

フェロシリコンの大深度地盤掘削用泥水への適用に関する研究

Study on Application of Ferro Silicone to Drilling Mud for Excavating the Ground in a Great Depth

吉田 弘 Hiroshi YOSHIDA (岡山大学大学院 環境生命科学研究科)
西垣 誠 Makoto NISHIGAKI (岡山大学大学院 環境生命科学研究科)
西山 哲 Satoshi NISHIYAMA (岡山大学大学院 環境生命科学研究科)

地中連続壁などの地盤を掘削する工法には、ベントナイトを主成分とした泥水が掘削壁面の安定性と施工性を確保するために使用されてきたが、大深度の掘削需要が増すにつれて、さらなる掘削壁面の安定性を確保できる泥水の開発が求められている。本研究ではベントナイトの約2倍の単位体積重量を有するフェロシリコンを泥水に添加することにより、前述の効果をj得ることができるだけでなく、掘削時の劣化特性も向上させる等の特性を持つ泥水の開発が可能であることを明らかにした。さらに使用済みの泥水からフェロシリコンを回収する電磁吸着法の実験結果は、約90%のFe元素成分の回収が可能であることを示し、本泥水が環境改善に寄与することも実証した。

キーワード：泥水、フェロシリコン、単位体積重量、大深度掘削 (IGC : C-5, K-10)

1. はじめに

近年、都市部において泥水を用いて地盤を掘削し、その後鉄筋コンクリートの壁を連続的に構築する地中連続壁工法が広く採用されてきた。本工法は他の地下工法と比較して施工中の騒音や振動が少なく、また止水性が高いため周辺地盤を乱さず、さらに地盤沈下も発生させにくいという特徴をもつため、1960年代にはいつてビルの地下外壁や地下街の側壁などの市街地の地下工事に急速に普及し、それ以後は地下タンクの側壁や下水処理場またはポンプ場における地下壁などの構築に採用されてきた。本工法の一般的な手順は次のとおりである。まず泥水を掘削孔内に充填させながら掘削を行い、次に掘削孔の底に堆積した掘り屑(スライム)を除去したのちに鉄筋カゴを挿入し、トレミー管を用いてコンクリートを打設することで地中に鉄筋コンクリート製の壁を形成する。この壁が連続して構築されるのが地中連続壁であり、剛性にすぐれるため独立して構築されたものが杭として利用される場合もある。近年の大深度地下利用法が成立したことにより、さらに本工法が大都市を中心に広まると考えられるが、泥水を用いて地中に連続壁体を構築する工法なので別名泥水工法とも呼ばれる。掘削からコンクリート打設までが泥水中で行われるので、本工法の施工の良否や構築される地中壁の品質が泥水の品質に左右され、泥水の品質管理が本工法の重要な要素とされてきた。しかしこれまでの泥水に関する技術のほとんどは石油ボーリングにおける技術が転用されてきたもので、掘削地盤や深さ、掘削孔の断面形状などを考慮した地中連続壁工法の実態に見合う泥水技術の確立がなされておらず、あらためて土木分野の実状に即した泥水技術の開発が求められている²⁾。

本工法における泥水の機能は掘削壁面の安定性の確保

および施工性の確保に大別される。掘削壁面安定の機構はいまだ理論的には充分解明されていない面もあるが、壁面に作用する土圧や水圧を泥水圧によって対抗させ、さらに粘着力のない砂地盤などでは浸透した泥水による土質改良効果が有効に作用するように品質を管理することが必要と考えられている³⁾。また泥水圧を地山へ伝達させるには、掘削壁面に良好な泥壁が形成されるように管理する必要があり、この泥壁は泥膜(マッドケーキ)と泥水浸透沈積層とで構成される。一般的には泥膜の厚さは2~20mm、透水係数は 10^{-9} ~ 10^{-10} m/sである。さらに掘削能率、掘削土砂の運搬や分離あるいはコンクリート打設の際の置換のしやすさなど施工性を良好にすることも要求される。たとえば掘削土砂は泥水と共に循環するので、掘削能率を改善するためにはスライムの除去能率を向上させることが必要であり、この性能は泥水の流動特性や比重に支配される。このように泥水には数多くの特性が要求され、これまでは一般にNa型のベントナイトを6~10%の濃度で水に懸濁分散させたものを使用している。水溶性高分子を0.4~1%溶解させたポリマー泥水も使用されてきてはいるが、石油ボーリングなどで古くから使用されてきたベントナイト泥水の使用が主流であり、土木分野での使用実態に即して再検討すべき点が多く残されている。たとえば従来のベントナイト泥水では、礫層等において泥水が逸水しやすいことによる掘削面の崩壊が懸念されている。掘削壁面の安定性の確保のためには、泥水の地盤に圧力を加える作用と掘削壁面の表面に泥膜を作る作用が重要になるが、それには泥水の比重すなわち単位体積重量の大きなものが有利であり、今後増えると予想される大深度掘削の際には、従来のベントナイトに代わる単位体積重量の大きい安定液材料の開発が急務となっている。

また泥水はコンクリート打設時にコンクリートと置換

表-1 ベントナイトとフェロシリコンの特性

材料名	単位体積重量 (kN/m ³)	融点	成分
ベントナイト	26.9	1100℃以上	モンモリロナイト主成分の粘土鉱物
フェロシリコン	51.0	1350℃	金属元素と30%以上90%未満のケイ素から成る合金鉄

