粘土泥水の粘性及びイールドバリュウ の基本的性質

藤 井 清 光*

Basic Properties of Viscosities and Yield Values of Clay Mud
Water by K. Fujii

Because of the thixotropic properties, the viscosities and yield values of water base clay mud do not display fixed values but are changing at all times. Such basic properties of the mud, measured by means of the capillary-tube type viscosimeter, are described in this paper.

I. 緒 言

掘鑿泥水の最も重要な性質は粘性及びイールドバリュウである。掘鑿する場合に直面する困難な問題は泥水中のガスの除去、逸水の防止、泥水中の掘層の除去、高圧水圧の対策等であるが、これ等は總て泥水の粘性及びイールドバリュウの適當な調節によつて完全に解決される問題である。著者はこの點に注目して數年前より研究を始めたが、從來から用いられている粘度計は測定範圍が狭く、或はイールドバリュウは求められず、且ある種のものは機械的摩擦が入り精密な結果が得難く、又は測定に非常に手数を要する等の缺點があり、研究に困難を感じた。數多く實驗を重ねた後、毛細管式粘度計を作り、これで測定することにより泥水の粘性が理論的に明かとなり、特に從來餘り認められていなかったイールドバリュウの變化狀態が明白となつた。例えばコロイド粘土の粒子は互に結合する性質があり、逆に外から力が加われば容易に分散される。即ちシクソトロピー的性質をもつていたので泥水の粘性とイールドバリュウは絶えず變化して一定の値とはならないと云う様なことが定量的に明かとなつた。これは非常に興味ある問題であると同時に泥水の理論に於て重要である。この様な研究結果につき以下説明する。

II. 實 驗 装 置

實驗裝置は第1圖に示すもので、Aは試料を入れる容器、Bは毛細管（内徑2.5mm、長さ17.7cm）Cは目盛付容器、Dは水銀マノメーターであり、以上が粘性測定裝置である。次にE及びFは試料を入れる容器、Gは毛細管（内徑2.0mm、長さ21.0cm）であり以上が構造破壊裝置である。Hは壓力

* 東京大學助教授（第一工學部石油工學科教室）

實驗方法は粘性及びイールドバリュウの測定をする場合には、マノメーターにより容器Cの眞空度を所定の値にし、毛細管Bの終りにあるコックを開き容器Aの中の試料をBを通して流し、Cに一定量が入ればコックを閉じ、その間の時間を測定する。壓力を變えて再び時間を測定し、なるべく數多くその値を求め、壓力と單位時間に於る流出量の關係をグラフに書く。尙測定結果の壓力 cmHg の數字はこの測定裝置特有の値であり、絶對値を示すものでないことを附加する。

粘土の結合状態の構造を破壊する場合には容器Eに試料を入れ、容器Fの真空度を大きくし毛細管Gを通して試料をFに流

す。次にコックを切り換えEの真空度を大きくし試料をEに向つて流す。この様にして毛細管中を繰返えし通すことにより結合構造を破壊する。

一般に流体内に互に平行で距離 dx だけ離れた2平面が相対的に速さ dv でその平面に平行に動く時、各々の平面 1cm^2 に働く内部摩擦の大きさ f との関係は次のようになる。

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\mu} \quad (1)$$

μ は粘性係数である。毛細管により粘性を測定する場合には Poiseuille の式より求める。

$$\mu = \frac{\pi R^4 P t}{8 L Q} \quad (2)$$

但し R = 毛細管の内徑

 $L = \text{毛細管の長さ}$

P = 両端の圧力差

Q = 時間 t の間に流れる流體の容積

この式を(1)の形に直せば

$$\frac{Q}{t} = \frac{1}{\mu} \frac{\pi R^4}{8 L} P \quad (3)$$

均質な流體の場合即ち Newton 的流動をなす場合は以上の式がそのままあてはまる。此の場合は常に加えられた壓力に比例した流動速度となり従つて粘性は常に一定である。横軸に P 、縦軸に Q/t をとれば第2圖のAの様に原點を通る直線となり、粘性は(3)で明かの様に直線の $\cotangent$ で表わされる。

