

切羽崩壊を生じやすい地盤における泥水式シールド工法の適性泥水性状の実験的研究
AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE OPTIMUM PROPERTIES OF
SUSPENSION FOR SLURRY SHIELD TUNNEL IN GRAVEL GROUND

長谷川昌弘*・藤原雅博**

Masahiro HASEGAWA, Masahiro FUJIWARA

Collapses of tunnel faces are reported to have occurred during tunneling by the slurry shield method in sand beds of a uniform particle size with a low proportion of fine particles and in gravel beds with high permeability. The authors conducted laboratory tests and experiment, assuming tunneling in a high permeability gravel bed, in order to define the optimum properties of suspension for this tunneling method. The tests/experiments included physical property tests on suspension, slurry seepage tests, and slurry trap door experiments.

[key word] slurry shield tunnel, suspension, coarse gravel, stability of excavation face.

1. まえがき

泥水式シールド工法は、加圧した泥水で切羽面を抑えながらカッターフェイスで地山を切削し掘進する密閉型シールド工法で、あり大深度・高水圧下でも安全性の高い工法であるが、透水性の高い砂礫層や細粒分が少なく粒径の均一な砂層では切羽崩壊や地表陥没を生じた例がみられる。

泥水式シールド工法で切羽の安定を確保するためには、つぎの2点についての検討が必要となる。

- ① 切羽面の変形抑止に必要な泥水圧（適性泥水圧）
- ② 泥膜の形成性と止水性が良い泥水性状（適性泥水性状）

本文では、泥水物性試験や透水性の高い砂礫地盤を対象に実施した泥水浸透実験・泥水落とし戸実験などの室内土槽実験結果から、適性泥水物性値の提案を行う。

2. 室内実験用模擬地盤および泥水材料

藤田は、滞水砂礫層と滞水砂層における泥水式シールド工事での切羽崩壊や陥没の事例から、次の3条件を同時に満たす場合には切羽崩壊の危険性があり、補助工法の併用が必要であるとしている。

- ① 切羽水圧が 0.7kgf/cm^2 以上
- ② 粒径 74μ 以下の細粒分含有率が8%以下
- ③ 均等係数 U_c が6以下（砂層の場合）または、透水係数 k が $1 \times 10^{-2}\text{cm/sec}$ （砂礫層の場合）

泥水式シールド、泥水、砂礫地盤、切羽安定

* 正会員 博士（工学） 大阪工業大学 工学部土木工学科

** 正会員 飛鳥建設㈱ 東北支店土木部

そこで実験には細粒分を含まない透水性の高い砂礫層を想定して、図一1に示す1、2の粒度分布を持つ2種類の模擬地盤を選んだ。湿潤密度 γ_t は、いずれも $2.20\text{tf}/\text{m}^3$ 、透水係数 k はそれぞれ $1.5\sim 2\text{cm}/\text{sec}$ 、 $2\sim 3\text{cm}/\text{sec}$ の状態を実験を実施した。なお、模擬地盤の粒度、密度、透水係数などは本実験結果を施工管理の基礎資料として適用する対象工事での立坑掘削時に得られた土質調査結果を参考に設定した。

実施工では、泥水材料は経済性から掘削対象地山中の粘土がおもに使用されており、適宜、これに良好な泥膜形成性をもつベントナイトなどの市販粘土やCMCならびに砂を混入することが行われている。そこで、泥水物性試験に供する泥水材料には、図一1のような粒度分布をもつ地山粘土3種類（1、2、3）と添加砂を用いた。地山粘土1、2はいずれも粒径 0.03mm 以下のシルト分と粘土分を主体とする細かい材料であり、両者の粒径分布は殆ど同じであるが、地山粘土2の方が粒径 0.001mm 以下のコロイド分の含有量が多い。地山粘土1は有楽町層の沖積粘土、地山粘土2は東京層の洪積粘土である。地山粘土3はシルト分を主体とする粒度が比較的粗い沖積粘土である。

3. 実験方法

実験は図一2の順序で実施した。各実験の目的と実験方法などの概要は、次の通りである。

3・1. 泥水物性試験

泥水物性試験は、各泥水材料のレオロジー特性を把握するために行うものであり、泥水比重や砂分添加率田の変化に伴う粘性、ろ過脱水量、分離度を測定した。試験は、アメリカ石油協会規格（API code29）等に準拠して、表一1に示す方法により、泥水比重を $1.05\sim 1.30$ 、砂分添加率を $0\sim 30\%$ に変化させて実施した。

