

密閉型矩形シールド工法の開発 (パドル・シールド工法)

大木 智明¹

¹清水建設(株) 土木技術本部 技術開発部 (〒104-8370東京都中央区京橋二丁目16-1)

都市内では輻輳する埋設物や低土被りといった厳しい施工条件、また、トンネル断面の有効活用のために、矩形断面シールド工法の実用化が進んでいる。しかし従来の矩形シールド機は、矩形端部まで掘削するため掘削機構が複雑で高価になるという課題や、円形断面に比べてアーチ効果による地表面変状抑制効果が期待できないという課題があった。そこで、汎用品の使用や機構の単純化を図った軸付き横配置カッタ、強制攪拌によりチャンバー内土砂の塑性流動性を向上させるパドルスクリュウ、低土被り部での地表面変位を抑制できる上段カッタスライド機構を装備した「密閉型矩形シールド工法（パドル・シールド工法）」を開発実用化した。

キーワード 軸付き横配置カッタ、パドルスクリュウ、スライド機構、地表面沈下抑制

1. はじめに

従来の矩形シールド機は円回転のカッタ方式を採用しているものが多く、コーナー部分まで掘削するためには機構が複雑となり、矩形シールド機の製造に多くの時間とコストを要していた。

また低土被りにおける矩形断面の掘削は、円形断面に比べて、掘削部上部のアーチ効果による変状抑制が期待できないため地表面変位が大きくなる。

そこで、汎用品（汎用モーターや減速機）の使用や横配置カッタを採用して掘削機構の単純化・コストダウンを図り、さらに上段カッタのスライド機構により低土被り部での地表面変位を抑制する「密閉型矩形シールド工法（パドル・シールド工法）」を開発・実用化した。

(図-1)

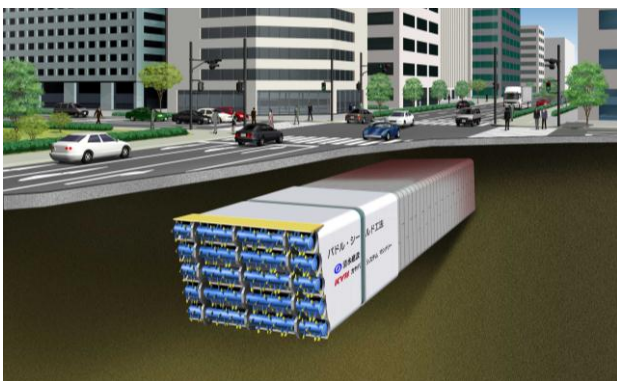


図-1 パドル・シールド工法イメージ

2. 技術の概要

本工法のシールド機形式は密閉型泥土圧式である。カッタは円筒形の横軸にビットを装備し、軸の回転により地山を切削する。カッタ面の縦方向には、カッタを複数段配置している（図-2）

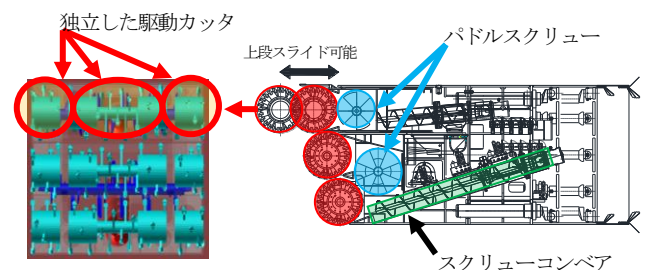


図-2 機構詳細図

各段カッタは各々独立した駆動カッタから構成されており、各々のカッタは回転方向や速度が制御できる。チャンバーは最上段の1本のカッタには1つのチャンバー、2段目以下は複数のカッタ（2～3本）で1つのチャンバーを構成し、各チャンバーにはこの工法のポイントの一つであるパドルスクリュウと、従来の泥土圧式と同様にチャンバー内土砂排土のためのスクリュウコンベアを装備している。パドルスクリュウは、カッタで切削した土砂とカッタ付近で吐出される添加材の攪拌混合および、

