

泥水特性に関する基礎的研究 (その5) (切羽の安定と泥水特性に関する実験的研究)

Fundamental Study on Characteristics of Slurry —Part 5—
(Experimental Study on the Relation between Face Stabilization and Characteristics of Slurry)

森 仁司*
Hitoshi Mori

野本 寿**
Toshi Nomoto

渡辺 徹***
Tōru Watanabe

新藤 敏郎*
Toshirō Shindō

要 約

本研究は、泥水式シールドにおける切羽安定と泥水特性の関係の解明を目的とし、間隙水圧と泥水圧をバランスさせた状態での切羽崩壊実験を行い、泥水特性の違いによる崩壊形態等について検討を行なったものである。その結果、①切羽の保持には、泥水のレオロジー特性よりベントナイト粒子によるプラスター効果が大きい、②切羽保持効果は、ベントナイト濃度2%以上ではほぼ一定となり、切羽が自立するために必要な泥水の特性値を特定できる、等が判明した。

目 次

- §1 はじめに
- §2 実験概要
- §3 実験結果および考察
- §4 まとめ
- §5 おわりに

§1. はじめに

泥水式シールドにおける切羽は、カッターによって連続して掘削され常に新しい切羽が現れる動的な現象であるため、切羽安定のメカニズムに関して、泥水がどのような役割を果たしているのか十分わかっていなかった。

このような状況の中で、切羽安定のメカニズムの解明のために、シールド模型による実験的研究も行なわれ、泥水を加圧することにより切羽面に形成されるフィルターケーキの壁面拘束効果と泥水が浸透した地山のせん断抵抗の増加による効果の有効性が立証された。しかし、泥

水の加圧にも問題があり、限度を越えた加圧は泥水の地表面への噴発や逸泥等につながる。このため、地盤の変状を起こさずに切羽の安定を図ることのできる最適泥水上圧も提唱されるに至っている。

これら一連の実験において、泥水圧が地下水圧とバランスした場合、あるいは下回った場合においても切羽が安定した状態が認められており、加圧効果以外にも切羽安定のメカニズムが存在することを暗示している。

そこで、本研究においては回転式コラムを使用し、間隙水圧と泥水圧をバランスさせた状態で切羽崩壊実験を行ない、泥水のレオロジー特性の違いによる切羽安定効果を解明することにした。

§2. 実験概要

2-1 実験装置

本研究の実験装置は、回転式のコラム、清水タンク、泥水タンク、そしてマンメータの四つから成っている。回転式のコラムは、直径30cm、高さ60cmのアクリル性の円筒で、コラム中央を中心に0.5度刻みで回転させることができる。

*技術研究部土木技術課
**技術研究部土木技術課副課長
***技術研究部土木技術課係長

清水タンクおよび泥水タンクは、0～1.8mの範囲で自由に水頭差をつけることができる。

つぎに、泥水と清水の密度差による水頭差を補正するため切羽設定面と同位置にマンノメータを取り付けてあり、これにより切羽面での泥水圧と間隙水圧の差を± $1 \times 10^{-4} \text{kgf/cm}^2$ 以下に抑えることができる。

