

鉛直水平両用シールド機の開発

RESEARCH AND DEVELOPMENT ON VERTICAL-HORIZONTAL CONTINUOUS SHIELD METHOD

— 止水および構造計算結果 —

貝沼憲男・秋山吉弘・金子研一・浜本健一・伊藤広幸

Norio KAINUMA, Yoshihiro AKIYAMA, Ken-ichi KANEKO, Ken-ichi HAMAMOTO and Hiroyuki ITO

A tunnel construction method has been developed in which both a shaft and a underground tube are continuously excavated using a hermetically sealed shield machine which is launched from the surface. The pressure-resisting part of the machine was confirmed through tests at a water pressure of 980 kPa.

Theoretical examinations of a shaft segment and the shaft base using the Finite Element Method were carried out assuming a soft ground stratum. This showed the designed structures to be safe.

Keywords: vertical-horizontal continuous shield, tunnel construction method, shaft hermetically sealed shield machine, FEM

1. まえがき

近年、大都市域において、都市機能の高度化に伴い、地下空間利用の必要性がますます高まっている。特に、地下鉄、電力洞道等の道路下の利用は相当進んでおり、飽和状態に近い。このため、今後ますます地下深部での施工が予想される。また、用地難から狭い地上用地での施工も要求されることは必至である。

深さ50mのシールドトンネル発進立坑を想定した場合、既存の技術でも対応可能である。しかし、地下水圧が高くなることにより技術的な課題が残されていることも事実である。このような状況の中で、大深度におけるシールド発進立坑建設の合理化を目指し、新しい立坑掘削技術の開発を行った。密閉型のシールドで地上から立坑、水平坑を連続して掘削する工法で、高水圧に対して安全な施工が可能である。地盤改良の併用なしで施工できるばかりでなく、立坑の高速施工が可能となり、立坑がコンパクトになるといった特長を有する。

以下に、鉛直水平両用シールド機の概要と同シールド機で使用するシールドの性能実験、立坑の構造解析結果について報告する。

-
- * 正会員 東京電力㈱技術研究所構造研究室
 - ** 正会員 大成建設㈱生産技術開発部
 - *** 正会員 大成建設㈱土木技術部
 - **** 石川島播磨重工業㈱油機シールド事業部

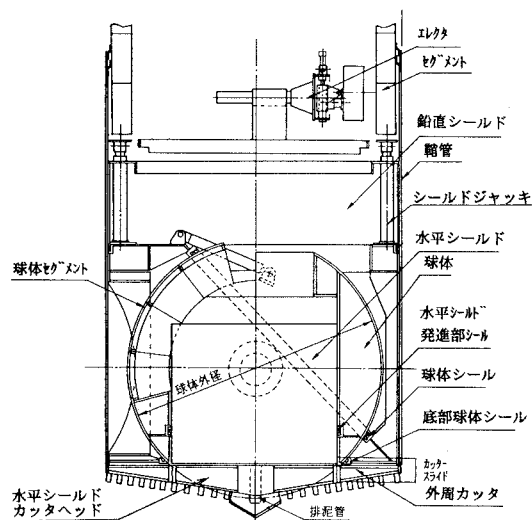
2. 鉛直水平両用シールド機の概要

鉛直水平両用シールド機は、図－1 に示すように立坑を掘削する鉛直シールドと、水平トンネルを掘る水平シールドを内蔵した球体により構成される。立坑寸法を掘削するために、鉛直シールドのカッタ装置は水平シールドのカッタヘッドの外側に、環状の外周カッタを装備する。両者はストッパピンにより結合しており、油圧ジャッキにより脱着を行う。外周カッタ脱着機構を図－2 に示す。

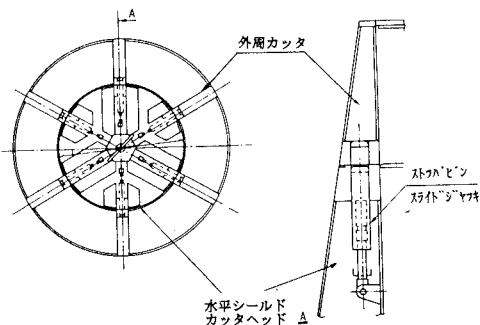
立坑の掘削土は、鉛直シールド外周に配置された送泥管から送られる泥水の流れを利用して中央に集められ、カッタのセンタシャフトから排泥される。