されて循環して戻ってくる工法が一般的に採用される。泥水はポンプで回収され、品質低下の著しいものはこの段階で廃棄され、再使用可能なものは次の掘削工程に転用される。廃棄される場合、泥水は含水比が高いために捨て場所が限定され、現場内あるいは処理センターで脱水され、残存する固形物のみが土捨て場へ捨てられる。また分離水はpH調整等を行った後に下水あるいは河川に放流される。その際、回収効率を高めることが経済性の向上に寄与し、残存する固形物の重量を減量させることは環境改善に大きく寄与することになる⁴⁾。すなわち、前述の泥水の単位体積重量を大きくするという課題に関しては、ベントナイトよりも単位体積重量の大きな添加物を加えることで課題を解決できるが、環境への配慮を考慮すると、添加物が回収できることが望ましい。たとえばタングステン酸ナトリウムなどの添加も考慮されたが、固形物の増加につながり実現にはいたっていない。

本論文は上記の背景を鑑み、表-1に示すように単位体積重量がベントナイトの約2倍大きいフェロシリコン(以下、化学式のFeSiで表す)を土木分野での泥水に適用することを検討し、その実験的成果をまとめたものである。フェロシリコンは鉄に金属元素を加えた合金鉄と呼ばれるものの一つであり、融点が高く化学的に安定で、鋼強度、靱性、耐熱性および耐食性などを与えるための鋼の添加材としてや、脱硫・脱酸のための製鋼工程で一般的に用いられている工業的に安定して生産されている物質である。単位体積重量がベントナイトの約2倍であることから、大深度の掘削あるいは高圧地下水条件下の掘削の際、その土圧や水圧を上回る泥水圧を得やすいという利点が生じる。また比重の大きさを利用して浮遊選鉱用の重液への使用も検討されたことがあり、工業的に利用された場合の化学的安定性は保証されている⁵⁾⁶⁾。また鉄分を含むため磁性を帯び、電磁吸着法等により使用済み泥水からFeSiを回収することが可能であると考えられ、添加しても固形物の重量を大きく増やすことがなく前記現状の泥水が抱える課題を解決することが期待される。ここでは実現場に適用できる泥水を実現するためのFeSiの具体的な使用法やその特性さらには回収方法に関する実験結果を報告する。本内容は特に大深度の施工に有用な情報を与えるものであり、その他大深度を対象にしたシールド工法などにも適用でき、今後の土木施工に貢献できる研究成果を提供するものとする⁷⁾。なお崩壊しないよう孔壁を保護することから

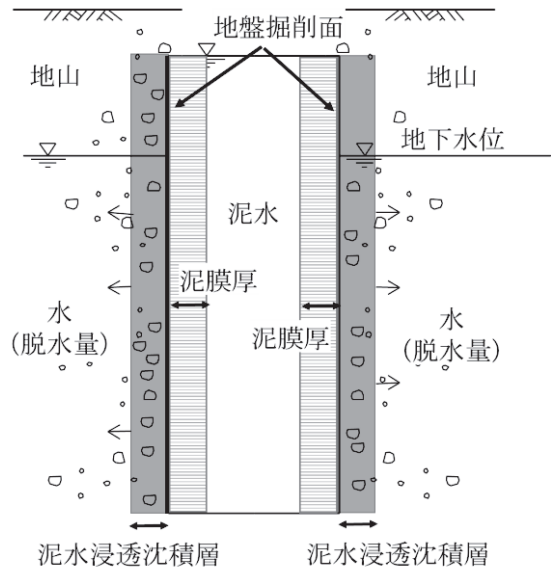


図-1 泥膜形成の概念図

表-2 泥水に要求される特性

要求される特性	具体的数値
粘度 (mPa・s)	50~3500
脱水量 (mL)	20以下
マッドケーキ厚 (mm)	5以上

泥水を安定液と称する場合もあるが、ここでは泥水の呼称だけを用いる。

2. FeSi を用いた泥水仕様の検討

ここではFeSiを添加した泥水に関する基本的な特性の検討結果を考察する⁸⁾。前述の単位体積重量の増加だけでなく、土木分野において使用される泥水に要求される機能としての掘削壁面の安定と施工性の確保のために、これまでの各種の実績から表-2に示される各特性値について具体的な数値が挙げられている⁹⁾。土木分野の基礎工事において最も重要なことは掘削壁面の崩壊を防ぎ、掘削した地盤の安定を確保することである。これは泥水の特性として図-1のように泥膜厚と脱水量で表現される。図は掘削工程中の泥膜の形成過程を示したものであり、この図のように泥水が地盤中に浸入し、地盤中の隙間に泥水の粒子が入り込み、やがて小さな隙間の箇所でも閉塞を起こす。その後泥水は固溶している成分と水とに分離し、その過程で地盤の表層内部および表面に泥壁が形成される。この泥壁を介して掘削面と地盤との間に差圧が生じるが、泥壁が保護膜となって地盤が崩壊するのを防止する。このように掘削壁面に作用する土圧や水圧を泥水圧によって対抗させ、粘着力のない砂から成る地盤などでは、浸透した泥水による土質改良効果が有効に作用するような特性を持たせることが必要である。一方、施工性においては掘削能率、掘削土

砂の運搬や分離さらにはコンクリート打設の際の置換のしやすさなどが考慮される。泥水を循環させて掘削する工法では、掘削土砂は泥水と共に循環してスクリーン、サイクロンなどによって分離除去されるが、その際の除去能率は泥水の性状、特に流動特性に支配されることになる。またコンクリートは泥水中に打設されるので、打設能率や流動状況には泥水の単位体積重量も影響する。これらの特性を考慮して、土木分野においてはこれまで表-2 に示す各種特性をもった泥水が要求されている。本研究は、泥水に添加した FeSi が表-2 に示される基本的な特性にどのような影響を与えるのかを検討したものであり、順次各特性について考察した結果を記述する。

