

大口径偏心多軸シールド機によるトンネルの施工

—みなとみらい21線・本町シールドトンネル—

木村 光夫・宇部 三津男・藤本 明生

みなとみらい21線・本町トンネルは、延長452m、外径 $\phi 7.0$ mの単線並列トンネルである。鉄道では最初となる大口径偏心多軸方式の泥土圧シールド機を採用している。

偏心多軸シールド機による施工の結果、カッタの平行リンク運動に伴う機体の揺動は2mm程度であり、マシンの姿勢安定性には影響しない。また、切羽安定については、塑性流動化の管理を適切に行うことで、従来機と同等の安定性を確保できる。さらに、ビットの摩耗特性は、最外周のクロスルーフビット母材の摩耗が大きいものの、内周部のビットの摩耗は従来機に比較して小さい。全体として偏心多軸シールド機は砂礫地盤にも有効に対応でき、長距離掘進にも適するといえる。

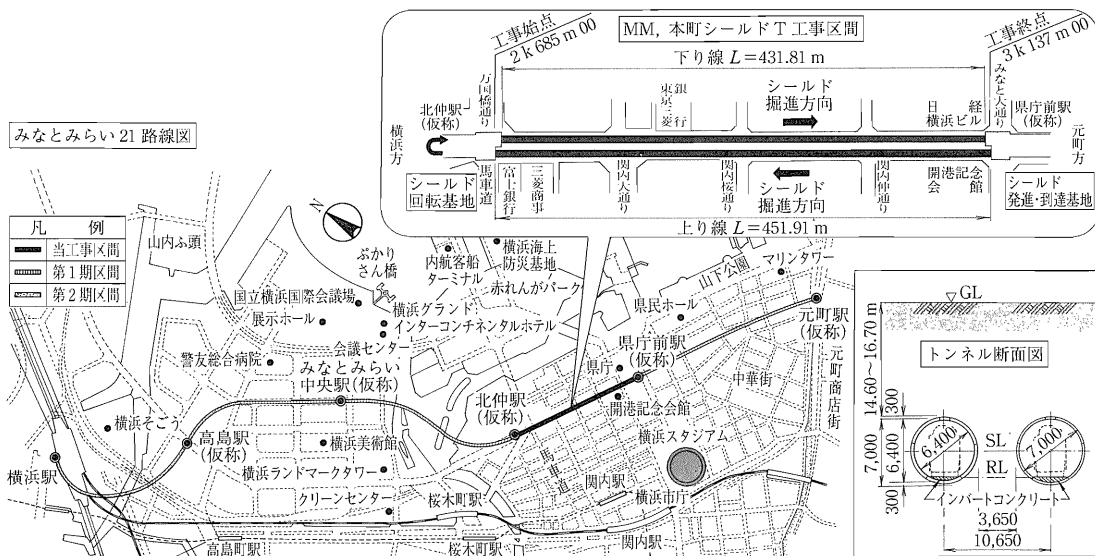
キーワード：鉄道トンネル、単線並列型、偏心多軸方式、泥土圧シールド、ビット摩耗

1. はじめに

みなとみらい21線は、横浜駅から「みなとみらい21地区」を経て、元町駅（仮称）に至る延長4.1kmの地下鉄新線である（図—1参照）。この路線は、「みなとみらい21地区」の円滑な旅客輸送と、既成市街地の「関内・山下町地区」の交通便利性の向上を目的として、平成16年春の開業を目指して現在建設中である。

路線は六つの駅と駅間を結ぶ5区間のシールドトンネルで構成される。このうち、本町シールドトンネル工区では、地下鉄工事では最初となる大口径偏心多軸方式（DPLEX）の泥土圧シールド機を採用している。

