

泥水工法の問題点とその考察

— ベントナイト泥水の性質との関係 —

大塚 義之
松田 昌三

§ 1. はじめに

泥水工法とは、主に、基礎くい、建物の地下壁、山止め壁などを造成する目的で掘削を行なう場合に、ケーシングを使わないで、ベントナイト泥水のような粘性の高いコロイド溶液を掘削孔内に満たし、孔壁の安定をはかりつつ掘削を行なう工法である。

ケーシングを使う場合に比べて、いちじるしく経済的な点が有利であると考えられているが、反面、泥水そのものが信頼性に乏しく、地中におけるくいの状況がつかめないために、様々な問題を生じている。

ここでは、ベントナイト泥水の性質を明らかにすることによって、ベントナイト泥水の適正な使用方法を裏付けるとともに、泥水工法のもつ限界を示唆しようとするものである。

§ 2. ベントナイト泥水の性質

ベントナイト泥水は、古くからボーリングの循環流体として使用されている。ボーリングの循環流体に要求される性質の中には、泥水工法にとってあまり重要でないものもあるが、多くは泥水工法にそのまま通用するものである。

次に、循環流体の具備すべき性質をあげる。

- (1) ある値以上の粘度をもった流体である
- (2) ある値以上のイールドバリューをもつ
- (3) 地層中に浸透しない
- (4) 地層の崩壊を防ぐ
- (5) 適当な比重をもつ
- (6) 安定性のあること（泥水の性質が変化しない）
- (7) 掘りくず、あるいはガスなどが泥水に混合しても容易に分離することができる
- (8) 循環の際、大きな抵抗にならない

このうち、泥水工法に直接関係のある性質は、(1)の粘

度、(2)のイールドバリュー、(4)の崩壊防止、(6)の安定性である。

以下、これらの性質について、簡単に説明を加える。

2.1 粘度

粘度とは、流体内部において、速度の異なる部分が相接しているときに、その两部分の間に生ずる抵抗力をいう。

粘度の測定方法としては、測定する流体内で、円筒を一定速度で回転させたときの抵抗を測定して求める方法が一般的である。粘度を示す単位は cp（センチポイズ）であり、 $\text{dyn}\cdot\text{sec}/\text{cm}^2$ で表わす。

粘度の測定には、スターマー粘度計、B型粘度計などを使用し、現場ではマーシュファンネル粘度計（Marsh Funnel Viscosimeter）が、簡便さを買われて広く用いられている（図-1）。この粘度計は、セメントモルタルのフロー値を測定するフロー・コーンのようなもので、API（American Petroleum Institute）で、寸法を規程している。マーシュファンネル粘度計の測定方法は、フ

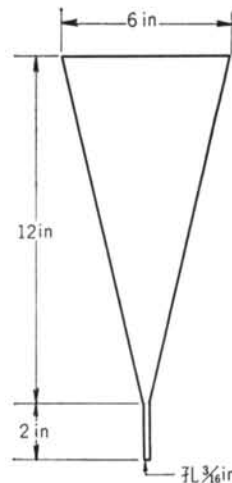


図-1
マーシュファンネル粘度計

アンネル内に試料を入れて、一定量の試料が流出するのに要する時間を測定する。この値を粘速といい、秒で表わす。API では、1500cc の試料をファンネルに入れ、このうち 946cc（1クオート）が流出する時間を測定する。

筆者らは、1500cc の試料をファンネル内に入れ、このうち 1000cc が流出する時間（秒）を測定した。

測定値は、測定方法によって当然異なるので、記録に当っては秒数の次に 946/1500、1000/1500 などと記す必要が

ある。

一方、粘度 (cp) の測定にはB型粘度計を使用した。これは20 r.p.m. で回転する円筒または円盤の抵抗を目盛盤からよみとり、回転体の形状と回転数に応じた一定の乗数を乗じて、粘度の値を求めるものである。

