

# 新立坑シールド工法における排泥機構に関する研究

東北大・工 高橋 弘・松井 二郎・齋藤 清次

## 1. はじめに

大深度における地下空間の建設あるいは鉄道などの大きな構造物を地中深くに造るためには、機械の搬入などのために大口径の立坑が必要とされている。一般に大口径立坑を掘削する場合、地中に壁を造り、立坑の周囲を覆い、内部をパワーショベルなどで掘り下げる「連続地中壁構築工法」が採用されることが多い。しかし、この工法には長時間の工期と多大な建設コストが必要であるという問題点がある。一方、トンネルなどの横坑掘削ではシールド工法が広く用いられており、現在ではカッター面板の方向制御のみならず、セグメントの組立も自動化されている。そこで、大深度大口径の立坑掘削に横坑掘削では既に多くの実績のあるシールド工法を適用することが考えられる。この立坑シールド工法が可能になれば、機械自体を低空頭（長さが短い）・軽量化できるため、初期の発進工事が簡単になり、またセグメントの組立も自動化が可能であることから、工期の大幅な短縮と建設コストの削減が期待できる。

この立坑シールド工法を実現するにあたり、最大の問題点は掘削土砂を如何にして坑外に排出するかである。横坑シールドでは重力の方向と進行方向が直交しているため、掘削土砂はチャンバー下部に集中する。従って、この部分に排泥管を設置し、ポンプで坑外に排出すればよい。しかし、立坑シールドでは重力の方向と進行方向が一致しているため、何らかの排泥機構を設置しなければ、円滑な排泥は期待できない。すなわち、実現されれば大きなメリットが期待できる立坑シールド工法であるが、その成否は掘削土砂の排泥機構の確立にあると言っても過言ではない。

それゆえ、本研究では立坑シールド工法の確立を目指し、その第1段階として坑底での噴流による掘削土砂の輸送機構を提案し、掘削土砂の輸送に関する模型実験を行うことを目的とする。

## 2. 模型の相似則に関する考察

噴流中の粒子の運動は、流体と粒子の相対速度に基づく慣性力、粒子に作用する重力ならびに流体の粘性力によって支配されている。従って、粒子の運搬に関する模型実験を行う上で慣性力と重力の比であるフルード数と粘性力と重力の比であるレイノルズ数の両方をそろえる必要がある。

今、粒子まわりの流れの状態が相似になるには、代表速度を $v$  [ $LT^{-1}$ ]、重力加速度を $g$  [ $LT^{-2}$ ]、代表長さを $L$  [ $L$ ]、動粘度を $\nu$  [ $L^2T^{-1}$ ]とし、模型における値に添え字1を付けた場合、次式を満足しなければならない。

$$Re = \text{レイノルズ数} = \frac{\text{慣性力}}{\text{粘性力}} = \frac{vL}{\nu} = \frac{v_1 L_1}{\nu_1}$$
$$Fr = \text{フルード数} = \frac{\text{慣性力}}{\text{重力}} = \frac{v}{\sqrt{Lg}} = \frac{v_1}{\sqrt{L_1 g_1}}$$

しかし、これらを同時に満足するものは実機以外に存在しない。従って、模型実験を行うためには、相似則の緩和を行う必要がある。詳細は省略するが、噴流中の粒子に作用する力として、粒子と底面との摩擦力、半径方向の噴流による流体抗力および円周方向の噴流による流体抗力の3つを考え、これらの力の比について考察し、想定する実機（直径18m）の1/36スケールの模型を作成した。その概略を図1に示す。

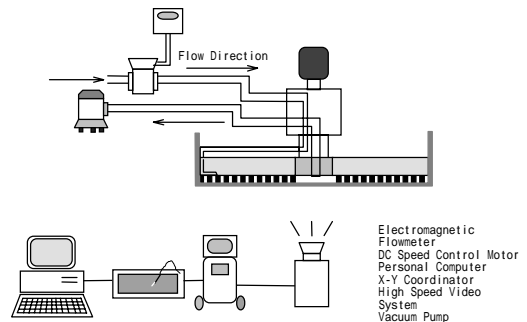


図1 実験装置の概略

流体はポンプにより断面Aに送られ、坑底部において噴流となり、掘削土砂を搬送しながら坑底部中心へ移動する。坑底部中心からは吸引機により断面Bを通過して坑外に排出される。坑底部は透明アクリル板で作成し、掘削土砂の移動が肉眼観察およびビデオ撮影できるようになっている。ビデオ撮影された掘削土砂の挙動はXYコーディネータで解析され、粒子の位置座標、移動速度などが計測される。坑底部の傾斜角度はカッタースポークの傾斜角度に他ならないが、本実験では0度および10度の2通りで実験を行った。実験に用いた粒子は、相似則を基に決定した平均粒径7mmの安山岩碎石に加えて平均粒径4mmの安山岩碎石も用いた。なお、実機における坑底部の状態は、水中ポンプによる排出能力が送水量よりも十分に大きく、従って泥水が

坑底部に滞留することなく、噴流は気中液壁面噴流になる場合と、送水量が水中ポンプによる排出能力を上回り、坑底部が泥水である程度満たされており、噴流は液中液壁面噴流になる場合の2通りが考えられるため、この2通りについて実験を行った。