本報文では、偏心多軸シールド機の姿勢安定性、切羽安定性、カッタの負荷特性、カッタの攪拌能力、カッタビットの耐久性などについて報告する。



図—1 みなとみらい21路線図

2. 本町シールド工事の概要

- ・工事名：MM，本町シールド T
- ・工事場所：横浜市中区本町 1 丁目
- ・発注者：日本鉄道建設公団東京支社
- ・施工者：間・大豊・森本特定建設工事共同企業体
- ・工期：平成 10 年 3 月～平成 13 年 2 月
- ・工事内容：トンネル延長：上り線 452 m
：下り線 432 m
トンネル勾配：+2～+12‰
トンネル土被り：14.6～16.7 m
シールド機外径：φ7,150 mm
セグメント外径：φ7,000 mm
セグメント内径：φ6,400 mm

単線並列型のトンネルを 1 台の偏心多軸式シールド機で施工する。県庁前駅（仮称）を発進基地として、まず上り線を掘進し、北仲駅（仮称）にてシールド機を回転させて下り線を施工する。図-2 にシールド機概要、表-1 にシールド機仕様を示す。仕様については、参考として隣接する大岡川 T 工区の単軸方式の仕様を示す。

上り線の掘進は、平成 12 年 5 月から開始し、8 月初旬に完了している。写真-1 に上り線到達時のシールド機を示す。下り線の掘進は、10 月初旬に開始し、12 月中旬に無事到達した。

3. 地質概要

工事位置は沖積低地にあたり、シールドの通過する地層は、大半がシルトとシルト質粘土で構成される粘性土層（Ac1）である。県庁前駅付近では、約 100 m にわたり礫層（Ag）及び砂層（As）が出現した。図-3 に地質縦断面図を示す。

表-1 シールド機仕様

	本町シールド T	大岡川シールド T
カット掘削方式	偏心多軸方式	単軸方式（従来機）
シールド機外径×機長（mm）	7,150×7,485	φ7,260×8,000
シールド 推力（kN）	43,120	47,040
ジャッキ 速度（mm/min）	50	48
カットトルク 常用（kN・m）	1,475	8,203
最高（kN・m）	2,213	—
カット回転数（rpm）	1.33～2.00	0.32～0.83