流體が plasticity の性質をもつ場合には流動速度は外からの壓力に比例せず、従つて粘性は一定の値とならない。此の關係は第2圖のB線であり、粘性はD線である。即ち外からの壓力がある一定値となる迄は變形は起らず固體の性質を示す。壓力が點Fになつて初めて流動を始めるが流動速度は初めは小さく壓力が大きくなるに従つて次第に大きくなり遂に壓力に直線的に比例する様になる。粘性はB線の $\cotangent$ であるから最初は無限大より次第に減少して最後にある一定値となる。B線の直線部分の延長が横軸と交る點Yを Bingham はイールドバリュ - (Yield Value) と名付けた。¹⁾ 尙流體が流動を始める點Fを流動點と名付けることにする。B線の直線部分は式(1)の代りに次の様になる。

$$\frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\mu} (f - Y) \quad (4)$$

然し P と Q の關係は第2圖のC線の様に直線とならないことがある。その場合、粘性の計算は(2)の代りに次の式を用う。²⁾

$$\mu = \frac{\pi R^4 P t}{8 L \left(\frac{3}{4} Q + \frac{P d Q}{4 d P} \right)} \quad (5)$$

第 1 表

壓力 cmHg	粘性 poise
2.0	∞
2.5	2.15
3.0	0.80
3.5	0.42
4.0	0.29
4.5	0.25
5.0	0.21
5.5	0.17
6.0	0.17

粘性の絶対値は(2)又は(5)により求めるわけであるが、この實驗裝置では毛細管に續いてガラス製コックがあり流れに對し抵抗となり、且流體は毛細管を出る際に運動エネルギーをもっている様な状態であるので正確な値を得ることは難しい。それで種々の粘性をもつた均質な液體(この實驗では原油)を用いてこの裝置で測定し、同じ液體をレッドウッド粘度計により測定して絶対値を求めて比較する方法を採用した。

測定結果の一例を次に示す。あるペントナ

1) E. Bingham : Fluidity and Plasticity. (1922)

2) A de Waele : The measurement of Plasticity. The Science of Petroleum Vol. II. (1938)

イト液の粘性が最初は無限大である，加わり圧力が大きくなるに従つて粘性は小さくなり遂に最小値になる経過を第1表より知ることができる。この様に泥水の粘性は壓力によつて變化するので壓力を指定しなければ粘性は定まらない唯最小粘性のみ泥水に一定の値となる。

IV. 濃 度 の 影 響

實驗に使用したカオリン屬粘土は灰色のいわゆる粘土で純粹なものではない。ベントナイトは粉末である。この測定結果を數字で示せば第2表のようになる。この測定結果に於て最も著しいことは、2種類の粘土の膨潤性の差により性質が異なることである。即ちカオリン屬粘土のある一定濃度に於る粘性又はイールドバリュー（YV）に達するモンモリロナイト屬粘土の濃度は前者の僅かに 1/7 ~ 1/12 でよい。次に濃度の増加による最小粘性及び YV の

第2表 濃度と最小粘性及びイールドバリューの關係

粘 土		濃 度	最 小 粘 性	Y V
屬	名 稱	水100cc : 粘土g	poise	cmHg
カ オ リ ン	粘 土 A	77.5	0.18	3.6
		91.3	0.36	12.0
		98.8	0.91	33.2
		113.0	2.4	52.0
	粘 土 B	53.6	0.070	4.2
		62.3	0.110	8.3
		69.0	0.150	16.8
モンモリロナイト	ベントナイト	5.06	0.070	1.7
		5.68	0.078	3.4
		7.05	0.108	6.0
		8.40	0.146	8.5
		9.02	0.165	11.7
		10.50	0.184	14.3
		11.01	0.205	16.1
		11.67	0.245	31.4
		12.43	0.260	24.9

