

自硬性安定液に関する研究（その2）

——自硬性安定液の硬化前の性状——

喜田大三 斎藤裕司
川地 武

Studies on Self-Hardening Slurry (Part 2)

——Properties Before Hardening——

Daizo Kita Hiroshi Saito
Takeshi Kawachi

Abstract

Self-hardening slurry must act as a ground stabilizing material during excavation, and harden quickly after completion of excavation to demonstrate the required strength and impermeability. Accordingly, laboratory experiments were carried out to develop slurry showing these functions and the following results were obtained. In the colloidal state, self-hardening slurry consisting of cement and bentonite is flocculated. Therefore, the flow property of this slurry is non-Newtonian and fluid loss is more than that of slurry in general. The properties of the slurry change drastically with time.

概 要

自硬性安定液は掘削中は壁面安定に有効な流体として機能し、掘削終了後には速やかに硬化して必要とされる強度、止水性などを発揮するものでなければならない。そこで、このような条件を満足するものとして高炉セメント系の硬化剤とベントナイトを含む自硬性安定液について、硬化前の性状を室内実験によって検討した。その結果、この安定液は凝集状態にあり、構造粘性を示すとともに、劣悪な造壁性を示すため改良の余地があることが判明した。また、この安定液は混入する粘性土や添加する遅延剤によって性状が変化するだけでなく、経時的な性状変化も著しい。これらの実験結果にもとづき、安定液の調合および品質管理について考察を加えた。

1. はじめに

アースダムを始めとする各種の締切りえん堤の下部の止水工や排水工事に伴う遮水工には従来グラウト工法が採用されているが、グラウト工法の施工管理の困難さに由来する効果の不確実性を克服する方策の一つとして、地中連続壁工法や柱列工法に準じた掘削を行ない、低強度の粘土モルタルで置換したり、泥水を固結化して、止水壁を構築する工法が実用化される傾向にある。一方、粘土モルタルや固結化した泥水とプレキャスト板とを併用して簡便な山留壁を構築する工法も考案されている。これらの工法には泥水を用いて地盤を掘削した後、粘土モルタルで置換する方式¹⁾、掘削孔に硬化剤を投入して泥水を固結化する方式²⁾、自硬性を有する泥水を用いて掘削する方式³⁾などがある。これらのうち、前二者では泥水と粘土モルタルとの置換性や投入した硬化剤の分布

の均一性の確保や施工性に疑問もあり、これらの点においては後者が優れていると考えられる。一方、自硬性のある泥水（以後、自硬性安定液と呼ぶ）を用いる方式では、掘削中は掘削壁面の安定や掘削能率の確保に有効であり、掘削終了後には速やかに硬化して所定の性能を示す安定液の調合と品質管理が不可欠である。そこで、新しい自硬性安定液の研究開発に着手し、自硬性安定液の調合、管理に有用な知見を得た。なお、本報は主として自硬性安定液の硬化前の性状について論及しており、硬化後の物性については別報⁴⁾で述べている。

2. 実験方法

2.1. 供試材料

硬化剤：市販の水硬性材料のなかでは硬化時間の遅い高炉セメント系の材料を使用した。

ベントナイト：群馬県産のNa型ベントナイト（250×

ッシュ)を使用した。

遅延剤: リグニンスルホン酸塩(遅延剤A)およびオキシカルボン酸塩(遅延剤B)を使用した。

掘削土: 東京, 大阪の沖積層シルトおよび千葉県船橋の砂を使用した。試料土の物理性を表-1に示す。

試料	粒 径 分 布			コ ン シ ス テ ン シ ー			自 然 含 水 比
	~5 μ	5~74 μ	74 μ ~	液 性 限 界	塑 性 限 界	塑 性 指 数	
シルトA	30%	68%	2%	99.8%	33.5%	66.3%	116.7%
シルトB	31%	64%	5%	53.5%	30.3%	23.2%	49.6%
砂	2%	9%	89%	—	—	—	12.4%

