

トンネル工事における高吸水性樹脂利用に関する実験的研究

羽生田 吉也 藤原 紀夫 山下 功
太田 正志 田中 俊次
(本社 矢切工事事務所) (本社 機械部)

Experimental Study on Utilization of High Absorbent Polymer for Tunnelling

Yoshinari Hanyuda Toshio Fujiwara Isao Yamashita
Masashi Ohta Shunji Tanaka

Abstract

A high absorbent polymer is a white powder and absorbs water several hundred times of its weight, and changes to be a gel. Thinking that this characteristic, the ability of the gel to cut off water, and the fluidity might be applicable in tunnel construction, the authors investigated its possibilities through basic tests and experiments using models.

As a result, it was clarified that the gel or gel-mixed soil can be used as grouting material for backfilling around pushing pipes, and that coarse sand can be pumped when mixed with this gel, while the powder is effective for improvement of muddy soil. The powder injected into the pressure chamber of an earth shield tunnelling machine while advancing might be capable of improving the excavated soil in the chamber, being especially effective when tunnelling through sand-gravel layers.

概 要

高吸水性樹脂は、通常、白色の粉末で、自重の数百倍の水を吸収してゲルに変化する。この性質とゲルの止水性および流動性をトンネル工事に应用できないか、その可能性について基礎的な試験、模型実験などを行なって検討した。

この結果、ゲルあるいはゲル混合土を推進工事の裏込注入材として利用できること、ゲルを添加材として川砂をポンプ圧送できること、また粉末を添加して泥土状の掘削土の取扱いを容易にできることなどが明らかとなった。さらに、土圧系シールドの模型実験から、粉末を土圧室内に吹き込んで同室内の止水性と流動性を改善しながら掘進でき、特に滞水砂レキ層の施工に有力であろうと推察された。

1. まえがき

高吸水性樹脂は吸水性能に優れ、人体への安全性も高いことから、紙おむつや生理用ナプキンに使用されてきた。土木工事には、泥水シールドや連続地中壁の掘削において、砂レキ地盤への逸泥防止材として適用された例がある。

筆者らは、“アラソープ”（商品名）と呼ばれる高吸水性樹脂を使った簡単な試験結果から、トンネル工事において、多くの利用方法があるものと考えた。

そこで、幾つかの室内試験を行なってアラソープの基本的な物理性状を調べ、次に模型実験などを通して高吸水性樹脂の具体的な利用方法について検討した。

2. 高吸水性樹脂“アラソープ”の基本的物性

2.1. アラソープの粉末とゲル

アラソープは、石油などを原料として製造され、通常白色の粉末状を呈する。その粒度は製造過程で調整できるが、見かけ比重は概ね0.5である。粉末は自重の数百倍の水を吸収してゲル化する。

この吸水性能は高分子の架橋構造に由来するもので、脱水作用を受けると、ゲルは固体状になる。また、ゲルに食塩や塩化カルシウムなどの塩を加えると速やかに脱水し、紫外線やアルカリの作用によっても架橋構造を破壊して、ゲルが分解する。

これらの関係を図-1に示した。また、同図より、ア

アラソープの利用方法とは、水分あるいは土質性状との関係から、粉末あるいはゲルを目的に応じて使い分けられることとも言える。すなわち、粉末は脱水・固化を、ゲルは潤滑、止水効果を目的として用いる。また、吸水能力をかなり残存する高濃度ゲルのように、粉末とゲルとの中間的な性状のものもあり、適時、これらを選択していくことになる。

2.2. 吸水性能

2.2.1. 粉末の吸水性 粉末の吸水性能を表わすのに吸水能（吸水倍率とも称する）がある。一定重量の粉末を1,200倍の重量の蒸留水に加え、定時間 t_0 放置する。その後、これを200メッシュの振動ふるいにかけて水とゲルを分級する。これより、吸水能は次式で求められる。

$$\text{（吸水能）} = \frac{\text{（加えた蒸留水重量）} - \text{（分級された水の重量）}}{\text{（粉末重量）}}$$

図-2に吸水の時間 t_0 と吸水能との関係を示す。 $t_0 = 30 \text{ min}$ の場合の吸水能は、850~900倍となる。また、蒸留水に替え、pH6.4の井戸水を使って上式に準じて求めた吸水能は、420倍で、蒸留水を用いた場合の半分となった。

