

泥水工法における泥水管理に関する研究 (第10報)

—泥水の粘性に関する実験的研究—

喜田大三
川地武

概 要

泥水工法において使用するベントナイト泥水の粘性は逸泥防止, スライム生成の防止, 掘削土の分離などに関与し, 各種の分散剤などが添加されるが, これら添加剤の作用機構は充分解明されていない。そこで, 添加剤の作用機構を解明することにより, 粘性を自由に調節する技術を確認するため, 基礎的な実験を行なった。すなわち, 一般に使用する二種のベントナイトの泥水に, 分散剤 (ヘキサメタリン酸ソーダ, フミン酸ソーダ), 無機系凝集剤 (塩化カルシウム, 硫酸アルミニウム, セメント) 有機系凝集剤 (CMC, PVA, SPA) を加え, その流動特性を回転粘度計 (V・G メーター) で測定した。その結果, 泥水のみかけ粘度は分散剤の添加により低下し, 凝集剤の添加によって上昇するが, セメントを除く無機系凝集剤の過剰の添加によって低下することが判明した。添加剤の反応機構を解明するため, プラスチック粘度とイーロードバリュウを測定し, みかけ粘度はベントナイトの膨潤, 添加剤の水和, 構造形成および粒子結合の状態に支配されると推定した。

1. はじめに

泥水工法においてはベントナイトを6~10%で水に懸濁させた, いわゆるベントナイト泥水を用いて掘削壁面の安定を図りつつ, 地盤を掘削する。このベントナイト泥水は, 他の粘土懸濁液に比べて粘性, チキソトロピー性が高く, 特異な流動挙動を示すことが古くから知られている。

ボーリング分野では古くからこの特異性を利用してベントナイト泥水が使用され, とくに正循環法であるため, 掘削土の運搬との関連で高い粘性が必要とされる。しかし, 建設分野の泥水工法においては, 静止工法ではクラムシエルにより, また循環工法では逆循環法により掘削土の運搬が行なわれるため, 掘削土の運搬には高い粘性は必要とされない。

しかし, 泥水工法では壁面安定のために, 増粘剤の一種であるCMCを一般に添加し, 特に砂礫層における逸泥防止のために, 各種の増粘剤を添加している。また, 泥水中には掘削時に地下水や掘削土が, コンクリート打設時にはセメントが混入する。特にセメントは泥水はゲル化させ, 粘性を著るしく上昇させるので, ゲル化防止のために各種の分散剤が添加される。これらの添加剤は泥水の粘性を変化させるが, その作用機構については解明されないままに使用されている。さらに, 掘削土の分離のためには低粘性が, 一方, 掘削完了後からコンクリート打設までにおけるスライムの生成の防止のためには高粘性が必要とされる。

このように, 本工法の施工の各過程で必要とされる粘性が異なる。そこで, 泥水の粘性を自由に調節する技術を確認するため, 基礎的な研究を行なった。ここでは, 各種の薬品を添加した泥水の流動特性について行なった実験結果を紹介する。

2. 実験方法

2.1. 供試材料

2.1.1. ベントナイト 泥水工法においてよく使用される産地の異なる二種のベントナイトを用いた。

A: 群馬県産, 250メッシュ

B: 山形県産, 250メッシュ

各ベントナイトの理化学的性質を表-1に示す。

種類	含水比 %	粒 径 分 布 %					C・E・C m ² g /100g	置換性+水溶性陽イオン me/100g					膨潤度 g/g	pH
		>0.02 mm	0.02~ 0.01	0.01~ 0.002	0.002~ 0.001	0.001 以下		Na	K	Ca	Mg	計		
A	11.5	10.8	6.5	18.9	12.2	51.6	58.8	54.0	3.5	15.7	5.4	78.6	5.3	9.60
B	7.1	15.9	10.0	22.2	2.4	49.5	65.2	47.8	1.8	27.7	7.0	84.3	8.8	9.65

表-1 供試ベントナイトの理化学的諸性質

これらのベントナイトは, X線回折の結果から, Na型モンモリロナイトを主体とすることが判明した。ベントナイトの供試濃度は, 添加剤を加えた泥水では8% (W/V), 添加剤を加えない泥水では2~10% (W/V) とした。