表-1 供試土の性状

2.2. 安定液の作成と保存

家庭用ミキサーによりベントナイトを水に懸濁させたのち, 硬化剤, 遅延剤を加え, 所定時間混練し試料とした。掘削土混入系ではこの安定液に湿潤状態の掘削土を加え, さらに混練した。作成した試料のうち, 粘度等の経時変化を見るものは, 往復振とう機によって試料を連続的にかく乱した。

2.3. 測定項目と方法

(1) 流動特性

ファンネル粘度計によってファンネル粘度を測定するとともに, B型粘度計およびVGメーターでみかけ粘度を測定した。さらに, B型粘度計によって安定液の流動曲線を描き, この曲線から降伏値を求めた。

(2) 造壁性

API規格の加圧濾過試験器により, 加圧条件を3kg/cm², 30分とした際の濾過水量および大林式の減圧濾過試験法による濾過水量を測定し, 脱水量として表示した。

(3) ブリージング

安定液を長さ50cmのアクリルシリンダーに入れ, 1日後あるいは2日後の界面沈降量を測定し, 安定液全体の高さに対する百分率で表示した。

(4) その他

pHはガラス電極法により, 比重はマッドバランスによって測定した。

3. 実験結果

3.1. 混練直後の性状

まず, 以後の実験結果の基本となる基本調合に

おける結果を表-2に示す。この基本調合は自硬性安定液に考えられる各種の用途を考慮したものであり, 調合A~Dは高強度を必要としない止水壁や杭の空掘り部の充てんなどを想定し, 調合D~Fは比較的高強度を必要とするプレキャスト板併用工法における裏込め充てんなどを想定している。なお, 当然ながらこれらの基本調合の安定液には必要に応じて遅延剤が添加されよう。

(1) 流動特性

表-2に示されるように, 自硬性安定液の混練直後のファンネル粘度は一般の泥水工法における泥水のそれと同じ範囲にあるが, みかけ粘度(η_{30})が異常に大きく, また降伏値も一般の泥水に比べて著しく高い。この理由は図-1の流動曲線に示されるように, 自硬性安定液ではズリ速度とズリ応力との関係が直線状ではなく, 非ニュートン性が著しいところにある。すなわち, 自硬性安定液は降伏値を有するビンガム流体であり, このためみかけ粘度のズリ速度依存性が著しい。これは, この安定液では硬化剤とベントナイトが凝集構造を形成しており, この構造が比較的小さな力で破壊され降伏値を発生していることを示している。したがって, 安定液の示す粘度は構造粘性にもとづくものである。このように, 自硬性安定液は一般の泥水とは異なり凝集状態にある。

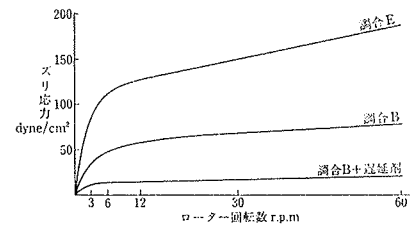


図-1 安定液の流動曲線

図-2は表-2の結果をもとに作図したものであり, これによれば, 安定液の流動特性には硬化剤よりベントナイトの調合量が大きく影響する。これは, 安定液の凝集構造すなわちゲル構造がベントナイト粒子によって形成されていることを示している。

記号	調合 kg/m ³		流 動 特 性 値				脱水量 (ml)		ブリージング率 (%)	比 重	pH
	硬化剤	ベントナイト	ファンネル粘度 (sec)	みかけ粘度* η_{30} (cp)	みかけ粘度** η_{300} (cp)	降伏値 (dyne/cm ²)	加圧法	減圧法			
A	120	50	24.0	415	15.5	52.8	225	23.5	4.2	1.102	12.8
B	160	50	24.5	461	15.5	55.2	202	23.5	7.6	1.121	13.1
C	160	60	26.6	580	21.5	76.8	181	19.5	3.5	1.124	13.1
D	160	75	34.2	1500	45.0	194.4	178	14.0	1.8	1.128	13.0
E	200	75	35.4	1700	45.2	232.8	196	16.0	1.5	1.150	13.0
F	240	75	32.2	1340	32.2	160.8	196	18.5	1.9	1.182	13.1

* B型粘度計の30rpmにおける粘度 ** VGメーターの300rpmにおける粘度

表-2 基本調合安定液の性状(混練直後)

