

世界最大 外径 17.45 m 泥土圧シールドの設計／製作／現地工事及び稼働状況

米国ワシントン州（シアトル）州道 SR99 トンネル工事

佐 藤 譲 治・横 山 満 久・大 垣 信 二

本工事は、ワシントン州シアトル市内の老朽化した州道 SR99 高架ハイウェイを地下トンネル化するので、延長 2,856 m を世界最大の ϕ 17.45 m 泥土圧シールドを用い築造する。

このシールド機は、施主のワシントン州運輸局より「Bertha（バーサ）」と命名され、平成 24 年 12 月に工場完成、その後解体・輸送・現地組立を経て、平成 25 年 7 月に掘進を開始、平成 25 年 11 月時点で約 250 m を掘進した。

本工事は、例のない超大型シールドであるとともに、高水圧・巨礫・高速施工・短納期という難しい課題があり、本稿では、設計／製作／現地工事、および発進から掘進が軌道に乗るまでの様々な対応について報告する。

キーワード：大口径シールド、高速施工、道路トンネル

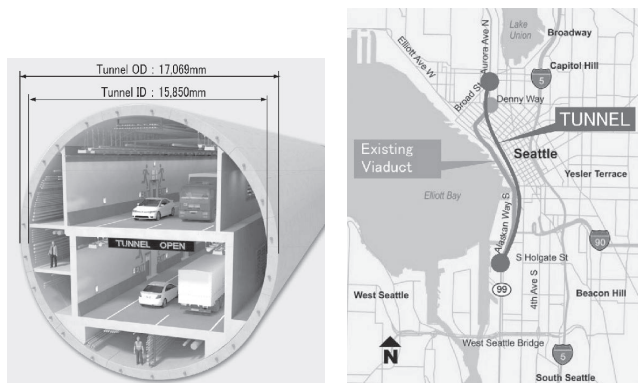
1. はじめに

本工事は、ワシントン州シアトル市内の老朽化した州道 SR99 高架ハイウェイを地下トンネル化するもので、延長 2,856 m を世界最大の ϕ 17.45 m 泥土圧シールドを用い築造する。トンネルの外径が 56 フィート (17.069 m) の円形トンネルであり、2 車線 2 層構造の道路が完成する（図－1、2）。

このトンネルを築造するシールド機は、施主のワシ

ントン州運輸局より「Bertha（バーサ）」と命名され、平成 24 年 12 月に工場完成、その後解体・輸送・現地組立を経て、平成 25 年 7 月に掘進を開始、平成 25 年 11 月時点で約 250 m を掘進した。

本マシンは、外径 17.45 m という例のない超大型シールドであるとともに、高水圧・巨礫・高速施工・短納期という厳しい条件を解決するために、シールド工法の最新技術、技術力を結集させ完成させたもので、様々な苦難の末、現在は安定した稼働状況に達しようとしているところである。



図－1 トンネル完成イメージ



図－2 トンネルルート

2. 工事概要

- (1) 工事名：州道 SR99 トンネル工事
- (2) 工事場所：米国ワシントン州シアトル市内
- (3) 施主：ワシントン州交通局／WSDOT
- (4) 施工者：シアトル トンネル パートナーズ
(Dragados USA, Tutor Perini JV)
- (5) 工事の特徴

トンネル長：2,856 m

最小曲線半径：1,800 m

勾配：－4％～＋4％

最大土被り：65.2 m

設計土圧：4.3 bar トンネル中心

- (6) セグメント

形式：鉄筋コンクリートセグメント

外径:17,069 mm, 内径:15,850 mm, 幅:1,980 mm

1 リングピース数: 10 個

1 ピース最大質量: 約 17 ton

(7) マシン設計条件

設計圧力: 最大 7 bar (緊急時 10 bar)

掘進速度: 60 mm/min (33 min/1 リング掘削)

セグメント組立時間: 30 min/1 リング組立

3. シールド機の特徴

(1) 主仕様 (図— 3, 4)

