

地中連続壁工法における安定液の調合と管理

き 喜 た 田 だい 大 そう 三*

1. ま え が き

近年、地中連続壁工法の開発・普及は非常にめざましい。とくに市街地における建築基礎工事や土木工事では、公害対策の“無振動・無騒音工法”として、本工法は今後ますます伸長する傾向にある。そのため、地盤掘削時に使用する安定液（泥水）の主材料ベントナイト粘土の使用量は10年前の約10倍に増大し、昨年度で約3万トンであり、建設分野で使用するベントナイト量の約40%を占めるにいたっている。

さて、安定液は一般に6～12%濃度のベントナイト粘土の水懸濁液に、若干の有機質および無機質の各種調整剤を必要に応じて添加したものである。この安定液は地盤掘削に対しきわめて有効に作用するので、この作用を十分に発揮させて地盤掘削を安全に、正確に、そして経済的に行なう必要がある。そのためには、掘削地盤、掘削方法その他施工条件に応じて、適切な安定液の調合ならびに、使用中の有効性判定などの泥水管理が重要である。

ところで、安定液を使用した地盤掘削技術は19世紀末に石油ボーリングの分野で採用され、その技術をRanneyが1932年に建設分野の地中連続壁の構築に初めて適用した。その後、とくに1950年代に各種工法が考案され、わが国でも10数年前からこの種工法が実用化された。当然ながら、安定液の本格的な研究は少なく、安定液に関する技術は石油分野で開発されたものに準じて行なわれてきた。そして、わが国の安定液に関して石油分野の沖野¹⁾、石油分野の技術を建設分野へ適用した藤井²⁾の資料がある。

しかし、石油と建設の両分野では、掘削地盤の性状、掘削方法、掘削孔の形状、安定液の循環方式などが異なるので、安定液に関する検討が必要になった。そこで、筆者らは安定液の管理に関して一連の研究を行ってきた³⁾。ここでは、これらの研究成果を中心にして、安定液の材料と調合、安定液の有効性試験などを以下に概説する。

2. 安定液の機能と性質

2.1 掘削壁面の安定に関して

地中連続壁工法における安定液の機能は掘削土の運搬を最重視する石油ボーリングとは異なり、掘削壁面の安定を

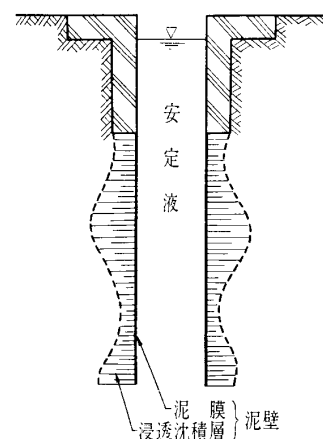
維持することが最も重要なものである。壁面安定の主たる機構は十分に解明されていないが、主として安定液のつぎのような作用によるものと推察される。

まず第一に、安定液が掘削壁面に図—1に示すような不透水性の泥壁を形成することがあげられる。安定液の泥壁形成作用はベントナイト濃度および懸濁分散状態によって支配される性質である。また、形成される泥壁は、筆者らの現場実態調査⁴⁾によれば、粘性土および砂質土のいずれの地盤においても形成される。泥膜は、2～20 mmの厚さであり、その透水係数は $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/secであり、ベントナイト含有量は20～30%である。一方、浸透沈積層は透水性のよい砂質土、砂レキでは掘削壁面から数10 cm～数mにも達していることなどが判明した。これらの泥壁形成の機構は、粘性土では化学的作用、砂では過作用が主たるものであろう。

泥壁の役割には、砂および砂レキにおいては、浸透したベントナイトがゲル化して土粒子を連結させて、これら土粒子の肌落ちを防止するとともに、安定液の流亡（逸泥）を防止することがあげられる。したがって、地盤に応じた泥壁形成性のすぐれた安定液を調合する必要がある。

