

砂礫地盤における泥水式シールド工法の 適正泥水性状に関する実験的研究

長谷川昌弘*・藤原雅博**・熊谷幸樹***

泥水式シールド工事では細粒分の少ない均一砂層や透水性の高い砂礫層で切羽崩壊を生じた例がみられる。透水性の高い砂礫層を対象として泥水物性試験、泥水浸透実験、泥水落し戸実験等の室内実験を実施し、泥水式シールド工事での適正泥水性状について考察した。また、泥水浸透実験での脱水量をもとにした「掘削偏差流量によるリアルタイム施工管理法」を実際のシールド工事に適用し、その有効性について検討した。

Key Words : slurry shield tunnel, suspension, coarse gravel, stability of excavation face, execution management method

1. はじめに

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、地下連続壁の掘削やボーリングに用いる泥水技術と1961年フランスで考案された圧力水密閉式シールドのアイデアをもとに我国で開発・実用化されたものである¹⁾。1969年に日本鉄道建設公団京葉線森ヶ崎運河付近工事²⁾で大断面シールドに本格的に採用されて²⁾以来、軟弱な粘性土層および砂質土層から砂礫層までの広い範囲の地層に適用され飛躍的に発展し²³⁾、最近では直径14mを超える大断面の施工が目前となっている。また、大深度・高水圧下でも安全性の高い工法として注目されている。

しかし、細粒分が少なく粒径の均一な砂層や透水性が高い砂礫層では、切羽の崩壊や陥没事故を起こした例がみられ³⁾、これら崩壊し易い地層での切羽安定機構の解明が泥水式シールド工法の施工管理上での課題になっている⁴⁾。

泥水シールド工法の切羽の安定は泥水が持つ次の作用で確保されている^{5), 23)}。

- ① 切羽に作用する土圧・間隙水圧に泥水圧で対抗し切羽面の変形を抑える。
- ② 切羽面に不透水性の泥膜を形成し、泥水圧を有効に作用させる。
- ③ 切羽面から泥水がある程度の範囲に浸透して地盤に粘着性を与える。

したがって、切羽の安定を確保するためには、次の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(適正泥水圧)
- ② 泥膜の形成性と止水性が良い泥水性状(適正泥水性状)

適正泥水圧は、Brookerの静止土圧、Rankinの主働土圧、Bromsの理論、Terzaghiのゆるみ土圧、同ゆるみ土圧と対数ら線すべり土塊重量による算定式等から求められる^{6), 24)}がまだ十分確立された計算法がない。適正泥水性状についても、掘削対象地層の粒度特性に対応した算定理論が未確立である。

また、日本トンネル技術協会がシールド工法の現状について実施したアンケート調査の結果でも、切羽安定関連の開発希望項目として「切羽安定保持のための泥水管理システム」や「湧水性砂質、砂礫地盤の切羽安定」が掲げられている⁷⁾。

以上のことから、泥水式シールド工法では切羽崩壊を生じやすい細粒分の少ない均一砂層や透水性の高い砂礫層における適正泥水性状の究明が課題と考えられる。

著者らは、シルト質砂層や均一砂層に対する適正泥水性状や施工管理手法等について、すでに室内実験と施工での検討を行い多くの知見を得てきた^{8)~13)}。

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・泥水落し戸実験等の室内土槽実験結果から、適正泥水物性値の提案を行うとともに泥水浸透実験結果にもとづく「掘削偏差流量によるリアルタイム施工管理法」の泥水式シールド工法を用いた工事での検証結果^{14)~16)}を示す。

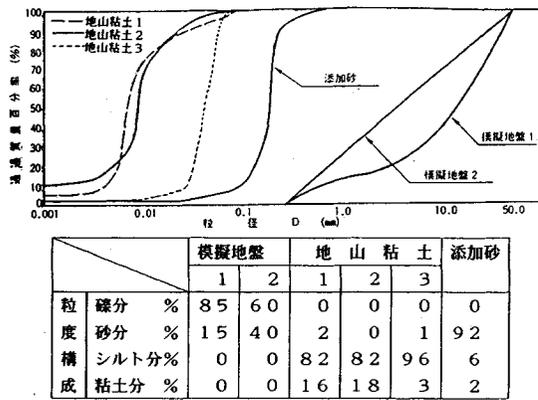
2. 室内実験用模擬地盤及び泥水材料

藤田は滞水砂層と滞水砂礫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があり、補助工法の併用が必要であるとしている³⁾。

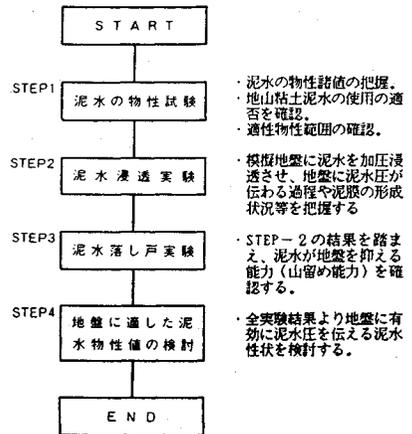
*正会員 飛鳥建設(株) 技術研究所 土質研究室 室長
(〒270-02 千葉県東葛飾郡関宿町木間ヶ瀬 5472)