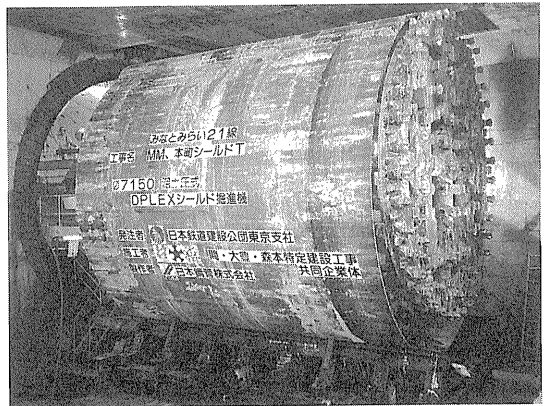


写真-1 偏心多軸シールド機

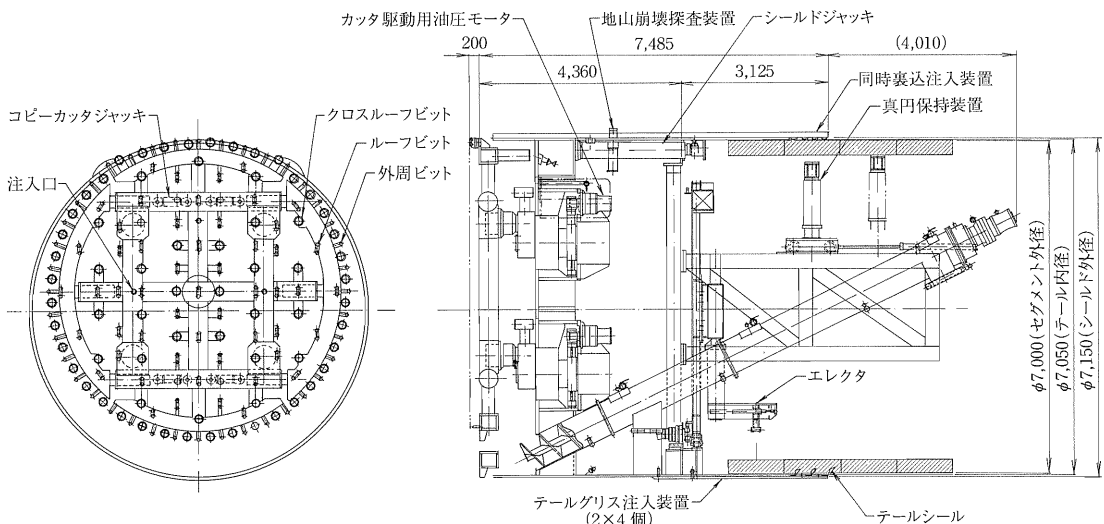


図-2 シールド機概要図

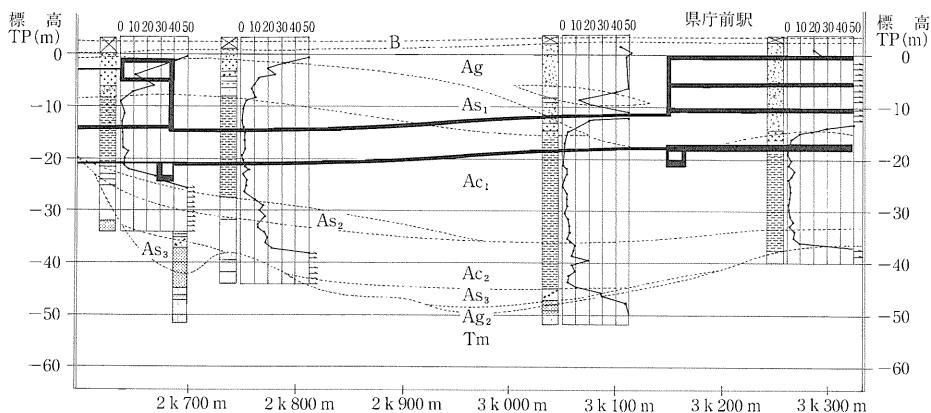


図-3 地質縦断面図

Ag層は、大岡川河口付近にのみ出現する玉石混じり砂礫層であり、層厚・分布範囲とも不規則で、沖積細粒土層に入替わるケースが見られる。当工事においても、シールド機製作の時点では出現することを想定しておらず、シルト・砂層を対象にシールド機的设计・製作を行った。

Ac1層は、 N 値2~5、一軸圧縮強度0.1~0.2 N/mm^2 の比較的安定した地層である。Ag層は、礫分を90%以上含み、 N 値は50以上と高いものの細粒分がほとんどない、崩壊性の地盤である。最大礫径は250 mmを示す。As層は N 値5~15と緩く、切羽の安定には特に注意が必要であった。

4. 偏心多軸シールド機の概要

(1) 工法原理

複数の駆動軸の先端にカッターフレームを偏心支持して回転させると、「平行リンク運動」を行い、カッターフレームとほぼ相似形の断面を掘削することができる(図-4参照)。

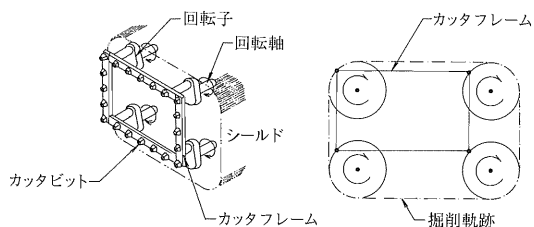


図-4 偏心多軸方式の掘削機構

(2) 工法の特徴

偏心多軸方式には、次の特徴がある。

- ① カッターフレームの形状を変えることで、円形、矩形、楕円形等任意の断面を掘削できる。
- ② 全ビットの摺動距離が同じであり、従来機に比べて摺動距離は小さいことから摩耗量が小さく、長距離掘進に適する。
- ③ カッターの回転半径が小さいため、カッタートルクを低減できる。また、駆動部がコンパクトになることで電力設備・消費電力等のランニングコストを低減できる。