本実験装置の概略図を Fig. 1 に、その写真を Photo 1 に示す。

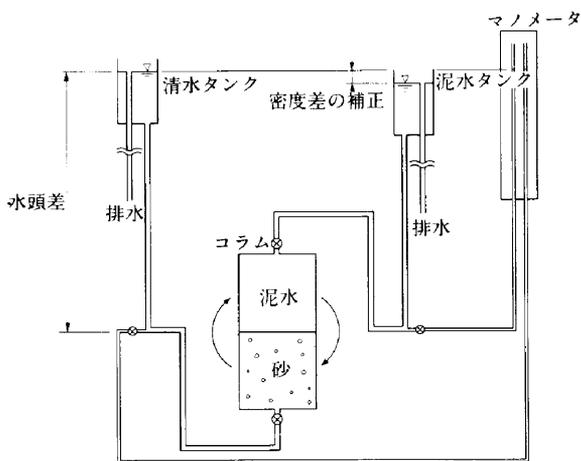


Fig.1 実験装置の概略図

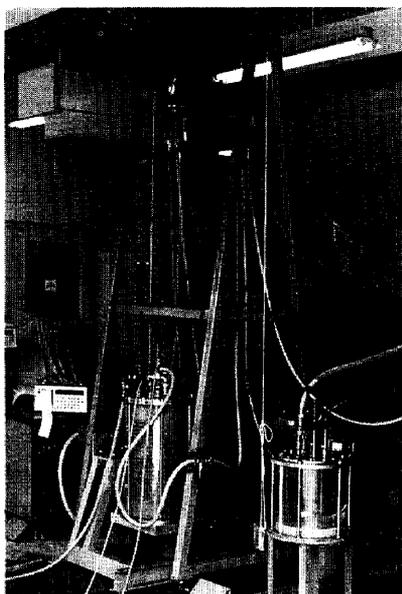


Photo 1 実験装置の全景

2-2 実験方法

2-2-1 模擬地盤

模擬地盤は、滞水砂層を想定し、飽和した豊浦標準砂を使用した。

地盤（厚さ 30cm）の作成に当っては、コラムの下部

に74 μm の金網を敷いて砂の流出を防ぎ、その上に3層に分けて一定重量の標準砂を水中落下させ、各層ごとに突き棒でよく攪拌し空気抜きした後、型枠バイブレーターにより5分間締め固め、さらに模擬地盤表面から3mmの位置まで水を抜いて実験地盤とした。

地盤試料として使用した標準砂の物理特性と実験状態を Table 1 に示す。

2-2-2 泥水の作成

本研究では、一般的な泥水のレオロジー特性が切羽安定にどのような影響を与えるかを調べるために、泥水材料はベントナイト（群馬産#300）とポリアニオンセルローズ系のポリマーの一種類づつを選択した。ベントナイト濃度は0～7%の範囲とし、各濃度に対してポリマーの添加量を変え粘性の異なる泥水を作泥した。つぎに、泥水をコラムに注入する際には、切羽面が乱れないように模擬地盤表面にろ紙を敷き、注入終了後にろ紙を静かに除去した。

2-2-3 崩壊実験

崩壊実験は、Table 2 に示した測定項目について特性試験を行った泥水をコラムに注入した後、コラム上部の泥水バルブと下部の清水バルブを同時に開き実験開始とした。つぎに、コラムをゆっくりと30度まで傾斜させて、そこから毎分1度の割合で傾斜させ、切羽面の一部が崩壊をおこした時のコラムの傾斜角度を切羽の崩壊角度とし測定を行った。

また、本実験では、切羽の崩壊角度の大小とレオロジ

Table 1 地盤試料の物理特性と実験状態

特性	土粒子比重	間ゲキ比 (e)	相対密度	透水係数 (cm/sec)
豊浦標準砂	2.64	0.746	0.622	1.43×10^{-2}

Table 2 測定項目および測定器具の一覧

測定項目	測定器具	
泥水比重	マッドバランス	
レオロジー特性	ファンネル粘性 (FV)	ファンネルロート (500cc/500cc)
	見掛け粘性 (FV)	ファンVGメータ (MODEL 135)
	塑性粘性 (PV)	
	イールドバリュウ (YV)	
ゲルストレンゲス (GS)		
ろ過特性	ろ過水量	API規格ろ過試験器 (3kgf/cm ² , 30分)
	泥膜厚	

一特性の変化の関係を調べることを目的としたため、コラムの傾斜角度が90度になり切羽が自立している場合は、崩壊なしとして実験を終了した。

§3 実験結果および考察

3-1 切羽の崩壊形態とレオロジー特性

3-1-1 実験結果

本実験では、地盤表面にフィルターケーキが形成されないこと、また、コラムの傾斜による土圧の増加が各実験において一定であることから、切羽の崩壊は、泥水のレオロジー特性の変化のみに支配されるものとする。Fig.2~Fig.6に、清水および粘性を変化させたベントナイト濃度2%泥水での切羽の崩壊形態を示す。