マシン形式: 泥土圧シールド

シールド外径: ϕ 17,450 mm

テールプレート厚み: 140 mm

シールドジャッキ推進速度: 最大 80 mm/min

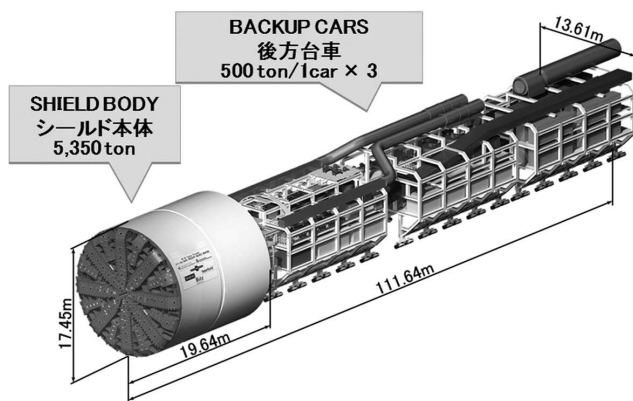
総推力: 392,000 kN (単位面積推力: 1,639 kN/m²)

カッタ駆動トルク: 定格 147,400 kN-m

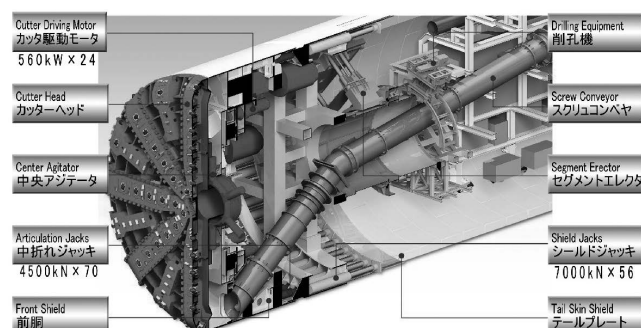
カッタ回転数: 最大 1.8 min⁻¹

カッタ駆動総動力: 13,440 kW

TBM 総動力: 23,000 kW



図— 3 マシン概要



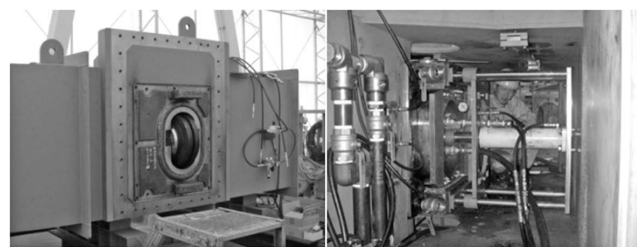
図— 4 マシン主要機器

(2) 本機の特徴

高速掘進を達成するために、カッタヘッドの回転数は従来の泥土圧シールドの基準より約 5 倍の速度を有し、カッタヘッドの駆動力も、トルク係数 (トルク／

外径の 3 乗) が約 28 と、大口径マシンとしては非常に大きな能力を装備している。一部に巨大礫の存在も予想されており、掘削用のカッタには種々の強化策をとるとともに、破碎を考慮した仕様となっており、礫破碎用のディスクカッタを装備している。推力は、高速掘進及び高水圧対応として、単位面積あたりの力として 1,639 kN/m² を有している。

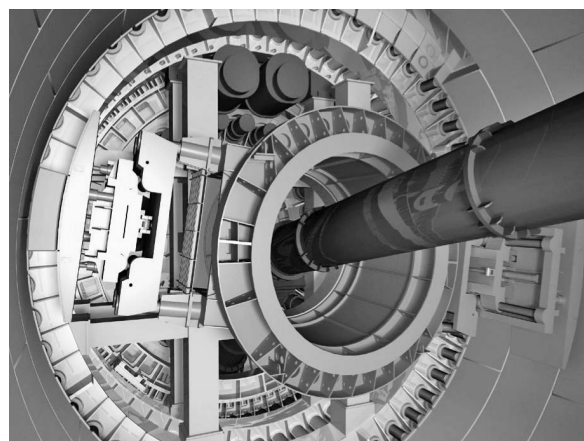
地盤崩落防止と交換作業の工程短縮、作業の安全性から、ディスクカッタを大気圧下で交換できる装置を装備しており、この交換装置は、ディスクカッタの種類の変更や、ツースタイプの固定式先行ビットに交換することも可能になっている。写真— 1 は実機と同じ大きさの装置で、外圧 1MPa を負荷し交換実験をした時の状況である。



写真— 1 カッタ交換装置 (ディスクカッタ・先行ビット)

トンネル壁となるセグメント組立装置 (エレクタ装置) は、組立時間短縮のためにセグメントをハンドリングするアーム・把持部を 2 箇所設けたダブルアーム式 (図— 5) を装備している。

