

建設汚泥の連続脱水・固化処理システムによる再資源化

嘉門雅史・勝見 武・乾 徹*

*京都大学大学院工学研究科

要 旨

建設工事に伴い発生する汚泥の処理が環境問題の一つに挙げられており、再資源化を行うためのより効率的な処理方法の確立が求められている。本研究では、建設汚泥の脱水処理、固化処理のそれぞれに関して、汚泥の特性に基づいて処理方法の効果と処理土の特性を検討、整理する。さらにその結果を踏まえて、連続脱水・固化処理システムの構築を目的として、処理効率の評価と検討を行う。

キーワード：建設汚泥，連続脱水・固化処理システム，コンシステンシー，処理効率

1. 緒言

近年、環境に対する人々の関心が高まる中、土木事業も自然環境に手を加えていくという点において、環境と大きな関わりを有しており、施工中や施工後の周辺環境に対する影響の軽減がこれまで以上に求められている。土木事業において環境に影響を与えるものとして、各種建設工事に伴って、副次的に発生する「発生土」と呼ばれる土砂や汚泥が挙げられる。Fig. 1 にその構成を示す。これらの処理・処分を考える上で、処分地の不足が特に大都市圏において、極めて深刻な問題となっており、建設工事に伴う発生土の処理と有効利用が地盤工学の分野において重要な課題となっている。特に、様々な掘削工事により排出される建設汚泥といわれる発生土は含水比が非常に高く、またその粒子も微細なために、泥土・泥水状を呈し、再資源化のための処理が困難である。平成5年度の建設副産物実態調査によると、日本における建設汚泥の発生総量は約1500万トンに達しており、その処分率は約8%にとどまっている。

処分を目的として場合においても、通常脱水処理などの最終処分を目的とした減量化処理が主なものであり、盛土・埋戻し材料等の建設材料として有効利用する場合に必要な強度、耐久性を保持し得ない場合が大半である。このため改良材による固化処理が必要

となるが、建設汚泥に直接固化処理を施すことは、汚泥が非常に高含水比であるため、改良材添加量および処理体積が非常に大きくなり、処理効率・経済性の両面で問題を有するのが現状である。

そこで本研究では、建設汚泥の効率的な処理を行うため、脱水と固化の各処理を一連のシステムとして行う方法として、連続脱水・固化処理システムの適用性と効果を評価することを目的とした。脱水処理では凝集剤や汚泥の特性による脱水特性の把握のための室内試験を行い、汚泥の性状による脱水特性の相違についての考察を行った。固化処理についてはセメント改良

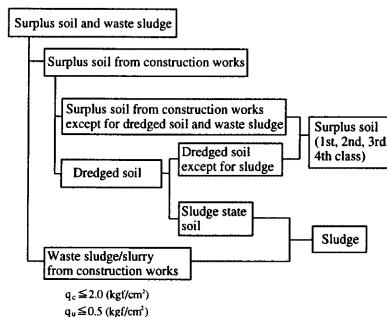


Fig. 1 Waste/by-product classification of surplus soil and waste sludge

による安定処理効果と処理土の特性について検討を行ない、更に脱水処理および固化処理に関する室内試験の結果に基づき、連続脱水・固化処理システムの効率性についての評価を試みた。

2. 連続脱水・固化処理システム

2.1 連続脱水・固化処理システムの概要

本研究においては効率的な建設汚泥の処理システムとして、脱水処理と固化処理を一連のシステムとして行う連続脱水・固化処理システムを提案する。Fig. 2 にこのアウトラインを示す。

2.2 脱水処理

脱水処理は建設汚泥の減量化に最も一般的に用いられる方法である。その処理過程は、まず凝集剤を添加することにより、微細粒子分のフロックを形成させ排水性を高める。この凝集剤としては現在は PAC (ポリ

塩化アルミニウム)、消石灰、硫酸アルミニウム等が一般的に利用されている。その後、凝集剤を添加した汚泥に対し、スクリュエーデカンタ、ベルトプレス、フィルタープレス等の脱水機械を用いて、脱水ケーキと排出水に分離することにより減量化を行う。参考として各脱水機械の処理能力を Table 1 に示す。

2.3 固化処理

脱水処理のみでは有効利用が不可能である場合には、固化処理によって所定の品質に改良する。改良材としてはセメント、石灰等の JIS 規格品に加え、軟弱土に対する改良効果が高いセメント・石灰系改良材、複合材等が用いられる。

安定処理汚泥の再利用方法としては、道路盛土や河川堤防の盛土材としての利用が有望と考えられ、施工の際の転圧・オーバークompaction等を考慮した判定基準等が提案されている。

3. 建設汚泥の脱水処理

3.1 使用材料

3.1.1 泥水

脱水処理試験では、Table 2 に示すような 4 種の試料を用いて実験を行った。これらの試料は、泥水シールド工法等の泥水工法を用いた建設工事から排出されたもの、もしくはそれに類似した特性をもつように人工的に作製した試験泥水である。

3.1.2 凝集剤

(1) 塩化カルシウム水溶液 (MA と称する)

本研究においては塩化カルシウムの 35% 濃度溶液の無機系凝集剤を用い、 Ca^{2+} による凝集作用を利用した。各種泥水の大部分に含まれるベントナイトはモンモリロナイトを主要鉱物とする超微細な粘土であり、非常に親水性が高く水を含んで膨張する。この膨張したベントナイト粒子は表面にマイナス電荷を持ち陽イオン交換能が非常に高い。また一般に土粒子も表面にゼ

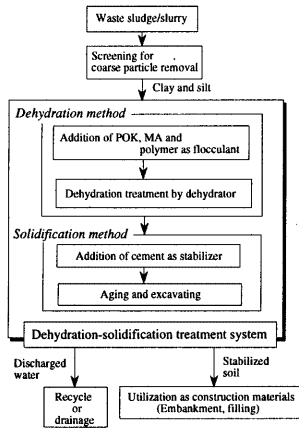


Fig. 2 Outline for dehydration-solidification treatment system of waste slurry

Table 1 Types of dehydrator (Kawachi et al. 1996)

Dehydrator		Dehydrated cake	
Type of dehydrator	Working ability	Water content (%)	Cone index (kPa)
Filter-press (ordinary)	500 - 700 kPa	$(0.8 - 0.9) \times w_L$	100 - 1000
Filter-press (high-pressure)	4000 kPa	$(0.6 - 0.8) \times w_L$	1000 - 3000
Belt-press	100 - 150 kPa	$1.0 \times w_L$	0 - 200
Screw decanter	500 - 2000 G	$(1.0 - 1.2) \times w_L$	0

w_L : Liquid limit (%), G: Acceleration of gravity (9.8 m/s^2)