表-1に、B型粘度計による粘度 (cp) と、マーシュファンネル粘度計による粘速(秒) 1000/1500 との関係を示す。

粘度 (cp)	粘速 (秒)
1.0	27
5.0	29
10.0	31
20.0	37
35.0	42
128.5	48
420.0	69
910.0	118

表-1 粘速と粘度との関係 (室温23°C)

次に、ベントナイト泥水濃度と粘度との関係、および濃度と比重との関係について測定した結果を図-2、図-3に示す。

ベントナイト泥水の濃度は、ベントナイトと水との重量比を%であらわしてある。

使用したベントナイトは、国峯礦工業製クニゲルV1 (250メッシュ)、およびクニゲルVA (300メッシュ) である。

2.2 イールドバリュー (yield value)

泥水が流動を起こすために必要な最小の剪断応力をイールドバリューまたはゲルストレングス (gel strength) という。

イールドバリューの測定は、スターマー粘度計で行なうことができ、測定試料内の円筒が回転を始めるのに必要な力を測定することによって求める。

イールドバリューの大きい泥水は、懸濁土粒子の沈澱を防止する効果がある。

2.3 孔壁の崩壊防止 (造壁性、脱水性)

泥水の泥水圧が地層中の地下水圧より大きいと、地層の多孔質部 (特に砂層) に泥水が浸入する。この結果、これらの孔隙は、泥水中のコロイド粒子、粘土粒子などによって充填され、泥壁を形成する。コロイド分が乏しく、砂分に富む泥水は、泥壁の厚さは厚くなるが、なお

水を透しやすいので、泥壁はますます厚くなる。一方、コロイド分に富む泥水は、泥壁の厚さも薄く、しかも、完全に水の浸透を防ぐ性質をもつ。このような、泥水の性質を、泥水の造壁性と脱水性という。

造壁性と脱水性を測定する方法としては、底部に汚紙をはった圧力シリンダーに泥水を満たし、流体圧力をかけることによって、汚紙を通過する水量と汚紙上に形成される泥壁の厚さを測定する方法による^{1), 3)}

これらの測定結果を図-4、図-5に示す。

なお、図中の粘速の値は、前記の方法と異なり、500 ccの試料をファンネル内に入れ、全部が流出するのに要する時間、すなわち、500/500を測定している。

図-4によれば、脱水量は濃度の増加とともに減少し泥壁の厚さはほとんど変化しない。この結果、泥水の粘度の高いものほど脱水性は小さくなるが、造壁性は粘度の大きさにほとんど影響されない。

図-5は、一例として、ベントナイトを塩水に懸濁させた場合、すなわち、塩水泥水の場合の性質を示したものである。

これによると、蒸留水の場合にくらべて脱水量が大きく、これにともなって、泥壁の厚さもいちじるしく厚くなるのがわかる。

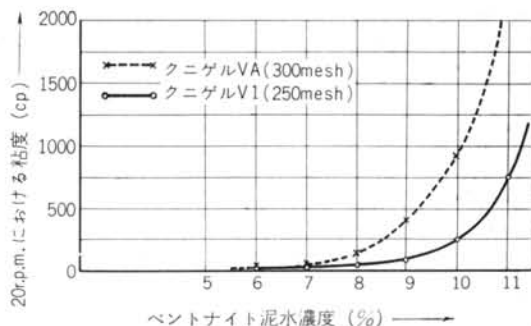


図-2 ベントナイト泥水濃度と粘度との関係 (室温23°C)

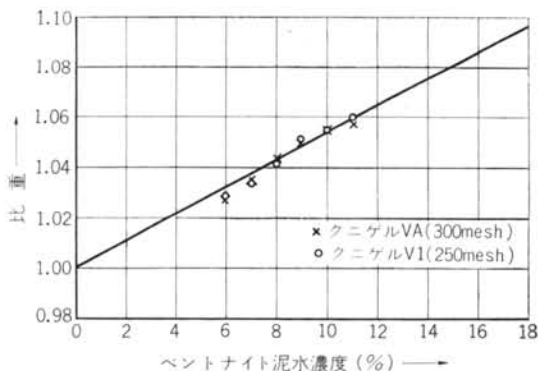


図-3 ベントナイト泥水濃度と比重との関係 (室温23°C)

