

建設汚泥の処理と有効利用

嘉門 雅史・勝見 武・今西 秀公

TREATMENT AND UTILIZATION OF WASTE SLURRY FROM CONSTRUCTION WORKS

By Masashi KAMON, Takeshi KATSUMI and Hidekimi IMANISHI

Synopsis

A number of waste slurry or sludge with high water content are produced in construction work or environmental purification, especially in foundation work, and a proper method to treat these waste materials must be established based on a viewpoint of environmental geotechnology. In this paper, we propose an utilization system of waste slurry, which consists of two treatment methods for dehydration and solidification. The selection of the treatment methods should be carried out based on the density and the viscosity of the waste slurry. Through experimental studies it is clarified that Carbonated-Aluminate Salts, newly developed, and coal fly-ash, one kind of industrial wastes, are used effectively for flocculant and stabilizer in this system, and this system realized efficient treatment, decrease in volume, stabilization, and recycling as resources.

1. 緒 言

廃棄物による様々の社会問題、環境問題が顕在化するようになって久しい。環境問題への意識は国際的にも高まっており、廃棄物で我々の生活圏が埋もれてしまうことへの危機感から、廃棄物の発生抑制、無害化、再利用などに焦点が絞られて研究開発が進められている。しかしながら、廃棄物の発生量は年々増加し続け1985年には年間3億6000万トンにも達し、特に建設事業に伴い発生する廃棄物の量は産業廃棄物の発生量（およそ3億1200万トン）の20%近くの5700万トンで、その減容化と有効利用は深刻に取り組まれるべき課題である。建設副産物には建設汚泥、廃コンクリート塊、廃アスファルト・コンクリート塊などがあり、またこれらが混合された形で排出される建設混合副産物がある。さらに、廃棄物の処理体系を定める「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」の定義には含まれない（すなわち産業廃棄物に含まれない）掘削工事等に伴う建設残土の排出量は年間4億5040万 m^3 にもものぼる。これらの建設副産物は再資源化率が低く、Table. 1に示すように処分量が多いため貴重な最終処分場をいたずらに消費しているのが現状である¹⁾。中でも建設残土や建設汚泥はもともと地盤を形成していたもので基本的に無害物が多く、その再利用が推進されるべきとして「建設廃棄物処理ガイドライン（平成2年）」や「再生資源の利用の促進に関する法律（平成3年）」で処理処分の目安や再資源化の促進が規定された。廃棄物の発生量が増加する一方で良質の天然資源が枯渇の傾向にあり、残土や汚泥に何らかの処理を施し、処理土を盛土や路床材へ利用することは意義深いことである。

建設残土、汚泥には様々の性質のものがある。道路工事、下水工事等の掘削に伴う掘削土は地山をときほぐした状態で発生し、地下水位が高い場合などは高含水比の残土が排出するが、これらは地山における状態

Table 1. Generation and recycle of by-products from construction works (1990)

Type of by-product	Generation	Recycle Ratio(%)	Disposal Ratio(%)
Surplus soil	$45.00 \times 10^8 (\text{m}^3)$	27.6	72.4
Waste sludge	$1.44 \times 10^7 (\text{t})$	7.6	79.9
Waste concrete	$2.54 \times 10^7 (\text{t})$	48.0	52.0
Asphalt-concrete mixture	$1.76 \times 10^7 (\text{t})$	50.6	49.6
Mixed by-products	$0.95 \times 10^7 (\text{t})$	13.7	69.5
Sewage sludge	$0.20 \times 10^7 (\text{m}^3)$	24.0	76.0

に近く、無処理であるいは何らかの処理を施せば比較的容易に再利用しうるものも多い。泥水シールド工法やリバース、アースドリルなどの場所打杭工法、地中連続壁工法などで掘削時の壁面安定に使用される泥水の不要物はやはり地山掘削による廃棄物であるが、細粒分が多く高含水状態であるため取扱いが難しく、さらに泥水の性質の調整に増粘剤や減水剤として使用するベントナイトや CMC (カルボキシメチルセルロース)、各種ポリマー等が保護コロイドとして働き、使用後の脱水処理等を困難にしている。環境浄化のための浚渫事業で発生する浚渫へどろも同様に高含水比で、含有する有機物が脱水処理や固化処理の効果を阻害する要因として働く²⁾。これらの建設残土、建設汚泥は地盤起源の土と水との混合物であるから、これを固液分離することにより減容化し、あるいは軟弱なものは固化処理を行って安定化を図り、処理土を地盤材料として有効利用していくことが望まれる。

残土や汚泥の処理、再利用の現状をみると、大阪市、大阪ガスをはじめとするいくつかの地方自治体や企業では管轄内の発生土を対象とした中央プラント方式の残土利用システムが実用化されており、残土を無処理あるいは石灰改質して再利用している³⁾。平成 4 年には東京都で再利用センターが開設された⁴⁾が、これらの再利用施設は比較的良質の土を取り扱っており、汚泥類への適用は難しい。泥水工法で発生する廃棄泥水の処理には、フィルタープレスやロールプレスなど現場改良方式の脱水システムが適用されており^{5), 6)}、廃棄泥水を効率的に処理し、処理土を再利用するための脱水機や凝集剤等の開発が途上にある^{7), 8)}。現状の残土、汚泥処理の問題点としては、

- ・固化処理を行う場合、対象土の含水量が高く多量の固化材が必要となる。
- ・脱水処理において使用される凝集剤の効果が対象汚泥により異なり、その判断や施工管理が難しい。
- ・低濃度泥水や濁水の迅速沈降分離処理を可能とする凝集剤が少ない。
- ・処理土が再利用されていない。

等が挙げられる。

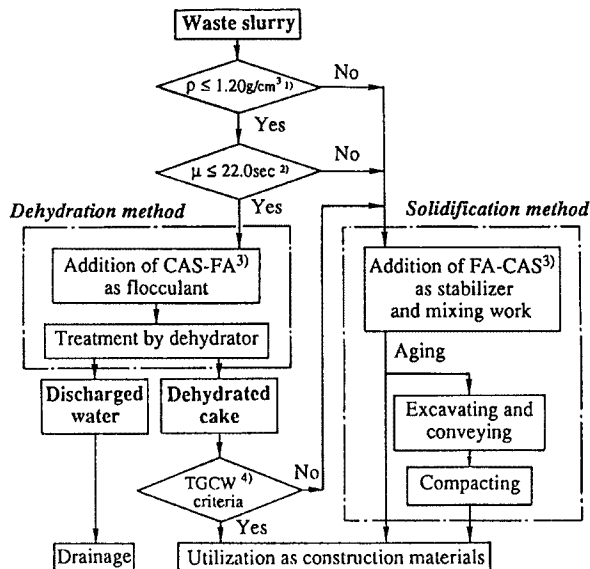
以上に述べた現状を踏まえ、本研究では脱水処理手法と固化処理手法による建設汚泥の処理システムを提案し、各手法の有効性を実験的に評価することを目的としている。提案する汚泥処理システムは、汚泥はできる限り脱水処理による減容化を図るべきとしつつも、汚泥の性質により必ずしも脱水処理が最適でない場合固化処理手法を採用することにより、排出する汚泥の全てを処理の対象としうると考えられる。実験では、汚泥として掘削工事に伴う廃棄泥水の他に、前述した河川へどろや沖縄県で環境問題となっている赤土流出による濁水なども対象として検討しており、広く環境問題への貢献が考えられる。それぞれの処理手法においては、凝集剤、固化剤として新しく開発された炭酸アルミネート系塩材料と産業廃棄物である石炭フライアッシュの適用性を評価している。

