

真空加圧脱水装置による高含水土の有効利用とセメント混入土処理への適用に関する研究

勝又正治¹・清水英樹²・福山雅典³・大林成行⁴

¹正会員 工博 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179 東京都練馬区旭町一丁目39-16)

²正会員 工修 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179 東京都練馬区旭町一丁目39-16)

³正会員 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179 東京都練馬区旭町一丁目39-16)

⁴正会員 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278 千葉県野田市山崎2641)

環境問題が大ききクローズアップされている今日、建設分野においても掘削工事などで排出される高含水土は産業廃棄物に指定され、その処理・処分が難しいのが現状である。そこで、筆者らはこの高含水土処理に対し低加圧と負圧を併用する新しい脱水機構を有する処理装置の開発を進めてきた^{4)~8)}。本論文は、この装置で得られた脱水ケーキの有効利用について研究すると共に、高含水土の内でも現在処理が難しいとされている地盤改良工事から発生する高含水セメント混入土に着目し、この処理に対する本装置を含む処理システムの適用性についてとりまとめたものである。この結果、幅広い高含水土に対し、本システムは有効利用を含めた処理方法として適用が可能であり、実用化に供する方法であることを確認できた。

Key Words : slurry, flocculant, dehydrator, sludge cake, soil improvement works, recycle, industrial waste

1. まえがき

環境問題に対する関心が高まっている現在、リサイクル法の施行により、建設分野においても産業廃棄物の処理と有効利用は重要な課題となっている。特に、掘削工事から発生する泥水や泥土状の搬出土（以下高含水土と記す）は産業廃棄物の汚泥に該当する。このような高含水土の発生量は、年間1,000万トンで、幅広い性状を示す高含水土の処理は難しく、有効利用の割合は30%程度である¹⁾。そこで、筆者らは排出量の多いセメントを混入していない高含水土（以下一般的な高含水土と記す）に対しては、これを効率よく脱水し、さらに脱水ケーキは土質材料として有効利用していける脱水装置の開発を進めてきた。その結果、「低加圧」と「負圧」を併用する独自の脱水機構を有する処理装置を考案した^{2)~6)}。従来の加圧による脱水装置としてはフィルタープレスが広く一般的に使用されており、この脱水機構は高含水土の投入圧で脱水する。これに対し真空脱水を併用させた結果、フィルタープレスよりも投入圧は低いにもかかわらず、脱水性が向上することがわかった。加圧のみの脱水では、脱水が進むにつれて次第に投入圧は土粒子骨格で受け持ってしまう、土粒子間の間隙水に投入圧が伝わりにくくなり、その結果脱水性は徐々に低下してしまう。し

かし、真空脱水を併用させることで、土粒子間の間隙水を負圧で強制的に吸引するため高効率な脱水性が確保されるものと考えられる⁷⁾。一方、地盤改良工事などから発生する高含水土はセメントが多量に混入しているため（以下高含水セメント混入土と記す）、時間の経過に伴って硬化し始め、流動性の低下が著しく大変取り扱いにくい。したがって、都市部ではこのような高含水セメント混入土については、ほとんどがバキューム車やコンテナ車でそのまま現場から搬出されているのが現状である。よって、この高含水土を効率的に脱水・減量化し、しかも改良土はダンプトラックで搬出できる処理装置が強く求められている。このような状況を踏まえ、開発した脱水装置を用い、一般的な高含水土を処理した場合に得られる脱水ケーキに対しては、その有効利用用途を検証する研究、さらには現在処理が難しいとされている高含水セメント混入土に対しては、当脱水装置を含むシステムの適用を図る研究を実施した。

本論文は、発生量が多い一般的な高含水土に対して、開発した脱水装置を用い、セメントを添加剤として脱水し、得られたケーキを盛土や埋戻し土として有効利用した場合の適用性について示したものである。さらに、処理の難しいとされている、すでにセメントが混入されている高含水土に対し、脱水してその量を減らし、現場などからの搬出量を極力

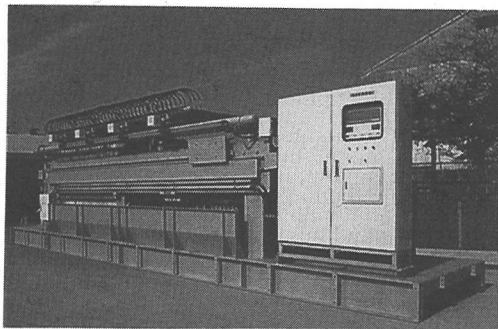


写真-1 脱水装置

表-1 脱水装置の仕様

| | | |
|------|------------------|------------------------------|
| ろ室数 | 38室 | |
| ろ室容積 | 約2m ³ | |
| 総重量 | 18t | |
| ろ板 | 材質 | ポリプロピレン |
| | 寸法 | 1.5×1.5 |
| ろ材 | 材質 | ポリプロピレン製ろ布 |
| | 厚さ | 0.48mm |
| | 通気度 | 1,800cc/min./cm ² |
| | 組織 | 5枚朱子織 |
| | 糸の形態 | モノフィラメント |
| | 破断強度 | 縦 150kgf/3cm 横 100kgf/3cm |
| 破断伸度 | 縦 30% 横 30% | |

少なくする目的で、このような高含水土への当脱水装置の適用性と、実用化について示したものである。

2. 実験用いた脱水装置について

実験に用いた脱水装置を写真-1に示し、表-1にその装置の仕様、図-1に寸法を示す。図-2は脱水装置の構造を示したものであり、ろ板をジャッキで各々重ね合わせた時の断面図を示したものである。ろ材にポリプロピレン製ろ布を用いたろ板を各々重ね合わせるにより、ろ板間に厚さ30mmのろ室(空間)ができる。このろ室内に高含水土を圧入する。そして、ろ室内圧が0.25MPa程度となった時点でこの圧力を保持したまま真空ポンプを稼働させ、負圧(真空度約93KPa)を作用させ真空脱水を同時に行う。なお、高含水土投入時のろ板内圧力の0.25MPaは、基礎実験結果から定めたものであり、この投入圧力でも高効率な脱水が行え⁷⁾、低圧にすることで脱水機本体のコストダウンが図れるものと考えたためである。逆に、ろ板内圧を高くした場合、

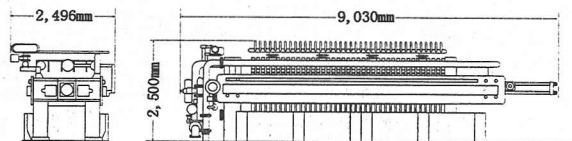


図-1 脱水装置の寸法

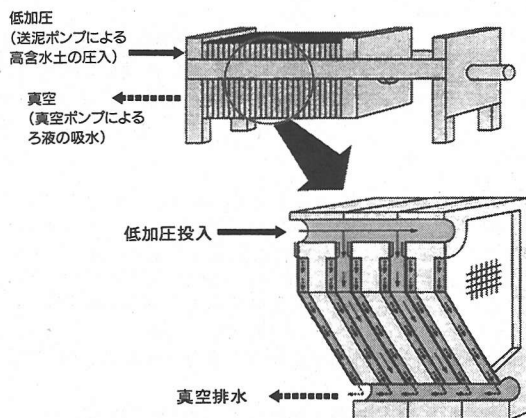


図-2 脱水装置の構造

表-2 泥水性状

| 粒度 (%) | | | コンスタン特性 | | | 土粒子の密度 (g/cm ³) |
|--------|------|------|----------|----------|---------|--------------------------------|
| 砂分 | シルト分 | 粘土分 | 液性限界 (%) | 塑性限界 (%) | 塑性指数 Ip | |
| 26.0 | 53.0 | 21.0 | 76.6 | 39.2 | 34.7 | 2.668 |