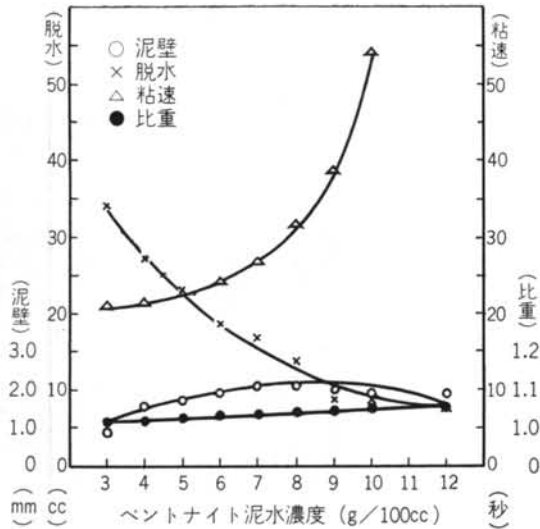


図-4 ベントナイト泥水の性質¹⁾
(蒸留水の場合)

浅い部分と深い部分とで泥水の性質が変化しないことを安定性が高いという。

すなわち、安定性の低い泥水では、泥水中の粘土粒子が沈澱し、深い部分では粘度が大きくなるが、浅い部分ではその粘度がいちじるしく小さくなる。その結果、粘度、比重、造壁性、脱水性などが、浅い部分ではほとんど失われることとなる。

一般に、泥水中に砂分や掘りくずの混入が多くなると安定性が低くなる。また、塩分やセメント分が混入しても、泥水の安定性は低下する。

泥水の安定性を維持するためには、コロイド分を多くする意味で、ベントナイトを添加したり、コロイド分の凝固を防ぐために CMC (carboxymethyl cellulose) などを添加することがある。セメントを添加した場合の性質については後に述べる。

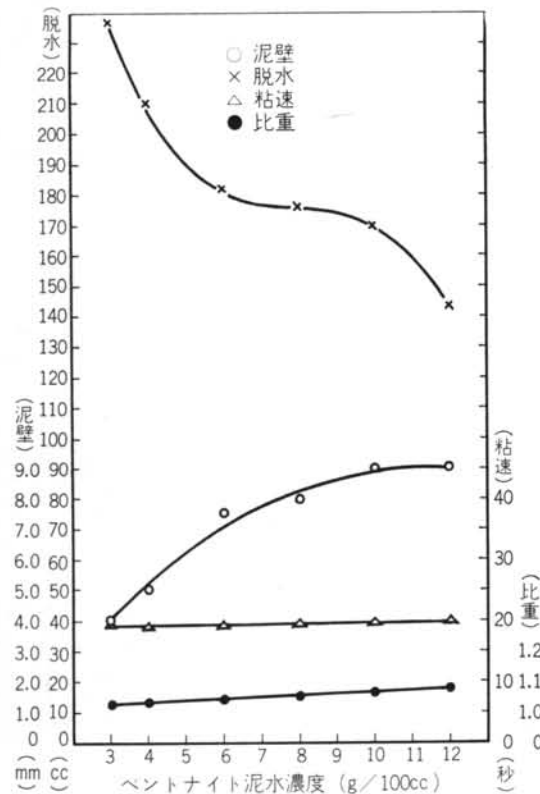


図-5 ベントナイト泥水の性質¹⁾
(塩水:3g NaCl/100cc 清水)

§ 3. 泥水工法の問題点とその考察

3.1 孔底沈澱物

孔底沈澱物とは、掘削時の掘りくずをバケットなどで引き上げるときにこぼれ落ちる土粒子とか、孔壁の崩壊によってもたらされた土粒子が、孔底に堆積したものをいう。

このような沈澱物は、一般に締まっていないことが多く、沈澱物が多量に存在すると、沈下の原因となることが考えられる。

そこで、アースドリル式の場所打ちくいを泥水工法によって施工したものについて沈澱物を調査した。これを図-6に示す。

このくいは、長さ11.480m、直径80cmであり、くいの先端より50cmの個所から先端にかけて径が次第に細くなり、先端は直径約40cmであった。地盤はかなり粒径のそろった砂と、上部の粘土質砂れきりなる。

