

矩形断面シールド工法の開発（その１） （ドラムタイプ矩形断面シールド機の実証実験報告）

Development of Rectangular Shield Method
(Part 1, Report on Experiment of Drum-type Rectangular
Shield Machine)

坪井 広美*
Hiromi Tsuboi

宇津木 薫**
Kaoru Utsugi

要 約

本文は、掘削機構にドラムカッタを、切羽安定機構に泥水式を採用したことを特徴とする「ドラムタイプ」矩形断面シールド機に関する報告である。開発は、模型実験、要素実験、実証実験の順で進められ、特に実証実験では掘削断面1060mm×1060mmのセミシールド機により実地盤を19m掘削し、掘進性能の確認を行った。その結果、ドラムタイプの欠点であったカッタへの土砂付着をV型スパイラル式ドラムカッタおよび高速アジテータの装備により低減することができた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. ドラムタイプ矩形断面シールド機
- §3. 模型および要素実験
- §4. 実証実験
- §5. おわりに

(DR)」、「スイングドラムタイプ(SDR, 日立造船株)と共同開発)」の2種類の掘削機構を考案した。本文では、第1報として実証実験を中心に「ドラムタイプ」の開発について報告する。

§2. ドラムタイプ矩形断面シールド機

矩形シールド工法は、掘削機構の機械化が困難とされ、手掘り式の実績が数件あるものであった。このため、矩形断面掘削を可能とするドラムカッタを有するシールド機を考案した (Fig. 1 参照)。

このシールド機の特徴は、以下のとおりである。

- ①推進工法およびシールド工法に適用できる。
- ②切羽安定機構は泥水式としている。
- ③方向修正に対応できるように中折れ構造としている。
- ④ドラムカッタに駆動用油圧モータを内蔵した構造としている。
- ⑤カッタツースをV型スパイラル状の連続刃にすることでドラムカッタの土砂付着を軽減することができる。
- ⑥カッタへの土砂付着、チャンバ内の土砂滞留を防止す

§1. はじめに

シールド工法では、掘削機構および覆工構造等の関係から、施設の種類に関係なく円形断面が多用されてきた。しかし、鉄道、道路、電力等の施設は、その機構や維持管理の面から、トンネル断面が矩形であることが望ましい。また、これらの施設では断面の矩形化により掘削断面の減少に伴う工費・工期の縮小、占有幅の減少による用地買収費用等の低減も期待できる。