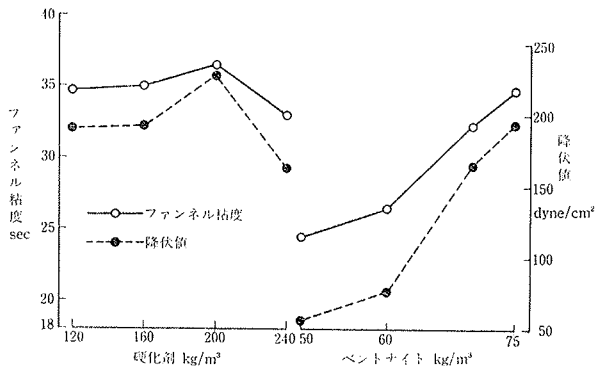


図-2 混練直後の安定液の流動特性

一方、基本調合の安定液に遅延剤を添加したところ図-3に示すように、粘度、降伏値ともに低下する。降伏値の低下は添加前の降伏値の高い調合Eで顕著であり、遅延剤の添加がベントナイト粒子によるゲル構造

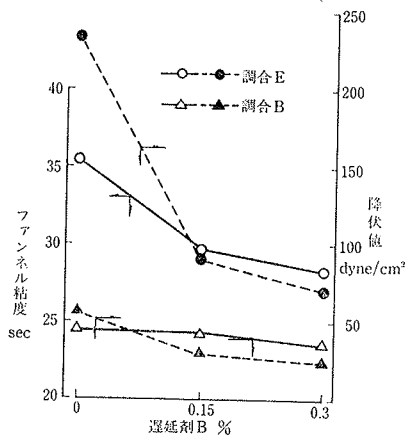


図-3 遅延剤の流動特性への影響

の形成を遅延させていることを示している。なお、この傾向は遅延剤Aでも同様に認められる。

(2) 造壁性

表-2に示すように、自硬性安定液は加圧法で200 ml前後、減圧法で20 ml前後の脱水量を示し、一般の泥水に比べて造壁性が著しく劣る。形成されるマッドケーキの厚さも加圧法では15~25 mmにもなる。このように安定液の造壁性が劣る理由は上述のように安定液が凝集状態にあるためである。加圧法と減圧法の脱水量の比は10前後であり、一般の泥水に比べて高い。

表-2に示されるように、脱水量はベントナイト濃度の増大につれて減少するが、硬化剤濃度の影響は顕著ではない。また、表示していないが、遅延剤の添加によって脱水量は減少する。

(3) ブリージング, 比重, pH

自硬性安定液は一般のモルタル等と比べて水量が多く、また凝集系にあるのでブリージングの発生が、表-2に示すように、基本調合のもので数パーセントになる。ブリージング発生の経過は示していないが、基本調合のものでは静置して10時間前後までブリージングが持続し、