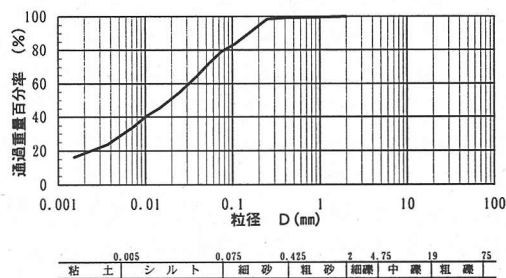


図-3 粒度分布

ろ板間から高含水土が噴き出ないようにジャッキ圧を上げてろ板面圧を増加させる必要がある。そのためにはジャッキシリンダー径を大きくしたり、各部材強度を上げなければならず、脱水機本体に対して3割程度のコストアップとなることが考えられた。また、圧入および真空時に脱水されたる液は、ろ板背面を通して下部排水口より排出される。この脱水機のさらなる特徴として、高含水土をろ室内に圧入

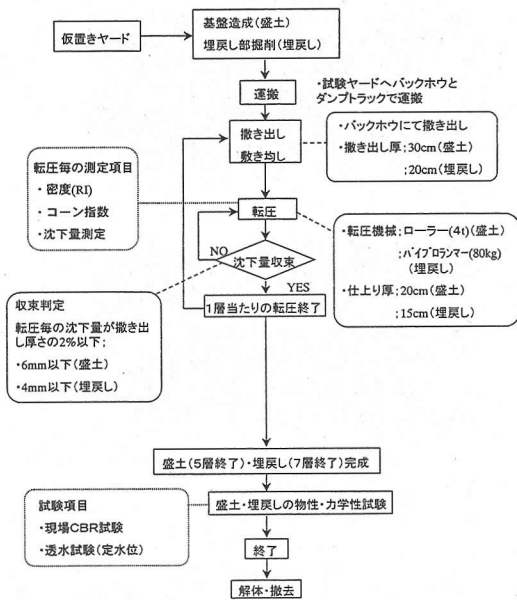


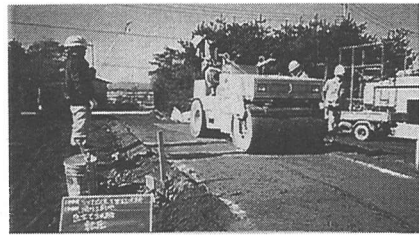
図-4 施工フロー図

する前にセメントを添加することがあげられる。セメントは凝集効果が高く、セメントを使用することで脱水して得られるケーキにもセメントが混入しているため、水和反応によって強度増加を示す。このセメントの添加量を調節することによって、脱水して得られるケーキの強度が変えられ、有効利用用途に適した強度を持ったケーキが得られるものである^{7)・8)}。

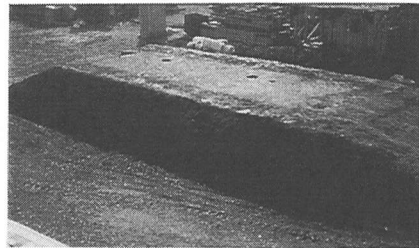
3. 脱水ケーキの有効利用について

(1) 実験に使用した泥水と脱水ケーキの性状

高含水土に対する当脱水装置の適用性については、高効率脱水が可能であり、得られた脱水ケーキは土質材料として使用していきける強度を有することを既に確認している^{7)・8)・9)}。そこで、実際に当脱水装置で得られたケーキを用いて盛土や埋め戻しの実証実験を行い、締固め度やCBR値を求め、これらへの適用性を実際に確認することを試みた。実験には、泥水シールド工事から発生した余剰泥水を当脱水装置で脱水し、この時に得られたケーキを使用した。添加したセメントは泥水重量に対し1%である。この場合、泥水比重が約1.25程度であるため、セメント添加量は $12.5\text{kg}/\text{m}^3$ 程度である。表-2に泥水性状を示し、図-3に粒度分布を示す。泥水は $75\mu\text{m}$ 以下が74%とシルト・粘土が卓越したものである。「建設発生土の有効利用マニュアル⁹⁾」に準



<施工時>



<完成時>

写真-2 盛土施工状況

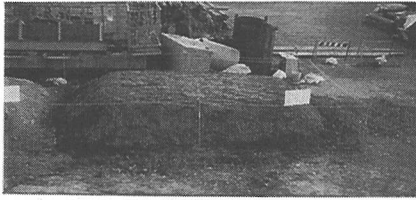


写真-3 埋め戻し施工状況

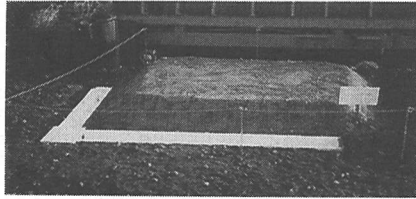
拠して得られた脱水直後のケーキ強度は $q_c=0.37\text{MPa}$ であった。実験では2~3ヶ月経過した脱水ケーキを使用した。その時の強度は $q_c=1.47\text{MPa}$ である。当脱水装置で得られるケーキの強度はほぼ7日で最終強度となることが確認されており⁸⁾、本研究の実験で使用したケーキは、強度増加が終了した最終強度のものであると考えられる。

(2) 実験方法

盛土は天端寸法 $2.5\text{m} \times 8\text{m}$ 、高さ1m、法面勾配を1:1とし、埋め戻しは掘削平面寸法 $2\text{m} \times 2\text{m}$ 、深さ1mとした。また、図-4に施工フローを示す。盛土の場合は、バックホウで撒き出し厚30cmに敷き均し、4tローラを用いて転圧を行い、仕上がり厚を20cmとした。この場合、転圧1往復毎に表面沈下量を測定し、撒き出し厚の2%以下で6mmに収束するまで転圧を繰り返し、盛土層厚が1mになるまで5回の撒き出し・転圧を繰り返した。一方、埋め戻しの場合は、バックホウで層厚20cmに撒き出し、80kgのバイブロハンマーで転圧を行い、

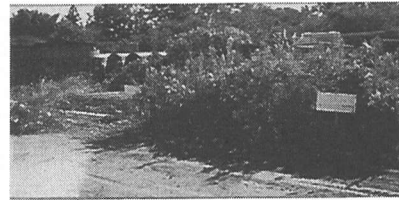


<覆土有り>

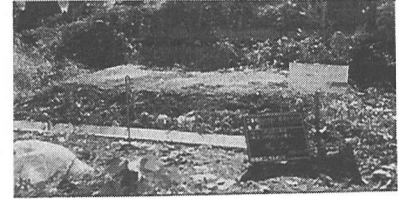


<覆土無し>

写真-4 pH測定用盛土（施工完了時）



<覆土有り>



<覆土無し>

写真-5 pH測定用盛土（1年9ヶ月後）

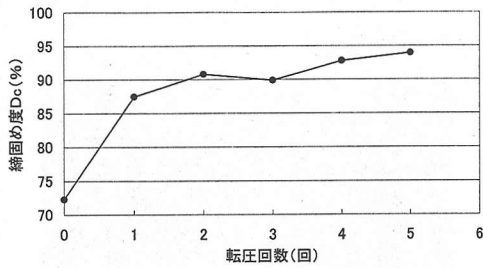
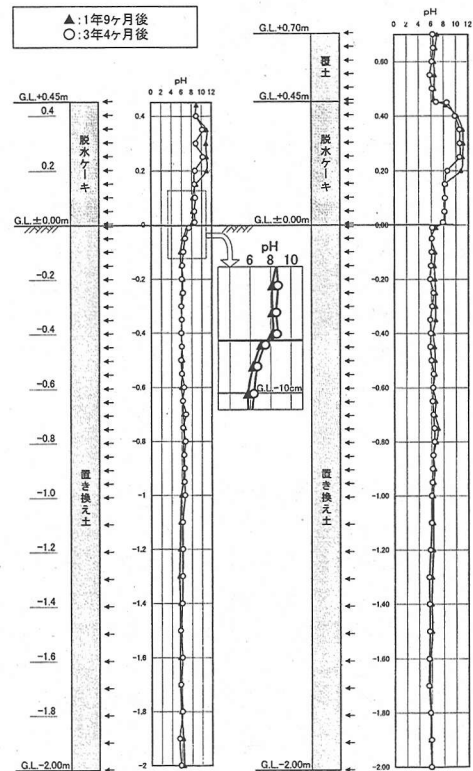