このような開発ニーズをもとに、著者らは密閉型矩形断面シールド工法の開発に着手し、「ドラムタイプ

*技術研究所土木技術課
**平塚製作所係長

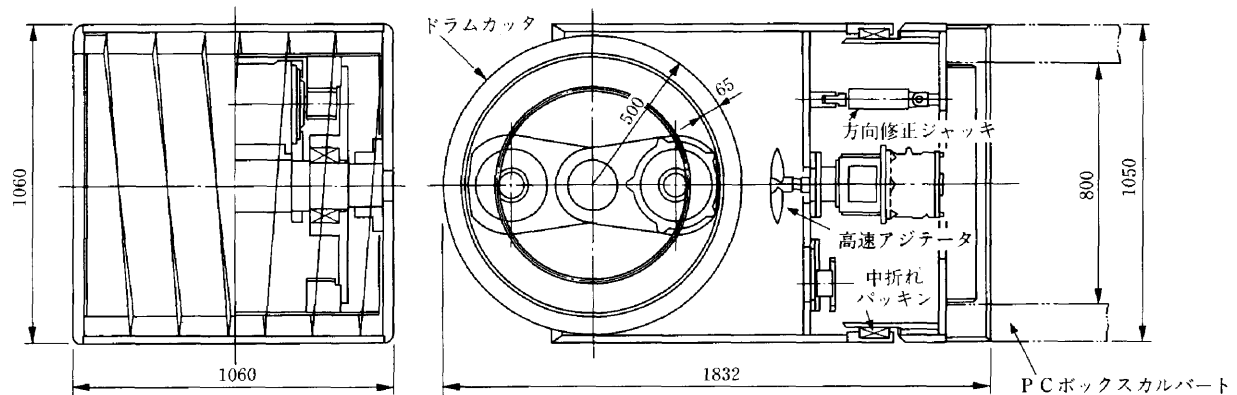


Fig.1 実験機構造図

る目的で、バルクヘッド中央に高速アジテータを装備している。

以下にドラムタイプ (DR) 矩形断面シールド機の実証実験までの開発経緯と内容を紹介する。

§ 3 . 模型および要素実験

3-1 模型実験

(1) 実験概要

著者らは既報¹⁾のとおり、ドラムカッタの切削性能を把握するために、掘削断面500mm×500mmの模型実験機を用い実験を行った。

(2) 問題点と対策

模型実験の結果より判明した問題点とその対策方法を以下に示す。

①V型スパイラル式ドラムカッタの導入

ドラムカッタにツース型カッタビットを用いた場合、ビットには切削と、切削した土砂を運搬するという2つの機能を課すため、土砂の付着が生じ易くなる。この問題を解決するため、スクリーによる切削土砂の中央へのかき寄せとV型閉合部における土砂のかき上げの2つの機能を有する「V型スパイラル状の連続刃」を採用し、模型実験機の改造を行った。改造後の模型実験では、土砂の付着を低減できることが確認された。

②高速アジテータによる泥水流の採用

模型実験では掘削土砂をチャンバ内で確実に泥水中に取り込むことができなかった。このためアジテータを高速で回転させ泥水流を起こす方法を採用することにしたが、高速アジテータの効果や切羽安定、泥水圧管理への影響が不明であるため、以下に紹介するような高速アジテータに関する要素実験を行った。

3-2 高速アジテータの要素実験

(1) 目的および実験方法

Table 1 に要素実験の目的・確認方法を示す。掘削断面1000mm×1000mmの掘進機のチャンバを模擬した実験装置を用いて、Table 2 に示す条件で実験を行った。

(2) 実験結果および考察

①チャンバ内泥水流の可視化

Fig. 2 に高速アジテータ取り付け位置の相違による Flow Pattern を示す。これらより以下のことが明らかとなった。

- ・取付け位置上：ドラムカッタとスキンプレートとのクリアランス部より切羽に向かって流体を押し出すような流れを起こしており、洗浄効果は期待できず切羽安定の観点からも好ましくない。
- ・取付け位置中：ドラムカッタの上部・下部において渦の発生が認められる。それらの渦が付着土砂を剝離させるとともに、洗浄効果を高めている。また、チャンバ内の流体の動きはチャンバ内だけにとどまり切羽への影響はない。
- ・取付け位置下：取付け位置上と同様に切羽に向かって流体を押し出すために洗浄効果は期待できない。

以上の結果より、高速アジテータの取り付け位置はバルクヘッド中央部が最も効果的であり、さらに切羽への影響もないことが明らかになった。

②チャンバ内泥水圧への影響

高速アジテータが起す泥水流がチャンバ内泥水圧に及ぼす影響を把握するため、間隙水圧計をバルクヘッドに取り付けその挙動を計測した。

静水圧分をキャンセルして変動分のみの計測結果を Fig. 3 に示す。水圧の変動分はアジテータに近い位置においても、わずか0.02kgf/cm² (1.96kPa) であることから、泥水圧管理には影響を及ぼさないと判断される。

Table 1 確認方法

目 的	確 認 方 法
①チャンバ内泥水流の可視化	トレーサーによる目視
②チャンバ内泥水圧への影響	水圧計の挙動把握
③付着土の除去効果	付着土(ベントナイト粘土)の除去状況

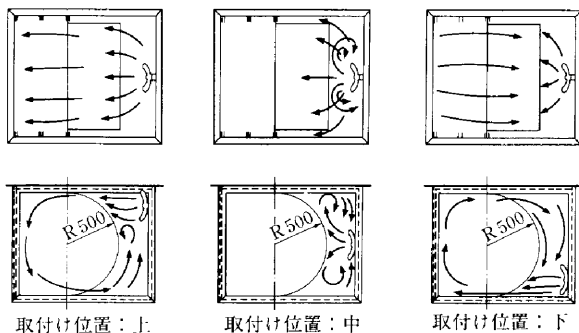


Fig.2 Flow Pattern

Table 2 実験条件

高速アジテータ	軸	数	一軸	
	羽	根	径	300mm
	形	状	3枚羽根(スクリュータイプ)	
	回	転	数	100～600rpm (可変)
	取	付	け	位置
実験流体	材	料	清水+増粘剤(CMC)	
	比	重	$\rho=1.02$	
	粘	性	FV=25s/PV=7.5cp	
トレーサー	材	質	ポリスチレン	
	粒	径	1 mm	
付着土砂	種	別	粘 土	粘土+砂
	配 合 (水重量を 1とする)	水	1	1
		ベントナイト	0.41	0.38
		粘 土	0.91	0.84
		砂	—	208
	含	水	比	44.0%