普通ポルトランドセメントモルタルに比べて持続時間が長い。さらに、遅延剤が添加されると、図-4に示すようにブリージングは増大するとともに、持続時間は長くなる。

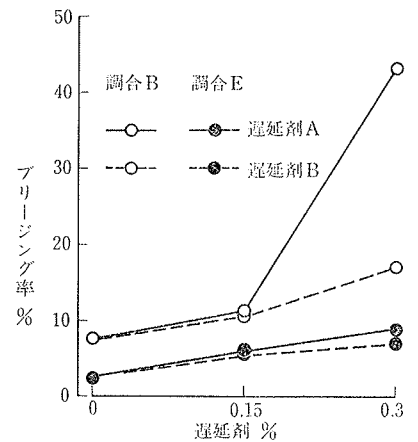


図-4 遅延剤添加によるブリージングの変化

一方、安定液の比重は1.1~

1.2の範囲にあり一般の泥水に比べて高い。また、pHは13前後を示し、自硬性安定液は強アルカリ性である。

3.2. 混入掘削土の影響

自硬性安定液によって地盤掘削を行なう場合にも掘削中には掘削土砂が混入し、その性状は混練直後の状態とは異なったものとなる。そこで、粘性土あるいは砂を混入させて安定液の性状変化の状況を見た。図-5には掃削土の混入量が7.5% (乾土) までの範囲における粘度への影響を示しているが、シルトAは混入量が5%以上で粘度をかなり上昇させる。図示していないが、その際の降伏値の上昇は著しく、粘性土の混入が安定液中のゲル構造を発達させていることを示している。シルトBではシルトAほどの影響は示さない。前出の表-1によれば両方のシルトは粒径分布は近似しているが、コンシステンシーが異なり、シルトAの方が活性の高い粘性土である。この活性度すなわち土粒子表面の物理化学的な性状の差が安定液への影響の差異を生じさせていると考えられる。なお、砂は実験した添加濃度の範囲(≤7.5%)ではほとんど影響を生じない。

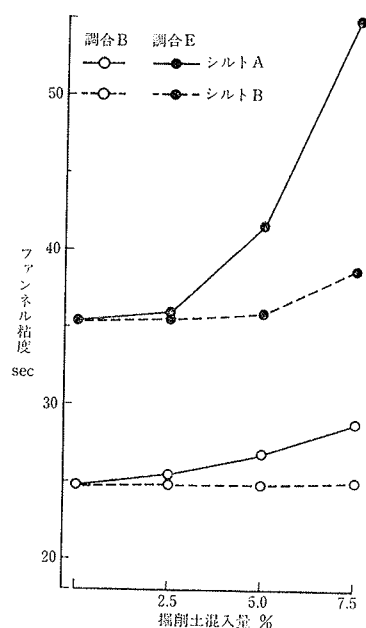


図-5 混入掘削土による流動特性の変化

一方、混入す

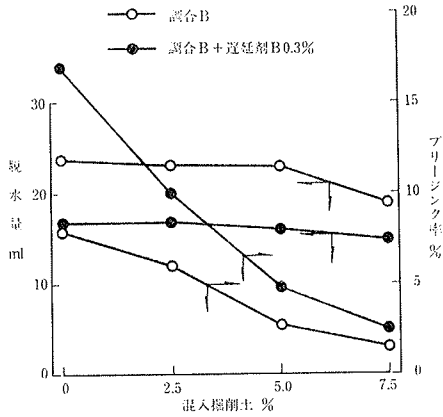


図-6 混入掘削土による造壁性、ブリージングの変化 (シルトA)

る粘性土は図-6に示すように脱水量を若干減少させるとともにシルトAではブリージング発生を抑制する。シルトAのブリージング抑制効果は上述のように混入土が安定液中のゲル構造を発達させ、このゲル構造が自重圧密に対する抵抗性を増大させているものと理解される。

また、混入する粘性土は安定液のpHを12.5近くまで低下させる。自硬性安定液の硬化剤はアルカリ状態で活性化して水硬性を発揮するので、粘性土が極端に多く混入しpH低下が著しい場合には、pH低下に対する防止策が必要とされよう。

なお、安定液に遅延剤を添加する場合、その効果が混入する粘性土によって低減する現象が認められた。これは遅延剤が粘性土粒子に吸着されることによるものと考えられ、遅延剤を添加する際には混入土の種類や量を考慮して添加量を決定する必要があることを示唆している。

3.3. 安定液の経時変化

自硬性安定液は一般の泥水と異なり、その性状が刻々と変化する。すなわち、安定液を混練直後から静置すれば、遅延剤を添加しない限り、1~2時間で粘度は著しく高くなりポンプによる輸送ができなくなる。このため、自硬性安定液はタンク等に貯留する場合にも常にかく乱を続けなくてはならない。図-7に常時かく乱をした場合の安定液の粘度変化を示したように、この場合にも粘度の経時変化は著しい。すなわち、基本調合Bでは混練後3~4時間に粘度が上昇し、その後低下し10時間後に再び上昇し、その後は混練直後の粘度に近づく。この安定液に粘性土が混入すると、粘度のピークが高くなるとともに早期に出現するようになる。これら二つのピークの意味は断定できないが、最初のピークは硬化剤から溶出するCa⁺⁺によるベントナイトのゲル化のピーク、二