Table 2 Physical properties of waste slurry

Sample No.	1	2	3	4
Soil density (Mg/m ³)	-	2.689	2.672	2.689
Solid Content (%)	5.29	6.80	20.00	14.70
Consistency				
Liquid limit (%)	-	283.81	99.72	143.64
Plastic limit (%)	-	71.23	28.62	-
Density of slurry (Mg/m ³)	1.020	1.030	1.142	1.087
Funnel viscosity (s)	25.9	25.9	24.0	25.4
Grain size distribution				
Gravel (- 2.0mm)	-	0.0	0.0	0.0
Sand (75 μm - 2.0mm)	-	0.0	0.0	0.0
Silt (5 - 75 μm)	-	31.7	33.8	25.0
Clay (5 μm -)	-	68.3	66.2	75.0
Remark		Bentonite content 5.0%		

ータ電位で -20～-30 mV の表面荷電を有している。これらに Ca²⁺, Na⁺ 等が添加されると、それらの陽イオンにより表面電位が低下する。これにより粒子間の Van der Waal's Force が卓越し、バントナイト・土粒子分を接着させる「凝結」効果により凝集作用が生じる。

(2) 炭酸アルミネート系塩材料 (POK と称する)

炭酸アルミネート系塩材料は、セメント・石灰に硫酸アルミニウム、炭酸ナトリウム、カルシウム塩、セメント、石灰灰等を配合した凝集材である。POK は清水と攪拌・混合するだけでフロックを形成し、更に中性を示すため利用がしやすい凝集剤である。その配合は Al₂(SO₄)₃:Na₂CO₃:CaCO₃:Cement:強アニオン性高分子凝集剤=40:21:30:7:2 となっている。

(3) 高分子凝集剤 (BK と称する)

泥水処理においては、無機系凝集剤のみでは凝集効果が十分でない場合が多いため、BK と称する高分子凝集剤を併用するのが一般的である。高分子凝集剤の凝集効果は以下のように考えられている。鎖状の高分子が複数の土粒子に吸着し、土粒子間を架橋する。この架橋された粒子が汚泥内をランダムに移動し、次第に大きなフロックを形成する。これにより、無機系凝集剤のみの使用よりも、大きなフロックが形成され凝集効果が高くなる。

3.2 実験手法

3.1 で述べた使用材料を用いた汚泥処理の有効性・汚泥による処理特性を評価するために概ね以下のよう手順で行った。

3.2.1 凝集剤添加

それぞれの凝集剤について、適正と予想される添加量をフロックの形成状況・排出水の水質等から予備実験で検討した結果、以下のような結果が得られた。

- 塩化カルシウム水溶液 (MA) は、濃度の低い汚泥 (5%程度) については MA 添加のみでの減量化処理が可能である。濃度が高いものに対しては POK, BK の併用が必要となる。添加量については、泥水体積の 1.0～2.0% 以上が必要であるが、排出水中の塩化物イオン分の増加がみられるため、MA の添加量は最小限にする必要がある。
- 低濃度の泥水に対しては POK の添加がなくても処理は可能であったが、通常は 400～800ppm 程度の添加によりフロックの形成が促進され、処理が行いやすくなった。また、多量の添加を行うと白濁分が流出し、排出水の水質が低下した。
- 高分子凝集剤の添加によりフロックの形成が促進され、特に試料 2 のような、比較的濃度が高い泥水については、泥水体積の 5% 以上の添加によりはじめて清浄な排出水が得られた。

この結果をもとに、脱水処理試験における凝集剤添加量を決定した。

3.2.2 圧密脱水試験

脱水処理に多く利用されるフィルタープレスやロールプレスによる強制脱水処理を想定して、Fig. 3 に示すような圧密リングを使用した圧密脱水試験を行い、泥水性状の相違による脱水特性への影響の評価を行った。手順としては、所定量の凝集剤を添加した汚泥 100 cm³ を圧密リングに充填し、所定の荷重段階に基づき載荷を行った。この間、汚泥の体積変化、排出水の浮遊物質濃度、pH、NaCl 濃度、導電率及び減量化処理後の固形分 (以下脱水ケーキ) の体積、含水比を測定した。荷重段階については、98.1kPa を初期載荷圧力とし、その後一定間隔毎に載荷圧力を倍増させ、最終的な最大載荷圧力を 784.8kPa, 1.26MPa, 2.51MPa の 3 バ

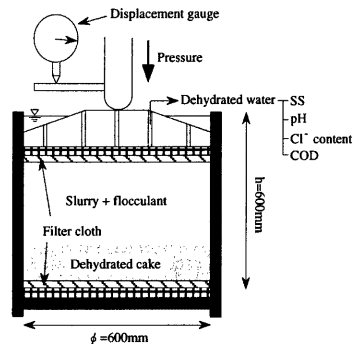


Fig. 3 Dehydration system

ターンを設定し脱水試験を行った。

脱水処理試験にて発生する排水は、簡易 pH メーターによる水素イオン濃度 (pH) 測定、光透過式粒度分布測定装置による浮遊物質量 (SS)、導電率測定装置による塩化物イオン濃度、アルカリ法による化学的酸素要求量 (COD) の 4 種の試験に供した。

3.3 圧密脱水時の脱水特性

3.3.1 従来の凝集剤との比較

本研究で試みた MA+POK+BK 凝集剤を用いた脱水処理過程を、従来から用いられている PAC (ポリ塩化アルミニウム) + 消石灰による処理過程と比較した。PAC を使用した処理例としては、建設省の評価書における実験値を用い Table 3 のように比較を行った。水質面においては、双方とも SS は排水基準をクリアしており清浄であるが、PAC + 消石灰を用いた処理においては、水酸化イオンの影響により pH が 11.8 と排水基準値を上回り、中和処理が必要である。これに対し、MA + POK + BK による処理では、原泥水の pH8.7 に対し、排出水の pH は 8.35 であり凝集剤による pH への影響はみられない。しかし、凝集剤添加量では MA + POK + BK においては PAC+消石灰による処理と比較しておよそ 10 倍の体積の添加が必要であり、処理効率の面で前者に劣ると考えられる。