増加率はカオリン屬粘土の方が遙かに大きい。例えば兩粘土の濃度が約 1.4 倍になつた場合には最小粘性はカオリン屬粘土が約13倍に達するのに對しモンモリロナイト屬粘土は 1.5 に過ぎず、YV は前者が14倍に達するのに對し後者は 3.5 倍にすぎない。次に兩粘土の特色はカオリン屬粘土では YV と流動點が離れているのに對しモンモリロナイト屬粘土ではこの 2 點が接近して

いることである。

以上の様な特色があるので掘鑿泥水としての取扱いに於ても違つた注意が必要である。先づカオリン属の場合は濃度が水 100cc : 50g 程度にならなければ安定とはならず濃度がこれより僅か高くなつても最小粘性とYVは急に上昇する。逆に濃度が高すぎる場合には水を僅か加えても不安定となり固形物の沈澱又は坑内崩壊の原因となる。これに反しモンモリロナイト属の場合には水 100cc : 5g で既に安定となり、それ以上濃度が増加しても最小粘性及びYVの増加率は甚しくないから遙かに使用し易い。然しYVと流動點が接近していることは、ある限界濃度以上では見かけの粘性が急に増加することであるから、限界濃度以上にならぬ様に注意を要する。

V. バライトの作用

何等コロイド的性質のない粉末のバライト (BaSO_4) を泥水に加えた場合に泥水の性質がどの様になるかは非常に重要である。先づバライトのみを水に加えた場合を測定した結果は第3圖である。圖のグラム数は100cの水に混合したバライトの量である。この場合、短時間に水を分離しない様な高い濃度で實驗を行つている。興味あることは測定結果は粘土の場合と殆ど同じ形となることである。即ちバライトの濃度の増加と共に最小粘性とYVが次

第に増加する。この場合濃度の増加と共にこの値の増加する割合が大きくなつている。(粘土の場合でもある濃度以上ではこの傾向をとる。)粘土の場合と非常に異つた現象は動流點が非常に小さいことである。即ちYVはかなり大きくなるにもかかわらず、流動點は常に殆ど零となつてゐる。即ち粘性は無限大とはならず有限値より始まる。

壓力と流出量の關係が第2圖B線の様にな

ることはコロイドの特性のように云われることがあるがバライトの実験はこの考えが間違っていることを示す。B線の関係は液體と個體の混合した不均質な物質に起る現象と見てよい。コロイドの場合は粒子の間の結合が強いので、YVのみならず流動點が顯著に現われると云うことがその特徴と考えられる。

次にベントナイト液にバライトを混合した實驗をベントナイトのみの場合と比較してバライトの作用につき述べれば次の様になる。即ちバライトの混合によりYVの増加より最小粘性の増加が著しいこと、及びYVと流動點の差が大きい（即ち流動點はかなり小さい）ことである。元のベントナイト液の最小粘性が大きいとバライトの混合によりYV及び最小粘性が極めて大きくなることが判明する。これは泥水の取扱い上非常に重要なことである。

次にバライトと水の混合物に乾燥ベントナイトを加えた實驗によれば乾燥ベントナイトの混合によりYVより最小粘性の増加が著しく、且流動點はかなり小さい。

VI. 掘鑿作業と粘性の關係

掘鑿作業に於て泥水の粘性を測定するには漏斗型粘度計による場合が多い。即ちこの粘度計により泥水の粘性を測定して泥水處理の方針を決定する。

第3表 ベントナイト液の比重と粘性の關係*

比 重	最 小 粘 性 poise	Y V cmHg	流 動 點 cmHg	1000/1500cc 秒	500/500cc 秒
1.000**	0.0094	0.0	0.0	28.5	18.5
1.038	0.044	0.1	—	33.2	22.0
1.045	0.070	0.3	—	35.0	23.6
1.047	0.074	0.9	—	37.2	25.5
1.052	0.090	1.5	1.0	40.0	28.7
1.055	0.098	2.3	1.8	43.2	32.9
1.060	0.103	3.2	2.8	46.4	39.7
1.065	0.108	4.1	3.2	53.9	—
1.066	0.120	5.3	3.8	59.4	57.0
1.067	0.120	5.9	4.1	68.2	—
1.069	0.145	6.9	5.3	77.4	—
1.070	0.148	8.0	5.9	102.7	—
1.073	0.175	9.0	6.9	140.7	—
1.075	0.180	9.7	7.6	212.7	—
1.078	0.185	11.7	9.1	307.3	—