③付着土の除去効果

実験は、ドラムカッタフェース上に高さ50mmのリップを取付け、この高さまで土砂を付着させた。そして、バルクヘッド中央に取り付けた高速アジテータの回転数を600rpmとして30分稼働させた後、付着土の除去率を比較した。

結果からリップとリップの間は良好に除去されているも

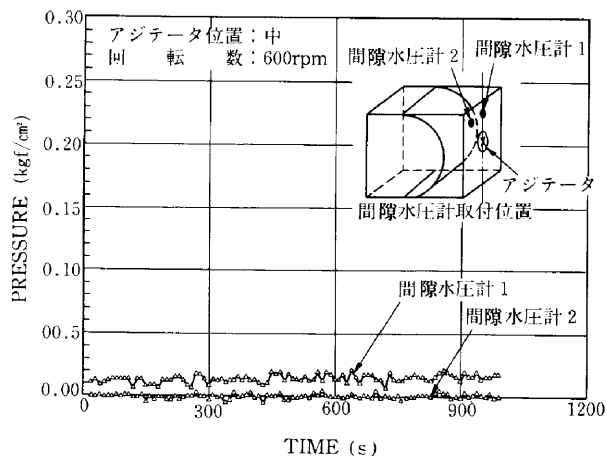


Fig.3 計測結果

の、リップの影になる部分は、ほとんど除去されていないことがわかった。また、リップの間においてもアジテータから離れた端部ほど除去率は低いことも確認された。したがって、実際装備するに際しては、その効果を最大限に発揮させるためにアジテータをできる限りドラムカッタに近づけ、掘削断面の大きい場合は軸数の検討が必要となる。

§4. 実証実験

4-1 実験および地質概要

実証実験では、推進工法にて推進延長 $L=19m$ を掘削した。Fig. 4 に実験概要図を、Table 3 に実験条件をそれぞれ示す。

4-2 矩形断面シールド実証実験機

Photo 1 に示す実験機の構造図および仕様をそれぞれ Fig. 1 および Table 4 に示す。

(1) 機械寸法

推進工法が可能な覆工内寸法を $800mm \times 800mm$ としたため、PCボックスカルバート外寸法が $1050mm \times 1050mm$ となった。さらに、フリクションカット量を片側5mmとして、シールド機の外寸法を $1060mm \times 1060mm$ と決定した。

(2) ドラムカッタ

ドラムカッタの形式は模型による再実験の結果を参考にしてV型スパイラル式とし、切削外径を $\phi 1000mm$ とした。さらに、設計上の掘進速度を $\max 100mm/min$ とし、連続刃高さ65mm、条数6条、回転数12.8rpmと決定した。また、連続刃先端はテロコート粉末合金でハードフェーシングを施している。

