

# 固化材を添加した高含水性土の脱水・固化特性

THE DEHYDRATION AND HARDENING CHARACTERISTICS OF HIGH WATER CONTENT CLAY ADDED BY CEMENT TYPE STABILIZER

小口 深志\*・滝口 健一\*・勝又 正治\*  
by Fukashi OGUCHI, Kenichi TAKIGUCHI  
and Masaharu KATSUMATA

## 1. 緒 言

近年の建設工事は大規模プロジェクトに伴う施工の大規模化、大深度化で特徴付けられ、建設系の発生土の量もこれらの工事量の増加に伴って、年々増加の一途をたどっている。一方で、発生土の処分地は大都市圏において逼迫しているため、特に、泥水工事やヘドロ処理工事等で発生する高含水性の土砂については、その減容化処理と有用土としての利用が切望されている。

最近ではリサイクル法等の制定を受けて、利用土の強度特性等による土質選定基準案がまとめられつつあり、発生土の有効利用の促進に拍車がかげられた。

さて、高含水粘性土はまず減容化の立場から脱水することが望ましい。一般に、脱水ケーキはフィルタプレス等の加圧式脱水によるものが最も低含水となり、形状保持性もあるが、粘性土としての鋭敏性は変わらないため、加水や練り返しにより再び流動性を呈するようになる。このため、脱水ケーキを利用する立場からは、固化処理による強度発現が必要となる。しかし、脱水と固化処理を組み合わせた工程は複雑なものとなり、現場の施工性を考慮した場合、必ずしも適当な方法とはいえない。特に、脱水ケーキを固化処理する場合、均一な改質土を得るためにはケーキの解砕と固化材の混合設備が高価なものとなり、処理効率も低下する(図1上段図)。

そこで、筆者らは脱水ケーキが強度を発現し、再利用が可能となる脱水方法として、脱水と固化の2工程をひとつに凝縮した機械脱水法(以降、固化材添加脱水法と称する)を考案した。これは、高含水粘性土の脱水処理の凝集剤として固化材を使用することにより、固化材に脱水促進と脱水ケーキの固化能との両機能を付加させる方法である。本法であれば新たに脱水ケーキの固化処理を行う必要がなくなり、大幅な能率化とコスト低減が図れる(図1下段図)。

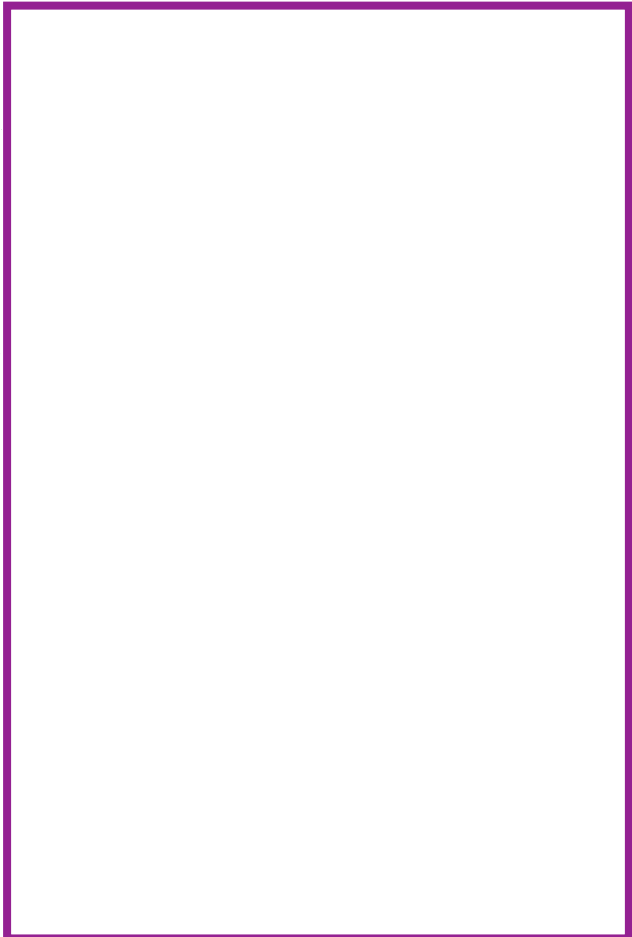
現在、土木工事では、廃棄泥水等の脱水機としてフィルタプレス等の加圧式脱水機がよく用いられている<sup>1)</sup>。固化材添加脱水法の場合、脱水後のケーキはある程度の含水状態であっても固化材による強度発現が期待できるため、筆者らは加圧式脱水よりはケーキ含水率が大きいが高能率な真空式脱水を採用し、現在では実用段階にあ