つぎに、安定液による壁面安定の第2の作用は、安定液が水圧や土圧に対して、泥膜を介して泥水圧を作用させることにある。すなわち、湧水による地盤崩壊の防止に対しては、泥膜を介して泥水圧を作用させるため、液面を地下水位より高く維持したり、被圧水のある場合には安定液の水位を高くするだけでなく、安定液の比重を大きくする処置を講じる。

また、掘削壁面に作用する土圧に対しては、泥膜を介して泥水圧が作用する。その際に必要とされる安定液の比重に関しては、これを算出する理論式はまだ確立されていない。通常使用される安定液の比重は、未使用時には1.035



図—1 掘削孔内の泥壁

* 農博，大林組技術研究所土質基礎研究室長

～1.065, 掘削時には掘削土が混入して, 粘性土地盤で最高15%増大し, 砂レキ地盤では地下水が混入してやや低下する場合もある。

ところで, 筆者らの現場調査⁵⁾¹⁶⁾によれば, 粘性土ならびに大部分の砂地盤では, f が1以下の範囲でも, 安全に掘削することができた。ここに, f は次式で与えられる。

$$f = \gamma_m / \gamma_R$$

γ_m : 孔内の安定液の比重

γ_R : ランキンの式から算出した土圧 (水圧を含む) から算定した, 必要とされる安定液の比重

このことは, ランキンの土圧算定式は半無限の長さの掘削に適用すべきであるが, 実際には約10 mまでの有限長さの掘削であるので, アーチ作用の効果を考慮する必要のあること, また泥壁形成などの因子をも考慮する必要のあることを示唆している。

このように, 土圧 (水圧を含む) に対抗させるために安定液には適当な比重および安定な懸濁状態を保つことが要求される。

2.2 施工性に関して

安定液にはビットの洗浄, 掘削土の運搬, 保持など施工性に関係する機能がある。従来, 石油ボーリング分野では循環方式が正循環であるため, 掘削土の運搬機能が最も重視されている。したがって, それに応じた安定液の性質としてレオロジー性, とくに高い粘性が要求されている。しかし, 建設分野の地中連続壁工法では掘削方式がクラムシエルバケットによるつかみ取りやサクションによる逆循環方式で掘削土を運搬するため, 粘性の役割は無視してよい。

本工法ではむしろ, 掘削土の分離 (スクリーン, サイクロン, 自然沈降など) を容易にするような泥水の性質が要求される。このため, 特別の逸泥防止対策が必要とされる場合を除いて, 粘性は低い方が望ましい。したがって, 掘削土, 海水, セメントなどが混入して粘性が高くなりすぎるのを防止する必要がある。

ところで, 安定液は何回も使えるものではなく, 使用後の安定液は廃棄しなければならないが, 最近では水質汚濁の公害とも関連して廃棄場所も制限され, 経費も高くなっている⁶⁾。したがって, なるべく転用回数を向上させ, 廃棄する安定液を少なくする必要がある。そこで, できるだけ劣化しない安定液を調べるとともに, 使用中の安定液を懸濁分散性がすぐれ, 必要なベントナイト濃度を維持するように管理する必要がある。先に筆者が発表した大林式泥水試験⁷⁾⁸⁾によって当社では安定液管理を合理的に行なうことにより, 転用回数は2回前後, 最高5回に達している。

3. 安定液の材料と調査

安定液が2.で述べた諸機能を十分に発揮するには, 地盤および工法を考慮のうえ, 適切な材料を選択するとともに,

合理的な調査を行なう必要がある。

3.1 材 料

1) 水

多量の塩類は安定液を劣化させるので, 原則として清水を用いる。ただし, やむをえず, 海水のように多量の塩類を含む水を用いる場合には, 耐塩性粘土あるいは分散剤を多量に添加したベントナイト粘土を用いる。