3・2. 泥水浸透実験

シールド機で掘削中の切羽は、ビットにより一定時間毎に常に切削されている。泥水浸透実験は、切削直後における地山（切羽）への泥水の浸透状況や泥膜の形成状況および泥水圧の伝播過程などを観察するために行うもので、内径 480mm 長さ 570mm の亚克力製の土槽部と同径で長さ 200mm の鉄製泥水チャンバ部よりなる円筒形実験装置を用いて、図一3に示すシステムにより実施した。土槽部とチャンバ部との境にはスリット付の面板があり、この開閉と離脱により泥水の模擬地盤への浸透を制御できる構造となっている。泥水圧を 0.2 から $1.0\text{kgf}/\text{cm}^2$ に段階的に昇圧し、泥水の浸透状況を観察すると共に、土槽内の土圧、間隙水圧および模擬地盤からの脱水量を測定した。

3・3. 泥水落し戸実験

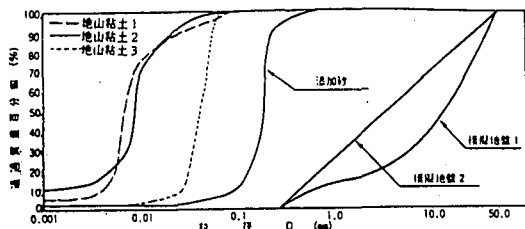
シールド掘進中の切羽面は、天端付近が最も安定性が低いと考えられる。泥水落し戸実験は、特に切羽天端地山の安定状態を検討するために行うものである。浸透実験装置を図一4のように逆さにして、チャンバ内に加圧した泥水を満たした後、スリットを開いて落し戸状態にすることでシールド掘進中の切羽天端付近の地山状況を模擬させ、泥水による山留効果や地盤の崩壊状況を観察した。模擬地盤には、バックプレッシャをかけ $0.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ の間隙水圧を発生させ、泥水圧には土圧+間隙水圧+変動圧 $=0.1+0.5+0.2$ として $0.8\text{kgf}/\text{cm}^2$ を用いた。

4. 実験結果

4・1. 泥水物性試験

(a). 泥水比重と粘性の関係

泥水比重とファンネル粘性の関係は、図一5のようになる。泥水比重が 1.15 以下では、各泥水材料とも両者の関係は略同一であって泥水比重の増加に伴うファンネル粘性の増加は僅かである。泥水比重が 1.15 を越



	模擬地盤		地山粘土			添加砂
	1	2	1	2	3	
粒度	85	60	0	0	0	0
砂分 %	15	40	2	0	1	92
シルト分 %	0	0	82	82	96	6
粘土分 %	0	0	16	18	3	2

図-1 実験模擬地盤と泥水材料の粒度分布

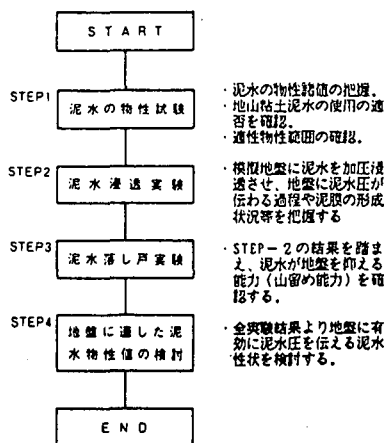


図-2 室内実験のフロー

表-1 泥水物性試験方法

測定項目	試験・測定方法
測定比重	マッドバランス（比重計）のカップに泥水を満たし泥水比重を測定する。
ファンネル粘性	泥水 500ccがファンネル漏斗を流出落下する時間を測定する。
イールドバリュ	回転粘度計で泥水の流動曲線を描き、そのY切片を求める。
APIろ過脱水量	API規格ろ過試験器により 1kgf/cm ² で泥水を30分加圧後の脱水量を測定する。
分離度	1%メスシリンダに泥水を24時間静置した後、うわ水体積を測定する。