**正会員 飛鳥建設(株) 技術研究所 情報化施工研究室 副課長

***正会員 飛鳥建設(株) 土木技術設計部



図一 実験模擬地盤と泥水材料の粒度分布



図二 室内実験のフロー

表一 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 7kgf/cm ² で泥水を30分加圧後の脱水量を測定する。
分離度	1%メッシュシリンダに泥水を24時間静置した後、うわ水体積を測定する。

- ① 切羽水圧が 0.7kgf/cm² 以上
- ② 粒径 74 μ 以下の細粒分含有率 p_f 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 1×10^{-2} cm/sec 以上 (砂礫層の場合)

そこで実験には細粒分を含まない透水係数の高い砂礫層を想定して図一に示す 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 tf/m³、透水係数 k はそれぞれ $1.5 \sim 2 \times 10^{-1}$ cm/s, $2 \sim 3 \times 10^{-2}$ cm/s の状態で実験を行った。尚、模擬地盤の粒度、密度、透水係数等は、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(第7章参照)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主に使用されており、適宜これに良好な泥壁形成性をもつベントナイト等の市販粘土や CMC ならびに砂を混入することが行われている⁴⁾。そこで泥水物性試験に供する泥水材料には図一のような粒度分布を持つ地山粘土 3 種類 (1, 2, 3) と添加砂を用いた。模擬地盤 1, 2 と泥水物性試験に用いる地山粘土 1, 2, 3 および添加砂の粒度構成を図一にあわせて示した。

尚、地山粘土 1, 2 はいずれも粒径 0.03 mm 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んど同じであるが、地山粘土 2 の方が粒径 0.001 mm 以下のコロイド分の含有量が多い。また、1 は有楽町層の沖積粘性土、2 は東京層の洪積粘性土である。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性土である。

3. 実験方法

実験は図二の順序で実施した。各実験の目的や実験方法等の概要は次の通りである。

(1) 泥水物性試験

泥水物性試験^{21), 24)}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

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 Code 29) 等に準拠して表一に示す方法により、泥水比重を 1.05~1.30、砂分添加率を 0~30% に変化させて実施した。

(2) 泥水浸透実験

シールド機で掘進中の切羽面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及び泥水圧の伝播過程等を観察するために行うもので、内径 480 mm 長さ 570 mm のアクリル製の土槽部と、同径で長さ 200 mm の鉄製泥水チャンバ部からなる円筒型実験装置を用いて図三に示すシステムにより実施した。土槽部とチャンバ部の境にはスリット付きの面板があり、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。

泥水圧は、実施工で採用されている変動圧^{4), 23)}を考慮して実験開始後 5 分間は 0.2 kgf/cm² とし、次に 5 分から 8 分迄の間は 0.5 kgf/cm²、さらに 8 分から 10 分迄の間は 1.0 kgf/cm² と段階的に昇圧した。泥水の浸透状況を観察するとともに、土槽内に土圧計と間隙水圧計を埋設して土圧、間隙水圧および模擬地盤からの脱水量を測定した。