\*前田建設工業(株)(〒179 東京都練馬区旭町1-39-16)

る<sup>2)</sup>~<sup>3)</sup>。

ところで、通常は無機系や有機系の凝集剤を用いた粘土質スラリーの脱水特性については種々の成書等で述べられている<sup>7)</sup>~<sup>9)</sup>。また、従来より消石灰(Ca(OH)<sub>2</sub>)が無機凝集剤のひとつとして用いられていることから、石灰を主成分とした固化材に凝集機能があることも容易に推定できる。土木の分野でも固化処理土の圧密脱水性<sup>10)</sup>や乾燥特性<sup>11)</sup>が向上することが確認されている。しかし、固化材添加脱水法における脱水特性や脱水ケーキの強度等に関する特性についてはほとんど研究例がなく、脱水ケーキを有効利用していく上でこれらの研究は今後重要性を増してくるものと思われる。

以上の背景をもとに、本報では筆者らによる固化材添加脱水法に関する一連の研究開発のうち、室内での基礎的な実験によって得られた、脱水特性と脱水ケーキの品質特性等について報告する。



量) $W_L$ )をもとに土の含水比調整を行った。すなわち、 $W_L$ に近い比較的低含水の状態を $1W_0$ とし、 $1W_0$ を便宜上以下の式で定義した。

$$1W_0 = W_L + 20 \quad (\%)$$

そして、土の含水比を $1W_0$ 、 $2W_0(1W_0 \times 2)$ 、 $3W_0(1W_0 \times 3)$ という形で調製し、脱水試験に供した。

2.2 固化材および凝集剤

固化材にはセメント固化材、セメント系固化材、石灰、および石灰系固化材を使用し、比較検討の目的で無機凝集剤として硫酸アルミニウムを用いた。これらの化学組成を表2に示す。本実験では固化材等の添加量を乾燥土に対する固化材等の重量添加率(%)で表し、固化材等の添加率は0~24%の範囲で試験した。

表1 土質材料の物性

名称および採取場所	カオリン	木節粘土	ヘントイト、豊順、浅間、#300	泥水シート、余剰泥水、船橋	根切工事、沖積土、五反田	海成、木更津	根切工事、沖積土、王子	珪石粉
略称	KA0	KC	BT	KSS	GC	KH	OC	SP
土粒子の密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.73	2.51	2.64	2.74	2.67	2.71	2.68	2.66
粒 (≥2000 μm) (%)	0	0	0	0	0	0	0	0
度 (75~2000 μm) (%)	0	0	0	3	1	4	2	0
特 (5~75 μm) (%)	53	68	54	66	66	69	77	78
性 (≤5 μm) (%)	47	32	46	31	33	27	21	22
コンス 液性限界: $w_L$ (%)	51	73	370	88	100	55	58	22
テソ 塑性限界: $w_p$ (%)	28	39	45	53	55	32	35	NP*2
特性 塑性指数: $I_p$ (%)	23	34	325	35	45	23	23	-
自然含水比: $w_n$ (%)	-	-	-	218	-	133	75	-
強熱減量 (%)	3.7	14.1	5.5	6.6	9.3	8.7	5.9	2.1
pH *1	7.6	6.1	9.6	7.9	9.2	7.5	8.2	6.5
陽イオン交換容量: CEC (me/100g)	7.2	31.9	91.6	25.8	32.3	25.6	23.2	2.6