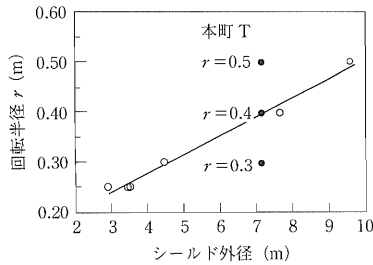
5. 偏心多軸シールド機的设计・製作

(1) 軸数の決定

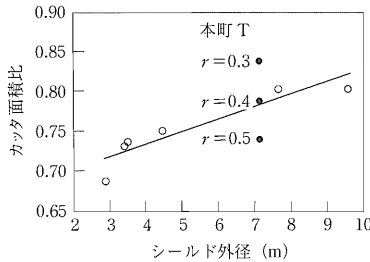
本機は $\phi 7.15$ mと大口径であることから、4軸としている。3軸では1軸当たりの負荷が増大し、構造的に設計が難しい。また、輸送・組立ての面でも3軸では分割重量が大きくなりすぎ、各軸のユニット化が図れない。

(2) カッター回転半径の決定

偏心多軸方式の回転半径の設定に際しては、トルク、攪拌能力、ビット配置、駆動部構造等の要因を考慮する。回転半径が小さいほどトルクが小さくなり、駆動部の構造補強の面では有利となる。その反面、攪拌能力が低下したり、ビットの配置数が多くなりカッターに土砂が付着しやすくなる。



図—5 外径と回転半径の関係



図—6 外径とカット面積比の関係

本機の設計では、 $r=0.3$ 、 0.4 、 0.5 mの3ケースについて比較し、施工実績も考慮して回転半径を 0.4 mに決定した。図—5及び図—6に、偏心多軸方式のシールド外径と回転半径、カット面積比（カット面積/シールド面積）の実績を示す。他の実績と比べても、 0.4 mが妥当であるといえる。なお、本機の設計当時の実績は、 $\phi 3.5\sim 4.5$ m（矩形断面については面積比で換算）の3件である。

（3） カッタ駆動方式

平行リンク運動の条件として、各駆動軸を同位相で同期回転させる必要がある。このことを考慮して、カッタ駆動方式を油圧駆動としている。油圧駆動のメリットとして次の2点がある。

- ① 同一の油圧源により4軸を駆動するので、作動圧が一定になり各軸の仕事量が均等化する。
- ② 回転が遅れた軸からは回転トルクが伝達されなくなり、作動圧が低下する。油圧源が同一であるため、作動油は圧力の低い軸に多量に流れ、結果的に回転遅れは解消される。すなわち、4軸が常にバランスしながら同期回転する。

（4） カッタトルクの設定

従来機では、計算所用トルクの1.5倍程度のトルクを装備している。今回は初めての大口径ということ considering, 常用トルクは計算値の1.3倍を装備し、最高トルクは2倍の装備としている。

6. 偏心多軸シールド機による施工

（1） 姿勢安定性

偏心多軸方式シールド機では、カッタの偏心回転に伴い、シールド機体が揺動する特徴がある。すなわち、カッタの切削反力を受けて、機体が同方向に揺動（首振り運動）する。

機体の首振り運動に伴って、掘進速度、ピッチングは連動して変動する。変動量は、掘進速度 ± 3 mm/min、ピッチング $\pm 0.01^\circ$ 程度である。

ピッチング変化より、首振り量に換算すると $1\sim 2$ mm程度となる。今回、首振り量が比較的小さいのは、カッタのオーバカット（余掘り）が全周ではなく掘り残しがあることから、シールド機胴体部の地盤による拘束が大きいためと考えられる。

