

泥土圧式シールド工法における高水圧下での スクリーコンベヤの山留め・止水効果に関する研究

STUDY ON LANDSLIDE PROTECTION AND WATER-PRESSURE REDUCTION EFFECTS OF A SCREW
CONVEYOR UNDER A HIGH WATER PRESSURE IN THE MUD PRESSURIZATION SHIELD METHOD

和久昭正*・宮澤秀治**・吉野広司***・和気輝幸****

Akimasa WAKU, Hideharu MIYAZAWA, Hiroshi YOSHINO and Teruyuki WAKI

In order that the mud pressurization shield method be made adaptable to the construction of a tunnel with a large cross section at a great depth, the elucidation of a mechanism to stabilize the facing being excavated would be an important task. In this regard, we performed the experiment of discharging excavated material by using the sand plug method under a high water pressure, and through which, the elements required in the landslide protection and water seepage were investigated. As a consequence, the following could be clarified: (1) Plug-zone lengths, screw rpm, gate is open, and soil nature largely affect the task of providing steady landslide protection to be performed using a screw conveyor. (2) Changing Plug-zone lengths according to the intensity of water pressure and the nature of soil was effective for the protection of landslide if occurring under a high water pressure.

Keywords: Shield method, Screw conveyor, Sand plug, Landslide protection, Water seepage

1. はじめに

近年、都市における地下空間の合理的な利用に対する技術開発が推進されており、その一環として、シールドトンネル工法は、大深度・大断面の地下空間建設技術の代表工法として位置づけられている。シールド工法のうち、泥土圧式シールド工法は、切羽の土圧および水圧に対抗するために、掘削土に一定の圧力を与えることで切羽の安定を図りながら掘進する工法である。そのシステム構成としては、掘削推進機構、切羽安定機構、添加材注入機構、混練機構、排土機構等からなる。掘進には、これら各機構の安定した相互バランスの確立が成されなければならないと考えられている。泥土圧シールド工法において、大深度・大断面シールドトンネル施工を目指した場合、掘進における切羽の安定機構の解明が重要な課題となる。すなわち、スクリーコンベヤ（以下、SCとする）による排土機構においては、チャンバー内の掘削土砂の充満状態を保持するべく、止水と山留め機能が重要な技術として必要となる。そこで、本報告は、高水圧下の条件に

* 正会員 ㈱フジタ 技術研究所 生産技術研究部

** 正会員 ㈱フジタ 技術研究所 生産技術研究部

*** 正会員 ㈱フジタ 技術研究所 生産技術研究部

**** ㈱フジタ 土木本部 技術部

対して、施工能率の良いプラグゾーン方式を用いたSCの排土実験を実施し、SCの山留めおよび止水機構の各要素と土水圧の圧力減衰状況および排土状況を計測・観察した。その結果、高水圧に対抗できるSC内の各種要因を解明し、安定した排土機構について考察するものである。

2. 実験装置の構成

泥土圧式シールド工法における高水圧下でのSC内の排土状況を観測するために、実大模型実験装置を設置し、実験を行った。実験装置は、チャンバー（モデル土槽）、SC設備、駆動装置、制御機器から構成され、図-1に実験装置全体の概念を示す。SCの長さは10m、口径は0.3mである。スクリーンの終端に設けたプラグゾーン（以下、PZとする）の長さは、80cm (L_1)、120cm (L_2) および250cm (L_3) の3種類とした。チャンバーは、内径1.8m、有効排土量 7.5m^3 である。SC内を移動する土水圧の圧力変化の計測には、土圧計と間隙水圧計をスクリー軸方向に1m間隔で各10測点配置した。写真-1に、SCのセンサー装着状況を示す。また、チャンバー内にも各3点配置した。SCの駆動装置は、幅広い実験パラメータに対応できるように最大トルク $6,180\text{kg}\cdot\text{m}$ の大容量とした。スクリーンの回転数とゲートの開閉操作は、任意に設定でき、また変更ができるものとした。