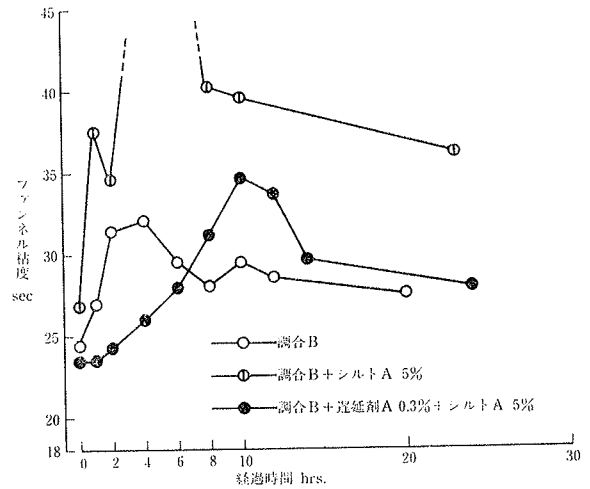


図-7 粘度の経時変化 (常時かく乱)

番目のピークは硬化剤成分による初期水和物、例えばエトリンジャイトの生成のピークを指すものと思われる。安定液に遅延剤が添加されるとピークの出現が大きく遅れ、またピークは一つになる。これは遅延剤による硬化剤からのCa⁺⁺溶出の抑制、水和物生成の遅延によって、両方のピークが重複したものと考えられる。

次に、造壁性の経時変化を図-8に示す。基本調合Bでは脱水量は時間経過とともに増大を続け、かく乱10時間後には100mlを越え、以後は平衡値に近づく。他の安定液も増大の傾向は同様であるが、平衡状態の脱水量は40~60mlである。このような造壁性の変化は安定液を静置した場合にも同様であり、造壁性の変化はゲル構造の形成や水和物の生成とは無関係の現象と考えられる。一般にNa型ベントナイトは分散性が高く、懸濁状態では脱水量が少ないが、セメントなどの硬化剤から溶出するCa⁺⁺によってCa型ベントナイトに移行し、そ

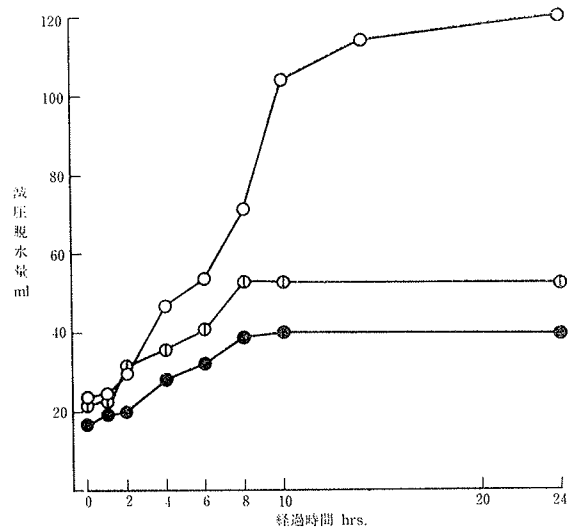


図-8 造壁性の経時変化 (常時かく乱, 記号は図-7と同様)

の際ベントナイトの膨潤性、保水性、分散性が低下し、造壁性が低下する。自硬性安定液の場合にも同様な現象が生じており、混練直後からCa型ベントナイトへの移行が始まり、10時間後にはその移行過程が完結するものと考えられる。

なお、実際の施工ではかく乱中の安定液が途中で静置され、その後硬化が始まる。そこで、図-9にかく乱途中で静置した際の粘度変化を示す。図示したように、ピークの前で静置した方が粘度は短時間に上昇し、硬化を始めるが、ピークを過ぎてかく乱し続けた後に静置したものは粘度が徐々に増大する。

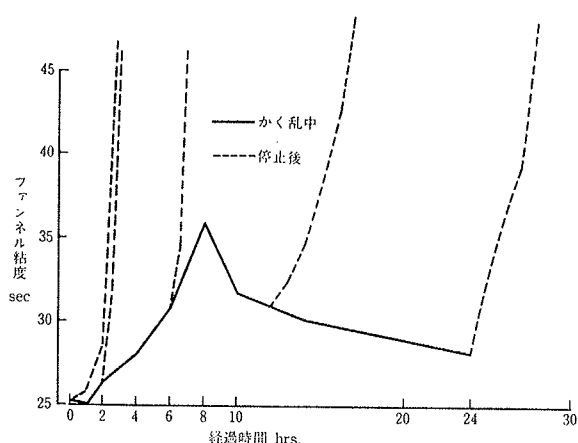


図-9 かく乱停止後の粘度の経時変化 (調査B+遅延剤B0.3%+シルトA5%)