(3) 泥水落し戸実験

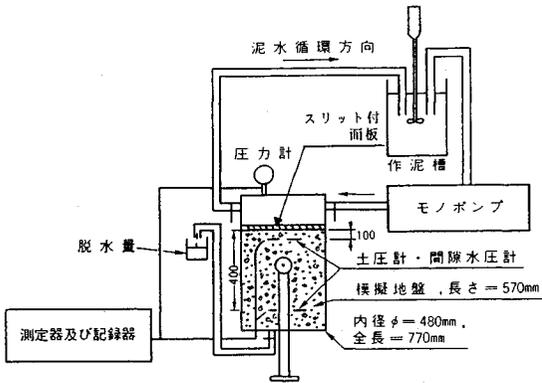


図-3 泥水浸透実験システム

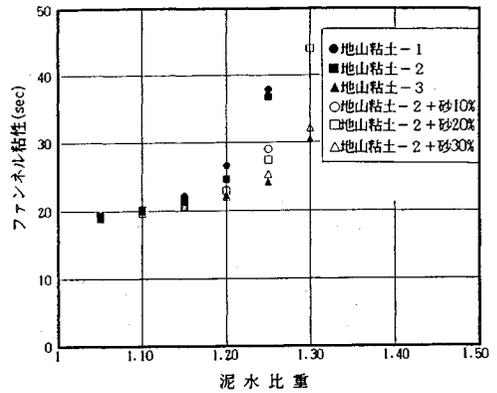


図-5 泥水比重とファンネル粘性の関係

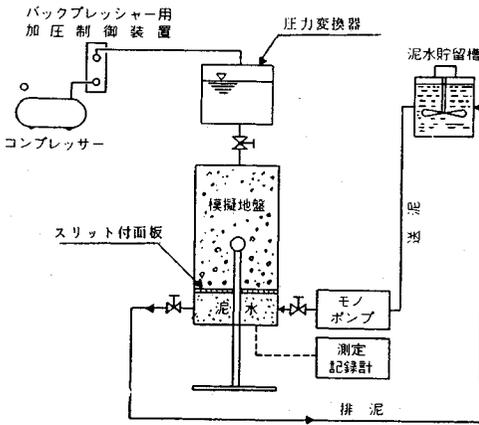


図-4 泥水落し戸実験システム

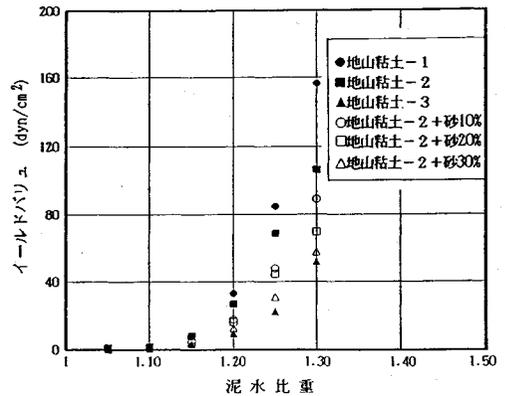


図-6 泥水比重とイールドバリュの関係

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、地山崩壊検出装置²³⁾もシールド機の天端付近に設置される例が多い。切羽面の安定性については、大型土槽内に模型シールドを掘進させる実験等が木島ら¹⁷⁾、檜垣ら¹⁸⁾、秋本ら¹⁹⁾、斉藤ら²⁰⁾等によって行われているが、ここで実施する「泥水落し戸実験」は特に切羽天端地山の安定状況を検討するために行うものである。浸透実験装置を図-4の様に逆さにして、チャンパ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、泥水による土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 kgf/cm^2 の間隙水圧を発生させており、泥水圧には土圧+間隙水圧+変動圧^{1), 23)} = $0.1 + 0.5 + 0.2$ として 0.8 kgf/cm^2 を用いた。

4. 実験結果

(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-5の様な

る。尚、地山粘土1と2で泥水比重1.30とした泥水は、粘性が高くファンネル漏斗では測定ができなかったため図-5にはプロットしていない。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の場合も、砂の添加率が増加するにしたがって(すなわち、泥水材料の粒度が粗くなるにしたがって)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ュとの関係を図-6に示す。泥水比重が1.10以下ではイールドバリュは殆ど零であるが、泥水比重が1.15を越すとイールドバリュが急激に増加し、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、砂の添加量が多くなるほどイールドバリュ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

泥膜の止水性が良いほど泥水の脱水量が減少することからAPIろ過脱水量は泥膜止水性の指標となると考えられる。図-7に示すようにいずれの泥水材料とも泥水比重の増加にしたがってAPIろ過脱水量が減少し、泥

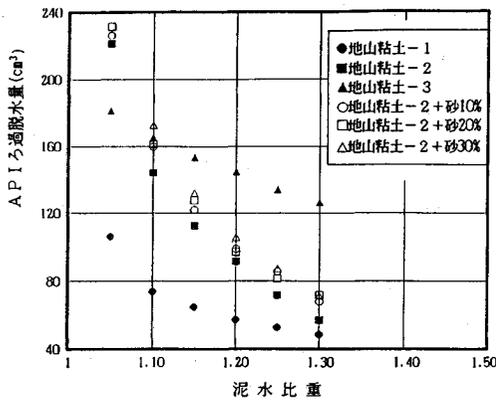


図-7 泥水比重とAPIろ過脱水量の関係

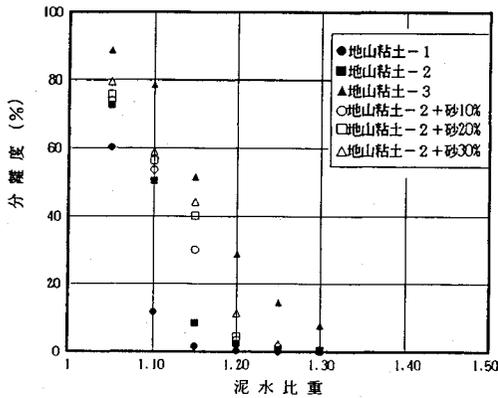


図-8 泥水比重と分離度との関係

膜の止水性が向上する傾向にあるといえるが、地山粘土3のような粒度の粗い泥水材料では、泥水比重が1.30の高濃度でも泥水中の自由水の殆んどが脱水し、止水性の良い泥膜を形成できないと判断される。

c) 泥水比重と分離度との関係

静置状態の泥水がどれだけ沈降するかで泥水の安定性を判断できるので、分離度は泥水安定性の判定指標となる。分離度が小さいほど泥水の安定性が高いと言える。

泥水比重と分離度の関係を示すと図-8の様になる。泥水比重の増加にともな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のような泥水材料は、沈降しやすいため泥水比重が1.25でも分離度が10%以上となり安定性が悪い。地山粘土2に砂を添加した泥水でも砂添加により分離度が高くなり泥水の安定性が低下することがわかる。

