

砂質地盤における泥水式シールドの 適正泥水性状に関する研究

森 仁司¹・栗原和夫²・柴田英明³・森 麟⁴

- ¹正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)
²正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242 神奈川県大和市下鶴間2570-4)
³正会員 工修 国土館大学 工学部土木工学科 (〒154 東京都世田谷区世田谷4-28-1)
⁴名誉会員 工博 早稲田大学 理工学総合研究センター (〒160 東京都新宿区大久保3-4-1)

砂質地盤における泥水式シールドの必要泥水性状は、シールド掘進に伴う切羽地盤の過剰間隙水圧の発生量を小さくすることである。これにより、切羽安定に必要な有効泥水圧を確保し、逸泥量を少なくして地下水汚染を防止することができる。そこで、本論文では、現行の泥水管理項目およびその管理基準値の過剰間隙水圧抑制に対する有効性の有無を検討した。つぎに、地盤の間隙径と泥水の粒子径との関係を表すグラウタビリティー比（GR値）を用いて、対象地盤に対して過剰間隙水圧の発生量が小さくできる泥水性状のあり方について調査したものである。その結果、対象地盤に対して最も適正な泥水性状は、GR値14～16、泥水比重1.20、ファンネル粘性25～30秒と定めることができた。

Key Words: *slurry-type shield, face stability, excessive pore-water pressure, groutability ratio, slurry property, sandy soils*

1. まえがき

泥水式シールド工法における砂質地盤での切羽安定機構は、従来の考え方では、泥水圧により切羽面に完全な不透水性の泥膜が形成され、泥水圧が地下水圧と土圧に対抗するというものであった。すなわち、泥水圧と地下水圧の差圧がそのまま全部土圧に対抗できる有効泥水圧と考えられた^{1)・2)・3)}。しかし、筆者らの研究によれば、実際には、切羽面の泥膜はカッターにより切削され、泥水が切羽面へ浸透し、それに伴って地下水の流れが発生し、切羽地盤の間隙水圧が上昇する。特に、従来泥膜の形成性が良く有効泥水圧が生じ易いと考えられてきた透水性の小さい砂層においても、実際の現場のような長い排水距離の場合には、間隙水圧はかなり上昇して有効泥水圧は非常に小さくなることがわかった⁴⁾。また、この有効泥水圧の小さくなった切羽面全体は、カッター圧の切羽地盤内部への拡散伝達によって押さえることができ、このカッター圧が不足するのは切羽面表層部に限られる。この切羽面表層部は、泥水浸透に基づく過剰間隙水圧の発生量を小さくして有効泥水圧を確保することによって安定させる必要があることを示した⁵⁾。さらに、過剰間隙水圧を小さくすることは、逸泥量を減少させ地下水汚染防止にもつながるものである。

しかし、現在の泥水の必要性状は、比重、粘性、およびろ過特性が経験的な基準で定められているだけで、カッターの泥膜切削による切羽面の過剰間隙水圧の発生に対する考慮をしたものではない。

そこで、本研究では、泥水比重、ファンネル粘性、APIろ過水量に着目して、これらの値とシールド掘進時の過剰間隙水圧の発生量との相関性を調査し、現状の泥水管理項目およびその基準値の過剰間隙水圧抑制に対する有効性の有無を検討した。また、地盤の間隙径と泥水の粒子径との関係を表すグラウタビリティー比を用いて、対象地盤に対して過剰間隙水圧の発生量が小さく有効泥水圧を十分に確保できる泥水性状のあり方についても調査した。さらに、技術者の経験的判断に頼ることの多かった現行の泥水配合の決定方法に対して、グラウタビリティー比を用いた新しい合理的泥水配合の決定方法と現場泥水品質管理方法を提案した。

2. 従来の泥水式シールドの必要泥水性状の考え方とその問題点

泥水式シールドに用いられる現行泥水の必要性状は、連続地中壁の溝壁の安定のために用いられてきた泥水の考え方をほぼ受け継いでおり、切羽面に速

表-1 泥水の品質管理基準例

文献	特性	泥水比重	ファンネル粘性 (sec)	APIろ過特性 (cc)
塚田ら ¹⁾		1.05~1.30	25~44 地下水の影響 小 28~65 地下水の影響 大	—
佐々木 ³⁾		1.05~1.25	20~40	20 (cc)以下
奥園ら ⁶⁾		1.10~1.20	20~40	20 (cc)以下
喜田ら ⁷⁾		1.01~1.15	20~45	5~50 (cc)
二村 ⁸⁾		1.05~1.30	25~44 地下水の影響 小 28~65 地下水の影響 大	—

やかに泥膜を形成させ、安定に必要な泥水圧を有効に作用させることが重要とされている。そこで、泥水比重、ファンネル粘性、APIろ過水量の三項目に着目し、これらを管理基準の範囲内に納まるように品質管理を行っている。表-1は、文献より泥水の品質管理基準例をまとめたものである。

表から、泥水比重は、各文献により多少の違いはあるが、1.05~1.30の範囲で管理されている。泥水比重は、高いほど切羽の安定には有利であるが、泥水による流体輸送においては、送泥ポンプの負荷の増大、輸送管の閉塞、泥水処理の困難などの問題が生じるので、切羽の安定と流体輸送の両面に対して適度な比重であることが必要である。