* 測定時の溫度は約23°C

** 水についての測定値

それ故この粘度計と毛細管粘度計の測定結果を比較することにより掘鑿作業に於る泥水處理を理論的に行うことができる。ベントナイト液の比重と粘性の關係が第4圖及び第3表である。尙この圖及び表の最初の値は水に關する値である。

先づ漏斗型粘度計により測定する場合にベントナイト液に與える壓力は毛細管粘度計に於てはどの位になるかを調べて見る。漏斗型粘度計に於て秒數が無限大になる點（液が流出しなくなる點）は大體流動點と一致する。この事實を基礎にして第4圖より壓力を求めると測定方法500/500ccに於ては約4 cmHg, 1000/1500cc に於ては約9 cmHg となる。

次に粘土粒子がポンプや管の中を流れる場合に受ける壓力を調べて見る。我々の常識として泥水の粘性は500/500ccに於て30~40秒附近が最も適當であることが判明している。そしてこれが約80秒以上になればポンプの壓力は

第4圖 ベントナイト液の比重と粘性の關係

ポンプや管が與える壓力は大體に於て5cmHg附近であることが推定できる。それ故能率よく循環するための泥水の濃度は5cmHgに於て最小粘性を示すものであることを要する。例えば第4圖のベントナイト液の場合では濃度の限度は比重1.065のものである。この様に泥水の濃度を保てば抵抗は大きくなり、従つて循環量を大きくすることができ、一般に掘進率は向上する。濃度がこれ以上になれば流動點が大きくなるので泥水を流すためには粘土粒子に大きな壓力を與えることを要し、従つてポンプの壓力を高くしなければならぬ同時に泥水にガスが混入すれば除去しにくくなる。

濃度の最小限度は泥水の流動點及びビットにより破壊された掘屑の大きさより定まる。即ち泥水の循環を止めた場合に大部分の掘屑は泥水中に支えられるを要し、従つて泥水の濃度には限度がある。例えば掘屑の大きさが1cmHgの流動點により支えられるとすれば、第4圖のベントナイト液の場合には比重は1.052が限度である。

泥水よりガス又は砂を除去する場合に泥水の粒子に與える壓力もこの實驗結果より定つて来る。即ち泥水を最小粘性を示す様な状態に保ち、ガス又は砂が最も分離しやすい様にすればよい。例えば第4圖の比重1.073のベントナイト液の場合には壓力が12cmHg以上になる様な状態にすればよい。此の數字を基礎にしてガス及び砂除去器の設計をする。

Ⅶ. シクトロビー的性質

水中に分散された粘土分子は水を吸収して膨潤する。膨潤した粘土の著しい特徴として粒子が互に結合して大きな構造を作る性質がある。然しこの構造の結合力は大きくはなく、外から力を加えることにより容易に破壊され分散状態となる。然し構造を破壊されて分散した粘土粒子も放置して置けば再び結合して大きな構造となる。それ故外から力が週期的に加えられると粘土粒子は結合と分散を絶えず繰返す。粒子が結合すれば必然的に粘性及びイールドバリュウの増加となり、分散されればこれは減少する。従つて粘土粒子の結合状態及び分散状態は毛細管粘度計により精密に測定される。尙今迄説明して來た實驗結果は總て結合状態に於る測定である。

粘土粒子の結合構造を破壊するためにこの毛細管粘度計の破壊装置(第1圖)を用う。水を吸収して膨潤した粘土は繰返して毛細管中を通ることにより分散状態となる。構造が破壊され粘性及びイールドバリュウが小さくなる状態は第5圖より明かである。最初に測定して次に毛細管中を壓力差をなるべく大きくし速い速度で8回通して再び測定し、以下毛細管を8回通す毎に測定した結果が示されてある。これによれば32回通せば結合構造は完全に破壊され、一定の粘性となる。この様な結果を得たので以後の實驗では分散状態にするためには毛細管を40回通すことにした構造を破壊するために特別の

