

縦横連続シールド工法による立坑施工時の挙動

GROUND BEHAVIORS IN EXCAVATING VERTICAL SHAFT

BY THE VERTICAL-HORIZONTAL CONTINUOUS SHIELD TUNNELING METHOD

會田好雄* ○佐藤紀司* 小林信明** 石田 修*** 浜本健一**

Yoshio AIDA, Toshikazu SATO, Nobuaki KOBAYASHI, Osamu ISHITA, Kenichi HAMAMOTO

This is a report on the behaviors of the structure and the surrounding ground in excavating a shaft by the vertical-horizontal continuous shield tunneling method which permits continuous excavation of a shaft and a drift with a single shielding machine. During excavation of a shaft, the structure elevated by about 3 mm, but then gradually subsided. After all the maximum subsidence of the structure and the ground was as small as about 7 mm, with negligible influence on the neighborhood. This small subsidence in site of the weak ground of this work site demonstrates the excellence of this method.

Keyword : Vertical-Horizontal Continuous Tunneling Method, Rotating Shield Machine,
Behavior of Ground

1. まえがき

東京都下水道局では、下水道施設の老朽化、能力不足などの問題に対応するために、計画的に施設の「再構築」を進めている。しかし、都心部で新たに構造物を築造する場合、既存地下構造物が輻輳するため、必然的に大深度の施工とならざるを得ない状況にあり、大深度施工に対応する技術が必要となる。特にシールド施工時の大深度立坑の施工技術は、深度が深いことおよび高水压下の施工となることから、施工性、安全性の面からもまだ確立された状態とは言い難く、新たな技術の開発が望まれている。

そこで、大深度立坑技術の確立を目的として、立坑から横坑までを連続して1台のシールド機で掘進する『縦横連続シールド工法』を、「足立区花畑七、八丁目付近枝線工事」に採用し、調査・研究を実施した。

縦横連続シールド工法とは、球体シールド機を用いて機械的に地下水・土圧に対抗しながら立坑を施工し、その後連続して横坑トンネルを施工する工法であり、大深度の立坑、トンネルを施工する新しい技術である。球体シールド機を用いた施工例としては、川崎市の「観音川雨水滞水池建設工事」があり、「横・横シールド」として既に成功をおさめている。しかし今回のように、縦方向掘進、および縦から横へ方向転換の実績はない。そこで本工法においては、縦掘進時の荷重バランス、荷重伝達機構、地盤沈下、鉛直掘進精度等、技術的に未解明な事項を把握し、安全な施工および設計手法の確認のために、各種の計測を実施しながら施工した。

ここでは、立坑施工結果の概要および施工時の立坑・周辺地盤の挙動について報告する。

* 東京都下水道局 管路建設部設計指導課 技術管理係
** 大成建設(株) 東京支店 花畑シールド作業所
*** 大成建設(株) 東京支店 土木技術部設計室

2. 工事概要

2・1 工事概要

本工事は、足立区花畑七、八丁目の雨水、汚水の排水を目的とした下水道主要枝線の立坑およびシールドトンネルを構築する工事である。立坑は外径5.7m、深さ38mの円形立坑である。

図-1、2に施工位置および立坑概要図を示す。

2・2 地盤条件

図-3にシールド路線の地質縦断を示す。当工区は「東京低地」と呼ばれる低地帯（TP+2m）に位置し、GL-30～-40m付近までN値0～2程度の軟弱な沖積シルト層が堆積し、その下部は洪積の埋没段丘層、東京層が広がっている。

立坑施工は全長にわたり沖積砂・シルト層での施工となっている。GL-4～-10mはN値が2～15の沖積砂層、GL-10～-30mまではN値が0～2の軟弱な沖積シルト層である。その下方にはややN値の大きいシルト層がGL-40mまで続き、それ以深は洪積の砂層である。