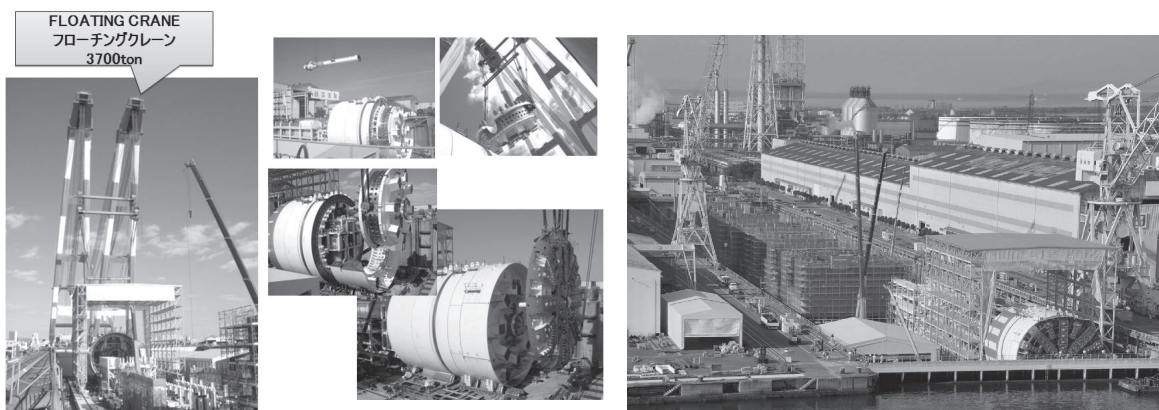
また、本機は、市街地中心部の地下を掘削することから、地上への影響を極力少なくする工夫をしており、シールド掘進機外径とセグメント外径の間に生じる空間に本体後部から裏込剤を確実に注入する装置や、掘進停止中でもカッタ圧力室内の土圧を監視し制御する装置を採用している。



図— 5 ダブルアーム式エレクタ

表－1 全体工程計画と実績

年月	2011 10	...	2012 12	2013 1	2	3	4	5	6	7	...	2014 10
マイルストーン	▽契約			▽工場完成					▽掘進開始			▽到達
設計・工場製作	計画											
	実績											
解体・出荷	計画											
	実績											
輸送・現地組立	計画											
	実績											
掘進	計画											
	実績											



写真－2 ドッグでの大組立状況



写真－3 工場仮組立完成状況

4. 工場製作・仮組立

表－1は、全体工程計画とその実績をまとめたものである。

本機は、製作、解体、現地再組立の工程短縮及び品質確保のため、最大 900 ton の分割ブロックとして製作を行った。本体、カッタヘッドの製缶、機械加工を堺、有明の2工場にて行い、後方設備、主要大物構造物は海外工場にて製作し、最終組立を堺工場のドライドックで行った（写真－2, 3）。各工場間の輸送を海上で行うことで、分割数を抑え、機械加工や組立工程の短縮を行うことができ、受注から 15 ヶ月という短期間での設計・製作を可能とした。

本機に使用されたケーブル長は、大小合わせ約 70 km にもおよび、油圧配管、各種ホースも同等の物量であった。そのため、解体には予想以上に時間を要した。

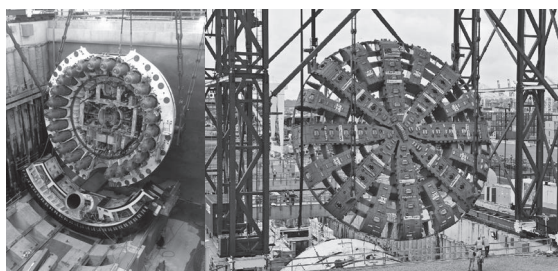
5. 輸送・現地組立

輸送のため、大小 64 個のブロックに分割し、一隻の大型船にて大阪港からシアトルまで輸送を行った。大阪港を3月中に出航し、4/2にシアトル港に到着した。

港から立坑までの横持ちを大型ドーリで行い、組立には大型の門型クレーンを使用した（写真－4, 5）。現地組立では、現場敷地面積の制約による横持ち作業の増加や各ブロックの吊位置に合わせたクレーンの調整作業、現地調達機器の設置作業および試運転調整等に予想以上に時間を要した。



写真－4 現地荷降ろし・輸送状況



写真一五 現地組立状況



写真一六 鏡切り状況

7月中旬より仮セグメントの組立を開始し、仮セグメント4リングの組立後、7月29日に発進式、7月30日に鏡切りを行った（写真一六）。

6. 発進・稼働状況

現在、当初計画より遅れが発生しているものの、到達時期はキープする予定で進んでいる。図一六は、計画時の月進リング数と現在の実績、及び遅れを回復

するための修正計画をまとめたものである。

(1) 発進～仮セグメント No.5 リング～ No.8 リング (2013/7/30～9/23)