毛細管を用いたが、單に粘性及びイールドバリュウ(YV)を測定するためにも毛細管を通すので構造は幾分破壊される。1回の測定には約10回毛細管を通し、その間に測定中に少しづつ分散状態に近づく。これにつき實驗し、7回測定すれば殆ど分散状態に達する結果を得ている。この様に測定することにより少しづつ構造が破壊されて行くので正しい粘性及びYVを示さない。

結合状態の正しい結果を得るには壓力差の低い方より、即ち靜かな流れより測定を始め、且壓力差の小さい範圍のみで測定する。然し以下示す實驗結果では結合状態の特に正しい結果を必要とする場合以外は、手数を省くために、壓力差の大きい方より測定を行つた。(分散状態ではどちらから計つても結果は同じである)

次に分散状態の粘土粒子が時間の経過

と共に結合状態に移つて行く状態を第6圖に示す。これは比重1.15のベントナイト液を分散状態にした後、一定時間内毎に測定したものである。(各試験毎に別の試料を用う)これによれば粘性及びイールドバリュウは絶えず増加しているが、特に最初の24時間内の増加が著しく、3日以後は増加率は非常に小さい。これを再び採つて構造を破壊すれば分散状態となり、又改めて結合が始まる。

以上は粘土粒子の著しい特徴であり、一般にシクソトロピー(thixotropy)の性質と云われている。然し言葉の定義につき吟味する必要がある。先づ粘土粒子がコロイドの大きさであるかどうかの問題となる。これにつき測定した結果³⁾によれば、カオリン屬の場合は約35%、モンモリロナイト屬の場合

第6圖 結合の状態

3) 藤井清光：物理的分析による泥水の研究。石油技術協會誌。第12巻第1號 (1944)

4) 玉虫文一：膠質化學 (1939)

は約50%が1ミクロン以下である。而して此所で扱つてゐるのは小粒子によつて代表される性質である。以上により粘土泥水をコロイドとして扱うのは適當と考えられる。次にシクソトロピーは温度一定の場合のゾル-ゲルの可逆的變換と定義されている。⁴⁾こゝで問題となるのはゾル及びゲル特にゲルの定義である。研究分野によつてかなり定義が異なるからである。然し大體次の様に定義することができる。即ちコロイドに於て液體の性質をもつものがゾルであり、固體又は半固體の性質をもつものがゲルである。以上に基き粘土の場合を更に吟味する。

既に述べた様に粘土泥水に流動點が現れる場合、流動點以下の壓力を受ける時、粘土泥水は固體の性質を示し、流動點の大小は固體の性質を示す範圍の大小である。即ち流動點以下の壓力を受ける場合はゲルの性質をもつことになる。以上は粘土粒子に與える力が粒子の運動單位の大きさに相當する場合（即ち毛細管を用ゐる場合）の現象である。然し普通の意味に於ては（例えば1"管を流れる場合）粘土泥水は明かに液體の性質をもつてゐる。即ちゾルである。この様に粘土泥水はゾルであると同時にゲルの性質をもつており、場合によりどちらかの性質が大きく現れる。

第6圖に示した様に粘土泥水は放置されれば粒子は互に結合し、流動點及

第7圖 温度の影響

びイールドバリューは増加する。即ちゲルの性質が大きくなる。逆に結合構造を破壊すれば第5圖の様に、ゲルの性質は小さくなる。即ち放置することにより純粹のゲルに近ずき構造を破壊することにより純粹のゾルに近づく。もしシクソトロピーの定義をそのままあてはめれば、以上の事實より“粘土泥水はシクソトロピー的性質の傾向をもつ、”と云うことができる。定義を嚴密にせず、ゲルの性質の大小の可逆的變換を以てシクソトロピーとするならば、“粘土泥水はシクソトロピーの性質をもつ、”と云うことができる。