2. 汚泥処理システム

2.1 汚泥処理システムの概要

建設汚泥は大部分が水分であるため中間処理により固液分離し、それぞれを適正処理することが理想的である。しかし、汚泥によっては細粒分が多く、増粘剤や減水剤の添加により親水性を有するなど脱水処理が困難あるいは不適切なものも多い。そこで本研究では、脱水処理が適正な汚泥の性質を明らかにするとともに、不適正な汚泥については固化処理を行う汚泥処理システムを提案する。Fig. 1 に提案する汚泥処理システムのアウトラインを示す。

システムは、汚泥を密度と粘性により脱水処理が可能なものと不適当なものに分類する。前者については固液分離の迅速性と減量化を目的として、新しく開発された炭酸アルミネート系塩材料の凝集剤としての適用を提案し、さらにフィルタープレスなどの脱水処理システムの利用により排出土や排水の再利用を図ることが可能である。後者は石炭灰と炭酸アルミネート系塩材料の混合による固化処理を施して汚泥を早期に安定処理し、固化処理混合物を有効利用するものである。



Note

1) ρ ; density of waste slurry.

2) μ ; funnel viscosity with 500cc-funnel of waste slurry.

3) CAS; Carbonated-Aluminate Salts.

FA; Fluidized Bed Combustion Coal Ash.

4) TGCW criteria; $q_c \geq 2.0 \text{ kgf/cm}^2 (= 196 \text{ kPa})$ or $q_u \geq 0.5 \text{ kgf/cm}^2 (= 49 \text{ kPa})$

Fig. 1. Outline for utilization system of waste slurry.

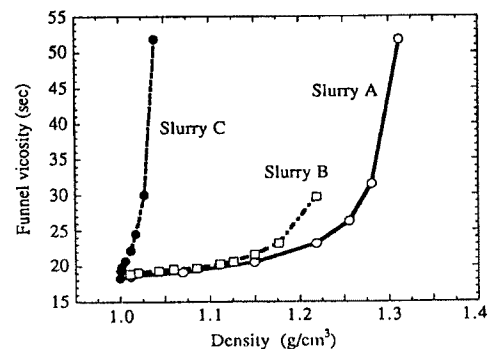


Fig. 2. The relationship between density and viscosity of slurry.

2.2 処理システム選択の判定手法

汚泥の脱水処理への適用性を示す指標として、本研究では密度 (ρ) と粘性 (μ) を取り上げている。これらは泥水工法を採用している現場では泥水管理の指標として測定されることが多く、簡便かつ迅速にデータが得られる。密度は、泥水の質量と体積の測定によりデータが得られ、泥水を使用する現場ではマッドバランス (天秤) を用いて測定されることが多い。粘性はじょうご型粘度計を用いて測定される。じょうご型粘

度計に 500 ml (または 1500 ml) の泥水を満たし、500 ml (または 946 ml) 流出するまでの時間 (秒) を測る方法で、清水の場合 (20 ± 2℃) 18.5 ± 0.5 秒 (または 26.0 ± 0.5 秒) である。

密度と粘性の判定指標としての位置づけは、密度が汚泥の含水量を示していることから、凝集分離や脱水による減容効果の予測を行うものである。一方、土粒子の親水性や粒径等は汚泥の脱水性を左右するが、これらの指標との結びつきの深いと考えられる粘性から脱水処理の可能性を予測することになる。本研究で実験に供した泥水の密度の粘性の関係を Fig. 2 に示す。図は現場より採取した廃棄泥水の水分量を変化させて得られたもので、含水比を減少させると密度が増加し粘性が上昇、スラリー状からペースト状へと変化する。同じ密度であっても泥水中の土粒子の性質、増粘剤等の添加の有無により粘性は異なり、細粒分や CMC を含むなど脱水が困難な要素を有するほど粘性は高くなる。

2.3 使用材料

(1) 炭酸アルミネート系塩材料

本処理システムの脱水処理手法では、凝集剤として新しく開発された炭酸アルミネート系塩材料 (CAS) の適用を考えている。CAS は配合 $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3:\text{Na}_2\text{CO}_3:\text{CaCO}_3$:セメント:強アニオン性高分子凝集剤=40:21:30:7:2である。

現在、脱水処理システムでは凝集剤としてポリ塩化アルミニウム (PAC) が広く適用されている。PAC を高分子凝集剤と併用使用する場合、その凝集作用は、粘土粒子のジータ電位を低下させることによる粒子間力の低下と、高分子凝集剤の粘土粒子への吸着架橋であると考えられている。一方、CAS は、CAS のみを水に溶かしてもフロックを形成し、フロック生成過程においてフロックに懸濁粒子が取り込まれて凝集作用を発揮するものである。CAS の特徴は以下の通りである。

- ・ pH が中性域となるように配合されている。
- ・ 塩分を含まないため塩化カルシウム使用時にみられる塩害がない。
- ・ 無機系成分が主体であり、有機物による水質汚濁の可能性が少ない。
- ・ 最適添加量が存在せず、施工管理が容易である。
- ・ 大きなフロックが瞬時に形成され、分離水が清澄である。
- ・ 粉体のまま添加することも、溶液として添加することも可能である。

(2) 流動床灰

固化処理手法における固化材あるいは脱水処理手法における凝集助剤として本研究では石炭流動床ボイラーより排出される流動床石炭灰 (流動床灰) を使用している。石炭火力発電の燃焼方式としては微粉炭ボイラーが主流であるが、近年は大気汚染防止の観点から SO_x や NO_x の排出量の少ない流動床ボイラーが鉄鋼業や化学工業の分野で自家発電用に採用されつつある。流動床灰は低温燃焼により未燃分が多く、脱硫剤として石灰石を使用するため石灰や石膏が残存し、水和固化作用を活かした有効利用が考えられている⁹⁾。

3. 建設汚泥の脱水処理

3.1 実験方法

汚泥の脱水処理の有効性を評価するために以下に示す 7 種類の泥水および濁水を用いて実験を行った。

- (1) 泥水 A: 泥岩地盤のシールド工事現場より排出された掘削泥水を密度調整して 1.060 g/cm³ および 1.295 g/cm³ としたもの。ベントナイトや CMC は含まない。
- (2) 泥水 B: 粘土地盤のシールド工事現場より排出された掘削泥水を密度調整して 1.116 g/cm³, 1.144 g/cm³, 1.184 g/cm³ および 1.210 g/cm³ としたもの。ベントナイトや CMC は含まない。
- (3) 泥水 C: ベントナイト作液泥水。ベントナイト (白根-A) 100 g に対しテルフロー (分散剤) 6.7 g, テルポリマー (脱水減少剤かつ増粘剤) 1 g, シークレー (増粘剤) 1 g を添加している。

