

泥水特性に関する基礎的研究

Fundamental Study on Characteristics of Mud Fluid

斉藤 顕次*
Kenji Saitō

野本 寿**
Toshi Nomoto

渡辺 徹**
Tōru Watanabe

平岡 博明***
Hiroaki Hiraoka

古市 尚治***
Naoji Furuichi

佐藤 靖彦****
Yasuhiko Satō

要 約

本研究では、泥水加圧シールド工法を採用する現場で使用する泥水について、基本特性試験及び浸透実験を行い、泥水特性と切羽の安定との関係を追求めた。

その結果、基本特性試験では泥水比重、レオロジー特性、ろ過水量の相互関係及び泥水の安定性とろ過水量との関係が明らかになった。さらに、浸透実験では、泥水比重、泥水圧、溢水時間等と溢水量との関係を調べ、泥壁の形成される前後でそのろ過特性が異なることが明らかにされた。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 実験概要
- §3. 泥水の基本特性試験結果
- §4. 浸透実験
- §5. まとめ
- §6. おわりに

§1. はじめに

泥水加圧シールド工法は、粘土・シルト層のみならず自立性のない滞水砂礫層にも適用される。特に、滞水砂礫層では、逸泥及び切羽の安定が重要な問題となり、対象地盤に適した泥水の選定・配合を行い、十分な泥水の品質管理を行わなければならない。しかし、泥水特性と切羽の安定機構に関してはまだ未解明な点も多い。

このため、泥水特性と切羽の安定の関係を明らかにするとともに、合理的な泥水の管理手法を確立するために、泥水特性に関する基礎的な実験を行った。

§2. 実験概要

2-1 実験目的

粘土泥水について、レオロジー特性、ろ過特性及び泥水安定性等の泥水特性試験を行い、各々の泥水特性を把握し、その相互関係を調べるとともに、切羽の状況を想定した鉛直方向の浸透実験によって、地盤及び泥水圧等の影響を考慮した造壁性及び切羽の安定機構を明らかにすることを目的としている。

2-2 実験内容

実験のフローチャートを Fig. 1 に示す。泥水の基本特性とその相互関係の把握のため、主にレオロジー特性、ろ過特性及び安定性に着目し各試験を行った。泥水特性試験で使用した試験器具と試験内容を Table 1 に示す。

また、浸透実験では、作成した砂地盤に泥水圧をかけ溢水量と土圧・間隙水圧を測定した。これによって、泥水圧・泥水比重等が溢水量へどのように影響するか、また、造壁過程について考察した。