発進壁にはエントランスパッキンは装備されておらず、コンクリート壁を直接切削する方式が採用されていた。掘削開始から2リング目（仮6）にてシールド機側面より掘削土の水分が流れ出し、チャンバー内の土砂の流動性が失われ、チャンバー下部、及びスクリュコンベヤが閉塞し、この解除作業に10日間要した。

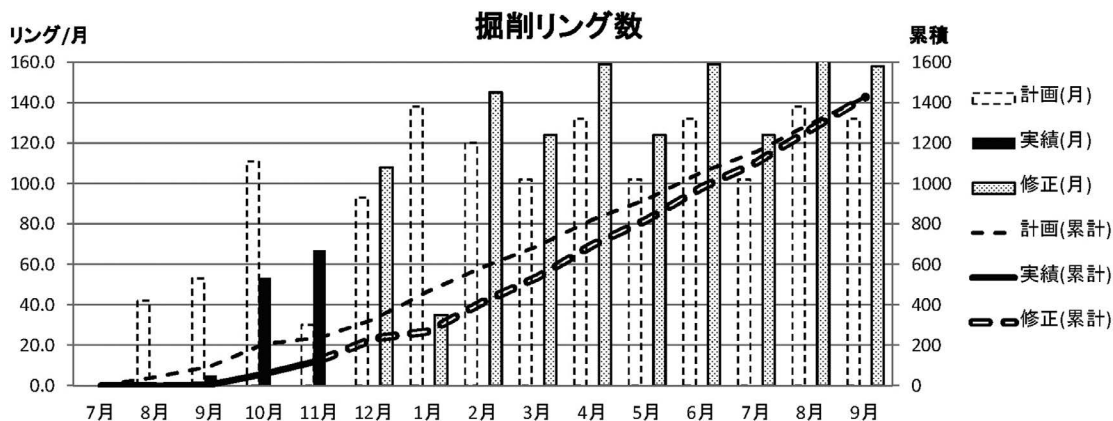
掘進再開の仮7、仮8リング掘削中に発進壁を構築していたグラウトの未固結分や切削屑が掘削のために注入していた水分と反応し、チャンバー内で再固結し、カッタヘッドスリット部、チャンバー内が完全に閉塞し、掘削不能となった。この時、掘削による発生熱及び反応熱でチャンバー内の温度は70℃を超える状態となった。

カッタヘッドとチャンバー内に広範囲に固着したセメント塊を、ブレーカを用い人力で碎き搬出するのに1.5ヵ月を要した。この間、シールド外周部に発砲ウレタンで仮のエントランスパッキンを設け、チャンバー内の逸水を防ぐ対策を施し、9月23日に再発進を行った。

(2) 仮セグメント No.9～No.13 及び本セグメント No.56 リング (9/23～10/25)

シールド機が通常掘削できるようになったが、就労を求める港湾労働者のデモにより、掘進停止や土捨て場の確保が計画通り進まず、進捗が上がらない状況が続いた。

本機の1リングの排出土（約1000 ton）を、バージとダンプで輸送する計画であったが、バージが港湾労働者との折衝で確保できず、ダンプのみで輸送。1台あたり20 tonの土砂を積載できるダンプにて搬出す



図一六 掘進の進捗状況

るが、3日掘削して、2～3日掘削停止を繰り返すような状況であった。

(3) 第1回 カッタビット総点検 (10/28～11/12)

本機は、巨礫の出現に備え、ディスクカッタと先行ビットを装備して発進したが、発進直後からφ900程度の礫の出現はあるものの、それ以上の巨礫が出現しなかったことから、初期に装備していたディスクカッタ20個を先行ビットに換装した。この間、土砂ビットの拡張を行った。

(4) 本セグメント No.56～No.111 リング (11/13～11/25)

土砂ビットの拡張、ダンプ数のアップ (50台×3往復/day)、及び11/23からバージを確保したことにより、掘進に対する制約が無くなった (写真—7)。また、オペレータの操作馴れによるセグメントの組立時間が飛躍的にアップしてきた。