攪拌混合した土砂をスクリーコンベアの取込口まで横移動させる機能を有している。

チャンバーのカッタからスクリーコンベアまでは前後にスライド可能な一体構造となっており、低土被り地盤においては、掘進始めは最上段カッタをスライドしながらセグメント1リング分の長さまで掘進し、以下順に各チャンバーのカッタでスライド掘進を繰り返すことで、地表面の沈下を抑制する。(写真-1)



写真-1 カッタのスライド機構

以下に本工法の特徴を述べる

- ・カッタ構造：ドラム形状の複数段横配置カッタにより端部まで掘り残しのない合理的構造
- ・シールド機製作コスト：従来比約3割減（汎用モーターや減速機を使用するため）
- ・シールド機製造工期：工期は短い（シンプルな軸付き横配置カッタの採用と汎用品モーターや減速機等を使用するため）
- ・土圧管理：上下に独立した複数のチャンバーを保有し、それぞれの土圧を綿密に管理
- ・チャンバー内の攪拌方法と土砂状況：カッタと独立したパドルスクリーにより攪拌性能が高い
- ・低土被り掘進時の地表面変状抑制方法：上段カッタの前方へのスライド機構を使用した段差形状の掘削による先受け効果により変状抑制効果が大きい

3. 開発経緯

(1) 要素実験

本工法の掘削機構の特徴は、軸付きの横配置カッタとチャンバー内のパドルスクリーによる強制攪拌である。この機構を確立するために4回にわたり要素実験をおこない、カッタ形状の改良やスクリーコンベアによる排土制御方法を改良し、安定した掘削能力、排土性能を確立し、地表面沈下が抑制できること及び良好な排土状況を確認した。

(2) 実証実験

実証実験は、断面が2.1m×2.1mの土圧シールド機を新規に製作して実施した。シールド機には、上段1段の

スライド機構付きチャンバーと中下段の固定チャンバーを装備した。パドルスクリーは各々のチャンバーに各1基ずつ装備した。

上段チャンバーのスライドは、実験に使用されるセグメントの幅に合わせて50cmのスライドが可能な構造とした。土圧計は上段チャンバーに2台、中下段のチャンバーに4台を装備し、土圧計を常時監視してスクリーコンベアの排土量を調整しながら所定の土圧を維持し実験を実施した。(写真-2、図-3)

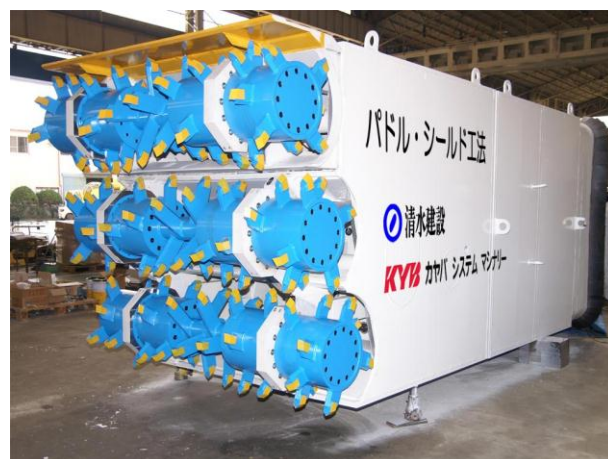


写真-2 実証実験機

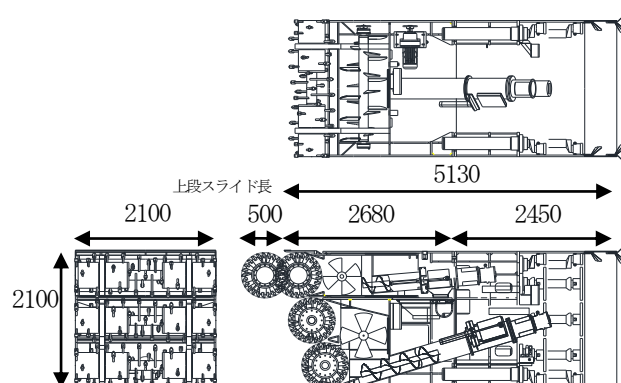


図-3 実証実験機概要図

a) 目的

- ①低土被り部掘進時、周辺地盤への影響を抑制しながら、掘進可能であること
- ②従来の円形泥土圧シールド機と同等の掘削管理が可能であること
- ③排土状況が良好であること（土砂の均一な塑性流動性の確保）

b) 掘進線形

実験の掘進線形は地表面付近から5%の下り勾配で掘進し、 $R = 150\text{ m}$ の縦断曲線を経て1D（2100mm）の土被りで水平に掘進する。掘進延長は28m、掘削地盤は主にN値1の軟弱地盤（沖積シルト・粘性土）であ