3.3.2 汚泥の性状による脱水特性の相違

脱水処理過程における建設汚泥の管理指標として、汚泥の密度 (ρ) と粘性 (μ) が用いられている例がある (嘉門ら、1993)。汚泥の密度 ρ は汚泥中の土粒子分の含有量と大きな相関を持つため、減量化の程度予測が可能となる。一方、粘性 μ は土粒子の親水性や粒径分布などにより決定されるため、汚泥の脱水処

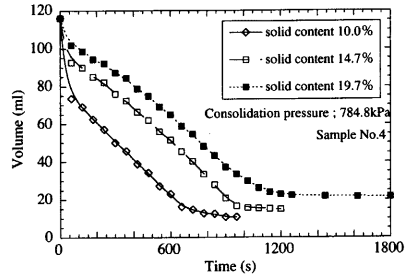


Fig. 4 Dehydration curves with the solid content

理性 (容易さ) を決定すると考えられる。そこでこれらの影響を定量的に評価するために脱水試験を行った。

(1) 汚泥の濃度による特性の相違

汚泥の濃度が脱水性に与える影響を考察するために試料 No.4 を濃度調整し、汚泥の濃度を約 10, 15, 20% の 3 通りに設定し脱水試験を行った結果、脱水時間と汚泥の体積の経時変化の関係は Fig.4 のようになり、汚泥濃度と脱水特性との間には処理速度の面において大きな相関が認められた。

この理由としては建設汚泥・泥水の脱水過程は、飽和土の圧縮過程に類似しているため、泥水の濃度が上がり混入している土粒子量が増加すると、脱水時の排水距離が増加するため、脱水に要する時間が長くなることによると考えられる。しかし、脱水ケーキの含水比自体はそれぞれ、73.9%、78.7%、74.3%となり濃度による脱水の程度への影響は見られなかった。

(2) 汚泥の粘性による影響

試料 No.3 と No.4 を用い、汚泥の濃度による脱水性への影響を排除するために双方とも約 20.0% 濃度に調整した。その結果、それぞれの試料のファンネル粘性は試料 3 が $\mu=24.0$ s、試料 4 が $\mu=35.3$ s となった。実験は最大載荷圧 784.8kPa の条件で行った。

2 種類の試料の脱水曲線は Fig.5 のようになり、高粘性の試料は特に載荷圧が低い段階で脱水の進行が遅く、ケーキの含水比・体積ともに大きな値を示した。

(3) 液性限界による基準化

これまでの試験結果から、汚泥の性質のうち濃度は脱水に要する時間、また粘性は脱水ケーキの含水比 w (脱水の程度) に対し大きな影響を有すると判断できる。そのため脱水の程度を評価する指標として汚泥の含水比をその液性限界で基準化した w/w_L を定義した。これにより汚泥の種類を問わず、脱水過程における汚泥の含水比変化を、土のコンシステンシーによる挙動の変化と関連づけて考慮できる。

Table 3 Dehydration characteristics with flocculants

Type of flocculant	Traditional method	Proposed method
	PAC and Hydrated lime	MA, POK and BK
Type of Slurry	Bentonite Slurry	Bentonite Slurry
Solid content (%)	18.56	20.00
Density (g/cm ³)	1.144	1.142
pH	9.0	8.7
Funnel viscosity (s)	26.3	24
Additive content of flocculant	PAC 3% Hydrated lime 3%	MA :1% BK: 5% POK: 400mg/l
Additive volume of flocculant (ratio to slurry volume)	0.017	0.16
pH of discharged water	11.8	8.35
SS (mg/l)	2.9	21.3

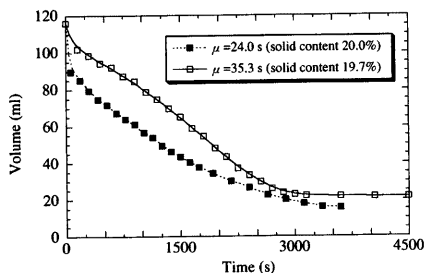


Fig. 5 Dehydration curves with viscosity

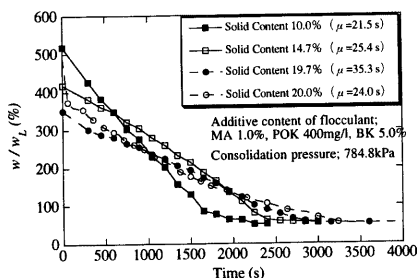


Fig. 6 Dehydration curves of sludge with flocculant

Fig.6はFig.4と5の体積の経時変化を含水比の変化に換算し、 w/w_L を用いて示したものである。体積変化で脱水の程度を表した場合には脱水の程度の推移にばらつきが見られたが、 w/w_L を用いて評価した場合、濃度・粘性が異なる汚泥の w/w_L がほぼ同じ数値に収束している。このことから汚泥の特性が異なる場合においても、 w/w_L で脱水のレベルを評価することにより、脱水の程度が概ね予測できることが分かる。

3.3.3 最大載荷圧による脱水特性の相違

建設汚泥の処理に用いられる脱水機械はその種類により、最大載荷圧や脱水の程度が大きく異なる。そこで、前項で述べた汚泥の種類による脱水特性の相違との関連を検討するため、同じ凝集剤を添加した試料No.2、3、4に対し、最大載荷荷重を784.8kPa、1.26MPa、2.51MPaの3段階に変化させ、脱水試験を行った。

最大載荷荷重の脱水時間に与える影響については大きな相違は確認できなかったが、汚泥の種類、最大載荷荷重の相違により脱水処理土の含水比 w_C に相違が生じた(Fig.7)。そのため、前項の考察をもとに w_C/w_L で脱水の程度を評価するとFig.8のようになり、最大載荷圧と脱水の程度 w_C/w_L に相関が見られた。これより脱水時の最大載荷圧による脱水の程度の変化は w_C/w_L により評価でき、脱水機械の能力から汚泥の脱水の程度 w_C/w_L をおおよそ予測できると言える。

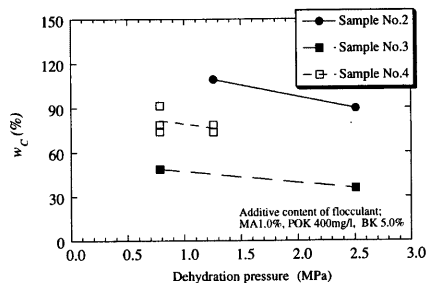


Fig. 7 Relationship between dehydration pressure and water content of dehydrated cake