2-3 実験材料

本実験は、対象地盤として滞水砂層を考え、泥水材料としては、市販の木節・笠岡・多治見粘土の3種類を使用した。各粘土の真比重はそれぞれ2.56、2.65、2.64で

*技術研究部技術研究所係長

**技術研究部土木技術課係長

***技術研究部技術研究所

****技術研究部土木技術課

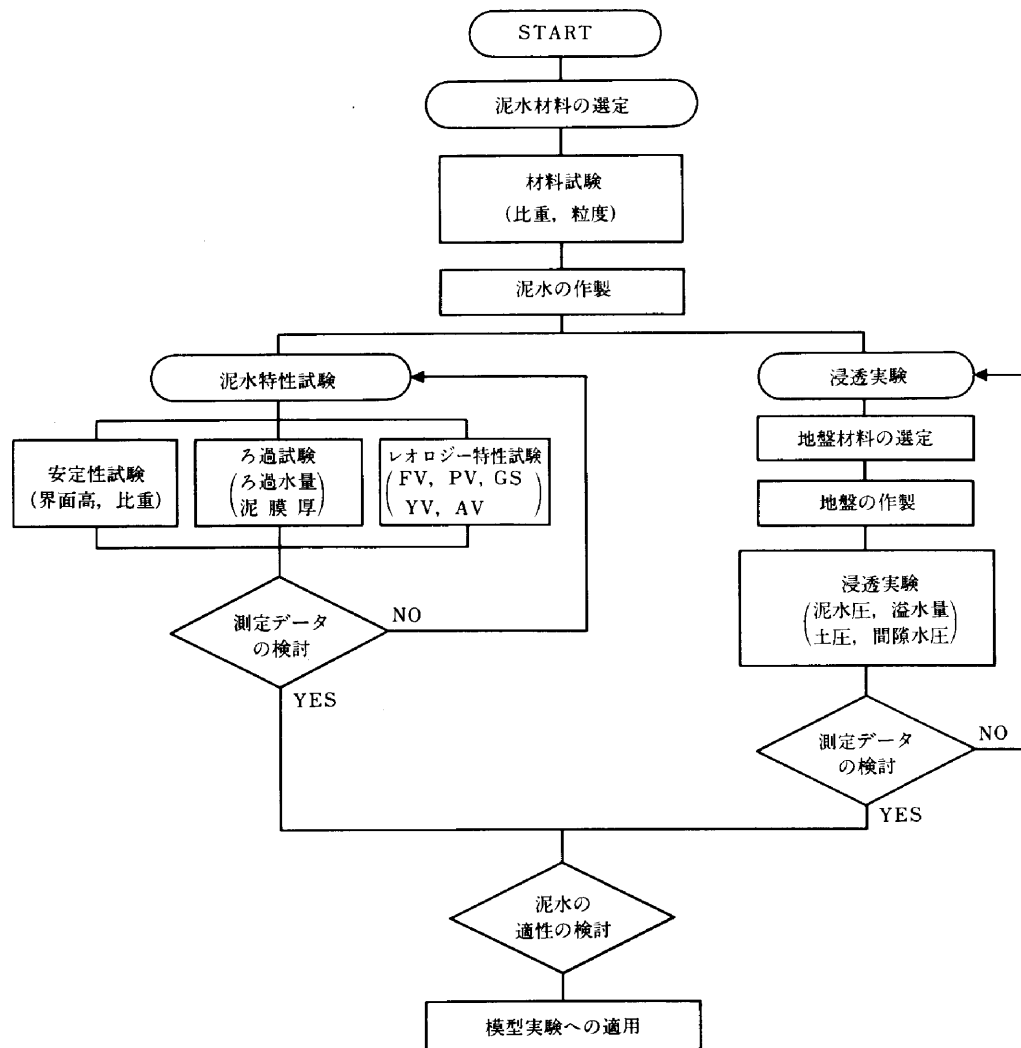


Fig.1 実験のフローチャート

Table1 泥水特性試験の使用器具及び試験内容

項 目	使 用 器 具	試 験 内 容
比 重	マッドバランス	泥水比重
レオロジー特性	ファンネルロート (500cc/500cc)	ファンネル粘性
	ファンVGメータ	見掛け粘性(AV) 塑性粘性(PV) イールドバリュー(YV) ゲルストレングス
ろ過特性	API規格ろ過試験器 (3kgf/cm ² , 30分)	ろ過水量, 泥膜厚
安 定 性	1,000ccメスシリンダー	界面高
	アクリル製シリンダー (直径10cm, 高さ70cm)	10cm毎の泥水比重

あり, その粒度分布を Fig. 2 に示す。また, Fig. 2 には浸透実験の対象地盤の材料として使用した川砂 (真比重2.68) の粒度分布も併記している。

§3. 泥水の基本特性試験結果

3-1 レオロジー特性

泥水のレオロジー特性は流体輸送系に影響し, また, 切羽の安定にも関与するため, 泥水の品質管理のための指標となっている。

Fig. 3~Fig. 5 はそれぞれ, 泥水比重とファンネル粘性, 塑性粘性及びイールドバリューの関係を示している。ベントナイト泥水の場合, 泥水比重1.05~1.10で高いレオロジー特性を示すが, 粘土泥水の場合, 泥水比重1.2以下ではファンネル粘性が19~20秒と低く, 泥水比重が1.25以上になるとファンネル粘性は増大し, 粘土の種類による差も現われる。また, 塑性粘性は各粘土ともほぼ同程度の値を示したが, イールドバリューについては粘土の種類による差が大きく現われ, イールドバリューの大小は各材料の粘土分の含有率と正の相関関係がある (Fig. 6)。

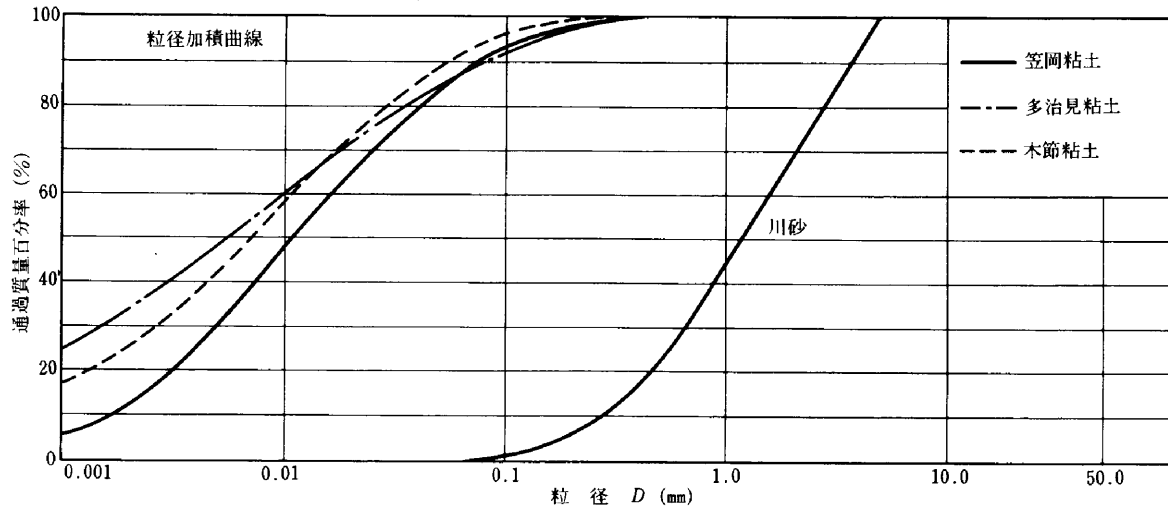


Fig.2 泥水材料の粒度分布

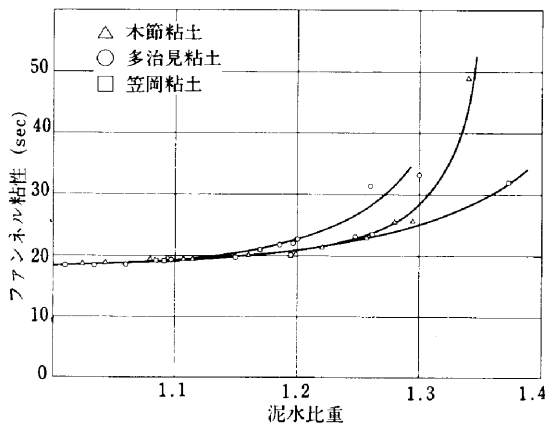


Fig.3 泥水比重とファンネル粘性の関係

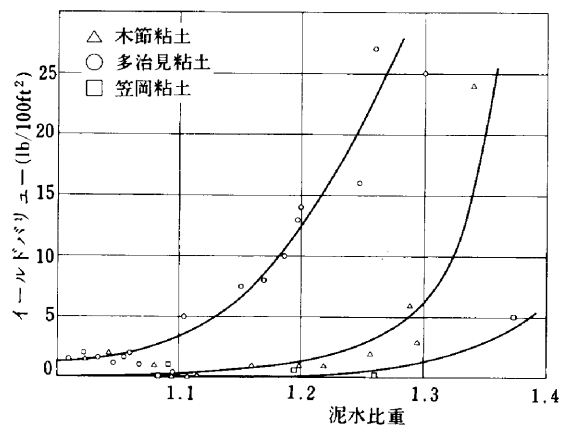


Fig.5 泥水のレオロジー特性(イールドバリュウ)