### 3. 実験結果および考察

掘削土砂は噴流の流体力によって搬送されるため、噴流の広がりや搬送能力を評価する上で重要なパラメータになる。図2は気中液噴流および液中液噴流の広がりの結果を示したものである。なお、噴流の広がりを計測する際には、清水中に白色の塗料を混ぜて白濁させ、噴流の境界をXY座標で計測した。気中液噴流の場合は、カッタースポークの回転方向と逆方向に広がる傾向が見られるが、液中液噴流の場合は、逆にカッタースポークの回転方向に若干広がる傾向が見られる。なお、送水量が大きくなると、この傾向はあまり見られず、噴流は中心部に向かってほぼ直線的に流下する。

図3に掘削土砂の移動軌跡の一例を示した。掘削土砂は噴流の最も流速の速い部分と考えられる流体部分で搬送され、その移動軌跡は初期位置から中心部に向かってほぼ直線的である。

次に排泥効率について検討した。本実験では、実際に岩盤掘削を行っていないが、想定される掘進速度、坑底面の面積および掘削土砂の平均径から、カッタースポークが1回転する間に得られる掘削土砂の個数が概算される。カッタースポークが1回転する間に、この全掘削土砂が排出されなければ、カッタースポークが回転するたびに何割かの掘削土砂が坑底部に滞留することになるので、やがてカッタースポークが抑留されて掘削ができなくなる。従って、厳密に言えば、排泥効率が常に100%になるように送水流量を設定しなければならない。本研究では、概算される個数の掘削粒子を坑底面上にランダムに設置し、カッタースポークが1回転するに排出される個数をカウントし、(排出された粒子の個数) / (全粒子数) で排泥効率を定義した。図4に排泥効率と送水流量との関係を示した。横軸は、傾斜角0度において単一粒子が坑底中心まで搬送される最小流量で除して無次元化してある。図4を見ると、気中液噴流の場合の排泥効率が液中液噴流に比べてかなり高くなっており、また少ない流量で高い排泥効率を示していることが分かる。装置の限界上、排泥効率を100%にまで上げることはできなかったが、気中液噴流では100%に近い効率を示していることから、実操業に当たっては、カッタースポークにある程

度の傾斜角をつけ、坑底部で気中液噴流が発生するように送水流量および水中ポンプの排出量を調整する必要があると考えられる。

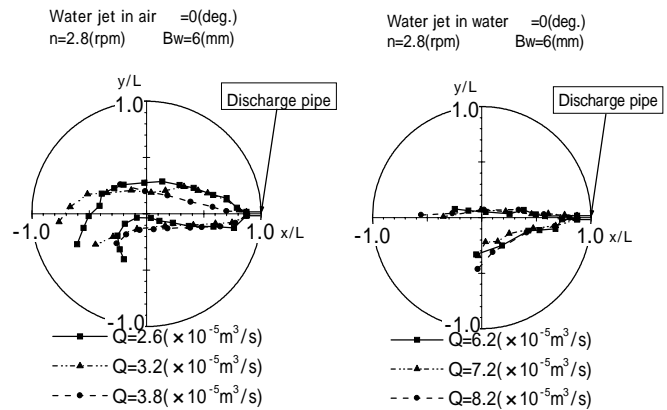


図2 噴流の広がり

Water jet in air  $ds=4(\text{mm})$   
 $=10(\text{deg.})$   $Bw=3(\text{mm})$   
 $n=2.1(\text{rpm})$   $Q=3.8(\times 10^{-5}\text{m}^3/\text{s})$

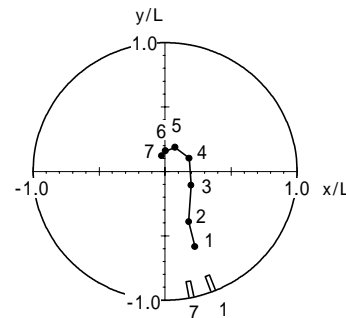


図3 掘削粒子の移動軌跡

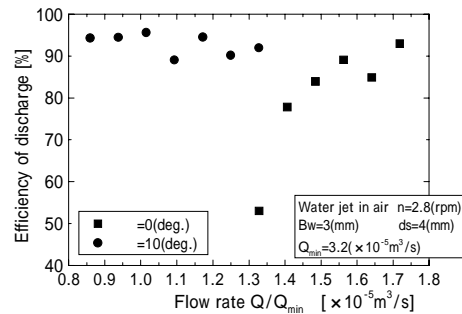
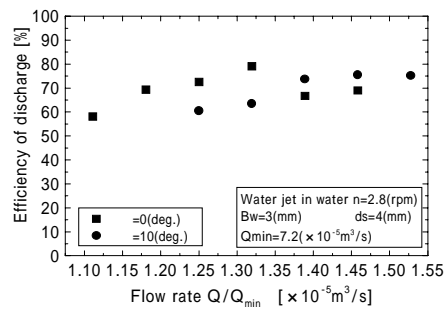


図4 排泥効率(上：液中液噴流，下：気中液噴流)