ファンネル粘性は、20~40秒の範囲で管理されており、地下水の影響を考慮して28~65秒と粘性を高め設定している場合もある。ファンネル粘性は、大きいほど泥水の地盤への浸透抵抗を増加させ、チャンパー内の泥水の沈降分離を防止するので、切羽の安定には役立つ。しかし、ポンプ負荷の増大や土砂分離を困難にするので、比重と同様に適度な粘性である必要がある。

ろ過水量については、連続地中壁の管理基準値をそのまま踏襲して20cc以下としているものもあるが、50cc以下としているものや、その量を規定していないものもある。ろ過水量は、切羽の安定に重要であると言われているが、その量と切羽の安定との間には明確な基準がない。

したがって、これらの泥水管理基準は、主に、流体輸送上の制約から決められており、土質条件によってどの様に变化させるかは明確でないので、実際に掘削対象地盤に対して泥水配合を決定する場合や現場で泥水品質管理を行う場合の的確な指針と成り得ていないのが現状である。

そこで、カッターにより連続切削を受ける切羽を安定させ、逸泥量を少なくするには、泥水性状によ

表-2 地山試料の特性

試料名	透水性係数 k (cm/sec)	間隙比 e	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)
珪砂 5号	7.34×10^{-2}	0.440	1.47
珪砂 6号	5.02×10^{-2}	0.419	1.54
豊浦砂	1.45×10^{-2}	0.442	1.48

り、シールド掘進中の切羽地盤の過剰間隙水圧の発生量を小さくすることであるとの観点から⁴⁾、現行の泥水管理基準を評価し、掘削対象地盤に対して適正泥水性状とはどうあるべきか明確にする必要がある。

3. 過剰間隙水圧の発生量からみた現行泥水管理基準の評価

(1) シールド掘進時の過剰間隙水圧の発生量の測定方法

a) 地山試料と使用泥水

地山試料は、豊浦砂、珪砂5号、珪砂6号を用いた。表-2に地山試料の土質定数を、図-1に粒度分布を示す。締固め方法は、3層に分けて水中落下させ、各層をバイブレータで30回、突き棒で120回突き固め、土槽上端まで均一な地山を作製するように努めた。

泥水は、群馬産ベントナイト (#300) 泥水をベースとしてそれに珪砂8号、フィラー、特粉砂、木節SS粘土の各種添加材を組み合わせて作泥した。添加濃度は水重量比を用いた。図-2にベントナイトおよび各種添加材の粒度分布を示す。

b) 実験装置

図-3に模型泥水式シールド実験装置の概略図を示す。土槽は断面が27cm×27cmの正方形で、長さ80cmの箱型であり、泥水の地盤への浸透状況を観察するために土槽側面の一方をアクリル板とした。また、シールド掘進による地盤内の間隙水圧の変化を測定するために、図-4に示すように土槽壁面のシールド中心の高さに1~5cm間隔で間隙水圧計を33個配置した。さらに、排水端には、厚さ20cm、透水性係数 $k=2 \times 10^{-3}$ cm/secの脱着可能なポーラスストーンを設置し、これにより等価排水距離を変化させて、過剰間隙水圧の発生量が比較し易いように調整できる。なお、等価排水距離は、式(1)で定義される。