沈澱物は、上部の砂層からもたらされたと考えられる黒っぽい砂でゆるく、現場で間げき比を測定したところほぼ1.00前後の値を示した。また、厚さはいく先端より約30cmあり、先端の支持力は初期の状態においてはあまり期待できないのではないかと考えられる。

このような沈澱物は、掘削中にバケットから漏れたものがそのまま残ったものか、孔壁の崩壊によってもたらされたものか明らかなでないが、泥水中に懸濁することができずに沈澱して堆積したことは明らかである。

なお、使用したベントナイト泥水は、豊順ベントナイト(250メッシュ)の7%泥水であった。

2.4 安定性

泥水の安定性とは、深いボーリング孔などにおいて、

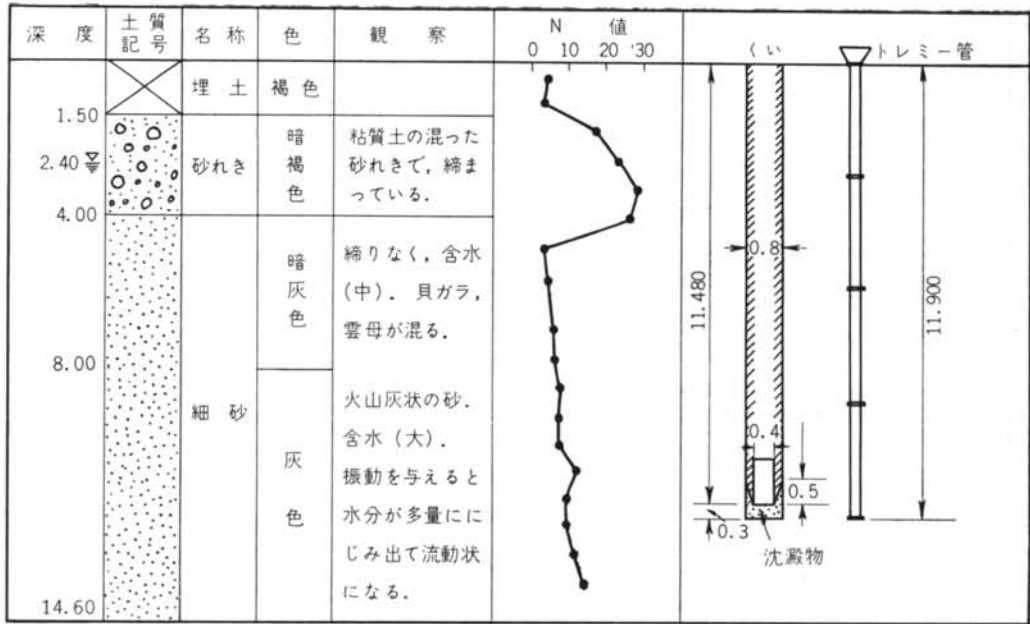


図-6 くい先端沈着物調査結果

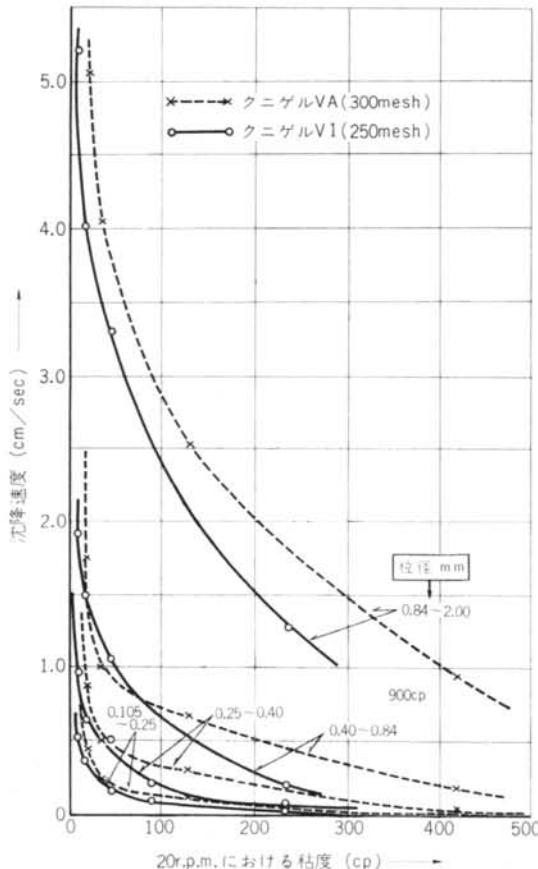


図-7 土粒子粒径と沈降速度との関係

次に、土粒子の粒径とその沈降速度との関係を実験した結果を示す(図-7)。

この結果、沈降速度は粘度の増加に対し、ゆるやかに0に近づく。この試験では、粒径2.00mm以下の土粒子は、900cp以上の粘度では沈降しなくなり、測定できなくなる。また、粘度が高くなると、微妙な濃度の差によって粘度が大きく変ることは図-2より明らかである。したがって、沈降速度0のときの粘度として、一応900cpを考慮してよいものと思われる。

3.2 孔壁の崩壊

ごく堅く緻密な地層を除けば、その地層は掘削孔の中に崩壊する傾向がある。泥水には、この崩壊を防ぐ作用がなければならない。