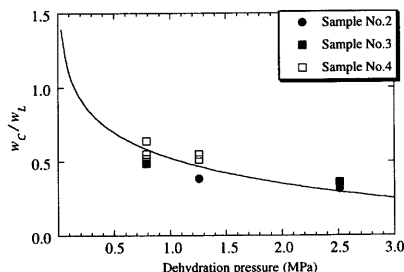


Fig. 8 Relationship between Dehydration pressure and normalized water content of dehydrated cake

4. 建設汚泥の固化処理

4.1 試験の概要

建設汚泥の連続脱水・固化処理過程においては脱水処理・固化処理それぞれに置かれるウエイトにより処理効率が左右される。つまり、固化処理にウエイトを置き、固化処理を行う前の時点の汚泥の含水比を高く設定した時は、脱水に要するエネルギーの軽減、脱水時間の短縮化といったことが期待できる。しかしその一方で、処理土の強度の低下、処理体積の増大といった問題が生じることが予想される。また、逆に脱水処理にウエイトをおいた場合、脱水処理過程への投資の増加・固材材混練り性の悪化が考えられるが、処理土の強度の増加・固材材添加量の削減といったメリットが期待できる。そこで汚泥の含水比による安定処理土の強度特性について検討を行うために室内固化処理試験を行った。さらに、3.での脱水処理試験も併せて、脱水の程度による安定処理時に要する固材材添加量、汚泥の土質工学的性質の相違による影響等について予測・検討を行った。

4.2 使用材料

固材材としては普通ポルトランドセメントを用いた。

Table 4 Physical properties of waste sludge

Sample	1	2	3
Sampling site	Aramoto, Higashiosaka-shi	Aramoto, Higashiosaka-shi	-
Density (g/cm ³)	2.673	2.672	2.689
Consistency			
Liquid limit (%)	72.00	99.72	143.64
Plastic limit (%)	31.90	28.62	-
Grain distribution			
Gravel (<2mm)	0.2	0.0	0.0
Sand (2mm-75 μm)	2.7	0.0	0.0
Silt (75 μm-5 μm)	59.1	33.8	25.0
Clay (5 μm-)	38.0	66.2	75.0
Remark		Bentonite content 5.0% Solid content 20.0%	

一方、試験の対象となる汚泥として、大阪市東荒本の地下約10mから採取された、主にMa12層粘土から構成される建設汚泥を対象土1として用いた。さらに、建設汚泥処理試験で一般的に行われている供試体の配合を参考とし、対象土1を泥水濃度20%、ベントナイト濃度5%、比重1.15程度のベントナイト廃泥水に疑似させた配合に調整したものを対象土2とした。また、3.で用いた試料4を固化処理試験においても対象土3として用いた。それぞれの対象土の土質学的性質をTable 4に示す。

4.3 実験手法

安定処理土の強度の測定は一軸圧縮試験及びフォールコーン貫入試験を用いて行った。

4.3.1 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験に際しては、供試体となる原泥土3種を含水比調整した後、所定の添加量の固化材を混合し、地盤工学会基準「安定処理土の締固めをしない供試体の作製方法 (JSF T 821-1990)」を参考とし、供試体の作製を行った。含水比の調整には、現在適用されている脱水機械から排出される脱水ケーキの含水比を液性限界との比率を考慮し、それぞれの脱水機械によるケーキ含水比と、実験での設定含水比がほぼ対応するように前記のTable 1のように設定した。また安定処理土の耐久性についても検討を行うため、水浸養生したものの及びときほぐしを行ったものについても一軸圧縮試験をおこなった。

4.3.2 フォールコーン貫入試験

脱水ケーキの強度を表す指標として、フォールコーン

ン貫入量 (以下 F_c) を採用されることがある。これは質量60g、先端角60度のコーンを脱水ケーキ表面から自由落下させたときの貫入量 (mm) で表され、現場でも測定が容易であり、室内試験においても一軸圧縮試験に比べて少量の供試体での強度測定が可能である。得られた F_c を以下のような換算式を用いてコーン指数 (以下 q_c) にのよう評価することにした。

$$q_c = \frac{18}{\pi \cdot F_c^2} \quad (1)$$

Fig. 9 に安定処理を行った対象土のフォールコーン貫入試験量と一軸圧縮強さとの関係を示した。フォールコーン貫入試験は、一般に貫入量が小さい場合には信頼性が低くなるとされているが、本研究における測定結果からは、 F_c と一軸圧縮強さ q_u の関係を

$$q_u = 153.5 \cdot F_c^{-1.254} \quad (2)$$

と相関係数0.92で表すことができ、このことから十分な信頼性を有すると判断した。

4.3.3 対象土の含水比調整

固化処理試験に用いる汚泥の含水比を調整する際には、「各種汚泥の脱水性は液性限界によって基準化された含水比の影響を受ける。」という3.で得られた考察を適用した。つまり、各試料の液性限界 w_L とその含水比 w の比率がほぼ一定となるように含水比を調整し、脱水処理との連続性を考慮した。なお、この設定値については、現在適用されている脱水機械から排出される脱水ケーキの含水比を液性限界との比率で表すとおおそTable 1のようになることを考慮し、それぞれの脱水機械による ケーキ含水比と、実験での設定含水比がほぼ対応するように以下のように設定した。

1. $w/w_L = 1.32 \sim 1.38$

(スクリーデカンタ、低能率脱水機械に対応)

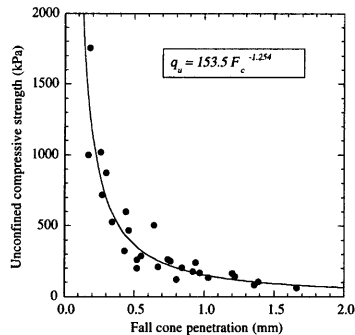


Fig. 9 Relationship between unconfined compressive strength and fall cone penetration of stabilized sludge

2. $w/w_L = 0.97 \sim 1.02$
(ベルトプレス、フィルタープレスに対応)
3. $w/w_L = 0.73 \sim 0.76$
(高圧フィルタープレスに対応)

4.4 安定処理汚泥の強度特性

4.4.1 汚泥の性状と強度特性

上記の要領で含水比調整を行ったすべての対象土について、その土質工学的性質の相違が安定処理時の強度特性へ与える影響について検討を行うため、固化材添加率7%、材令14日までの強度をフォールコン貫入試験により測定した。