余掘り量が小さいと、機体外周部と地盤との摩擦抵抗が大きくなり、推進力を増大させたり地盤を乱す要因となる。一方、余掘り量を大きくすると、機体の首振りも大きくなると考えられる。したがって、偏心多軸方式の余掘り量を決定する際には、地盤特性を把握して慎重に検討する必要がある。

（2） 切羽安定性

偏心多軸方式の切羽安定性を評価するには、カッタの平行リンク運動に伴う、切羽土圧の変動幅、および、地盤の押し上げ・引込み現象の有無を確認する必要がある。

図—7に切羽土圧データの一例を示す。図中にはカッタ位置を併せて示す。切羽土圧は、カッタの回転に伴い規則性をもって変動していることがわかる。これは、前述の首振り運動に起因するものであるが、変動幅は $20\sim 30$ kPaと小さい。

カッタ掘削機構からすると、土圧の変動幅は、チャンバ内泥土の塑性流動化状態によって大きく左右されると考えられる。塑性流動化が良好に管

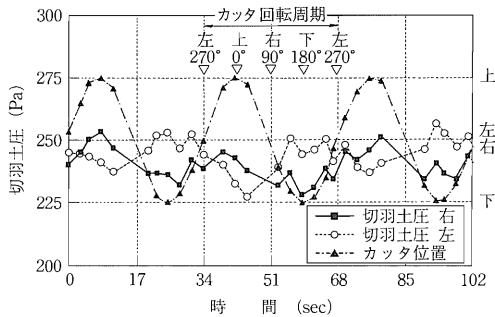


図-7 切羽土圧データの変動幅

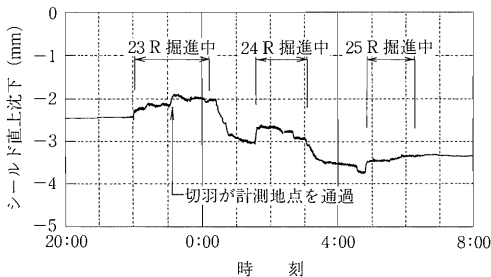


図-8 シールド直上の地中変位計測値

理されていれば、切羽土圧の変動幅は従来機と同じ程度であるといえる。

図-8 にシールド直上 1 m の地中変位の計測結果を示す。カッタの回転に伴う地盤変位は見られず、カッタが上下動しても、切羽安定性には影響しないことが分かった。

(3) カッタの負荷特性

単軸のシールド機のカッタトルク係数 α は、トルク T とシールド外径 D の 3 乗比で表される。これに対して、偏心多軸方式シールド機のカッタトルク T は次式で表すことができる。

$$T = \beta r D^2$$

ここに、 β : トルク係数 (kN/m²)

T : カッタトルク (kN・m)

r : カッタ回転半径 (m)

D : シールド外径 (m)

偏心多軸方式の過去 5 件の工事実績も含めて、装備トルクと掘削実績トルクを調査し、トルク係数 β を整理したものを図-9 に示す。

当工区の上り線の施工実績では、シルト層・砂層の区間で $\beta = 25 \sim 30$ kN/m²、礫層区間で $\beta = 35 \sim 50$ kN/m² である。

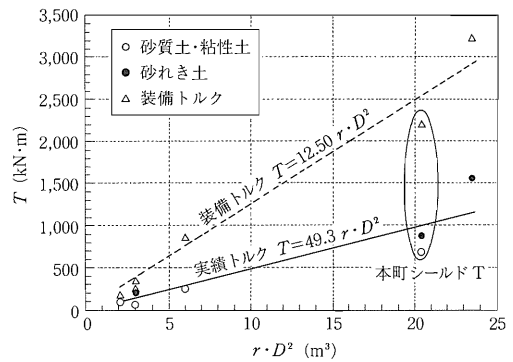


図-9 偏心多軸方式のカッタトルク

(4) カッタの攪拌能力

図-10 に攪拌翼の軌跡を示す。カッタの攪拌能力に関しては、偏心多軸方式では、チャンバ内の全体的な攪拌が行われない。このため、県庁前駅付近の砂礫層で、玉石の沈降によるチャンバ閉塞を懸念していた。発進直後に作泥材の注入過多となったとき、若干その傾向が見られたものの、適切な塑性流動化状態を確保できてからは、玉石の沈降現象は起こらず、良好な攪拌状態で排土することができた。