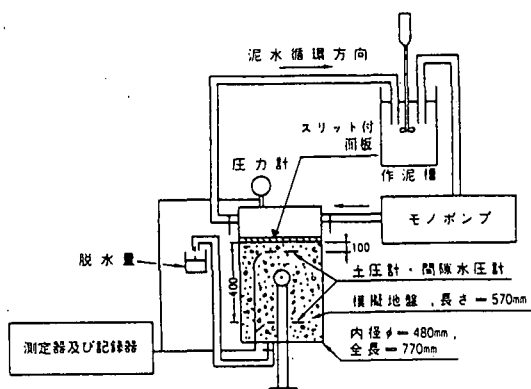


図-3 泥水浸透実験システム

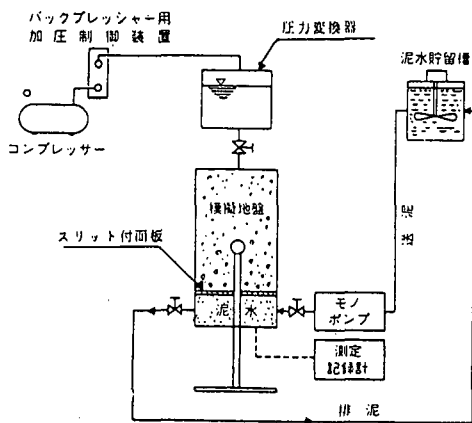


図-4 泥水落し戸実験システム

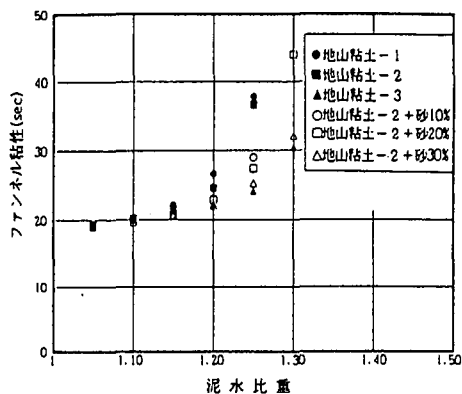


図-5 泥水比重とファンネル粘性の関係

すとファンネル粘性が急激に増加するが、増加の割合は粒度の粗い泥水材料の方が小さくなっている。地山粘土 2 に砂を添加した泥水でも砂添加率が増加するにしたがって同じ泥水比重でもファンネル粘性が低くなる。泥水比重とイールドバリユとの関係を図-6 に示す。泥水比重が 1.10 以下では、イールドバリユは殆ど零であるが、1.15 を越すとイールドバリユが急激に増加し、増加の割合は粒度の粗い泥水材料ほど小さい。地山粘土 2 に砂を添加した泥水でも砂添加量が多くなるほどイールドバリユが小さくなっている。

(b)、泥水比重と API ろ過脱水量との関係

泥膜の止水生が良いほど泥水の脱水量が減少することから API ろ過脱水量は泥膜形成性の指標となると考えられる。図-7 に示すように、各泥水材料とも泥水比重の増加に伴って API ろ過脱水量が減少し、泥膜の止水性が向上する傾向にあるといえるが、粒度の粗い地山粘土 3 のような泥水材料では、泥水比重が 1.30 の高濃度でも泥水中の自由水の殆どが脱水し、止水性の良い泥膜を形成できないと判断できる。

(c)、泥水比重と分離度の関係

泥水の安定性は、静置状態の泥水どれだけ沈降するかで判断できるので分離度は、泥水安定性の指標となる。分離度が小さい泥水ほど安定性が高いといえる。図-8 に泥水比重と分離度の関係を示した。泥水比重の増加に伴い分離度が低くなるが、低下の度合は泥水材料の粒度特性に依存する。粒度の粗い地山粘土 3 のような泥水材料では、沈降しやすいため比重 1.25 でも分離度が 10% 以上になり安定性が悪い、また地山粘土 2 に砂を添加した場合でも分離度が高くなり泥水の安定性が低下することが分かる。

以上の泥水物性試験結果から、シルト分を主体とした粒度の粗い地山粘土 3 は、止水性や安定性が悪く砂礫層地盤を対象にした泥水材料には不適であると判断した。また、洪積砂礫地盤を研究対象としているため、泥水浸透実験と泥水落し戸実験に使用する泥水材料は、洪積粘土である地山粘土 2 とした。

