

建設汚泥の効率的な脱水技術 — ヒートポンプ式真空脱水技術の適用 —

Efficient Dehydration System for Sludge from Construction Site — Application of Vacuum Dehydration System with Heat Pump —

石井 健嗣 吉迫 和生 間宮 尚¹⁾

要 約

建設工事に伴って発生する建設汚泥の量は多く、建設現場においては、処理費用削減や環境負荷低減の観点から、その処分量を低減するために様々な脱水技術が適用されている。しかしながら、土砂中の水分を力学的に絞り出す既往の技術、例えば高圧フィルタープレスにおいては、ポリ塩化アルミニウムなどの凝集剤を添加した上で、含水比を40%程度まで低減させることが限界であった。そこで、筆者らは、熱エネルギーを効率的に利用することによって、凝集剤を加えることなく、大幅な含水比の低下が期待できる「ヒートポンプ式真空脱水技術」に着目し、その脱水能力を評価するための実験を実施した。その結果、既往の脱水技術を上回る脱水能力を省エネルギーで達成できることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 建設汚泥をめぐる状況
- III. 脱水技術の概要
- IV. 真空脱水実験の概要
- V. 真空脱水実験の結果
- VI. おわりに

I. はじめに

建設汚泥とは、建設工事に伴って排出されるもののうち、含水比が高く粒子が微細で標準仕様ダンプに山積みができず、その上を人が歩けない状態のものである。この状態を土の強度指標で表すと、コーン指数が概ね 200kN/m² 以下、または一軸圧縮強さが概ね 50kN/m² 以下となる¹⁾。

建設汚泥の最終処分量を削減することは、環境負荷低減に向けた喫緊の社会的な課題である。また、建設汚泥の処理費用は、中間処理業者毎に単位体積、若しくは単位重量当たりの単価として設定されているため、搬出業者側の視点に立てば、搬出量を低減させることによる処理費用削減の効果は大きい。

建設汚泥の発生量を低減するためには、汚泥中の水分を取り除き、汚泥全体の減容・減量化を図る必要がある。しかしながら、一般的な脱水技術であるフィルタープレスでは、建設汚泥の含水比を40～80%程度（土質性状による）まで低下させることが限界²⁾であるため、より高い脱水能力を保持し、建設汚泥の発生量を低減可能な技術が必要とされている。

ここで、本報では、熱エネルギーを効率的に利用することによって、大幅な含水比の低下が期待される「ヒートポンプ式真空脱水技術」に着目し、その脱水能力およびランニングコストなどについて検討した結果を報告する。

II. 建設汚泥をめぐる状況

1. 建設汚泥の処分量

Table 1 に平成 24 年度に国土交通省が実施した建設廃棄物の実態調査の結果³⁾を示す。建設汚泥の排出量はアスファルト・コンクリート塊、コンクリート塊に次いで3番目に多く、再資源化率は68.8%と全品目の中で最も低い水準である。なお、我が国は世界でも有数の産業廃棄物の海洋投棄国であり⁴⁾、建設汚泥の最終処分量の内訳には、埋立て処理のほか海洋投棄も含まれている。以上の背景から、建設汚泥の再資源化を促進し、最終処分量を削減するための取組み⁵⁾が積極的に行われている。

Table 1 建設廃棄物の実態調査結果（文献3）より抜粋）
(Survey of Construction Wastes)

品 目	排出量	再資源化量	縮減量	最終処分量	再資源化率
	万トン	万トン	万トン	万トン	%
アスファルト・コンクリート塊	2,577	2,564	0	13	99.5
コンクリート塊	3,092	3,072	0	20	99.3
建設汚泥	657	452	107	98	68.8
建設混合廃棄物	280	160	2	117	-
建設発生木材	500	446	26	28	89.2
その他(廃プラスチック、紙くず等)	164	138	12	14	94.0