- (4) 泥水D：ベントナイト（浅間）によるベントナイト作液泥水。
- (5) 濁水A：沖縄県の赤土（国頭まあじ）を清水と混合して得られた濁水。降雨侵食された赤土の海域流出が環境問題となっている。
- (6) 濁水B：ポンプ浚渫による河川へどろで余剰水を大量に含む。
- (7) 濁水C：池の水。

凝集剤としては、炭酸アルミネート系塩材料（CAS）の粉体または水に溶かして溶液としたもののほかに、CASと流動床灰を5対2で配合したもの（CAS-FA）、ポリ塩化アルミニウム（PAC）、硫酸第二鉄（ $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ）、塩化カルシウム（ CaCl_2 ）を使用し、凝集剤として2種類の有機系高分子凝集剤（アニオン性ポリアクリルアミド系）を用いた。実験は概ね以下の手順にて行った。

(1) 沈降分離試験

凝集剤の添加による造粒特性および造粒物の沈降特性を評価するために沈降分離試験を実施した。実験は、容器中の11の泥水に所定量の凝集剤を添加して約30秒間混合し、この混合物を11メスシリンダーに移して、上水層と分かれるフロック層の沈降体積の経時変化を調べた。上水はpH、SSなどを測定した。

(2) 圧密試験

凝集剤を添加した泥水の脱水特性を評価するために、圧密試験を実施した。沈降分離試験と同様にして作製した泥水と凝集剤の混合物を30分間自然放置沈降させ、上澄みが発生しておればこれを除去し、残った泥水を圧密試験用容器（内径6cm、高さ2cmまたは6cm）に充填して、所定の圧密荷重にて圧密を行った。排水はpH、SSなどの測定に供した。脱水ケーキは含水比を測定するとともに、可能な限りフォールコン試験を実施した。

(3) 小型フィルタープレス試験

沈降分離試験、圧密試験に加えて、送泥、打ち込み、濾過といった一連のプロセスをもつフィルタープレスシステムへの適用性を評価するために Fig. 3 に示す小型フィルタープレス装置での実験を行った。実際に用いられているフィルタープレス機は、複数のろ室に泥水を油圧で送り込むものであるが、本研究で用いた小型フィルタープレス機は単一のろ室に泥水を空気圧で送り込むものである。

実験は、3～51の泥水をバケツに用意し、これに所定量の凝集剤を添加して一分間程混合する。これを小型フィルタープレス機の泥水タンクに充填し、蓋をして密封した後、タンク内に空気圧を導入して泥水をろ室に打ち込む。タンク内の空気圧が打ち込み開始5分で 7 kg/cm^2 (686 kPa) になるようにし、その後55分

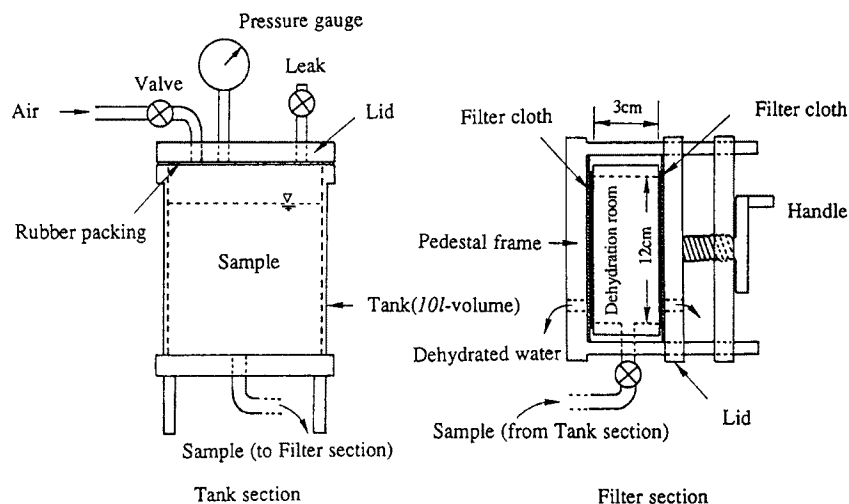


Fig. 3. Small-sized Filter-press system.

間この圧力を維持できるように空気量をコックで調整する。排出されるろ水は、その排出量、pH、SS などの測定を行い、脱水ケーキはフォールコーン試験と含水比測定に供した。

(4) フォールコーン貫入試験

質量 60 g、先端角度 60° のコーンを脱水ケーキのある表面から 5 秒間自由落下させたとき貫入量 F_c (mm) を測定し、貫入量から求められる載荷面積とコーン質量から次式によりコーン指数 q_c (kPa) を算定した。

$$q_c = 1764 / (F_c^2 \cdot \pi) \dots\dots\dots (1)$$

「建設廃棄物処理ガイドライン」で示される汚泥と残土の基準のコーン指数 2.0 kgf/cm^2 (196 kPa) は先端角 30° のコーンを土中に貫入するときの抵抗値から算定するもので、本研究で求めるコーン指数と異なる。Fig. 4 はフィルタープレスおよびロールプレスによる脱水ケーキの一軸圧縮強さとフォールコーン貫入量の関係の一例であるが⁵⁾、「建設廃棄物処理ガイドライン」の汚泥と残土を区別するもう一つの基準「一軸圧縮強さ 0.5 kgf/cm^2 (49 kPa)」に対応するフォールコーン貫入量は $1.5 \sim 2.5 \text{ mm}$ の範囲にある。式 (2.1) に基づけばコーン指数 2 kgf/cm^2 (196 kPa) を満たすフォールコーン貫入量は 1.7 mm となり、フォールコーン貫入量から算定したコーン指数による評価は安全側に偏る傾向があるといえる。

(5) 排出水の水質分析

沈降分離試験、圧密試験、フィルタープレス試験にて排出されるろ水は、簡易 pH メータによる水素イオン濃度 (pH) 測定と光透過式粒度分布測定装置による浮遊物質 (SS) 測定に供した。光透過式粒度分布測定装置は溶媒中に浮遊する粒子量を光の透過率にて測定するもので、本研究ではカオリナイトを蒸留水に添加して作成したカオリン標準液にて検量線を求め、測定試料の吸光率からカオリン標準濃度として SS への換算を行った。本手法は厳密な意味での SS を求めるものではないが、沈降分離試験や圧密試験などサンプルが少量しか得られない場合に有効である。

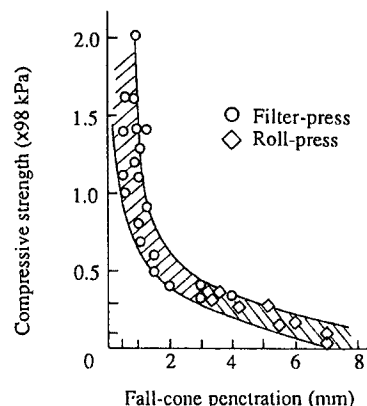


Fig. 4. The relationship between compressive strength and fall-cone penetration of dehydrated slurry.