カッタ駆動は油圧駆動とし、装備トルクは $4.7tf \cdot m$

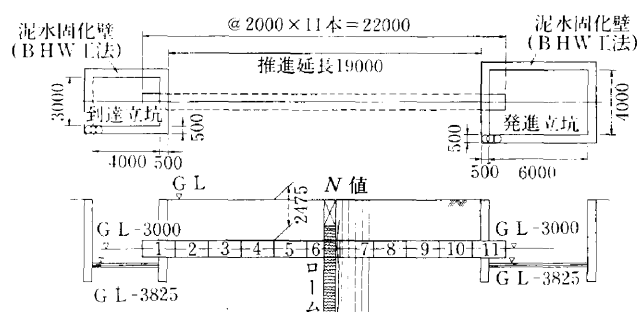


Fig.4 実証実験概要図

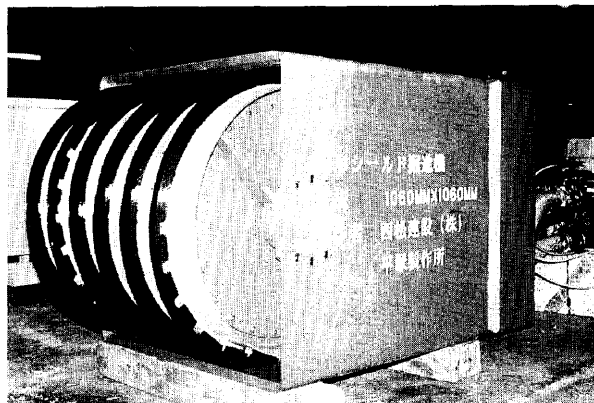


Photo 1 実証実験機

Table 3 実験条件

土質条件	土質	関東ローム
	土被り	2.475m
	地下水位	GL-13.8m
	土の単位体積重量	1.8tf/m ³
	内部摩擦角	30度
	粘着力	0.5kgf/cm ²
	N値	5
	一軸圧縮強度	1.0kgf/cm ²
	含水比	108.8%
	透水係数	3.51×10^{-5} cm/s
	土の真比重	2.6
	上載荷重	T-20
施工条件	工法	泥水式矩形断面推進工法
	工事延長	19.0m
	線形	直線
	勾配	±0%
覆工	種類	P Cボックスカルバート
	外形寸法	矩形1050×1050mm
	幅	2000mm
	厚さ	125mm

Table 4 実験機仕様

機械寸法	掘削断面 機長	矩形1.06m ^a ×1.06m ^b L=1832mm
	スキンプレート	アーティキュレート中折れ式 水平方向 t=25mm 垂直方向 t=36mm
ドラムカッタ	カッタ	形式：V型スパイラルカッタ 条数：6条 切削外径：φ1000mm 開口率：13%
	ビット	スパイラルカッタ先端ハードフ ェーシング ビット高さ：65mm
	軸受	ベアリング方式
	カッタ駆動方式	油圧駆動方式
	カッタ回転数	回転数：12.8rpm(周速40m/min)
	カッタトルク	カッタトルク：4.7tf・m (トルク係数 α=2.35)
アジテータ	形式	攪拌翼型高速アジテータ(1軸)
	外径	φ250mm
	トルク	35kgf・m
	回転数	0~600rpm
中折れ構造	中折れ角度	±4度
	中折れジャッキ	8tf×28ST×4本

(46.1kJ)であり、トルク係数は円形シールドに換算して
 $\alpha=2.35$ に相当する。

(3) アジテータ

外径 φ250mmの攪拌翼型高速アジテータを採用し、バルクヘッド中央に一軸装備している。回転数は可変であるが、要素実験から切羽安定、泥水圧管理への影響が極めて少ないことがわかったので、通常は最大の600rpmで使用する。

(4) 中折れ構造

姿勢制御、蛇行修正を主な目的として中折れ構造を採用している。アーティキュレート方式で最大角度は±4°(±π/45rad)である。

(5) 自動測量

ジャイロコンパスとレーザーを併用した方式の自動測量装置を装備し、リアルタイムに位置、姿勢の計測が可能である。

4-3 計測項目

本実験では、Table 5に示すような推進力、カッタトルク等のマシンデータや測量データ等の計測を行った。

4-4 施工結果および考察

(1) 掘進性能

推進力およびドラムカッタトルクの経距変化を Fig. 5, Fig. 6にそれぞれ示す。

①推進力

Fig. 5より次のことが確認される。

i) 推進力は掘進距離に比例して増加する。

管 No.3~No.7における結果は、(1)式で表わされる。なお、(1)式の相関係数は $r=0.815$ である。

Table 5 計測項目

計 測 項 目	計測機器
掘 進 機	切羽水压
	ドラムカッタトルク
	アジテータ回転数
	アジテータトルク
	元押し圧力
	元押しストローク
	元押し速度
泥水輸送	送泥密度
	送泥圧力
	送泥流量
	排泥密度
	排泥圧力
	排泥流量
自動測量	蛇行量
	ピッチング
	ヨーイング
	ローリング
泥水性状	泥水比重
	ファンネル粘性
	濾過水量

$$F = 38.18 + 4.71 \times D \quad \cdots \cdots (1)$$

F : 推進力 (tf)