1) 環境本部 Environmental Engineering Division

キーワード : 建設汚泥, 含水比, 減容化, 減量化, 真空脱水, ヒートポンプ

Keywords : sludge from construction site, volume reduction, mass reduction, heat pump

2. 建設汚泥の処理費用

中間処理業者は、建設汚泥の処理費用として 12,000～15,000 円/m³（運搬費除く）を標準価格としているが、現在の価格は、処理業者同士の価格競争によって、大幅に低下している。そのため、建設汚泥以外の廃棄物処理や、建設汚泥の再生利用（例えば、流動化処理土）の販売による利益から、建設汚泥処理の損失分を補填している。その結果、再生利用向けに保管された建設汚泥が産業廃棄物の放置状態と見なされ、行政指導を受ける事例が全国的に散見されている⁶⁾。

3. 建設汚泥の再生利用上の問題点

建設汚泥処理土の再生利用上の問題点は、下記のとおりである⁷⁾。

- ・建設発生土と再生利用材が用途上で競合する
- ・再生利用方策が煩雑・不明確である
- ・再生利用を促進する制度が十分に確立されていない
- ・再生利用に消極的な環境部局関係者が多い

上記を踏まえて、建設汚泥の再生利用を促進するためには、建設汚泥処理土の需要先として期待される公共工事での率先的な利用を図っていくことが必要不可欠であるとの考えのもと、平成 18 年の国土交通省の通知⁸⁾において、「建設発生土と一体となった工事間利用調整」と「リサイクル原則化ルールの導入」が義務付けられた。

4. 総括

建設汚泥に関する最も重要な課題は、最終処分量の削減である。建設汚泥を生み出す側（施工会社など）としては、処理費用や再生利用上の問題点など、特定機関（国や地方公共団体など）を対象とした課題に対する動向に注意を払いつつ、発生量の抑制技術や再利用用途の開発など、工法的な技術開発に積極的に取り組む必要がある。

Ⅲ. 脱水技術の概要

1. 既往技術

代表的な脱水技術としては、フィルタープレス（Photo 1 参照）が挙げられる。フィルタープレスは、フィルター中に汚泥などのスラリーを加圧圧入することによって、スラリー中の水分を絞り出す技術である。本技術は、力学的な作用によって土砂中の水分を取り除くため、土粒子間の空隙にある結合水（土粒子同士を結びつける水）までを取り除くことは困難であり、達成含水比は 40～80%程度までが限界⁹⁾である。また、脱水を効率的に実施するために、スラリー中にポリ塩化アルミニウムなどの凝集剤を添加した場合、排水処理の必要性が生じてしまう。



Photo 1 フィルタープレス
(Filter Press)

その他の脱水技術としては、スクリュープレス⁹⁾（Photo 2 参照）が挙げられる。本技術は、外筒スクリーン内にスクリュープ軸が設けられ、そのスクリュープ軸の回転によって汚泥を圧搾し脱水する原理の装置であるが、その処理量は少なく、脱水量もフィルタープレスと同等以下である。

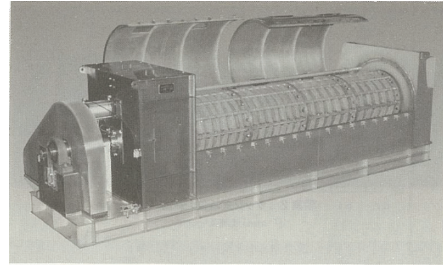
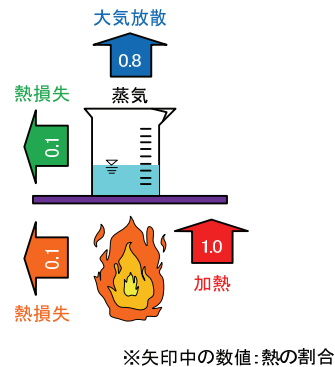


Photo 2 スクリュープレス⁹⁾
(Screw Press)