3.2 造粒特性と沈降特性

低濃度の汚泥に CAS を添加すると径 1 mm 程度のフロックが直ちに形成され、造粒物層と上水層とに分離する。上水層は清澄で、フロック層との境界部分は明瞭であり、経過時間とともにフロック層は沈降していく。泥水 A (密度 1.060 g/cm^3)、濁水 A、濁水 B のフロック沈降特性を Fig. 5 ~ 7 に、分離上水の水質を Table. 2 ~ 4 に示す。いずれの泥水、濁水も PAC よりも CAS の使用が凝集分離に効果的である。濁水 A は PAC を添加しても造粒、沈降は起こらず、凝集効果がみられなかった。CAS は PAC に比べて自然放置による沈降速度が速く、沈降体積も小さくなっており、浮遊土粒子が有効に造粒物に取り込まれて上水の SS 値が低くなっている。したがって、沈降槽での固液分離に有効と考えられる。PAC を用いた場合は添加量を増やしても沈降特性はあまり変化しないのに対し、CAS 使用時は添加量の増加に伴い造粒物の沈降速度は速くなり浮泥沈降体積が減少するため、現場プラントにおいてフロック形成状況を確認しながら CAS の添加量を調整することが可能で、プラント運転管理を容易にすると考えられる。CAS 使用量は泥水 A で $5 \sim 10 \text{ g/l}$ 程度、濁水 A および B では $0.1 \sim 0.5 \text{ g/l}$ と少なく済み、高分子助剤の添加も不要である。排出水の pH、SS とともに排水基準をみたすことから、沈澱槽などの設置により分離された排出水をそのまま放流することが可能である。

凝集助剤として流動床灰を添加することの効果については Fig. 5 (b) に示される通りである。CAS の正

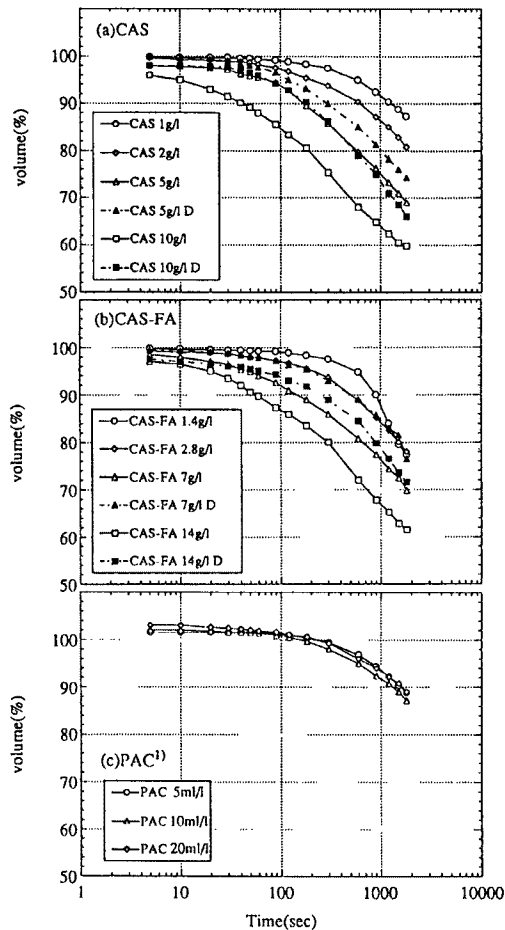


Fig. 5. Sedimentation characteristics of waste slurry A with flocculants.
(Waste slurry A; $\rho=1.060 \text{ g/cm}^3$, $\mu=19.2 \text{ sec}$
'1'); with 10 ml/l addition of Polymer B
0.01% solution
'D'; the slurries obtained through
churning test)

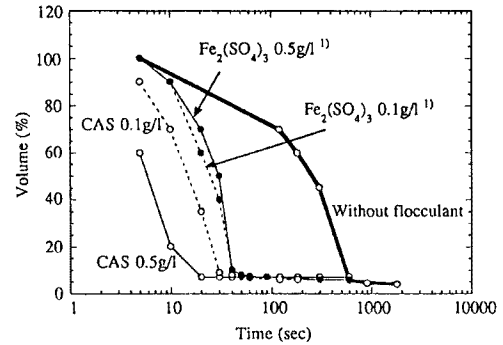


Fig. 6. Sedimentation characteristics of waste water A with flocculants.
(Waste water A; $\rho=1.002 \text{ g/cm}^3$
'1'); with 50 ml/l addition of Polymer A
0.1% solution)

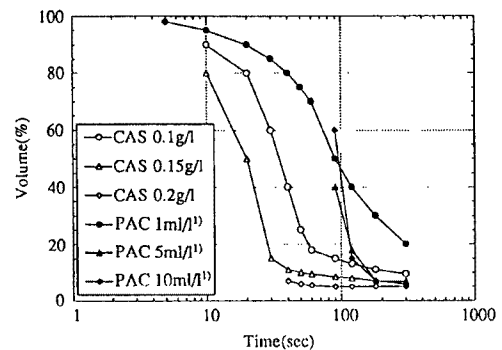


Fig. 7. Sedimentation characteristics of waste water B with flocculants.
(Waste water B; $\rho=1.003 \text{ g/cm}^3$
'1'); with 10 ml/l addition of Polymer B
0.01% solution)

味の添加量が等しければ、流動床灰添加の有無に関わらずフロック沈降特性は同等とみなしうる。

フィルタープレスなどの脱水処理システムでは、形成フロックのポンプ圧送などの送泥中の耐久性の検討が重要である。フロック形成した泥水を攪拌機によって5分間攪拌した場合の沈降特性は Fig. 5 (a) 及び (b) に示される。攪拌機にかけることによって径 1 mm 程度であったフロックは目視で確認できないほどに小さく破壊されるが、静置するとフロックが直ちに再形成されることが特徴的である。そして、攪乱によって沈降速度は若干落ち沈降汚泥体積は増加するものの、基本的な沈降特性には変化を生じていないと考えることができる。この場合も流動床灰の添加の影響は無いと考えられる。

3.3 加圧脱水特性

Fig. 8 は泥水 A の圧密脱水試験による圧密曲線である。密度 1.060 g/cm^3 の泥水 A に CAS および CAS-

Table 2. Quality of discharged water from sedimentation and consolidation test (Waste slurry A, $\rho=1.060 \text{ g/cm}^3$, $\mu=19.2 \text{ sec}$)

Type of flocculant	Additive content	SS(mg/l) Water(S) ¹⁾	SS(mg/l) Water(C) ¹⁾	pH Water(C) ¹⁾
CAS	1.0(g/l)	2.6		
	2.0(g/l)	1.8		
	10.0(g/l)	3.5	2.1	7.5
CAS-FA	1.4(g/l)	1.4		
	2.8(g/l)	1.4		
	14.0(g/l)	3.0	4.0	7.8
PAC ²⁾	20.0(ml/l)	428.4	5644.3	4.4

Note 1) 'Water(S)' and 'Water(C)' indicate water discharged by sedimentation and consolidation.

2) with 10 ml/l addition of Polymer B 0.01% solution.

Table 4. Quality of discharged water from sedimentation test (Waste water B)

Type of flocculant	Additive content	SS(mg/l)	pH
CAS	0.10(g/l)	37	7.3
	0.15(g/l)	31	7.2
	0.20(g/l)	57	6.9
PAC ¹⁾	1(ml/l)	5	7.0
	5(ml/l)	158	4.4
	10(ml/l)	468	4.1

Note 1) with 10 ml/l addition of Polymer B 0.01% solution.