D : 推進距離 (m)

ii) 一般に、推進力は次式で表わされる²⁾。

$$F = F_0 + \{ [(2W_1 + D_0/B')B' + (Q_1 + Q_2)H']\mu' + 2(B' + H')C' \} \times D \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに、 F : 推進力 (tf)

F_0 : 初期抵抗 (tf)

W_1 : 鉛直荷重 (tf/m²)

B' : カルバート外幅 (m)

H' : カルバート外高 (m)

Q_i : 側方土圧 (tf/m²)

D_0 : カルバート自重 (tf/m²)

μ' : カルバートと土の摩擦係数

C' : カルバート土の付着力 (tf/m²)

D : 推進距離 (m)

また、初期抵抗 F_0 は (3) 式で表わされている³⁾。

$$F_0 = (P_e + P_w) A \quad \cdots \cdots (3)$$

ここに、 P_e : 切羽単位面積当り推力 (tf/m²)

；一般に 15tf/m² (147.1kPa)

P_w : 泥水压 (tf/m²)

A : 切羽断面積 (m²)

さて、(2) 式に今回の実験条件を代入して整理すると次式が誘導される。

$$F = 19.85 + 4.86 \times D \quad \cdots \cdots (4)$$

次に (1) 式と (4) 式を比較してみると、推進距離に比例する第 2 項の係数はほぼ同じ値であるが、初期抵抗に相当する第 1 項については、かなり大きくなっている。さらに、実験結果を用いて切羽単位面積当り推力 P_e を求めてみると、

$$P_e = 31.6 \text{ tf/m}^2 \text{ (309.9kPa)} \quad \cdots \cdots (5)$$

となり、通常の泥水式円形セミシールドでの実績値 15tf/m² (147.1kPa) に対して 2 倍以上となった。

これは、フード先端の未切削刃口貫入抵抗に起因するものと考えられる。

② ドラムカッタトルク

Fig. 6 より次のことが確認される。

i) 一般にカッタトルクは切込量と相関関係にあるといわれている。一方、結果からは、推進距離との間に強い相関があり、カッタトルクは推進距離に比例して増加する。

管 No.3～7 についてカッタトルクと推進距離との関係は、相関係数 $r=0.904$ で、(6) 式で表わされた。

$$T = 1.531 + 0.262 \times D \quad \cdots \cdots (6)$$

T : カッタトルク (tf・m)

D : 推進距離 (m)

また、Fig. 7 に切込量とカッタトルクの関係、Fig. 8 に推進距離とトルクを切込量で除したトルク切込比 (T/C) との関係を示す。それぞれの相関係数は $r=0.311$ および $r=0.722$ であり、この結果からも、推進距離とカッタトルクとの相関の方が強いことが認められる。

このように、推進距離とともにカッタトルクが上昇した原因は、ドラムカッタサイド部での土砂取り込み不良や、掘削地山が粘性土であったためにドラムカッタ端部に土砂付着が生じたこと、さらにチャンバ内のフラットな底部に土砂が堆積していたことなどが考えられる。

(2) 蛇行・姿勢変化

今回の実証実験では、掘進距離が 19m と短かったため、上下・左右蛇行量、ヨーイングおよびローリングはほとんどなく、若干のピッチング修正を行った程度であった。しかし、掘進距離が長くなれば蛇行、姿勢変化が生じると予想されるので、曲線施工も想定した方向修正機構の装備を検討する必要がある。