ゆるい砂よりなる地層があるとする。これを水に浸すと、水は砂層の内部へ浸透し、地層は水に接している部分から崩壊を始める。この現象は、スレーキングともよばれ、砂粒子間の毛管水の表面張力によって見かけの粘着力が働いていたのに対し、粒子間が水で飽和されるため見かけの粘着力が失われ、崩壊を起こすものである。

これに対して、泥水に浸した場合を考えると、泥水のコロイド分が砂層中に浸透し、砂粒子の間げきを充填する。その結果、泥水が地中へ浸入することを防ぎ、粒子間を充填したコロイド微粒子によって真の粘着力が発生し、孔壁の崩壊を防ぐ効果をもつ。

この効果を水槽内で実験した結果を写真-1、写真-

2に示す。砂は標準砂として市販されているものを使用した。

方法は乾燥した砂を一定の単位体積重量 (1.7 g/cm^3) となるよう、図-8に示す水槽内につめ、仕切板をはさんだ一方の側にベントナイト泥水を入れた。次に、仕切板をゆっくりと引き抜き、泥水と砂の接触面の状況を観察した。泥水濃度は、最初6%で安定だったので、2回目は4%に減少させた(クニゲルV1使用)。

これによると、6%では崩壊はみられないが、4%では崩壊する。ただし、原地盤の場合にくらべて、乾燥し

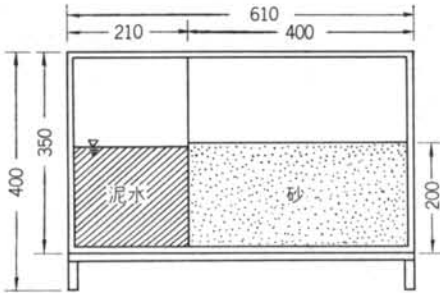


図-8 実験水槽側面図(単位 mm)

た粒径のそろった砂を使ったこと、上載荷重のないことなど、条件はいくぶん異なる。

3.3 泥水濃度のコンクリート打設への影響

泥水濃度を上げ、粘度を高めれば、沈澱物と孔壁の崩壊とは実験的に防止できることが明らかとなった。ここでは、ベントナイト泥水の粘度を高めた場合に、モルタルとうまく置換することができるかという問題について実験的に確かめることにした。