以上の様にゾル及びゲルの定義が厳密にされていないので説明に不便である。又は粘土泥水がゾルとゲルの混合状態にあるためにゾル及びゲルの言葉を使うことが不適当である。著者は粒子が結合してイールドバリュウが大きくなった状態を結合状態と名付け、結合構造が破壊され粒子が運動単位の大きさに分散された状態を分散状態と名付けて、この研究に用うることにした。

VII. 温度の影響

温度の変化により粘土泥水の粘性及びイールドバリュウがどのような影響を受けるかと云うことは重要である。然し熱することにより粘土泥水より水が蒸発し易く、少し水が蒸発しても泥水の性質は大きく変化するので、実験は非常に困難である。実験中に濃度が変化して失敗した例が多かつた。実験はベントナイト液を用い、總て分散状態に於て測定した。実験Ⅰは比重1.050の液であり、第4表及び第7圖にその測定結果を示す。これに

第 4 表

温 度 °C	最 小 粘 性 poise	イールドバリュウ cmHg	流 動 点 cmHg
9	0.34	5.5	2.4
16	0.30	5.4	〃
20	0.28	5.3	〃
25	0.26	5.2	〃
30	0.24	5.1	〃
36	0.21	4.9	〃

第8圖 粘性と温度の関係

より温度の影響が非常に明かである。即ち（１）最小粘性は温度の増加と共に一定の割合で減少する。（２）イールドバリュウは殆ど変化しないが温度の増加と共に稍減少する。（３）流動点は温度の影響を受けない。

以上の他に実験Ⅱ及びⅢの測定を行つた(比重は約1.05)。温度の変化による粘性の変化状態を求めるために、以上の実験の最小粘性及び水の粘性を記したものが第8圖であり、水の粘性に対する倍率を求めたものが第5表である。温度と粘性の関係は第8圖に明かの様に直線的関係がある。温度1°Cに對する粘性の減少は、実験Ⅰ及びⅡでは0.0048 poiseであり、Ⅲでは0.0071

poise である。温度の低い場合には減少率が大きくなる様ではあるが、例が少いので断言できない。

泥水の粘性が温度により変化する理由は勿論水の粘性が変化するからである。それでその関係を求めるために第5表の倍率を見ると温度の増加と共に倍率は少しずつ増加している。然しこの変化は餘り大きくはなく約30倍となっている。

第5表 最小粘性及び水の粘性に對する倍率

温 度	水	實 驗 I		實 驗 II		實 驗 III	
℃	poise	poise	倍 率	poise	倍 率	poise	倍 率
0	0.0179	—	—	—	—	0.450	25.1
5	0.0152	—	—	—	—	0.415	27.0
10	0.0131	0.330	25.2	0.360	27.5	0.380	29.0
15	0.0114	0.310	27.2	0.335	29.3	—	—
20	0.0101	0.285	28.2	0.351	31.1	—	—
25	0.0089	0.260	29.2	0.290	32.6	—	—
30	0.0080	0.235	29.3	—	—	—	—
35	0.0072	0.210	28.2	—	—	—	—

以上泥水に對する温度の影響に關する實驗に於て、根本的の性質が明かとなり大きな收獲を得た。然し詳細な點に於てはまだ十分でなく、これは今後の研究により解決される問題である。

IX. 粘土粒子の結合現象

粘土泥水では粘土粒子が結合状態と分散状態の間を絶えず變化していることは既に述べた。粘土粒子は互に結合することにより粒子間の水を外に放出する傾向がある。この事實は粘性及びイールドバリュウ（YV）の變化状態より知ることができるが、膨潤性の少い粘土では放置すれば上に水を分離するので直接目で見るができる。結合状態を破壊すれば構造が小さくなるから粘性は減少する。結合により放出された水は混合されるから再び粒子に吸収される。同時に粘土粒子の結合が再び始まる。

以上の様に粘土粒子の結合の状態とその間に存在する水の状態の種々の場合により粘土泥水の性質は異つて来る。これを第9圖及び第6表に示した實驗によつて説明する。（第9圖を數字で表わしたものが第6表）試料は乾燥ベントナイトを2ヶ月間水と混合して膨潤させたものである。試料の比重1.060であり、100g中にベントナイトを7.23g含むものである。先づ結合状態に於て測定し次に40回毛細管を通し構造を破壊した後分散状態で測定變化の様子を圖に於て矢印で示してある。矢印の數字は、例えば1は第1日

