日本建設機械化協会規格(JCMAS)
3. 土工機械関係 ISO 規格

体 裁：B5判、約1,400頁/写真、図面/表紙特製
定 価：会 員 44,100円（本体42,000円） 送料 1,050円
非会員 52,500円（本体50,000円） 送料 1,050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