4・2. 泥水浸透実験結果

(a)、地盤への浸透形態

泥水が模擬地盤面に接触するとその浸透状態は図-9 のようにつぎの 3 タイプを呈することが観察された。

タイプ①；泥水が地盤に貫入し泥膜が形成されない。

タイプ②；当初は泥水が地盤に貫入するが、短時間の間にろ過されて地盤表面に泥膜が形成される。

タイプ③；泥膜が殆ど地盤に貫入せず地盤表面でろ過されて泥膜が形成される。

タイプ①では、泥水圧が有効に地盤に伝わらないため切羽の安定確保にはタイプ②③であることが必要である。各実験ケースにおける泥水の浸透形態を表-2 に示す。

(b)、間隙水圧の挙動

模擬地盤中に埋設した泥水チャンバ側の間隙水圧の経時変化は、図-10 のようにつぎの 4 タイプを示した。

タイプ a；泥水圧とほぼ等しくなり降下しない。

タイプ b；一旦上昇し、5～15 秒後に下降し初期状態に戻る。

タイプ c；一旦上昇するが、すぐに（2～4 秒後）下降し初期状態に戻る。

タイプ d；ほとんど上昇せず初期状態を保つ。

ここで初期状態とは、泥水圧をかける前の間隙水圧の値を指す。タイプ a では、泥水圧が地盤の間隙水圧を上昇させ切羽面が不安定となる。タイプ b c d では、泥水のろ過と貫入の度合によって間隙水圧の下降状況がそれぞれ異なっている。タイプ b では、泥膜形成までの時間が長くなるので、切羽の安定を早期に確保するためにはタイプ c d を示す泥水が必要である。各実験ケースでの間隙水圧挙動のタイプをまとめると、表-2 のようになる。なお、タイプ a は清水（比重 1.00）の場合のみであったので同表では割愛した。

(c)、模擬地盤からの脱水量

実験中の模擬地盤からの脱水量は、図-11 のように浸透開始後 30 秒～1 分付近で増加の度合が減少し、約 2 分を過ぎると増加割合はほぼ一定になる。浸透開始当初の脱水量は、泥膜形成のための地盤への貫入とろ過によるもので、泥膜形成後は泥膜でのろ過のみによるものと考えられる。したがって、浸透開始後 0～