図-5 転圧回数と締固め度との関係

仕上がり厚を15cmとした。この場合、埋め戻し平面を1周転圧する毎に表面沈下量を測定し、撒き出し厚の2%以下の4mmに収束するまで転圧を繰り返し、埋め戻し厚が1mになるまで7回の撒き出し・転圧を繰り返した。写真-2に盛土施工状況、写真-3に埋め戻し施工状況を示す。また、セメントや石灰で改質した土はpHが強アルカリを示すことから、このような土の有効利用に対しては覆土を行い植生を可能としたり、客土を行ってpHの溶出を抑えることが提案されている^{9)・10)}。そこで、上記実験で使用した脱水ケーキを用いて天端寸法4m×4m、高さ50cm、法面勾配1:1の盛土を作成し、覆土の有無による違いや、pHの深度方向変化を調べる実験を実施した。覆土厚は30cmである。写真-4に盛土完成状況を示す。なお、盛土の下部は深度方向に2m以上掘削し、pH6程度の均一な土で置き換えを行い、盛土後のpHの変化がわかるようにした。測定は盛土内部およびG.L.-1.0mまでは5cmピッチで、G.L.-1.0m以深は10cmピッチで地山を採取し、(社)地盤工学会の「土懸濁液のpH試験¹¹⁾」に準拠した。



<覆土無し> <覆土有り>

図-6 pH測定結果

(3) 実験結果

図-5は、盛土の最終盛立て（5層盛立て）時の転圧回数と締固め度との関係を示したものである。この締固め度は、現場乾燥密度と同盛土材料を用いて実施した室内突き固め試験で、締固めエネルギーを1EC与えた時に得られた最大乾燥密度との比で

示されるものである¹¹⁾。室内試験での最大乾燥密度は 1.107g/cm^3 、最適含水比は41.1%であった。この図から、転圧回数2回で締固め度90%以上となることが分った。この値は、道路(路床)盛土、高規格堤防、一般堤防、宅地造成等の施工管理規定の要求品質⁹⁾を満足するものである。また、盛土のCBR値は3.2%を示し、透水係数は 2.3×10^{-4} であった。一方、埋め戻しに関しては、CBR値15.5%、透水係数は 6.8×10^{-5} であった。例えば東京都の埋め戻しを改良土(掘削土などを生石灰で改良したもので)を行った場合の品質管理基準¹²⁾は、CBR値が3%以上、平均値が20%以下であり、今回の実験結果から得られた値はこれを満足するものである。また、泥水重量に対してセメント1%(12.5kg/m^3)の添加量で脱水したケーキによる埋め戻し部分は、簡単にスコップで再掘削可能であった。以上の結果から、当脱水装置で得られたケーキは盛土材や埋め戻し材として十分有効利用可能であることが実証できた。

また、pHに関する実験結果は、写真-5の1年9ヶ月経過した状況からわかるように、脱水ケーキのみの盛土ではアルカリ分が高いために植物は生えないが、覆土を行うことによって盛土表面の植生は可能である。また、図-6は盛土作成から1年9ヶ月と、3年4ヶ月経過した時点での盛土内部とそれ以深の置き換え土のpH変化を示したものである。この図からわかるように、覆土有無に関わらず盛土内部のpHは高いが、覆土を行った方の盛土以深の置き換え土のpHはもとの値のまま、覆土による盛土内への雨水の浸透が少ないためか、上部盛土のpHの影響は受けていないことがわかる。また、覆土を行っていないものも、置き換え土表面から10cm以深ではもとのpHの値に戻っている。この結果は、pHの高い溶出水は土壤中を通過することで土に吸着されてしまう実験結果に一致する^{9)・10)}。よって、当脱水装置で得られたケーキを盛土などに有効利用する場合は、覆土を行うことで植生は可能であり、盛土下部に客土を行うことで、盛土内部を浸透するpHの高い溶出水の周辺への影響は抑えられることが実証できた。

4. 高含水セメント混入土への適用について

(1) 高含水セメント混入土の性状

開発した脱水装置を含む一連のシステムの、高含水セメント混入土への適用に対しては、コラム

ジェットグラウト工法¹³⁾(以下C.J.G.工法と記す)による地盤改良工事から発生する高含水セメント混入土を用いて実験を行った。このC.J.G.工法は空気を伴った超高压水を地盤中に回転噴出させ地盤を切削し、この時に硬化材を充填させて円柱状の固結体を造成するものである。この際、地上部にはセメントを多量に混入した高含水土が噴出する。表-3に実験中に任意に実施した高含水セメント混入土の土質試験結果を示し、その粒度分布を図-7示す。また、表-4にはその他実施した高含水土の性状試験結果を示す。表-5はC.J.G.工法の硬化材の配合を示したものである。当工法で地上に排出された高含水土を改良位置の地山と比較した場合、シルト・粘土分に相当する粒径の含有率が高くなっていることがわかる(図-7)。この要因として、表-3に示すように高含水土中に30%前後も含まれるセメント分の影響によるものと考えられる。また、表-4より含水比は168~386%(平均246%)、粘性は8.16~10.24秒(平均9.19秒)、比重は $1.18 \sim 1.33\text{g/cm}^3$ (平均 1.27g/cm^3)と幅広い値を示した。これは主に改良深度の違いによる地山性状の変化からくるものと考えられる。このように、地盤改良工事から発生する高含水土は幅広い性状を示し、セメント含有量が非常に高いため時間の経過に伴い流動性が低下し、次第に水和反応によって固化し始め非常に取り扱いにくい。よって、ほとんどの場合無処理のまま現場から搬出されているのが現状である。

(2) 処理システム開発に対しての検討課題

当脱水処理システムは、前述した脱水ケーキの有効利用も含め、一般的な高含水土に対し適用可能であることが実証できた⁸⁾。しかし、地盤改良工事などから発生する高含水セメント混入土への処理システムを含む当脱水装置の適用に対しては、以下の課題を克服する必要がある。

第1の検討課題(I)は、脱水管理を自動制御し、処理システムの自動化を図ることである。地盤改良工事などから発生する高含水セメント混入土は、表-3、4に示したようにその性状が大きく変化する。したがって、脱水直後に概ね $q_c > 0.2\text{MPa}$ のダンプトラックで搬出できるような脱水ケーキを得るためには、高含水土の性状に合わせその都度脱水時間を変えなければならない。そこで、この脱水管理を簡便な方法で自動制御する必要があり、この管理方法を見出す必要がある。

表-3 高含水セメント混入土の土質試験結果

| 測定項目 | | 高含水土 | | | | |
|-----------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 |
| 土粒子の密度 (g/cm ³) | | 2.847 | 2.716 | 2.634 | 2.603 | 2.671 |
| コンシステンシー | 液性限界 (%) | 71.6 | 109.0 | 113.8 | 148.2 | 97.8 |
| | 塑性限界 (%) | 59.9 | 101.6 | 110.2 | 126.2 | 92.8 |
| | 塑性指数 | 11.7 | 7.4 | 3.6 | 22.0 | 5.0 |
| 粒度構成 | 最大粒径 (mm) | 0.85 | 2 | 0.85 | 0.85 | 0.85 |
| | 礫分 (%) | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | 砂分 (%) | 18 | 12 | 1 | 1 | 1 |
| | シルト分 (%) | 51 | 52 | 44 | 54 | 43 |
| | 粘土分 (%) | 31 | 36 | 55 | 45 | 56 |
| 高含水土重量に対するセメント含有量 (%) | | 30.5 | 30.0 | 29.8 | 24.2 | 37.3 |
| pH | | 12.4 | 13.0 | 12.5 | 12.6 | 12.5 |