2.1.2. 分散剤 現在, 泥水工法で用いられている次の二種を供試した。

D1: ヘキサメタリン酸ソーダ 0.1~2.0%

D2: フミン酸ソーダ 0.1~2.0%

2.1.3. 凝集剤 粘性上昇に効果があると予想され

た凝集剤5種およびコンクリート打設時に泥水をゲル化させるセメントを供試した。凝集剤を大別すると無機系のものはセメントを含め3種、有機系のもの3種であり、添加濃度は0.5%までとした。以下にその内容を示す。

- F1: 塩化カルシウム CaCl_2
- F2: 硫酸アルミニウム $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$
- F3: セメント (普通ポルトランドセメント)
- F4: CMC (カルボキシチルセルローズ)
- F5: PVA (ポリビニルアルコール)
- F6: SPA (ポリアクリル酸ソーダ)

有機系のものうち、F4およびF6はアニオン性、F5はノニオン性の高分子である。

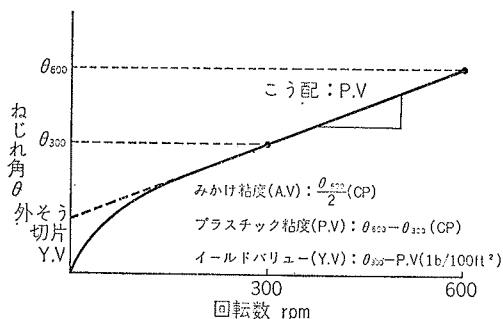
2.2 供試泥水の作成法

分散剤添加泥水の場合、水にベントナイト、分散剤を同時に加え、家庭用ミキサーで10分間かくはんし、一夜以上静置し、試料泥水とした。

また、凝集剤添加泥水の場合、まずベントナイトのみで泥水を作成し、一夜静置後、凝集剤を加えて5分間かくはんし、4日以上静置したものを試料泥水とした。

2.3 測定項目と方法

2.3.1. 流動特性 ベントナイト泥水の多くは非ニュートン流体であり、粘度は測定条件、とくにズリ速度によって変化する。そこで、従来粘度測定に用いられているファンネル粘度計にかわって、回転速度が6段階に可変の回転粘度計 (V・G メーター) を用いて、300rpm と 600rpm におけるねじれ角を測定し、三つの流動特性値、すなわちみかけ粘度 (A・V, cp)、プラスチック粘度 (P・V, cp) イールドバリュウ (Y・V, 10/100ft²) を図一1のように算出した。



図一1 V・G メーターによる流動特性値の算出法

これら三数値相互の関係は次式で示される。

$$A \cdot V = P \cdot V + \frac{A \cdot V}{9.56}$$

ここに、A・V: みかけ粘度 (cp)

P・V: プラスチック粘度 (cp)

Y・V: イールドバリュウ (ここでは

dyne/cm²)

したがって、みかけ粘度が同一の泥水でも、プラスチック粘度とイールドバリュウの割合のちがいによって性状を異にする。

なお、プラスチック粘度は泥水中の固体粒子間のマサツ、固体粒子とそれを囲む液相との間のマサツならびに液体自身のせん断によって生ずる流動抵抗であり、イールドバリュウは泥水中の粘土粒子間の引力の大きさを示すといわれている²⁾。

2.3.2. 懸濁分散性 泥水の懸濁分散性を、Na 塩溶液に対する凝集抵抗性を測定することによって求め、耐凝集能 meq/100ml として表示した。凝集剤添加泥水で耐凝集能を示さないものは、低濃度を添加した泥水の耐凝集能を測定し、これを添加濃度に対してプロットして、図上で推定値を算出し、負の耐凝集能として表示した。

3. 実験結果

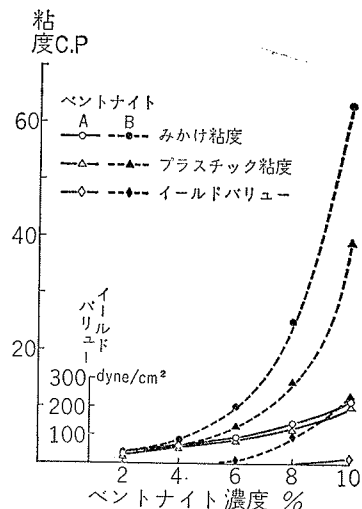
3.1. 添加剤を加えない泥水

図示しないが、流動曲線はベントナイト濃度の低いものでは原点を通る直線となるが、濃度が高くなるにつれて直線からのズレが目立つようになり、イールドバリュウを示すようになる。また、流動曲線の直線部のこの配も高濃度のものほど大きくなる。