容積 $1165 \times 400 \times 790 \text{ mm}$ の長方形の箱を用い、径 7.5 cm 、長さ約 1 m の真ちゅうパイプを建て込んで周囲に砂を詰める。パイプ内にベントナイト泥水を注入し、約1週間屋外に放置した。その後、パイプを引き抜き、モルタルを泥水と置換させるように径 1.9 cm のパイプを用いて打設した。

結果を、以下の写真-3、写真-4、写真-5、写真-6および図-9に示す。

この結果より、泥水濃度とモルタルの置換性能との間には相関関係がみられないが、6%の泥水中で置換したくいは、いくぶん形が不整であった。

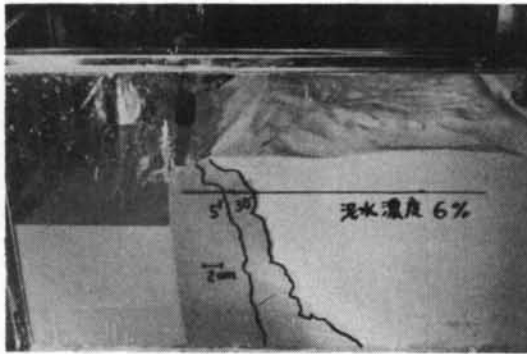


写真-1 孔壁安定の実験：泥水濃度6%では崩壊しない。5分後、30分後の泥水の浸透範囲を示す。



写真-3 モルタル打設実験：モルタルはいずれも十分にゆきわたり、径も変化せず、打ち込み結果良好。

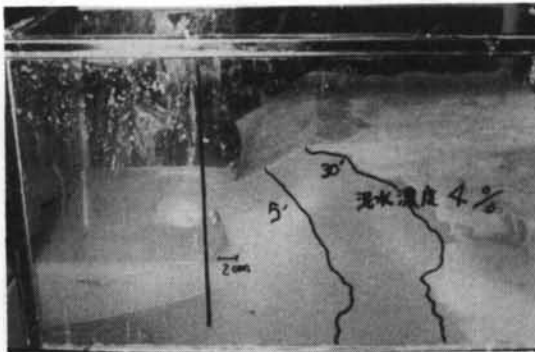


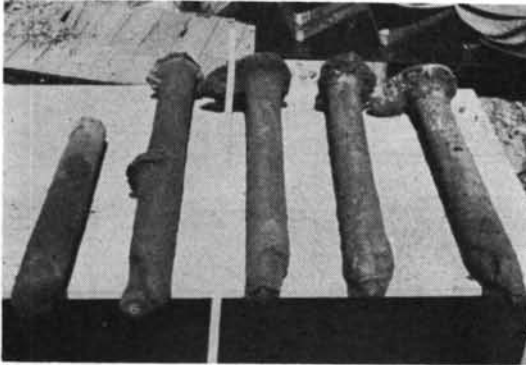
写真-2 孔壁安定の実験：泥水濃度4%では崩壊する。5分後、30分後の泥水の浸透範囲と崩壊の状況を示す。



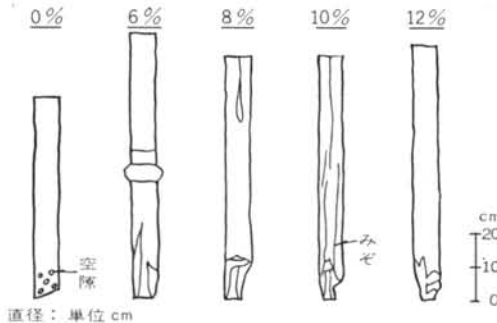
写真-4 モルタル打設実験：くいの外面には厚さ数mmのベントナイト膜があり、砂が付着している。



写真一5 モルタル打設実験：くい先端は細くなり、そのくびれた個所にゲル化物が溜まっている。



写真一6 モルタル打設実験：掘り出したくい、左から、①パイプに直接モルタルを打ち込んだ場合 ②6%泥水 ③8%泥水 ④10%泥水 ⑤12%泥水（クニゲルV1使用）