横坑トンネルは、発進部が沖積シルト層で、綾瀬川を横断した後は到達まで、N値50以上の洪積砂層中の施工となる。

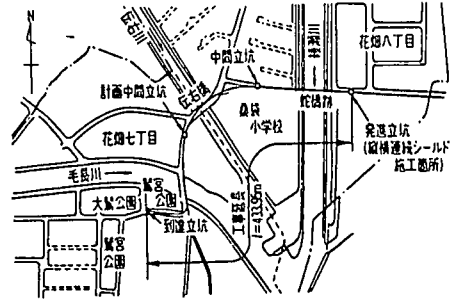


図-1 施工位置

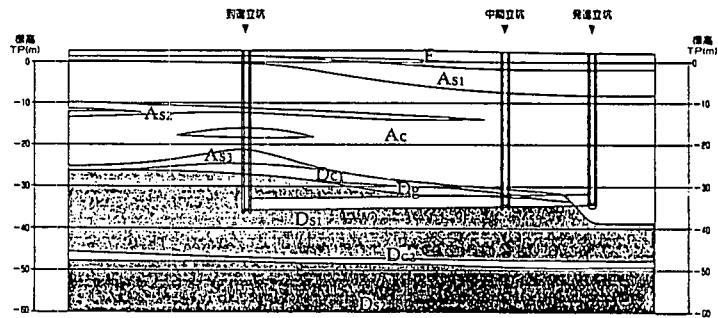


図-3 地質縦断図

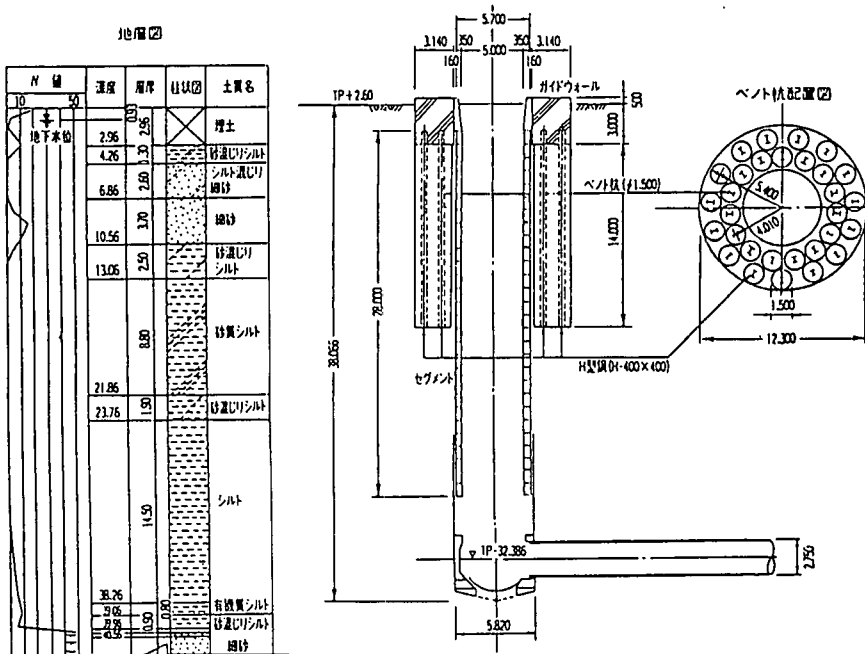


図-2 立坑概要図

3. 縦横連続シールド工法の概要

3・1 工法の概要

本工法は1台のシールド機で立坑と横坑トンネルを連続して施工するもので、横シールド機を球体内部に装備したシールド機（球体シールド機）で立坑を掘進した後、球体を90度回転させて横シールド機を水平に向け、連続して横坑トンネルを施工するものである。

本工法は以下に示す利点を有している。

- ①立坑の掘削、横シールドの発進において機械的に地下水および土砂の流入を防ぎながら施工できるため、大深度立坑、大深度トンネルの施工性、安全性が向上する。
- ②立坑の内空断面、駆体壁厚などを小さくでき、立坑規模を縮小できる。
- ③立坑の底盤改良、発進防護工といった補助工法を省略できる。
- ④立坑の施工速度が速く、発進基地における工期を短縮できる。