2.1 単位体積重量の増加に関する検討結果

従来のベントナイトを主成分とした泥水の材料は、ベントナイトのほかに増粘剤、分散剤あるいは逸泥防止材などを混合させる。ベントナイトは 250 メッシュ前後の Na 型モンモリロナイトを含むものが使用されてきた。品質の良好なベントナイトは水 100 リットルに対し 8kg の混合で限界濃度になるため、ベントナイトで単位体積重量の増加を図ることには限界がある。増粘剤としては主として CMC(Carboxy-Methyl-Cellulose：カルボキシルメチルセルロース)が用いられ、0.025~0.1%の範囲で添加される。分散剤はベントナイト泥水の塩類混入によるゲル化を防止するために添加され、一般的に濃度は 0.1~0.5%である。分散剤には各種のものがあ、泥水的主要劣化因子や使用するベントナイトの種類を考慮して選択される¹⁰⁾。ここでは標準的な 10%以下の濃度のベントナイト溶液に FeSi 粉末を添加して、まず単位体積重量の変化を調べる。なお FeSi 添加前の泥水の単位体積重量は約 13kN/m³である。一般に使用される泥水に添加するので、増粘材や分散材も前述の割合で混合されているが、それらは単位体積重量に影響を及ぼさないで、ここでは添加量は制御していない。

FeSi の単位体積重量は Si の成分量によって変わるが、工業的に利用されているものの最大のもは約 51.0kN/m³であり、FeSi を添加することで、約 27.0kN/m³の単位体積重量のベントナイトの約 2 倍の比重をもつ泥水を製造することができる。前述の通り、壁面安定のためは単位体積重量の大きな FeSi を加えた高比重の泥水が適しているが、その一方でコンクリートとの置換性の向上のためには低比重のものが適することから、12.8~29.4kN/m³の範囲に調整されることが望ましいとされる。図-2 は、平均粒径が 45 μ m、72 μ mおよび 100 μ m の FeSi 粉を水 100g に対して混合した FeSi の量と泥水の単位体積重量の関係を示したものである。なお泥水は一般に使用されている 10%以下の濃度のベントナイト溶液であり、その単位体積重量は約 13kN/m³であることから、図より FeSi の添加によって単位体積重量を増加させる効果は明らかである。また FeSi の添加量と泥水の単位体積重量は、FeSi 粉末の平均粒径に依存することなくほぼ線形関係にある。これにより、泥水の単位体積重量も粒径に関係なく添加量の調整によって容

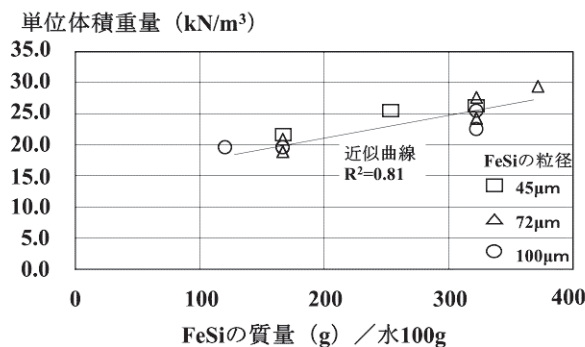


図-2 FeSi の添加量と単位体積重量の関係

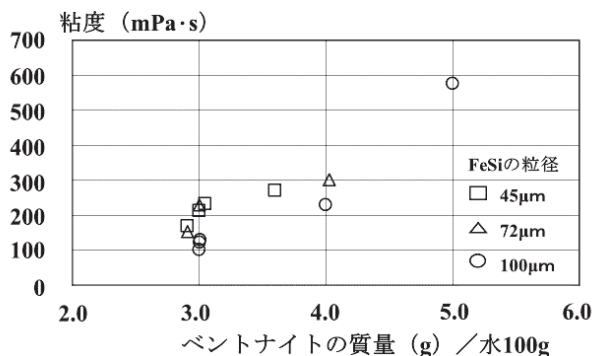


図-3 ベントナイトの添加量と粘度の関係

易に制御できることが分かる。

2.2 粘度に関する検討結果

次に泥水の粘度であるが、掘削に伴って発生するズリを運ぶ能力をもたせるためには高粘度が必要となるが、逆に掘削速度は低下する。そのため表-2 に示す粘度が適する範囲になると考えられているが、FeSi は化学的に安定で水に溶けないことから粘度には影響を与えないと考えられる。これを確認したものが図-3 の結果であり、図は FeSi を加えることで単位体積重量を 19.6kN/m³に調整した泥水に、ベントナイトを加える量を変えた際の粘度の変化を調べたものである。なお粘度は B 型粘度計で計測した。

図に示すように、FeSi の粒径にかかわらずベントナイトの添加量に応じて粘度が変化することから、ベントナイトの添加量を調整することによって所望する粘度の泥水となる。また、これまでは単位体積重量の大きな泥水を作成する際にはベントナイトの量を増加させる工夫が取られていたが、ベントナイトの主成分である Na 型モンモリロナイトは、掘削工程中にセメントが混入した場合、Na イオンがセメント中の Ca イオンに置換される現象がおこる。また地下深部の地層水は塩分を含んでおり、これらの中にも含まれている各種イオンも Na イオンと置換する。一般にこれらのイオンの置換が発生すると、ベントナイト粒子の凝集が生じ、脱水の増加、泥壁の厚さの増加などの他に、多くの場合は泥水の粘度が急増することによる掘削効率の低下をもたらすことが知られている。これまでの例では、ベントナイトによって作成された泥水に対してセメントが溶液に対して 0.5%混入しただけでも粘度が著しく上昇