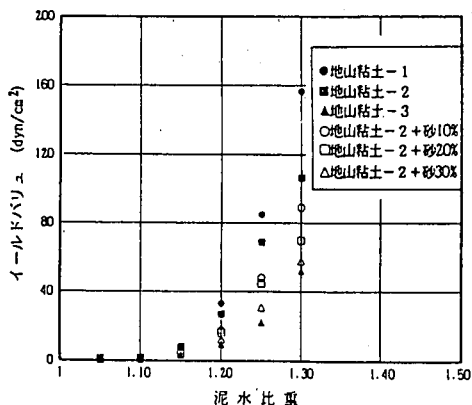


図-6 泥水比重とイールドバリュの関係

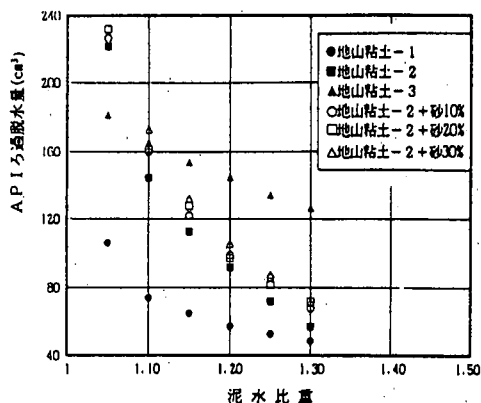


図-7 泥水比重とAPIろ過脱水量の関係

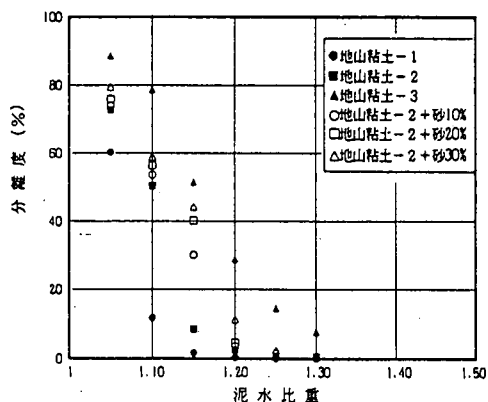


図-8 泥水比重と分離度の関係

表-2 泥水浸透実験・泥水落とし戸実験の結果

	模擬地盤2		模擬地盤1			
砂分添加率%	0	0	10	20	30	
泥水比重						
1.15	③ b II	① b I	① b I	① b I	② d I	
1.20	③ c III	② b II	② b II	② b II	② d II	
1.25	③ c III	② c II	② c II	② c II	② d III	
1.30	---	② c II	② c II	② c II	② d -	

①②③：泥水浸透実験での泥水の浸透形態タイプ

b c d：泥水浸透実験での間隙水圧の径時変化タイプ

I II III：泥水落とし戸実験での地盤の挙動タイプ

(泥水材料には地山粘土2を用いた)

(砂分添加率は泥水への砂分添加率である)

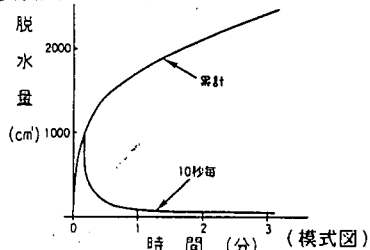


図-11 泥水浸透実験での脱水量の径時変化

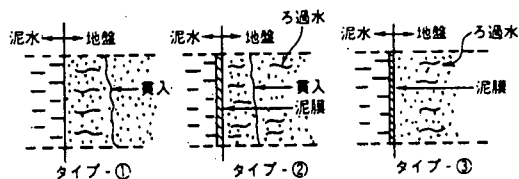


図-9 泥水浸透実験における泥水の浸透形態

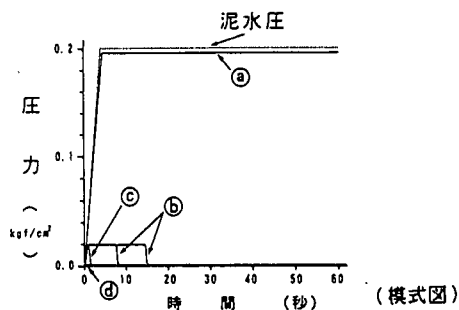


図-10 泥水浸透実験における間隙水圧の挙動

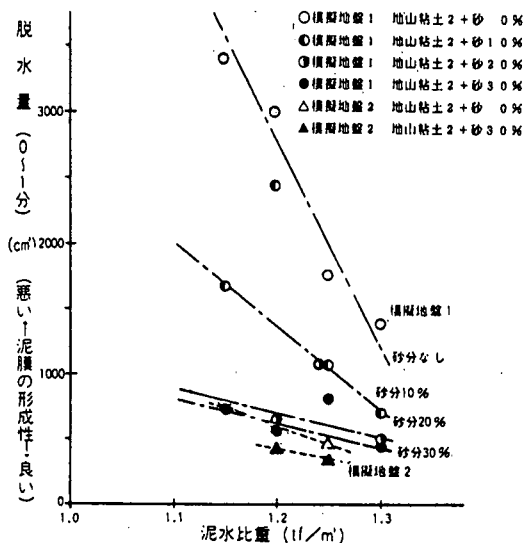


図-12 脱水量(0~1分)と泥水比重の関係
〔泥膜形成性〕

1 分の脱水量で泥膜の形成性を評価し、同じく 2～3 分の脱水量で泥膜の止水性を評価すると、実験結果は、図一12、13 のようにまとめられる。0～1 分の脱水量は、泥水比重が大きくなるほどまた砂分添加率が増すほど少なくなる傾向を示した。砂の添加による目詰め効果により泥膜の形成性が向上し、その傾向は模擬地盤 1 の方が顕著である。2～3 分の脱水量は、泥水比重が大きくなるほど少なくなり泥膜の止水性が良くなる。また、砂の添加により脱水量が増加し、泥膜の止水性が低下することが分かる。