3・2 縦横連続シールド機の構造

シールド機は主に縦シールド機、横シールド機、球体、鞘管および外周カッターより構成され、球体外周には地下水および土砂の流入を防止するための各種のシール機構が設置されている。

写真-1、図-4にはシールド機の全体写真、構造概要図を、表-1には縦シールド機、横シールド機の緒元を示す。

表-1 シールド機主要諸元

	縦シールド仕様	横シールド仕様
シールド外径	φ 5,820mm	φ 2,890mm
スキムプレート長	8,700mm	4,165mm
シールド機全長	9,710mm	5,160mm
シールドジャッキ	150t×16本	80t×10本
総推力（単位面積）	2400t（90.2tf/m ² ）	800t（122.0tf/m ² ）

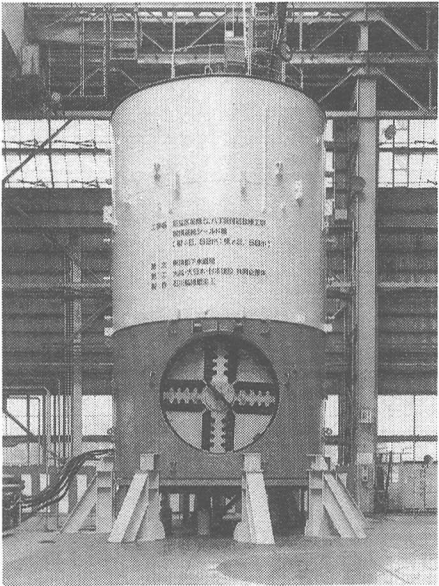


写真-1 シールド機

3・3 施工手順

立坑の施工は以下の手順にて実施した。

- ①シールド機組立て：ベノト杭、ガイドウォールを構築後、地上で別々に組立てたシールド機をガイドウォール上で一体化する。また、ガイドウォール上にシールド機吊り下げ用架台を設置する。
- ②リフトダウン掘進（深度：0～4.00m）：シールド機を吊りジャッキにてガイドウォール内に吊り下ろす。
なおガイドウォール内はGL-4.0mまであらかじめ掘削しておく。
- ③初期掘進（深度：4.00m～14.72m）：吊り架台にシールド機を吊下げ、仮組セグメントで反力を取りながらシールドジャッキにより推進し、上下方向の荷重バランスが一定になるまで掘進する。
- ④本掘進（深度：14.72m～34.33m）：セグメントをガイドウォールに緊結し、推進反力をガイドウォールに直接伝達しながら掘進する。
- ⑤床付掘進（深度：34.33m～38.07m）：鞘管をセグメントに固定し、かつ鞘管を縦シールド機と分離した状態で掘進し、発進開口部を鞘管より引出しながら、床付けまで掘進する。