る。(図-4)

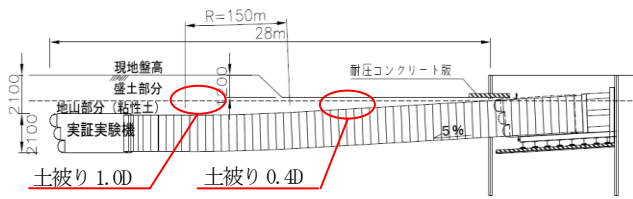


図-4 掘進縦断面図

掘削方式は添加材に気泡を使用した。切羽安定管理は、掘進中隔壁に設置した土圧計を常時監視し、スクリーコンベアの排土量を調整しながら所定の土圧を維持した。トンネルの覆工として矩形のスチールセグメントを使用した。

掘進は、上段掘削部を先行して50cm掘進し、本体と一体構造である中下段掘削部は、上段掘削部終了後シールドジャッキを伸張して掘進した。裏込めは可塑状裏込材を使用し、下段掘進時に即時注入で行った。

計測は地盤変状（地表面沈下量等）、掘削機各機能（カットトルク、推進力等）、計画線との変位を主に測定した。

(3) 実証実験結果

地上変状に関しては、以下の傾向が認められた。

低土被り0.4D(D=2100mm)の地点において最大変位は切羽通過直後に発生し、シールド機テール通過後に収束する傾向が確認された。また土被り1.0Dの地点においても上述した同様の傾向が認められた。最大変位は極めて微小であり、2地点ともシールド機幅2100mm範囲内直上に集中し45°の影響範囲内に収まっている。

これより上段カッタスライド機構の地盤変状抑制への有効性が確認できた。(図-5、図-6)

以上の実証実験により得られた成果を以下に記す。

- 上段カッタスライド機構による先受け効果が有効であり地表面沈下が抑制できることが可能となった。
- 平面及び縦断線形において、計画線形に対して、共に誤差±30mm以内に収まっており、従来の円形泥土圧式シールド機と同等の掘削管理が可能であることが確認できた。(図-7、図-8)
- パドルスクリーとカッタの独立制御が可能のため、チャンバー内での安定した攪拌混合が可能となった。
 - チャンバー内でのパドルスクリーの強制攪拌により、土砂の均一な塑性流動性が得られ、安定した地山の保持が可能となった。
 - 上下に独立した土砂チャンバーを保有し、緻密な土圧管理が可能となった。