Fig.10 に汚泥の含水比と材令時間ごとの換算コーン指数を示した。材令時間と強度の相関は概ね確認できたが、汚泥の含水比と処理土の強度には相関は見られなかった。

Fig.11 に汚泥の含水比を液性限界で基準化した含水比 w/w_L とコーン指数との関係を示した。この場合は w/w_L と強度の間には強い相関が確認できる。

以上の考察から、土のコンシステンシーを考慮することにより、汚泥の種類を問わず強度発現の予測がある程度可能であり、従来の含水比レベルでの予測よりも正確に強度の発現性が推定できると言える。

4.4.2 安定処理土の改良効果の検討

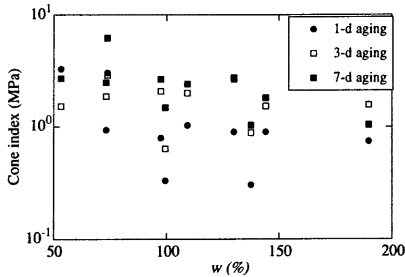


Fig. 10 Relationship between water content and cone index of stabilized sludge

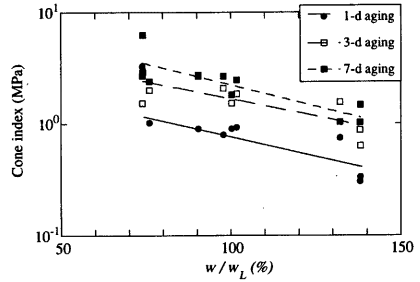


Fig. 11 Relationship between normalized water content and cone index of stabilized sludge

(1) 安定処理土の目標強度

建設汚泥は適切な処理を施すことにより道路盛土、河川堤防、土地造成等に利用でき、この利用用途と品質区分に応じて安定処理土の改良目標品質が定められる。本研究においては、建設省が安定処理汚泥の実事業への適用性の確認の一環として行っている、一般的な道路盛土への適用を想定した試験盛土工事例を参考とし、Table 5 のような処理土の転圧特性を判断基準とする4段階からなる改良品質を目標強度として設定し、考察を行った。

(2) 固化材配合量についての考察

一軸圧縮試験の結果を Table 6 に示す。またこの結果に基づいて脱水レベルによる固化材添加量と強度の関係から、設定強度と固化材添加量の相関を推定したものを Table 7 に示す。この結果から適当な固化材添加量により、十分再利用が可能な安定処理土を得ることが可能であり、固化材添加量自体も連続脱水・固化処理により、従来の処理方法と比較して大幅に低減されていることが確認できる。

Table 5 Required construction condition and in-situ target strength

Case	Required construction condition			In-situ target strength
	Bulldozer		Tired roller	
	Placing/spreading	Rolling compaction	Rolling compaction	Cone Index (kPa)
1	Possible	Possible for 2 times compaction	Impossible	250
2	Possible	Possible	Possible for 1-2 times of compaction	450
3	Possible	Possible	Possible for 2 times of compaction	800
4	Possible	Possible	Possible for 5-7 times of compaction	1600

Table 6 Unconfined compressive strength of stabilized sludge

Additive content (%)	Dehydration level w/w_L	Compressive strength (kPa)		
		1 day	3 days	7 days
5.0	1.38	62.8	140.3	167.8
	0.98	106.0	164.8	239.4
	0.78	176.6	249.2	210.9
7.0	1.38	80.4	120.7	261.9
	0.98	205.0	260.9	468.9
	0.74	323.7	600.4	874.1
10.0	1.38	135.4	287.4	525.8
	0.98	200.1	719.1	1017.3
	0.77	504.2	998.7	1755.0

Pattern 3 : $w/w_L = 0.75$

5.2 処理効率の評価

5.2.1 評価の目的

最適とされる連続脱水・固化処理システムを検討するには、各処理パターンに必要なコスト、エネルギー、所要時間などを詳細にわたって検討する必要があるが、このようなデータを得ることは難しい。従って本研究では、脱水処理に必要なコスト・エネルギーを表す指標 T_d と脱水の程度によるプラントの処理能力の変化を表す指標 S_d を用い、連続処理過程における脱水の程度や汚泥の濃度・粘性が処理効率、および処理に要するエネルギーに与える影響を評価した。

5.2.2 処理効率の評価の手法

(1) 脱水過程において投入されるエネルギーの評価

連続処理過程においては、脱水処理に投入するエネルギーあるいは時間によって処理土の含水比・体積が大きく変化し、またそれに伴い固化材添加量およびプラントの処理効率に影響が生じる。そのため、脱水処理に投入するエネルギーと処理土の脱水レベルの相関を評価することが重要となる。ここでは、以下のような方法で脱水処理過程に要求されるコスト・エネルギーを表す指標として用いた。

- 3.での各種汚泥の脱水試験結果から、同じ載荷過程（最大載荷荷重 784.8kPa）で行っているものを抽出し、脱水過程において汚泥に投入されるエネルギーを処理に要する時間のみの関数と仮定した。
- 汚泥の脱水レベルを $w/w_L = r$ によって表すため、脱水処理試験から得られた汚泥体積の経時変化を示した曲線および汚泥の初期含水比から、各体積時の含水比を算出し、 w/w_L を縦軸に処理時間を横軸にとったグラフを作成した（例 Fig.6）。
- この図から、任意の w/w_L にまでの処理に要する時間を読み、汚泥に投入されたエネルギーの評価を行った。例えば $w/w_L = r$ における処理時間 T_d は前述の

5. 連続脱水・固化処理システムの構築に関する考察

5.1 概要

脱水処理を行った汚泥に固化材を添加し安定処理を施す連続脱水・固化処理システムを想定し、システムの構築に関する検討を行った。実際に建設汚泥をこの方法で処理する場合、前述したように脱水処理・固化処理それぞれのウエイト、汚泥の土質工学的な性状の違いによるプラントの処理効率に影響を検討することが、最適な処理方法を確立する上で重要である。

この検討における基本的な考え方として「汚泥の性状による脱水の特性の変化、および安定処理土の強度発現の変化は、汚泥の含水比を液性限界で標準化した w/w_L を用いることにより評価ができる」という前章までで得られた考察を適用した。これに基づき脱水レベルの変化を w/w_L によって表し、連続脱水・固化処理システムの処理効率や処理土の工学的特性の評価を行った。なお、通常適用されている脱水機械の脱水能力を考慮して、特に以下のような脱水の程度の処理パターンを設定した。