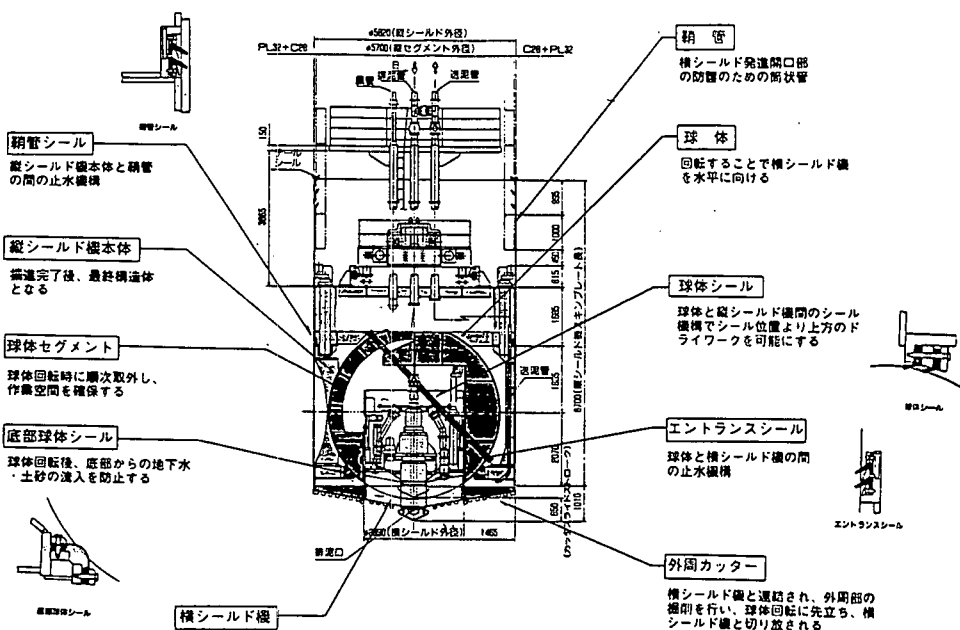


図-4 シールド機構造

4. 計測概要

4.1 計測目的

本工法は密閉型のシールド機による立坑の施工であり、深度とともに浮力が増大し荷重バランスが変化するため、横シールドの施工とは異なる種々の技術的課題の発生が予測された。そこで、これらの技術課題を解明するために以下に示す計測を実施した。図-5に計測器の配置例を示す。

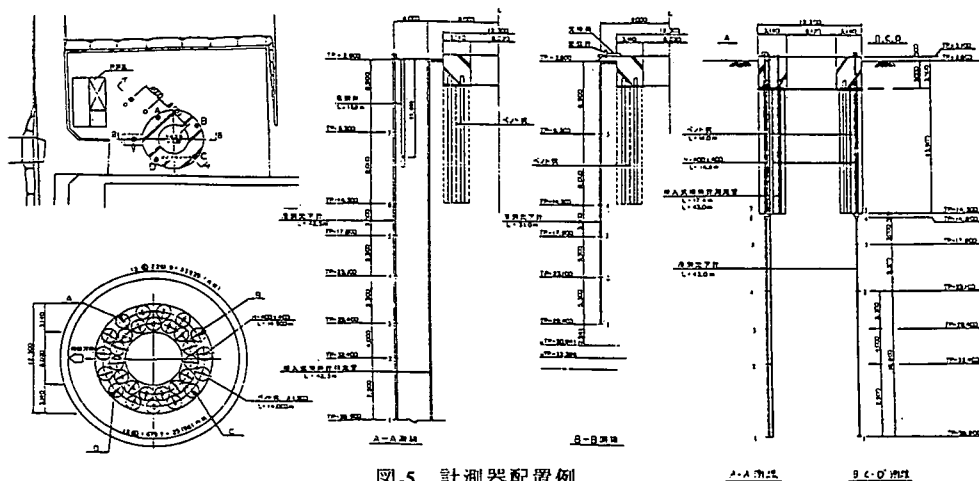


図-5 計測器配置例

4.2 計測項目

縦掘進時の技術的課題および計測項目を以下に示す。

- ①縦掘進時の荷重伝達機構；セグメント、上部架台、ベント杭にひずみ計を設置し、縦シールド掘進時に作用する各種荷重の伝達機構を解明する。
- ②立坑セグメントの挙動；セグメント横断面に鉄筋応力計、土圧計、内空変位計、縦断面にひずみ計、ボルト軸力

計を設置し、縦掘進時、球体回転時、横シールド発進時のセグメント横断面、縦断面の挙動を把握する。

- ③上部架台、ガイドウォールの挙動；上部架台にひずみ計、ガイドウォールに鉄筋応力計を設置し、縦掘進時の上部架台、ガイドウォールの挙動を把握する。
- ④ベノト杭の挙動；ベノト杭にひずみ計、層別沈下計、杭先端に土圧計を設置し、縦掘進時のベノト杭の軸挙動、曲げ挙動および沈下、浮き上がり状況を把握する。
- ⑤地盤変位；周辺地盤に層別沈下計、挿入式傾斜計を設置し、縦掘進時のテールボイド、切羽土圧等による地盤沈下、水平変位等の地盤変状を把握する。