\*1 土質工学会基準 (JSF T 211-1990) に基づく pH測定法による pH値  
\*2 塑性がなく測定不能

表2 固化材の化学組成

種別	名称	略称	化学組成 (%)					
			SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
石灰	生石灰	L	-	-	-	≥93	-	-
	消石灰	LH	-	-	-	≥73	-	-
石灰系	ロ-ム質土用	NL55	18	7	-	68	3	-
セメント	普通ポルトランド	NP	22	5	3	64	2	2
セメント系	ロ-ム質土用	SF12	14	3	2	67	1	11
	高含水土用	SF20	15	8	2	54	1	18
凝集剤	硫酸アルミニウム	AS	-	16	-	-	-	38

2.3 脱水試験方法

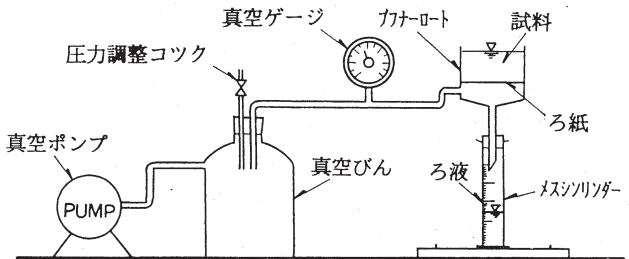
今回行った脱水試験方法はヌッチェテストとリーフテストであり、いずれも基本的な真空脱水試験法として使われている方法である。これらの試験装置を図2に示し、以下に試験方法の概要について述べる。

(1) ヌッチェテスト

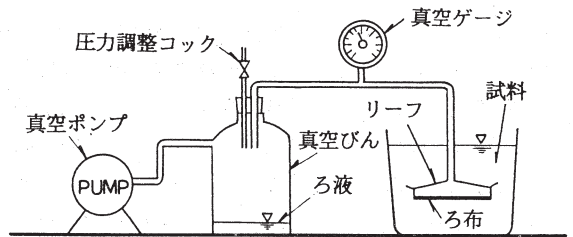
ヌッチェテストはケーキのろ過比抵抗等を求めることにより、材料の脱水特性を判定する試験法である。本実験ではNo. 5Cのろ紙を敷いたブナーロートに約400mlの試料を入れ、真空度400mmHgの定圧でろ過を行った。そし

て、ロート中の試料(脱水ケーキ)にクラックが入り、所定の真空圧が保持できなくなった時点で試験を終了した。

ろ過特性については、ろ過時間とろ液量との関係を調べてろ過特性線図として表し、ケーキ比抵抗を求めた<sup>12)</sup>。また、脱水ケーキの流動性や強度特性をみるためにフォールコーン貫入量( $F_c$ )を測定した。フォールコーン貫入試験は60°の先端角をもったコーンの自重により貫入する量を測定するものであり、この貫入量と一軸圧縮強さとの間には、図3に示すような反比例の関係が得られている。