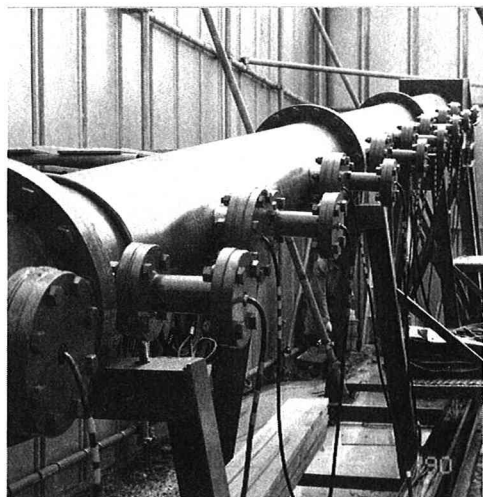


写真-1 SCのセンサー装着状況

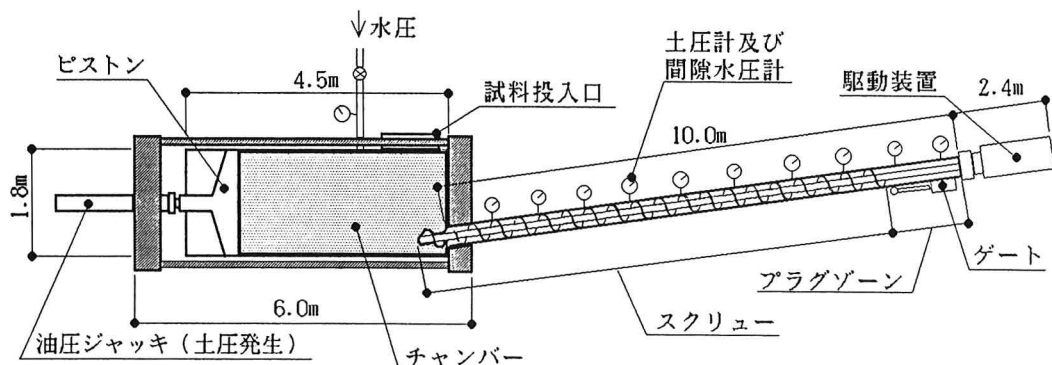


図-1 実験装置概念図

3. 実験方法

実験パラメータとして、砂の性質、チャンバー内の土水圧、PZの長さ、スクリー回転数、ゲートの開口率を変化させることにより、SC内で移動する土砂の圧力変化の状況を計測した。実験に用いた試料は、浜岡産砂（以下、A砂とする）と富士川産砂（以下、B砂とする）の2種類である。各試料の土性値を表-1に示す。また、チャンバー内の設定水圧は5、6、7、8、9、 $10\text{kgf}/\text{cm}^2$ の6種類、スクリー回転数は8、10、12、15rpmの4種類とした。ゲートの開口率は任意に設定でき、形成されるPZの強さを調節して山留め力の調整を行った。以上、実験条件の一覧を表-2に示す。

表－１ 試料の土性値

試料名	密度 ρ_s (g/cm ³)	平均粒径 D_{50} (mm)	均等係数 U_c	透水係数 k (cm/s)
浜岡砂	2.66	0.246	2.03	5.03×10^{-3}
富士川砂	2.70	0.990	8.53	6.20×10^{-3}

表－２ 実験条件一覧

①土質	A砂（浜岡砂） B砂（富士川砂）
②PZの長さ (cm)	$L_1=80, L_2=120,$ $L_3=250$
③チャンバーの水圧 (kgf/cm ²)	5, 6, 7, 8, 9, 10
④スクリー 回転数 (rpm)	8, 10, 12, 15
⑤ゲート 開口率 (%)	1～20