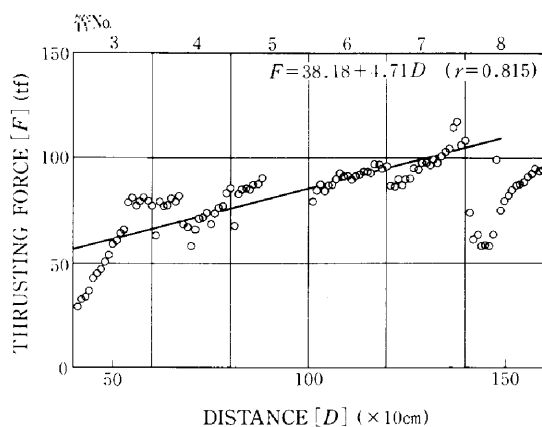


Fig.5 推進力[F]の経距変化

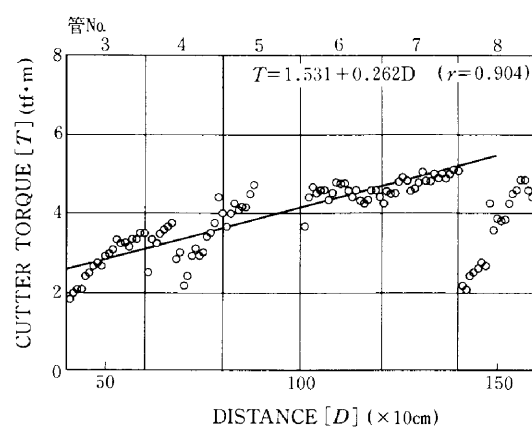


Fig.6 カッタトルク[T]の経距変化

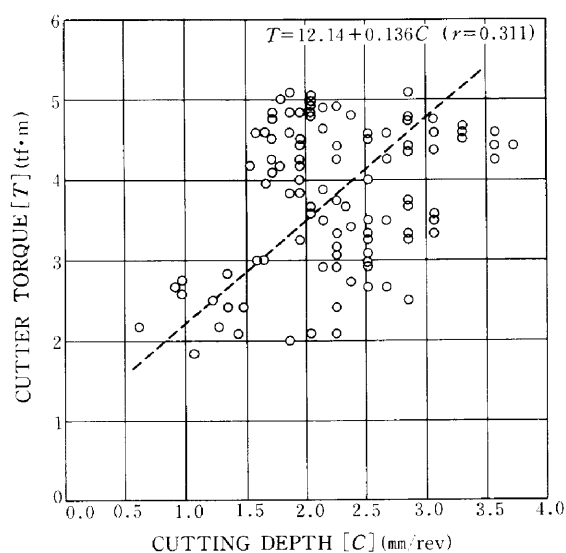


Fig.7 切込量[C]とカッタトルク[T]の関係

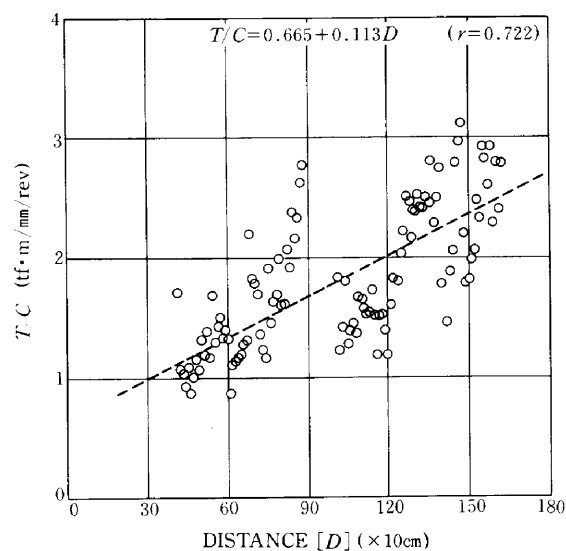


Fig.8 推進距離[D]と T/C の関係

§5. おわりに

今回の実証実験では、ドラムカッタの欠点であった「土砂付着」を V 型スパイラルカッタおよび、高速アジテータにより克服することができた。しかし、フードの貫入抵抗に起因する初期抵抗が大きいため、断面の拡大化には問題が残った。さらに、掘進に伴い除々に、掘進効率が低下し、カッタトルクを上昇させることもわかった。

今後は、オーバーカット機構を付加し、全断面掘削による貫入抵抗の低減、高速アジテータや、チャンバ内形状の最適化によるカッタトルクの低減を行い、早期に実機完成を目指す所存である。

最後になりましたが、御指導いただいた関係各位に感

謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坪井広美ほか：矩形断面シールドの模型実験，西松建設技報，第13号，pp.174～176，1990.
- 2) 日本 PC ボックスカルバート製品協会：推進工法用 PC ボックスカルバート設計・製造マニュアル，1990.
- 3) (社)日本下水道管渠推進技術協会：推進工法用設計積算要領 泥水式推進工法編，1989.