表-4 高含水セメント混入土に対するその他の性状

| 測定項目 | 高含水土 | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | No. 1 | No. 2 | No. 3 | No. 4 | No. 5 | No. 6 | No. 7 |
| 含水比 (%) | 190 | 386 | 181 | 304 | 168 | 226 | 269 |
| 粘性 ※1 (秒) | 10.50 | 8.68 | 10.24 | 8.54 | 9.41 | 8.78 | 8.16 |
| 比重 ※2 (g/cm ³) | 1.26 | 1.18 | 1.31 | 1.21 | 1.33 | 1.33 | 1.25 |
| 備考 ※3 | No. 1 | | No. 2 | | | | No. 5 |

※1 : P漏斗, ※2 : マッドバランス, ※3 : 表-3のNo.と一致

表-5 硬化材の配合

| 品名 | 数量 | 比重 | 備考 |
|-----------|--------|------|--------------------------------|
| セメント | 760 kg | 3.15 | 練り上がり比重 ρ = 1.522 ± 0.05 |
| 混和剤 (減水剤) | 12 kg | 1.2 | |
| 水 | 750 l | - | |

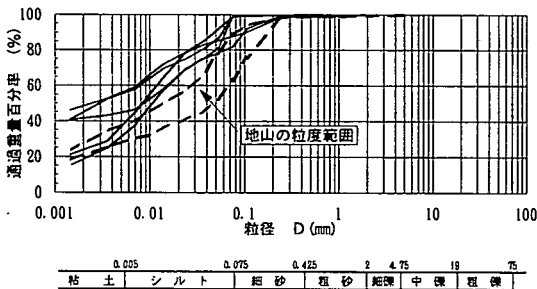
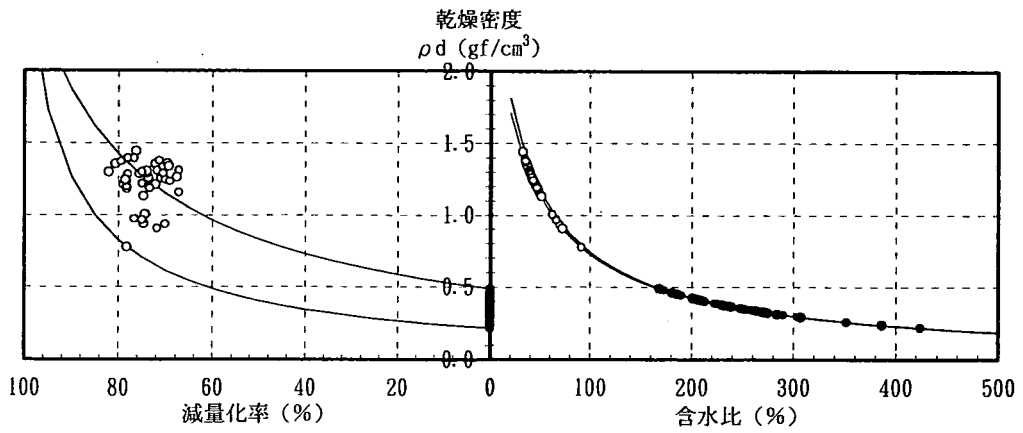


図-7 高含水セメント混入土の粒度分布

第2の検討課題(Ⅱ)は、開発当初ろ板のろ材(フィルター部)にはステンレス金網(200メッシュ, 74 μm)を使用していた。ステンレス金網を使用していた大きな理由は、ろ板を開栓すると同時にケーキが落下し、このケーキの剥離性が非常に良いことである。しかし、その後高含水土中のセメントの量が多くなると、脱水を繰り返すうちにセメント分がろ材下部に溜まり、これが固結して金網を破る現象が生じた。地盤改良工事などから発生する高含水セメント混入土に対しては、このような現象が多々発生することが考えられる。そこで、ステンレス金網よりも耐久性に優れ、コストが安く、さらに入手しやすいポリプロピレン製ろ布を当脱水装置へ適用することを考えた。しかし、ここでの課題は、ポリプロピレン製ろ布の通気度は1,800cc/min./cm²と、ス

テンレス金網の約30,000cc/min./cm²に対し1/17程度と極端に通気度が低いことである。このため脱水時間がステンレス金網よりも長くなり、処理能力が低下することが懸念され、これについての検討を行う必要がある。

第3の検討課題(Ⅲ)は、ろ材の目詰まりを解消できる簡便な自動洗浄方法を考案することである。セメントの混入していない高含水土処理に対しては、ろ材の目詰まり頻度が少ないため、ろ材に希塩酸を散布して水洗浄することで解消できていたが⁹⁾、セメントが多量に混入されている高含水土処理に対しては、早期にセメント固形物がろ材に付着し目詰まりが生じることが懸念され、そのメンテナンスを頻繁に行わねばならず稼働効率が著しく低下することが考えられる。今まではこの頻繁に生じる目詰まりへの適切な解消方法がなかったため、高含水セメント混入土を処理する脱水装置の開発に大きな傷害となっていた。そこで、このろ材の目詰まりを完全に解消できる簡便な方法を見出す必要がある。



●: 脱水前の高含水土の実測値, ○: 脱水ケーキの実測値

図-8 含水比・乾燥密度・減量化率の関係

(3) 実験結果

a) 脱水管理の自動制御 (1の課題)

高含水セメント混入土を脱水処理する場合、高含水土中の水分をいかに脱水するかがポイントとなり、ケーキをダンプトラックで搬出する場合の搬出量を左右するのみならず、減量化率（高含水土に対して脱水されたろ液の容量比）が低い場合はケーキの状態にも影響し、 $q_c > 0.2$ MPaの改良土強度が得られず、ダンプトラックでの搬出が不可能となる。図-2に示すように室内に高含水土を圧入していくと、土粒子間の間隙水（ろ液）が排出され、減量化された分新たに室内に高含水土が圧入されてくる。しかし、ろ室容量に見合った土粒子がろ室内に詰まってくる（ケーキ状になる）と、高含水土の投入量は減少し収束する。そこで、高含水土の投入管に流量計を設置し、この流量が収束してきた時点で脱水を停止すれば、高含水土の含水比の変動に係わらず脱水管理（脱水時間の自動管理）ができると考えた。この減量化率は、理論的には脱水ケーキの含水比と関係するが、実状においてこの関係が大幅に異なってくると上記考えは成り立たないことになる。よって、理論値と実測値の比較を行い、今回の機械脱水の物質収支関係を検証することとした。

脱水前の高含水土の含水比は、飽和度を100%とすると次式で求められる。

$$\omega / 100 = \rho_w / \rho_d - 1 / \rho_s \quad (1)$$

ρ_d : 乾燥密度 (g/cm^3), ρ_w : 水の密度 (g/cm^3)

ρ_s : 土粒子の密度 (g/cm^3)

ω : 高含水土のある状態における含水比 (%)

したがって、乾燥密度と含水比の関係は以下となる。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 / \rho_s + \omega / 100} \quad (2)$$

この関係を示したものが図-8の右図の実線であり、実測した土粒子の密度の内、最大値2.847と最小値2.603を上式に代入して得られたものである。この図から、乾燥密度と含水比の関係は土粒子の密度にはあまり左右されないことが分かる。一方、この図中にプロットした点は、脱水前の高含水土と脱水後のケーキの実測値である。この乾燥密度については飽和度を100%として、次式より求めた。