FA を添加した場合、圧密終了時間は5～10分程度でフィルタープレス機等での脱水処理が可能と考えられる。CAS の添加量は圧密最終時間と脱水ケーキの体積に影響すると考えられ、CAS の添加量が多いとより大きなフロックが形成されるため最終体積は若干大きく、圧密終了時間は早い。フロックを破壊して加圧実験を行った場合も、加圧脱水特性にほとんど影響がないと考えられる。また、加圧脱水特性に、CAS とともに流動床灰を使用することの効果不効果はみられない。PAC を使用したものは、CAS あるいは CAS-FA 使用時と同等の加圧脱水による減容効率が得られ

Table 3. Quality of discharged water from sedimentation test (Waste water A)

Type of flocculant	Additive content	SS(mg/l)	pH
—		755.6	6.2
CAS	0.1(g/l)	9.1	6.8
	0.5(g/l)	2.9	6.9
$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ ¹⁾	0.1(g/l)	304.8	4.3
	0.5(g/l)	140.8	3.5

Note 1) with 50 ml/l addition of Polymer A 0.1% solution.

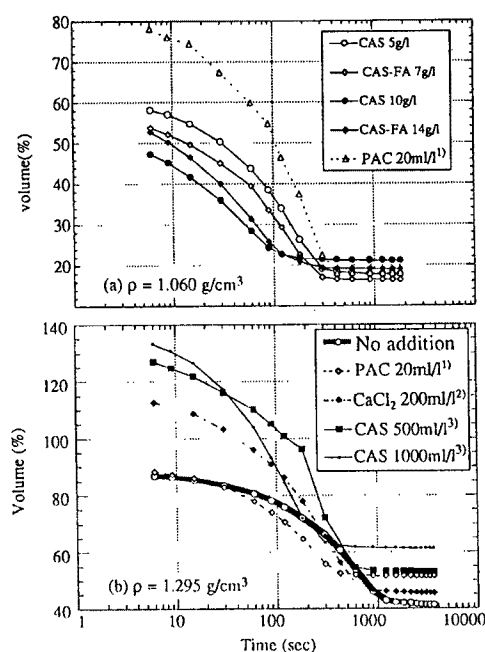


Fig. 8. Consolidation curves of waste slurry A with flocculants.
(Consolidation pressure; 9.8 kPa
'1); with 10 ml/l addition of Polymer B 0.01% solution
'2); with 20 ml/l addition of Polymer A 0.1% solution
'3); 5% CAS solution)

るが、加圧時に排出水中に固形分が多く混入するため、後述するように脱排水の水質は悪く、PACにより形成されるフロックが小さく弱いためと考えられる。脱水処理プラントでPACが使用される場合、強引に加圧脱水してSSの高い脱排水を生じている可能性が考えられるが、CASを用いる場合は大きくて強いフロックが形成されるためより確実な加圧脱水を行いうる可能性が考えられる。

一方、密度 1.295 g/cm^3 の泥水Aの場合はCASの添加量を多くする必要があり、他の凝集剤と比較して必ずしも効果的ではない。CASの効果は対象とする泥水の濃度に影響を受けると考えられ、濃度水準を変えて圧密脱水試験を実施し、その可否について示したのがTable. 5 及び 6 である。掘削泥水の泥水Bとベントナイト泥水の泥水Cの圧密脱水の可否と圧密終了時間、排水のSSを示している。Table. 5によると、泥水Bでは実験を行った全ての泥水濃度でPAC添加により圧密脱水が可能であった。CASは粉体添加と溶液添加の二方法によった。粉体添加の場合固相分が増加したことによる圧密脱水性の改善がみられたが、CAS本来の造粒による効果はみられなかった。溶液で添加した場合は造粒作用が生じ、低濃度の泥水では圧密脱水が可能と考えられる。

Table. 6 に示す泥水Cでは密度 1.202 g/cm^3 以上、粘性26秒以上では使用したいずれの凝集剤も効果がなく、脱水処理を行うこと自体に問題が考えられる。密度が低い場合は、CAS, PAC, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ の添加により圧密脱水が可能であるが、多量に添加する必要があり、減容化率が低いなどCASの効果は低い。膨潤性をもつベントナイトはイオン交換によってゲル化させる必要があり、交換順位 ($\text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{Li}^+$) の高いイオンを持ち、酸性であるPACや $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ などの凝集剤はベントナイト泥水の処理には効果的である。CASはこれらの凝集剤に比べて凝集効果は劣り、高粘性泥水への使用は不適切と考えられる。

これらの実験結果からCASの適用範囲は、泥水の密度 $1.15 \sim 1.20 \text{ g/cm}^3$ 以下、粘性 $20 \sim 22 \text{ sec}$ 以下として示される。

小型フィルタープレス試験による掘削泥水の泥水Bとベントナイト泥水の泥水Dの脱排水の水質をTable. 7 および 8 に、排水量から算定した残留水分をFig. 9 に示す。同図によると脱水特性は凝集剤の種類によらないことが明らかで、汎用されているPACなどと同様にCASをフィルタープレスシステムにて

Table 5. Propriety of dehydration by consolidation and consolidation time (Waste slurry B)

Type of flocculant	Additive content	Density of slurry (g/cm^3)			
		1.210	1.184	1.144	1.116
—	—	40(87.1)	×	—	—
CAS-FA	28(g/l)	30(13.4)	25(6.4)	×	—
CAS-FA(L)	200(ml/l)	×	×	12(347)	8(345)
PAC ¹⁾	20(ml/l)	25(9.0)	15(133)	—	—
PAC ¹⁾	10(ml/l)	—	—	12(6250)	8(284)

Consolidation pressure; 5.6 kgf/cm^2 (= 549 kPa) (after 0.8 kgf/cm^2 (=78 kPa) for 5 minutes)

'CAS-FA(L)' indicates the mixture of CAS-FA and water (14:100)

Uncovered figures indicate the time (minute) to reach the final volume by compression, and covered figures indicates the SS(mg/l) of discharged water.

1) with 10 ml/l addition of Polymer B 0.01% solution.

Table 6. Propriety of dehydration by consolidation and consolidation time (Waste slurry C)

Type of flocculant	Additive content	Density of slurry (g/cm ³)				
		1.038	1.020	1.015	1.004	1.001
—	—	×	—	—	—	—
CAS	20(g/l)	×	—	—	—	—
CAS(L)	600(ml/l)	—	—	×	9(215)	9(0.5)
CAS(L)	200(ml/l)	×	×	×	×	×
PAC	40(ml/l)	×	×	×	×	×
	40(ml/l) ¹⁾	×	×	12(1569)	8(4.7)	8(59.6)
	10(ml/l)	×	×	×	8(3.7)	×
	10(ml/l) ¹⁾	×	×	×	8(5.8)	7(9.7)
Fe ₂ (SO ₄) ₃	200(ml/l)	×	×	×	×	×
	200(ml/l) ¹⁾	×	×	13(15.8)	8(1.8)	7(4.7)

Consolidation pressure; 5.6 kgf/cm² (= 549 kPa) (after 0.8 kgf/cm² (= 78 kPa) for 5 minutes)

'CAS(L)' indicates the mixture of CAS and water (10:100)

Uncovered figures indicate the time (minute) to reach the final volume by compression, and covered figures indicate the SS(mg/l) of discharged water.