目の測定，2は第2日目の測定を意味する。

先づ粘土泥水は分散状態になると粘土粒子が結合しようとする作用と水が粒子間に入ろうとする作用が同時に始まる。破壊される前の結合力が弱ければ水は粒子間に入り易い。水が粒子間に入れば，粒子の結合しようとする力は弱くなる。水が粒子間に行きわたり，且粒子間の結合力が強くならない時期に測定すれば，これは結合状態でありながら，前の分散状態よりYVは低

第 6 表

日 数	測定回数が多い場合				測定回数が少ない場合			
	Y V cmHg		最小粘性 poise		Y V cmHg		最小粘性 poise	
	結 合	分 散	結 合	分 散	結 合	分 散	結 合	分 散
1	12.1	11.6	0.53	0.48	12.1	11.6	0.53	0.48
2	11.2	10.1	0.47	0.45	—	—	—	—
3	10.1	9.2	0.45	0.43	11.2	10.5	0.47	0.45
5	10.5	9.5	0.44	0.43	—	—	—	—
8	9.7	8.4	0.43	0.42	10.9	10.4	0.46	0.44
10	9.7	8.4	0.43	0.42	—	—	—	—
12	9.9	8.8	0.44	0.43	11.8	10.5	0.47	0.45
17	10.1	8.8	0.45	0.43	11.9	10.7	0.48	0.46

い値を示す(第9圖A)この時に外から力を加えれば粒子間の結合力は弱いので構造は更に小さくなり、即ち分散状態となり、YVは下る(B)

水が粒間子に行きわたつても放置時間が長ければ、粘土粒子は次第に結合して水を粒子間より追出す。それで次第に大きな構造となるので、最小粘性及びYVは分散状態より大きな値となる(C)。この時構造を破壊すれば再び分散状態となる。この場合放置時間が比較的に短く粒子間の結合力が弱ければ以前の(前日の)分散状態の値より小さくなるか(D)。又は同じになる(E)。もし放置時間が比較的に長く粒子間の結合力が強くなつておれば以前の分散状態の値より大きくなる。

以上は粘土泥水に於て粘土粒子の結合に關して起り得る總ての現象である。これを一言で云えば、粘土粒子の元來の結合力の強さと放置時間の長さより粘土粒子の状態が定まる。第6表では2つの同じベントナイ液が單に放置する時間の異なることによつて異つた性質となることを明かに示している。即ち測定回数の多い場合には毎日又は一日おきに構造を破壊したので、粘土の結合力は強くなり、且水はよく混合され粘土粒子間に行きわたるため最小粘性及びYVは低い値となる。然し測定回数の少ない場合には粘土の結合力が強くなり、この値は餘り低くならない。

もし結合力が強く現れない様に一定期間毎に構造を繰返えして破壊すれば最小粘性及びYVは破壊毎に小さくなり遂に最小値に達する筈である。これに關する實驗結果が第10圖である。この試料は第9圖の場合と同じである(濃度は稍大きい)。これにより粘土粒子の構造が次第に小さくなつて行く經過が明かである。最小の構造の状態を完全な分散状態と名付ける。分散状態ではありながら粒子の結合が一部に起り、最小の構造の場合より大きくなつたものを不完全な分散状態と名付ける。第10圖のベントナイトは大體に於て完全な分散状態に達したものと判斷される。即ちこの場合には毎日又は一日おきに構造を破壊し7回目に完全な

分散状態に達している。

以上の第9圖及び第10圖の實驗結果は膨潤性のかなり大きいベントナイトの場合である。膨潤性の小さいベントナイトでは粘土粒子の結合力が大きく、従つて水は粒子間に入り難い。それ故構造を破壊すれば完全な分散状態に直ちに達する。この實驗結果が第11圖である。先の試料の水分は 92.77% であるのに對し、この試料の水分は 86.50% であり、粘性及びYVは圖を比較することにより明かに様に逆にこの試料の方が遙かに小さい。このベントナイトでは結合状態と分散状態の變化の様子も簡單である。この實驗に於ても測定回数の違いにより異つた現象となることを示している。