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と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の対象としているため、泥水浸透実験と泥水落し戸実験の泥水材料には洪積粘土である地山粘土2を用いた。

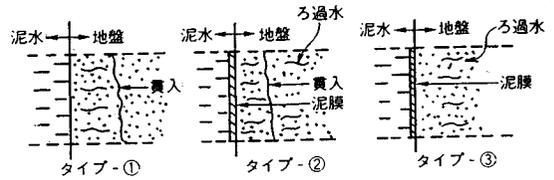


図-9 泥水浸透実験における泥水の浸透形態

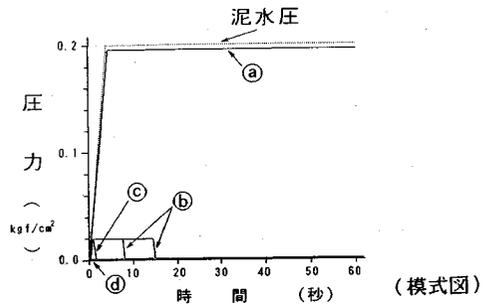


図-10 泥水浸透実験における間隙水圧の挙動

(2) 泥水浸透実験結果

a) 地盤への浸透形態²²⁾

泥水浸透実験での泥水材料には地山粘土2を用いた。泥水が模擬地盤面に接触すると図-9の様に、次の3タイプの浸透形態を示すことが観察された。

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; 泥水が殆ん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のタイプを表-2に示す。表中の砂分添加率とは泥水への砂分添加率のことである。尚、泥水浸透実験完了後、面板をはずして泥水と接する模擬地盤表面全体にわたって泥膜の形成状況を観察したが、アクリル板に接する周辺部と中心部では差異が認められなかった。

b) 間隙水圧の挙動

模擬地盤中に埋設された泥水チャンバ側の間隙水圧計の経時変化は、図-10の様に次の4タイプを示した。

タイプa; 泥水圧とほぼ等しくなり下降しない。

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。

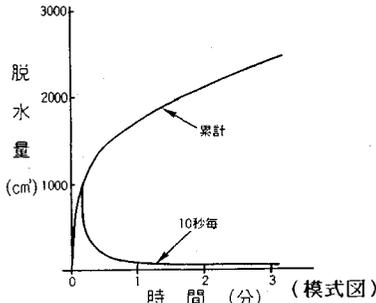
タイプd; ほとんど上昇せず初期状態を保つ。

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の場合は、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bcd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

表一 2 泥水浸透実験・泥水落し戸実験の結果

砂分添加率%	模擬地盤 2		模擬地盤 1			
	0	0	10	20	30	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 III	② c III	② c III	② d III	
1.30	---	② c III	② c III	② c III	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)



図一 11 泥水浸透実験での脱水量の径時変化

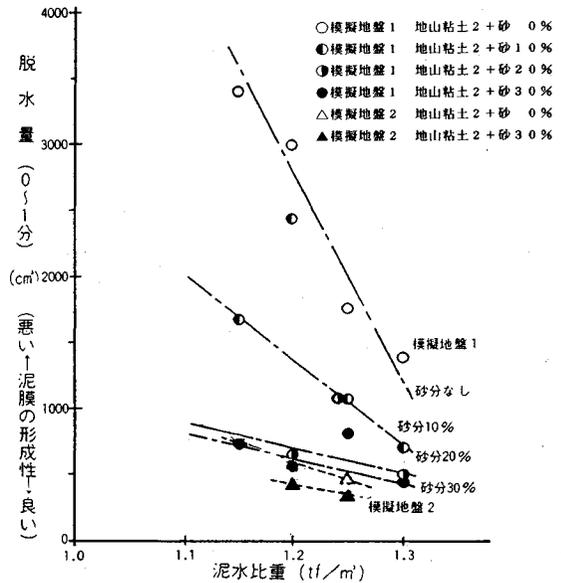
それぞれ異なっているが、タイプ b は泥膜形成までの時間が長く、切羽の安定を早期に確保するためにはタイプ cd を示す泥水が必要である。各実験ケースでの間隙水圧挙動のタイプをまとめると表一 2 のようになる。尚、タイプ a は清水 (比重 1.00) の場合のみであったので表一 2 では割愛した。