図一2にはこれらの泥水の流動特性値を示す。みかけ粘度はベントナイト濃度の増大につれ大きくなり、特にベントナイトB泥水ではこの傾向が著しい。

みかけ粘度構成成分のひとつであるプラスチック粘度の傾向もほぼ同様であり、同一のベントナイト濃度ではベントナイトB泥水の方が大きく、この差は濃度の増大につれて大きくなる。

イールドバリュウはベントナイトA泥水では10%濃



図一2 添加剤を加えない泥水の流動特性

度のものであらずかであるが、ベントナイトB泥水では6%以上の濃度のもものでは無視できない値となり、濃度の増大につれ大きくなる。

さて、ベントナイトA泥水とベントナイトB泥水を比較すると、ベントナイトB泥水の方が高い流動特性値を示す。この原因を検討するため、表一に示したベントナイトの膨潤度の値を用いて、泥水中のベントナイトの膨潤体積と自由水の体積との比を算出した。プラスチック粘度はこの比にほぼ比例して上昇するので、添加剤を加えない泥水のプラスチック粘度は、膨潤したベントナイト粒子間のマサツに由来すると推定される。したがって、同一のベントナイト濃度でも、膨潤度の高いベントナイトB泥水の方が高い膨潤体積自由水比を示すことになり、その結果、高いプラスチック粘度を示すことになるのであろう。

また、ベントナイトB泥水は高濃度になると高いイールドバリューを示すようになり、添加剤を加えない状態でもすでに若干の粒子間結合が生じていることを示唆している。耐凝集能の測定値も、ベントナイトA 8%泥水で28meq/100ml、ベントナイトB 8%泥水で6meq/100mlであり、ベントナイトB泥水の方がより凝集的であるといえる。これらの反映として、ベントナイトB泥水では高い流動特性値を示すといえよう。

3.2. 分散剤添加泥水

3.2.1. 流動特性 図一三に分散剤添加泥水の流動特性を示す。いずれの分散剤もみかけ粘度を低下させ、特にベントナイトB泥水において低下作用が大きい。

この傾向はプラスチック粘度、イールドバリューにもみられるが、ベントナイトA泥水では分散剤無添加のものイールドバリューが小さいため、低下量は大

きくない。みかけ粘度の低下にはプラスチック粘度、イールドバリューいずれもが寄与するが、プラスチック粘度の寄与の方が大きい。

なお、いずれのベントナイトにおいても、ヘキサメタリン酸ソーダを添加すると、添加濃度1.0%で最低のイールドバリューを示し、2.0%の添加濃度ではやや高い値を示している。これはヘキサメタリン酸ソーダの塩凝集作用のあらわれかも知れない。

3.2.2. 懸濁分散性 図示しないが、既報³⁾のようにいずれの分散剤も懸濁分散性を向上させる。特に、添加濃度0.5%までの効果がすぐれ、耐凝集能は添加濃度の増大につれ、直線的に上昇する。これをうまわる添加濃度では平衡値を維持する。

3.3. 凝集剤添加泥水

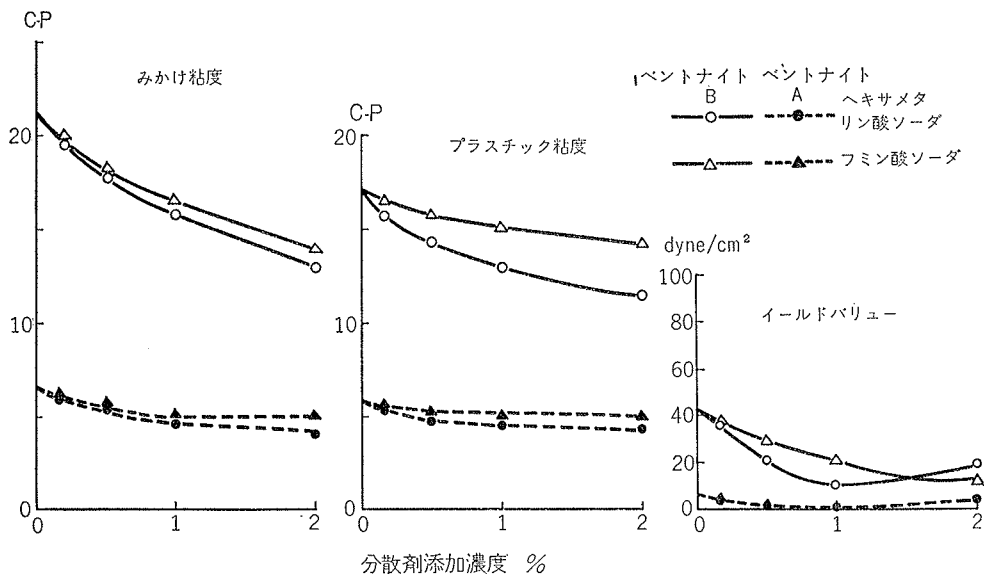
3.3.1. 流動特性 無機系凝集剤添加泥水の流動特性を図一四に示す。みかけ粘度は塩化カルシウム、硫酸アルミニウムの添加によって、ある添加濃度の範囲では、添加濃度の増大につれて上昇する。しかし、さらに高濃度の添加によって、みかけ粘度が著しく低下し、凝集剤無添加泥水より小さな値となる。みかけ粘度が最大値を示す凝集剤の添加濃度は、硫酸アルミニウム添加泥水で0.2%前後であり、塩化カルシウム添加泥水ではベントナイトBで0.05%前後であり、ベントナイトAでは明瞭でない。