1) with 500 ml/l addition of Polymer A 0.1% solution.

Table 7. Quality of discharged water from mini-filter-press test (Waste slurry B, $\rho = 1.150 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 21.5 \text{ sec}$)

Type of flocculant	Additive content	Polymer Additive content	SS(mg/l)	pH
CAS(L)	600(ml/l)	—	11.4	7.4
CAS(L)	200(ml/l)	100(ml/l)	27.6	7.6
PAC	10(ml/l)	400(ml/l)	13.4	6.8
PAC	10(ml/l)	200(ml/l)	168	7.0
PAC	40(ml/l)	200(ml/l)	380	6.4
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (L)	200(ml/l)	200(ml/l)	0.1	7.0
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (L)	200(ml/l)	400(ml/l)	15.8	7.0
—	—	200(ml/l)	864	8.8
—	—	400(ml/l)	27.6	8.8

'CAS(L)' indicates the mixture of CAS and water (10:100)

'Fe₂(SO₄)₃(L)' indicates the mixture of Fe₂(SO₄)₃ and water (1:100)

Polymer is Polymer A 0.1% solution.

Table 8. Quality of discharged water from mini-filter-press test (Waste slurry D, $\rho = 1.011 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 20.2 \text{ sec}$)

Type of flocculant	Additive content	Polymer Additive content	SS(mg/l)	pH
CAS(L)	600(ml/l)	100(ml/l)	3.7	7.9
PAC	10(ml/l)	200(ml/l)	14.2	6.8
PAC	40(ml/l)	400(ml/l)	10.4	4.5
Fe ₂ (SO ₄) ₃ (L)	200(ml/l)	400(ml/l)	5.8	5.4
—	—	600(ml/l)	18.3	8.8

'CAS(L)' indicates the mixture of CAS and water (10:100)

'Fe₂(SO₄)₃(L)' indicates the mixture of Fe₂(SO₄)₃ and water (1:100)

Polymer is Polymer A 0.1% solution.

適用することが充分可能である。脱排水の水質は PAC や $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ よりも CAS 使用の方が清澄で pH も中性領域である。大きくて強い造粒物が形成されるために脱排水への土粒子の混入が避けられると考えられ、脱排水の再処理が不要であるという利点をもつ。

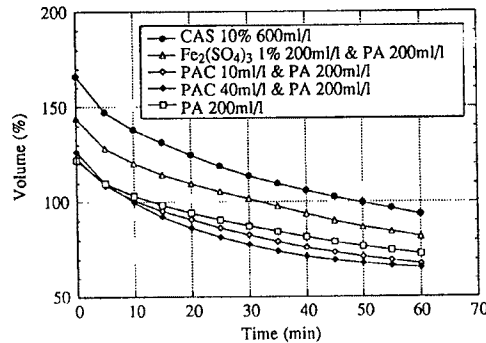


Fig. 9. Volume reduction of waste slurry B by small-sized Filter-press test.
(Waste slurry B; $\rho = 1.150 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 21.5 \text{ sec}$
'PA'; with addition of Polymer A 0.1%)

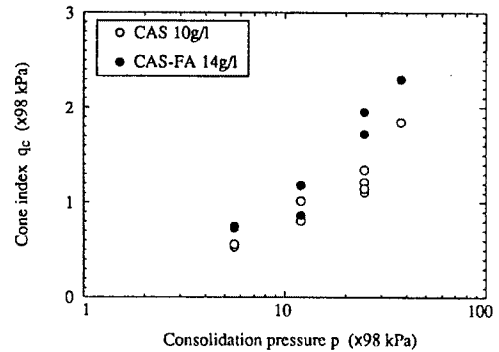


Fig. 10. Strength characteristics of dehydrated cakes.
(Waste slurry A; $\rho = 1.060 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 19.2 \text{ sec}$)

3.4 脱水ケーキの特性

泥水Aのフォールコーン貫入試験によるコーン指数と加圧力の関係を Fig. 10 に示す。加圧力の増加にともないコーン指数は増加するが、CAS によるものよりも CAS-FA によるものの方が高く、ここではじめて流動床灰を CAS とともに使用することの効果が示される。「建設系廃棄物処理ガイドライ」で残土と汚泥の区分の基準として示されているコーン指数 2 kgf/cm^2 (196 kPa) をクリアするためには加圧力を 3 MPa 以上とする必要があり、脱水ケーキを残土として有効利用するためには高圧力のフィルタープレスプラントが必要となる。大阪市などで出されていた脱水ケーキの運搬基準や盛土材への使用基準である「フォールコーン貫入量 4 mm 以下」は低圧力による脱水でも達成される。脱水ケーキを攪乱した場合も CAS 単味によるものよりも流動床灰を併用した方がコーン指数は高い。沈降特性、加圧脱水特性に関しては前述のように流動床灰を併用したことによる不効果はないため、廃泥水を加圧脱水処理して脱水ケーキを残土利用することを想定する場合には、CAS に流動床灰を添加することにより脱水ケーキの強度を確保することができる。

Fig. 11 及び 12 は小型フィルタープレス試験で得られた脱水ケーキのコーン指数と含水比を示したものである。CAS を使用する場合、大きな造粒物の形成により脱水による最終体積が大きくなり、脱水ケーキの強度が低く含水比が高くなることが懸念されるが、泥水Bについては他の凝集剤使用時と同程度の強度特性を有しており、フィルタープレスプラントでの使用と排土の利用が考えられる。しかし、ベントナイト泥水である泥水Dでは CAS 使用の脱水ケーキの強度が非常に低い。CAS がベントナイト泥水の処理に効果を発揮しにくいことは前述した通りで、凝集作用が不十分なため脱水ケーキの強度が低いと考えられる。

3.5 脱排水の特性

沈降分離試験、圧密脱水試験、小型フィルタープレス試験での脱排水の水質は Table. 2~4, 7 および 8 に示した通りである。CAS を使用する場合、確実なフロックレーションが起きておれば SS 値は低く、pH

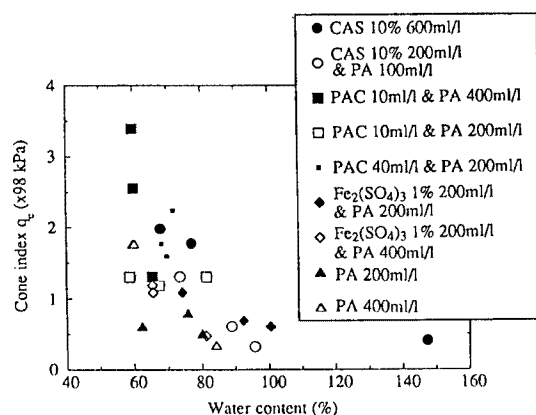


Fig. 11. Strength characteristics of cakes dehydrated by small-sized Filter-press test.
(Waste slurry B; $\rho = 1.150 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 21.5 \text{ sec}$
'PA'; with addition of Polymer A 0.1%)