鞘管は、水平シールド発進のために鉛直シールド外殻に開けられた開口部を地山崩壊から防護するために設ける。図－3 に鞘管スライド手順を示す。所定の深さまで掘進後、立坑セグメント固定リングに鞘管を固定する。シールドが降下することで相対的に鞘管はスライドする。

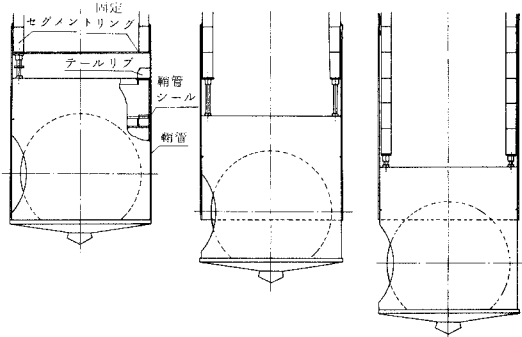
シールドが立坑の底に到達した段階で、外周カッタを切り離し、カッタを球体の軌跡の中に収める。水平シールドのシールドジャッキをスライドジャッキとして用い、水平シールド全体を球体中央へスライドさせる。次に、油圧ジャッキを用いて図－4 の状態まで回転させる。回転中、順次、作業空間を確保するために、球体セグメントをはずす。水平シールドをテール長さ分発進し、テールプレートを継ぎ足す。エレクト、配管等を整備し、通常のシールドと同じように水平シールドを発進する。



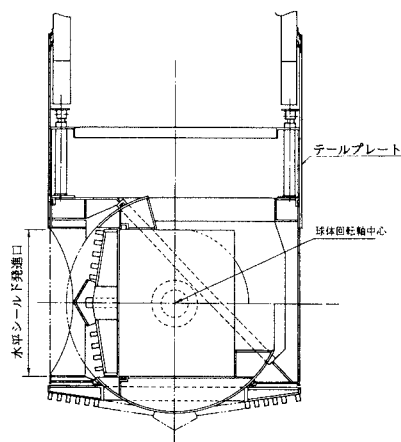
図－1 鉛直シールド掘進図



図－2 外周カッタ脱着機構



図－3 鞘管スライド手順



図－4 水平シールド発進図

3. シールの選定と止水性能実験

3・1 シールの選定

(a) 球体シール

球体シールの位置を図-1に破線で示す。球体を斜めにシールすることで、掘削中および球体回転時に、止水性能を発揮する。このシールは、特に、球体回転時に球体製作精度に対する追従性および反転しないことが要求される。

図-5に示すようにシール形状としては二段のリップ形状とし、グリースを給油可能な機構とした。材質はウレタン（硬度90）を使用した。オートグラフ試験機を用いて行ったリップの押え代に対する接触力の変化を図-6に示す。

(b) 底部球体シール

底部球体シールの設置目的は球体回転後、球体底部をシールして、内部を解体するためである。静止時、耐圧性能が要求される他、球体回転時、カット通過に対する耐久性が要求される。図-7に示すように、形状はインフレートタイプとし、材質はウレタン、内部にグリースを給油することでシールを図る構造とした。

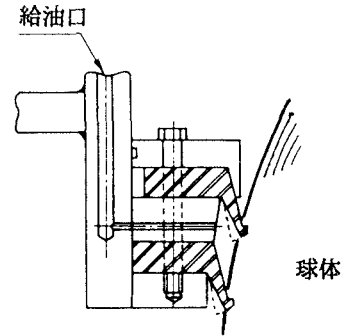


図-5 球体シール

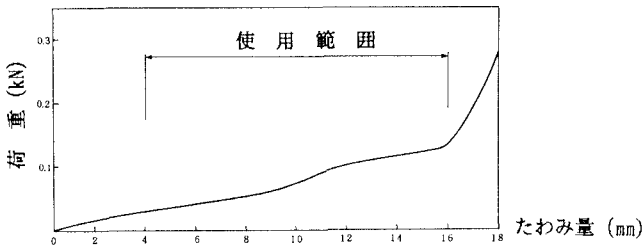


図-6 球体シールの荷重-たわみ特性

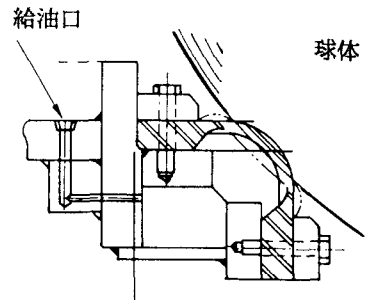


図-7 底部球体シール

3・2 実験の概要

実験の目的は、選定したシールの、水圧10kgf/cm²(980kPa)での性能確認と実機製作上のデータ収集である。実験装置は、φ1200mmの球体と内径φ2000mmの水槽から構成され、油圧ジャッキにより球体を90°回転させることができる。治具を挟み込むことで両シールの実験が可能となるように製作した。球体シールの実験装置を図-8に、底部球体シールの実験装置を図-9に示す。なお、球体の板厚は16mmである。