2. ヒートポンプ式真空脱水技術

既往の脱水技術を上回る脱水量を達成するためには、熱的な作用によって土砂中の水分を蒸発させることが有効である。最も簡単な手法として、天日干しが挙げられるが、天候に左右されるなどの問題から、脱水速度の制御が困難である。また、ボイラーなどによって、直接若しくは間接的に土砂を加熱する方法（Fig.1 参照）も有効であるが、水を蒸気に相変化させた際に使用した熱エネルギーを大気中に捨てることになるため、この蒸気を回収し、加熱側に再度供給することによって、エネルギー効率の改善を図る必要がある。



※矢印中の数値:熱の割合

Fig.1 加熱脱水の課題
(Problem of Dehydration by Heating)

そこで、高いエネルギー効率で脱水を行う方法として、冷温水同時作製型のヒートポンプをベースにした「ヒートポンプ式真空脱水技術」を考案した（Fig.2 参照）。本装置の主要な構成機器は、被脱水物（土砂）を投入し、蒸発を行うための蒸発器（Fig.2 の①）、蒸発した水蒸気を回収し凝縮させるための凝縮器（同②）、および蒸発器と凝縮器に循環させる温水と冷水を作製するためのヒートポンプ（同③）である。

脱水の流れとしては、まず、蒸発器の加熱、および凝縮器の冷却を行うために温水と冷水をそれぞれに循環させる。その後、蒸発器内に被脱水物（土砂）を投入し、真空ポンプを用いて蒸発器と凝縮

器内を減圧する。これによって、温水の温度が 100℃以下においても、土砂に供給された蒸発熱に応じた水分が蒸発する。なお、蒸発した水蒸気は、冷却された凝縮器内で凝縮し水に戻るが、この際の凝縮熱を冷水から回収し、ヒートポンプ内での温水と冷水の作製に再利用するため、熱エネルギーを効率的に利用できる。

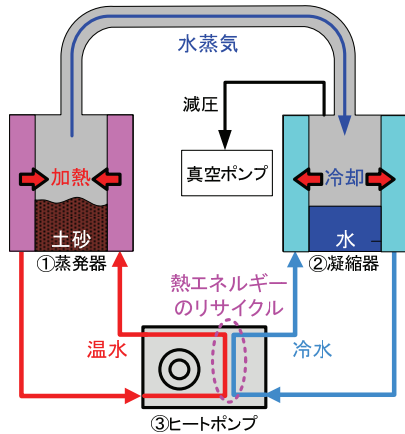


Fig.2 ヒートポンプ式真空脱水技術の概要
(Vacuum Dehydration System with Heat Pump)

3. ヒートポンプ式真空脱水技術の展開イメージ

建設現場へのヒートポンプ式真空脱水技術の展開イメージについて、シールドトンネル工事を例に述べる (Fig.3 参照)。

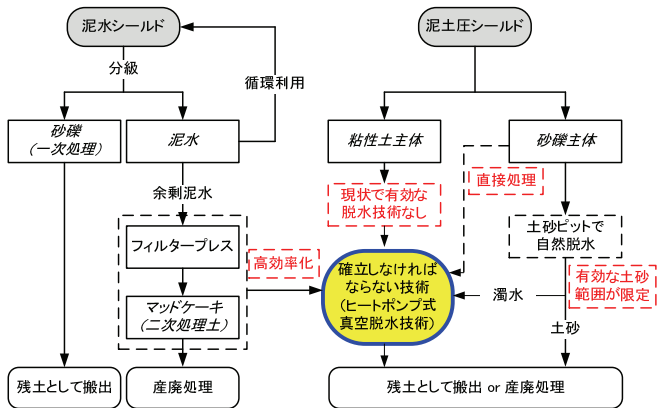


Fig.3 シールド工事への展開イメージ
(Development Image for Shield Construction)