$$L = l_1 + l_2 \times k_1 / k_2 \quad (1)$$

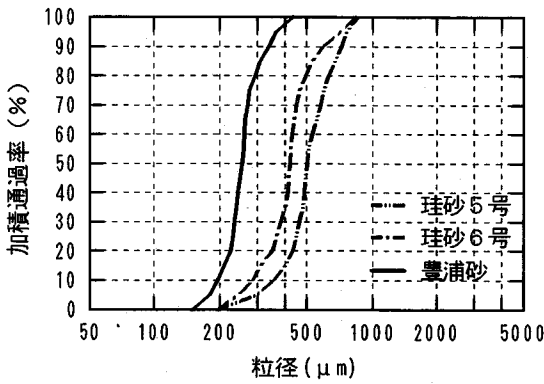


図-1 地山試料の粒度分布

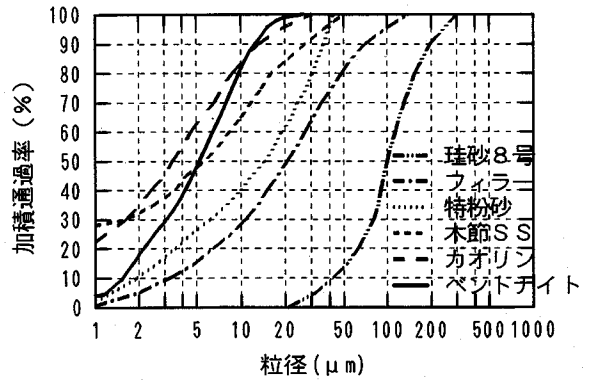


図-2 泥水添加材の粒度分布

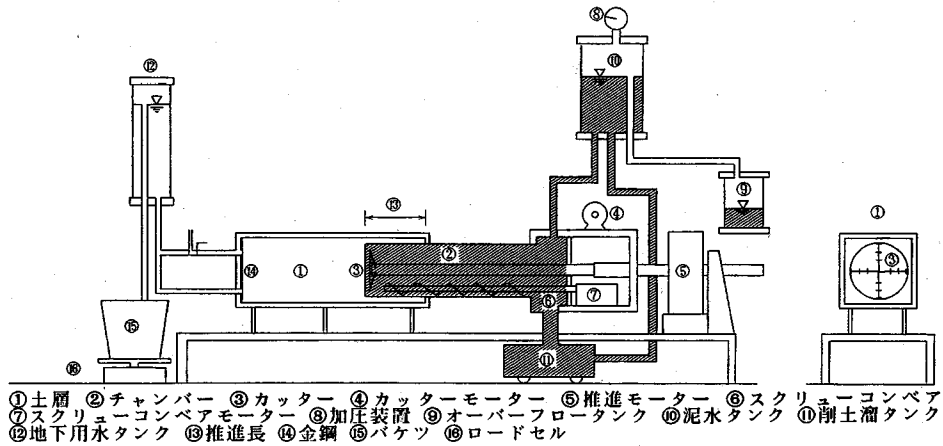


図-3 模型泥水式シールド実験装置

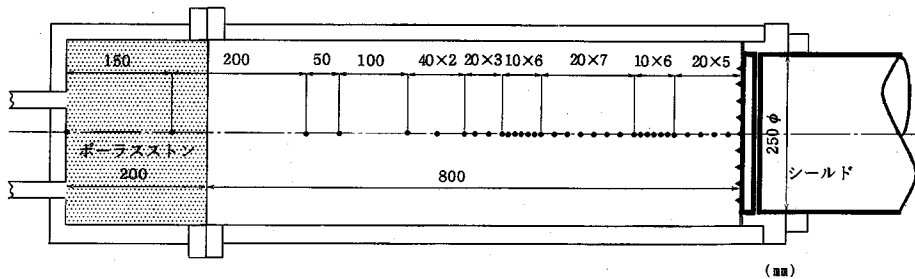


図-4 土槽側面の間隙水圧計配置図

ここで、

L : 等価排水距離 (cm)

l_1 : 土槽の長さ (cm)

l_2 : ポーラス石の長さ (cm)

k_1 : 地山試料の透水係数 (cm/sec)

k_2 : ポーラスストーン透水係数 (cm/sec)

また、シールドは直径25cmで土槽断面積に近いので、土槽内の水の流れはほぼ1次元流と考えることができる。

c) 実験方法

実験は、地山とカッターフェイスを仕切っている矢板を抜き取り、シールド機を5cmまで初期掘進させる。つぎに、泥水圧をシールド中心で 0.3 kgf/cm^2 (29.4 kPa)まで加圧し、同時に背水圧タンクによって地下水圧 0.094 kgf/cm^2 (9.2 kPa)を作用させ実験開始とし、差圧 0.206 kgf/cm^2 (20.2 kPa)、掘進速度 1.0 cm/min 、カッター回転数 1.0 rpm 、パス数2 (同一箇所の切削インターバルは30秒)に設定して、

泥水の種類のみを変化させ、5mm掘進(30sec)ごとに間隙水圧計の値とシールド掘進により地盤内に発生した地下水の流量を測定した。

(2) 現在の泥水管理基準と過剰間隙水圧の発生量との関係

表-3は、12%ベントナイト泥水をベースとしてそれに珪砂8号、フィラー、特粉砂、木節ss粘土をそれぞれ10%に統一して添加した泥水の現行の管理項目とその値を示したものである。表中の泥水A～Eは、どれも管理基準値内に入る泥水である。

図-5は、泥水A～Eを用いて珪砂6号に対してシールド掘進した場合の10cm掘進時における切羽前方の間隙水圧分布を示したものである。なお、土槽の排水端には厚さ20cmのポーラスストーンが取り付けられており、この透水係数は、珪砂6号に対して1/25であるので、等価排水距離は式(1)より580cmになる。

また、図-6は、図-5の切羽面付近の過剰間隙水圧分布を拡大したものである。

図-6より、泥水Bでは、切羽面からの距離が0における過剰間隙水圧の発生量は 0.200kgf/cm^2 (19.6kPa)で、差圧は 0.206kgf/cm^2 (20.2kPa)なので、有効泥水圧(差圧-過剰間隙水圧)としては、 0.006kgf/cm^2 (0.6kPa)と非常にわずかである。最も過剰間隙水圧の発生量の小さい泥水Eでは、有効泥水圧は 0.068kgf/cm^2 (6.7kPa)となっている。しかし、表-3の泥水性状では比重、ファンネル粘性、APIろ過水量ともに、管理基準内でほぼ同じ値である。また、泥水Bと泥水Cを比較すると、ろ過水量の少ない泥水Bの方が、過剰間隙水圧の発生量が大きくなっている。

(3) 過剰間隙水圧の発生量からみた現行泥水管理基準の評価

泥水性状が管理基準内で比重、粘性、ろ過水量がほぼ同じであるにもかかわらず、過剰間隙水圧の発生量に大きな差が生じる場合がある点について考える。

過剰間隙水圧の発生を抑えるためには、泥水の切羽地盤への浸透速度を小さくする必要がある。この浸透速度は、泥水の粘性、比重および粒径に影響される。実験に用いた泥水BとEは、ほぼ同じ粘性、比重であることから、過剰間隙水圧の発生量に大きな差が生じた原因は、泥水添加材の粒径の違いによるものと考えられ、粘性、比重の他に泥水の粒径の影響も考慮する必要がある。

つぎに、APIろ過水量は、ろ紙表面に形成される泥膜の透水性から泥水の優劣を判断するものであ

表-3 実験に用いた泥水配合および品質管理基準値

	泥水配合 (水重量比)	比重	ファンネル粘性 (秒)	APIろ過特性 (ml)
A	ベントナイト12%	1.06	36.0	12.4
B	A+フィラー10%	1.12	38.5	11.9
C	A+特粉砂10%	1.11	36.4	13.5
D	A+木節SS10%	1.11	42.3	10.4
E	A+特粉砂8%+木節SS2%	1.12	38.2	10.3