5. 挙動計測結果

5・1 推進力・掘進抵抗

図-6に推進力および掘進抵抗の推移を示す。なお掘進抵抗は次式により算定した。ただし、本掘進時はリ-7荷重（ $J_r = 0$ ）である。リ-7荷重とは、初期掘進時に安定掘削を図るために、あらかじめシールド機を引張っておく荷重である。

$$\text{掘進抵抗 (R)} = \text{推進力 (J_s)} - \text{リ-7荷重 (J_r)} + \text{マシン重量 (W_m)} - \text{浮力 (U)}$$

推進力は初期掘進の前半では200～300tfを推移し、その後掘削深度とともに増加し、初期掘進終了時点では460tfとなった。本掘進では約600tfから若干の変動をしながら深度とともに増加し、最大値は1,080tfとなったが、最終床付け時では約1,000tfとなった。

掘進抵抗は初期掘進時のGL-10mまでは、約130tf（約5tf/m²：切羽単位面積当たり）とほぼ一定であるが、これ以降は徐々に増加し約240tf（約9tf/m²）となった。また本掘進時では鞘管固定時点までは、160～400tf（6～15tf/m²）で変動し、鞘管固定後はやや小さくなった。

初期掘進時の初期段階での掘進抵抗は、切羽面の刃先貫入抵抗、テールブラシの摩擦抵抗が主要因で、後半ではこれにマシン周面摩擦力が加わった結果であるものと考えられる。また、本掘進時は上記の抵抗が複合して現れ、深度に依らずほぼ一定になったものと考えられる。鞘管固定後に掘進抵抗が増大しなかったのは、鞘管シールの抵抗が大きくなかったためと考えられる。

なお、設計での掘進抵抗は切羽単位面積当たり10tf/m²と設定しており、実測結果は設計値に対してやや変動はあるが、ほぼ設計値と同程度の値となっており、設計値の妥当性が示された。

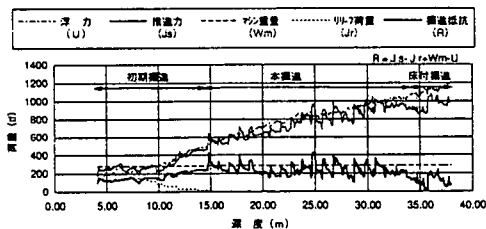


図-6 推進力と掘進抵抗

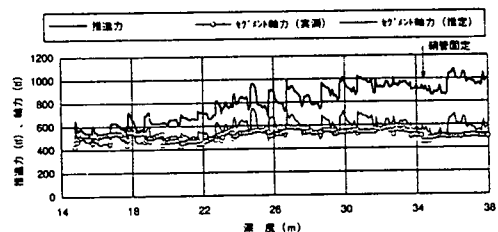


図-7 推進力とセグメント軸力（本掘進）

5・2 セグメント周面摩擦力

図-7に本掘進時の、推進力とセグメント軸力（実測値）および、摩擦力を無視して推定した軸力（推定値＝推進力－セグメント自重）を示す。セグメントの軸力は最上部のスチールセグメントの縦リブ（8カ所）に歪計を設置して計測した。

これによれば推進力と推定軸力はほぼ等しく、このことから推進力がほとんど上方に伝達し、セグメント周面の摩擦力はほとんど無いことがわかる。なお、セグメント周面摩擦力は設計時点でも無視しており、設計値

の妥当性が示された。

5・3 地盤・構造物の挙動

立坑掘進時のガイドウォール天端および周辺地盤地表面の沈下量の推移を図-8に示す。

初期掘進中はガイドウォール、地盤とも沈下はあまりみられなかった。本掘進では、シールド機テール部がベノト杭の先端を通過するまで（GL-14.7～-26.7m）は、徐々に隆起の傾向となり、ガイドウォール天端で最大3mmの隆起が生じたが、その後鞘管