c) 模擬地盤からの脱水量

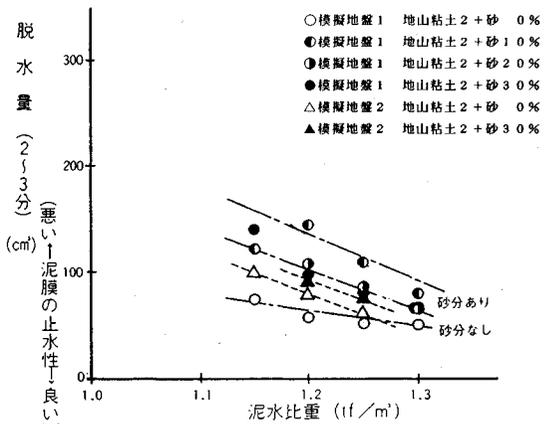
泥水浸透実験中の模擬地盤からの脱水量は図一 11 に示す様に泥水の浸透開始後 30 秒～1 分付近で増加の割合が減少し、浸透開始後 2 分を過ぎると増加の割合はほぼ一定となる。浸透開始当初の脱水量は、泥膜形成のための地盤への貫入とろ過によるもので、泥膜形成後は泥膜でのろ過のみによるものと考えられる。したがって、泥膜の形成性を浸透開始後 0～1 分の脱水量で評価し、泥膜の止水性は同じく 2～3 分の脱水量で評価すると、実験結果は図一 12, 13 の様にまとめられる。

0～1 分の脱水量は泥水比重が大きくなる程、また砂の添加量が増す程少なくなる傾向を示した。砂の添加による目詰り効果により泥膜の形成性が良くなっており、その傾向は模擬地盤 1 の方が顕著である。模擬地盤 1 での砂分 30% 添加の泥水は、模擬地盤 2 での砂無添加の泥水とほぼ同じ泥膜の形成性を示した。

2～3 分の脱水量は泥水比重が大きくなる程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わかる。



図一 12 脱水量 (0～1 分) と泥水比重の関係 [泥膜形成性]



図一 13 脱水量 (2～3 分) と泥水比重の関係 [泥膜止水性]

(3) 泥水落し戸実験結果

泥水落し戸実験でも泥水浸透実験と同様に泥水材料には地山粘土 2 を用いた。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 に示す様に次の 3 タイプを示した。

- タイプ I：泥水が地盤内へ貫入し、地盤は崩落する。
- 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：泥水浸透実験の時よりも多く泥水が地盤内へ貫入したが、地盤は崩落しない。

天端地山の山留効果を充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 の様になる。同表より、地盤を崩落させないためには模擬地

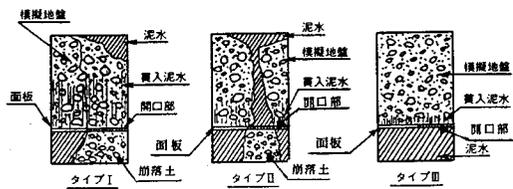


図-14 泥水落し戸実験における地盤の挙動

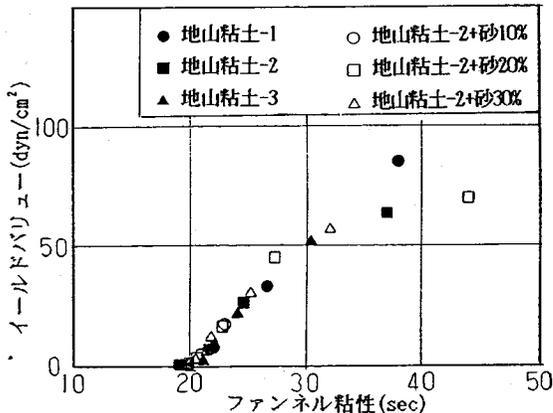


図-15 ファンネル粘性とイールドバリュの関係

盤1で泥水比重を1.25以上、模擬地盤2で泥水比重を1.20以上にする必要があることがわかる。泥水の地盤への貫入状況は泥水落し戸実験の方が泥水浸透実験よりも顕著であった。

尚、タイプIIIを示す状態でも、面板を模擬地盤から離れた状態にして泥水圧を徐々に下げると（土圧+間隙水圧）に相当する0.6 kgf/cm²位から模擬地盤全体が下降したことから、実験土槽内面と模擬地盤との間の摩擦やアーチアクションは無視できることを確認している。

5. 実験結果の考察

(1) 泥水材料の物性評価指標

図-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が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を出来ないことが分かる。

一方、ファンネル粘性とイールドバリュの関係を示すと図-15の様になり、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を推定することが可能である。

図-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等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出来ないことが分かる。