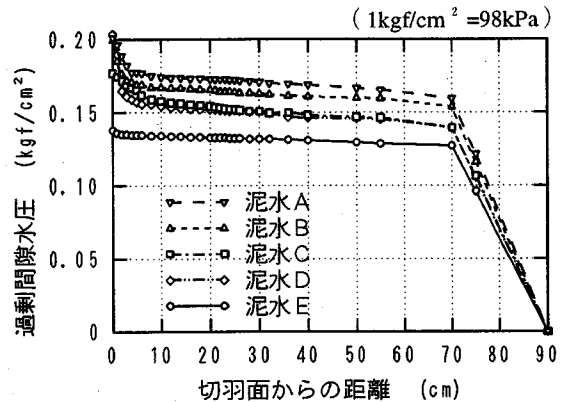


図-5 シールド掘進時における過剰間隙水圧分布(全体図)

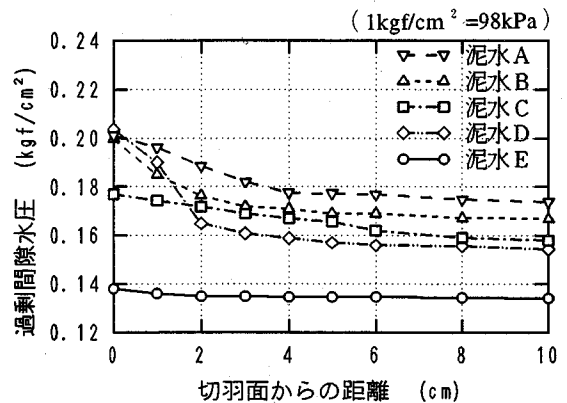


図-6 切羽前面の過剰間隙水圧分布(拡大図)

る。このろ紙の間隙は、泥水材料の粒径に比べ非常に小さいために泥水粒子はすべてろ過されてしまうので、泥水の粒径の違いによるろ過水量の差が明確にでない場合がある。一方、砂質土の間隙は、泥水粒子に対して大小さまざまであるので、泥水粒子が切羽面で詰まる場合もあれば、浸透する場合もあり、泥水の粒径の違いによって泥水浸透速度は変化し、過剰間隙水圧の発生量も大きく影響を受ける。ゆえに、APIろ過水量は、対象地盤に対する泥水

浸透速度の大きさを直接示す指標とはならない。

したがって、過剰間隙水圧の発生量を抑制することは、現行の泥水の管理基準だけでは不可能である。すなわち、過剰間隙水圧の発生量を制御するには、泥水の比重、ファンネル粘性およびAPIろ過水量の他に、地盤に対して泥水の浸透速度が小さくなるような大きさの泥水粒子を選択する管理項目と基準を現行管理基準に付加する必要がある。

4. 過剰間隙水圧抑制のために付加すべき泥水管理項目

(1) GR値（グラウトピリティー比）による泥水性状の判別

3. より、現行の管理基準の他に地盤に対して泥水の浸透速度が小さくなるような大きさの泥水粒子を選択する管理基準が必要であることがわかった。そこで、地盤の間隙径と泥水の粒子径の関係を定量的に把握するために、シールド掘進時の過剰間隙水圧の発生量を、セメント注入工法等で用いられているグラウトピリティー比（Groutability Ratio）⁹⁾を用いて評価した。グラウトピリティー比は、式(2)のように定義される。

$$GR = \frac{D_{15}}{G_{85}} \quad (2)$$

ここで、

GR：グラウトピリティー比

D_{15} ：対象地盤の粒径加積曲線の15%粒径(mm)

G_{85} ：泥水の粒径加積曲線の85%粒径(mm)

(2) 泥水のGR値と過剰間隙水圧の発生量との関係

図-7は、豊浦砂地盤をGR値の異なる泥水を用いてシールド掘進した時の切羽面付近の過剰間隙水圧の分布を示したものである。なお、添加材の添加濃度は10%とし、ファンネル粘性は30秒前後になるようにした。なお、本実験および5. の実験では、土槽の排水端のポーラスストーンは取り外して行った。