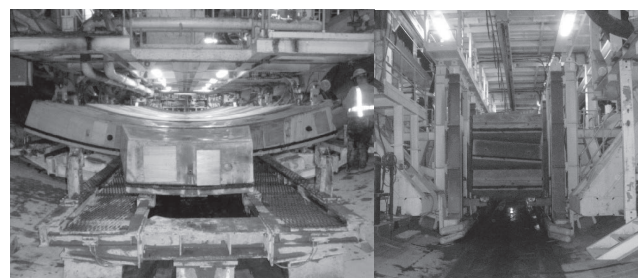


ダンプ搬送 バージ搬送
写真—7 ズリ搬送状況

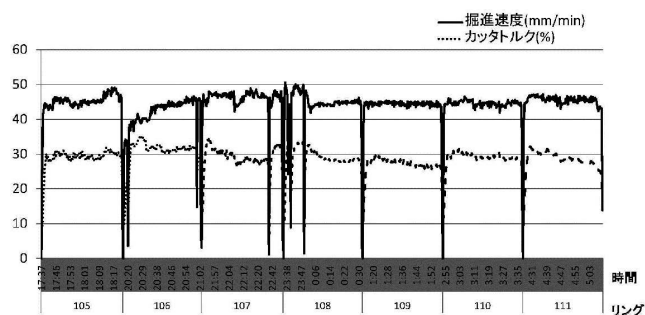
エレクタはバキューム把持を採用しており、セグメント把持、解放の時間が5秒以内と非常に短い (写真—8)。セグメントフィーダもエレクタの組立サイクルと相性がよく、セグメントアンローダについても10ピースのセグメントを5分以内で搬送台車から受け取れており、非常に有効に機能している (写真—9)。マシン設計条件であるセグメント組立時間1リング30分は概ね達成しており、掘進速度は40～50 mm/min がコンスタントに出ており、200リングまでのトライアル区間中に最高掘進速度60 mm/minに挑戦する予定である。図—7に直近の1シフト (夜



写真—8 セグメント組立状況



セグメントフィーダ セグメントアンローダ
写真—9 セグメント搬送システム



図—7 掘進データ



写真—10 坑内状況

19時～翌朝7時)掘進データを示す。

本マシンは、カッタヘッドと駆動部を一体で前後できるリトラクト構造を有しているが、カッタ点検時の作業スペースの確保並びに通常運転時の推力の指標として、非常に有効に機能している。

また、外径φ1.5mのリボンスクリュコンベヤの止水性が当初懸念されていたが、添加剤の種類、注入量の管理により、十分な止水効果が得られている。大断面の掘削ゆえに、異なる複数の地層を同時に掘削することになるが、本機には、気泡、ベントナイト、ポリマー用で各々独立した設備と吐出口を持っており、掘削土の状況に応じ対応できるようになっている。

そのほか、本シールド機は、油漏れや機器の破損への対応のため、後方台車内にワークショップを設けている他、機内、台車の各所に溶接機、工具用のエア、電源、洗浄水などのユーティリティを装備している。

今後、メンテナンスを定期的に行い、マシンの状態を維持しながら、発進直後の遅れを挽回し、工期内の

到達を目指していく予定である。

初期の予定では、6 ring/day であったが、現状はその倍の速度で掘進中である。

7. おわりに

本機は、来年末の到達に向け稼働中であり、プロジェクトを成功裏に終えるべく、現在もたゆまぬ努力を続けているところである。

当社は、本機以外にも東京湾横断道路向けφ14.14 m 泥水圧式シールド掘進機など、φ10 m 級以上の大型シールド掘進機を約20機納めており、シールド掘進機の製造においては世界トップクラスの技術力を誇っている。

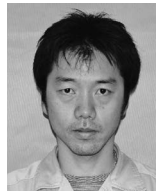
シールド掘進機は、中国やインドなど新興国やシンガポールなどの地下鉄向けを中心に益々需要が高まっている。当社は、国内外で1,200機以上を納入、米国やシンガポール、インド、台湾、香港、韓国など、海外向けにも120機以上を納めるなど、海外市場にも積極的に事業展開している。今後、培われた超大型シー

ルド掘進機の製造技術力で、益々高まる需要に向け、積極的に取り組んでいく予定である。

J C M A

【筆者紹介】

佐藤 誠治（さとう じょうじ）
日立造船㈱
機械・インフラ本部 シールドビジネスユニット
技術部
グループ長



横山 満久（よこやま みつひさ）
日立造船㈱
機械・インフラ本部 シールドビジネスユニット
技術部
主任



大垣 信二（おおがき しんじ）
日立造船㈱
機械・インフラ本部 シールドビジネスユニット
プロジェクト部
主任