一方、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-16,17の様になり、ファンネル粘

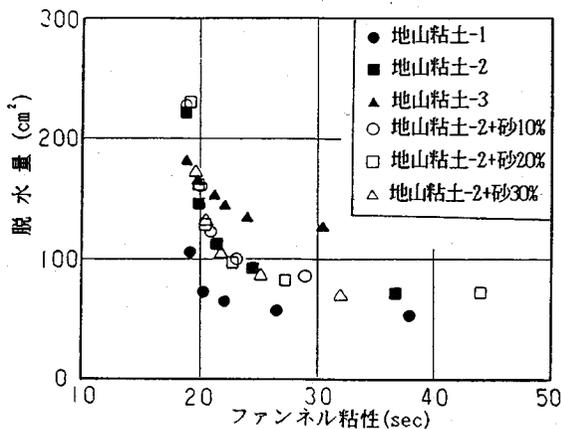


図-16 ファンネル粘性とAPIろ過脱水量の関係

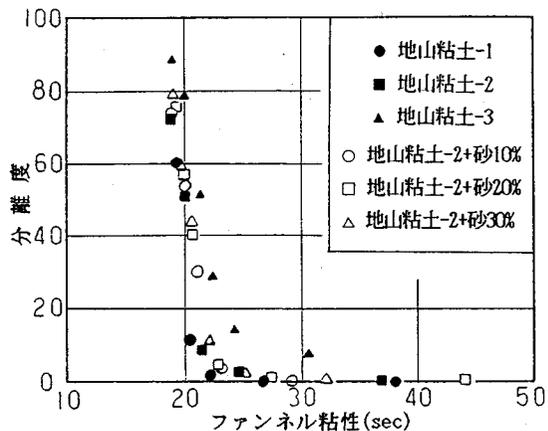


図-17 ファンネル粘性と分離度の関係

性が25 sec以上ではAPIろ過脱水量や分離度が低下し一定値におちつくことが分かる。

以上の結果からファンネル粘性は、イールドバリュ、APIろ過脱水量、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であるといえる。

(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-18に示す。尚、泥膜形成性の評価尺度は4章(2)のC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の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ろ過脱水量との関係が変化し、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とが分る。

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

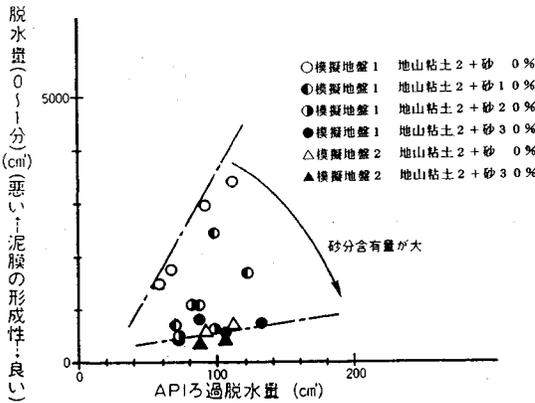


図-18 APIろ過脱水量と泥膜の形成性との関係

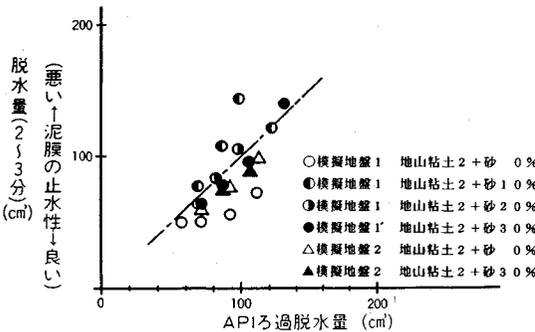


図-19 APIろ過脱水量と泥膜の止水性との関係

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ため、加圧当初に泥水がある程度地盤に貫入し、地盤表面の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のに対し、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のような砂分の含有量が極めて少ない礫質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出来ることを示している。

以上の結果から、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（又は砂分含有率）とが泥膜形成性の指標になると考えられる。

(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-19に示す。尚、泥膜の止水性評価の尺度は4章(2)の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事がわかる。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

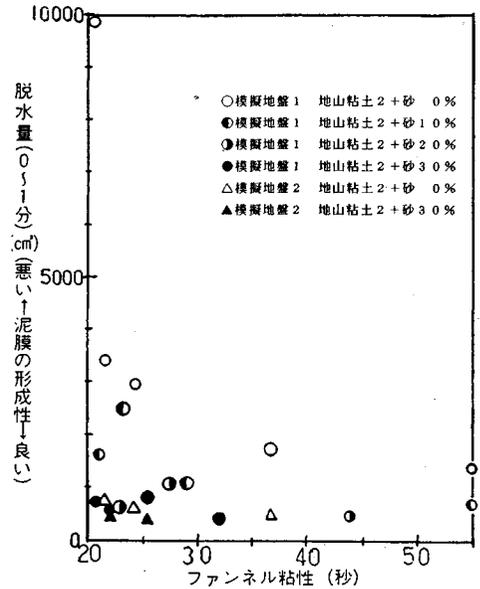


図-20 ファンネル粘性と泥膜の形成性との関係

表-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			透水系数 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 %	礫分 %		泥水比重	ファンネル粘性 sec	A.P.I.ろ過脱水量 cm³
1	0	15	85	(1.5~2) × 10 ⁻¹	1.25以上	25以上	90以下
2	0	40	60	(2~3) × 10 ⁻²	1.20以上	—	90以下

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。

(4) 泥膜形成性とファンネル粘性の関係

模擬地盤1の様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。泥膜の形成性とファンネル粘性の関係をまとめると図-20の様になる。

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25 sec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を判定できない。