上り線到達後のチャンバ内の状況は、シルト・粘土の固結閉塞も見られず、チャンバ内の攪拌応力は十分であると判断される。なお、砂礫層、シルト層とも、排土のスランプが 14~19 cm 程度となるように塑性流動性を管理した。

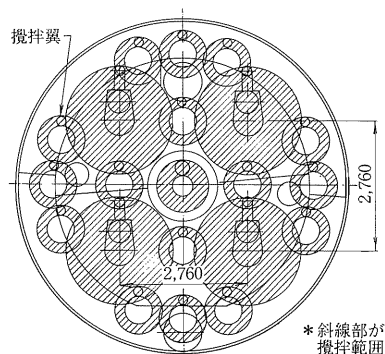


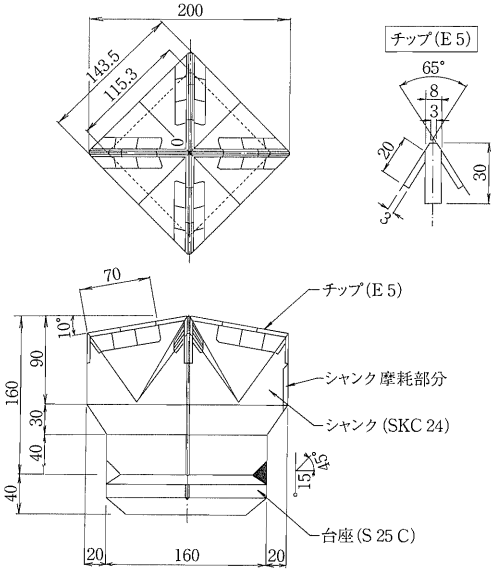
図-10 チャンバ攪拌図

(5) カッタビットの耐久性

上り線掘進後に、ビットの摩耗状況を調査測定した。表-2 にビットの摩耗欠損状況の調査結果を示す。表には、従来機の施工実績に基づく土質

表一 2 ビット摩耗・欠損状況

	ビット配置		摩耗係数 (mm/km)		ビット欠損数
	位置	数	チップ	シャンク	
クロスルーフビット	外周	40	0	0.053	10
	内周	32	0	0.008	2
ルーフビット	内周	53	0	0.003	3
外周ビット	外周	40	0.006	—	0
(従来機泥土圧シールド機)					
粘土・シルト			0.007	0.010	
砂			0.020	0.030	
砂礫			0.040	0.060	



図一11 クロスルーフビットの形状と摩耗部位

別の摩耗係数を併せて示す。カット総回転数は38,253回、ビット摺動距離は約96kmであった。ビットの材質としては、超硬チップにJIS E5相当、クロスルーフ及びルーフビットのシャンク(母材)にSKC24、外周ビットのシャンクにS25Cを採用している。

従来機の摩耗係数と比べると、チップの摩耗係数はいずれも小さい値となっている。しかし、シャンクの摩耗係数を見ると、最外周に配置したクロスルーフビットの摩耗(図一11参照)が極端に大きいことが分かる。これより、ビットの摩耗特性と耐久性について、以下に考察する。

(a) クロスルーフビットの摩耗特性

まず、クロスルーフビットのチップについては、計測不可能なほど摩耗量が小さかったため、摩耗係数が0 mm/kmとなった。クロスルーフ

ビットは、刃先の先端部に従来型ビットのような逃げ角やすくい角がなく、四方向に対して尖った形状をしており、従来型ビットとは極端に異なる。このため、クロスルーフビット特有の摩耗係数については、施工実績を重ねることで統計的に考え方を構築していく必要があると考える。