４．実験状況

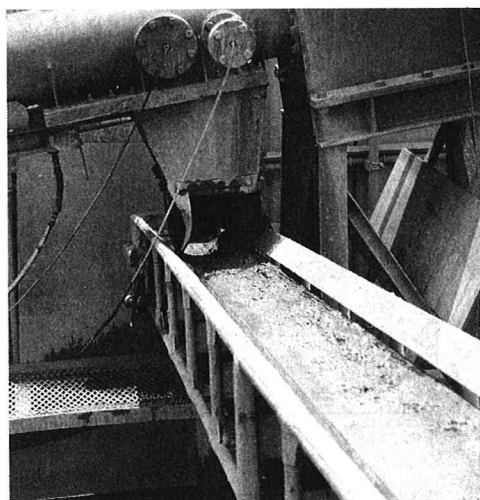
実験状況を大別すると、S C内の土水圧および水圧の変動状況より、安定時と不安定時に分けることができる。

４・１ 安定時の排土状況

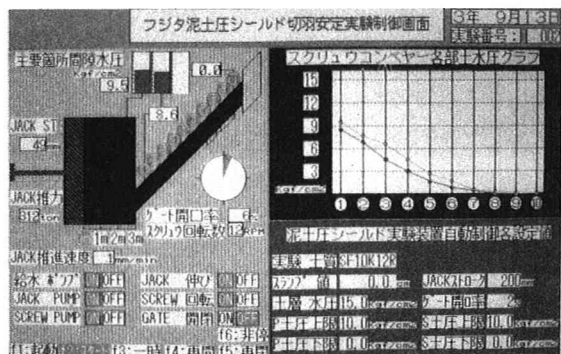
写真－２に、A砂における安定時のゲート部の排土状況を示した。また、写真－３に、その時の制御画面上に示されるS C内の土水圧および水圧の低減状況を示す。安定時には、S C内の土水圧と水圧は、チャンバー内での圧力がS C内を通過するに従って低減し、ゲート部において大気圧 (0kgf/cm²) になっている。

４・２ 不安定時の排土状況

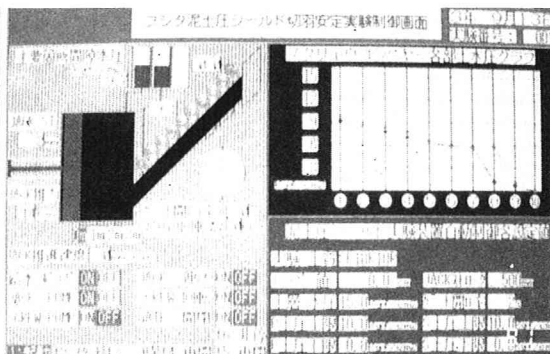
写真－４に、A砂における不安定時の制御画面上に示されるS C内の土水圧および水圧の低減状況を示す。不安定時には、S C内の土水圧と水圧は、チャンバー内での圧力がS C内を通過しても低減が少なく、P Z間際もしくは、P Z内における土圧の発生による山留め力で低減される。これより、S C内の土砂が締め固められて水圧が減少し、急激にゲート排土出口において大気圧 (0kgf/cm²) になっている。



写真－２ 安定時のゲート排土状況



写真－３ A砂における安定時実験制御状況



写真－４ A砂における不安定時実験制御状況

5. 実験結果

実験より得たSC内の土水圧および水圧の安定時の排土状況を整理し、各影響因子について検討した。

5.1 プラグゾーン長さの影響

図-2にA砂・水圧 9kgf/cm^2 、図-3にA砂・水圧 10kgf/cm^2 、図-4にB砂・水圧 9kgf/cm^2 、図-5にB砂・水圧 10kgf/cm^2 によるスクリー回転数 10rpm でのPZの長さの違いによるSC内の土水圧および水圧の減少状態の代表例を示した。実験全体を通して、PZ-L₃は各水圧においても、SC内の水圧がS1からS10の間で漸次低減している傾向を示した。しかし、PZ-L₂ではスクリー部分における水圧の減少は少なく、PZ-L₃の様に安定した排土をすることは難しくなる。その圧力低減状況は、両者の土水圧および水圧の変化として明確に計測することができた。これは、A砂、B砂とも同様である。また、SC内の発生土圧（土水圧-水圧）を見ると、PZ-L₃はPZ-L₂に比較して、SC内全体を通して平均して発生している。すなわち、PZ-L₃はSC内で砂を万遍なく締め固めて移動させることができているといえる。ちなみに、今回、PZの長さL₁ではA砂、B砂共に、PZの効果が十分ではなく安定した排土は得られなかった。榎本ら¹⁾によれば、高水圧対抗シールド工法の開発を行い、PZの長さはできるだけ長いほうがPZの信頼性は向上すると想定している。また、PZの長さは排土効率に及ぼす影響は少ないとしている。本研究においても、同様にPZの長さによる影響は、長いほうが明らかに排土状態が安定することを確かめることができ、高水圧に対するPZの有効性が得られた。