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。

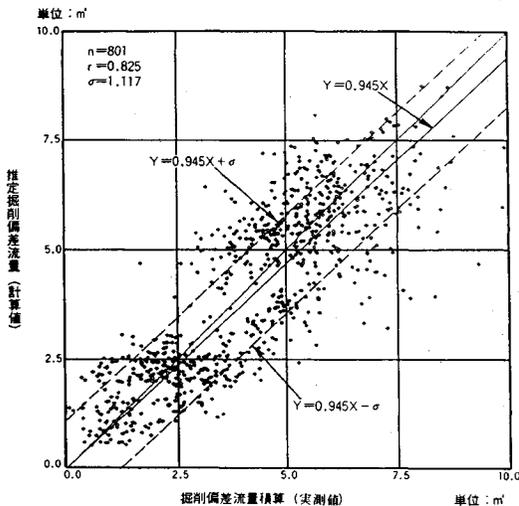


図-22 掘削偏差流量 (推定値と実測値の比較)

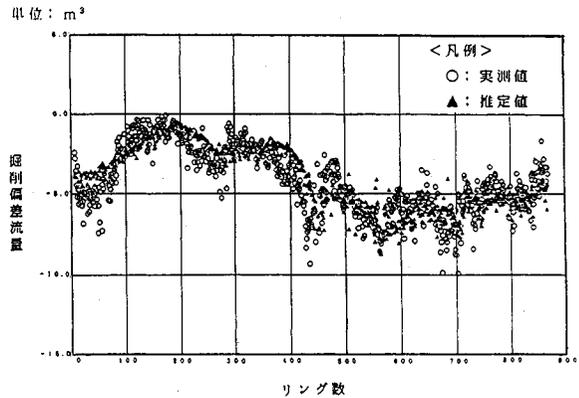


図-23 リング毎の掘削偏差流量

る部分に分かれるので各地盤に対する泥水浸透実験における浸透開始後 27 秒と 54 秒の脱水量をもとに掘削偏差流量の推定値 (計算値) を算定した。この推定値と泥水処理プラントで計測した掘削偏差流量 (実測値) とを比較すると図-22, 23 の様になる。

推定値と実測値とは高い相関を示し、推定値は実測値を良く説明していることがわかる。したがって、室内実験と同じように実施工でも泥膜の形成性が良好であったことが確認された。

対象工事は最小土盛り 10 m であったがシールド掘進中の地表沈下は極めて小さかったことから、切羽面には常に良好な泥膜が形成され切羽崩壊・崩落もなく適正な掘進管理が行われたと判断される。このことは、掘削偏差流量を泥膜形成性の判断指標とした施工管理手法の有効性を示唆している。

尚、実測値のばらつきの原因は、泥水圧のうち地盤側圧に対する過剰圧が正確に把握できないために過剰圧の補正をしていないことや、シールド切羽面の土質分布を推定地質縦断面図から想定したことなどが考えられる。

したがって、この施工管理手法の精度向上には切羽面に作用する側圧・水圧の値や切羽面の土質分布状況の正確な把握をリアルタイムに行うことが課題であるが、特に切羽面の土質分布状況を正確に探知することは難しいためこれを間接的に把握できる代用特性についての研究が必要である。

8. 結 論

泥水式シールド工法における透水性の高い砂礫層での適正泥水物性を究明することを目的に実施した泥水物性試験、泥水浸透実験、泥水落し戸実験等の室内実験結果と、その結果をもとにシールド工事で実施した「掘削偏

差流量を用いたリアルタイム施工管理法」についてまとめると以下のようなになる。

- 1) シルト分を主体とする粒径の粗い地山粘土は、止水性や安定性が悪いため泥水材料としては不適である。
- 2) 泥水比重が 1.15 を越すと泥水比重と粘性の関係は泥水材料の粒度分布や砂分の混入量に依存するため泥水比重のみでは泥水材料の物性を評価出来ない。
- 3) ファンネル粘性とイールドバリュとの相関性は高く、ファンネル粘性からイールドバリュを推定することが可能である。
- 4) API ろ過脱水量や分離度はファンネル粘性が 25 sec 以下では急増するが、25 sec を越すとほぼ一定値におちつくことから、安定性の高い泥水を確保するにはファンネル粘性で 25 sec 以上とする必要がある。
- 5) ファンネル粘性は、イールドバリュ、API ろ過脱水量、分離度などと良い相関関係を有し泥水の粒度による影響も小さく、試験も容易であることから泥水材料の物性評価指標として適切なものである。
- 6) 砂分の含有量が少ない礫質地盤でも泥水に砂分を適量補うことによって地盤の間隙への「目詰め効果」が生じ、泥膜の形成性を向上させることが出来る。
- 7) API ろ過脱水量は、泥膜の形成性や止水性を評価する指標になるので、透水性の高い砂礫地盤では泥水比重とファンネル粘性とともに、API ろ過脱水量も泥水の品質管理項目に加える必要がある。
- 8) 泥水浸透実験の脱水量をもとに算定した掘削偏差流量の推定値と泥水処理プラントで計測された掘削偏差流量の実測値とを比較することによって実施工における泥膜の形成状態を判断する施工管理法は、泥水式シールド工法を用いた工事のリアルタイム施工管理手法として有効な手法となる可能性を有していると考えられるが、さらに他の土質条件下でも検証を重ねる必要がある。