図から、最も過剰間隙水圧の発生量が小さかった泥水は、GR値16.2の泥水であった。また、このGR値よりも大きくても小さくても過剰間隙水圧の発生量は増加している。

(3) 砂地盤の違いによるGR値への影響

図-8と図-9は、図-7と同様に珪砂6号と珪砂5号地盤に対して、泥水のGR値を変えたときの過剰間隙水圧の発生量を比較したものである。

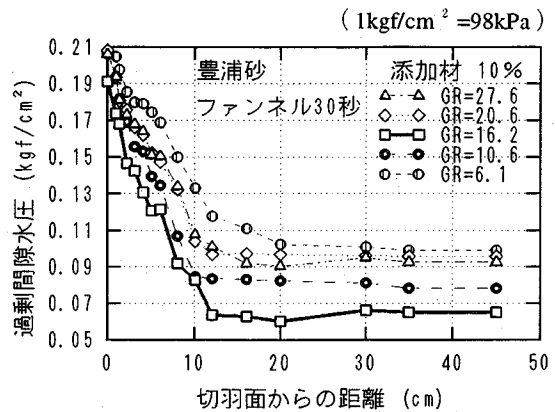


図-7 豊浦砂におけるGR値の影響

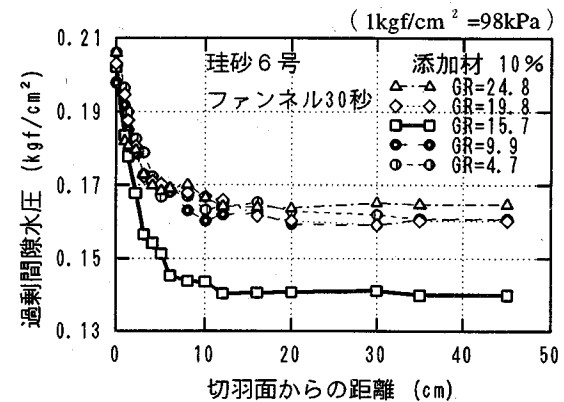


図-8 珪砂6号におけるGR値の影響

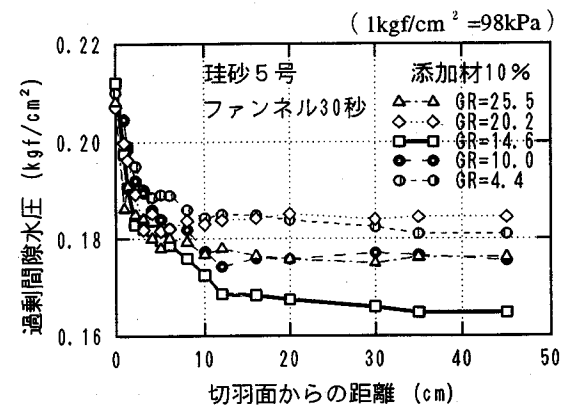


図-9 珪砂5号におけるGR値の影響

図から、珪砂6号ではGR値15.7の泥水が、珪砂5号では、GR値14.6の泥水が、過剰間隙水圧の発生量が最も小さくなっている。したがって、地盤の砂の粒径が違って、過剰間隙水圧の発生量の最も小さくなる泥水のGR値は14~16程度である。

(4) 泥水添加材濃度の違いによるGR値への影響

図-10は、珪砂5号地盤に対して、添加材の添加濃度を20%に増加させ、泥水のGR値を変化させたときの過剰間隙水圧の発生量を比較したものである。

図から、GR値14.8の泥水が、過剰間隙水圧の発生量が最も小さくなっている。したがって、泥水の濃度が変化しても、最も過剰間隙水圧の発生量の小さくなる泥水のGR値は14~16程度と変わらない。

(5) 泥水性状をGR値を用いて判定する意義

シールド掘進時の泥水性状を、GR値で評価した結果、泥水のGR値が14~16程度の場合に、過剰間隙水圧の発生量を抑制するのに最も効果があることがわかった。この理由は次のように考える。

セメント注入工法等では、セメント懸濁液のGR値が11以下では、地盤に対して不浸透状態、24以上では浸透状態としている⁹⁾。GR値が、14~16程度とは上記の不浸透状態と浸透状態の中間に当たり、この状態が過剰間隙水圧の発生量を抑制するのに最も効果があることになる。

つまり、GR値が11以下の不浸透状態では、泥水粒子は、大部分が切羽表面に詰まり、カッター切削により削り落とされてしまい、細かい粒子のみが浸透するため、過剰間隙水圧の発生量が大きくなる。また、GR値が24以上の浸透状態では、泥水粒子の殆どは、間隙を縫うように流れてしまうので泥水浸透速度が大きくなり、この場合も過剰間隙水圧の発生量が大きくなる。この中間状態であるGR値14~16では、泥水粒子の大部分は切羽表面に詰まることはなく、ある程度地盤の間隙中に浸透できる。しかし、地盤の間隙は曲がりくねっているので、粒子の大部分が切羽面近傍の間隙に詰まり、そしてこの泥水粒子の詰まった間隙が、さらに小さい粒子の浸透を抑え、泥水浸透速度を遅くして過剰間隙水圧の発生量を最も小さくすると考えられる。

従来、泥水の粒径は大きい方が泥膜が形成され易く、切羽の安定に有利であると考えられていた。山崎¹⁰⁾も、静的な浸透実験から泥膜の形成には、泥水の最大粒径が地山の粒径加積曲線の $D_{20}/3$ より大きいことが必須の条件であるとした。しかし、本実験では泥水の粒径が大きすぎても小さすぎても過剰間隙水圧の発生量は大きくなり、切羽の安定には不利であることがわかった。この両者の違いは、カッターによる切羽の連続切削を考慮するか否かの違いであり、山崎の見解は、静的な場合の言わば泥膜の形成を前提とする連続地中壁の場合に相当する。

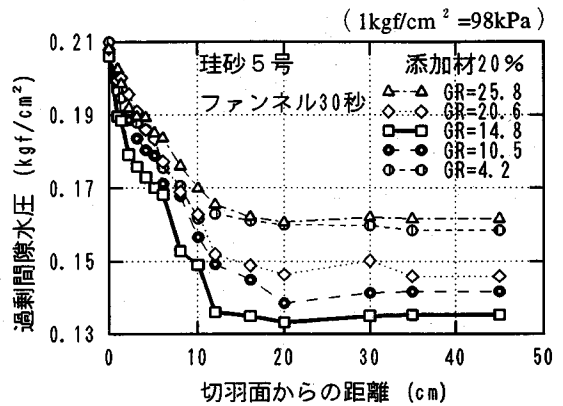


図-10 泥水添加材濃度の違いによるGR値の影響

5. 適正泥水性状について

4. において、過剰間隙水圧の発生量の大小は、泥水の比重や粘性の他に地盤の間隙径と泥水の粒子径の関係が大きく影響することを示した。また、この関係を表す指標としてグラウタビリティ比を導入し、泥水比重と粘性が同一の場合、GR値が14~16程度であれば過剰間隙水圧の発生量が最も小さくなることを明らかにした。しかし、GR値が同一であっても泥水比重や粘性が異なる場合もあり、この場合の過剰間隙水圧の発生量に与える影響も明らかにする必要がある。