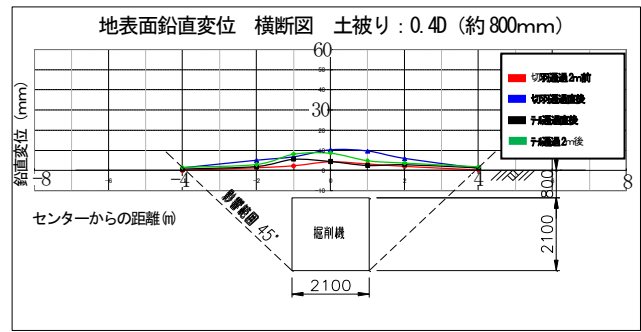


図-5 地表面鉛直変位（土被り0.4D）

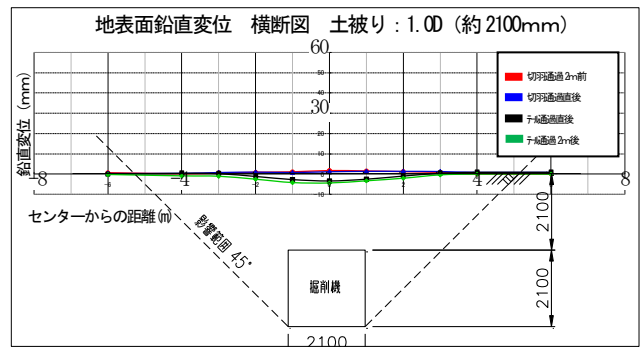


図-6 地表面鉛直変位（土被り1.0D）

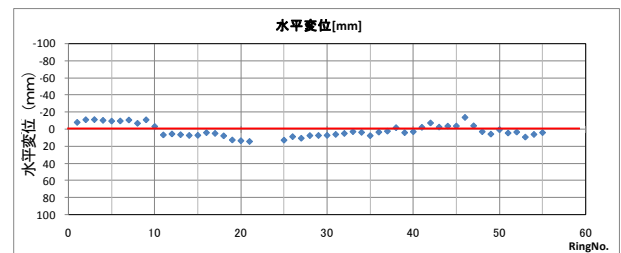


図-7 平面線形出来形図

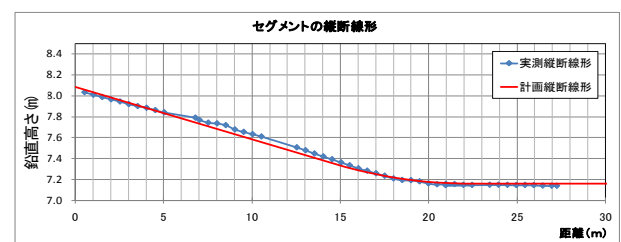


図-8 縦断線形出来形図

4. 施工実績

(1) 工事概要

本工法を、千葉県茂原市と長生村の境界を流れる一宮川を横断する地下送水管敷設工事に適用した。

以下に工事概要を示す。

- 工事名称：合同長生送水管工事

- ・用途：送水管配管洞道
- ・形状：内寸1.7m×1.7m, 外寸2.1m×2.1m
(ボックスカルバート(函体)長 2.0m)
- ・施工延長：70m (35函体, 直線)
- ・施工方式：
パドル・シールド機を使用した推進工法
- ・対象土質：硬質地盤 土丹 (N値=50)
- ・土被り：最大14m, 最小(河床部) 5.4m
- ・工期：2012年9月～2013年12月
(写真-3, 図-9)

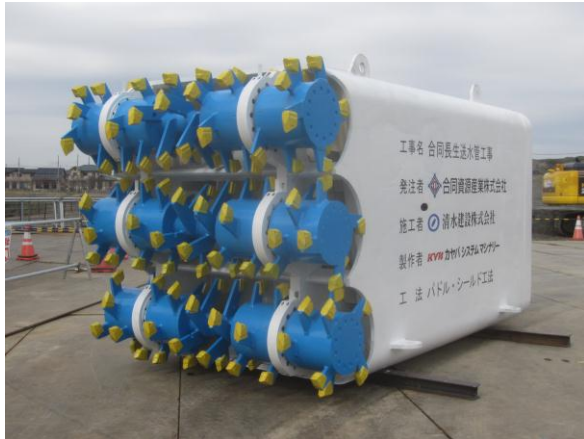


写真-3 パドル・シールド機

(2) パドル・シールド機の概要

本工事に適用したパドル・シールド機の仕様および全体図をそれぞれ表-1, 図-10に示す。なお、本工事は十分な土被りが確保されている硬質地盤のため上段カッタスライド機構は装備しなかった。

表-1 シールド機仕様

項目		単位	仕様	
シールド機外径		m	縦2.1×横2.1m	
掘削断面積		m ²	4.41	
掘進速度		mm/min	15	
カッター			センター	サイド
	最大回転数	rpm	10	10
	装備数	台	3	6
	最大トルク	kN-m	17.5	8.7
パドルスクリュー				
	最大回転数	rpm	20	
	装備数	台	2	
	最大トルク	kN-m	20.8	
排土スクリュー				
	最大回転数	rpm	20	
	装備数	台	1	
方向修正装置				
	推力	kN	1188	
	装備数	本	6	
	ストローク	mm	150	