最後に、実験や施工に際して御指導を賜った東京都立大学名誉教授山本 稔博士、帝都高速度交通営団、東日

本旅客鉄道(株)、東日本貨物鉄道(株)の関係各位ならびに現場計測データの提供を頂いた飛鳥建設(株)東京支店飛鳥山シールド作業所の関係各位に深謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 鈴木 章：シールドトンネルの新技术(1), トンネルと地下, 第21巻6号, p.78, 1990.
- 2) 栗原和夫：泥水加圧シールド工法, p.3, 鹿島出版会, 1982.
- 3) 藤田昌一：シールドトンネルの新技术(4), トンネルと地下, 第21巻9号, pp.67~68, 1992.
- 4) 栗原和夫, 前出, pp.40~97, 1982.
- 5) トンネル標準示方書(シールド編)同解説, p.120, 土木学会, 1986.
- 6) 二村敦：シールドトンネルの技術(6), トンネルと地下, 第21巻11号, pp.69~74, 1990.
- 7) 日本トンネル技術協会研究開発委員会シールド工法調査小委員会：シールド工法の都市トンネルへの適用性に関する調査報告書, 1988.
- 8) 長谷川昌弘・藤原雅博：口過脱水量による大断面泥水加圧シールドの泥水管理について, 土木学会第43回年次学術講演会Ⅲ部門, pp.1028~1029, 1988.
- 9) 小林清三・長谷川昌弘・藤原雅博・斉野博文・佐野公彦：泥水シールド工法における泥水性状について, 第21回土質工学研究発表会, pp.1725~1726, 1988.
- 10) 小林清三・長谷川昌弘・藤原雅博・斉野博文・佐野公彦：泥水の出留機能に関する模型実験, 第21回土質工学研究発表会, pp.1733~1734, 1986.
- 11) 長谷川昌弘・藤原雅博・武永真徳・佐野公彦：泥水式シールドの最適泥水性状について(その1), 土木学会第44回年次学術講演会Ⅲ部門, pp.86~87, 1989.
- 12) 長谷川昌弘・藤原雅博・武永真徳・佐野公彦：泥水式シールドの最適泥水性状について(その2), 土木学会第44回年次学術講演会Ⅲ部門, pp.88~89, 1989.
- 13) 藤原雅博・斉野博文・佐野公彦：泥水加圧式シールド工法における適正な泥水性状の把握, とびしま技報 No.36, pp.75~86, 1986.
- 14) 長谷川昌弘・藤原雅博：礫質地盤における泥水式シールドの施工管理手法について, 土木学会第47回年次学術講演会Ⅲ部門, pp.112~113, 1992.
- 15) 長谷川昌弘・藤原雅博・熊谷良樹：泥水式シールドの礫質地盤用泥水についての実験研究, とびしま技報 No.42, pp.87~95, 1991.
- 16) 長谷川昌弘・藤原雅博：礫質地盤における泥水式シールド工法の適性泥水物性について, 土木学会第48回年次学術講演会Ⅲ部門(投稿中).
- 17) 木島誌郎他：泥水加圧式シールド工法の研究(その1)~(その2), 鹿島建設技術研究所年報, Vol.24~Vol.25, 1976~1977.
- 18) 檜垣貴司他：加水加圧式シールド工法の研究(その1)~(その2), 大成建設技術研究所報, Vol.15, pp.173~182, 1982.
- 19) 秋本 勝他：礫質地盤の泥水シールド工法, 五洋建設技術研究所年報, Vol.11~Vol.14, 1982~1985.
- 20) 斉藤顕次他：泥水特性に関する基礎研究(その1)~(その5), 西松建設技報, Vol.8~Vol.11, 1985~1988.
- 21) 栗原和夫編：現場で役立つシールド工事, pp.139~147, 出版科学総合研究所.
- 22) H. Muller-Kirchen Bauer : Stability of Slurry Trenches in Inhomogeneous Subsoil, 第9回国際土質基礎工学会議 Session 3 pp.125~132, 1977.
- 23) シールド工事施工積算研究会：シールド工事の施工と積算, pp.2~7, pp.120~136(財)経済調査会, 1984.
- 24) 土質工学会講習会等委員会：シールドと土質, pp.17~28, p.53, pp.91~96, 土質工学会, 1981.
- 25) 折出勝士：重要構造物下の礫質砂層における泥水管理, 第27回施工体験発表会, pp.45~50, 日本トンネル技術協会, 1990.

(1993.5.12 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE OPTIMUM PROPERTIES OF SUSPENSION FOR SLURRY SHIELD TUNNELING IN GRAVEL GROUND

Masahiro HASEGAWA, Masahiro FUJIWARA and Kouki KUMAGAI

Collapses of cutting 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 experiments, assuming tunneling in a highly permeable 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. From the dehydration amounts obtained in the slurry seepage tests, the authors propose a real time tunneling control method by deviation of the slurry flow balance, and verify the effectiveness of this method by applying it to the excavation of a large-section shield tunnel.