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \omega / 100} \quad (3)$$

ρ_t : 高含水土の湿潤密度 (g/cm^3)

また、減量化率は次式で表される。

$$q = (1 - \omega / \omega_{ini.}) \times 100 \quad (4)$$

q : 減量化率 (%)

$\omega_{ini.}$: 脱水前の高含水土の含水比 (%)

式(4)の含水比(ω)はケーキの含水比を示す。したがって、式(4)をこの ω について解き、式(2)に代入することによって、次式が得られる。

$$\rho_d = \frac{\rho_w}{1 / \rho_s + (1 - q / 100) \times \omega_{ini.} / 100} \quad (5)$$

表-6 脱水結果

| No. 表 | | 1 | | 2 | |
|--------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|
| ろ材の種類 | | 金網 表4 | ろ布 表5 | 金網 表4 | ろ布 表5 |
| 高含水土の 性状 | 比重 表1 (g/cc ³) | 1.31 | 1.29 | 1.27 | 1.34 |
| | 含水比 (%) | 205.6 | 201.6 | 181.1 | 180.6 |
| | 粘性 表2 (秒) | 8.52 | 8.60 | 8.43 | 8.80 |
| 処理状況 | 処理量 (cc ³) | 6.7 | 6.9 | 6.7 | 7.5 |
| | 減量化率 (%) | 70 | 71 | 70 | 73 |
| | 処理時間 表7 (分) | 20 | 22 | 25 | 25 |
| | 処理能力 (cc ³ /h) | 20 | 19 | 16 | 18 |
| 改良土 表3 | 含水比 (%) | 49.7 | 41.8 | 42.5 | 46.7 |
| | 強度qc (MPa) | 0.5 | 0.7 | 0.3 | 0.4 |
| ろ液の濁度 (度) | 圧入開始時 | 2200 | 23 | 8000 | 9 |
| | 圧入終了時 | 9 | 6 | 450 | 7 |
| | 脱水終了時 | 300 | 17 | 270 | 7 |

※1: マッドバランス, ※2: P漏斗, ※3: 脱水終了直後の値
 ※4: ステンレス金網, ※5: ポリプロピレン製ろ布
 ※6: 表-3のNo.とは無関係
 ※7: 処理時間は開栓, 脱水, 開栓などの時間を含む一工程時間

この式が図-8の左図の実線である。ここに示した2本の実線は、脱水前の高含水土の含水比を式(5)に代入して求めたものであり、図-8の関係を求めるべく測定した中の最大含水比424%と最小含水比168%に対してのものである。ところで、セメントが大量に混入されている高含水土においては、脱水以外に実際にはセメントによる水和反応で高含水土中の水分が使用されている。このセメントの水和反応に使用される水分量は、セメントの重量に対し約25%程度と言われている¹⁴⁾。図-8の右図において、ケーキの実測値(○印)は式(2)の実線にプロットされているが、実際は上記理由によって、水和反応の一部が関与していると考えると式(2)の関係に対しては含水比は小さく表現され、乾燥密度は式(3)により大きく表現されていることになり、その結果実線に実測値が重なったと考えられる。一方、図-8の左図において、ケーキの実測値は式(5)に対し上方へずれる結果となっている。これは同様の理由により式(3)から、乾燥密度の実測値が大きく表現されるためである。ここで示した減量化率の実測値は、改良前の(脱水装置に投入された)高含水土量から改良土の容量(2m³)を差し引くことで脱水した水量を求め、これを改良前の高含水土量で除した容量比である。したがって、脱水量を直接測定したものではないため、セメントの水和反応に使用された水分量は脱水したも

表-7 小型脱水装置による実験結果

| ろ材の種類 | | ポリプロピレン製ろ布 | | ステンレス金網 | | |
|-------------|----------------------------|------------|------|---------|-------|-----|
| セメント添加率(%) | | 3 | 20 | 3 | 20 | |
| 高含水土の 性状 | 比重 表1 (g/cc ³) | 1.26 | 1.35 | 1.24 | 1.35 | |
| | 含水比 (%) | 232 | 242 | 215 | 143 | |
| | 粘性 表2 (秒) | 9.5 | 11.2 | 10.1 | 10.8 | |
| 脱水時間(分) | | 25 | 15 | 32 | 15 | |
| 脱水ケーキ | 含水比 (%) | 61.5 | 48.0 | 60.5 | 48.1 | |
| | 強度 qc (MPa) | 表3 0.5h | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 0.4 |
| | | 表3 2.0h | 0.4 | 0.5 | 0.4 | 0.5 |
| | | 表3 4.0h | 0.6 | 1.0 | 0.6 | 1.3 |
| ろ液の濁度(度) | | 593 | 345 | 3,888 | 1,320 | |

※1: マッドバランス, ※2: P漏斗
 ※3: 脱水終了からの経過時間

のとされ、これは式(5)から得られる結果と同様となる。よって、実際は水和反応で使用された水分量の分が、脱水量より少なくなるため、この分若干減量化率も小さくなるのが考えられる。

以上、今回機械脱水した高含水土の含水比と減量化率の関係は、乾燥密度を介して得ることが出来る理論値ではあるが、上記誤差分を加味しても実測値がある程度適合することが確認できた。よって、高含水土の投入管に流量計を設置し、脱水の停止を自動的に判断させることができると考えた。

表-6は、上記管理方法による実験で求められた脱水結果の一例である。性状の異なる高含水土(表-6のNo.1およびNo.2)に対しても、脱水ケーキはqc>0.3MPa以上と、ダンプトラックで搬出可能な状態であるqc>0.2MPa以上のものが得られることが分かった。このことで、脱水管理の自動化が可能となった。なお、強度の測定は「建設発土の有効利用マニュアル⁹⁾」に準拠した。

b) ろ材の違いによる脱水性比較(IIの課題)

表-6にはろ材にステンレス金網とポリプロピレン製ろ布を用いた場合の脱水結果の比較を併記している。高含水土の性状が類似したものと同志で比較した場合、No.1および2の性状に対してもろ材がポリプロピレン製ろ布のものは処理状況、特に脱水時間もステンレス金網とほとんど変わらず、またケーキの性状もほぼ変わらない結果が得られ、ろ材の通気度の違いによる影響は見られなかった。しかし、セメントが多量に混入されていて凝集効果が高い場合の高含水土による実験から得られた結果であり、セメント添加量が少なくなった場合、同様な結果が得られるとは限らない。そこで、当脱水装置の小型のもの(容量55ℓ)⁷⁾を用いて再度検証を試みた。実験では、泥水シールド工事から発生する余剰泥水

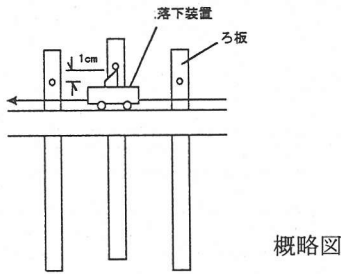
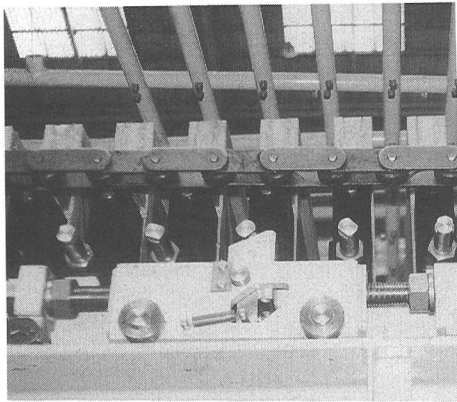