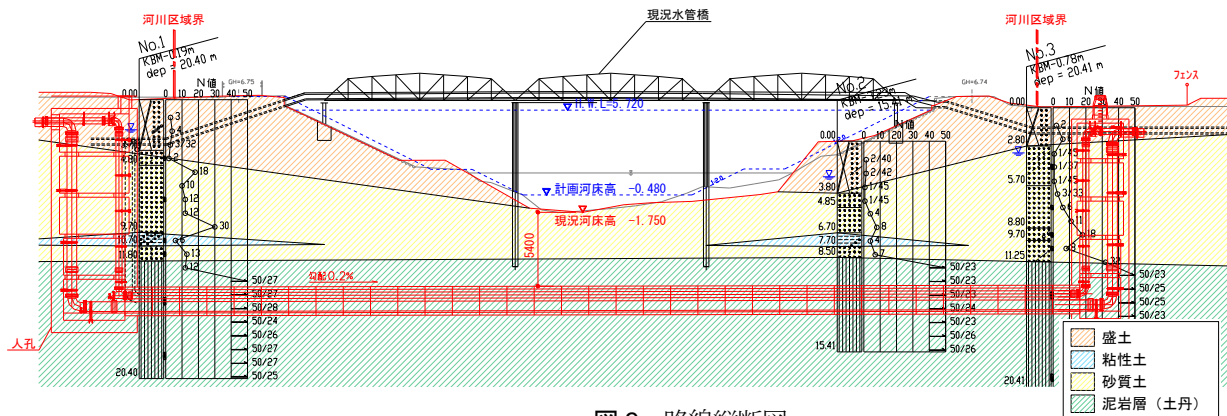


図-9 路線縦断面図

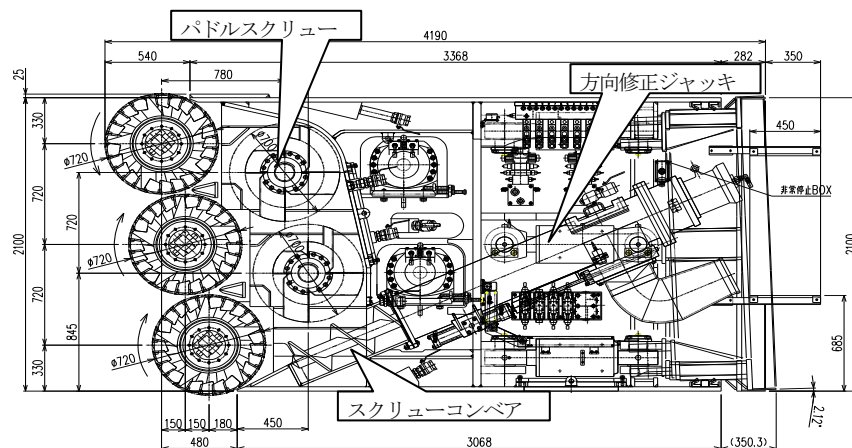


図-10 パドル・シールド機全体図

(3) 施工概要

掘削はパドル・シールド機で行い、シールド機に後続する函体を立坑で押し出しながら函体を順次継ぎ足す推進工法で施工した。シールド機先端から添加材を注入しチャンバー内パドルスクリーで混練された土砂は、スクリーコンベアを通り直結した圧送ポンプで立坑の下まで送られ、初期掘進時にはバケットで地上まで揚重し排土した。(写真-4, 写真-5) なお、坑内設備台車がすべて設置できる本掘進時には、土砂圧送ポンプにより直接地上の土砂ピットまで土砂圧送をおこなった。



写真-4 坑内掘進時状況



写真-5 立坑下排土状況

(4) 施工結果

以下に施工結果を記す。

a) 地山安定

掘進土層は土丹で、チャンバー内やスクリーコンベアの閉塞が懸念されたが、排土した土砂はよく塑性流動化しており、チャンバー内でのパドルスクリーの強制攪拌が地山安定に寄与していることが確認できた。

b) 線形管理と姿勢制御

管路の計画線形は、縦断・平面ともに直線で0.2%の上り勾配であった。この線形管理とそのためのピッチング制御は、パドル・シールド機に装備した方向修正ジャッキが有効であった。