2) 粘 土

粘土は安定液の主材料であり, 通常はベントナイトが使用される。この粘土は凝灰岩が熱水変成作用を受けて生成したものであり, わが国では, 東日本に広く産出し, とくに群馬・山形両県に, 西日本では福岡県に多く産出する。この粘土の有効な主成分は極微細な不定形板状の粘土鉱物モンモリロナイトである。これは他の粘土鉱物に比べて比表面積が著しく大きく, 負の電荷も大きく, その表面にNaイオンを吸着している場合には水中で良く膨潤し, 懸濁分散し, 粘稠でシキソトロピー性を示す。しかし, Caイオンを吸着したり, あるいは水中の塩類濃度が増すと, 水中における特異な性質は低減する。したがって, 地中連続壁工法ではCa系でなく, 主としてNa系のベントナイトの200～300メッシュのものを採用している。なお, 海水が多量に混入する場合には, ベントナイト以外に耐塩性粘土として, アタパルジャイト, セリサイト, クロライトなどの粘土鉱物を主体とするものが使用されることもある。

3) CMC

CMCは安定液の粘性を向上させ, 泥壁形成性を改善するために添加剤として使用される。これは木材パルプを化学的に処理した, 一種の高分子糊である。CMCは高価なものであるため, 材料の選択にあたっては, 品質のみならず価格をも考慮した, 合理的な選択法⁹⁾が必要である。

4) 分散剤

安定液中には掘削時に掘削土や地下水が, コンクリート打設時にはセメント成分が, 海岸地帯では海水が混入し, 安定液は劣化する。とくに, 図-2に示すように, 懸濁分散性が低下し, そのために泥壁形成性が低下する (泥膜の透水係数が大きくなる) とともに, 粘性が異常に上昇する。その結果, 劣化の著しい安定液は廃棄されるが, できるだけ転用することが望ましい。安定液の劣化を防止するには分散剤が有効であり, 分散剤を適切に添加することにより転用回数を向上させた例¹⁰⁾も報告されている。現在, 地中連続壁工法で使用されている分散剤には, 無機系の炭酸ソーダ, ヘキサメタリン酸ソーダや有機系のフミン酸ソーダ, 鉄クロムリグニンスルホン酸ソーダなどがある。筆者らはこれら分散剤の性能を比較し, 経済性をも考慮した結果, ヘキサメタリン酸ソーダがすぐれていることを明らかにし, 安定液の劣化因子およびベントナイトの種類に応じた, 分散剤の経済的な選択順位を提示した¹¹⁾。