ベントナイト濃度 (%)	見かけ粘性 (cp)
2	4.3

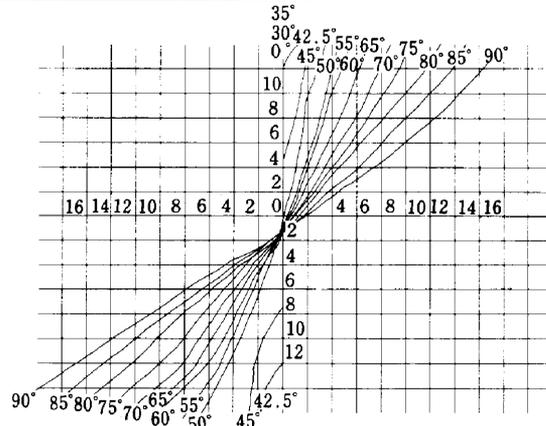


Fig.4 切羽の崩壊形態の変化

ベントナイト濃度 (%)	見かけ粘性 (cp)
真水	1.5

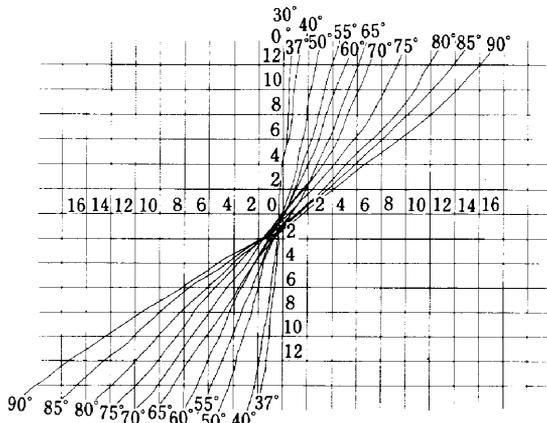


Fig.2 切羽の崩壊形態の変化

ベントナイト濃度 (%)	見かけ粘性 (cp)
2	7.5

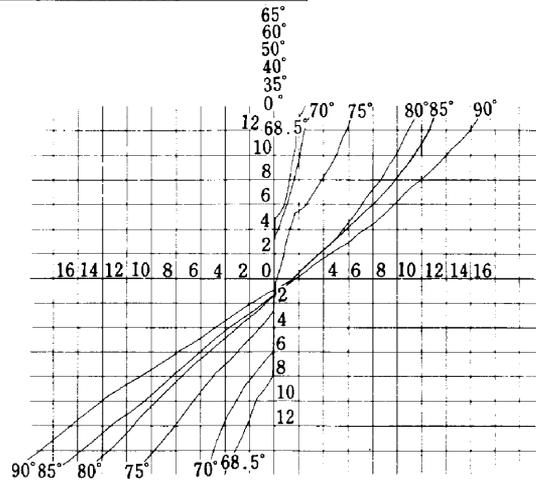


Fig.5 切羽の崩壊形態の変化

ベントナイト濃度 (%)	見かけ粘性 (cp)
2	2.0

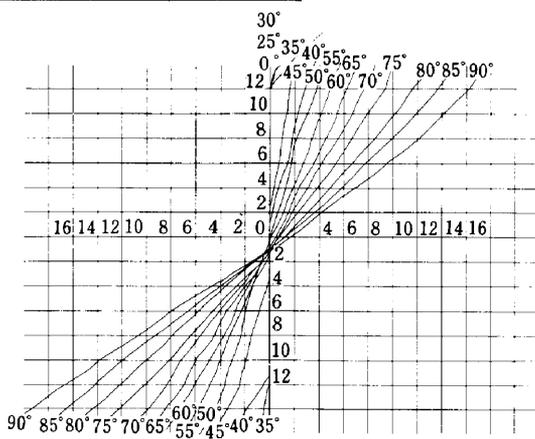


Fig.3 切羽の崩壊形態の変化

ベントナイト濃度 (%)	見かけ粘性 (cp)
2	10.0

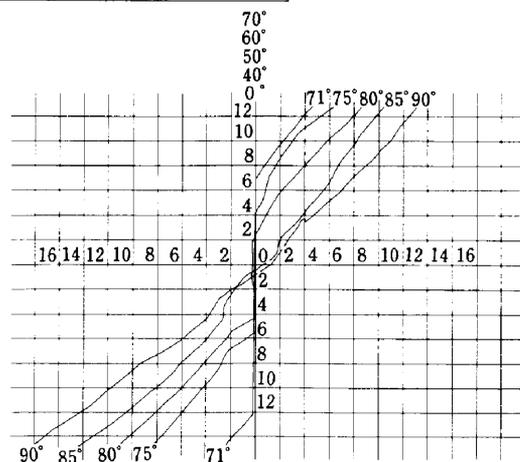


Fig.6 切羽の崩壊形態の変化

Fig.2~Fig.6 から、崩壊はいずれも切羽上部から発生し、低粘性の方が崩壊角度は小さい。また、Fig.3とFig.4に示すように、低粘性の場合は切羽表面全体が流動するような崩壊形態となる。崩壊後の切羽面は、コラムの各傾斜角度に対応した傾きで安定し、その傾きは清水の場合とほとんど変わらない。