また、これらの泥水ではイールドバリューはみかけ粘度と同様の傾向を示すが、プラスチック粘度は凝集剤添加濃度の増大につれ低下する。

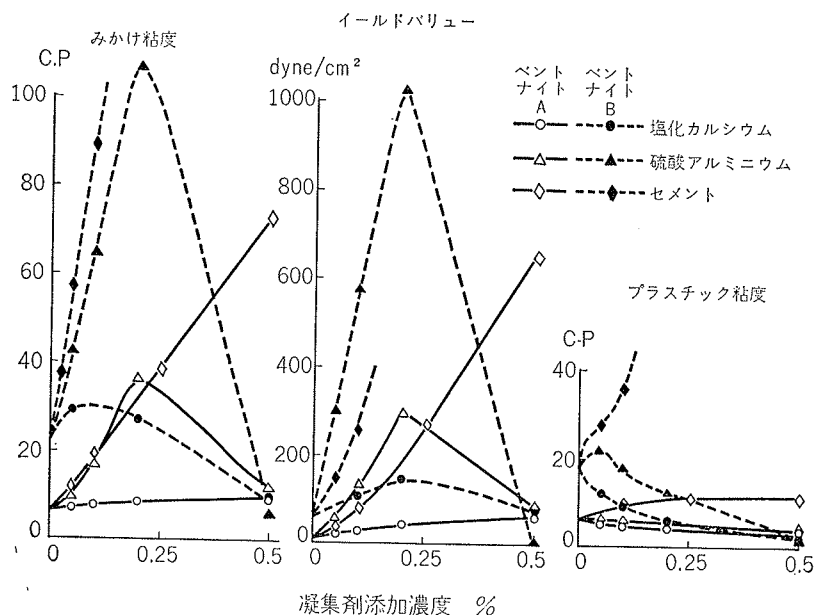
したがって、塩化カルシウム添加泥水、硫酸アルミニウム添加泥水におけるみかけ粘度の上昇はイールドバリューの上昇に由来するといえる。

コンクリート打設時に泥水中に混入するセメントは、みかけ粘度、イールドバリューおよびプラスチック粘度いずれをも上昇させ、ベントナイトA泥水では0.5%、ベントナイトB泥水では0.1%の混入でみかけ粘度が70c.p前後となり、泥水をゲル化させる。

有機系凝集剤添加泥水の流動特性を図一五に示す。有機系凝集剤はみかけ粘度を、その添加濃度にほぼ比例して上昇させ



図一三 分散剤を添加した泥水の流動特性



図一四 無機系凝集剤を添加した泥水の流動特性

る。上昇効果はポリアクリル酸ソーダで特に大きく、従来粘性増進剤として使用されてきた CMC の効果は他のものより大きいとはいえない。

プラスチック粘度も有機系凝集剤の添加によって上昇し、その効果は SPA>PVA>CMC の順位となり、ポリアクリル酸ソーダの効果が大きい。また、イールドバリューも有機系凝集剤の添加によって上昇するが、上昇効果には大きなちがいが無い。