写真-6 脱水ケーキ落下装置

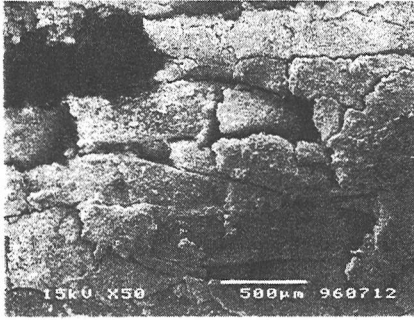
を処理する場合でセメント添加率の低いものと、地盤改良工事から発生するセメント混入土の処理の場合でセメント添加率の多いものを想定し、2種類のセメント添加率で実験を行った。なお、脱水時間は各ケースともろ過面積当たりの脱水ろ液量が $0.2 \ell / \text{min} / \text{m}^2$ 以下となるまでとした。実験に用いた高含水土は泥水シールド工事から発生した余剰泥水である。この泥水は粘土・シルト分が86%、液性限界73.5%、塑性限界35.3%、塑性指数38.2である。表-7に実験結果を示す。この実験結果から、セメント添加率が3%と少ない場合は、ケーキ強度についてはろ材の種類にかかわらずほぼ同程度のものが得られている。しかし、ステンレス金網の方が後述する脱水ろ液の濁度が高いことから、泥膜形成が遅いと考えられ、脱水時間($q_c > 0.2 \text{MPa}$ 以上の脱水ケーキが形成されるまでの時間)がやや長かかっている。一方、セメント添加率20%の場合は、実証実験結果の表-6と同様に、ろ材の種類にかかわらず同じ脱水時間でほぼ同等の強度を持ったケーキが得られている。また、ろ液の濁度についてみた場合、表-7から、ポリプロピレン製ろ布はステンレス金網よりも大幅に低い値を示した。この結果は表-6と同様であり、これについては通気度の関係に起因し、特に泥膜の出来る前に通気度の大きいステンレス金網では、細粒分がろ液と共に排出されるものと

考えられる。セメント添加率の多い方が少ないものよりも濁度が低い、これはセメント添加率が多いと凝集効果が向上するため、泥膜形成も早くなり、濁度が低くなるものと考えられる。したがって、今回使用しているろ材については、そのろ過抵抗よりはむしろろ材表面の泥膜の形成時間に大きく脱水時間が依存されていると考えられる。よって、金網の方が濁度の値からも土粒子が抜け出さず泥膜形成時間が遅いと考えられ、この傾向はセメント添加率が少ないほど顕著である。添加率が高い場合は、同様に金網は多少泥膜形成が遅れやや濁度は高くなるものの、脱水時間には差異はなかった。このことから、当初懸念されたろ材をポリプロピレン製ろ布に変更することによる脱水時間の延長はなく、むしろ通気度が小さいことで泥膜形成が早くなる分、脱水時間は短縮されることが確認できた。

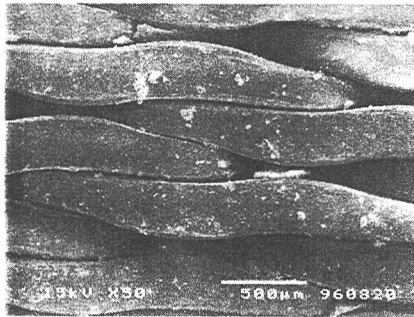
なお、当初ろ材に金網を選定した理由には、脱水ケーキの剥離性が良いことがあげられる。実験の結果、今回のようにセメントが多量に混入されている高含水土処理の場合は、脱水回数を繰り返すことでろ材に目詰まりが生じてくると、特にろ板の隅角部分のろ布がたるむ部分において付着力が大きくなり、一部剥離性が悪くなる結果が得られた。そこで、補助設備として写真-6に示すような簡単な構造のケーキ落下装置を考案し設置した。これはろ板の開枠と同時に、この装置の突起がろ板を約1cm程度持ち上げ、ろ板に上下振動を与えるものである。この装置を設置した実験の結果、脱水ケーキを完全にろ材から剥離させ、落下させられることが検証できた。

c) ろ材の目詰まりとその解消方法(Ⅲの課題)

セメントが多量に混入されている高含水土処理に対しては、セメントがろ材へ付着し早期に目詰まりが生じる。写真-7(a)は、20回脱水を繰り返した時点(処理した高含水土量約 140m^3)のろ材の電子顕微鏡写真である。これはケーキと接触している側のろ材の状況であるが、セメント固形物が付着し、目詰まりを起していることがわかる。この解消方法として、希塩酸をろ材に散布する方法を考案したが⁸⁾、人力によってこの作業を行わなければならない時間がかかることや、希塩酸が飛散することによる安全上の問題とで、セメントが多量に混入した高含水土の処理にはこの洗浄方法は適用できない。そこで、この脱水装置のろ板構造が密閉タイプであるため、図-9に示すように、ろ板を開板した後ろ板内に希塩酸に腐食防止剤を混入した洗浄薬液を自動投入し、目詰まりしたろ材を漬け置きする方法を考案した。写真-7(b)は、目詰まりしたろ材を同方法で約1時間自動漬け置きした後の、ろ



＜(a) 目詰まりしたろ材＞



＜(b) 洗浄後のろ材＞

写真-7 ろ材の電子顕微鏡写真（材質は表-1参照）

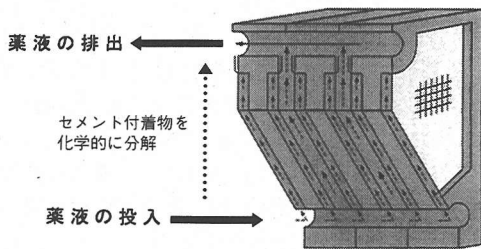


図-9 ろ材の洗浄方法

材の電子顕微鏡写真である。この写真から、セメント固形物は希塩酸によって解かされており、目詰まりが完全に解消されていることがわかる。したがって、セメントが多量に混入されている高含水土処理に対しては、作業終了時にこの自動ろ材洗浄を試みればよいことがわかった。このことで、既存のフィルタープレスなどでセメントが多量に混入した高含水土を処理する場合の障害となっていたろ材の目詰まりに対し、完全に解消できる簡便な自動洗浄方法を見出すことができた。

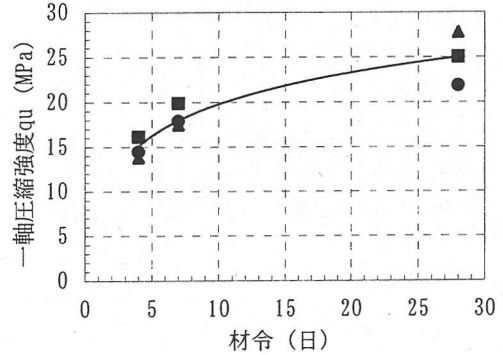


図-10 一軸圧縮強度の経時変化

表-8 ろ液の性状（ろ材をステンレス金網とした場合）

| ろ液採取時期 | 濁度(度) | 懸濁物質質量(g/l) | pH |
|--------|--------|-------------|------|
| 脱水開始直後 | 45,200 | 85.1 | 12.3 |
| 脱水終了直前 | 724 | 2.1 | 12.3 |

表-9 モルタル供試体による強度比較結果

| ろ液採取時期 | 基準モルタル (MPa) | | ろ液モルタル (MPa) | | 圧縮強度比(%) ※1 | |
|--------|--------------|-------|--------------|-------|-------------|-------|
| | 材令 7日 | 材令28日 | 材令 7日 | 材令28日 | 材令 7日 | 材令28日 |
| 脱水開始直後 | 34.8 | 46.4 | 36.3 | 46.4 | 10.8 | 9.8 |
| 脱水終了直前 | 33.1 | 44.0 | 32.8 | 46.6 | 9.7 | 10.4 |