し、ゲル化と称される劣化状態になることが指摘されている。これらの対策として、あらかじめ特定のイオンを加えた泥水を調合したり、粘度降下剤で凝集したベントナイトを分散させたりする工夫が取られてきたが、その混合量の調整は現場ごとに異なり、経験に頼った労力を要するものであった。しかしながら FeSi 粉を添加した泥水は、その効果によって単位体積重量が増加するので、これまでのように単位体積重量を増加させる目的等のためにベントナイトを添加する必要がなく、後述の高分子材料の混合量の調整とともに、これまでより少量のベントナイトの添加で粘度を調整することが可能となる。これよりコンクリート打設時に混入するセメント成分などによる泥水の劣化が生じにくい利点も生じることが分かる。

2.3 脱水量および泥膜厚の特性に関する検討結果

泥膜厚はアメリカ石油協会(API: American Petroleum Institute)の試験法に準拠して計測しその結果を考察した。試験の概要は次のとおりである。図-4 は計測のための簡易圧力計の概念図を示す。計測に際しては、図の試料挿入用ゴム用具内に試料を 94mL 入れる。この部分は下部のみ開放しており、底部にろ紙（粒子保持能 20-25 μ m No.4 ろ紙）を設置し、その上面から 30kPa の圧力の CO₂ ガスを 30 分間印加して、ろ紙を通過した泥水量を脱水量とし、さらにろ紙の下部に形成された泥膜を泥膜厚とする。

図-5 は FeSi の添加量を変えて泥水の単位体積重量を変化させた際の脱水量を調べた結果であり、泥水は図-2 において示したものと同一 10%以下のベントナイトと 0.5%以下の CMC を加えた溶液に、FeSi 添加量を変えて単位体積重量を調整したものである。FeSi の添加量を多くして単位体積重量を大きくするとやや脱水量が減少する傾向が見られるが、泥水として好ましいとされる単位体積重量が 12.8~29.4kN/m³ の範囲を含めて、脱水量は要求される 20mL 以下となっていることが分かる。これまでの泥水においては泥膜および脱水量の調整は、前述のとおりベントナイトの添加量とともに高分子材料を添加することで行われてきた。この高分子材料としては PVA(ポリビニールアルコール)、PA(ポリアクリル酸ソーダ)、PAA(ポリアクリルアミド)、PEO(ポリエチレンオキサイド)などの合成物質あるいは前述のカルボキシメチルセルロースや MC(メチルセルロース)などの天然物の誘導体があるが、これらの高分子材料は膨潤性をもち、低濃度の添加であっても粘度を調節することが可能で、さらにその効果によって泥膜造成作用も発揮される。FeSi はベントナイトや高分子材料のような膨潤作用を有していないことから、図-5 では FeSi の添加量によって脱水量も大きく変化しなかったと考えられる。そこで単位体積重量を 19.6kN/m³ に調整した泥水に高分子材料として CMC を添加した場合の添加量と脱水量の関係を図-6 に示す。高分子材料の添加量に応じて脱水量が減少する傾向にあることが分かる。これは高分子材料の増粘効果によるものと考えられ、図-5 と比較した場合、FeSi によって粘度に関する物性値は変化することが