一般に、粉末に吸水させてゲルを作成するには、粉末を水へ徐々に加え、攪拌しながら行なう。2~3minでゲルができるが、均一に加えないと粉末の周囲に不透水層が形成され、いわゆる“ダマ”ができて、吸水速度が低下するため注意を要する。

2.2.2. 高濃度ゲルの吸水性 粉末に加える水との重量比をパーセント表示した値をゲル濃度とする。

加える水のpH値によるが、ゲル濃度0.5~1.0%以上のもので、吸水能力をかなり残存するものを高濃度ゲルとする。ゲル濃度1%のものを蒸留水で作成して、1,000mlのメスシリンダの3本それぞれに100mlを入れ、その上部へ各900mlの蒸留水、地下水、1%濃度の食塩水を静かに注ぎ込み、ゲルの吸水・膨潤による界面高を観察すると、図-3のごとくなる。

高濃度ゲルが攪拌なしにかつ限定された面積を界して吸水するには、長時間を要すること、地下水では吸水速度が遅くなること、食塩水1%濃度に対して全く膨潤が進まないことが分かる。

2.3. ゲルの粘性

2.3.1. ゲルの粘度 常温におけるゲルの粘度をゲル濃度との関係で図-4に示す。0.2%のゲルは、ほぼ常温におけるグリセリンの粘度と同程度である。また、ファンネル粘度計では、ゲル濃度0.2, 0.5%においてそれぞれ90sec, 2,000secであった。