(a) ヌッチェテスト装置



(b) リーフテスト装置

図2 脱水試験装置

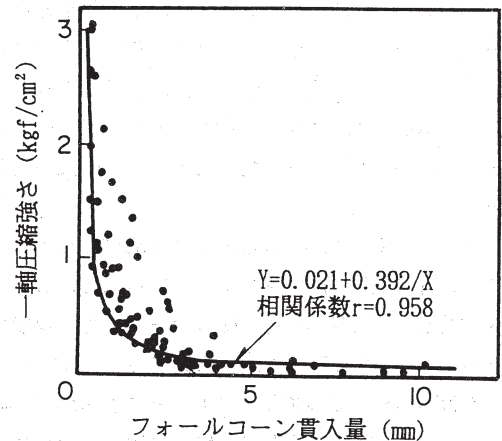


図3 フォールコーン貫入量と一軸圧縮強さとの関係

## (2) リーフテスト

ヌッチェテストでは脱水性の悪い試料に対して長時間を要するのに対し、リーフテストは試験時間を設定でき、通常のドラム型真空脱水機の脱水条件を模擬できるため、運転条件設定のための基本試験としてよく用いられる。本実験では約2ℓの試料中にろ布を固定した直径11cmのリーフを浸漬し、真空度400mmHgで4分間吸引後、ケーキの付着したリーフを気中に取り出してさらに1分間空吸引した。このときの単位時間、単位ろ過面積当たりの吸水量を透過流束(m/s)とし、また、付着ケーキの物性(含水比、フォールコーン貫入量等)を調べた。なお、ろ布は通気度が約500cm<sup>3</sup>/cm<sup>2</sup>・minのナイロン製のものを使用した。リーフテストでは種々の土と固化材との組み合わせで試験を行い、土や固化材等の物性が脱水特性やケーキの強度特性等に及ぼす影響について検討した。

## 3. 実験結果と考察

### 3.1 固化材を添加しない高含水粘性土の脱水特性

王子土、木節粘土および珪石粉による高含水粘性土の脱水特性をヌッチェテストによって検討した。このときのケーキ比抵抗を表3に示す。なお、3種の土はいずれもろ過時間とろ液量との間に線形の関係があり、定圧ろ過の基本式に従った脱水特性を示した。

固化材を添加しない土の脱水特性は、土の種類により大きく異なる。特に、王子土と珪石粉はシルト・粘土分の含有率が類似しているにも拘らず、珪石粉はケーキ比抵抗が王子土の1/60程度であり、脱水特性は珪石粉の方が良好である。また、脱水ケーキの含水比も3種の土で異なり、珪石粉が最も小さい。これらの違いは土本来の性質によるもので、土のコンシステンシー等が大きく影響を及ぼしていると考えられる。いずれにせよ、王子土や木節粘土のような粘性土ではケーキ比抵抗が $10^{12}$ (m/kg)のオーダーであり、そのまま脱水するには真空脱水等では難しいと判断された<sup>1,2)</sup>。

表3 固化材を添加しない土の脱水特性

土の種類	高含水土の含水比(%)	脱水ケーキの含水比(%)	ケーキ比抵抗(m/kg)
王子土	200	72.9	$3.49 \times 10^{12}$
木節粘土	200	99.9	$4.22 \times 10^{12}$
珪石粉	200	41.2	$6.03 \times 10^{10}$

### 3.2 固化材添加脱水法における脱水特性

#### (1) ケーキ比抵抗

王子土に種々の固化材を添加した際の脱水特性をヌッチェテストによって検討した。このときの固化材添加率とケーキ比抵抗との関係を図4に示す。以降、図および本

文中の土質材料と固化材等の略称は、表1および表2中の略称と相応する。なお、固化材を添加した土についても、固化材無添加の場合と同様に、ろ過時間とろ液量との間には線形の関係があった。図4によると、固化材の添加により、ケーキ比抵抗は $10^{11}$ (m/kg)のオーダーまで低下しており、固化材を添加した高含水粘性土は真空脱水あるいは低圧での加圧脱水の適用可能な性状まで脱水特性が向上することが示された<sup>1,2)</sup>。

また、いずれの材料においても添加率の増加に伴って、脱水特性が向上する傾向が認められ、比較的高い添加率において、固化材間で脱水特性に関する顕著な差異はみられない。

一般に、汚泥脱水の凝集剤として消石灰がよく用いられるが、本試験で用いた生石灰は即時に消化して消石灰に変化するため、凝集機能としては両者に変わりはない。一方で、セメント固化材やセメント系固化材は生石灰と類似した脱水特性を示したことから、これらの固化材は凝集剤としての石灰と同等の凝集機能を有しているといえる。