5) 逸泥防止剤

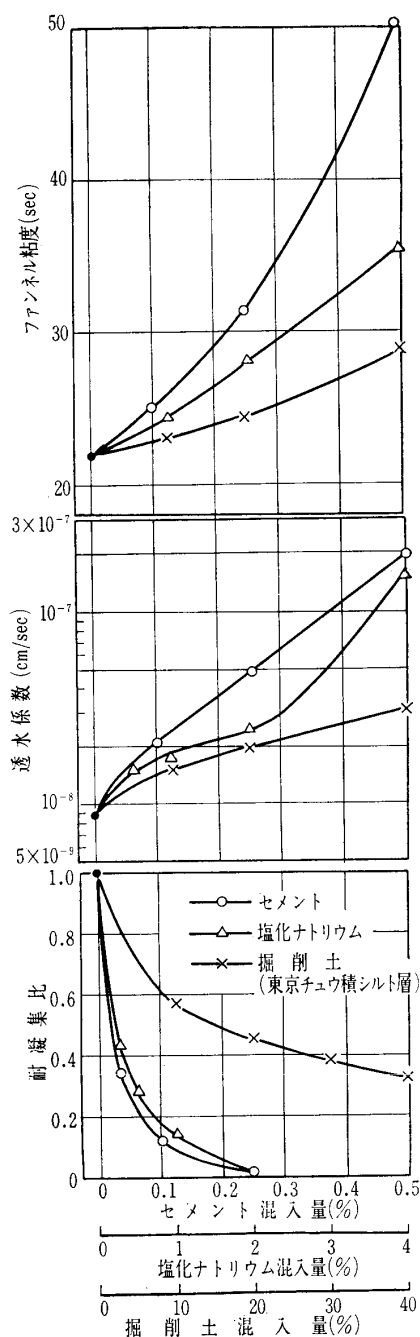


図-2 各種劣化因子による安定液の変化

最近、地中連続壁工法が砂レキ地盤にも適用されるようになるにつれ、逸泥事故によって急激に水位を低下させたために壁面崩壊を起こす場合がある。そこで、粗大な砂レキの間ゲキをふさぐために、各種の逸泥防止剤(材)を安定液に添加する必要がある。逸泥防止剤として、綿の実の殻、雲母系粘土、パルプ繊維などが市販されているが高価であるので、筆者らは、より一層安価な逸泥防止剤として粗粒フライアッシュを開発し、いくつかの現場で使用して効果を認めている¹²⁾。この他にも、安価なおがくずも有効である。

6) その他の添加剤

地下水位が安定液の水位より高い場合など、高比重泥水が必要な場合にバライトや鉄粉が加重剤として用いられる。

3.2 調 合

安定液の調合は地盤、施工条件、工法によって異なるが、地盤が最も大きな決定条件である。各地盤の調合例を表-1に示す。

表-1 代表的な調合例

地 盤	ベントナイト (%)	C M C (%)	分散剤 (%)	そ の 他
粘性土	6 ~ 8	—	~ 0.5	
砂	6 ~ 8	~ 0.05	~ 0.5	
砂レキ	8 ~ 12	0.05~0.1	—	逸泥防止剤

ここで、粘性土地盤では掘削土の混入によって安定液の粘性が高くなり、施工性の低下を防ぐため分散剤を添加して粘性の上昇を抑制する。

つぎに、砂地盤では良好な泥壁を形成し、とくに壁面の砂粒子の肌落ちを防止する必要がある。そして、当初は高濃度でベントナイトを使用していたが、現在では泥壁形成に有効なCMCを添加し、ベントナイト濃度は粘性土地盤のそれに類似させている。

一方、砂レキ地盤では地下水による安定液の希釈が著しいので高濃度でベントナイトを使用するとともに、逸泥防止のために逸泥防止剤が、たとえば綿の実の殻では1%前後、粗粒フライアッシュでは4%前後の濃度で添加される。そして、逸泥防止剤を安定に浮遊させるために高い粘性が必要とされるのでCMCが添加される。

これらの調合例は掘削深度が極端に深い場合、海水が混入する場合、また路下掘削の場合のように地下水位が安定液の水位より高い場合などには適用できず、その場合には特別の調合が必要である。また、地盤は不均一なもので、粘性土地盤といえども砂レキ層をはさむ場合もある。このような場合、二、三の調合計画を立て、掘削状況を見ながら、より経済的な調合を採用する。しかし、現場近くですでに施工例がある場合には、その例に準じた調合を採用すればよい。

さて、表-1の調合は標準的なもので、この調合で平均2回前後の転用を行なっている。さらに、使用中の泥水の劣化因子を分析し、劣化因子に見合った対策、たとえば、セメントなどによる懸濁分散性の低下の場合には分散剤濃度を、また湧水などによるベントナイト濃度や比重の低下の場合にはベントナイト濃度を調節すれば、数回の転用は可能である。いずれにせよ、転用回数の向上を図るためには適切な安定液の調合とともに、合理的な有効性試験が必要であることはいうまでもない。

4. 安定液の有効性試験

3.に前述した各種材料を調合し、ミキサーで混練された安定液は良液そう(槽)に貯えられる。この安定液は一般に繰返し使用するが、地盤掘削時に掘削土や地下水、またコンクリート打設時にセメント成分などが混入して安定液は

劣化する。そこで、使用中の安定液の有効性すなわち使用可否とか、その良否の程度を判定する試験を行なう必要がある。その結果に基づいて、安定液の性質をフルイ、サイクロンなどで機械的に、分散剤などの調整剤で化学的に改善する処置を行なう。また、コンクリート打設時には、安定液の劣化状況に応じて再使用液そうあるいは廃液そうへ回収する。