つぎに、Fig.5とFig.6に示すように、高粘性の場合には、切羽上部のくさび形の土塊が崩壊する形態をとるようになり崩壊面の傾きも大きくなる。

3-1-2 考察

泥水が低粘性の場合、切羽の崩壊は切羽表面の砂の粒子の一つ一つが泥水中に連鎖反応のように流出することにより生じる雪崩崩壊である。また、高粘性の場合は、傾斜角度の小さいときの切羽表面の砂粒子の流出は妨げられ表面の雪崩崩壊は起こらない。しかし、傾斜角度の増大にともない土圧が増加すると、滑り崩壊を起こすものと考えられる。

3-2 崩壊角度とレオロジー特性

3-2-1 実験結果

Fig.7~Fig.12に、崩壊角度と各レオロジー特性を示す。

Fig.7から、粘性の増加に対する崩壊角度の増加の割合は、ベントナイト濃度0%に比べ1%以上の方が急激に大きくなっている。また、濃度が増加すると傾きも大きくなるが2%~7%ではほとんど一定となり、見かけ粘性15cp~20cpで切羽が自立する。つぎに、0%(ポリマー泥水)のときの崩壊角度は、20cp以下では清水の場合とほとんど同じであり、40cpまで増加しても約40度にしかならない。しかし、40cpをこえたあたりから粘性の増加にともない大きくなる。