シールドトンネルは、その掘進距離や掘削地山の性状などによって、泥水シールドと泥土圧シールドに区分される。

泥水シールドは、シールドマシンで掘削する部分に泥水を加圧することで切羽の安定を図る工法である。掘削した土砂は、泥水とともに配管を通して地上に搬送し、土砂と泥水を分離し再利用する。本工法では、余剰泥水をフィルタープレスで脱水処理し、場外搬出を行うが、脱水量に限界があることや、添加剤を用いた場合は排水処理が必要となることから、余剰泥水処理に効率化の余地がある。そのためフィルタープレスの代替技術として、ヒートポンプ式真空脱水技術の適用が期待される。

一方、泥土圧シールドは、カッターで掘削した土砂に加泥材を添加し泥土状に改質し、その泥土圧によって切羽の安定性を確保しながら掘進しつつ、掘削土の地上搬送を行う工法である。泥土圧シールドの場合、現状、粘性土主体の掘削土砂に対する有効な脱水技術は存在せず、また、掘削土砂が砂礫主体の場合でも、加泥材混じりの土砂を脱水することは容易ではなく、泥水シールドと同様にヒートポンプ式真空脱水技術による脱水処理の適用が期待できる。

IV. 真空脱水実験の概要

1. 脱水実験装置

脱水実験装置の外観を Photo 3 に示す。蒸発器と凝縮器は二重管構造とし、温水と冷水は外側の管内を循環させた。蒸発器 (土砂最大投入量 100L) は、投入した土砂が伝熱面に効率良く接触するように、揺動式の横置き型とし、内部には奥行方向に計 27 枚のフィンを設置した。凝縮器 (容量 40L) は、凝縮水の水量管理、および排水が容易に実施できるように、縦置き型とした。ヒートポンプは 20～90℃の循環水を作製可能なタイプを使用した。

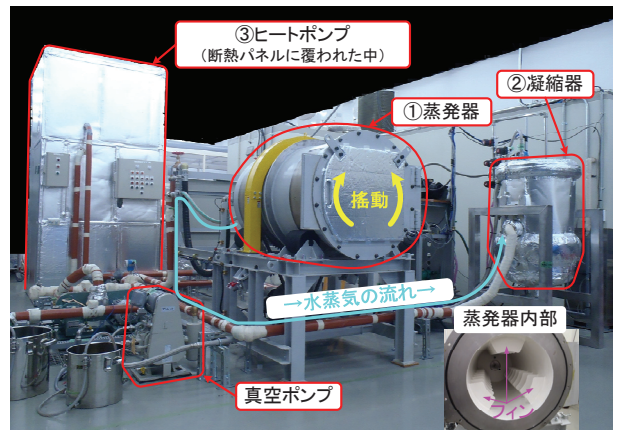


Photo 3 脱水実験装置の外観
(Exterior of Dehydration Experimental Device)

2. 実験試料

実験試料には、前述した泥水シールド工事における余剰泥水処理と泥土圧シールド工事における掘削土 (粘性土主体) の脱水処理を想定して、泥水と泥状土を使用した。泥水 (含水比 $w=192.7\%$) は、湿潤密度 $\rho_w=1.3g/cm^3$ 、ブリーディング率が 1.0%以下となるように笠岡粘土とベントナイト、水を混合し作製した。泥状土は、開削現場より採取した現地発生土 (含水比 $w=108.5\%$) を使用した。各試料の状態と物理特性を Photo 4 と Table 2 にそれぞれ示す。



Photo 4 実験試料の状態 (左: 泥水, 右: 泥状土)
(State of Experiment Samples (Left: Slurry, Right: Mud))

Table 2 実験試料の物理特性
(Physical Characteristics of Experiment Samples)