以上の様に膨潤性の違いにより現象の現れ方が異なるので、實驗にはベントナイトを區別する必要がある。今迄説明して來た内では「温度の影響」の實驗は第9圖、第10圖の膨潤性の高い種類であり、その他は總て膨潤性の低い第11圖と同じ種類のベントナイトである。

XI. 結 論

以上に於て粘土泥水の粘性及びイールドバリュウに關する基本的性質を述べた。これを要約すれば次の様になる。

(1) この研究に於て粘性及びイールドバリュウの測定は毛細管式粘度計を用いた。これは測定装置と構造破壊装置の2部分より成り、これにより粘土粒子の状態をかなり詳しく測定できる。

(2) この装置により粘性既知の液體につき測定しておけば、これと比較することにより一般の測定結果の粘性の絶対値を求めることができる。

(3) 測定により求めた壓力と流出量の關係をグラフに書けば曲線と直線の組合わさつた特色のある線を得る、即ち粘性は無限大より始まり最小値に至る無限に多くの値をとる。それで與える壓力を指定しなければ粘性は定らない。唯最小粘性のみは一定の値となる。

(4) 2種の粘土の膨潤性の差は極めて大きい。即ちある濃度のカオリン屬粘土の最小粘性又はイールドバリュウを持つには、モンモリロナイト屬粘土の濃度は前者の約10分の1でよい。

(5) カオリン屬粘土のイールドバリュウと流動點は離れているが、モンモリロナイト屬に於ては此の2點は接近している。濃度の増加による最小粘性又はイールドバリュウの増加率はカオリン屬がモンモリロナイト屬より遙かに大きい。以上の事實より濃度が高くなると兩種の粘土とも急に流動性が失われ、濃度が低くなるとカオリン屬粘土は急に不安定となることを意味し共に掘鑿作業に於る重要な注意事項である。

(6) コロイド性のない粉末バライトを水と混合した物につき測定すれば

やはりイールドバリュースは現れるが、流動點は0である。

(7) ベントナイト液に粉末バライトを混合すれば最小粘性及びイールドバリュースは共に増加するが、前者の増加率の方が著しい。流動點の増加は極く小さい。以上の値の増加率は元のベントナイト液の最小粘性が大きい程大きくなるから、實際の取扱いにはこの點に注意を要する。

(8) 泥水は循環する場合及びガスと砂を除去する場合には必ず最小粘性の状態にあることを要する。泥水の各比重に於る壓力——流出量の關係を求めておけば適當な比重の範圍を知ることができ、尙ガス及び砂を除去する際に與える壓力を知ることができるから、安全に且能率よく作業を進め得る。

(9) 泥水の最小粘性及びイールドバリュースは一定のものではなく、時間の経過と共に絶えず増加する。これは粘土粒子が結合状態になるためであり

これに外力を與えれば容易に結合構造は破壊されて分散状態になる。従つてイールドバリュースと最小粘性は小さくなる。

(10) 溫度の影響は、先づ最小粘性は溫度の増加と共に一定の割合で減少し、イールドバリュースは殆ど變化しないが溫度の増加と共に僅かに減少し、流動點は變化しない。

(11) 粘土粒子の結合の状態とその粒子間に存在する水の状態の種々の場合により泥水の性質は異なる従つて同じ泥水であつても構造を破壊する回数の違いにより性質は異つたものになる。

粘土泥水の粘性及びイールドバリュースに關する研究により、以上の様に基本的性質が明かとなつたので、泥水の處理を理論的に行い得るものと信じる。

この研究の實驗は昭和20年5月より22年4月に至る間に行われたものの一部である。東京に於る歴史的に状態の悪いこの時期に實驗に従事された杉野幸子嬢、横田吉子嬢及び青木あや子嬢に對し茲に厚く感謝の意を表す次第である。