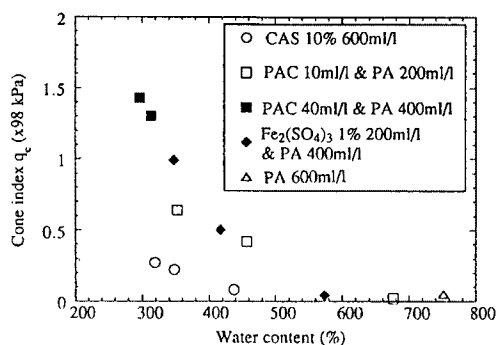


Fig. 12. Strength characteristics of cakes dehydrated by small-sized Filter-press test.
(Waste slurry D; $\rho = 1.011 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 20.2 \text{ sec}$
'PA'; with addition of Polymer A 0.1%)

も中性領域であるため脱排水の再処理を必要としないという利点を持つ。特に自然沈降による上水は CAS を使用したものは非常に清澄であるのに対し、PAC によるものは濁っており、明らかな違いがみられる。自ら造粒作用を発揮する CAS は沈降分離過程で造粒物が浮遊土粒子を取り込む働きをし、圧密脱水過程では強く大きいフロックが圧密荷重に対して耐久的であるため脱排水の SS 値は低い。粒子間反発力の低下作用による PAC の使用時は、造粒物は小さく、積極的に浮遊土粒子を取り込むことが難しいため、脱排水に土粒子が残存してしまい、pH も酸性側である。Fe₂(SO₄)₃ 使用時は、SS 値は低い脱排水が赤濁することがあり、脱排水の取扱いが困難となる。

濁水 C の室内試験と現場施工による処理水の水質を Table. 9 に示す。現場施工は CAS 材を直接池へ圧送し、投入部分を直ちにスクリー攪拌する投入攪拌装置によっており、施工区域 (面積 150 m², 平均水深 0.5 m) に CAS 材が 33 kg (0.44 g/l) 投入された。CAS 材の投入により透明度は上がり、黄濁色が乳白 (淡青) 色となった。CAS 材の投入により COD, BOD, N などは下がり、特に P の低下が著しく、浮遊土

Table 9. Quality of water treated by CAS (Waste water C)

		Laboratory test		Field test	
		untreated	treated	untreated	treated
	pH	7.0	6.9	7.6	7.4
COD	(mg/l)	7.5	4.0	2.6	1.0
BOD	(mg/l)	3.0	1.0	4.0	2.0
T-N	(mg/l)	8.7	0.9	0.75	0.57
T-P	(mg/l)	0.19	0.02	0.11	0.01
T-Fe	(mg/l)	1.9	0.09	1.7	0.52
Ca ²⁺	(mg/l)	9.6	16	8.6	19
Muddiness	(degree)			37	6

粒子の除去だけでなく水質浄化にも貢献すると考えられる。透視度は処理前で 44 cmであったものが、処理直後は 56 cmに、処理 1 日後は 70 cmとなった。

4. 建設汚泥の固化処理

4.1 実験手法

実験ではベントナイト泥水を対象に、流動床石炭灰と炭酸アルミネート系塩材料 (CAS) を混合することによる固化処理効果を検討している。使用した CAS は予備試験により決定したもので、その組成は普通ポルトランドセメント：高炉セメント：石膏： $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ： $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ： Na_2CO_3 = 50：25：9：8：6：2 である。

4.2 固化処理泥水の強度発現特性

室内試験にはベントナイト泥水 (密度 1.059 g/cm³) を用いている。流動床灰と CAS 材により安定処理した泥水の強度発現特性を Table. 10 に示す。流動床灰単味を廃泥水に添加した場合、添加率 70% で材令 28 日まで養生しても強度発現せず、流動床灰の他に固化材の使用が必要である。CAS のみ添加の場合、同表に示すように添加率 25% (材令 7 日) でも「建設廃棄物処理ガイドライン」による残土の基準を満足しない。一方、流動床灰—CAS—泥水混合物は、材令 3 日までの発現強度は低く、配合によっては自立しないために一軸圧縮試験が不可能なものが多いが、流動床灰および CAS 添加量 50%—13%, 60%—10% で 30 kPa をみだし取扱いの改善性が図られ、70%—13% でガイドラインの残土の基準を満たす。材令 3 日以降の強度の伸びは大きく、材令 7 日 40%—10% 以上で 100 kPa 以上をみだし、盛土材や路床材への適用が考えられる。材令 14 日以降の強度の伸びは CAS 単味によるものと比較して大きく、材令 28 日で CAS 単味では達成できない 500 kPa 以上の強度を得ることが可能である。材令 7 日以降の強度の伸びは流動床灰の量が多いほど小さくなり、CAS の量が多いほど強度の伸びは大きくなる。流動床灰量と CAS 量を調整することによって初期材令および長期材令での発現強度を管理する考え方も可能である。材令 7 日で供試体を水浸した場合何れの配合においても試料の崩壊、再泥寧化等の現象はみられず、流動床灰—CAS—泥水混合物は耐水性に優れており、盛土、路床への積極的な利用が考えられる。

流動床灰と CAS を混合することによる体積増加率は Table. 10 に示す通りで、処理後の体積増加がこの処理手法の問題点である。体積増加を極力抑制したい場合は流動床灰の量を減らし CAS の量を増やすこと

Table 10. Strength characteristics of the slurry-FA-CAS mixtures

Additive content(%)		Compressive strength(kPa)				Volume change ratio
FA	CAS	3 days	7 days	14 days	28 days	
40	7	—	65	199	228	1.20
	10	—	101	356	435	1.22
	13	19	142	629	761	1.24
50	4	—	73	172	219	1.26
	7	—	112	348	314	1.27
	10	15	175	534	665	1.28
	13	29	213	931	855	1.31
60	4	—	123	253	419	1.31
	7	—	194	411	637	1.32
	10	27	282	670	978	1.33
	13	40	396	1145	1381	1.34
70	4	15	215	493	467	1.36
	7	17	319	720	891	1.37
	10	38	435	980	1178	1.38
	13	61	579	1260	1711	1.39
—	10	—	13	15	30	1.02
	20	—	26	40	74	1.09
	25	—	40	67	98	1.10
	30	—	133	183	305	1.17

Waste slurry; $\rho=1.040 \text{ g/cm}^3$, $\mu=51.7 \text{ sec}$

1) Volume ratio indicates the volume of slurry-FA-CAS mixture after mixing versus the one of waste slurry only.