		単位	泥水 (笠岡粘土+ベントナイト+水)	泥状土
一般	土粒子密度 ρ_d	g/m ³	2.685	2.611
	含水比 w	%	192.7	108.5
粒度	石分 (75mm以上)	%	0	0
	礫分 (2~75mm)	%	0	0.7
	砂分 (0.075~2mm)	%	0.6	13.4
	シルト分 (0.05~0.075mm)	%	27.3	53
	粘土分 (0.05mm未満)	%	72.1	32.9
	最大粒径	mm	0.425	4.75
	細粒分含有率	%	99.4	85.9
コンシステンス特性	液性限界 w_L	%	71.8	106.8
	塑性限界 w_p	%	21.2	39.8
	塑性指数 I_p		50.6	67.0
分類	地盤材料の分類名		粘土 (高液性限界)	砂混じり粘土 (高液性限界)
	分類記号		(CH)	(CH-S)
備考			室内で作製	現場発生土

3. 実験ケース

Table 3 に実験ケースを示す。CASE1, 2 は泥水を対象とした場合であり、蒸発器内への投入量を CASE1 で 40L, CASE2 では 100L (蒸発器内への最大投入量) とした。一方, CASE3, 4 は泥状土を対象とし、蒸発器内への投入量は、CASE3 で 37kg, CASE4 では 91kg とした。なお、実験結果を比較するために、CASE1 と CASE3, CASE2 と CASE4 の乾燥土量 (重量) をそれぞれ同じ値とした。

Table 3 実験ケース
(Cases of Dehydration Experiment)

ケース名	試料	含水比	投入量(湿潤土量)		乾燥土量	備考
		%	L	kg	kg	
CASE1	泥水	192.7	40	52	18	100Lは蒸発器内への最大投入量に相当
CASE2	泥水	192.7	100	130	44	
CASE3	泥状土	108.5	—	37	18	CASE1(泥水40L)と乾燥土量が同じ
CASE4	泥状土	108.5	—	91	44	CASE2(泥水100L)と乾燥土量が同じ

V. 真空脱水実験の結果

1. 脱水能力の確認

脱水に伴う含水比の変化、および実験終了後の試料の状態を Fig.4 と Photo 5 に示す。Fig.4 から、泥水および泥状土ともに、その投入量に関わらず、含水比を 40%以下まで低減できている。このことから、「ヒートポンプ式真空脱水技術」は、既往の脱水技術を上回る脱水量を達成可能であることが確認できる。次に、脱水速度 (Fig.4 の各グラフの勾配) に着目すると、泥水の場合 (CASE1 と CASE2) では、含水比 50%付近 (経過時間 8 時間) 以降において脱水速度の低下が確認できる。この原因としては、脱水後の試料が直径 10~20cm 程度に大きく団粒化したこと (Photo 5 の CASE1 と CASE2 参照) によって、団粒物内部への伝熱が阻害され脱水が遅延したためと考える。また、泥水の場合と比較して、泥状土の脱水速度が遅い理由としては、泥状土と蒸発器部の伝熱面との接触面積が小さく、泥状土内の水分に対して、熱エネルギーが効率的に付与されなかったためと考えられる。

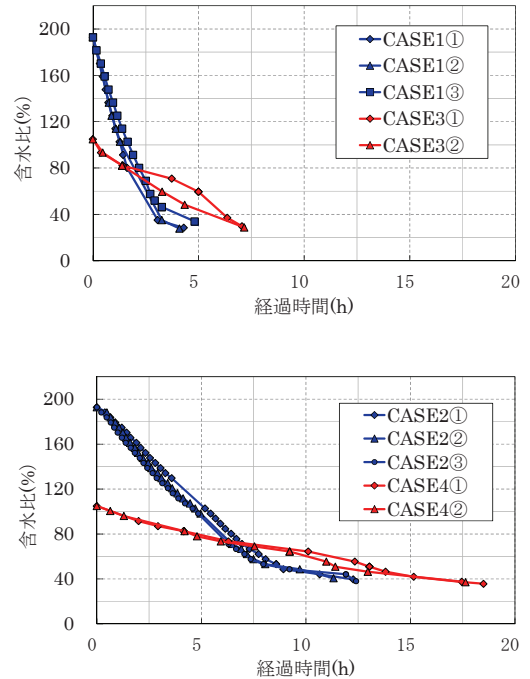


Fig.4 脱水に伴う含水比の変化
(上: CASE1 と CASE3, 下: CASE2 と CASE4)
(Variations of Water Content with Dehydration (Upper Fig.:CASE1 and CASE3, Lower Fig.: CASE2 and CASE4))