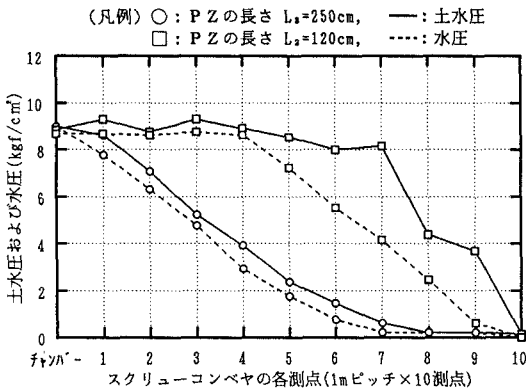


図-2 PZ長の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件: A砂, 水圧 9kgf/cm^2 〕
スクリー回転数 10rpm

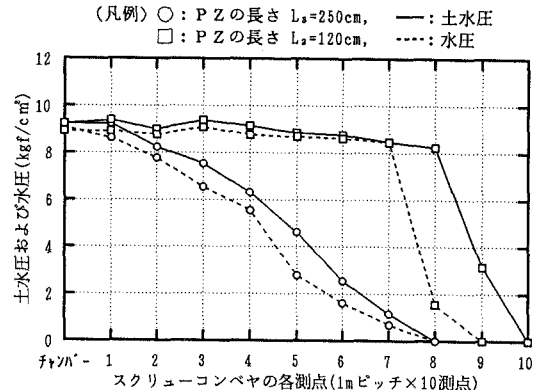


図-4 PZ長の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件: B砂, 水圧 9kgf/cm^2 〕
スクリー回転数 10rpm

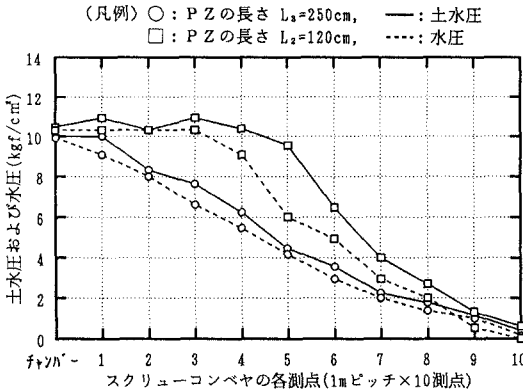


図-3 PZ長の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件: A砂, 水圧 10kgf/cm^2 〕
スクリー回転数 10rpm

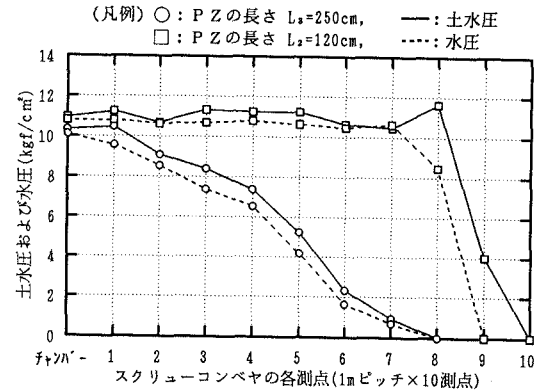


図-5 PZ長の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件: B砂, 水圧 10kgf/cm^2 〕
スクリー回転数 10rpm