	0%	6%	8%	10%	12%
上	7.83	7.80	7.87	7.55	7.55
中	8.03	7.86	7.76	7.44	7.53
下	7.88	7.81	8.03	7.81	7.79

図一9 モルタル置換後のくいの形態：置換される泥水濃度を変えた場合の影響

掘り出したくいの強度を圧縮試験によって調べたが、強度的に問題のありそうなものはなかった（表一2）。

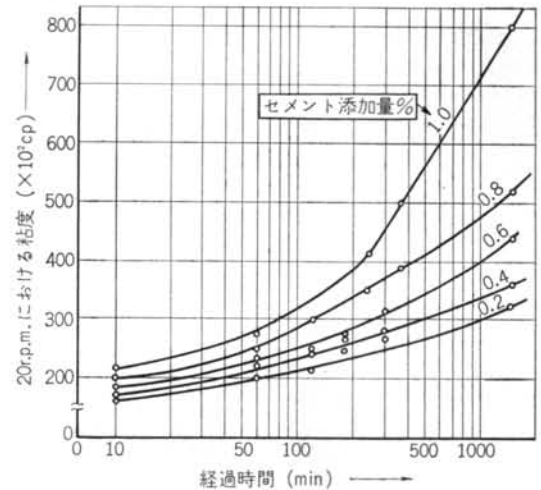
B/W %	4週圧縮強度 kg/cm ²	備 考
0 ₍₁₎	372.335	1) 0 ₍₁₎ は JIS によるモールド使用
0 ₍₂₎	345.445	2) C:F:S=1:0.4:1.4
6	373.610	W/C+F=50%
8	422.740	C; 普通ポルトランドセメント
10	298.265	F; フライアッシュセメント
12	313.375	S; 標準砂
3) 打設7日後に採取し21日間水中養生		

表一2 モルタルの調合と強度試験結果

3.4 セメントとベントナイト泥水の接触によるゲル化の影響

安定性の項で触れたように、ベントナイト泥水中にセメントが混入すると、安定性がいちじるしく低下する。これは、セメント中のカルシウムイオンがベントナイトと結合し、ベントナイト粒子の分散性が失われて、いわゆるゾルの状態からゲルの状態に移行するためである。その結果、前に述べたように、ゲル化物が沈澱して、深い部分と浅い部分の泥水の性質に差が生じるのである。

ベントナイト泥水にセメントを添加した場合の性質について、図一10および表一3に示す。



図一10 ベントナイト泥水8%にセメントを加えた場合の粘度と時間との関係(クニゲルV1 250メッシュ使用)

セメント混合量 g/100cc	比重	経過水 cc		泥壁 mm
		1分	30分	
0	1.05	4.5	21.0	2.0
0.3	1.05	6.0	37.0	12.5
0.5	1.05	8.5	49.0	13.0

表一3 泥水に対するセメントの作用³⁾

このような障害を緩和するため、市販されている添加剤を加えることは、かなり有効な手段である。一例として、ニトロフミン酸のアンモニウム塩であるハイベントを添加した場合の効果を図-11に示す。

図-11の方法は、ベントナイト濃度8%の泥水に対して、重量で0.2%のセメント粉末を投入した。その結果ベントナイト泥水のみの場合にくらべて、粘度の値が約100倍の増加を示す。これに対し、ハイベントを重量比で加えると、図-11の下方に示すような結果になり、粘度の値はセメント添加時の1/1000に低下する。しかしハイベントの添加量は、ある限度以上加えても効果は上がらないということも、図から読みとれると思う。