3.3.2. 懸濁分散性 当然ながら、いずれの凝集剤も懸濁分散性を低下させる。その作用は無機系のものでは硫酸アルミニウムが、有機系のものではポリアクリル酸ソーダが最も大きい。泥水の耐凝集能をゼロすなわち完全凝集させるのに要する凝集剤の添加濃度は、無機系のもので0.1~0.2%、有機系のもので0.05~0.2%であり、無機系、有機系のちがいはわずかである。

4. 考察

以上の実験結果をもとに、各添加剤の作用機構について検討を加える。

4.1. プラスチック粘度

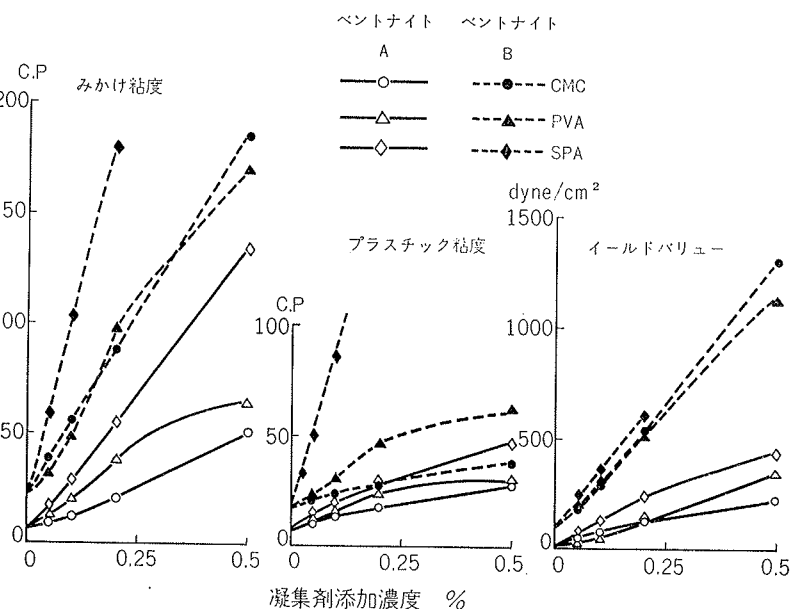
図一六に泥水のプラスチック粘度を耐凝集能に対してプロットした。分散剤添加泥水では耐凝集能の上昇につれ、プラスチック粘度が低下する。また、セメントを除く無機系凝集剤を添加した泥水では、耐凝集能の低下につれプラスチック粘度が低下する。一方、セメントおよび

有機系凝集剤を添加した泥水では耐凝集能の低下につれ、プラスチック粘度が上昇する。

さて、泥水のプラスチック粘度は固体粒子間のマサツなどに由来するといわれ、3.1.で述べたようにベントナイトの膨潤体積と自由水の体積の比が重要であると思われる。ここで供試した硫酸アルミニウム、塩化カルシウムのアルミニウムイオンおよびカルシウムイオンは多価カチオンとして、ベントナイトの膨潤を抑制し、またいくつかの粘土粒子の集合したタクトイドを形成する⁴⁾⁵⁾といわれている。このため、ベントナイトの膨潤体積を低下させ、自由水を増加させる。したがって、粒子間マサツが低下し、プラスチック粘度の低下をもたらしたと考えることができる。

一方、有機系凝集剤はそれ自身がベントナイトより高い水和度を示し、泥水中ではこの水和のために自由水が減少する。このためにプラスチック粘度の極端な上昇がみられたと思われる。

また、これらの凝集剤はいずれも粘土粒子を連結させる作用があるといわれ⁶⁾、V・Gメーターで測定する際のズリ速度ではこの粒子間連結を切断できないためにプラスチック粘度の上昇を示している可能性がある。事実、他のものに比べて水和度の低い PVA が CMC



図一五 有機系凝集剤を添加した泥水の流動特性

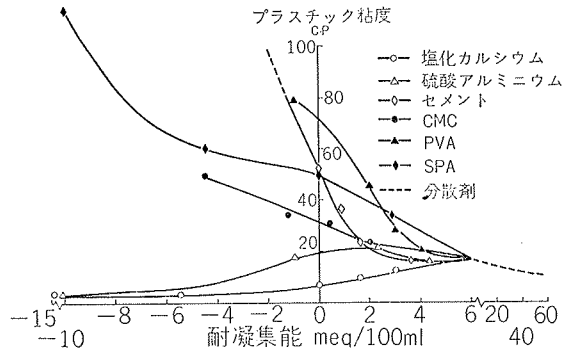


図-6 泥水のプラスチック粘度と耐凝集能との関係 (ベントナイトB)