そこで、安定液の有効性判定試験を経験とカンに頼らないで科学的に行なうために、筆者らは現場調査と室内実験を通じて大林式泥水試験法⁷⁾⁸⁾を確立し、すでに多数の現場に適用し成果を収めている。一方、安定液掘削工法研究会では、従来石油ボーリング分野で採用されている方法に準じた試験法¹³⁾を提案している。いずれの方法も泥水の性状を数量化し、一応の判定基準を設けている。そこで、これらの試験法を解説し、その適用結果について概説する。

4.1 化学的試験

筆者らは安定液の有効性判定法を考案することを意図し、現場調査を行なった結果、2. で述べた安定液の機能と性質が、主として安定液中のベントナイト濃度(微細粒子濃度)とセメント成分あるいは海水などの塩類の濃度に支配されることが判明し、図-3に示すような有効性判定用管理図を作成した。この図において安定液の懸濁状態は図-4に示すように分類される。図-3において、未使用の安定液は左上方に位置する。掘削中には地下水による希釈や泥壁

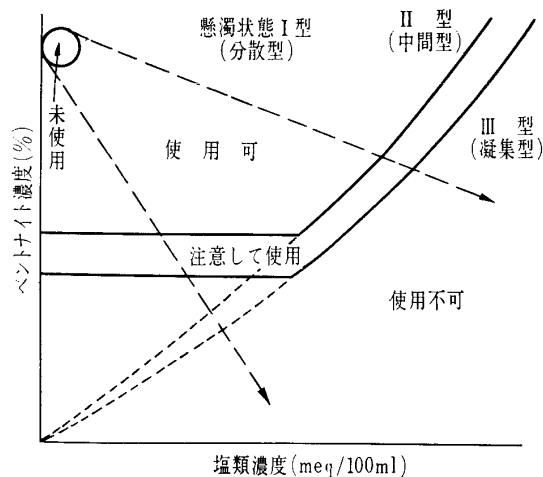
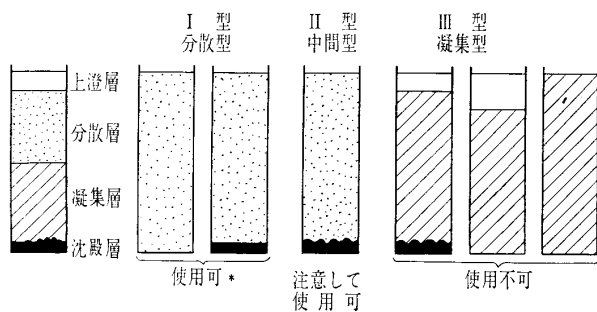