※1：(ろ液モルタルの強度/基準モルタルの強度)×100

(4) 有効利用について

セメントが多量に混入した高含水土の処理は、それ自体を減量化し、現場などからの搬出量を減らすことに大きなメリットがある。しかし、ここではさらに脱水ケーキとろ液に対してその有効利用の可能性の検討を行った。

a) 脱水ケーキ

脱水して得られたケーキの強度は、脱水直後でコーン指数 (q_c) 0.3MPa以上のものが得られたが、セメントが高含水土重量に対し30%前後も含まれているため、脱水して得られた改良土は時間の経過とともにさらに強度増加を示す。その一例として、一軸圧縮試験結果を図-10に示す。この図から、28日で約25MPaの強度を示すことがわかった。このように、脱水ケーキは前述した泥水シールドの余剰泥水を処理した場合よりも高強度となる。よって、高含水セメント混入土を当脱水装置で処理して得られる改良土は、盛土材や埋め戻し材としてよりは路

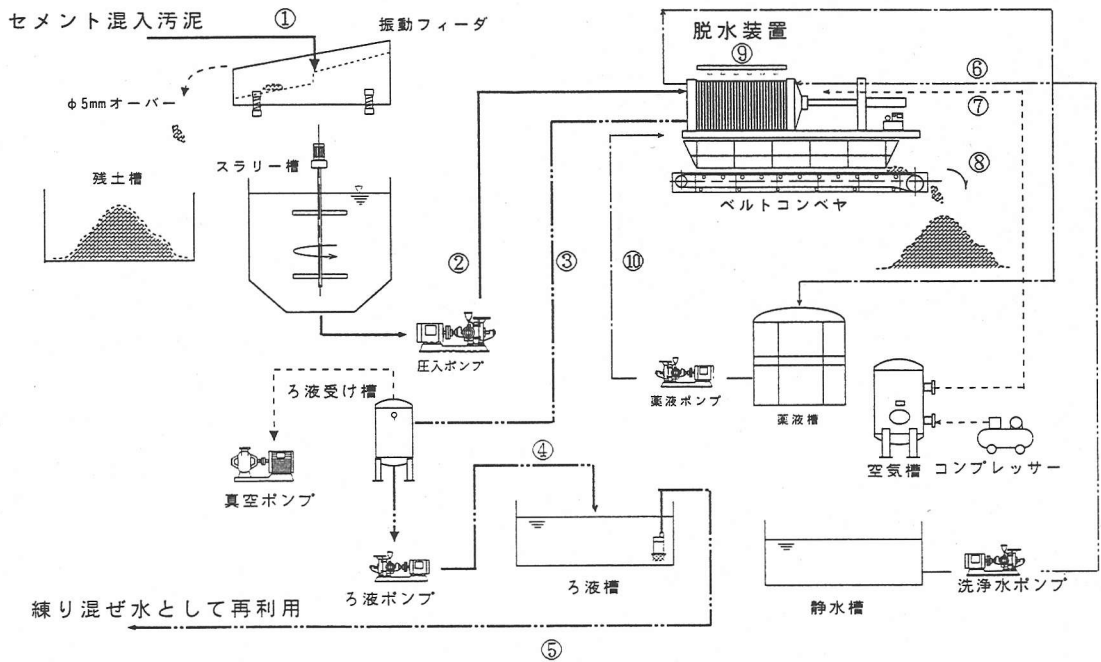


図-11 高含水セメント混入土処理のシステムフロー図

盤材等として利用していけることが考えられる。

利用可能となる。

b) 脱水ろ液

ろ材がポリプロピレン製ろ布の場合、脱水されたろ液の性状は、積分球式濁度計で測定した濁度が概ね25度以下、pHが12程度であった。したがって、ろ液を全て地盤改良の硬化材の練り混ぜ水に有効利用することを試みた。ここで、pH12前後の強アルカリ水を練り混ぜ水に使用した場合、改良体の強度に対する影響が懸念された。そこで、この脱水ろ液を練り混ぜ水に用いたモルタル供試体と、水道水を用いた供試体とで強度比較を行った。なお、濁度の影響も考慮し、ここでは濁度が高くなるステンレス金網（200メッシュ、74 μ m）をろ材に用い、濁度が極端に高いろ液で上記比較試験を行った。表-8に比較試験に用いたろ液の性状を示し、表-9にモルタル供試体の一軸圧縮試験結果を示す。水道水を用いた供試体に対し、7日および28日強度のいずれにも強アルカリに対する影響は見られず、さらに高濁度のろ液に対しても、強度に影響はないことが確認できた。したがって、ろ液は地盤改良の硬化材の練り混ぜ水にそのままの状態で見ることがわかった。C.J.G.工法で粘性土を改良した場合、地上には注入した分とほぼ同等量の高含水セメント混入土が上がってくる。これを脱水した場合60~80%程度のろ液が排出される。C.J.G.工法の配合は75%が水のため、ほとんど全てのろ液が有効

(5) 処理システムの自動化について

前述した課題への対応策も加味し、処理システムの自動化についての検討を行った。地盤改良工事から発生する高含水土は、セメントが多量に混入されており、時間の経過とともに固化しはじめ、短時間で流動性が低下してくる。したがって、本システムにおいては、常にこの高含水土を流動化させておき、水和反応を遅らせる必要があった。そのためにはシステム上の一連の動きを自動化させ、高含水土の動きが滞らないようにし、設備的にも固化しないような工夫を試みた。特に、脱水処理中の20分程度は最低スラリー槽に次に処理する高含水土を溜めておく必要がある。そこで、スラリー槽は高攪拌が行える仕様とし、絶えず貯留する高含水土を流動化させておくようにした。図-11に考案した地盤改良工事から発生する高含水セメント混入土の処理システムフローを示し、以下にこのシステムの概要を示す。なお、文中の①~⑨は図-11に付記する①~⑨を示す。

地盤改良工事によって発生した高含水セメント混入土は、網目5mmの振動フルイを通過した後（図-11の①）、スラリー槽に溜められる。ここでは高含水土の流動化を図るために、高速の攪拌機を設置した。さらに、余分な高含水土がここに溜まらない

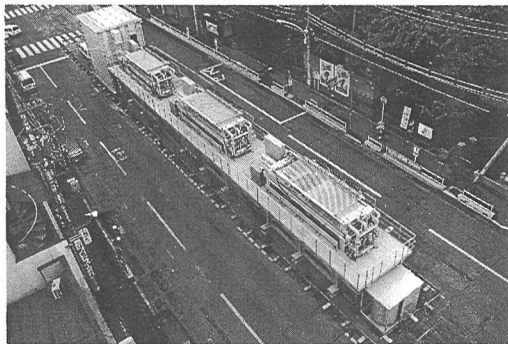


写真-8 実稼働状況

ように、レベルコントロールで高含水土量を自動制御できるようにした。次に、この高含水土を閉板した脱水装置のろ板間に圧入ポンプで圧入する(②)。圧入圧が約0.25MPa程度となった時点で、この圧力を保持したまま真空ポンプを稼働させ、真空度約93KPaの負圧で脱水を行う。排出されたる液は、いったんろ液受け槽に溜められ(③)、一定水位に達したことをレベルコントロールが検知すると自動的にろ液ポンプが稼働し、ろ液槽へ移送される(④)。そして、このろ液はそのまま地盤改良工事の硬化材の練り混ぜ水として再利用する(⑤)。脱水終了後、圧入管内などに残存する高含水セメント混入土を水(⑥)、さらにはエア(⑦)を用いてスラリー槽へ押し戻し、配管内を清掃する。次にろ板を開板し改良土を排出する。ケーキは開板と同時に自重でベルトコンベア上に落下し、土砂ピットへ移送される(⑧)。この時ろ板の枠に付着したケーキが、次のろ板閉板時に挟み込まれると、高含水土が漏れたり真空度が低下する原因となる。そこで、ケーキを搬出した後、脱水装置上部と下部に取り付けられた洗浄管より水を散水し(⑨)、ろ板の枠に付着した改良土を洗浄する。この時、ベルトコンベア上に落ちた洗浄水は、スラリー槽に送られる。また、ろ材が目詰まりした場合は閉板したろ板内に薬液を投入して自動洗浄を行う(⑩)。