そこで、5. では、泥水のGR値を最適値に固定したまま泥水比重および粘性を変化させて、対象地盤に対して最適な泥水比重、粘性、GR値の組み合わせを調査し、泥水式シールドの適正泥水性状のあり方について検討する。

(1) 泥水比重の影響

図-11は、珪砂6号地盤に対して、泥水のGR値15、ファンネル粘性30秒とし、泥水比重を1.10~1.25の範囲で変化させたときの過剰間隙水圧の発生量を比較したものである。図から、泥水比重が増加するにつれて、過剰間隙水圧の発生量は小さくなっている。しかし、比重が1.10から1.15に増加したことによる過剰間隙水圧の減少量に比べ、1.15から1.20に増加した場合はその減少量は小さくなっている。さらに、1.20から1.25に増加してもその減少量は非常に小さい。

図-12と図-13は、珪砂5号および豊浦砂地盤に対して、図-11と同様に泥水比重のみを1.10~1.25の範囲で変化させたときの過剰間隙水圧の発生量を比較したものである。珪砂5号および豊浦砂地盤にお

いても、泥水比重が増加するにつれて、過剰間隙水圧の発生量は小さくなるものの、1.20から1.25に増加してもその減少量は非常に小さい。したがって、泥水比重を1.20以上に増加させても過剰間隙水圧の減少効率はごくわずかで、最適泥水比重としては1.20程度で良いと言える。

過剰間隙水圧の発生量を小さくするには、泥水粒子が切羽近傍の内部間隙に詰まる必要があるが、これには泥水の粒子数が多い方が有利である。しかし、泥水土粒子が必要以上あっても、その分はほとんど余剰になるために、泥水比重を1.20以上に増加させても過剰間隙水圧の減少効率は非常に小さくなるものと考えられる。

(2) 粘性の影響

図-14は、珪砂6号地盤に対して泥水比重を1.20、GR値を15とし、ファンネル粘性を25～40秒の範囲で変化させたときの過剰間隙水圧の発生量を比較したものである。図から、ファンネル粘性が25秒から40秒に増加しても過剰間隙水圧の発生量にほとんど差は見られない。

図-15は、珪砂6号地盤に対して泥水の比重を1.10、GR値を15とし、ファンネル粘性を25～40秒の範囲で変化させたときの過剰間隙水圧の発生量を比較したものである。図から、泥水の粘性が増加するにつれて、過剰間隙水圧の発生量は僅かに小さくなる傾向は見られるものの、ファンネル粘性が25秒から40秒に増加しても過剰間隙水圧の発生量に大きな差は見られない。また、ファンネル粘性40秒の泥水でも、図-14の比重1.20、ファンネル粘性25秒の泥水に比べ、過剰間隙水圧の発生量は大きくなっている。このことは、過剰間隙水圧の抑制には、粘性の効果よりも泥水比重の効果の方が卓越していることを示しており、泥水比重を最適比重の1.20に保っておけば、ファンネル粘性は、泥水粒子を安定して浮遊させておける程度あれば良いと言える。したがって、最適ファンネル粘性は、25～30秒程度である。

(3) 適正な泥水性状

泥水式シールドの適正泥水性状は、連続切削を受ける切羽の安定と流体輸送の両面を満足すべきものであったが、おもに流体輸送の制約に主眼がおかれ、切羽の土質条件を十分に考慮したものではなかった。しかし、泥水の適正性状は、土質条件によってかなり変化するので、切羽の土質に対応した泥水品質管理を行う必要がある。筆者らによる過剰間隙水圧抑制のための泥水性状に関する研究結果に基づけば、対象地盤に対する適正泥水性状は、GR値が14～16