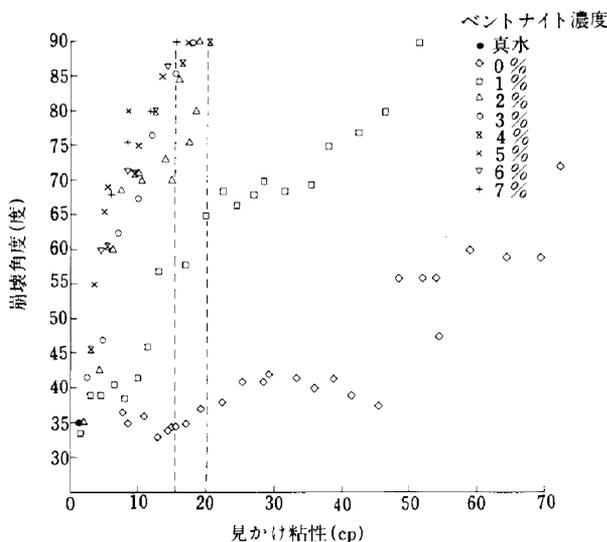


Fig.7 崩壊角度と見かけ粘性の関係

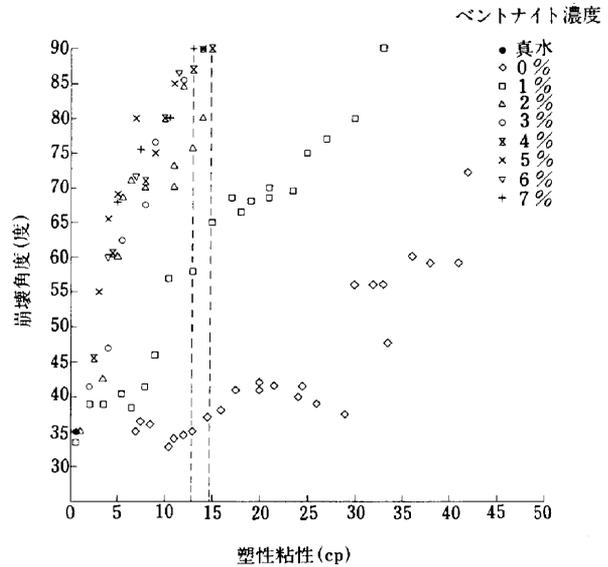


Fig.8 崩壊角度と塑性粘性の関係

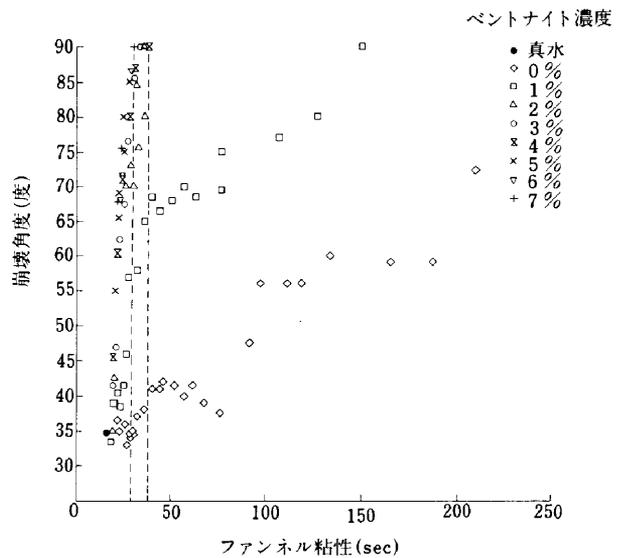


Fig.9 崩壊角度とファンネル粘性の関係

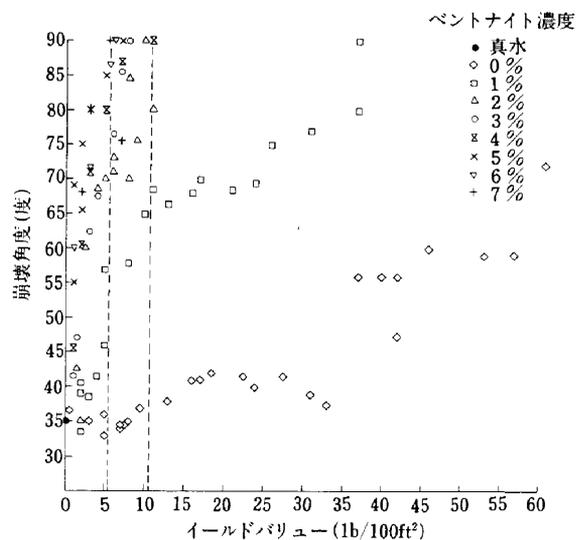


Fig.10 崩壊角度とイールドバリューの関係

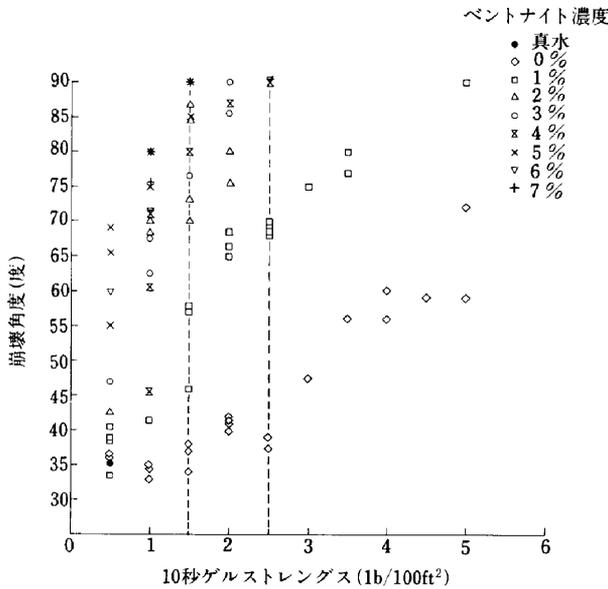


Fig.11 崩壊角度と10秒ゲルストレングスの関係

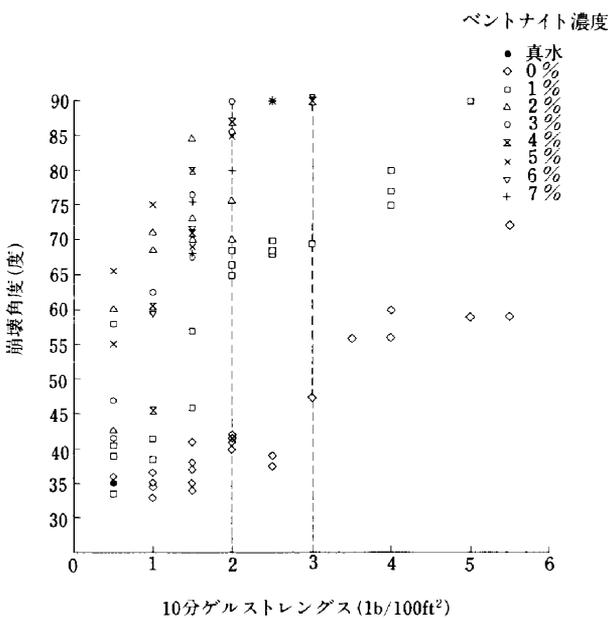


Fig.12 崩壊角度と10分ゲルストレングスの関係

Fig. 8～Fig. 12 においても、塑性粘性・ファンネル粘性・イールドバリュウ・10秒ゲルストレングスおよび10分ゲルストレングスは、見かけ粘性同様にベントナイトの添加による崩壊抑制効果がみられ、2%～7%における濃度の増加による違いもみられない。また、これらの濃度で切羽が自立した時の特性値は、塑性粘性が12.5～14.5 (cp)、ファンネル粘性が25～35 (秒)、イールドバリュウが5～10 (lb/100 ft²)、10秒ゲルストレングスが1.5～2.5 (lb/100 ft²) となりほぼ一定値を示している。

3-2-2 考察

(1) 切羽の安定に関して、ベントナイト濃度0%のポリマー泥水は、崩壊角度が見かけ粘性40cpまで清水の場合とあまり変わらず、40cpをこえたあたりから大きくなることや、イールドバリュウやゲルストレングスでも同様な傾向が見られることから、単なる流体のレオロジー特性のみではかなり高い値でも切羽面を保持することができないことがわかる。

(2) ベントナイトが添加されると崩壊角度が顕著に大きくなることから、泥水と切羽の境界面においてポリマーによって結合されたベントナイト粒子が切羽表面の砂粒子と直接接合し、砂粒子の流出を防ぐものと考えられる。ただし、ベントナイト泥水でポリマーの添加量の少ない場合は、境界面におけるベントナイト粒子の結合力が弱いため切羽面から砂粒子が流失し、清水やポリマー泥水のとときと変わらない崩壊形態を示すものと思われる。

(3) 2%～7%濃度の崩壊角度がほぼ一定となることから、結合のためのベントナイト粒子の数は一定量以上存在すればよいと考えられる。