より高いプラスチック粘度を示すことは、この推定の根拠を与えるといえよう。

セメントは水和の際に自由水を減少させるが、水量はわずかなものである。したがって、セメント添加泥水のプラスチック粘度の上昇は、セメントにも粘土粒子連結作用があることを示唆している。

なお、わずかであるが分散剤にはプラスチック粘度低下作用が認められるが、分散剤も泥水中では一部が解離してイオン化し、イオン濃度の上昇によってベントナイトの膨潤を抑制している可能性もある。

4.2. イールドバリュウ

図-7に泥水のイールドバリュウを耐凝集能にプロットした。イールドバリュウは耐凝集能がゼロ付近までは、耐凝集能の低下につれて大きくなるが、これより耐凝集能が低下すると、塩化カルシウムおよび硫酸アルミニウムを添加した泥水ではイールドバリュウが低下し、有機系凝集剤およびセメントを添加した泥水では、イールドバリュウの低下は認められない。

さて、イールドバリュウは泥水中の粘土粒子間の結合、とくに低いズリ速度で切断されるファンデルワールス力による結合に由来する。ところが、泥水中の粘土粒子間には静電反発力とファンデルワールス力が作用し、分散状態では前者が、イオン濃度の増大、多価カチオンの存在により凝集状態になると後者が優勢となるといわれる⁷⁾。

分散剤添加による耐凝集能の上昇は反発力を増大させることによって、図に示されるように、イールドバリュウを低下させる。

一方、塩化カルシウム、硫酸アルミニウムは泥水中のベントナイト粘土粒子の静電反発力を低下させることにより、泥水を凝集化させ、凝集化の進行につれてイールドバリュウが上昇する。しかし、さらに凝集化が進行すると、前述したように、粘土粒子がいくつか集ったタクトイドが形成され、みかけ上の粒子数が減少する。このため粒子間引力も小さなものとなるため、

イールドバリュウの低下がみられると解釈される。

なお、硫酸アルミニウム添加泥水ではイールドバリュウの最大値が極めて大きい。これは、上述の凝集効果以外に、水酸化アルミニウム重合物の生成にもとづく結合作用のあらわれと考えられる。すなわち、アルミニウムイオンは溶液のpHが中性から弱アルカリ性の領域で水酸化アルミニウム重合物となるといわれ⁸⁾、この重合物は高分子カチオンとしての性質をもつ。そして、硫酸アルミニウム添加泥水中ではアルミニウムイオンと水酸化アルミニウム重合物が泥水のpHによって存在割合を変えて共存している。耐凝集能がややマイナス側ではpHは6.5前後であり、水酸化アルミニウム重合物が優勢であるため高いイールドバリュウを示したものと考えられる。

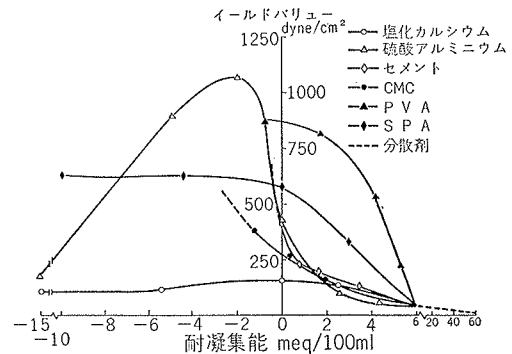


図-7 泥水のイールドバリュウと耐凝集能との関係 (ベントナイトB)

有機系凝集剤がイールドバリュウを上昇させることは、有機系凝集剤が形成する粘土粒子間結合には低いズリ速度で切断される結合も含まれることを示す。すなわち、有機系凝集剤はプラスチック粘度の上昇にあらわれる強い粒子間結合とともに、イールドバリュウの上昇にあらわれる弱い粒子間結合を形成するといえる。

なお、セメント添加泥水の場合、ゲル化が著るしく、耐凝集能がマイナス側のイールドバリュウは測定できなかったが、セメントは有機系凝集剤と同様の作用機構を持っているようである。

ところで、泥水のみかけ粘度はプラスチック粘度とイールドバリュウで構成されるが、以上の考察からも明らかのように、各種添加剤はこれらの成分の一方あるいは両方を変化させることによって、みかけ粘度を変化させる。得られるみかけ粘度がいづれを主体とするかによって、みかけ粘度が同一でも、その流動特性が異なる。すなわち、イールドバリュウを主体とするものは粘度のズリ速度依存性が大きく、プラスチック粘度を主体とするものは、粘度のズリ速度依存性が小さい。そこで、各種添加剤を加えた泥水のみかけ粘度

