

35. 限定圧気式シールド掘進機の開発

三菱重工業(株) 明石製作所 安田 勉

1. まえがき

シールド工法は1818年フランスのブルーネルが考案したものと云われ、最初の工事はブルーネルが設計したシールド掘進機(以下シールド機と略称する)によるもので、ロンドンのテムズ河底トンネル用であり1825年着工以来18年目の1843年に完成した。しかし当時は圧気工法が開発されていなかつたため工事は非常に難渋なものであつたと記録されている。

この圧気工法はコックレーンが1830年エアートルックの特許をとり、圧気とエアートルックが初めて工事に用いられたのは1839年フランスのシャロン炭山の立坑掘削のときであつたと云われている。トンネル工事に最初に用いられたのは1879年ニューヨークとアントワープであり、この工事が初めてシールド工法に地山安定処理工法としての圧気工法を採用したものと云える。

わが国では1926年東海道線丹那トンネル水抜き坑用シールド工法に圧気工法を採用されたのが初めてであり、最高 1.4 kg/cm^2 の圧気をかけた。初の本格的シールド工事と云われている1943年の関門トンネル門司側海底部では実に 2.5 kg/cm^2 の圧気をかけ、海底への漏気を防ぐため海底へ粘土ふとん工を施したと記録されている。このように滞水層などの悪条件土質を掘削する場合、地山安定処理工法が採用され、この工法で最も多用されているのが圧気工法であり、現在シールド工法の約75%が採用しているが、この工法はトンネル全体圧気となるため種々の欠点がある。即ち圧気下作業の健康上の問題がとり上げられ、昭和52年1月7日公布の労働安全衛生法施行令が改正実施されるなど規制が強化されたこと、また作業能率、圧気下作業員の不足などの問題があるが、これら欠点は広く知られているため省略する。ここで考えられたのが圧気が必要な切羽部分のみを圧気する限定圧気式シールド工法であり、このシールド機が完成すれば全体圧気工法の欠点を全て解決する画期的工法となる。このため過去何度か試みられたが実用化に成功し、一般工法化される可能性のある結果は得ていない。この最大の原因は切羽の圧気室より大気側へ掘削土砂を排出する装置の気密性と砂礫排土による寿命、粘性土の付着防止など苛酷な条件が未解決なためである。従来この排土機構に試みられたのはロータリフィーダ型が多く、気密性と寿命に対する構造的な問題が一般実用化を阻害していたとも云えよう。この解決のために、ロータリフィーダ型と全く異なる泥水加圧式シールド工法の排泥管系に用いられる苛酷条件下のボールバルブの水密性に着目し、この構造を応用したシールド機外径5mクラスの排土装置を完成させ、試験装置によるテストを重ね高圧気に対する気密性、寿命などで好結果を得たので今後の限定圧気式シールド機の一般実用化の一助にせられたいと考え、この試験結果を紹介する次第である。なお、本試験に用いられた排土装置と同一装置を装備した外径5.25mの限定圧気シールド機が昭和52年8月末、東京都水道トンネル用として発進した。

2. ボールバルブ型気密排土装置の概略構造と気密排土原理

図-1がボールバルブ型気密排土装置（以下排土装置と略称する）をシールド機に装備した限定圧気式シールド機の全体図である。圧気部分は排土装置と隔壁より前方であり、圧気部の切羽でカットヘッドにより掘削された土砂はホツバに投入され排土装置により大気側へ排土され、後方へベルトコンベアにより搬出される。機能上この排土装置は苛酷な条件で使用されるため、ホツバと排土装置の間には非常用ゲートバルブを備え、万一のトラブルに対処している。

図-2に排土装置の概略構造及び作動原理を挙げる。駆動モータにより回転するボールとケースの間には上部シールと下部シールの2本のメタルシールを装着し、圧気室の気密を保持している。従つてボールコア位置が②の時は下部シールが、④の時は上部シールのみで気密を保持し、その他の状態の時は両シールが気密を保持している。従つてボールコア内の気圧は①～③が圧気状態、④以降は大気圧となる。