なお、この際のゲルの比重は、ゲル濃度0.2, 0.3, 1.0%に対してそれぞれ、0.999, 0.988, 0.983であった。

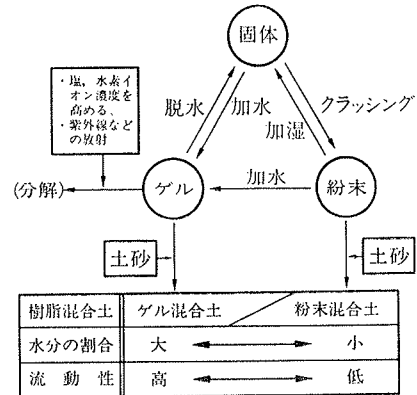


図-1 アラソープの形態と利用方法の模式

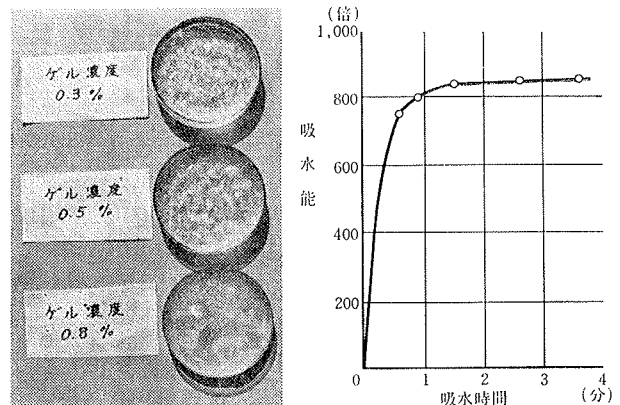


写真-1 アラソープゲル

図-2 粉末の吸水能

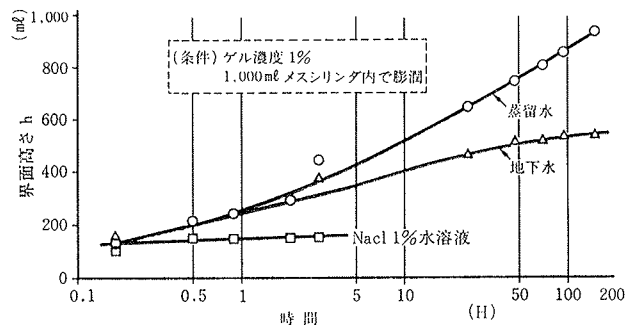


図-3 高濃度ゲルの吸水による膨潤

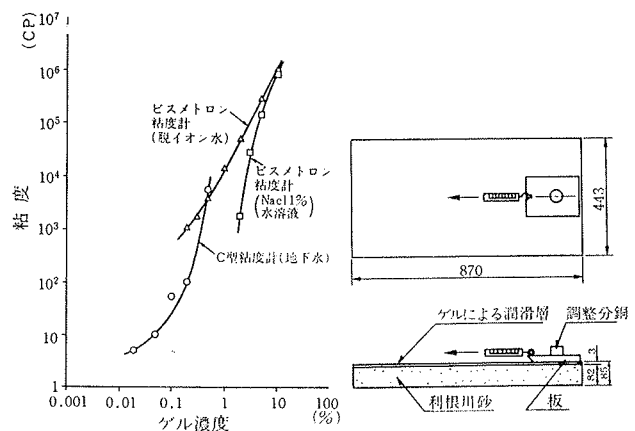


図-4 ゲルの粘度

図-5 ゲル潤滑性に対する試験装置

2.3.2. 潤滑性能 図-5に示す装置に、含水比 $w \approx 20\%$ に調整した利根川砂をタンピンダして詰めた後、上部に 3 mm 厚のゲルの層を形成し、コンクリート板および鋼板を 20 cm/min の速度で牽引した。この際の牽引力から運動摩擦係数 μ を算出すると図-6のごとくなり、ゲルの潤滑性をみることができる。この実験では、接地圧 0.01 kgf/cm^2 一定となるよう分銅で板の重量を調節した。

ゲル層 3 mm の介在によって、潤滑性が上がり、ゲル濃度 0.3~0.5% の場合で、摩擦は $1/5 \sim 1/10$ になった。

3. 樹脂混合土の物性

高吸水性樹脂の粉末ないしゲルを土砂に混合したものを、それぞれ粉末混合土、ゲル混合土とし、これらを総称して樹脂混合土とする。粉末混合土とゲル混合土とは水分、流動性などの物理性状、および用途が異なるので区分して扱う。なお、ゲル混合比、粉末混合比は、加えたゲルないし粉末の重量と土砂の重量との比をパーセントで表示したものである。

3.1. ゲル混合土の比重量とスランプ値

利根川砂にゲルを添加して、ミキサで十分に混合、攪拌したゲル混合土について、図-7、図-8 にそれぞれ比重量とスランプ値を示す。

利根川砂の締固め特性における最適含水比 $w_{opt} \approx 19\%$ ($\rho_{dmax} = 1.723$) であるが、これに近いゲル混合比 20~30% 付近で比重量は最大となり、スランプ値も急激に変化する。0.5% 濃度のゲルを混合比 15% 加えた場合では、ゲルが砂を成形するように作用した。

3.2. 粉末混合土のスランプ値とコーン支持力 q_c

関東ローム ($w = 137\%$) を練ってスランプ 21.6 cm と流動性を上げた後、粉末を添加してさらに練った粉末混合土について、スランプとコーンペネトロメータ貫入試験を行ない、この結果を図-9 に表わす。

3.3. ゲルおよびゲル混合土の保水性

モールド径 25 cm ϕ をもつ再圧密装置(写真-2 参照)にゲルを入れて、 0.5 kgf/cm^2 の载荷をし、ゲルの保水状態を調べた(図-10参照)。

利根川砂とゲルとを混ぜて 1 分間ミキサで練った後に自然放置して、表面に浸出してくる水を採取すると図-11のようになった。ここで、(水の吐き出し量) = (表面から採取した水の量) / (ゲル作成に使用した水の量) である。

3.4. ゲル混合土の潤滑性

利根川砂のゲル混合土を作り、図-5の装置内に層厚 3, 10 mm の潤滑層を形成し、前述の方法に準じて潤滑性に関する実験を行なった。ゲル濃度 0.8% のものを混合比 50% で作成した混合土では、10 mm 厚で層を形成

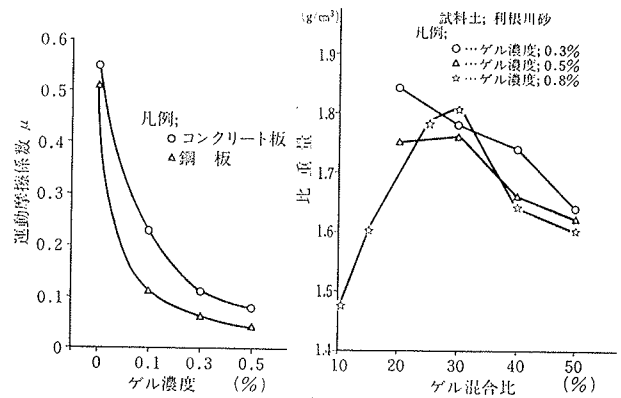


図-6 ゲル潤滑特性 図-7 ゲル混合土の比重

記号	試料土名	粒度組成(%)				比重Gs	自然含水比 w_n (%)
		レキ分	砂分	シルト分	粘土分以下		
A	利根川砂	6	86	8	0	2.75	8.7
B	関東ローム	0	11	49	40	2.84	117
C	現場発生土	0	43	33	24	2.67	38.6
D	川砂	25	74	1	0	2.65	3.7