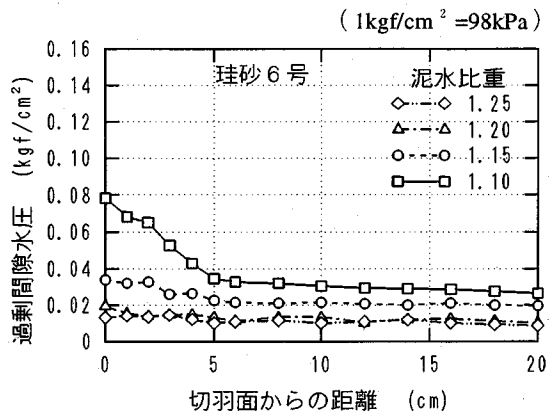


図-11 泥水比重の違いによる過剰間隙水圧への影響

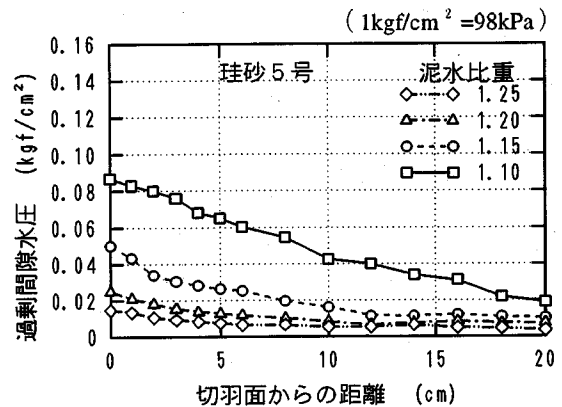


図-12 泥水比重の違いによる過剰間隙水圧への影響

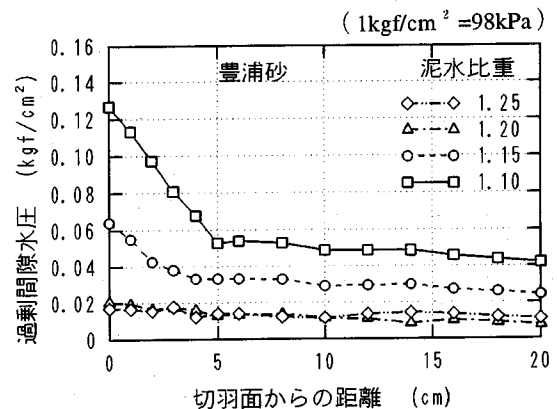


図-13 泥水比重の違いによる過剰間隙水圧への影響

程度で、泥水比重1.20程度、ファンネル粘性25～30秒と定めることができる。なお、この適正泥水性状のものは、逸泥量が最も少なく、さらに、比重およ

び粘性の両面から見て、切削土砂の流体輸送に適正な条件を備えている。

6. 適正泥水の配合方法とその品質管理について

(1) 現行の泥水配合方法とその問題点

現在、現場で使用する泥水の配合の決定は、以下の手順で行われている。

- ① ベントナイト、粘土などの泥水材料を選定する。
- ② 選定した泥水材料を組み合わせる表-1に示した管理基準を満足する泥水配合を数種類選定する。
- ③ 上記②で選定した泥水配合に対して対象地盤を用いた静的なろ過試験を行い、ろ過水量から逸泥の有無を確認し、現場泥水配合を決定する。

しかし、この現行の泥水配合決定の手順には、以下の問題点がある。

- ① 対象地盤に対して適正な泥水材料を選定する判断基準がないので、技術者の経験的な判断により選定しなければならない。
- ② 選定した泥水材料を用いて泥水配合を決める場合、現行の泥水管理基準を満足する配合は数多くでき、これらの中から数種類の配合を絞り込むのに判断基準がない。
- ③ 対象地盤を用いた静的なろ過試験のろ過水量には、管理基準がなく、さらに、静的なろ過であるので、地盤の間隙よりも大きい粒子を多く含む泥水配合は、すべて逸泥のない良好な泥水配合と判定される欠点がある。

(2) GR値の概念を付加した新しい泥水配合方法

そこで、新たに泥水のGR値の概念を付加した現場泥水配合の決定方法を提案する。

- ① 事前の土質調査項目中の粒度試験結果から、切羽通過予定地盤の D_{15} を求める。
- ② 使用するベントナトを選定し、このベントナトの粒度分布を求める。
- ③ 選定したベントナトと混合して対象地盤に対してGR値が14~16にできる粒度分布を持つ泥水添加材を2~3種類選定する。
- ④ 選定したベントナトと泥水添加材に加えて、CMCおよび分散剤を組み合わせ、泥水比重1.20、ファンネル粘性25~30秒、GR値が14~16の泥水配合を決定する。

上記の方法により泥水配合を決定すれば、対象地盤に対して過剰間隙水圧の発生量を最も小さくできる泥水配合を得ることができる。

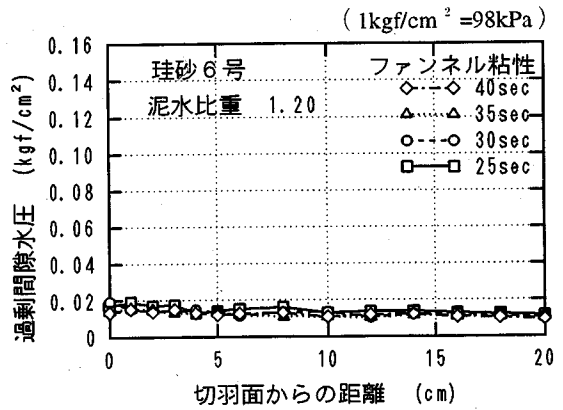


図-14 泥水の粘性の違いによる過剰間隙水圧への影響

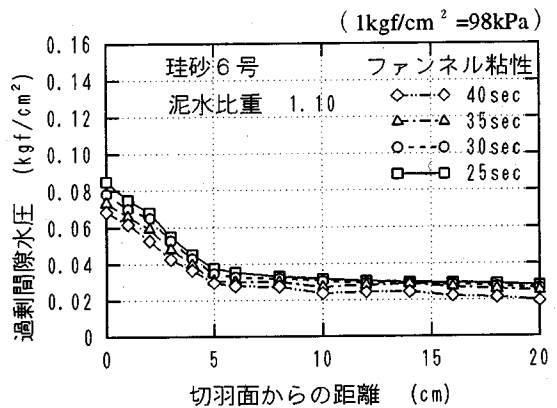


図-15 泥水の粘性の違いによる過剰間隙水圧への影響

(3) GR値項目を付加した現場泥水の品質管理方法
実際のシールド掘進時には、地山の細粒分が泥水中に混入して泥水性状が変化するが、この現場泥水に対してもGR値を用いた品質管理方法を提案する。