5・2 スクリュー回転数による影響

大断面シールドの掘進を想定すると、従来の排土量に対して、多くの土量を制御・管理しなければならない。すなわち、掘削土量に見合ったSCの排土機構制御がより重要となる。そこで、スクリーウの回転数の変化によったSC内での土水圧および水圧の低減状態について検討した。実験でのスクリーウ回転数は、実施工において実情行なわれている平均的な回転数10rpmを目安として、8rpmから15rpmと変化させて計測した。図-6に水圧5kgf/cm²、図-7に水圧8kgf/cm²、図-8に水圧9kgf/cm²、図-9に水圧10kgf/cm²によるB砂、PZの長さがL_sでのスクリーウ回転数の違いによる圧力線図の代表例を示す。これより、スクリーウの回転数が8rpmから15rpmと速くなるにつれてS1からS3附近、すなわち、スクリーウ呑み込み口近くでの土水圧および水圧の低減が少なくなる様子が分かる。これは、回転数が速くなるにつれて、チャンバー内の圧力はS10の方向へ波及する現象となり、スクリーウの速い回転による排土は、不安定時の排土状況へと移行する傾向と考えられる。すなわち、この状態は実施工においての切羽水圧をゲート出口に招き、SCでの噴発トラブルの原因となると想定できる。樹本ら¹⁾によれば、スクリーウ回転数による影響は加圧力が高くなるにつれて増大する傾向が認められるが、その割合は小さいとしている。本研究においては、チャンバー内水圧と回転数との間に有為な関係は見られなかったが、いずれの水圧においても回転数の影響が排土状態に関係していることを確かめることができた。

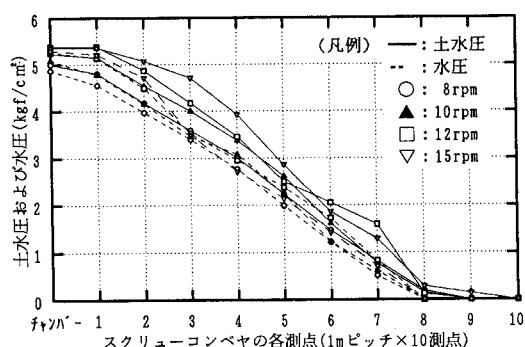


図-6 スクリュー回転数の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件：B砂，水圧 5kgf/cm²〕
PZの長さL_s=250cm

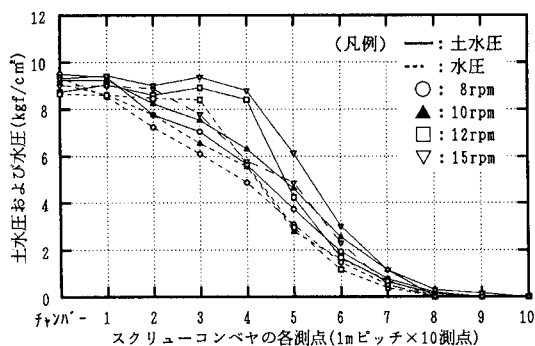


図-8 スクリュー回転数の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件：B砂，水圧 9kgf/cm²〕
PZの長さL_s=250cm

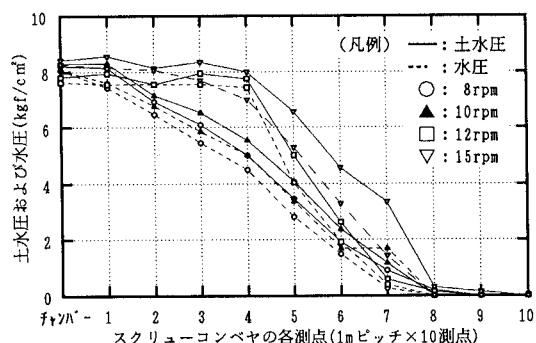


図-7 スクリュー回転数の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件：B砂，水圧 8kgf/cm²〕
PZの長さL_s=250cm