表-1 実験に用いた試料土の土質性状

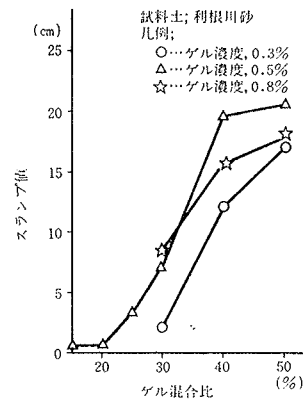


図-8 ゲル混合土のスランプ値



写真-2 ゲル混合土の保水性試験装置

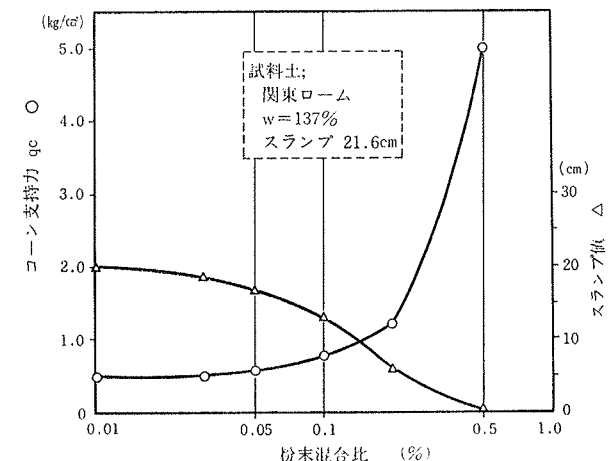


図-9 粉末混合土のコーン支持力とスランプ値

すると、運動摩擦係数が、コンクリート板および鋼板について、それぞれ 0.3, 0.2 であった。また、ゲル分が 50% 以下になると、潤滑効果はみられなかった。

4. トンネル工事に応用のための諸実験

4.1. ゲルを使った川砂のポンプ圧送実験

4.1.1. 実験方法 表-1 の D の性状をもつ川砂についてゲル混合土を作成し、図-12 の水平配管 (2B×150 m) 内を、スクイズポンプ PC-05-20M により圧送した。

ゲル混合土の作成方法は、自然乾燥した川砂にアラソープ粉末を加えて空練りした後、水を加えて 2~3 min 間強制練ミキサ (YG-500) で混合、攪拌する。

4.1.2. 実験結果 ゲル混合土の圧送直前に実施した清水のポンプ圧送結果と合わせて図-13 に示す。

ゲル混合比 40, 50% の 2 種類を設定した結果、2 つとも上記の条件で輸送可能であったが、用いたポンプでは、15 kgf/cm² を使用圧力の上限としていることから、ゲル混合比 50% 以上、スランプ 27~28 cm 以上のゲル混合土であれば余裕をもって圧送できた。また、流量は、清水をポンプ圧送した場合と、ほとんど変らなかった。

4.2. 推進工事の同時裏込注入材としての適性実験

4.2.1. 薬注地盤に注入後のゲルの挙動 ヒューム管と薬注地盤との間に裏込めされたゲルの変化を調べるために、図-14 に示すような方法で、濃度 1% のゲル層を薬液混合土層と自重 6 kgf のコンクリート板との間にセットした。薬液混合土層は、表-1 の現場発生土に重量比で 40% の薬液を混合したもの 3 種類を用意し、これらと比較のために薬液を混ぜない層も用いた。同図に、結果も合わせて示す。

この結果、ゲル注入の 1 カ月後には、ゲル層厚が 30~35% 程度減少するが、特に薬注地盤に注入したことによる影響は、微少であった。

4.2.2. ヒューム管推進時の滑材性能 高濃度ゲルやゲル混合土が滑材として利用できそうであることを、前に述べたが、ここでは、従来のベントナイトやマッドオイルを主成分とする滑材 (1 m³ の滑材の配合; 250 ムッシュベントナイト 100 kg, マッドオイル 40 l, 水 900 l) とゲルおよびゲル混合土との比較、および経時的な特性を調べるため、図-15 の模型推進実験装置を用いて実験を行なった。同図に示す性状の試料土を土槽内に投入し、ヒューム管周囲に 3 mm 厚の潤滑層を形成したものをセットして覆工する。さらに、200 kgf の上載荷重を各ヒューム管に作用する。そして、定期的に約 20 cm/min の速度で、各ヒューム管を押して、この際の推力を自動測定し、図-16 にまとめた。