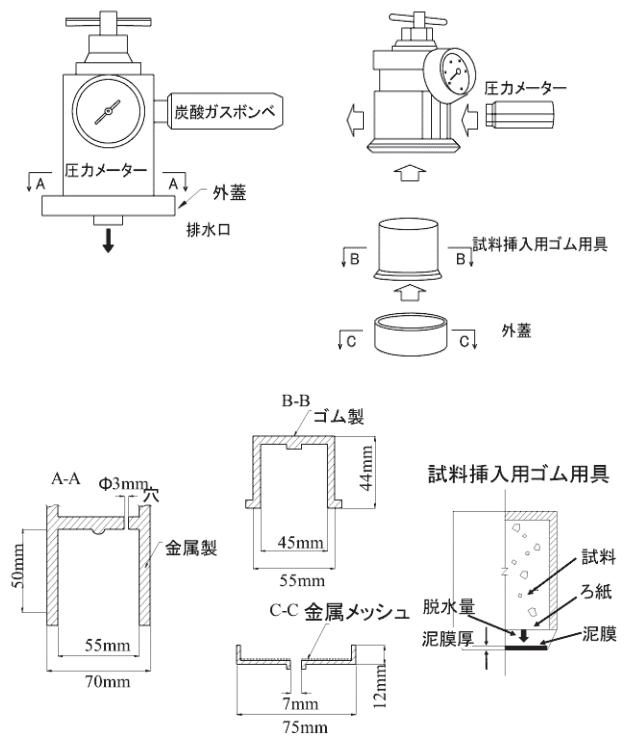


図-4 脱水量と泥膜厚計測機器の概念図

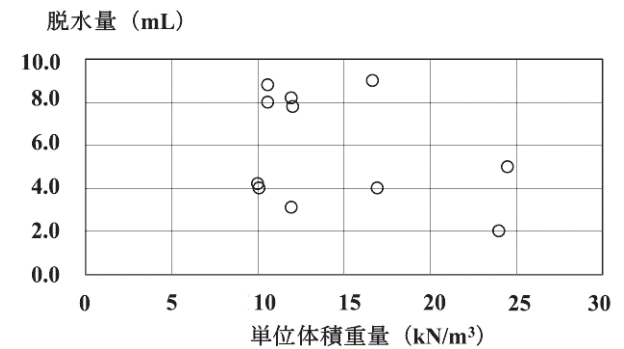


図-5 FeSi 添加泥水の単位体積重量と脱水量の関係

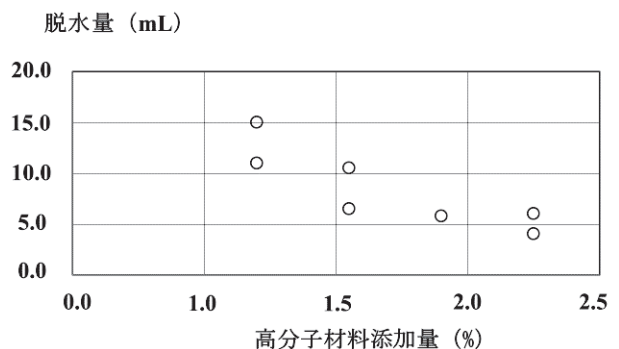


図-6 高分子材添加量と脱水量の関係

なく、またセメントの混入によって著しく劣化するベントナイトではなく、高分子材料によって粘度を調整できることが分かる。脱水量は泥膜厚に関係することから、FeSi を加えたベントナイト泥水における脱水量と泥膜厚の関係を示したものが図-7 である。所定の泥膜厚を得るために

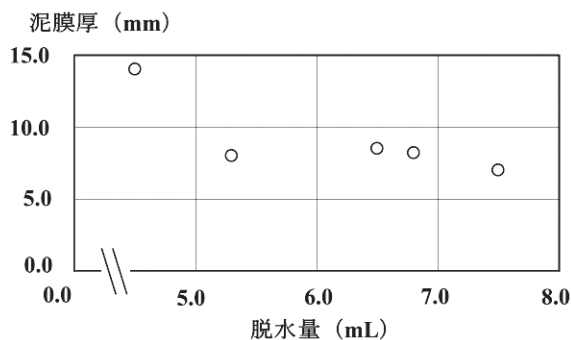


図-7 脱水量と泥膜厚の関係

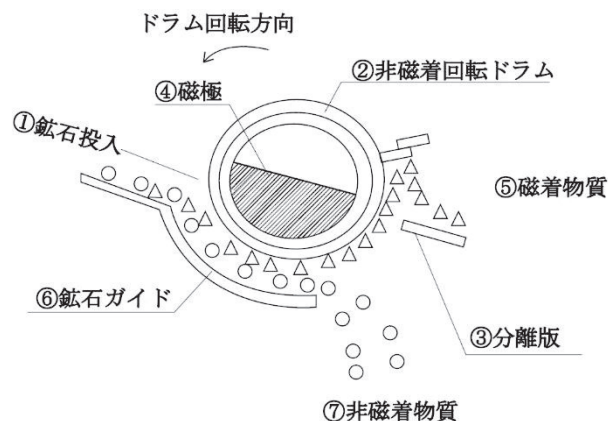


図-9 選鉄工程の概念図

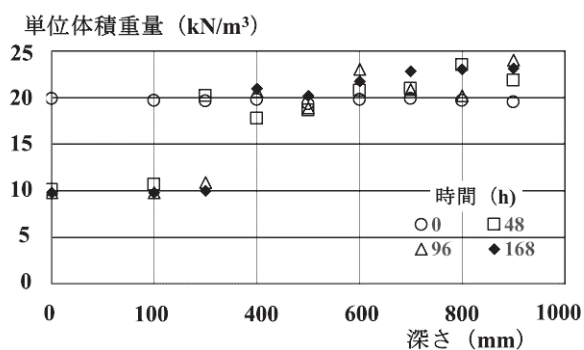


図-8 沈降試験結果

で沈降時間を計測した結果を図-8に示す。この結果より、48時間後に400mmまでの浅層の泥水の単位体積重量が減少する傾向が見られるが、その後168時間経過しても泥水の単位体積重量の変化は見られない。すなわち、ごく浅い層においてFeSi粒子が沈降する現象が見られたが、それ以外の層では時間の経過と共に沈降は生じておらず、また400mmより浅い層でも時間経過と共に沈降による成分が分離する現象が進行していない。実用的には泥水を48時間静置し、ごく浅い層だけを取り出して使用することはないので、FeSi添加の泥水の成分の分離は実用上問題がないと考えられる。

脱水量を調整する必要があるが、図-6に示したように高分子材料の添加量によって脱水量を抑制すると同時に泥膜厚も制御できることが分かる。これらの結果は、泥水の単位体積重量を増やすことはFeSiが担い、それ以外の粘度等の泥水特性を高分子材料で調整できるということを示すものであり、その結果として掘削時およびコンクリート打設時に劣化しやすいベントナイトの添加量を抑制できることにつながるから、大深度掘削時に用いる泥水としての有用性が示されたと考える。

2.4 沈降分析結果

本章における各項の検討結果で述べたように、FeSi粉末を加えることで、これまでの泥水と比較していくつかの優れた特性を発揮させることができる。これはFeSiの単位体積重量がベントナイトの約2倍であることに起因しているが、一方で泥水成分のうちFeSiだけが速く沈降してしまうと、泥水の単位体積重量が時々刻々と変化することになり、泥水としての機能が発揮できなくなる恐れがある。そこで、基本的な特性以外に、沈降による泥水成分の分離現象がどれくらいの時間後に生じるかを室内での鉛直カラム実験によって検討した。

本実験では、内径100mmで高さ3500mmの円筒に泥水を入れ、一定時間経過後に円筒の上端から100mmごとに泥水を注射器で採取していくことで、この円筒内での各高さでの泥水の単位体積重量の経時変化を計測した。平均粒径75 μ mのFeSi粉末を用いて単位体積重量を19.6kN/m³で粘度を153mPa \cdot sと比較的小さな値に調整した泥水を用い