4. 考察

4.1. 流動特性

一般に泥水による地盤掘削においては泥水の粘度は低い方が施工性の確保、スライム処理などの面で望ましい。自硬性安定液を用いて掘削する場合にも、粘度が高くなると混入する掘削土砂の沈降が遅くなるため安定液の比重の増大、粘度の一層の増大を招く。このような状態が著しくなると超音波方式による孔壁測定が困難になるだけでなく、プレキャスト板のそう入能率や精度の低下、掘削土が土塊として安定液に浮遊して硬化

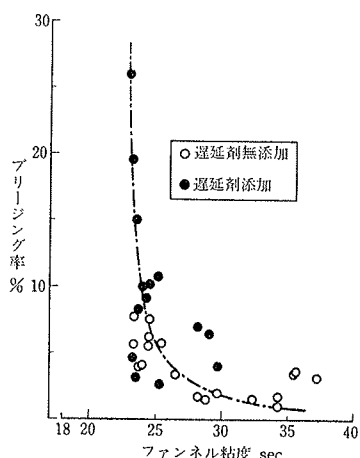


図-10 ブリージングと粘度との関係

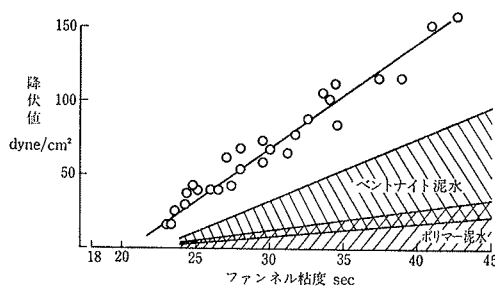


図-11 安定液の粘度と降伏値の関係

後の止水壁などの不均一性をもたらすなどの弊害が考えられる。一方、図-10に示すように安定液の粘度が低い場合にはブリージングの発生量が大きくなるので、自硬性安定液では余り粘度を低くすることもできない。

さて、前述のように自硬性安定液は構造粘性によって粘度を発現しており、図-11に示すよう、一般の泥水に比べて降伏値が著しく大きい。このため安定液はかなり粗大な粒子を浮遊させることができる。すなわち、安定液に浮遊しうる土粒子の径と安定液の降伏値の関係は次式で示される。ここで、

$$\tau = 980 \times \frac{2}{3} \times D \times (G_s - G_m)$$

τ : 降伏値 dyne/cm²

D: 粒子径 cm

G_s: 粒子の密度 g/cm³

G_m: 安定液の密度 g/cm³

土粒子が単一粒子の場合の密度を2.6g/cm³、土塊の場合を1.6g/cm³とし、安定液の密度を1.2g/cm³として、粒子径と降伏値との関係を求めると図-12が得られる。図によれば、100 dyne/cm²の降伏値の安定液では、単一粒子では1.2m/m以下のものが、土塊状では3.9m/m以下のものが浮遊しうる。したがって、土塊状であれば相当大きなものも安定液に浮遊するので、硬化壁体の均一性を確保するためには安定液の降伏値すなわち粘度を低くする必要がある。なお、図-11によれば、降伏値100 dyne/cm²はファンネル粘度で約35秒に相当する。

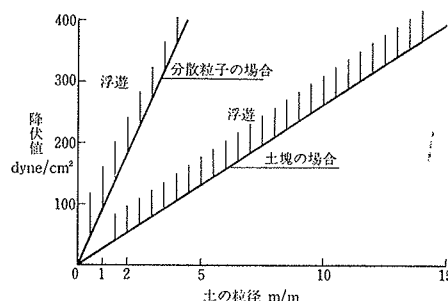


図-12 掘削土砂の浮遊条件

安定液の降伏値を低下させる方法としては前述のようにベントナイト濃度を低下させる方法や遅延剤の添加が考えられるが、ベントナイトは安定液のゲル構造の骨格成分であるので極端に少なくはできない。遅延剤の添加はブリージングの発生量を増大させるので、その添加量を最少限に留めるとともに、粘度が上昇し始めてから掘削を終了しようとする掘削計画が必要であろう。また、その際掘削土の混入程度によって遅延剤の必要量が異なる点にも留意する必要がある。