4・3. 泥水落し戸実験結果

面板のスリットを開いて落し戸状態にした後の模擬地盤の挙動は図一14 のように次の 3 タイプを呈した。

タイプⅠ；泥水が地盤へ貫入し、地盤は崩壊する。

タイプⅡ；泥水が浸透実験時よりも多く地盤内へ貫入し、地盤の一部が崩落する。

タイプⅢ；泥水が浸透実験時よりも多く地盤内へ貫入したが、地盤は崩落しない。

切羽天端地山への山留効果を十分に発揮させるためにはタイプⅢであることが必要となる。各実験ケースでの地盤の挙動をまとめると、表一2 のようになる。同表から、地盤を崩落させないためには模擬地盤 1 で泥水比重を 1.25 以上、模擬地盤 2 では 1.20 以上にすることが必要であることがわかる。

5. 実験結果の考察

5・1. 泥水材料の物性評価指標

図一5 の泥水比重とファンネル粘性との関係から、泥水比重が 1.15 以下では泥水比重が粘性評価の指標になるが泥水比重 1.15 を越すと両者の関係は泥水材料の粒度分布や砂分混入量に依存するため泥水比重だけでは泥水材料の粘性を評価できない。一方、ファンネル粘性とイールドバリュウとの関係は、図一15 のようになる。両者の相関性は高く、ファンネル粘性からイールドバリュウを推定できる。図一7、8 によると泥水比重と API ろ過脱水量および分離度の関係も泥水材料の粒度分布などに依存するため、泥水比重だけでは泥膜の止水性や泥水の安定性を評価できない。

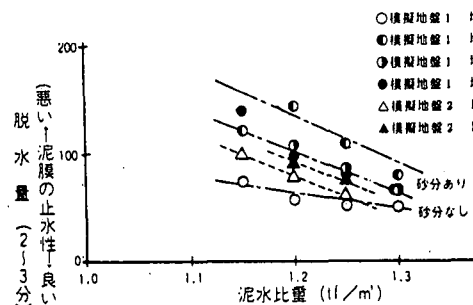
また、ファンネル粘性と API ろ過脱水量および分離度の関係を示すと図一16、17 のようになり、ファンネル粘性が 25sec 以上では API ろ過脱水量や分離度が低下し一定値に落ち着く。

以上の結果からファンネル粘性は、イールドバリュウ、API ろ過脱水量および分離度との間に良い相関関係を有し泥水材料の粒度による影響も小さく測定も容易であることから、泥水比重とともに泥水材料の物性評価指標として適切なものといえる。

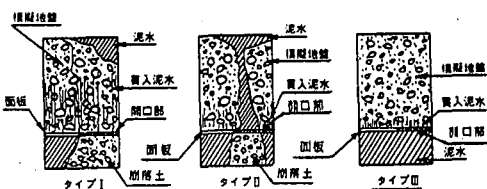
5・2. 泥膜形成性と地盤の関係

泥膜形成性と泥水の API ろ過脱水量との関係を図一18 に示す。なお、泥膜形成性の評価尺度は、4・2 の(3) で述べた方法とする。同図によると、API ろ過脱水量が少ない泥水ほど泥膜の形成性が良くなるが、模擬地盤 1 での両者の関係は、模擬地盤 2 でのそれと大きく異なり API ろ過脱水量が同じ泥水でも泥膜形成性が悪くなっている。また、模擬地盤 1 では泥水に砂分を添加することによって泥膜形成性と API ろ過脱水量の関係が変化し、砂分添加率が 30% では模擬地盤 2 のそれとほぼ等しくなる。これは泥膜の形成過程が地盤の砂分含有状態に依存していることを示唆しており、細砂含有率 10% 程度を境として泥膜形成過程が変化するものと考えられる。細砂分が少ない模擬地盤 1 では、地盤表面の間隙が大きいいため加圧当初に泥水がある程度地盤へ貫入し、地盤表面の間隙が大きい間隙を泥水中の固形分が埋めた後に泥膜が成長するに対し、模擬地盤 2 では地盤表面の間隙が小さいので泥水が地盤に接触しても僅かに貫入するのみで、すぐに泥膜が形成される。また、模擬地盤 1 のような砂分の少ない砂礫地盤でも泥水に砂分を適量補うことによって地盤表面の間隙への「目詰め効果」が生じて泥膜の形成性を改善できることを示している。