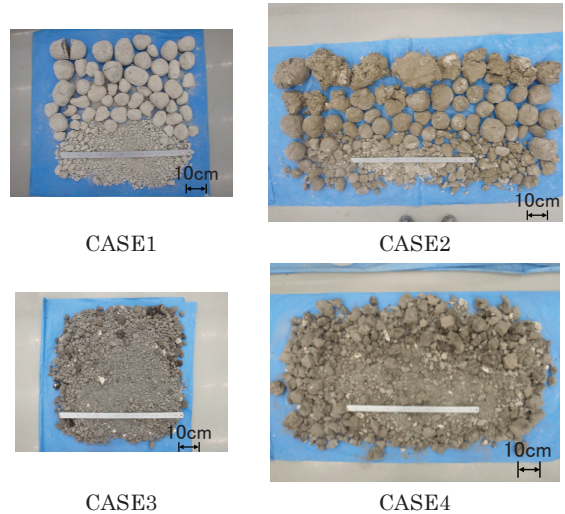


Photo 5 脱水後の試料の状態
(State of Experiment Samples after Dehydration)

2. ランニングコストの確認

前述の実験結果から得た脱水量と実験中に測定したヒートポンプの消費電力量から、実験装置を用いた場合におけるヒートポンプ式真空脱水技術のランニングコストを試算した。

(1) 泥水の場合

泥水シールドにおける余剰泥水処理を想定し、実工事に基づいて以下の条件を仮定した。なお、比較対象として、中圧フィルタープレスのランニングコストも試算した。

(a) 掘削対象地山

粘性土地盤で細粒分含有率 $F_c=95\%$ 、含水比 $w=58\%$ 、湿潤密度 $\rho_t=1.65\text{g/cm}^3$ と仮定した。

(b) 余剰泥水の発生量

発生量を $201\text{m}^3/\text{日}$ として、含水比は $w=267\%$ と仮定した。

(c) 装置の運転費（電気料金）

ヒートポンプ式真空脱水技術の運転費は、前述の CASE1 の実験中に計測したヒートポンプの消費電力量を基に算出した。また、中圧フィルタープレスの運転費は、泥水シールド現場で測定した消費電力量を基に算出した。

(d) 搬出処分費

首都圏の工事現場から中間処分業者へ支払う一般的な金額を参考として、建設汚泥 1t あたり $8,000$ 円（運搬費含む）と仮定した。

(e) 達成含水比

ヒートポンプ式真空脱水技術の達成含水比は、前述の実験結果で確認した $w=30\%$ (Fig.4 上図参照)、中圧フィルタープレスの場合は、現場実績を基に $w=80\%$ と仮定した。

(f) 試算結果

Fig.5 に試算結果を示す。Fig.5 から、処理土を建設汚泥として処理した場合、ヒートポンプ式真空脱水技術のランニングコストは、中圧フィルタープレスとほぼ同じ値となった。また、ヒートポンプ式真空脱水技術は中圧フィルタープレス以上の脱水が可能であるため、最終処分土量が 28% 削減 ($118\text{t}\rightarrow 85\text{t}$) できることがわかった。