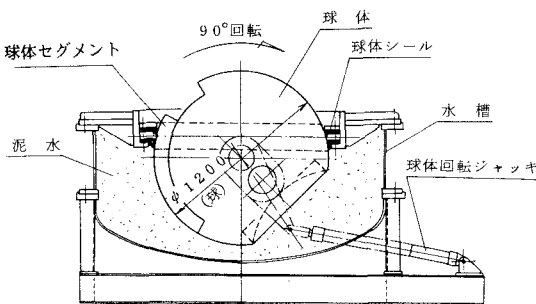


図-8 球体シール性能実験装置

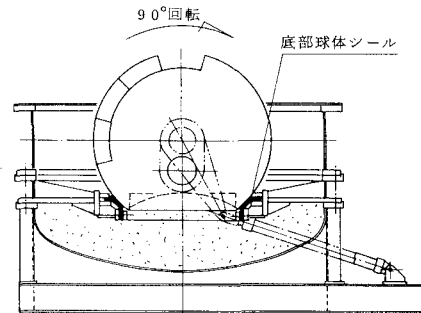


図-9 底部球体シール性能実験装置

シールは外径 $\phi 4750\text{mm}$ の球体（水平シールド外径 $\phi 3130\text{mm}$ で試設計）に実際に使用するシールと同一寸法形状のものを使用し、球体との接触角が最も近似する個所で実験を行った。

球体シールについては、水圧を 196kPa ごとに 980kPa まで上げ、各段階で球体を 90° 回転させ、止水状況を確認すると共に、グリース圧および回転ジャッキの作動圧を測定した。また、 24 時間、 980kPa で水圧保持を行い、止水性を確認した。底部球体シールについては、球体静止状態で 980kPa まで加圧するとともに、無加圧で球体を回転させ、シールの耐圧性能を確認した。どちらの実験も加圧水として、清水と泥水の 2 ケースで行った。

3・3 実験結果および考察

(a) 耐圧性能の確認

いずれのケースにおいても漏水のないことを確認した。球体シールについては、スパーサリングをはさむことで締め代 4mm （基準 10mm ）での止水性も確認した。

球体シールの場合、シール間へグリースを給油しなくても、水圧の上昇に伴い、リップが押しつけられることでグリース圧も上昇し、止水できることが分かった。底部球体シールについても同様であった。砂がはさみこまれた場合、給油を行うことで止水可能なことも確認した。球体シール実験における初期設定圧が異なる場合の水圧とグリース圧の関係を図-10に示す。

当初心配された、回転時における球体シールの反転もなく、また、球体切り欠き部の底部球体シール通過時の耐久性も確認でき、実用上問題ないと考える。

(b) 摺動抵抗の計測

球体シール実験において回転角度 45° での、水圧と球体回転モーメントの関係を図-11に示す。○印は伸び側、●印は縮み側を表す。測定した範囲内では、水圧の上昇とともに摺動抵抗も比例して大きくなることが分かった。

(c) 変形量測定

ダイヤルゲージを設置して、水圧に対する球体の変形量を測定した。計測の結果、最大変形量は 1.95mm であり、球体シールの締め代の使用範囲内であることが分かった。

事前にFEMにより、水圧 980kPa が球体に作用した場合の構造解析を行った結果、開口部付近において、最大変形量は 1.7mm であった。図-12に変形状態図を示す。このことから、FEM解析が事前の構造解析として、有効な手段であることが分かった。