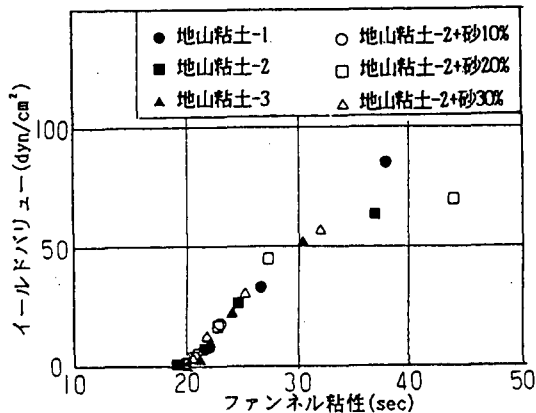
これらの結果から、模擬地盤 2 では泥水の API ろ過脱水量が、また模擬地盤 1 では泥水の API ろ過脱水量と砂分添加率（または砂分含有率）とが泥膜形成性の指標になると考えられる。



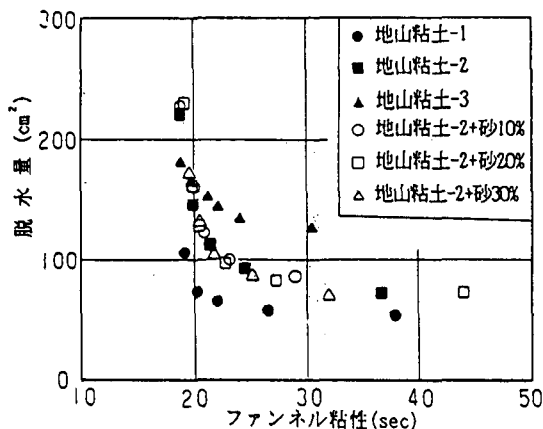
図一13 脱水量(2~3分)と泥水比重の関係
[泥膜止水性]



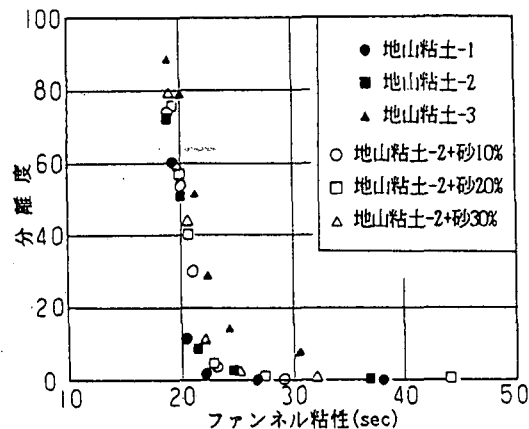
図一14 泥水落下実験における地盤の挙動



図一15 ファンネル粘性とイーロッドバリュウの関係



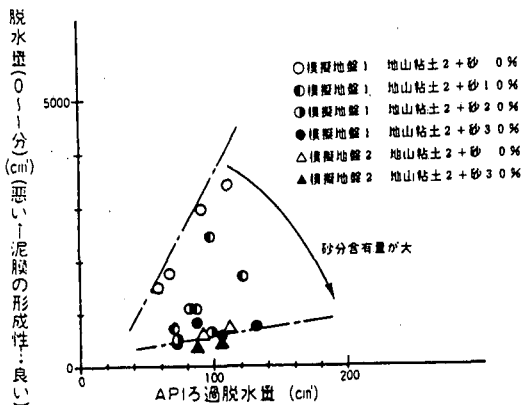
図一16 ファンネル粘性とAPIろ過脱水量の関係



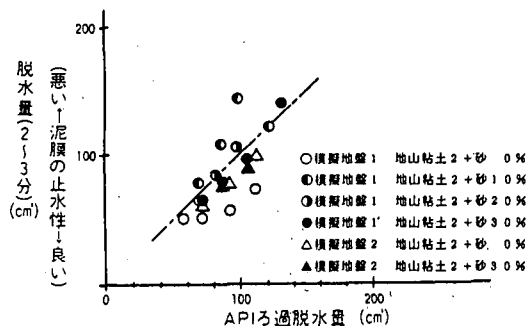
図一17 ファンネル粘性と分離度の関係

表一3 礫質地盤の重要管理項目と適正泥水物性値

模擬地盤	粒度構成			透水係数 k cm/sec	重要管理項目と適正泥水物性値		
	シルト・粘土分 %	砂分 %	離分 %		泥水比重	ファンネル粘性 sec	A.P.I.ろ過脱水量 cm
1	0	15	85	(1.5~2) × 10 ⁻¹	1.25 以上	25 以上	90 以下
2	9	40	50	(2~3) × 10 ⁻¹	1.20 以上	—	90 以下