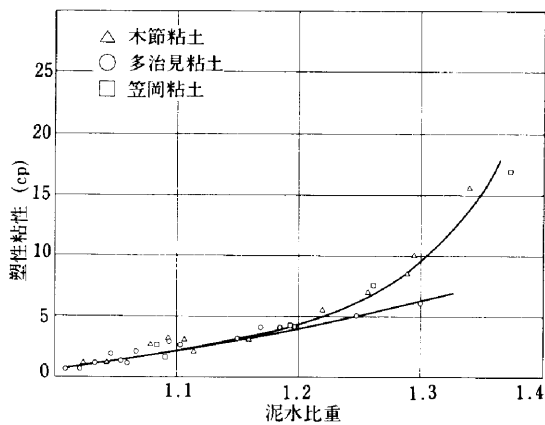


Fig.4 泥水のレオロジー特性(塑性粘性)

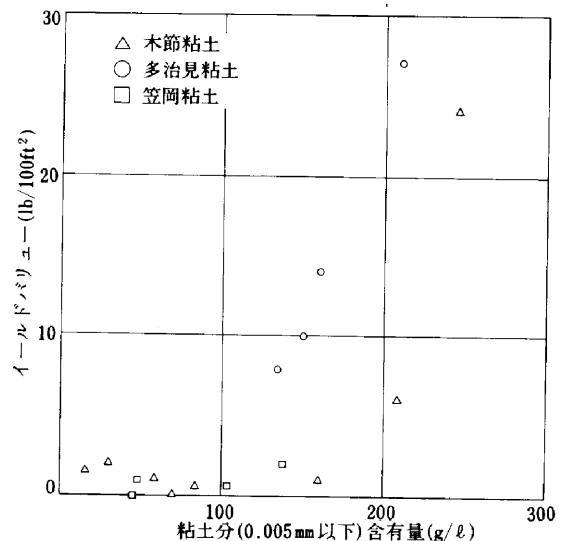


Fig.6 粘土分含有量とイールドバリュウとの関係

3-2 ろ過特性

泥水のろ過特性（造壁性）は切羽の安定に非常に重要な要素となり、ろ過水量の多少はソリッドの粒度構成や含有量及び粘性、分散状態に大きく影響される。ろ過特性を調べるため API 規格によるろ過試験 (3kgf/cm^2 , 30分)を行い、ろ過水量と泥膜厚を測定した。

その結果を Fig. 7 に示しており、泥水比重の増加に伴い泥膜はやや厚くなり、ろ過量は減少する。また、同比重の泥水の場合、粘土の種類によって泥膜の厚さは異なり、薄い泥膜ほど緻密性に優れ、ろ過水量が少ない。

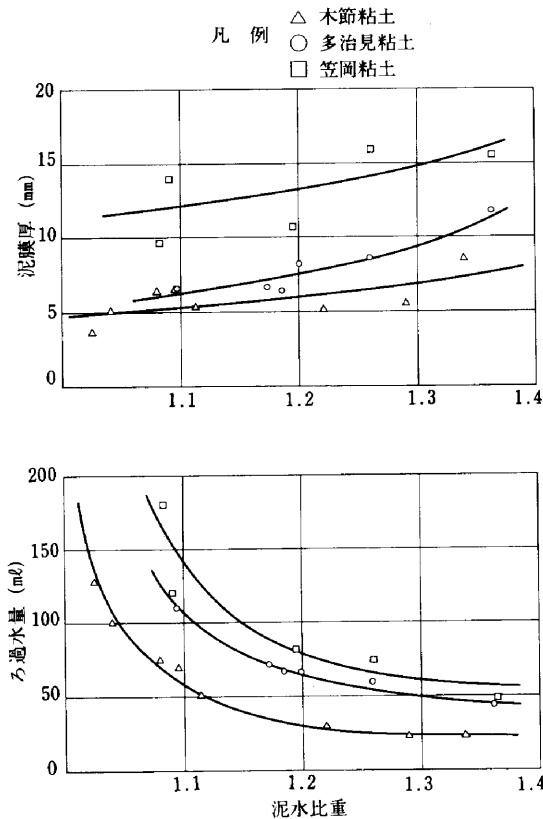


Fig.7 ろ過試験結果

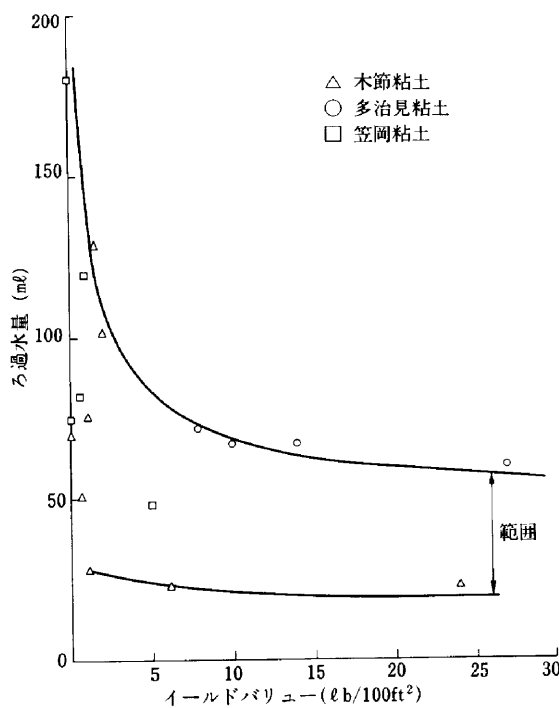


Fig.8 ろ過水量に及ぼすイールドバリューの影響

ろ過水量に及ぼす泥水のレオロジー特性の影響を調べるため、イールドバリュー及び塑性粘性とろ過水量との関係を Fig. 8, Fig. 9 に示す。塑性粘性、イールドバリューの増大によってろ過水量は減少する傾向にある。し