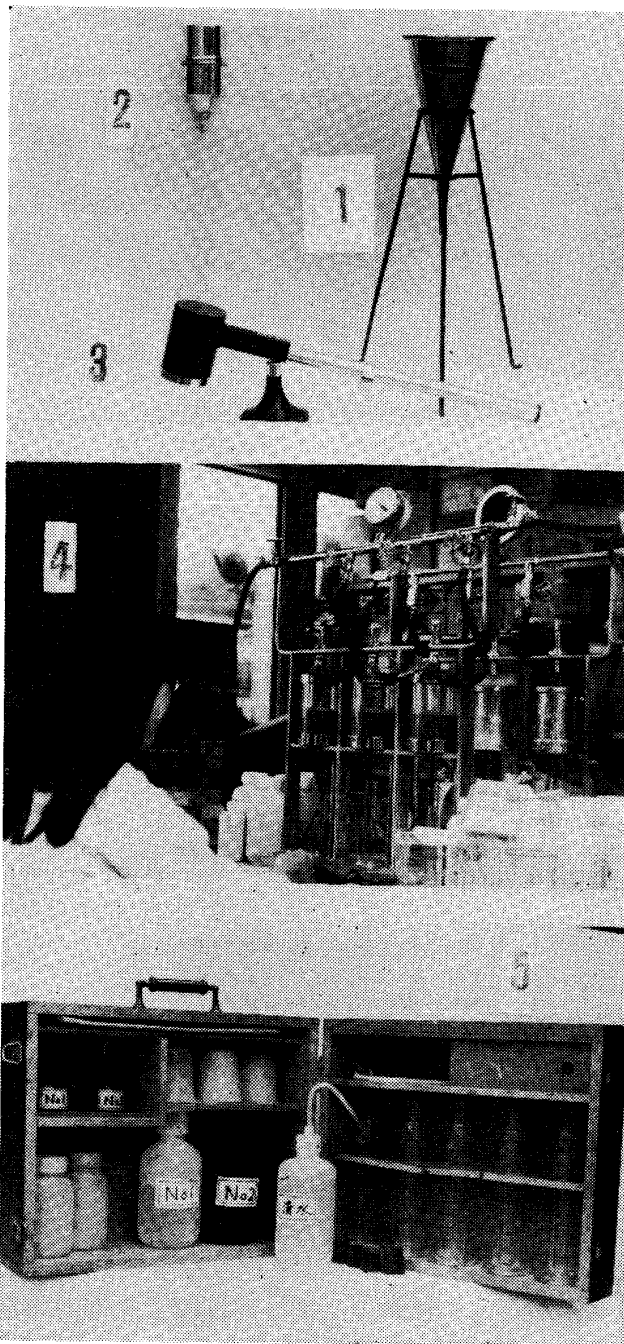
図-3 安定液の有効性判定用管理図



*ただし、この安定液のベントナイトが最低限界濃度以上であること

図-4 懸濁状態の型の分類 (模式図)

形成による微細粒子の消費によってベントナイト濃度は低下するとともに、塩類濃度が高くなる。そして、ベントナイト濃度の低下は掘削する土質によって異なり、粘性土では小さく、砂レキでは大きい。一方、コンクリート打設時にはベントナイト濃度はあまり変化しないが、打設の進行につれて塩類濃度が高くなり、懸濁状態はⅢ型(凝集型)に移行する。この状態の安定液は多量の上澄液を発生して泥壁形成性が低下し、また掘削孔内における比重の分布が不均一となり壁面安定上好ましくない。また、場合によっては安定液がゲル化し、流動性を失うため施工上好ましく



- ① ファンネル粘度計
- ② 砂分計
- ③ 比重計
- ④ ろ過試験器
- ⑤ 大林式泥水試験器

写真-1 各種試験器具

ない。

以上の考え方に基づいて筆者らは化学的手法によって測定する各種の大林式泥水試験法⁷⁾⁸⁾ (表—2 参照) を確立し、現場では条件に応じていずれかを採用している。写真—1 に改良迅速法試験器を示した。

表—2 大林式泥水試験法

判定法	試験項目	所要時間	特徴
簡易判定法	懸濁状態の型の分類と判定 ベントナイト濃度の測定と判定 塩類濃度の測定と判定	90分	泥水の使用可否 ならびに良否の 程度を判定する
迅速判定法	懸濁状態の型の分類と判定 ベントナイト濃度の測定と判定	30分	泥水の使用可否 を判定する
改良迅速判定法	同上	5分	同上

なお、この他に安定液の水素イオン濃度 (pH) による有効性試験がある。安定液の pH はセメント成分の混入によって高くなるので、コンクリート打設時のセメント成分の混入状況を把握することができる。現在、pH が 11.5 以上の安定液を使用不可とするという見解¹⁴⁾ があるが、安定液が使用不可となる際の pH はベントナイトや添加剤の種類・濃度、掘削土や地下水の性質によって異なるため、基準値を一律に決めない方がよい。

4.2 比重試験

2. で述べたように、掘削壁面の安定上、安定液の液圧は最も重要なものであり、液圧は水位と安定液の比重に支配されるので、安定液の比重を常時測定する必要があるとされ、写真に示した API (America Petroleum Institute) 規格のマッドバランスを用いて測定される。筆者らの現場実態調査⁵⁾ では、未使用の安定液の比重はベントナイト濃度 6% の 1.035 から 12% の 1.065 の範囲にあり、掘削孔内では掘削土の混入によって増大し、その増大の程度は掘削地盤によって異なるが、比重測定によって安定液の有効性を管理することはできないことが判明している。