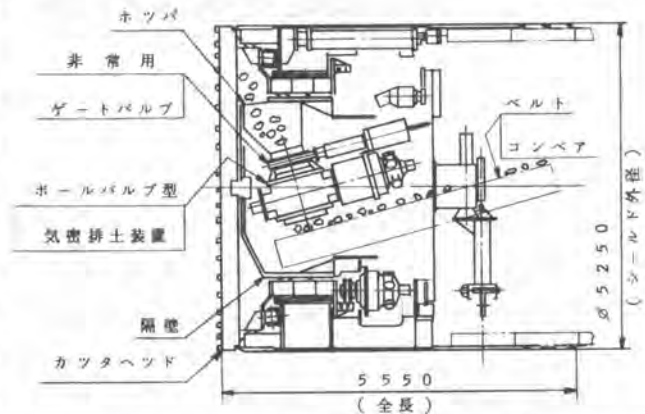


図-1 ボールバルブ型気密排土装置を装備した限定圧気式シールド機

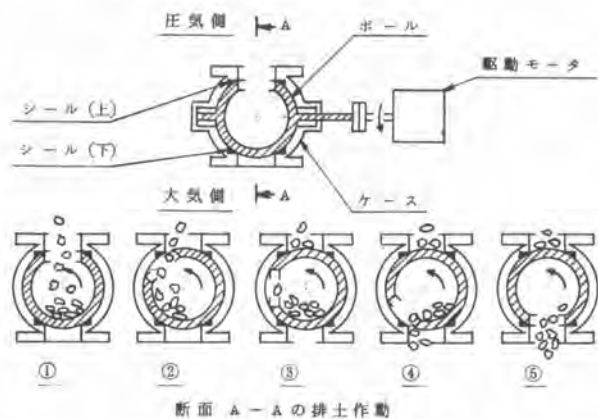


図-2 ボールバルブ型気密排土の作動原理

次にこの排土装置にボールバルブ型を採用したことによる特徴を挙げる。

- (1) ロータリフィーダのように円筒形でなく球形体であるため、1本のメタルシールによる気密保持が可能である。また土砂との摺動によるシールの摩耗隙間からの漏気はシールがスプリングによりボールへ押し付けられる構造のため防止できる。
- (2) ボールとケースの間に付着した粘性土がシールの役目を果たし、気密保持を助ける。
- (3) ボールコア入口部硬度、形状の検討により砂礫による摩耗寿命を延ばすことができる。

3. 試験装置と試験用土砂

3.1 排土装置仕様

回転数	$N = 0 \sim 14 \text{ r.p.m}$	q ; 1 m 掘進に要する切羽断面容量
装備トルク	$T = 3 \text{ T} - m$	η ; 排土効率 (砂質の場合)
ボールコア実容積	$Q = 0.12 \text{ m}^3$	A ; 掘削による切羽土砂の膨張係数

排土能力 (シールド外径 5.25 m で 1 m 掘進の場合)

$$1 \text{ m 掘削時間} = q \times A / Q \times N \times \eta = 21.6 \times 1.3 / 0.12 \times 14 \times 0.9 = 19 \text{ min}$$

$$\text{最大排土量} = Q \times N \times 60 = 0.12 \times 14 \times 60 = 100 \text{ m}^3 / \text{Hr}$$

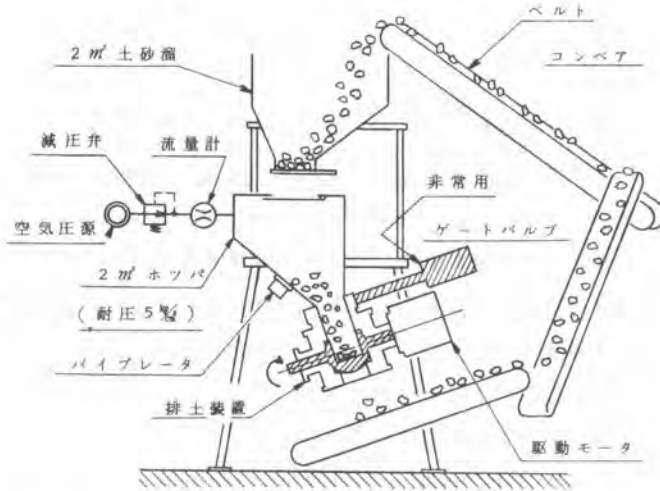


図-3 ボールバルブ型気密排土試験装置概略図

写真-1 排土試験中の同装置

3.2 試験用土砂

試験用土砂は

- (1) シルト質粘土) 表-1 参照
- (2) 砂
- (3) 礫 (平均径 10 mm)

について空気漏れ量, シール摩耗量, 排土効率などについて試験を行った。

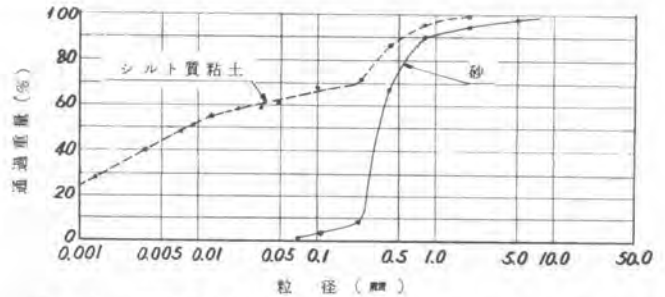


表-1 試験用土砂 (シルト質粘土, 砂) の粒径加積曲線

4. 試験結果と考察

4.1 空気漏れ量試験

空気漏れ量の測定はアニューバ流量計によるもので, 上下部の両シールがシールした状態, 即ち図-2のボールコア位置③のボール静止状態の測定結果である。排土中は排土効率が加算されるためデータ採取は不能であった。この空気漏れ量は累積回転数にほぼ比例的に増加しており, シールの摩耗限界の15万回転時は約 $4 \text{ Nm}^2/\text{mm}^2$ 程度と推定され, 実用上支障ないと考える。また空気圧力 1 kg/cm^2 のときと 3 kg/cm^2 のときの漏水量の差が少