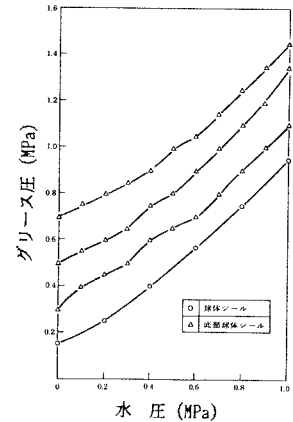


図-10 水圧とグリース圧の関係

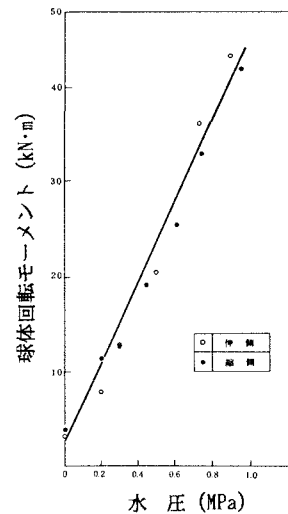


図-11 球体シールの摺動抵抗

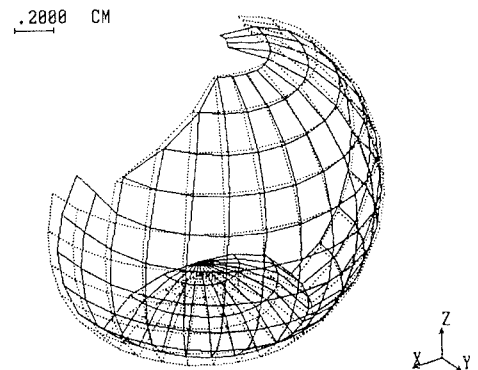


図-12 FEMによる球体変形量解析

4. 立坑セグメントの設計方法

立坑セグメントの設計にあたっては、設計計算に用いる荷重条件、検討条件の設定が問題となる。これは大深度での作用土圧、円形の立坑構造に作用する偏荷重について、従来確立された考え方がなく、その評価が難しいことによる。また、層状をなす複雑な地盤中に建設される立坑は、地震による影響を大きく受けることが予想され、地震に対しても十分な検討を行う必要があると考えられる。以下に設計手法の一案を示す。

立坑セグメントの設計は、表－1に示すように、完成後、施工時、および地震時に対する3ケースの検討を行い、断面の決定をするものと

する。解析方法としては、完成後および施工時の検討は、偏荷重も考慮した骨組構造解析により、また地震時の検討は立坑が線状をなす地中構造物で、地震時の変形が地盤の変形に支配されと考えられるため、一般に用いられている応答変位法にて行うこととする。

表－1 検討ケース

	解析断面	作用荷重	偏 圧	許 容 応 力 度
完成後	横断面	土圧：静止土圧 水圧：間隙水圧	元撓み	長期許容応力度
施工時	横断面	土圧：静止土圧 水圧：間隙水圧	10%割増し荷重 (1方向)	上記の50%増し
地震時	縦断面	地盤応答変位	—————	上記の50%増し
	横断面	縦断面の解析で 得た地盤反力	—————	上記の50%増し

完成後の偏荷重については、組み立てられたセグメントが組立誤差や不測の事態等により必ずしも真円とならず、曲げモーメントが付加されることが予想される。そこで、元撓みを持つ楕円管に荷重が作用するものと考え、セグメントの設計を行うものとする。撓み量はセグメント半径の0.5～1.0%を想定する。

元撓みによる最大曲げモーメント $M^*_{\max}$

$$M^*_{\max} = \{ \delta 0 / (1 - q / P_{cr}) \} \cdot N^* , \quad N^* = q \cdot R_c$$

ここに、 q : 外圧

R_c : セグメント軸半径

$\delta 0$: 初期楕円最大ずれ量

P_{cr} : 円弧形アーチ座屈荷重

施工時の偏荷重としては、地質の不均一、掘削によるゆるみなど施工の段階において予想できない一時的な偏土圧が作用する恐れがあるため、一方向からの土圧を10%割増しして付加するものとする。

また、立坑セグメントを地盤急変部に構築する場合は、地震の影響により大きな曲げモーメント、リング間継手ボルトに大きな引張応力が発生するため、地震動、地山条件、立坑の形状寸法を考慮しつつ、可撓セグメントを設置する等の地震対策を講じる必要がある。

5. 立坑底部構造の解析

水平シールドが発進した後の立坑底部構造は、鉛直シールドの外板に大きな断面欠損が生じた状態となり、この構造に大きな土圧・水圧が作用することとなる。この状態での立坑底部構造の安全性を確認するため、以下に示す条件下で施工した場合を想定し、応力解析を行ってみた。