かし、レオロジー特性とろ過水量との関係においては、粘土の種類によってばらつきが大きく、粘性の大きいものは、ろ過水量が少ないとは必ずしも言えない。従って、ろ過水量に影響を及ぼすものは粘性だけでなく、分散性等の影響も大きいと考えられ、作泥材の選定に当っては、レオロジー特性のみならずろ過特性を十分に調べる必要がある。

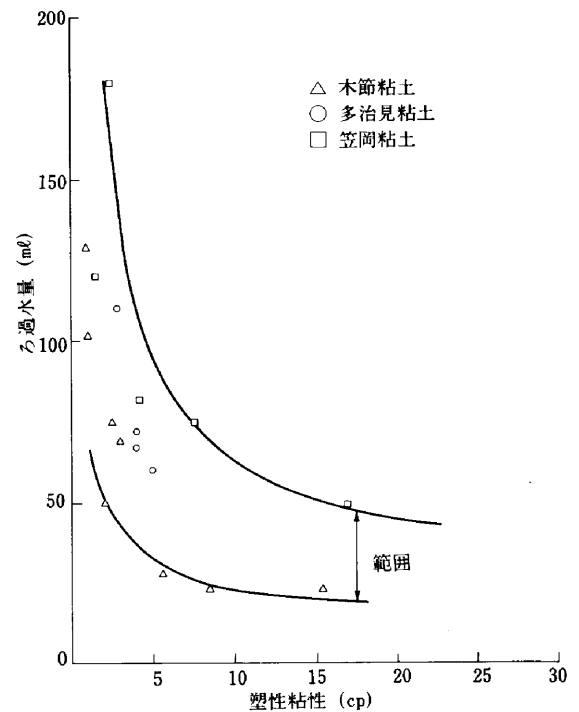


Fig.9 ろ過水量に及ぼす塑性粘性の影響

3-3 泥水の安定性

泥水の安定性は物理的な現象とイオン等の化学的な現象によって判断されるが、ここでは沈降分離に着目し物理的な安定性について検討した。泥水を長時間放置すると清水部分と懸濁液相の部分とに分離し、境界面(界面)ができる。また、土粒子の沈降によって界面から下の液相でも高さにより比重が変化している。このように、泥水の物理的な安定性も2つに分けられ、本文では前者を界面安定性、後者を比重安定性と呼ぶことにする。そして、両者の安定性試験を行い、泥水の安定性を調べた。さらに、それらろ過特性との関連性についても検討した。

(1) 界面安定性

泥水を1000mlのメスシリンダーに入れて静置し、泥水の界面高の経時変化を測定した。そして、その結果を、界面による安定度の指標として、作成試料体積 V_0 に対

する懸濁液相部 V_1 の体積率 $V_1/V_0 \times 100\%$ で表わした。6時間静置後の泥水の安定度と泥水比重との関係を Fig. 10 に示す。木節粘土及び多治見粘土の場合、泥水比重1.2以上で、笠岡粘土の場合、泥水比重1.35以上で界面安定度が100%となり、界面沈降のない安定した泥水となる。