1 箇月間の測定結果から、ゲルおよびゲル混合土の滑

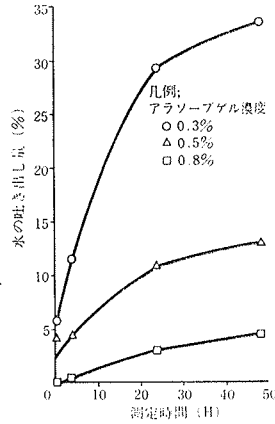


図-10 ゲルの保水性

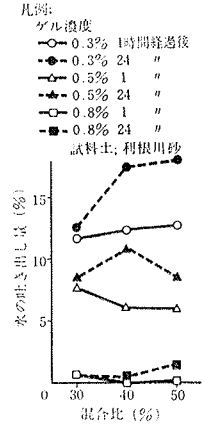


図-11 ゲル混合土の保水性

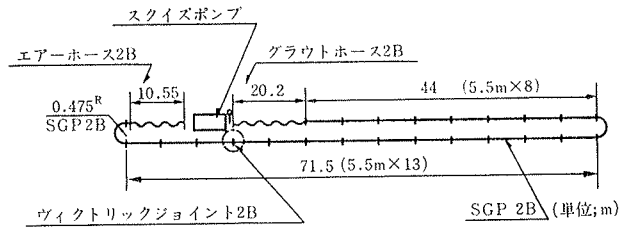


図-12 ゲル混合土のポンプ圧送実験用配管平面図

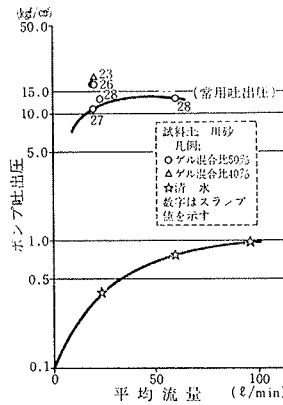


図-13 ポンプ圧送結果

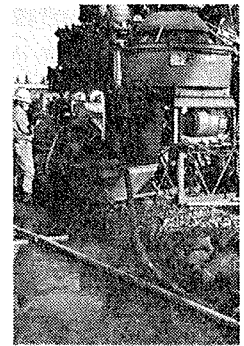


写真-3 ポンプ圧送実験

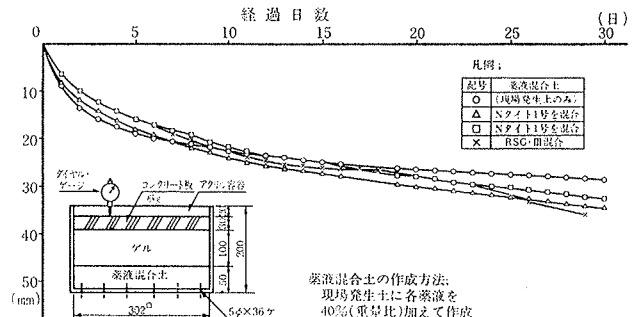


図-14 薬注地盤へのゲル注入模型実験と結果

材性能は、従来の滑材の2倍程度はあり、少なくとも1箇月間は持続できることが分かった。

4.3. 土圧系シールドへの作泥土材としての適性実験

滞水砂レキ層に掘進する場合、土圧室にアラソープ粉末を圧縮空気流に乗せて注入して、同室内で水を吸収したゲルを掘削土と混合することにより止水性と適度な流動性を与えて行なう方法を考え、これを具体化するために、図-17の模型シールド装置を使って実験をした。

試料土には川砂とレキ 10~15 mm を用いた。予め、各土砂についてスクリュコンベアからの排土量を調べて、粉末混合比で0.2~0.5%のアラソープが供給できるよう空気量を調整して送り込む。地下水の条件は、水をホップより越流させ、最大 0.1 kgf/cm² 程度の水頭をホップ内で作用させた。スクリュコンベア排土口からの水量および排土のスランプ値について調査した結果を表-2に示した。

模型を使った実験から、粉末混合比で0.5%のアラソープの注入によって、土圧室内の止水性、流動性を高めることができた。また、注入後の混合が効率良く行なわれれば、0.2%程度の混合比でも適用できるものと思われる。