3. FeSiの回収技術の開発

コスト面あるいは環境面から廃棄物の量を減らすために、泥水は可能な限り繰り返し使用されることが望ましい。本研究におけるFeSiを添加した泥水も同様であり、ここではFeSiの回収技術について考察した結果を示す。FeSiは鉄分を含むために磁性をもち、電磁吸着分離法で使用済みの泥水からFeSiを回収することが可能である。電磁吸着分離法とは、鉄鉱石の鉱山において掘削した岩砕から鉄鉱石を選別する際に使用されている手法である。本研究においても、この電磁吸着分離法を基に回収技術の実用化を図ることを試みた。本項では電磁吸着分離法を実施するための機械設備の概要および泥水の回収実験結果についての研究成果を述べる¹¹⁾。

3.1 電磁吸着分離法実施のための機械設備

まず本研究の基本となる鉱山において使用されてきた電磁吸着分離法の概要を記述する^{12),13)}。図-9は代表的な選鉄工程の概略を示したものである。選鉄器は磁極が装置された回転ドラムの外周に、非磁性ドラムが回転する構造になっており、投入された鉱石は、回転ドラム外縁に沿って流れている間にこの回転ドラムに磁着されながら分離板まで運ばれる。このとき鉱石中の磁性を帯びた鉱石は分

離版を越えて運ばれるが、非磁性鉱石は鉱石ガイドと示されたガイド板を通過して分離版に到達するまでに落下する。これにより磁性を帯びた鉱石と非磁性鉱石が選別され各々集積される。図-10 は実際に使用されているグレンダール式と称される電磁選鉱器であり、非磁性回転ドラムの内側に直流式の電磁石が備わっており、鉱石は重液の状態ですらドラムに投入される。上昇水流によって鉱石はドラムに入り、磁性を帯びた鉱石を集積する精鉱室と非磁性の鉱石を集積する尾鉱室および両者が混合して不完全に分離された鉱石が片羽室と称される集積室に選別される。鉱山では設備は永久的に設置されるので、図におけるドラムの直径は500~750mmであり幅430~800mmと大型である。

この選鉱器を用いて磁鉄鉱の回収を行ったこれまでの鉱山での実績を表-3に示す。鉱石の状態によって磁鉄鉱の回収率は異なり、予めスクリーンによる材料分別を行うなどの工夫を行っているが、微細な粉末に対する回収率は高くなく、全体の回収率は大きくばらついているのが現状である。表-3には各設備で配置されている磁石の磁束密度を掲載しているが、重要なのは磁界の強さ H と磁界の勾配 $(\partial H/\partial x)$ の積 $H(\partial H/\partial x)$ であり、より弱い磁性の粒子を磁着させるために強大な磁界をもつ設備を用意することには設備に限界があり、 $\partial H/\partial x$ を大きくすることで大きな $H(\partial H/\partial x)$ を実現して吸着能力を向上させることの方が効率的である。回収率を向上させている鉱山では、このような設備上の工夫が採用されている。

そこで本研究では、これらの鉱山での実績をふまえて、図-11に示す選別器を開発し、FeSiを添加した泥水への適用を試みた。鉱山での鉱石の選別は1mm~5mmの粒径の粒子が多く、電磁吸着の効率が比較的良好なのに対して、FeSiを添加した泥水は100 μm 以下の粒子が主であり、また粘度が高いことから粒子の吸着能が低いと考えられる。また土木分野での泥水には粒径が100 μm ~50mmで平均の単位体積重量が25kN/m³程度の掘削土砂が含有された懸

表-3 鉱山での鉱石回収実績例

鉱山場所	磁束密度 (ガウス)	給鉱濃度 (%)	回収率 (%)
釜石	1000~2000	10	57
見立	1200	16-73	42
白滝	1050	7.3	99

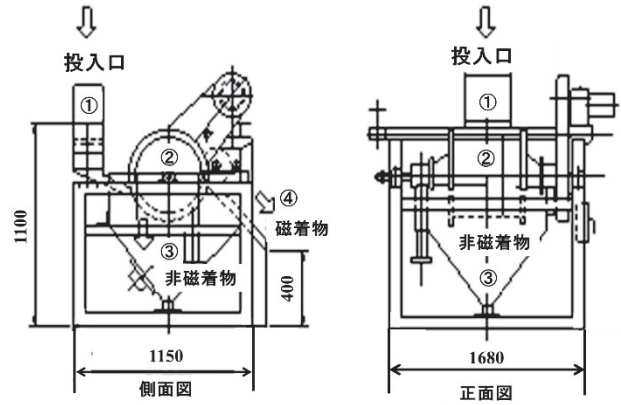


図-11 電磁選鉱器の原理を利用した FeSi 回収器

濁状になるのが一般的であり、磁性物質の粒径が小さいだけでなく、他の混合物も数多く含まれる状態の中から効率よく磁性物質を選別する必要がある。これらの理由から電磁吸着部分の磁力を高めることが必要であると判断し、この設備では、これまでの選鉱器よりも大きな3800ガウスの磁石を用いることで磁性物質の吸着能を向上させた。また鉱山で使用される設備は永久的に設置できるので大設備化も可能であるが、土木分野で使用される設備は短期間の操業で小さく移動可能なものが便利である。これらのことを考慮して、選別の原理は同じであるが図-10に示すこれまでのような大型の電磁選鉱器に代わり図-11に示すような小型の泥水成分の回収器を開発した。設備の小型化には、吸着設備の磁力を大きなものにしても、その設備自体が小型になるので大幅なコスト高にはならない利点も生じる。この回収器では、投入口から投入された泥水はドラムに搬送され、泥水中の磁性を帯びたものはドラムに吸着された後にドラムの回転に伴って背面に達し、磁場の影響がなくなった時点で落下して集積される構造になっている。一方、非磁性の成分はドラム回転中に吸着されないことを利用して、専用のホッパーに落下して分離される。本研究では泥水からFeSiを回収する実験を本設備を用いて実施し、その回収効率等を考察した。