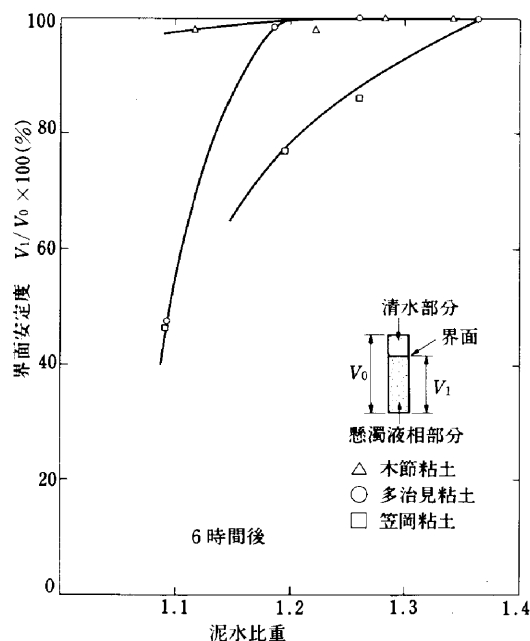


Fig.10 界面安定度と泥水比重の関係

(2)比重安定性

界面による安定性試験では、界面より下の懸濁部分における泥水の性状まで言及するには不十分であるため、高さによる比重の変化を測定し、安定性について検討した。

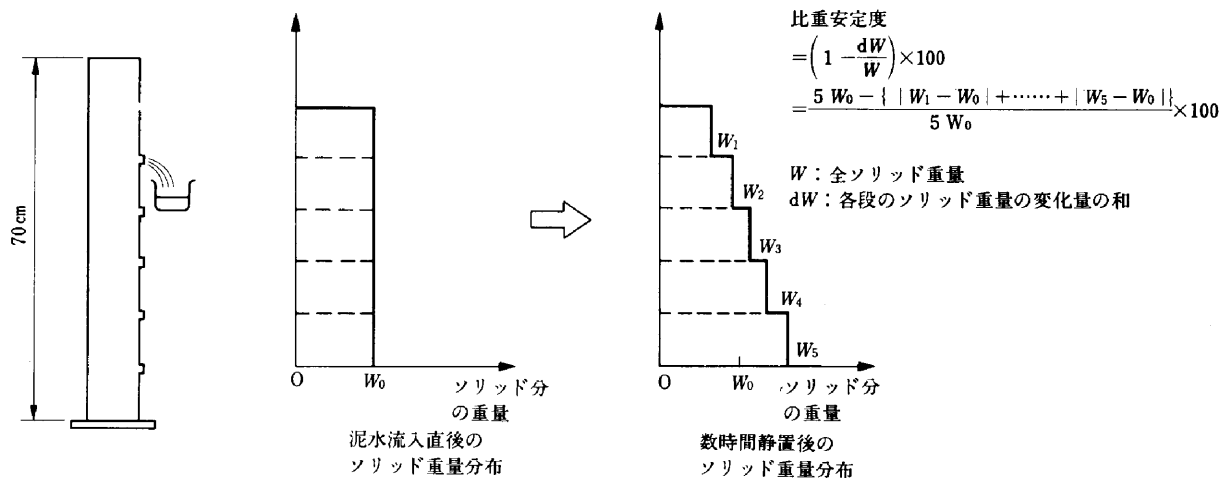


Fig.11 比重安定性試験における比重安定度

試験は径10cm、高さ70cmのシリンダーに泥水を入れ、1、3、6時間静置した後、10cmごとに泥水を抽出しその比重を測定して、各高さの泥水に含まれるソリッドの重量を求めた。そして、比重による安定度をソリッドの重量変化率 (Fig. 11 参照) で表わした。

泥水比重と6時間静置後の比重安定度との関係を Fig. 12 に示す。泥水比重の増加とともに比重安定度は高くなり、木節粘土及び多治見粘土は比重1.2以上で、笠岡粘土は比重1.4以上で安定度が100%になって、比重変化のない安定した泥水となる。

Fig. 13 には、界面による安定度と比重による安定度との関係を示しており、界面安定度と比重安定度とは正の相関関係を示しほぼ直線関係にある。ただし、界面による安定度が100%でも比重による安定度は100%にならない場合があり、界面の沈降がなくても界面以下では比重の変化が生じている場合があるので注意を要する。

(3)泥水の安定性との過水量との関係

安定性の高い泥水は造壁性も優れているものと考えられるため、泥水の安定性がろ過水量に及ぼす影響について検討した。Fig. 14 には、泥水を6時間静置した後の泥水の安定度とろ過水量との関係を示している。界面安定度が100%の場合、ろ過水量が60m³以下であるが、ろ過水量が60m³以上の場合、ろ過水量と界面安定度との関係は粘土の種類にかかわらず直線関係にある。

また、比重安定度が100%の場合、ろ過水量が40m³以下であるが、ろ過水量40m³以上では比重安定度とろ過水量はほぼ直線関係になる。

以上の結果から、泥水の安定性との過水量との関連の高いことが明らかになり、界面安定度よりも比重安定度の方がより敏感に安定度とろ過水量の関係を示している。

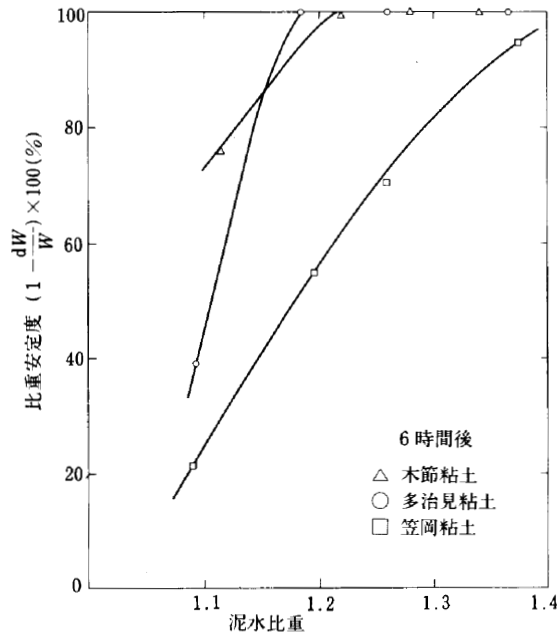


Fig.12 比重安定度と泥水比重の関係

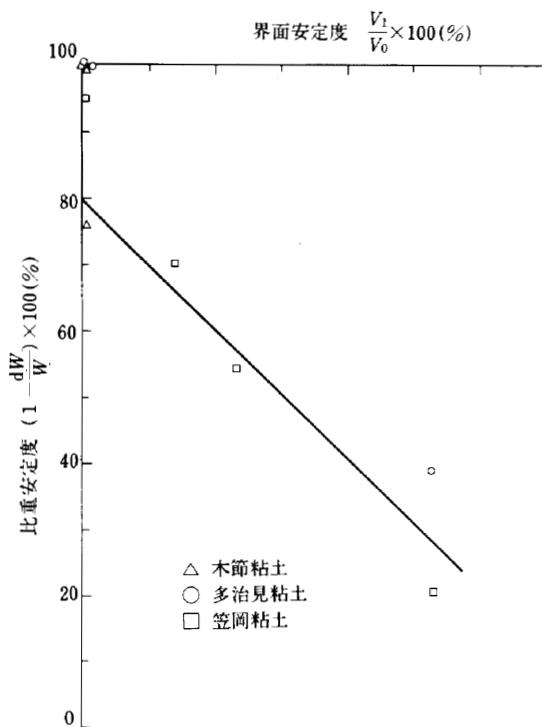


Fig.13 界面安定度と比重安定度との関係

泥水の物理的安定性には土粒子の分散性が影響し、分散性の悪い泥水はフロック沈降して間隙の大きな透水性の高い泥膜となり、分散状態にある泥水は密な泥膜となり、ろ過水量の少ない薄く強固な泥膜を形成すると考えられる。