上記システムを用いて、地盤改良工事(C.J.G.工法)から発生する高含水セメント混入土処理を行った現場の状況を写真-8に示す。当脱水装置の高含水セメント混入土への適用研究を行った結果、脱水機1台で約6,000m³(脱水回数約860回)の処理を実施し、ろ材も破損することなく耐久性に対しても優れていることが検証できた(ろ材については表-1参照)。ここで処理した結果をまとめると、処理時間(脱水時間に雑時間…閉枠・残液戻し・開枠・洗浄)は20~25分程度であった。また、処理能力は約18m³/h前後、減量化率は75%前後

(処理した高含水土に対し25%前後がケーキ)であった。

5. 結論

当脱水装置の脱水ケーキを用いた実証実験によって、脱水ケーキは土質材料として有効利用できることが確認できた。さらに、脱水処理が難しいとされていた地盤改良工事から発生する高含水セメント混入土処理に対し、当脱水装置を含むシステムの適用を試みた結果、改良を行うことによって適用可能であることが実証でき、実用に供することを確認できた。今回の研究開発で得られた結果をまとめると以下となる。

1) 脱水ケーキの有効利用について

① 土質材料としての有効利用

- ・泥水シールド工事から発生する余剰泥水を用い、泥水重量に対し1%セメントを添加し当脱水装置で処理して得られたケーキは、転圧回数2回で締固め度90%以上となることが分かり、盛土などへの有効利用が可能であることが検証できた。また、CBR値からも十分埋め戻し材としても有効利用可能であることが検証できた。

② pHに関する実験結果

- ・3年4ヶ月の盛土実験を行った結果、盛土内部は高いpHの状況となつてはいるが、覆土を行うことで盛土表層の植生は可能であり、客土を行うことで高いpHの溶出が防止できることを検証できた。

2) 高含水セメント混入土への適用

① 脱水管理の自動制御

- ・脱水装置に投入される高含水土の投入量が収束する時点で脱水終了とする制御方法を試みた結果、性状が変化する高含水土に対し、この制御方法が有効であることが検証でき、脱水管理の自動化が可能となった。

② ろ材の違いによる脱水特性比較

- ・当初ろ材に使用していたステンレス金網に対し、ポリプロピレン製ろ布を採用したが、懸念された脱水時間の伸びる現象は見られなかった。これは脱水時間がろ材のろ過抵抗よりも、ろ材表面にできる泥膜の形成時間に依存するためと考えられる。

③ ろ材の目詰まりとその解消方法

- ・セメントが多量に混入されているため、早期にろ材の目詰まりが生じるが、閉板したろ板内に

洗浄薬液を自動投入し、ろ材を漬け置きさせておく方法を考案した結果、完全に目詰まりを解消することができ、目詰まり解消方法に対し、自動化を図ることができた。

④有効利用について

- ・脱水ケーキの強度は $q_c > 0.3\text{MPa}$ を示し、ダンプトラックで搬出可能なものが得られた。さらにセメントが高含水土重量に対し30%前後も含まれているため、改良土は時間の経過に伴い強度増加を示し、28日で約25MPaの一軸圧縮強度を示した。よって、土質材料（路盤材等）として利用可能であると考えられる。
- ・脱水ろ液はそのまま地盤改良の硬化材の練り混ぜ水に利用できることがわかった。

⑤自動化を図った処理システムの稼働結果

- ・約6,000m³/台（脱水回数約860回）の量を処理した結果、処理時間は20～25分程度、処理能力は約18m³/h前後、減量化率約75%（処理した高含水土に対し約25%が脱水ケーキ）であった。この結果、当脱水装置を含むシステムは高含水セメント混入土処理として実用に供することが実証できた。

6. あとがき

掘削工事などで発生する高含水土を脱水・減量化し、しかも脱水して得られるケーキは土質材料として有効利用できる脱水装置と一連のシステムを研究開発し、特に脱水処理が難しいとされてきた高含水セメント混入汚泥に対しても、適用可能であることが実証できた。建設分野での環境問題を検討していく上で、建設廃棄物の発生抑制、再利用の促進、適正処分の徹底が基本となる。本研究成果は、この対応策として貢献できる技術であると考えられる。今後は工期の短い小規模工事に対しても対応できるように、車載搭載型などといった脱水装置のコンパクト化に関する開発を進めていくことを考えている。

参考文献

- 1) 建設副産物リサイクル広報推進会議：総合的建設副産物対策 平成12年度版、(財)先端建設技術センター。
- 2) 滝口健一、勝又正治、小口深志、安田昭彦：固化材を少量添加した高含水土の脱水特性（その1）、第

26回土質工学研究発表会、pp.2055-2056, 1991.7.

- 3) 滝口健一、勝又正治、小口深志、安田昭彦：固化材を少量添加した高含水土の脱水特性（その2）、第26回土質工学研究発表会、pp.2057-2058, 1991.7.
- 4) 滝口健一、勝又正治、小口深志、安田昭彦：模型脱水装置による高含水土の改良について、第27回土質工学研究発表会、pp.2351-2352, 1992.6.
- 5) 滝口健一、勝又正治、安田昭彦：真空脱水を併用した高含水土の改良効果について、第28回土質工学研究発表会、pp.2603-2604, 1993.6.
- 6) 勝又正治、滝口健一、安田昭彦：真空脱水を併用した高含水土改良装置の性能特性、土木学会第48回年次学術講演会、pp.652-653, 1993.9.
- 7) 勝又正治、滝口健一、清水英樹、安田昭彦、大林成行：建設排出土の資源化を考えた土質改良装置の実用化について、土木学会論文集、No540/VI-31, pp.171-179, 1996.6.
- 8) 勝又正治、滝口健一、清水英樹、安田昭彦、大林成行：高含水建設排出土の改良システムの開発、土木学会論文集、No560/VI-34, pp.117-129, 1997.3.
- 9) (財) 土木研究センター編：建設発生土の有効利用マニュアル、1994.10.
- 10) (財) 先端建設技術センター編：建設汚泥のリサイクル指針、大成出版社、1999.11.
- 11) (社) 地盤工学会：土質試験の方法と解説、2000年4月20日。
- 12) (財) 東京都弘済会編：土木材料仕様書、1997年。
- 13) 日本ジェットグラウト協会編：JET GROUT、1995.4.
- 14) チェルニン：建設技術者のためのセメント・コンクリート化学、技報堂出版、1977.

(2001.8.22 受付)

UTILIZATION OF THE CAKE DEHYDRATED BY VACUUM-PRESSURE DEHYDRATION EQUIPMENT AND DEVELOPMENT OF A SYSTEM TO DEHYDRATE SLURRY CONTAINING CEMENT DISCHARGED

Masaharu KATSUMATA , Hideki SHIMIZU, Masanori FUKUYAMA
and Shigeyuki OBAYASHI

Recently, environmental problems have been a part of our major topics. In a construction field, increase of discharged soil produced by excavation works and shortage of spoil bank have become serious social problems. Especially, slurry which is specified as industrial waste is mostly disposed because there is no generally acceptable improving method. Accordingly, authors have developed a new apparatus which makes it possible to dehydrate slurry efficiently and to provides improved soil with strength enough to reuse. Furthermore, experiments were carried out in order to apply this apparatus to dehydration of slurry containing cement discharged from soil improvement works. As a result, the dehydrated soil can be used effectively as earth material, and it was confirmed that this dehydration system was applicable to slurry containing cement.