がいづれを主体とするかを検討すると、分散剤あるいは有機系凝集剤を添加した泥水では、プラスチック粘度の寄与が大きく、無機系凝集剤を添加した泥水ではイールドバリュウの寄与が大きいようであるが、この点についてはさらに詳細な検討が必要である。また、今回供試した各種添加剤を実用に供するためには、現場の各施工過程におけるズリ速度の範囲、望まれる最適な流動特性の検討あるいは、凝集剤などを添加した泥水の流動特性の経時変化、また添加剤が示す他の性能および経済性などの検討が必要であろう。

5. まとめ

泥水工法において使用するベントナイト泥水は特異な流動特性を示し、この流動特性は泥水の循環、掘削土の分離、スライムの生成あるいは逸泥防止に関与するが、使用中に変化する。そこで、泥水の粘性変化の機構を解明するとともに、粘性を自由に調節する方法を確立するため、基礎的な実験を行ない、以下に列挙する知見を得た。

- i) 添加剤を加えない泥水では、ベントナイト濃度の増大につれ、みかけ粘度が上昇し、上昇程度はベントナイトB泥水の方が大きい。みかけ粘度の上昇は主としてプラスチック粘度の上昇によるものである。ベントナイトA、B両泥水の流動特性の差異についても考察を加えた。
- ii) 分散剤は泥水のみかけ粘度を低下させ、このみかけ粘度の低下はプラスチック粘度、イールドバリュウ両方の低下に由来する。
- iii) 塩化カルシウム、硫酸アルミニウムはある添加濃度まではみかけ粘度を上昇させるが、過剰の添加によりみかけ粘度を低下させる。これらを添加した泥水のイールドバリュウの変化はみかけ粘度の変化と同様の傾向にあり、プラスチック粘度は添加濃度の増大につれ低下する。
- iv) セメントはみかけ粘度、イールドバリュウ、プラスチック粘度いずれをも上昇させる。
- v) 有機系凝集剤は、みかけ粘度、イールドバリュウ、プラスチック粘度いずれをも上昇させ、特にポリアクリル酸ソーダの効果が著しい。
- vi) 添加剤の作用機構はいくつかに分類することができ、分散剤は泥水中の粒子間反発力の増大により

イールドバリュウを低下させ、塩化カルシウムと硫酸アルミニウムは、粒子間反発力を低下させて凝集構造を発達させることによりイールドバリュウを上昇させるとともに、タクトイド形成、膨潤抑制によりプラスチック粘度を低下させる。また、有機系凝集剤は泥水中で水和するとともに粘土粒子を連結することにより、プラスチック粘度を上昇させ、同時に粒子間反発力を低下させることによりイールドバリュウを上昇させる。セメントは有機系凝集剤と類似の効果を示すが、その作用機構についてはさらに検討する必要がある。

おわりに、本研究における実験を担当した結城恒子職員に心から感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 後藤 廉平：ベントナイトのレオロジー特性、ベントナイト、10周年記念特集号、26 (1970)
- 2) P. F. CHANEY et al: The Chemical Treatment of Drilling Fluids, World Oil, Jan and Feb. 1, (1954)
- 3) 喜田 大三・川地 武：各種の泥水分散剤の性能比較、泥水工法における泥水管理に関する研究 (第8報)、大林組技研報 No. 4, 107 (1970) 第6回土質工学研究発表会講演集, 683. (1971)
- 4) A. BANIN and N. LAHAV: Optical Study of Particle Size of Montmorillonite with Various Adsorbed Cations, Nature, 217, 1146 (1968)
- 5) N. MUNGAN and F. W. JESSEN: Studies in Fractionated Montmorillonite Suspensions, 11th Nat. Conf. on Clays and Clay Minerals, 290, (1963)
- 6) 喜田 大三：粘土をつなぐ高分子, 高分子, 13, 306 (1964)
- 7) H. VAN OLPHEN: An Introduction to Clay Colloid Chemistry, 89-108, John Wiley & Sons (1963)
- 8) V. E. NASH: Role of Exchangable Cations in Viscosity of Clay Suspensions, 7th Nat. Conf. on Clays and Clay Minerals, 328 (1959)