従って、良質の泥膜を生成するための必要条件として、長時間静置しても沈降せず泥水中の比重の変化がない安

定した泥水を使用することが望まれる。そして、泥水の管理には、泥水比重及び粘性の他に、安定性も重要な指標であることが判明した。

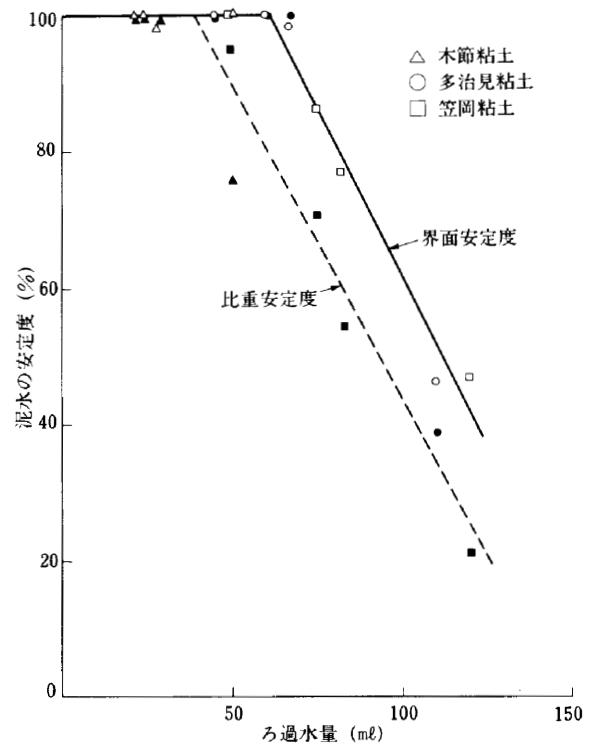


Fig.14 泥水の安定度とろ過水量の関係

§4. 浸透実験

4-1 実験方法

浸透実験装置の概略図を Fig. 15 に示す。

実験方法は直径30cm、高さ60cmの浸透槽に、厚さ35cmの川砂による対象地盤を作製した後、泥水を流入する。次に、貯泥槽の泥水を加圧し、泥水圧を地盤に作用させて、その溢水量をロードセルによって計測する。また、土圧計・間隙水圧計を地盤表面と地盤内深さ10、20cmの位置に埋設して、圧力変動を測定する。加圧の方法は、あらかじめ貯泥槽内を一定圧力にした後、バルブを開いて浸透槽に加圧する。

実験条件を Table2 に示す。

4-2 実験結果及び考察

(1) 溢水量について

Fig. 16 に泥水圧1.0kgf/cm²の場合の各粘土泥水の溢水量の経時変化を示している。泥壁のできる過程は、まず適当な粒径のソリッドが砂地盤表面に目詰りし、その上に不均一な泥壁ができ、最後に均一な泥壁ができる。そのため、加圧開始後約15秒の間に200~400mlの多量

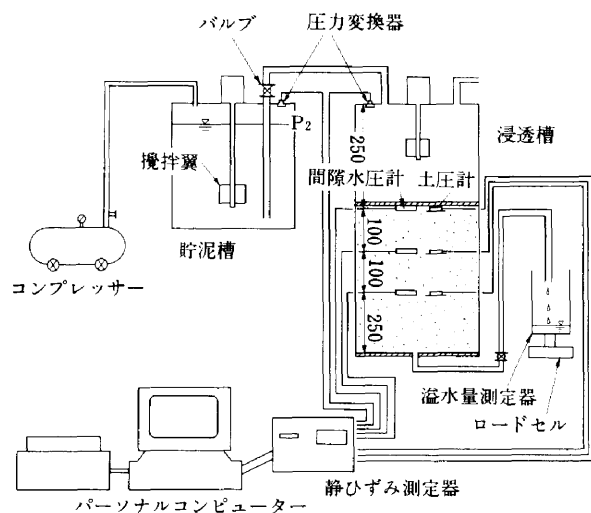


Fig.15 浸透実験装置概略図

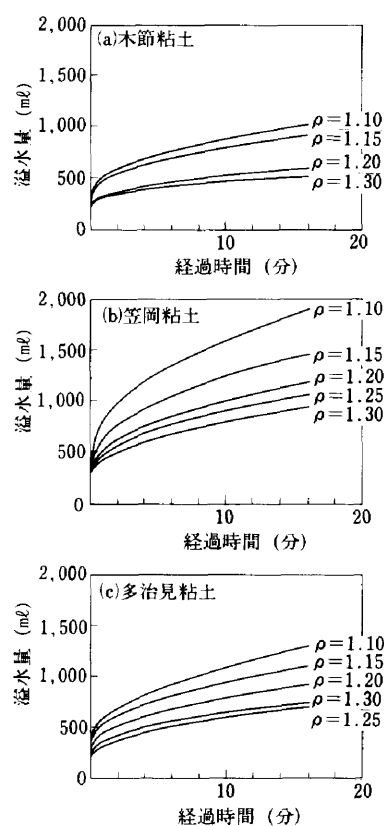


Fig.16 溢水量の経時変化 (泥水圧1.0kgf/cm²の場合)

Table2 実験条件

要因	因子	水準
泥 水	粘 土	木節, 笠岡, 多治見
	比 重	1.10, 1.15, 1.20, 1.25, 1.30
	圧力 (kgf/cm²)	0.25, 0.50, 0.75, 1.00
対象地盤	粒 度 分 布	Fig.2 に示す
	単位体積重量	1.5g/cm³

の溢水があり、その後は徐々に溢水量の増分が減少していく。初期の段階では、泥壁が完全に形成されていない

ため、溢水量の大小は粘土の種類によって大きな差はないが、均一泥壁が形成される数十秒後から粘土の種類による溢水量の差が見られ、泥壁の良否が顕著に現われる。

解析ではまず、溢水量と溢水時間との関係を次式にて検討した。

$$Q = \alpha T^{\beta} \quad (1)$$

(ml)

ここで、 Q : 溢水量 (sec)

T : 溢水時間

α, β : 回帰係数

式(1)による回帰分析の結果を Table3 に示す。 β の値に注目すると、比重および圧の影響はあまり見られないが、粘土の種類による違いが現われ、木節・多治見・笠岡の各粘土に対してそれぞれ0.18, 0.24, 0.30程度であった。従来、ろ過水量は時間の平方根に比例する¹⁾とされているが、本実験結果の溢水量においては、必ずしもこの事が言えず、溢水量で言う β の値は粘土の特性を代表するものと考ええる。