Pattern 1 : $w/w_L = 1.38$

Pattern 2 : $w/w_L = 1.00$

Table 7 In-situ target strength versus required additive content of stabilizer

Case	In-situ target strength q_c (kPa)	Laboratory target strength (In-situ target strength)×2.0)			Required additive content of stabilizer (%)			
		Cone index (kPa)	Unconfined compressive strength (kPa)	$w/w_L = 1.38$	$w/w_L = 1.00$	$w/w_L = 0.75$	Without dehydration treatment	
1	250	500	100	2.8	1.8	2.6	-	
2	450	900	180	5.3	3.9	4.1	12.5	
3	800	1600	320	7.8	5.9	5.5	20.0	
4	1600	3200	640	8.3	7.2	10.9	30.0	

Pattern 1, 2, 3 の場合それぞれ $T_{1.3r}=0.54$ (h), $T_{1.0r}=0.69$ (h), $T_{0.75r}=0.81$ (h) となる。
 このように算出した T_r の逆数として、 Q_r を定義すれば、

$$Q_r = T_r^{-1} \quad (3)$$

となるが、この Q_r (h^{-1}) は任意の脱水レベル $w/w_L=r$ ま
 で脱水を行う場合の単位時間当たりの脱水処理能力指
 標となる。

(2) 処理体積バランスの算定

建設汚泥の処理工程には施工現場から排出される大
 量の廃汚泥に対し、施工の進行に影響を与えない十分
 な処理能力・容量を設定する必要がある。

プラントの処理能力・容量の設定を行う手法として、
 処理体積バランスを算出することにより、原汚泥に対
 して要求される凝集剤添加量、処理土の排出量、固化
 処理プラントの必要容量、固化材添加量等が推定する
 ものがある。処理体積バランスとは、処理の対象とな
 る原汚泥 1 単位体積に対する凝集剤、脱水ケーキおよ
 び排出水の体積・質量の比率のことであり、この数値
 から処理汚泥量に対して必要となる固化処理プラント
 の容量等が決定できる。ここでは脱水ケーキの含水
 比が w_C で与えられる場合の、脱水ケーキおよび余剰
 水の体積・質量を以下のような式により算出した。

$$V_C = \left(1 - \frac{w_0 - w_C}{1 + w_0} \rho_0\right) V_0 \quad (4)$$

$$W_C = (1 + w_C) \frac{1}{1 + w_0} \rho_0 V_0 \quad (5)$$

$$\delta V_w = \frac{w_0 - w_C}{1 + w_0} \rho_0 V_0 + V_F \quad (6)$$

V_C (m^3): 脱水ケーキ体積
 W_C (tf): 脱水ケーキ質量
 δV_w (m^3): 余剰水体積
 V_0 (m^3): 処理を行う汚泥体積
 V_F (m^3): 添加する凝集剤体積
 (本実験では $V_F=0.16 V_0$)
 ρ_0 (t/m^3): 建設汚泥の単位体積質量
 w_0 : 建設汚泥の初期含水比
 w_C : 脱水ケーキの含水比

またこれらから、固化処理の対象となる脱水ケーキ
 (脱水レベル $r=w/w_L$) の体積 V_C とそれに対する原
 汚泥の体積 V_0 の比を用いて

$$S_r = V_0/V_C \times 1(m^3/h) \quad (7)$$

を定義した。この S_r は処理能力 $1m^3/h$ の固化処理プラ
 ントをロスなく稼働させると仮定した場合に可能とな
 る任意の r におけるプラント全体の処理能力を原汚泥
 量で表している。

(3) 処理効率の推定の手法

実際の処理効率の推定には Q_r , S_r を以下のような手
 法で用いた。概要は Fig.12 に示している。

1) 脱水処理プラントの容量を V_i とすると、脱水プラ
 ントの処理能力は

$$V_i/T_r = V_i \cdot Q_r(m^3/h) \quad (8)$$

で与えられる。また固化処理プラントの能力を $V_2 \times$
 $1(m^3/h)$ とすると、プラントで可能となる汚泥の処理
 能力は (7) から $V_2 \cdot S_r(m^3/h)$ と推定できる。

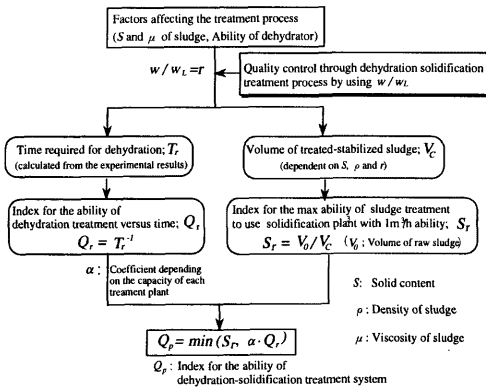


Fig. 12 Outline for the estimation of the ability of dehydration-solidification treatment system

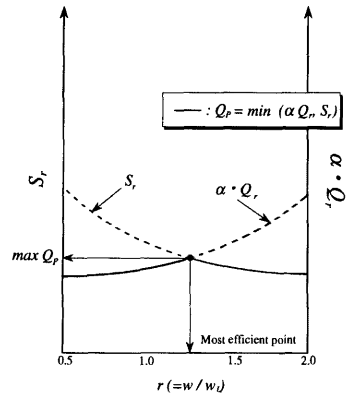


Fig. 13 Concept for the estimation of the most efficient point

2) $\alpha = V_1/V_2$ として、脱水プラントと固化プラントの容量比を定義する。これを用いてプラント全体の処理能力指標 Q_p を

$$Q_p = \min(\alpha \cdot Q_r, S_r) \quad (9)$$

と定義した。ここでは、(7)式から任意の脱水レベル r において固化処理プラントの能力 $1\text{m}^3/\text{h}$ が確保できる場合、プラントで可能な汚泥の処理量 S_r 、あるいは脱水過程において脱水レベル r にまで処理を行う時の処理能力 $\alpha \cdot Q_r$ のどちらかがプラントの処理能力に制限を与えると考えた。よってこの2つの指標のうち小さい方がプラント全体の処理能力 Q_p を与えると仮定した。 S_r 、 $\alpha \cdot Q_r$ はどちらも r の関数であり、 Q_p は様々な脱水レベルに対する処理効率の変化を表す指標であるといえる (Fig.13)。