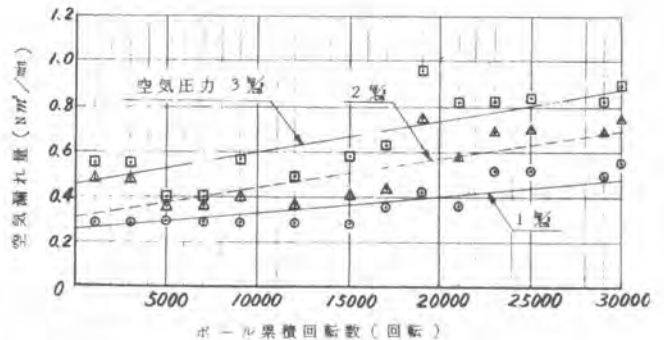


表-2 排土装置累積回転数と空気漏れ量

また空気圧力 1 kg/cm^2 のときと 3 kg/cm^2 のときの漏水量の差が少

いことは、この排土装置の構造が気密排土に適しているためと云えよう。

4.2 シール摩耗量

表-3は土砂排土の寿命に関するデータで、シールを押し付けているスプリングの伸び量を測定した値である。

上部シールの摩耗量は挙げてないが、3万回転後の摩耗量は0.6mmで下部シールの約半分であつたことは下部の土砂排出側

が苛酷条件であることを示した。なお、ボール累積回転数3万回転は外径5mクラスのシールド機の掘進距離約100mに相当し、シールの摩耗限界が5mmであることからシールは400~500mの掘進に耐えるものと想定される。試験的に径50~60mmの礫を投入し、ボールコア端部とシールの間に噛込ませたが簡単に破砕し、シールの損傷も認められなかつた。

4.3 排土効率

排土効率とはボールコア部容積と排出土砂の見かけ容積の比である。

表-4、表-5でボールが低速回転時に100%以上を示しているのは圧気により土砂がボールコア内に圧

密され、反転してボールコア部が大

気側へ解放されたとき、即ち排土される時土砂が膨張するためである。当然高速回転時は低排土効率となり、ボール径にもよるが実用上はボール外周速で30m/minが限界であると云える。なお含水比の高いシルト質粘土の高速回転時の効率は急激に低下しているが、これは上部のホツパ、ボールコア内壁にシルト質粘土が付着し、効率を低下させているためである。この対策として種々の方法を試みたが最も有効な結果を得たのはバイブレータによるものであつた。

表-5の含水比13.3%は排土実用限界と受けとられるが、これは工場内試験であるため、シルト質粘土塊が乾燥し、含水比を高くするための散水も土塊内部に浸透せず均等な含水比を得られなかつたため、実際の地山の含水比で云えば30~40%程度、即ち機械掘りシールド機で掘進可能な程度の含水比のシルト質粘土までは排土効率を低下させずに排土可能と考える。

5. あとがき

シルト質粘土、砂、礫による排土装置の累積回転数3万回転は外径5mクラスのシールド機の掘進距離約100mに相当し、この時点での空気漏れ量は圧気3kg/cm²で1Nm³/minと非常に気密性にすぐれた結果を得ることができた。この排土装置が今後の限定圧気式シールド機の実用化の一助になれば幸いである。

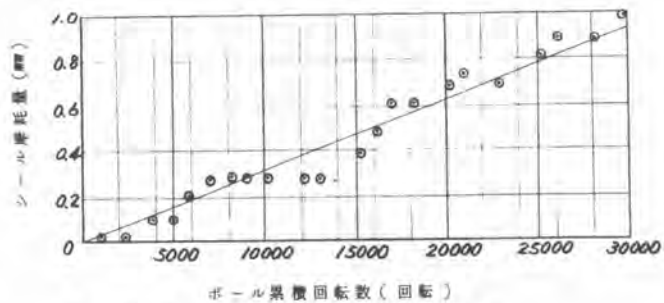


表-3 累積回転数と下部シール摩耗量

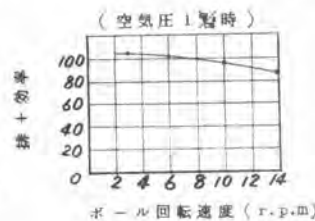


表-4 砂の排土効率

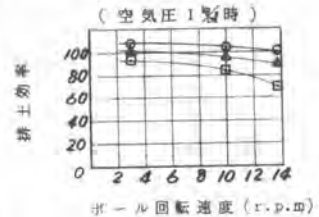


表-5 シルト質粘土の排土効率