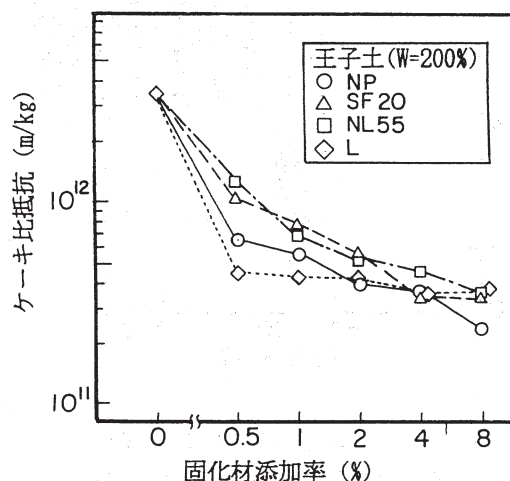


図4 固化材を添加した土の脱水特性

#### (2) 土や固化材が脱水特性に与える影響

土や固化材等の種類が脱水特性に与える影響を検討するため、種々の材料の組み合わせでリーフテストを行った。

まず、土のコンシステンシーと脱水特性との関係について検討した。各種土の含水比を2W<sub>0</sub>に調製し、固化材あるいは凝集剤を5%添加した場合について、土の液性限界と透過流束との関係を図5に示す。これより、両者の関係は添加する材料の種類によってばらついたが、液性限界の大きい土ほど透過流束が小さく、脱水特性が悪くなる傾向を示している。この傾向は、固化材を添加しない土についても同様であった(表1および表3)。なお、コンシステンシー特性が両極端であるベントナイト(BT)とカオ



リン(KAO)は粒度分布がほぼ同等であるにも拘らず、脱水特性は大きく異なっていることから、粘性土の脱水特性は粒径より土のコンシステンシーや圧縮性等の影響を大きく受けると推察された。

また、土の液性限界についてはケーキの含水比とも関係が深い。図6に示すように、脱水ケーキはベントナイト(BT)の場合を除いて、概ね土の液性限界に相当する含水比まで脱水されており、土の液性限界がケーキの含水比を決定するひとつの指標であることが示唆された。

次に、脱水特性を添加材料間で比較すると、例えば図5によれば、石灰(L, LH)が平均的に脱水特性がよく、他のセメント固化材やセメント系固化材(NP, SF12, SF20)も凝集剤である硫酸アルミニウム(AS)と同等以上の脱水特性を有していることが確認された。

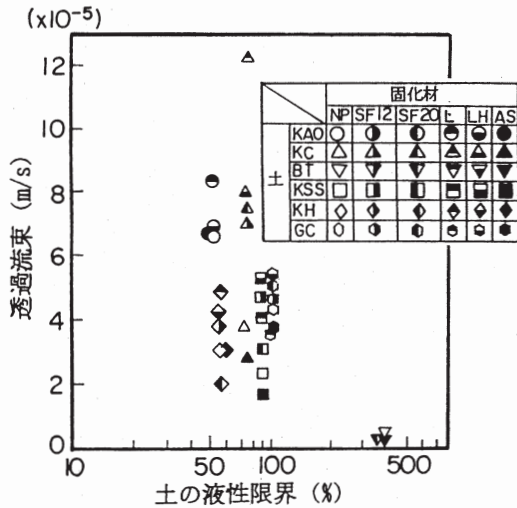


図5 土の液性限界と透過流束との関係 (調整含水比:2%o, 固化材添加率:5%)

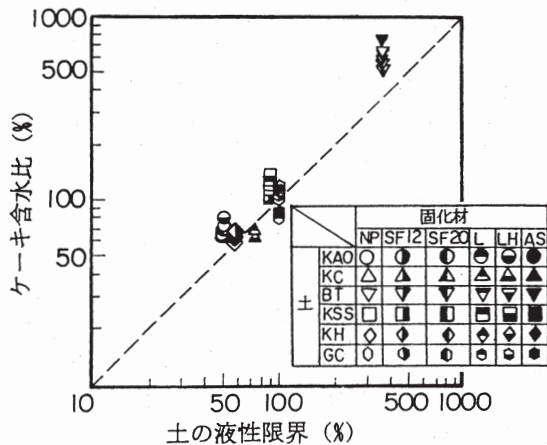


図6 土の液性限界とケーキ含水比との関係 (調整含水比:2%o, 固化材添加率:5%)