4.2. 造壁性

3で述べたように自硬性安定液は一般の泥水に比べて造壁性が著しく劣り、形成されるマッドケーキの止水性は一般の泥水の場合に形成されるものに比べて著しく劣る。したがって、掘削地盤の土質および地下水位によってはマッドケーキを介して安定液中の水分が周辺に逸水し、安定液の水位低下にもとづく掘削壁面の崩壊を生じることが考えられるので、水位低下を防止するために安定液の頻繁な補給が必要とされよう。また、安定液中の水分が周辺地盤へ逸水するため、掘削孔内の安定液は混練時に比べて硬化剤などが富調合となり、したがって、硬化体の強度などが設計値に比べて高くなることが推察される。さらに、逸水によって安定液の使用量が多くなることも考えられるので、設計、積算の時点で配慮が必要であろう。

さて、このように劣悪な安定液の造壁性の改良方法として遅延剤の添加はかなり有効である。しかし、遅延剤の添加は硬化時間の遅れ、ブリージングの増大を招くので注意が必要であり、自硬性安定液の造壁性の改良は今後の課題である。

4.3. ブリージング, pH

自硬性安定液は水分の多い凝集系の懸濁液であり、普通セメントモルタルなどに比べて硬化時間が遅いため、ある程度のブリージングの発生は避けられない。しかし、図-13に示したようにブリージングの発生は硬化体の強度のばらつきの原因となり、特にブリージング率が4%以上となるとばらつきが大きくなるのでブリージングの発生を極力抑制する必要がある。

ところで、ブリージング発生量は図-10に示したように、安定液の粘度と密接な関係があり、粘度を適切に管理することによってブリージング率を4%以下に抑制す

ることが可能であり、その際の粘度の下限値はファンネル粘度で26秒前後である。

安定液のpHは掘削土が混入しなければ13前後であるが、掘削土特に粘性土が混入することによって低下する。自硬性安定液の硬化剤は水サイ粉末を主体

とする高炉セメント系の材料であるので、pHが低下すると硬化不良を生じることが懸念される。硬化不良を生じさせないためには安定液のpHを12以上に維持する必要がある、粘性土地盤の掘削においては、この点を考慮して、安定液のpHを管理する必要がある。

5. おわりに

高炉セメント系の硬化剤を用いた自硬性安定液について、その硬化前の性状を従来の一般の泥水と比較しつつ検討した。その結果、この安定液は一般の泥水と異なり、凝集状態にあるため構造粘性を示し、また造壁性に劣ることなどが判明した。今後は自硬性安定液の改良を行なうとともに、工事現場で実際に施工した際の安定液の性状を明らかにしたい。

参考文献

- 1) 平岡：土と基礎，Vol.27，No.6，(1979)，pp.21～28
- 2) 増沢：施工，No.118，(1976)，pp.17～29
- 3) 山肩：土と基礎，Vol.21，No.1，(1973)，pp.39～46
- 4) 喜田，斎藤，川地：大林組技術研究所報，No.20，(1980)，pp.65～70

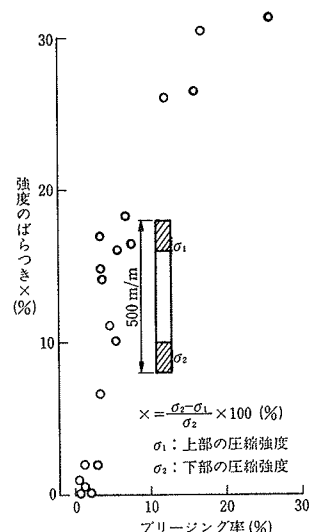


図-13 ブリージングの強度へのばらつきの影響