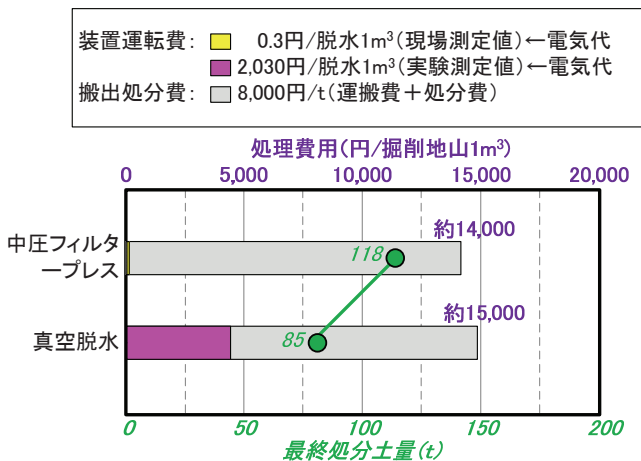


Fig.5 ランニングコストの試算（泥水の場合）
(Trial Calculation of Cycle Cost (Case of Slurry))

(2) 泥状土の場合

泥土圧シールドにおける掘削土処理を想定し、実工事に基づいて以下の条件を仮定した。泥土圧シールドの場合では、現状、粘性土主体の掘削土砂に対する有効な脱水技術は存在せず、セメント等の添加による改質が行われているため、比較対象をセメントによる改質

とした。

(a) 掘削対象地山

泥土の場合と同様、粘性土地盤で細粒分含有率 $F_c=95\%$ 、含水比 $w=58\%$ 、湿潤密度 $\rho_t=1.65\text{g/cm}^3$ と仮定した。

(b) 泥状土の発生量

外径 2.4m のシールドマシンで 1 日あたり 15m の掘進を想定した。また、掘削中における加泥材の添加率を掘削地山 1m^3 あたり 10% と仮定した。

(c) 装置の運転費（電気料金）

ヒートポンプ式真空脱水技術の運転費は、前述の CASE3 で計測したヒートポンプの消費電力量を基に算出した。また、セメントの価格は、 $10,000$ 円/t と仮定した。

(d) 達成含水比

ヒートポンプ式真空脱水技術の達成含水比は、泥水の場合と同様、 $w=30\%$ と仮定した。一方、セメント添加の場合では、脱水処理を行わないため、含水比は $w=58\%$ のままとした。

(e) 試算結果

Fig.6 に試算結果を示す。Fig.6 から、処理土を建設汚泥として処理した場合、ヒートポンプ式真空脱水技術の処理費用は、セメント改質による処理費用よりも安くなる。また、セメント改質と比較して、最終処分土量は 24% 削減 ($120\text{t}\rightarrow 91\text{t}$) できることがわかった。

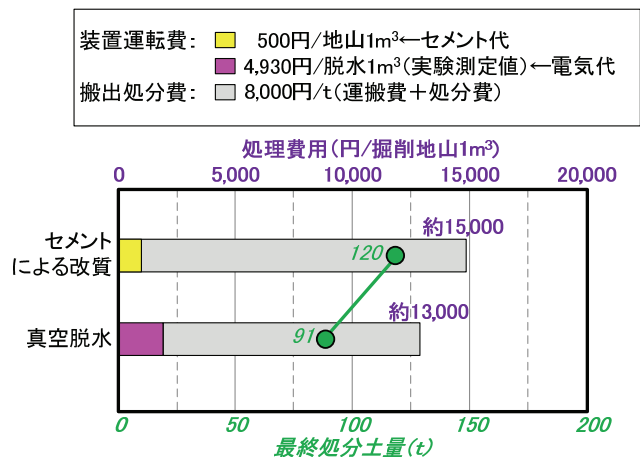


Fig.6 ランニングコストの試算（泥状土の場合）
(Trial Calculation of Cycle Cost (Case of Mud))

3. 脱水装置の高性能化に向けて

Table 4 に前述の泥水を対象とした脱水実験における熱量の内訳（全データの平均値）を示す。Table 4 に示す全熱量は、水の蒸発に必要な熱量を $2,400\text{kJ/kg}$ として、脱水量から算出した。また、蒸発器と配管からの熱損失は、シュテファン=ボルツマンの法則に基づき算出した熱伝達率と蒸発器、および配管温度と大気温度との温度差を用いて算出した。