次に最外周のクロスルーフビットのシャンクの摩耗が激しいことについては、偏心多軸方式の特徴であるといえる平行リンク運動により、カットフレームの外周面側は常に泥土を押しつける動作をしており、土砂にさらされて大きく摩耗したものと考えられる。

通常シールド機では、最外周部でパス数を増やしている。これに対して、偏心多軸方式では最外周のビットは他のビットの軌跡と重複することのない完全な1パス部分が存在することも影響していると思われる。

いずれにしろ内周部に配置されたビットと比べて、摩耗条件が格段に厳しいといえるので、長距離掘進では、チップ埋込みなどの対策が必要と考えられる。

(b) 外周ビットの摩耗について

外周ビットのシャンクの材質(S25C)は、クロスルーフビット(SK24)より軟らかい。外周ビットには摩耗防止用に硬化肉盛を施してあり、上り線の掘進完了時ではまだ硬化肉盛が残っていたため、クロスルーフビットのようなシャンクの摩耗は見られない。

(c) 礫に対する耐久性について

想定外の「全断面礫層」を掘進したにも関わらず、ビットの摩耗が比較的になかった。ただし、外周部のビットに大きさ15~25mm程度のチップ欠損が集中的に見られた。

全体的には、ビットの摩耗・欠損が少ないことは、偏心多軸方式のビットの運動特性が理由として考えられる。通常シールド機では、最外周のビット周速は約20 m/minであるのに対して、本機では全ビットの移動速度は一律5 m/minである。運動エネルギー(速度の2乗に比例)が小さく、礫切削時の衝撃が小さいため、チップが欠損しにくいのである。

最外周にチップの欠損が集中したことは、内周側に比べて礫の逃げ場がなく、カットフレームで

地山に押込まれる状況が発生したためと考えられる。

大量の礫が出現することを設計時には想定しておらず、刃先角が鋭角なビットを採用していた。結果的には、偏心多軸方式の切削特性及びビット形状が礫に対しても有効であることが実証された。なお、一般的な礫対策としては、チップを厚くしたり、刃先角を鈍角にする方法がある。

7. おわりに

偏心多軸方式の泥土圧シールド機を鉄道トンネルで初めて採用し大きなトラブルもなく、無事施工を完了することができた。順調に施工が進んでいる。さらに詳細な施工結果や偏心多軸方式のマシン組立て・解体の効率性については、機会があれば報告したいと考えている。

偏心多軸方式は、任意断面や長距離掘進に対応でき、今後、ますます採用される機会が増えると

思われる。本報文が少しでも参考になれば幸いである。

【筆者紹介】

木村 光夫 (きむら みつお)
日本鉄道建設公団
東京支社
横浜鉄道建設所
所長



宇部三津男 (うべ みつお)
日本鉄道建設公団
東京支社
横浜鉄道建設所
担当副所長



藤本 明生 (ふじもと あきお)
間・大豊・森本特定建設工事共同企業体
監理技術者



//橋梁架設工事業務の必携書//

橋梁架設工事の積算

——平成12年度版——

建設省においてはこのたび「土木工事積算基準」の改正を行い、平成12年4月1日以降の工事の積算に適用されました。

そこで、当協会では当該資料に準拠した「橋梁架設工事の積算 平成12年度版」を発行いたしました。

橋梁架設工事の積算業務に携わる関係者には、必携の書です。

■ 改訂内容：建設省土木工事積算基準、建設機械等損料算定表（平成12年度版）の改訂にあわせて、鋼橋・PC橋とも複合損料の改正を行い、また鋼橋のベント設備の見直し等を行っております。

■ B5判 941頁 カラー写真入り

■ 定 価：会 員 7,560円（本体7,200円）、送料 700円
非会員 8,190円（本体7,800円）、送料 700円
（官公庁（学校関係を含む）は会員価格です）

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