図一18 APIろ過脱水量と泥膜の形成性との関係



図一19 APIろ過脱水量と泥膜の止水性との関係

5・3. 泥膜の止水性と地盤の関係

模擬地盤面に形成された泥膜の止水性と泥水の API ろ過脱水量との関係を図一19 に示す。なお、泥膜の止水性評価の尺度は、4・2. (c) で述べた方法とする。同図より、API ろ過脱水量が少ないほど泥膜の止水性が良くなることがわかる。また、両者の関係は、対象地盤や泥水中の砂分添加率が変わっても大きく変化しない。これは一旦泥膜が形成されると泥膜の止水性は、対象地盤の粒度構成にあまり影響されないことを示している。よって、API ろ過脱水量は泥膜の止水性の指標となると考えられる。

5・4. 泥膜の形成性とファンネル粘性の関係

模擬地盤1のような間隙が大きい地盤では、前述したように地盤内にある程度泥水が貫入してから泥膜ができるので、泥膜の形成性は貫入抵抗、即ち泥水の粘性に影響されると考えられる。模擬地盤1では砂分を含まない泥水の場合は、ファンネル粘性が25sec 以下では脱水量が急激に増加し泥膜の形成性が悪くなる。このことからファンネル粘性は、地盤の間隙が大きい模擬地盤1での泥膜の形成性の指標となると考えられる。模擬地盤2ではファンネル粘性に関係なく、泥膜の形成性はほぼ一定となっており、ファンネル粘性では泥膜の形成性の良否は判定できない。また、模擬地盤1で砂分を添加した泥水を使用した場合は、砂の目詰め効果によりファンネル粘性に関係なく脱水量は少なくなり泥膜の形成性が向上する。

6. 重要管理項目と適性泥水物性

6・1. 泥水比重

泥膜が早期に地盤表面に形成され泥水圧が有効に地盤に伝わるためには、泥水浸透実験での泥水の浸透形態がタイプ②、③であり、間隙水圧の経時変化がタイプc、dであることが必要となる。また、切羽天端地山が崩落を起こさず山留効果を十分に発揮するためには、泥水落し戸実験での地盤の挙動がタイプⅢであることが要求される。これらの諸条件を満足する泥水比重について、表一2を参考にして求めると模擬地盤1では1.25、模擬地盤2では1.20となる。

6・2. ファンネル粘性

5・1で示したように、ファンネル粘性が25sec 以下ではAPI ろ過脱水量や分離度が一定値に落ち着く。5・4で述べたように、模擬地盤1では泥水のファンネル粘性が泥膜の形成性の指標になりファンネル粘性値を25sec 以上にする必要があるが、模擬地盤2ではファンネル粘性では泥膜の形成性の良否を判定できない。

6・3. API ろ過脱水量

5・2および5・3で述べたように、API ろ過脱水量は模擬地盤1、2の双方に対して泥膜の形成性・安定性の指標となる。表一1と図一7などを参考にすると、良好な泥膜の形成性・止水性を確保のためには、模擬地盤1、2ともに泥水のAPI ろ過脱水量を90cc 程度以下にする必要がある。

以上の考察から、透水性の高い砂礫地盤における重要管理項目と適性泥水物性値についての試案を示すと表一3のようになる。

7. あとがき

本実験後、泥膜の形成性が良好な状態での掘削偏差流量を泥水浸透実験の脱水量から推定し、これと実測値とを比較することで切羽の安定状況を判定する施工管理方法を実施工で採用し、その有効性を検証した。今後の施工管理の精度向上には、切羽鏡面の土質分布状況や間隙水圧の正確な把握が課題である。

【参考文献】

- 1) 藤田昌一：シールドトンネルの新技术，土木工学社，pp. 47～48，1995.2.