(4) 当実験において切羽が自立する時のレオロジー特性値を求めることができたが、これらの値は、実験で用いた標準砂の粒径や締め固め度から定まったものである。したがって、地盤の条件を変化させて実験を行えば、各地盤に対して切羽が自立するために必要な泥水濃度とレオロジー特性値を見つけることができる可能性がある。

(5) 当実験では、低いベントナイト濃度でも切羽面の被膜で砂粒子の崩壊を防ぐプラスター効果がみられた。このことから、シールド模型実験で使用する泥水配合は、その模型のスケールに対して過剰とならないよう、切羽の崩壊と泥水特性との関係をより明確に把握して決めることが必要と考えられる。

§4 まとめ

切羽の崩壊と泥水特性に関する実験において明らかになったことは、以下のとおりである。

- (1) 切羽の崩壊形態は、泥水が低粘性の場合に切羽表面の粒子が流出する雪崩的崩壊であり、粘性が増加するにつれて土塊ごと滑る崩壊形態へと変化する。
- (2) 切羽の安定は、流体のレオロジー特性のみでは評価できず、ベントナイト泥水によるプラスター効果も大きな要因となる。
- (3) 切羽保持効果は、ベントナイト濃度に比例しない。本実験ではベントナイト濃度は2%以上で効果がほぼ一定となり、その時に切羽が自立する泥水の特性値を特定できた。

(4) 間隙水圧と泥水圧がバランスした条件でも、低いベントナイト濃度で切羽を十分保持できることがあるので、シールド模型実験においては、実験で使用する泥水濃度に十分配慮が必要である。

§5 おわりに

本報告では、間隙水圧と泥水圧をバランスさせた状態での実験結果を報告したものであるが、本実験によって、切羽の崩壊と泥水特性との関係の解明の糸口を得たと信じている。今後は、圧力差や地盤条件を変えた実験を行い、切羽の安定と泥水特性の関係をより明確にしていく所存である。

最後に、本実験を行なうに際し平塚製作所の寺田信義氏には多大な御助力を賜ったことに感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 森・栗原・何・木村：滞水砂層における泥水加圧シールドの最適泥水圧に関する研究 土木学会第42回年次学術講演会第3部門, pp.574~575, 1987
- 2) C.Verder:Excavation of Trench in the Presence of Bentonite suspension for the Construction of Impermeable and Load-bearing Diaphragms, Pro. Symposium Grouts and Drilling Muds in Engineering Prcticep, pp.181 ~188 , 1963