- ① 前節(2)の方法で求めた適正泥水配合に対して、比重、ファンネル粘性、APIろ過水量で品質管理を行い、これらの値が新液の状態から大きく変化したら、泥水の粒度分布を測定し、GR値が14~16、泥水比重1.20、ファンネル粘性25~30秒になるように泥水を再配合する。
- ② シールドの進行に伴って切羽の土質が大きく変わる場合は、現在の泥水の粒度分布を測定し、新しい切羽土質に対してGR値が14~16、泥水比重1.20、ファンネル粘性25~30秒になるように泥水を再配合する。

上記の方法で泥水の品質管理を行えば、むやみに比重や粘性を高くすることなく、過剰間隙水圧の発生量を小さくすることが可能である。また、このこ

とは、泥水浸透速度が小さくなることであるので、泥水の切羽地盤への浸透量を減少させ逸泥や地下水汚染の防止にも役立つものである。

7. まとめ

本研究では、カッターにより連続切削を受ける切羽を安定させ、逸泥量を少なくするには、泥水性状により、シールド掘進中の切羽地盤の過剰間隙水圧の発生量を小さくすることであるとの観点から現行の泥水管理項目およびその基準値の有効性の有無を検討した。さらに、地盤の間隙径と泥水の粒子径との関係を表すグラウタビリティ比（GR値）を用いて、対象地盤に対して過剰間隙水圧の発生量が小さくできる泥水性状のあり方についても調査研究した。ここで得られた主な知見は以下のようなものである。

(1) 現行の泥水管理項目である比重、ファンネル粘性、APIろ過特性がともに、管理基準内ではほぼ同じ値であるにもかかわらず、過剰間隙水圧の発生量に大きな差が生じる場合があるので、過剰間隙水圧の発生量を抑制することは、現行の泥水の管理基準だけでは不可能である。

(2) シールド掘進時の泥水性状を、セメント注入工法等で用いられているグラウタビリティ比で評価する方法を提示した。その結果、泥水のGR値が14～16程度であれば過剰間隙水圧の発生量を小さくするのに最も効果があることがわかった。

(3) GR値とファンネル粘性が同一で、泥水比重のみを1.10～1.25の範囲で変化させた場合、泥水比重が増加するにつれて、過剰間隙水圧の発生量は小さくなるものの、泥水比重を1.20以上に増加させても過剰間隙水圧の減少効率は非常に小さくなる。したがって、最適泥水比重としては1.20程度で良いと言える。

(4) GR値と泥水比重が同一で、ファンネル粘性のみを25～40秒の範囲で変化させた場合、ファンネル粘性が25秒から40秒に増加しても過剰間隙水圧の発生量にほとんど差は見られない。したがって、過剰間隙水圧の抑制には、粘性の効果よりも泥水比重の効果の方が卓越していることがわかった。

(5) 砂質地盤における適正泥水性状は、対象地盤に対する泥水のGR値が14～16程度で、泥水比重1.20程度、ファンネル粘性25～30秒と定めることができる。なお、この適正泥水性状のものは、逸泥量

が最も少なく、切削土砂の流体輸送に適正な条件を備えている。

(6) 技術者の経験的な判断に頼ることの多かった現行の現場泥水配合の決定方法に対して新たに泥水のGR値の概念を付加した合理的現場泥水配合の決定方法および品質管理方法を提案した。

最後に、本研究を進めるに当たり、早稲田大学大学院生朴宰満君および森研究室の学生諸氏、西松建設の細川勝巳君には御助力を賜ったことを心から感謝致します。

参考文献

- 1) 塚田 章ほか：シールド工法の実際、鹿島出版会、1984。
- 2) 栗原和夫：現場で役立つシールド工事、出版科学総合研究所、1988。
- 3) 佐々木道雄：わかりやすいシールド技術入門、土木工学社、1990。
- 4) 森仁司、栗原和夫、森麟、近藤啓二：泥水式シールドによる砂質切羽地盤の間隙水圧とその発生メカニズム、土木学会論文集、第430号/Ⅲ-15、pp.115～124、1991。
- 5) 森仁司、森麟、栗原和夫、小川雄二：泥水式シールドの切羽安定機構について—とくに、カッタービット間部の切羽安定問題—、トンネルと地下、第24巻5号、pp.29～35、1993。
- 6) 奥園清、白石和雄：泥水加圧シールド工法(2)、トンネルと地下、第13巻5号、pp.61～67、1982。
- 7) 喜田大三、川地武：泥水の基本特性、基礎工、VOL.10、No.5、pp.6～14、1982。
- 8) 二村敦：シールドトンネルの新技术(6)、トンネルと地下、第21巻11号、pp.67～74、1982。
- 9) 土質工学会編：薬液注入工法の調査・設計から施工まで、土と基礎シリーズ9、pp.128～129、1985。
- 10) 山崎広宣：泥水加圧シールドの切羽の安定性と掘削管理、土木学会論文報告集、第343号、pp.1～13、1984。

(1995. 11. 27受付)

THE STUDY ON SUITABLE SLURRY PROPERTIES WITH SLURRY-TYPE SHIELD DRIVING IN SANDY SOILS

Hitoshi MORI, Kazuo KURIHARA, Hideaki SHIBATA and Akira MORI

A comparative study was made on the amount of the excessive pore water pressure produced during shield excavation and values of the current management items for various types of slurry. The result of the study revealed that current management item alone are not sufficient to evaluate the slurry properties. Then, we evaluated the slurry properties during shield excavation using the groutability ratio (GR). Our study has demonstrated that the excessive pore water pressure is minimized in the case of slurry having the GR value of 14 to 16, density of 1.20, fannel viscostiy of 25 to 30 second.