Table3 $Q = \alpha T^{\beta}$ の回帰係数

粘 土	泥水比重	泥水圧 (kgf/cm²)	α	β	相関関数
木 節	1.1	0.25	238.5	0.1980	0.9835
		1.00	157.2	0.1887	0.9886
	1.2	0.25	152.8	0.1870	0.9879
		1.00	67.1	0.2448	0.9898
	1.3	0.25	198.2	0.1283	0.9743
		1.00	88.4	0.1645	0.9943
多 治 見	1.1	0.25	210.5	0.2499	0.9885
		1.00	182.9	0.2555	0.9908
	1.2	0.25	182.4	0.2196	0.9865
		1.00	149.7	0.2211	0.9909
	1.3	0.25	138.7	0.2306	0.9862
		1.00	63.7	0.2719	0.9908
笠 岡	1.1	0.25	246.4	0.2888	0.9967
		1.00	92.5	0.3874	0.9975
	1.2	0.25	181.1	0.2621	0.9896
		1.00	95.2	0.3114	0.9959
	1.3	0.25	171.5	0.2328	0.9838
		1.00	77.3	0.2976	0.9820

次に、泥水圧の溢水量への影響を示すため、木節粘土泥水の10秒から10分後までの溢水量と泥水圧との関係を Fig. 17 に示す。泥水比重が1.10, 1.15の場合には圧力の増加に伴う溢水量の変化も大きいですが、比重が1.20以上になると圧力増加による溢水量の変化が小さくなる。従って、高濃度の泥水のように良質な泥壁が形成された場合、圧力の溢水量への影響は小さくなる。

泥水比重、泥水圧、時間のうち、どの要因が溢水量に

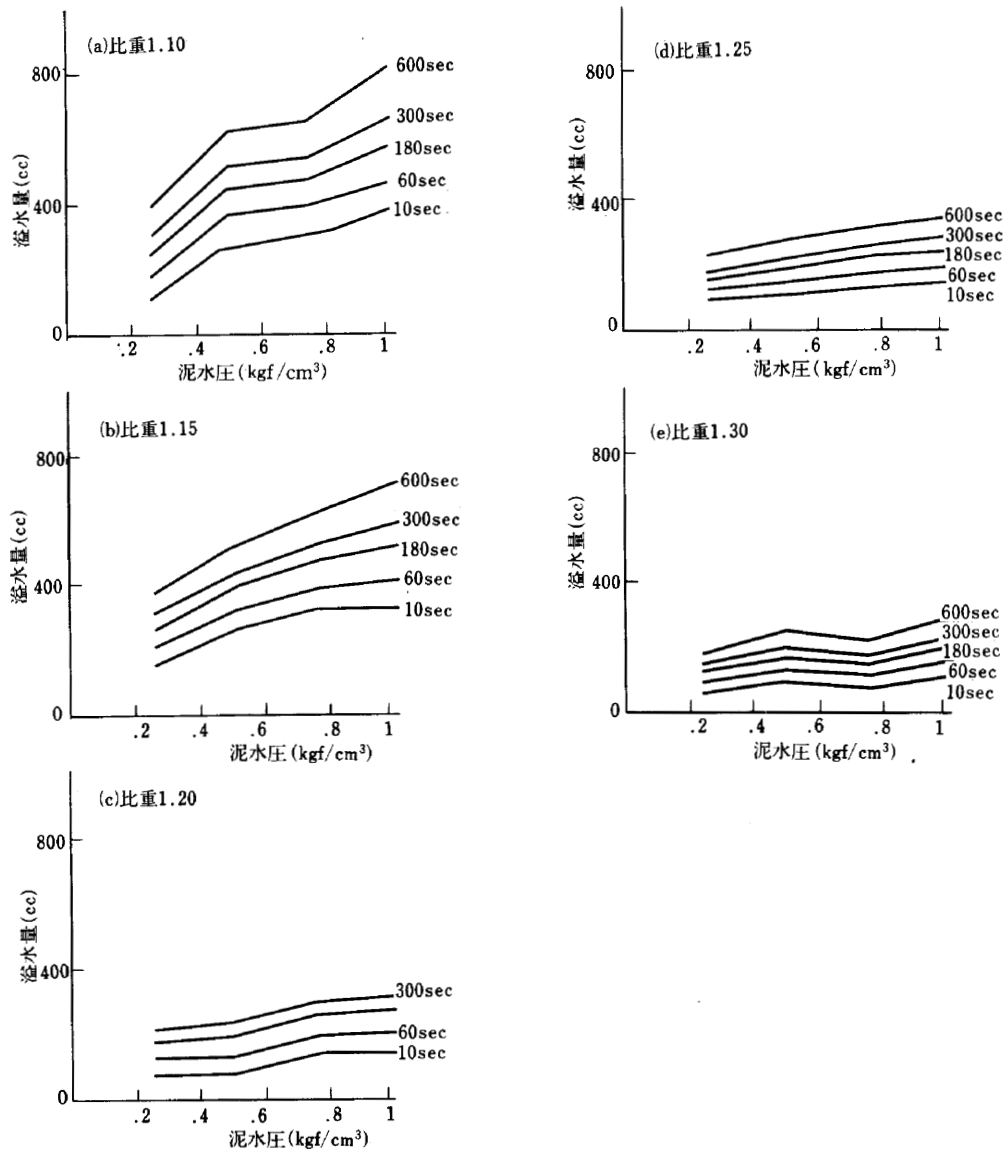


Fig.17 溢水量に及ぼす泥水圧の影響 (木節粘土)

最も影響するかを調べるため、溢水量について重回帰分析を行った⁴⁾。重回帰式として、次式を仮定した。

$$Q = a\rho^{\alpha}T^{\beta}p^{\gamma} \quad (2)$$

ただし、 Q : 溢水量

ρ : 泥水比重

T : 溢水時間

p : 泥水圧

a, α, β, γ : 回帰係数

溢水量の特性は泥壁の形成される前後で異なるため、重回帰分析は泥壁の形成時と形成後を含めたものとに分けて行い、その規準化した回帰パラメータを Table 4 に示す。その結果、初期の泥壁形成時 ($T = 0 \sim 30$ sec) には、泥水比重、溢水時間、泥水圧それぞれに関する係数 α, β, γ に大きな差は見られず、各要因が同程度の重