3.2 泥水中の FeSi 成分の回収実験結果

ここではFeSiを添加した泥水の回収実験結果を報告する。実験に供した3種類の泥水の配合を表-4に示す。泥水中には実際の掘削工程中に地盤材料が混入されることを想

① 非磁性回転ドラム固定式電磁石

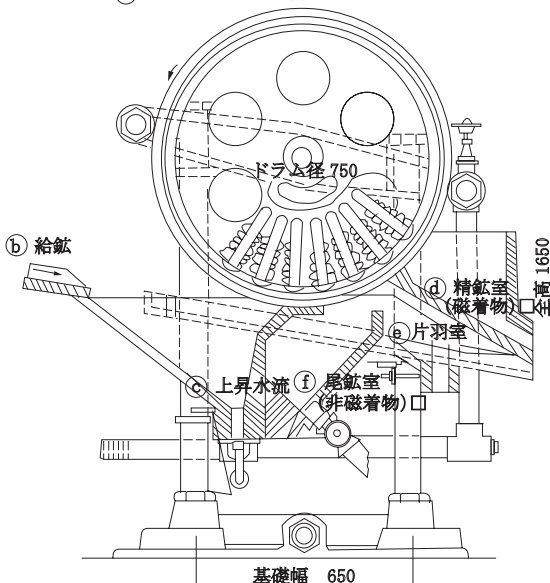


図-10 グレンダール式電磁選鉱器

定して豊浦砂を添加している。表中の鉄元素分と記している量は、各々の試料の Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 等のメタリック鉄の量を求めて総計した値である。また表-5 は 3 種類の泥水の基本特性として泥膜厚および単位体積重量を示したものである。このように 3 種類の泥水の単位体積重量は同じであるが、高分子材料の量を 0.074、0.20 および 0.40 kN/m^3 と変えることで違った粘度をもつものに調整しており、結果として泥膜厚の特性が異なるものとなっている。また本泥水に添加した FeSi 粉末の粒度分布を図-12 に示す。図のように、FeSi 粉末は 90%以上が 100 μm 以下のものである。このように、本実験はこれまでの選鉱器による選別が得意としている微細な粉末の回収能力を泥水の粘度の影響とともに実験によって検証したものである。

用意した 3 種類の泥水の回収実験の結果を表-6a, b に示す。回収物質量とは前述の設備においてドラムの背面にて磁場の影響がなくなった時点で落下して集積された量であり、Fe 元素成分回収量は回収物質量に回収物質中の鉄含有量を掛けたもの、そして Fe 成分回収率は Fe 元素成分回収量を全投入量中の Fe 成分量で割ったものである。試料 No.1, 2 および 3 ともに約 90%の Fe 元素成分の回収率を得ることができ、表-3 に示したこれまでの磁鉄鉱の選別における実績と比較しても優れた回収率を得ることができた。これは本手法において設備の磁力を高めるなどの工夫を行った効果が現れた結果と考えられる。また高分子材料の添加量が多く、粘度の大きな泥水ほど一般的に回収は困難になる傾向があるが、本実験結果では泥膜厚を変化させるために粘度を変えた泥水で実験したにもかかわらず、良好な回収率を得ることができた。これは FeSi を添加した泥水においては、高分子材料あるいはベントナイトを任意の割合で添加することにより泥水の基本特性を調整しても回収率には影響しないことを示す。

廃棄泥水の発生量は掘削条件によって変わるが、地下連続壁工事においては約 2~20 m^3 /日の廃棄泥水が生じているとの報告もあり、残存固形物の増加を防ぐことの意義は大きい。また再利用可能な材料の回収率が約 90%ということは、材料費を 10%に減価したことに相当し、現場に対応して FeSi を添加しても工程中の泥水の作成に要するコストの上昇が抑制されることになり、FeSi を添加した泥水の優れた有用性を証明するものと考えられる¹⁴⁾。

4. 結論

本研究は、大深度の掘削における掘削壁面の安定性の確保を目的として、これまでのベントナイトを主成分とする掘削用泥水にフェロシリコンを添加することで単位体積重量を大きくすることを試み、その泥水的基本的な特性を検討し、実用性を考察したものである。その結果、次の結論を得ることができた。

- (1) 鋼の添加材あるいは脱硫・脱酸のために製鋼工程で工業的に広く用いられている FeSi を用いてベントナイトより大きな単位体積重量をもつ泥水が製造できること

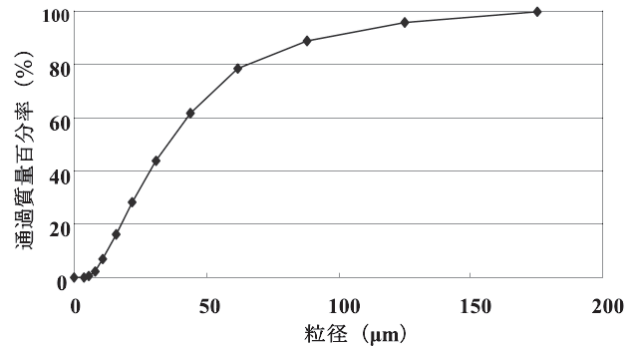


図-12 FeSi 粉末の粒径分布

表-4 実験に用いた泥水の配合

試料	FeSi (kN/m ³)	砂 (kN/m ³)	ポリマー (kN/m ³)	水 (kN/m ³)	Fe 元素分 (%)
No.1	1.47	3.82	0.07	132	23.1
No.2	1.47	3.82	0.2	132	23.1
No.3	1.47	3.82	0.4	132	23.1