5.2.3 処理効率に関する考察

(1) 脱水の程度の影響

固化処理試験で用いた濃度 20% の泥水を処理する場合の S_r 、 $\alpha \cdot Q_r$ の値をいくつかの α についてまとめたものが Fig.14 である。

この図から脱水レベルと処理効率との関係について考察すると、脱水レベルが先述の各パターン ($w/w_L = 0.75, 1.00, 1.38$) の場合の S_r はそれぞれ 3.9, 3.2, 2.4 の値を示す。このことは $1\text{m}^3/\text{h}$ の固化処理プラントを稼働させた場合、プラント全体ではそれぞれ $3.9\text{ m}^3/\text{h}$, $3.2\text{ m}^3/\text{h}$, $2.4\text{ m}^3/\text{h}$ の汚泥処理が可能であることを示す。このことは固化処理施設の能力に制限があるとき、

$r=1.38$ の時を基準とすると脱水レベル r を上げることにより、プラント全体の処理能力が

$$3.9/2.4=1.63 \quad (r=0.75)$$

$$3.2/2.4=1.33 \quad (r=1.00)$$

倍になることを示している。

Q_r ($\alpha=1.0$) に着目すると、各処理パターンにおいてそれぞれ 1.2, 1.5, 1.9 の値をとる。これは脱水処理能力に制限がある場合、 $r=0.75$ の時を基準として脱水時の含水比を低下させると、それぞれ

$$1.9/1.2=1.58 \quad (r=1.38)$$

$$1.5/1.2=1.25 \quad (r=1.00)$$

倍の汚泥の処理能力を確保できることを示す。

また、減量化を目的として脱水の程度を $w/w_L=1.25$ から $w/w_L=0.8$ にまで高めなければならないとすると、処理効率が最適となる α は 1.5 から 3.0 となり、脱水機械の容量を固化処理プラントの容量比で 2 倍にする必要があると算定できる。

また Fig.14 から連続脱水・固化処理システムにおいて、用いる脱水機械からその脱水レベル w/w_L が予測できると、最適処理効率を実現するにはどの程度の α を適用するか、すなわち脱水処理プラントと固化処理プラントの容量の比率の設定をどの程度にすればよいのかを推定することも可能である。

(2) 汚泥の性状の影響

本項では、 Q_r および S_r を用いて、汚泥の性状が処理過程に与える影響を行う。

まず、汚泥の濃度と処理効率の変化を考察するため、(9)式で $\alpha=3.0$ と設定した場合の αQ_r と S_r を、各汚泥濃度に対して Fig.15 に示した。

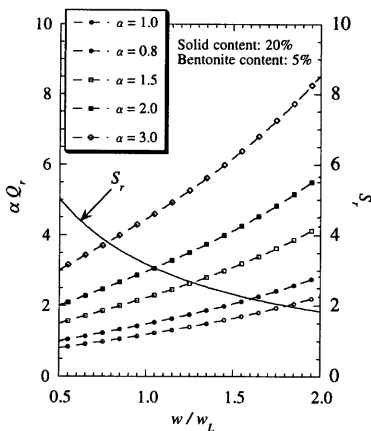


Fig. 14 Effect of the coefficient α on the treatment efficiency

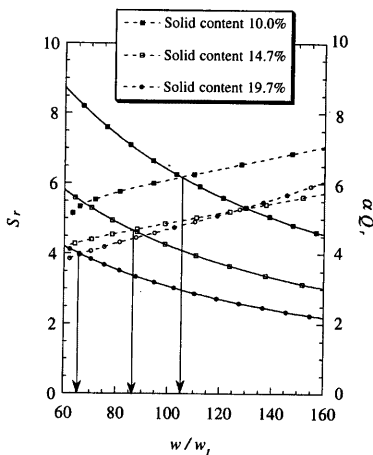


Fig. 15 Effect of the solid content of the sludge on the treatment efficiency

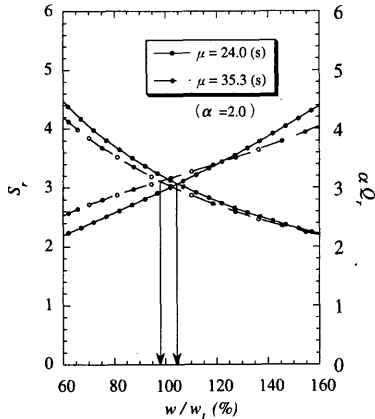


Fig. 16 Effect of the viscosity of the sludge on the treatment efficiency

この図から最適処理効率を達成するには、濃度が高くなるにつれ脱水レベルを上げる必要があることがわか

る。例えば濃度がそれぞれ 10, 15, 20% の場合、 $w/w_L=1.10, 0.85, 0.65$ で脱水を行う時が最適効率である。また、その場合の指標の値はそれぞれ 6.2, 4.5, 4.0 となり、固化処理プラント $1\text{ m}^3/\text{h}$ に対するプラントの処理量自体も低下する。

次に汚泥の粘性による Q_r と S_r を先ほどの場合と同様に Fig.16 に示した。

濃度による比較と比べ、粘性による比較時において処理効率に対する影響はほとんど見られない。この理由としては、土粒子分布や土粒子分の親水性、汚泥への増粘剤の添加の有無といった粘性に起因する汚泥の性状が汚泥の含水比を液性限界で標準化することによりほぼ表されていると考えられる。よって汚泥の粘性と液性限界には強い相関があると考えられる。

5.3 実際への適用の想定例

5.2, 5.3 で行った汚泥の処理効率、および安定処理土の品質の考察結果から、建設汚泥の最適処理方式を具体的に示すため、3.における試料 No.3 と同じ汚泥を毎時間 10 m^3 処理することが要求された場合、最適処理効