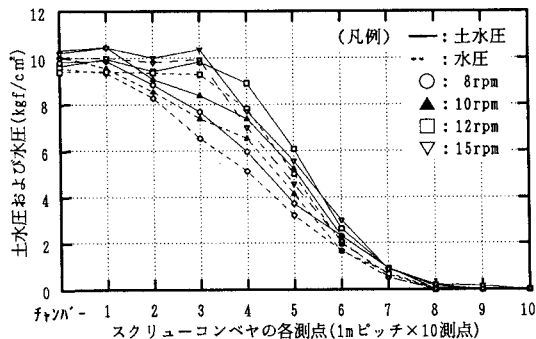


図-9 スクリュー回転数の違いによる土水圧及び水圧線図
〔実験条件：B砂，水圧 10kgf/cm²〕
PZの長さL_s=250cm

5・3 土質の違いによる影響

泥土圧式シールド工法の切羽を代表とする土質による排土機構の影響は大きく、土質の変化に順応できる安定排土に対して重要な対策が必要である。実験結果より、図-10に、実験に供したA砂とB砂の発生土圧の合計値(10測点)、スクリュー回転駆動トルクとゲート開口率の経過時間による変化状況の代表例を示す。これより、B砂はスクリュー駆動トルクが安定しており、土圧はそれに伴ってほぼ一定して発生した。また、A砂はスクリューおよびPZ長が山留めに十分ではなく、ゲートを閉めぎみにし、PZとスクリュー駆動トルクにより、土圧を強制的に発生させて補う状態となる。このように、両者の土質性状の違いにより、ゲート開口率とスクリュー駆動トルクの制御に応じて、土圧の発生の違いが見られる。これは、土砂がSC内を移動する際の塑性流動において、土砂の粒度分布が複雑に関係していると考えられる。特に、本結果による相違は、土の粒径と均等係数によるものと考察される。よって、土質の違いはSC内の山留め効果に差があり、排土機構の制御に影響する要素である。

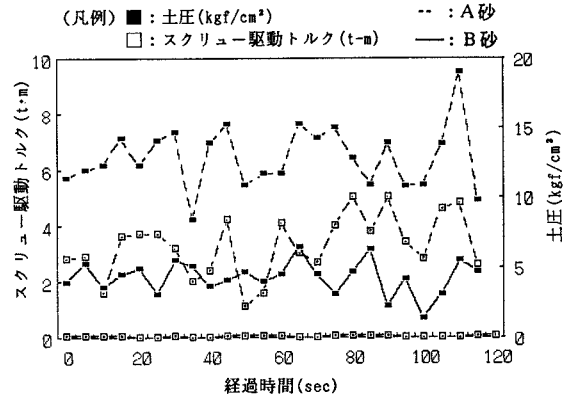


図-10 土質の違いによる土圧、トルクと経過時間の関係

〔実験条件：水圧10kgf/cm²、PZ長L_s=250cm
スクリュー回転数 8rpm〕

6. まとめ

泥土圧式シールド工法による大深度・大断面シールドの実績は、現在、径10mクラスの施工が国内で実施されようとしている状況である。泥水式シールド工法に比べると大深度・大断面の施工実績面において一歩遅れていることは否めないが、システム構成の内容を改善・改良することにより、今後、更に発展していく工法であると考えられる。その為には、高水圧条件下の地盤に対する切羽安定機構の解明と技術の定着が不可欠である。今回の実験により、高水圧におけるSCの山留めには、PZの長さ、スクリューの回転数、土質の種類が関係することを定性的に確認することができた。特に、PZの長さは、SCの山留め効果に大きく影響し、PZの長さによる効果は、高水圧下におけるSCの山留め作用に対して、有効であることが分かった。

7. おわりに

今後は、PZを中心としたSCの各要素の相関々係を定量的に把握すべく、実施工に対する最適な切羽の安定機構の解明実験を行っていく予定である。なを、本研究は「地下空間の利用技術の開発」(建設省総合技術プロジェクト)の中の「大深度・大断面シールドトンネルの設計・施工技術」に関する共同研究の一環として実施したものである。

8. 参考文献

- 1) 榎本・馬場ら：高水圧対抗シールド工法の開発(第2報)，奥村組技術研究年報，No12, 1986.