表-5 実験に用いた泥水の特長

試料	泥膜厚(mm)	単位体積重量 (kN/m ³)
No.1	0.8	12.6
No.2	5.3	12.6
No.3	2.7	12.6

表-6a 回収実験結果

試料	全投入量中の Fe 成分量 (kN/m ³)	回収物質量 (kN/m ³)	回収物質中の鉄含有量 (%)
No. 1	1226.5	1559	70.6
No.2	1226.5	1359	80.5
No.3	1226.5	2101	53.9

表-6b 回収実験結果

試料	全投入量の 1 m^3 当たりの Fe 成分量 (kN/m ³)	Fe 元素成分回収量 (kN/m ³)	Fe 成分回収率 (%)
No.1	1226.5	1100.6	89.8
No.2	1226.5	1094.0	89.3
No.3	1226.5	1132.4	92.3

を実証した。FeSi は各種粒径をもつものが工業的に安定して生産されているが、FeSi の添加量と泥水の単位体積重量は FeSi 粉末の平均粒径に依存することなくほぼ線形関係にあり、泥水の単位体積重量も粒径に関係なく添加量の調整によって容易に制御できることを明らかにした。

- (2) FeSi を添加した泥水は、その効果によって単位体積重

量が増加するので、これまでのように単位体積重量を増加させる目的のためにベントナイトを多量に添加する必要がなくなり、これまでより少量のベントナイトの添加量でも粘度を調整することが可能となる。これによりコンクリート打設時に混入するセメント成分などによる泥水の劣化が生じにくい利点が生じ、またベントナイト泥水の劣化を防ぐために特定のイオンを加えたり、粘度降下剤で凝集したベントナイトを分散させたりするという経験に頼った調合をする必要がなく、現場に適する粘度をもつ泥水を容易に作成できることを明らかにした。

- (3) セメントの混入によって著しく劣化するベントナイトではなく高分子材料によって粘度を調整することが可能であることは、脱水量および泥膜厚の調整もこの高分子材料で容易にできることにつながり、前述の効果と同じく劣化しにくい泥水を容易に作成できることが示された。
- (4) 沈降実験の結果、時間経過と共に沈降によって大きく成分が分離する現象が生じないことを明らかにし、FeSi 添加の泥水の成分の安定性が実用上問題ないことを実証した。
- (5) 電磁吸着分離法による泥水の回収実験を実施した結果、泥水の粘度にかかわらず約 90%の Fe 元素成分の回収率を得ることを示した。一般的に泥水は現場で回収され再度掘削工程にて再利用されるが、品質低下の著しいものは廃棄される。そのため、泥水成分の回収率を高めることは経済性を改善するだけでなく、残存する固形物の重量を減量させることによる環境改善効果も大きいことを示すものである。本研究ではこれまでの鉱山にて実績のある磁鉄鉱の選別と比較しても優れた回収率を得ることができており、FeSi 添加効果の有用性を実証できたと考える。

以上のように本論文は FeSi を添加した泥水の実験的成果を実証した成果をまとめたものであるが、今後は都市部において増えると予想される地中連続壁工法の他、大深度を対象にしたシールド工法などへの適用をつうじて、本研究の成果の普及を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 斎藤二郎, 芳賀孝成: 地下連続壁工法の最近の動向, コンクリート工学, Vol.20, No.2, pp.14-21, 1982.
- 2) 喜田大三: 地中固化壁工法に使用する自硬性ベントナイト安定液, 粘土科学, Vol.29, No.1, pp.1-9, 1989.
- 3) 岡田武二: 地中連続壁工法の問題点, コンクリートジャーナル, Vol.19, No.1, pp.65-72, 1971.
- 4) 飯塚芳雄, 橋本修左: 建設工事から発生する泥水の処理・処分について, 粉体工学会誌, Vol.15, No.5, pp.31-39, 1978.
- 5) 三菱金属鉱業株式会社妙法鉱業所選鉱課: フェロシリコンにマグネタイトを混合した重液材, 浮選, Vol.10, pp.5-9, 1959.
- 6) 下飯坂潤三, 鴻巣彬, 林雄造, 富田堅二, 坂本宏: 擬重液による陶磁・アルミニウムの分離-故ビンからのカレットの回収に関する研究(第 2 報)-, 日本鉱業会誌, Vol.95, No.1096, pp.349-352, 1979.
- 7) 長谷川昌弘, 藤原雅博, 熊谷幸樹: 砂礫地盤における泥水式シールド工法の適正泥水性状に関する実験的研究, 土木学会論文集VI, Vol.22, No.486, pp.95-104, 1994.
- 8) 田中彰一: 掘さく泥水について-作井工学と粉体工学-, 粉体工学会誌, Vol.19, No.1, pp.23-32, 1971.
- 9) 藤井清光: ボーリング泥水に必要な性質とその調節, 日本鉱業会誌, Vol.75, No.849, pp.187-189, 1959.
- 10) 喜田大三, 川地武: 地中連続壁工法における粘土と高分子の反応の利用, 粘土科学, Vol.9, No.8, pp.10-21, 1979.
- 11) 渡邊勉, 小宮一仁, 清水英治: 建設汚泥の改良に関する基礎的研究, 廃棄物学会論文誌, Vol.12, No.1, pp.10-16, 2001.
- 12) 八嶋三郎: 最近における磁選機の進歩ならびにわが国とその周域における磁選の記録(資料), 日本鉱業会誌, Vol.103, No.1194, pp.525-530, 1987.
- 13) 三野英彦: 選鉱産物の解析に役立つ 2・3 の方法, 鉱山地質, Vol.12, No.51, pp.46-72, 1979.
- 14) 藤田圭一: 廃棄泥水の処理について, 土と基礎, Vol.21, No.1, pp.47-52, 1973.

(2015 年 6 月 22 日 受付)