出来形(函体中心)を図-11, 図-12に示す。

管路の計画線形に対して、掘進時の矩形の出来形(センター部)は、平面線形、縦断線形ともに $\pm 15\text{mm}$ 以内に収まっており、従来の円形シールド機同等の高精度な掘進管理が可能になったことが確認できた。

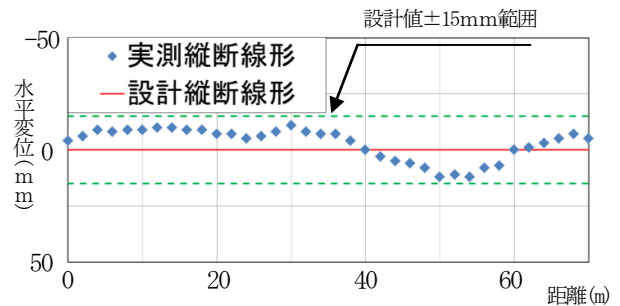


図-11 函体平面線形図

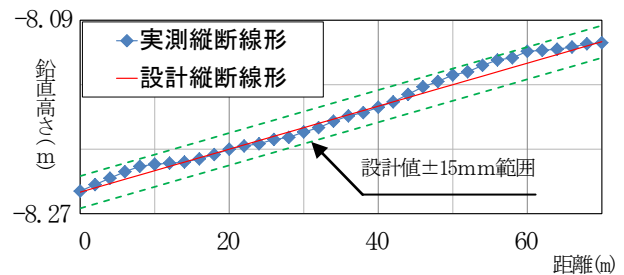


図-12 函体縦断線形図

C) 掘進推力

掘進推力の計画値と実績値の推移を図-13に示す。計画値は一般に密閉型の推進工で適用される計算方法に基づいたが、概ね計画値以下であった。

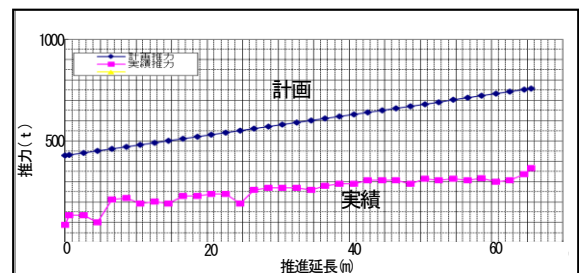


図-13 推力の計画と実績

d) 到達～パドル・シールド機引出し

本機は傾斜したカット面と矩形形状のため、一般の円形シールド機と比べ到達引出しが困難となるが、到達坑口パッキンのワイヤーからの押しつけ力発生を図る(写真-6 囲い部)等の諸策により、上部地盤の崩壊、河川水の引き込み等が発生させることなく安全にパドル・シールド機を引出し回収した。(写真-7)



写真-6 到達時状況



写真-7 到達時マシン全景

5. おわりに

今回開発した本工法は、汎用品の使用とシンプルな掘削機構の採用により、コストダウンを実現した。

また、上段スライド機構を装備することにより、低土被り部での地表面沈下抑制に効果があることが確認された。さらに、掘削性能についても一般の円形土圧式シーールド機と同等の掘削性能を持つことが確認された。

これらの実績が評価されH25年度土木学会技術開発賞を受賞した。

今後は、道路のアンダーパスや地下通路、電力やガス等の地下管路等に展開し、高品質な社会インフラ構築に貢献する所存である。

参考文献

- 1)金丸清人,小高宏幸他：矩形断面トンネル構築技術「パドル・シーールド工法」の開発（その1），土木学会第65回年次学術講演会，VI-470,2010.
- 2)金丸清人，小高宏幸他：矩形断面トンネル構築技術「パドル・シーールド工法」の開発（その2），土木学会第65回年次学術講演会，VI-471,2010.
- 3)金丸清人：パドル・シーールド工法の開発，建設の施工企画，20109
- 4)白井健太郎,立花博令,中谷武彦,小野塚直紘：パドルシーールド工法による河川横断，土木学会第69回年次学術講演会，VI-609,2014.