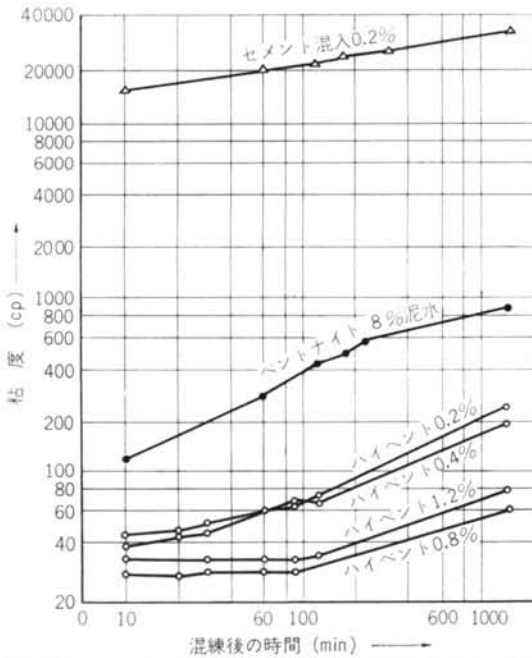


図-11 セメントの混入したベントナイト泥水に対するハイベント添加の効果(クニゲルV1, 普通ポルトランドセメント使用)

§ 4. 今後の問題

泥水工法の問題点を、泥水の濃度、特に粘度との関係から眺めてきたが、泥水の性質は主に粘度によって変化する。したがって、必要な粘度を維持することによって、泥水の使用目的を満足させることができると考えてよい。しかし、有害な混入物、特にセメントは、工法上泥水に混入することを避けることは困難である。セメントの混入した泥水の処理法については、まだ定まった方

法がなく、今後に残された課題の一つである。

泥水を使用することの意義を考えると、バケツなどからこぼれ落ちた土粒子などは、泥水中に懸濁させたままこれを排除することが目的の一つであろうと思う。

一方、別な考え方として、土粒子を懸濁させずに早く沈澱させ、後に底にたまった沈澱物をさらってコンクリートを打つという方法も考えられている。いずれが施工上適当であるかの判断は、早急に下しがたい。

粘土地盤の掘削を行なうようなとき、泥水中に地盤内の電解質その他が溶解して安定性を低下させることがあるが、これに対する検討はまだ行っていない。

§ 5. むすび

ベントナイト泥水とその泥水工法への応用について、次の点が明らかとなった。

- 1) 泥水濃度の増加に伴い、粘度は急速に増大する。
- 2) 孔壁の崩壊にはベントナイト泥水の造壁性と脱水性が関係し、ベントナイト泥水中にコロイド分が多いと、遮水性のある薄い泥壁を形成する。
- 3) 泥水中の粘土粒子が沈澱を起こし、浅い部分と深い部分との間に濃度の差を生じるような場合は、安定性が低下したことを示す。
- 4) 孔底沈澱物は、泥水の粘度を高めることによって防止することができる。900 cp以上の粘度があれば、径2.00mm以下の土粒子は完全に懸濁されたままの状態におかれる。
- 5) 壁面の崩壊に対し、泥水濃度6% (20cp)以上であれば、実験的に孔壁は安定する。
- 6) 泥水濃度12%の場合においても、モルタルと泥水の置換は可能である。
- 7) ベントナイト泥水とセメントが接触すると、急速にゲル化し、安定性を失う。この対策として、市販のゲル化防止剤を使用することは有効である。

本論は、まえがきにも触れたように、ベントナイト泥水の性質とその適正な使用方法に重点をおいて述べたつもりである。その意味で、実験の手法や解析の方法にまだ足りない点のあることはやむを得ないところである。しかし、これらの実験を通じて問題の残るいくつかの点については、今後研究してゆくつもりである。

おわりに、泥水工法に関する貴重な記録の蒐集に協力して下さった現場係員の諸氏に感謝する次第である。

<参考文献>

- 1) 試錐〔Ⅱ〕一槽と作業法—中村小四郎：熊本大学工学部試錐研究会，1963.10
- 2) 泥水工法と掘削壁面の安定：福住隆二：土質化学セミナー資料，1965.1
- 3) ボーリングに使用する循環流体の処理法：藤井清光：理工図書，1957.12
- 4) **The Support of Trenches using Fluid Mud** : Nash & G. Jones : Grout and Drilling Mud in Engineering Practice, 1963.5