したがって掘削当初に、地盤に応じて経験的に求められた比重 (たとえば 2. における γ_R にある係数を乗じた値) を満足しているかどうかを確認するにとどめている。なお、藤井¹⁴⁾ によれば未使用の安定液のベントナイト濃度を推定したり、掘削中の砂の混入状況を確認するのに比重測定は有効であるというが、混入するのは砂ばかりではないので判断がむずかしいようである。

4.3 粘性試験

安定液の粘性は施工性、すなわち掘削能率、掘削土の分離、スライムの防止、逸泥防止などに関係する重要な性質のひとつであり、安定液の材料、調合ならびに掘削土、地下水およびセメントなどの混入によって変化する。したがって、有効性管理のためには粘性の測定が必要とされ、写真で示した API 規格のファンネル粘度計によってファンネル粘度が測定される。そして、粘性による有効性管理のための基準値が表—3¹⁴⁾ のように提案されている。

表—3 安定液の適当な粘性¹⁴⁾

使用法	地盤の地質	砂 (500/500 cc)
循環	砂混じり, シルト	23 ~ 27
"	砂	28 ~ 35
"	レキ	37 ~ 45
静止状態	砂混じり, シルト	24 ~ 28
"	砂	32 ~ 40
"	レキ	45 ~ 55

ところが、筆者らの現場調査の結果¹⁵⁾ では、大林式泥水試験による判定結果と粘性による判定結果とは一致しない。また、最近の調査¹⁶⁾ では、粘性土地盤では粘度の分布範囲が広く、表—3 で示される基準値の範囲にはいるのは全体の 30% 前後であり、砂地盤では基準値の範囲にはいるのはさらに少なく、いずれの場合もとくに施工性の点で問題はなかった。一方、砂レキ地盤では基準値より低くなるものが大部分であり、この場合には若干の逸泥が認められ、粘性が適切でなかったといえるが、表—3 の基準値は高すぎるようである。したがって、掘削中の孔内の安定液を粘性によって管理することは、砂レキ地盤以外の地盤ではむずかしいようであり、とくに表—3 に示された基準値は実情に即したものとはいえない。

ところで、コンクリート打設時に安定液中にセメント成分が混入して、安定液が凝集してゲル化することを 4.1 で述べた。ゲル化した安定液は粘性が著しく上昇するので、コンクリート打設時の安定液の再使用の可否を迅速に判定するのにファンネル粘度計を用いると便利である。その際の基準値については、45 秒以上を使用不可とするのが適当と思われる。

4.4 脱水量試験 (ろ過試験)

写真に示したような API 規格の加圧ろ過試験器によって測定される脱水量は安定液の泥壁形成性の指標として重視されている。筆者らの現場調査⁴⁾ によれば、泥壁形成性は安定液中のベントナイト濃度および懸濁分散状態に支配されるので、化学的試験を行なえばろ過試験の必要はない。なお、最近の調査¹⁶⁾ では掘削孔内の安定液の脱水量はかなり広範囲に分布し、従来提案されている基準値¹⁴⁾ (10 cc 以下: 良い安定液, 20 cc 以上: 悪い安定液) を採用すると、大部分が悪い安定液と判定される。しかし、いずれの現場でも壁面安定上とくに問題は発生していない。したがって、脱水量によって安定液の有効性を判定する場合には基準値の再検討が必要であろう。

4.5 砂分率試験

砂分率とは、写真に示した API 規格の砂分計を用いて測定される、安定液中の砂分 ($<74 \mu$) のタイ積容積百分率である。コンクリート打設時のスライムをなくすため掘削時に沈砂そう、スクリーン、サイクロンなどで砂を分離する際、その除去の状況を砂分計で判定できる。なお、掘削終了後砂の除去が不完全な場合には循環させながら除砂をするか、あるいは所要時間静置したのち孔底をさらえる。