Table 4 重回帰式 $Q = a\rho^{\alpha}T^{\beta}p^{\gamma}$ による規準化回帰係数

サンプルデータ		α	β	γ	重相関係数
$T = 0 \sim 30$ sec	木 節	-0.176	0.068	0.111	0.906
	笠 岡	-0.114	0.127	0.096	0.971
	多治見	-0.173	0.147	0.141	0.884
$T = 10 \sim 600$ sec	木 節	-0.065	0.174	0.090	0.959
	笠 岡	-0.049	0.288	0.072	0.981
	多治見	-0.031	0.299	0.153	0.875

みで溢水量に影響している。しかし、泥壁形成時と泥壁形成後を含めたもの ($T = 10 \sim 600$ sec) との比較で、 α, β の値に注目すると、泥水比重に関する係数 α の絶対値が小さくなり、時間に関する係数 β が大きくなって、溢水時間の重みが増加する。すなわち、泥壁が形成

されると溢水時間の影響が大きくなり、反対に泥水比重の影響が小さくなる。ただし、圧力の影響を示す γ の値は、泥壁の形成時と形成後であまり変化がなかった。

このように、泥壁の形成の前後で溢水特性が大きく異なり、泥壁が形成されると溢水時間の溢水量に及ぼす影響が顕著になることが明らかとなった。

(2)土圧・間隙水圧について

地盤内の土圧・間隙水圧を測定し、これらの経時変化から、泥壁の形成によって泥水圧がどのように地盤に伝わるかを調べた。

浸透実験において測定した鉛直土圧・間隙水圧の経時変化の一例を Fig. 18 に示す。泥水圧をかけた直後は、泥水が地盤に浸透している状態にあり、そのため、地盤内の間隙水圧が上昇し、有効土圧は小さい。しかし、その数秒後には、間隙水圧は各位置ともほとんど静水圧に下り、有効土圧が増加し、この時点で泥膜が形成されて、泥水圧が地盤に有効に作用していることを示している。

泥壁形成後は、溢水量の増分がさらに減少するが、土圧及び間隙水圧の変動は見られない。従って、浸透実験において土圧及び間隙水圧の変化に注目されるのは、泥壁形成の初期過程であると考えられる。

今回の実験では、泥壁形成後においては、粘土の種類及び泥水比重によって土圧・間隙水圧の経時変化に特に差異は認められなかった。

また、Fig. 18 において示されるように、地盤中の下方の土圧の方が小さくなる傾向も認められた。これは泥壁の形成によって有効土圧が増加し、浸透槽壁面と砂の摩擦が増加した分、下方での土圧が減少したものと推定される。従って、今後は、周辺摩擦の影響がでないような大型浸透槽により、有効土圧の発生機構について議論することが必要であると考えられる。

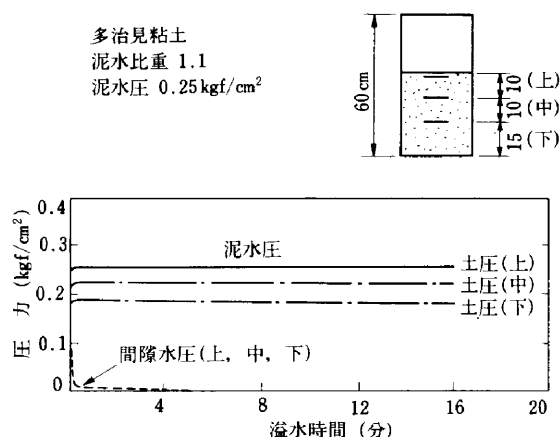


Fig.18 土圧・間隙水圧の経時変化

§5. まとめ

泥水の基本特性及び切羽の安定機構に関して、本実験結果から明らかとなった事項は以下のとおりである。

- 1) 泥水の比重を高くすることによって、粘性は増大し、ろ過水量は減少するが、粘性の高い泥水が必ずしもろ過水量が少ないとは言えない。
- 2) 沈降のない安定した泥水の場合、ろ過水量が少なく、泥水の安定性とろ過水量とは高い相関性を示した。従って、良質の泥膜を生成するための条件として、長時間静置しても界面沈降が無く泥水中の比重変動のないような安定した泥水が必要である。
- 3) 浸透実験から、泥壁形成前後の溢水の特性を比較すると、その特性が大きく異なり、泥壁の形成後は泥水比重よりも溢水時間の影響すなわち泥膜の性質そのものの影響が顕著になる。

§6. おわりに

本研究は泥水加圧シールド工法を採用するある現場における切羽の安定機構の解明、泥水の品質管理の確立を目的としてスタートし、今回は泥水的基本的な特性に関する実験を行った。今後は、対象地盤及び増粘剤・分散剤の影響についても検討する予定である。また、今回の実験は静的なものであり、掘進中における泥水の切羽に対する影響及び切羽崩壊の発生機構等の研究について、模型実験を通して動的実験を行う予定であり、その模型もすでに完成している。静的実験データの蓄積はもとより、動的実験を並行して行う予定である。

なお、本実験を進めるに当たり、御協力・応援を頂いた関東(支) 増田修一、上田昭、宮腰敏勝各氏をはじめ関係各位に深く感謝する。

参考文献

- 1) 沖田文吉：ボーリング用泥水〈新版〉、技報堂、1981
- 2) 塚田 他：シールド工法の実例、鹿島出版会、1980
- 3) 土質工学会編：土質工学における化学の基礎と応用、土質工学会、p. 217～p. 226、1978
- 4) 奥野 他：多変量解析法、日科技連、1982