によって、体積増加は25%以内には抑えられる。

解きほぐした試料の強度特性を Fig. 13 に示す。材令3日で試料を解きほぐすと再締固めにより密度が増加して強度が高くなる。その後も固化反応の進行により強度は増加し、再締固め後3日で 100 kPa 以上の強度が発現するため、混合固化、再掘削、運搬、再締固めというフローに基づいた処理と盛土、路床材への適用が有効と考えられる。また、初期材令で処理土に部分的な破碎、損傷が生じた場合も、その後の強度再生が期待できると考えられる。材令7日で試料を解きほぐした場合は不攪乱のものよりも強度が低く、その後の強度の伸びも低い。化学的固化反応は材令7日までにほぼ終了しており、この材令以降での解きほぐしは固化反応によるセメンティングを破壊するため強度の再生が期待できないとともに、解きほぐし作業自体も困難となる。

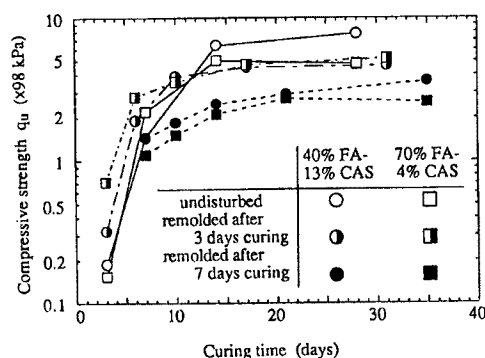


Fig. 13. Strength characteristics of remolded slurry-FA-CAS mixtures.
(Waste slurry; $\rho = 1.040 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 51.7 \text{ sec}$)

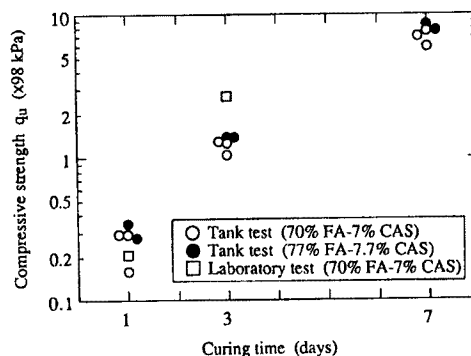


Fig. 14. Strengths of specimens sampled through the tank tests.
(Waste slurry; $\rho = 1.050 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 22.7 \text{ sec}$.)

4.3 固化処理手法の施工性

本手法のような混合攪拌処理工法では、施工精度の違いから室内試験で得られた処理効果が必ずしも現場で得られない場合が多い。そこで、大型土槽（ノッチタンク）を用いた現場スケール実験を行い、改良効果の検討を行った。実験は、廃泥水 12 m^3 を満たしたノッチタンク（断面 $2.3 \text{ m} \times 8.0 \text{ m}$ 、深さ 1.8 m ）に流動床灰および CAS を投入し、専用バケットを装着したバックホウ（ 0.7 m^3 ）により試料を混合後整地して行った。実験に供した廃泥水は場所打杭工事により排出された廃ベントナイト泥水で、密度 1.050 g/cm^3 、粘性 22.6 秒 、 $\text{pH } 8$ である。室内配合試験の結果に基づき、取扱いの改善性のための改良目標強度を材令1日の一軸圧縮強さで 0.2 kgf/cm^2 (19.6 kPa) と設定して、AタンクおよびBタンクの配合をそれぞれ流動床灰70%、CAS 材7%（廃泥水 12 m^3 に流動床灰 8400 kg 、CAS 材 840 kg ）および流動床灰77%、CAS 材7.7%（廃泥水 12 m^3 に流動床灰 9200 kg 、CAS 材 920 kg ）と決定した。

混合攪拌サイクルタイムは、流動床灰と CAS の投入がそれぞれ30分と10分、混合攪拌が40分の合計80分で、一時間あたり 7.3 m^3 の泥水を処理した事になり、フィルタープレスやロールプレスによる処理能力と同等とみなしうる。脱水性が困難な場合や、固化処理泥水が運搬するのに適している場合はこの手法の適用性が有効と考えられる。

タンク内の各点から採取された試料の一軸圧縮強さを Fig. 14 に示す。材令1日の採取試料の一軸圧縮強さは若干ばらつきはあるものの、その平均は室内配合試験による強度よりも高く、処理土上の歩行が可能であった。現場室内強度比が高いことは、流動床灰を用いた固化処理の場合特徴的で、擁壁基礎の軟弱地盤改良においても示されている¹⁰⁾。材令3日および7日の一軸圧縮強さはばらつきも少なく、本施工でのバックホウによる混練はかなり粗い混練であったにもかかわらず、流動床灰と廃泥水の混合は材料どうしのなじみが

良く、一様に混合しやすかったと考えることができる。養生3日強度は100 kPa以上、7日強度は500 kPa以上で、対象泥水の場合材令3日前後で固化土の積み込み、運搬、再締固めを行い、盛土、路床材への転用を図ることが可能と考えられる。

5. 結 言

本研究では、建設工事に伴い発生する汚泥の処理と有効利用を確立するために汚泥処理システムを提案し、処理の迅速性や処理システムによる環境影響、安定性、減量化、再資源化について実験的に検討した。得られた結論を以下に要約する。

- (1) 脱水処理手法と固化処理手法による汚泥処理システムを提案し、手法選択の指標として泥水管理によく用いられる密度、粘性を取り上げ、その有効性を示した。
- (2) 凝集剤として新しく開発された炭酸アルミネート系塩材料は低密度、低粘性の汚泥や濁水の凝集脱水処理に有効で、処理水は無処理で放流しうる水質を有する。また、フィルタープレスプラントへの適用も可能で、処理土の地盤材料への適用が考えられる。
- (3) 脱水処理が必ずしも適当でない高密度、高粘性の汚泥については固化処理手法が有効であることを示した。この手法では流動床ボイラーによる石炭灰の適用について検討し、強度発現特性、施工性等が処理システムの条件を満たすことが明らかとなった。

以上のように技術的には汚泥処理システムによる排出土の有効利用の可能性が明らかとなったが、今後は社会的、経済的側面からも有効利用を見つめ直し、廃棄物利用をバックアップするための社会システム、法体制などの基本的考え方をまとめあげる必要がある。

本研究の遂行にあたりご助力を賜りました財団法人旭硝子財団、株式会社大林組、鹿島建設株式会社、株式会社神戸製鋼所、ソイルジェット株式会社、東亜建設工業株式会社、東急建設株式会社、東洋紡エンジニアリング株式会社、常盤建設株式会社、日産建設株式会社、日本鋼管工事株式会社、三星化学合資会社の関係各位に深謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 久楽勝行：建設副産物の再利用の現状とその展望，土木技術資料，Vol. 34, No. 11, 1992, pp. 32-39.
- 2) 喜田大三・久保 博・岡田芳樹：土中のフミン酸が土質改良効果に及ぼす影響，土木技術資料，Vol. 26, No. 8, 1984, pp. 405-410.
- 3) 万波一郎：土質改良プラントの例，掘削残土処理，土木施工，Vol. 27, No. 15, 1986, pp. 38-46.
- 4) 前田正博：東京都における建設残土対策，土木学会誌，Vol. 77, No. 6, 1992, pp. 46-49.
- 5) 喜田大三・辻 博和：各種泥水工法における廃棄泥水の処理と有効利用，土と基礎，Vol. 29, No. 11, 1981, pp. 57-64.
- 6) 本多淳裕・山田 優：建設系廃棄物の処理と再利用，財団法人省エネルギーセンター，1990.
- 7) 財団法人国土開発技術研究センター：建設汚泥の高効率・低含水比型脱水機械・工法技術評価委員会資料，1992.
- 8) 菅原正孝・堀中俊治・川口修宏・北村明洋：建設残土の脱水処理について，第47回土木学会年次学術講演会講演概要集，第3部，1992, pp. 1090-1091.
- 9) 嘉門雅史・Supakij Nontananandh・勝見 武：産業廃棄物の固化処理による有効利用，材料，Vol. 40, No. 459, 1991, pp. 1538-1544.
- 10) 嘉門雅史・勝見 武：流動床ボイラー石炭灰の基礎地盤改良工への適用例，第27回土質工学研究発表会講演集，1992, pp. 2333-2334.