Table 4 から、使用した実験装置では、ヒートポンプで作製した全熱量のうち、約 6 割が水の蒸発に使用されずに損失していることがわかる。この原因は、脱水装置の放熱対策が十分でなかったことや、配管長が長過ぎたことなどが考えられるため、これらの改善を行うことによって、本装置の更なる効率化が可能と考える。

Table 4 熱量の内訳 (泥水実験の場合)
(Details of Calorie (Case of Muddy water))

実験ケース	泥水量	熱 量					
		全熱量	割 合				
			水の 蒸発熱	熱損失			
				蒸発器	配管	その他	合計
L	MJ	%	%	%	%	%	
CASE1	40	188	36	25	3	35	63
CASE2	100	485	38	26	5	31	62

また、熱損失対策に加えて、ヒートポンプ式真空脱水装置の脱水効率を向上させるためには、式(1)で示される伝熱量 Q を増加させることが重要となる。

$$Q = h \times A \times \Delta T \quad (1)$$

ここに、

Q : 伝熱量(W)

h : 熱伝達率(W/m²・°C)

A : 伝熱面積 (m²)

ΔT : 温度差 (°C)

式(1)から、伝熱量 Q を増加させるためには、蒸発器と凝縮器の伝熱面積 A を増加させることや、蒸発器と被脱水物、および凝縮器と蒸発した水蒸気との温度差 ΔT を大きくすることが効果的だといえる。さらに、蒸発器内に攪拌翼を設置し、被脱水物が伝熱面に効率的に接するような工夫も有効と考えられる。

VI. おわりに

「ヒートポンプ式真空脱水技術」の脱水能力を検討した結果、本技術は、添加剤を加えることなく、既往の技術を上回る脱水量を達成可能であることを確認した。しかしながら、本検討で使用した脱水装置では、作製した熱量の約6割が水の蒸発に使用されていないため、更なる装置の改良が必要であることもわかった。

今後は、蒸発器および凝縮器の伝熱面積を増大させたり、蒸発器内の攪拌翼を改良したりすることによって、ヒートポンプ式真空脱水技術の高度化を図るとともに、シールド工事以外への技術展開についても、検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 環境省;建設廃棄物処理指針(平成22年度版),2003, pp.15-17.
- 2) 港湾・空港等リサイクル推進協議会;港湾・空港等におけるリサイクル技術指針,2004.3, pp.2-25.
- 3) 国土交通省;平成24年度建設副産物実態調査,2012, pp.1-6.
- 4) 環境省;今後の廃棄物の海洋投入処分の在り方について,2003, pp.3-4.
- 5) 国土交通省;建設汚泥に関するガイドライン,2007.
- 6) 一般財団法人泥土リサイクル協会;泥土を適正に処理するための手引書(新規改訂版),2013, p.13.
- 7) 建設リサイクル2006夏号,大成出版社,2006.
- 8) 国土交通省;建設汚泥再生利用指針検討委員会報告書,2005, p.16
- 9) 吉田隆;汚泥の減量化と発生防止技術,(株)エヌ・ティー・エス,2000, pp.43-65.

Efficient Dehydration System for Sludge from Construction Site – Application of Vacuum Dehydration System with Heat Pump –

Kenji Ishii, Kazuo Yoshizako and Takashi Mamiya

Because of much quantity of sludge production from construction sites, various dehydration systems were applied to reduce the disposal quantity from view point of reduction of the disposal cost and environmental burden. However, there was a limitation in reducing water content to 40% with a high pressure filter press which was the typical dehydration system by adding flocculants such as a polyaluminium chloride. Therefore, the authors developed a “Vacuum Dehydration System with Heat Pump” which utilized thermal energy effectively without adding flocculants and carried out experiments to evaluate dehydration ability. As a result, it was confirmed that it could achieve higher dehydration ability than the current technology with energy saving system.