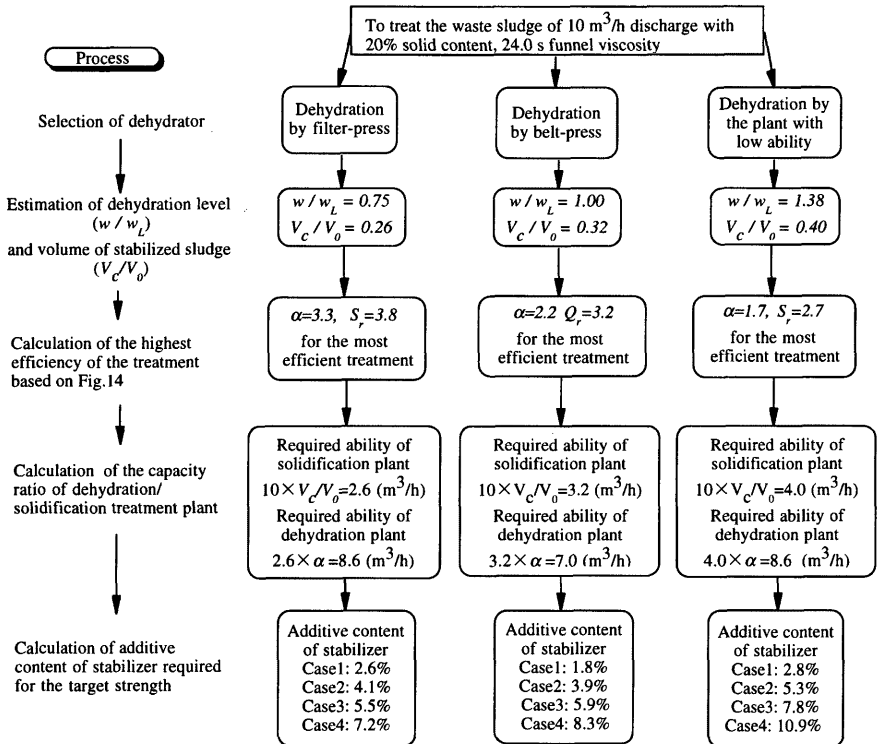


Fig. 17 Outline for the estimation of the most efficient treatment

率となる処理プラントの容量設定、目標強度による固化材添加量の相違等について、用いる脱水機械毎にまとめたものを Fig.17 に示す。

この Fig.17 は、処理の対象となる建設汚泥の性状・使用脱水機械の能力から、おおよその脱水処理レベルが推測できる。また、そのときに最適処理効率を与える固化処理能力、および固化材添加量を推測するフローを示したものである。

6. 結論

本研究では、建設汚泥の効率的な再資源化を行う手法の確立を目的として、脱水、固化それぞれの室内試験の結果から連続脱水・固化処理システムを想定し、その処理効果についての検討を行った。得られた結論を以下に要約する。

- 1) 汚泥の脱水処理過程における汚泥の粘性濃度（含水比）による脱水特性への影響が確認できた。汚泥の濃度により脱水に要する時間が、また汚泥の粘性により脱水の程度（処理土の含水比）が決定される。また液性限界で基準化した含水比を用いることにより、載荷圧に対しておおよその脱水の程度を予測できた。
- 2) 各種汚泥を固化処理した場合の発現強度は、固化材混合前の含水比よりも、液性限界で基準化した含水比に対して強い相関を持っている。また 2. の成果と合わせ、連続脱水・固化処理過程においては汚泥の含水比を液性限界で基準化し管理することが適切であると考えられる。
- 3) 固化処理試験の結果から、各種脱水機械の脱水の程度に応じた処理パターンを設定し、その影響を検討したところ、道路盛土に必要とされる程度の固化処理強度はどの処理パターンにおいても適当な固化材添加量で得ることができた。また、高い品質を目的として改良を行った場合、脱水の程度により固化材の減量化が期待できる。
- 4) 連続脱水・固化処理システムの処理効率の評価により、汚泥の濃度が処理効率および最適効率を実現する脱水の程度に大きな影響をおよぼすことが

明らかとなった。一方、汚泥の粘性が処理効果に与える影響については、 w/w_0 を脱水の程度として用いることによりほぼ表すことができた。

今後の課題としては室内試験の結果と現場条件との整合性、長期的な安定処理土の強度特性や環境影響評価、コスト面での適用可能性などを十分に検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 勝見 武・山田 優・小川伸吉・神谷光彦 (1997) : 発生土および廃棄物の地盤工学的処理と有効利用, 4. 発生土の地盤工学的処理と有効利用 (その 1), 土と基礎, Vol.45, No.1, pp.55-60.
- 嘉門雅史・勝見 武・今西秀公 (1993) : 建設汚泥の処理と有効利用, 京都大学防災研究所年報, 第 36 号 B-2, pp.37-51.
- 建設省土木研究所 (1996) : 建設汚泥再生利用技術暫定マニュアル (案) .
- 建設省 (1992) : 建設汚泥の高効率・低含水比型脱水機械・工法の開発, 建技評第 91301 号.
- 建設省 (1992) : 建設汚泥の高効率・低含水比型脱水機械・工法の開発, 建技評第 91303 号.
- 小林 勲・今野昭三・岩崎光美 (1983) : 建設工事における濁水・泥水の処理工法, 鹿島出版会.
- Kawachi, T., Katsumi, T., Tran Duc P. O. and Yamada, M. (1996): Treatment and utilization of waste sludge/slurry from construction works in Japan, Environmental Geotechnics, Kamon (ed.), pp.767-772.

謝辞

本研究の遂行にあたりご助力を賜りました京都大学防災研究所 清水博樹技官、京都大学大学院 渡辺 拓氏、ならびに三星化学合資会社、株式会社三央、滋賀県琵琶湖流域下水道道西浄化センター、五洋建設株式会社の関係各位に深謝いたします。

Dehydration-Solidification Treatment System of Waste Slurry from Construction Works

Masashi KAMON, Takeshi KATSUMI and Toru INUI*

* Graduate School of Engineering, Kyoto University

Synopsis

Recently, utilization of the waste sludge from construction sites is strongly required, because a large amount of the sludge with high water content is produced, most of the sludge are merely disposed of as waste in the landfill site and some of them are even illegally dumped. Two major present methods are generally applied for the sludge treatment, namely dehydration and solidification, however these methods possess technical and economical limitations. In this paper we propose the continuous dehydration-solidification treatment system as effective treatment method to utilize the sludge materials. Dehydration characteristics of the sludge are experimentally evaluated, and the effect of the flocculants is examined. As the dehydration level can be expressed in relation to w/w_L (the dehydrated water content normalized by the liquid limit) regardless of other properties of the sludge, solidified properties of the sludge stabilized by cement after dehydration treatment are experimentally assessed and normalized by the index of w/w_L . According to these experimental results, we examine the efficiency of this system by using two indexes. In conclusion, the application of the sludge treated by the proposed method as earthen materials is reviewed in relation to the treatment level.

Keywords: waste sludge, dehydration-solidification treatment system, consistency, efficiency of the system