5.1 検討条件

鉛直シールド外径 : ϕ 5,450mm

立坑深度 : GL -50m

水平シールド外径 : ϕ 3,130mm

掘削地盤 : 沖積粘性土・砂質土

5.2 解析方法および解析モデル

立坑底部構造の解析モデルは、土圧・水圧等の外圧に対して、安全側を考え鋼構造のみで抵抗するものとし、薄肉シェルでモデル化した。また解析方法は3次元有限要素法を用いた。

5.3 解析ケース

解析は常時および地震時について行い、地震時は偏土圧が横坑軸方向より作用した場合（Case-1）と横坑軸直角方向より作用した場合（Case-2）について解析を行った。

5.4 作用荷重

常時の作用荷重は、軀体側壁には静止土圧と水圧が作用し、底版部には水圧のみが作用するものとする。また地震時の増分土圧は、地震時主働土圧 P_{EA} と常時主働土圧 P_A の差分とした。

5.5 解析結果および考察

解析結果の一例を図-15および表-2に示す。

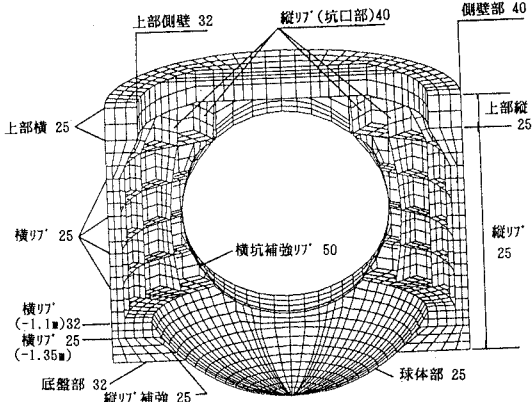
- ① 全体的に圧縮応力が卓越しており、横坑開口上部、および横坑開口下部の球体と鉛直シールドの接合部に大きな応力が発生している。したがって、この部分に縦リブを補強する等の対応が必要である。
- ② 土圧・水圧に対して鋼構造のみで抵抗するものとして応力解析を行ったが、発生応力は全て許容値以下で、立坑底部構造は鋼構造として考えても安全であることが確認された。

表-2 解析結果一覧表

	常 時	地 震 時	
		Case- 1	Case- 2
最大引張応力〔kgf/cm ² 〕	683	734	797
最大圧縮応力〔kgf/cm ² 〕	1200	1200	1260
最大せん断応力〔kgf/cm ² 〕	622	693	669

6. あとがき

高水圧下における球体回転時の止水性の確認を行うとともに、立坑セグメントの設計方法の検討、最終構造となる立坑底部構造の応力解析を行い、鉛直水平シールド機実用化への有益な成果を得ることができた。今後は、鉛直シールド機掘進に関する実験、鉛直坑水平坑の連続施工実証等を行い、技術の確立を推進するとともに、鉛直水平両用シールド機を応用した水平坑の直角施工に関する研究も進めてゆきたい。本研究を進めるにあたっては、東京都立大学山本稔名誉教授に貴重なご意見を頂いており、ここに深く感謝する次第である。



（図中の数字は鋼材の厚さ:単位mm）

図-13 解析モデル図

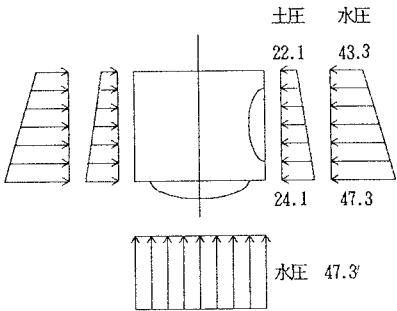


図-14 常時作用荷重図 (t/m²)

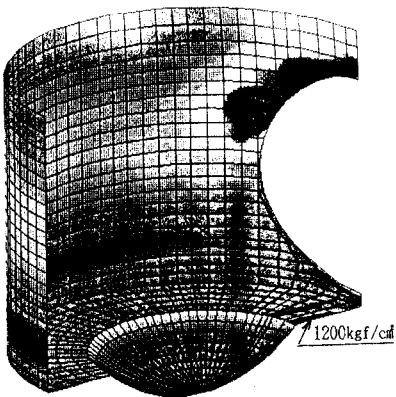


図-15 最大圧縮応力分布図

（図中、色の濃い部分に応力が集中している）