固定時までは沈下の傾向となった。シールド機テール部がベノト杭先端を通過後から沈下傾向を示すのは、テールボイドの発生により、地盤内応力が集中している杭先端付近の応力が解放されたために生じたものと考えられる。最終沈下量はガイドウォール天端で最大7mm、地盤地表面で最大6mmとなり僅かな沈下量でおさまった。

当地点の地盤が軟弱であったにもかかわらず僅かな沈下量でおさまったのは、泥水圧の設定が適切であったこと、裏込め注入が確実であったこと等のためと考えられ、本工法の優位性が確認されたものと考えられる。

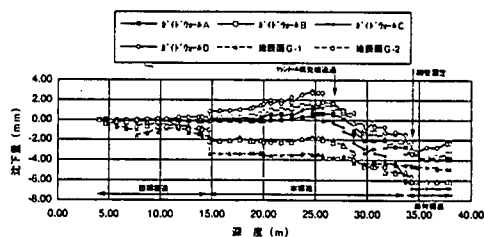


図-8 ガイドウォール・地盤の沈下量

5・4 ベノト杭接地圧

図-9に本掘進時のベノト杭先端（4点）の平均接地圧およびガイドウォール天端の沈下量の推移を示す。

ベノト杭先端の接地圧は、掘進の初期は掘進とともに減少の傾向にあるが、シールド機テール部がベノト杭の先端付近を通過する部分（GL-25～28m）においては、接地圧はやや増加し、その後のGL-28～34mの区間は急激に減少している。また、鞘管固定後はほぼ一定値であり変化は無い。

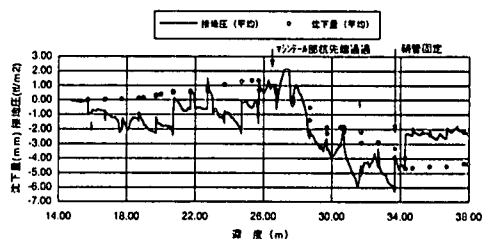


図-9 ベノト杭接地圧・ガイドウォールの沈下量

この原因としては、掘進の初期は上向き力の増大とともに接地圧は減少するが、GL-25～28mでは、裏込め注入圧等の影響が現れて増加するものの、その後はテールボイドの発生により周辺地盤の応力解放が生じ、接地圧が急激に減少したのと考えられる。このことは、ガイドウォール天端の沈下傾向が接地圧と同様であることから説明される。

なお、鞘管固定後に階段状に増加しているが、これは鞘管固定後から再掘進までに5日間経過したため地盤がなじんだ結果として、みかけ上の接地圧が上昇したものと考えられる。

6. まとめ

立坑掘進時には掘削深度とともに荷重バランスが変化すること、立坑掘進部の地層が軟弱なシルト層であること等から、鉛直掘進精度、掘進時の推進反力の確保、地盤沈下等が重要な課題であった。しかし、各種の計測による入念な施工管理を実施した結果、十分満足できる結果となった。今後は、他の計測データの詳細な分析をするとともに、本工法の設計・施工技術の確立に向けて鋭意努力してゆくつもりである。

なお本工事に際して、貴重な意見を頂いた、（社）日本トンネル技術協会の「縦横連続シールド工法特別委員会（委員長：松本嘉司 東京理科大学教授、特別顧問：山本稔 東京都立大学名誉教授）」の関係者には深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 川上宏一他：縦横連続シールドの施工計画と技術的課題、トンネルと地下、第25巻6号、1994年6月
- 2) 梶ヶ谷勝他：立坑と横坑を連続施工、土木技術、50巻1号、1995年1月
- 3) 並木克之他：縦横連続シールドによる立坑施工時の地盤挙動 他4編、土木学会年譜集VI、1995年9月