4.6 安定液試験の運用

現在採用され、あるいは採用することが提案されている試験について、その項目、基準値および適用例を概説した。これらの試験は安定液を補給する場合、掘削中、コンクリート打設時などに行なうが、その際よく均一にされた試料について試験を行なう必要がある。試験項目は施工過程と掘削地盤を考慮のうえ、最も合理的なものを採用する必要がある。そこで、表—4にこれらの条件に応じた試験項目をあげる。

表—4 地盤と施工過程に応じた安定液試験項目

地 盤	施 工 過 程		
	掘 削 中	コンクリート打設	再使用液の補給
粘 性 土	・ベントナイト濃度 ・懸濁分散状態 ・砂 分 率	・懸濁分散状態	・ベントナイト濃度 ・懸濁分散状態
砂	同 上	・粘 性	同 上
砂 レ キ	・ベントナイト濃度 ・砂 分 率 ・粘 性	・(pH)	・ベントナイト濃度 ・砂 分 率 ・粘 性

5. あとがき

地中連続壁工法における安定液の調合と管理について、筆者らの研究結果を中心に、総括的なまとめを行なった。これからは安定液の有効性判定試験の自動化ならびに劣化して使用不可となった安定液の経済的固化処理、さらに特殊な条件、たとえば海底掘削などにおける安定液の調合と管理などの諸課題に対して研究開発がより一層進められ、地中連続壁工法の発展に寄与することを願っている。

参 考 文 献

1) 沖野：ボーリング用泥水 (1966)
2) 藤井：基礎工における地盤の安定 (泥水工法) (1966)
3) 喜田：地中連続壁工法における泥水の調合と管理, 建築技術, No. 222, p. 99, (1970)
4) 喜田・中田：現場泥水の造壁性の実態調査と管理 第4回土質工学研究発表会講演集, p. 287, (1969), 大林組技研報 No. 4, p. 101, (1970)
5) 喜田・中田・扇：現場泥水の比重の実態調査と管理 第3回土質工学研究発表会講演集, p. 487, (1968), 大林組技研報 No. 3, p. 114, (1969)
6) 喜田：泥水工法における廃液処理の現状と問題点, 施工技術, 5巻7号, p. 12, (1972)
7) 喜田：泥水有効性の簡易判定法, 第1回土質工学研究発表会講演集, p. 33, (1966), 大林組技研報 No. 1, p. 73, (1966)
8) 喜田：泥水有効性の迅速判定法, 第2回土質工学研究発表会講演集, p. 335, (1967), 大林組技研報 No. 1, p. 81, (1967)
9) 喜田・扇：泥水工法における調泥剤CMCの性能比較と経済的選択, 第2回土質工学研究発表会講演集, p. 341, (1967), 大林組技研報 No. 2, p. 141, (1968)
10) 喜田：海岸掘さくにおける泥水分散剤FCLの効能と経済性, 第3回土質工学研究発表会講演集, p. 481, (1968), 大林組技研報 No. 3, p. 107, (1969)
11) 喜田・川地：各種の泥水分散剤の性能比較, 第6回土質工学研究発表会講演集, p. 683, (1971), 大林組技研報 No. 4, p. 107 (1970), 建築技術 No. 246, p. 131, (1972)
12) 喜田・川地：アッシュ添加泥水による逸泥防止法の検討, 第6回土質工学研究発表会講演集, p. 687, (1971), 大林組技研報 No. 5, p. 120, (1971)
13) 安定液掘削工法研究会：安定液の管理方法 (1969)
14) 藤井：安定液の基本的性質と管理方法, 施工技術, 4巻7号, p. 8, (1971)
15) 喜田・中田・扇：OWS・SOLETANCHE工法の泥水粘度の現場調査と管理, 第3回土質工学研究発表会講演集, p. 493, (1968), 大林組技研報 No. 3, p. 121, (1969)
16) 喜田・川地：未発表

(原稿受理 1972.10.25)

*

*

*