4.4. 土砂ピット内の泥土の固化と推進工事への適用

横浜市内の某シールド現場では、二次覆工後の坑内清掃および地下水の湧出による水が土砂ピットに流入してヘドロ状をきたした。まず、ポンプにより上水を排出後、0.1%重量比で粉末を加えてクラムシェルで泥土と混合した。約 30 min 後には、泥土は固化し、クラムシェルによる土砂搬出が容易となった。

同じ現場で、外径 960 φ のヒューム管の手掘り推進工事において、ゲル濃度 1% のものを裏込め注入に試用した。区間延長は、16.2 m と短く、注入ホース 1½B×35 m で、注入圧 3.5~4.0 kgf/cm² によって、のべ 110 l のゲルを推進と同時に裏込め注入した。この際のジャッキ推力は、最大 6.5 tf であった。

5. あとがき

高吸水性樹脂アラソープについて、粉末、ゲルおよび樹脂混合土の物性を試験し、トンネル工事に応用するための諸実験を行なった。

この結果、粉末は、泥土状の掘削土砂の改良、滞水砂レキ層を掘進の土圧系シールドの止水性および流動性を改善できること、また、ゲルおよびゲル混合土は、同時裏込め注入材として推進工事に使えることなどが分かった。

謝 辞

実験に協力していただいた荒川化学、平和ゴムの各社及び当社の坂村卓司所長に深甚なる感謝の意を表します。

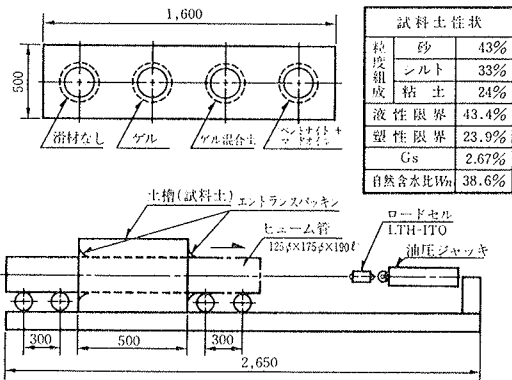


図-15 ヒューム管の推進模型実験装置

砂	43%
シルト	33%
粘土	24%
液性限界	43.4%
塑性限界	23.9%
Gs	2.67%
自然含水比W _n	38.6%

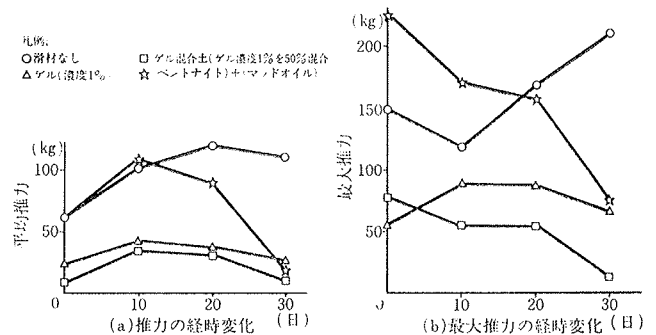


図-16 滑材の種類による所要推力の経時変化

仕 様	
ホップ容量	0.5m ³
スクリュ軸回転数	16.5~10r.p.m
駆動モータ容量	3.7kw×4p
減速機型式	無段変速機D037F4MS10D
スクリュコンベア内径	8φ
本体重量	1200kg

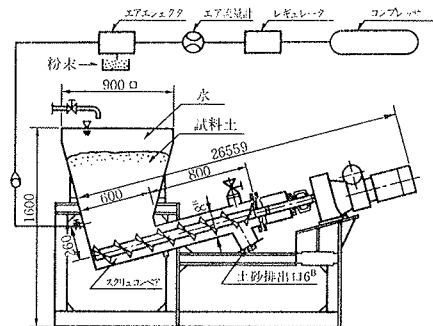


図-17 模型シールド装置

使用アラソープ	砂			レキ(10~15mm)		
	粉末混合比(%)	Q _a /Q ₀ *	スランプ値(cm)	Q _a /Q ₀ *	スランプ値(cm)	
防湿材 添加型	0.2	0.040	14.9	0.062	17.6	
	0.3	0.056	8.4	—	—	
	0.5	0	10.2	0	13.8	
改良型	0.2	0.040	13.5	0.04~1.28	18.0	
	0.3	0.012	10.0	—	—	
	0.5	0.040	2.8	0.003	13.6	

(注) Q_a, Q₀ はアラソープ粉末注入前、後の排土口からの水量

表-2 粉末注入による模型シールドへの効果