### 3.3 固化材添加脱水法による脱水ケーキの固化特性

#### (1) 脱水試料と未脱水試料との比較

図7は、固化材を添加した王子土によるヌッチェテスト後、3時間経過した脱水ケーキのフォールコーン貫入量(Fc)(図中白塗り)を、同じ試料を脱水しない場合のFc(図中黒塗り)と比較したものである。同じ固化材添加率の試料では、未脱水試料と比較し、脱水試料によるケーキの方がFcが小さく、脱水によるケーキの強度発現が確認された。また、生石灰(L)および石灰系固化材(NL55)の場合、脱水ケーキおよび未脱水試料ともに、Fcが固化材添加率の影響をあまり受けていないのに対し、普通ポルトランドセメント(NP)およびセメント系固化材(SF20)の場合、固化材添加率の増加に伴ってFcの減少が著しく、強度増加が認められる。例えば、「汚でい」と判定されない強度は、一軸圧縮強さで0.5kgf/cm<sup>2</sup>以上とされているが<sup>13)</sup>・<sup>14)</sup>、図3よりそのときのFcは約2mm以下である。この値には、NPやSF20による脱水ケーキが最も少ない添加率(12%)で到達しており、セメント固化材やセメント系固化材による固化材添加脱水法の優位性が確認された。なお、未脱水試料の場合は24%の添加率においてもFcは5mm以上であり、固化処理では固化材添加脱水処理に比較して、かなりの固化材量を必要とすることが裏付けられた。

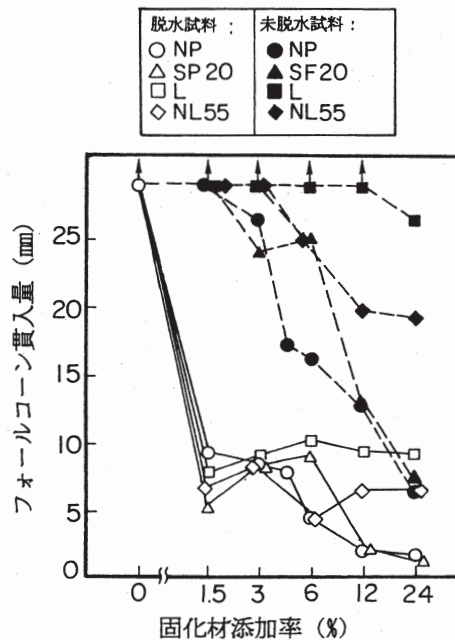


図7 脱水試料と未脱水試料のフォールコーン貫入量 (王子土, 調整含水比:200%, 3時間材令)

#### (2) 土や固化材がケーキの固化特性に与える影響

まず、脱水前の原土の含水量がケーキ強度に及ぼす影響について検討を行った。木節粘土(KC)および海成ヘド

ロ(KH)に普通ポルトランドセメント(NP)を添加したケースのリーフテストにおいて、種々の含水状態で固化材添加脱水した際の脱水ケーキのフォールコーン貫入量(Fc)を図8に示す。これより、ケーキのFcが脱水前の原土の含水量によって明確に層別される傾向は認められない。換言すれば、いずれの含水状態においても、乾燥土量に対して同一の固化材添加率であれば、同等のケーキ強度が得られている。この理由として以下のことが考えられる。

高含水粘性土を固化材添加脱水した脱水ろ液中の固化材成分として、カルシウム分(Ca)を分析すると、その量は水酸化カルシウム(Ca(OH)<sub>2</sub>)の溶解度に相当する約0.1%のCa濃度であった。

例えば、木節粘土において、2Wo(含水比200%)の高含水土の場合、普通ポルトランドセメント(NP)の添加率が5%(Ca分で2.3%)では、全固化材量の1割足らずの固化材成分が脱水ろ液中に溶脱するにすぎない。したがって、脱水前の土の含水比が高くても、ケーキ中には固化材の有効成分のほとんどが残存し、強度発現に寄与しているものと考えられる。

以上のことから、脱水ケーキの強度は脱水前の高含水土の含水量によらず、特にセメント固化材やセメント系固化材を添加した脱水ケーキについては、乾燥土に対する固化材添加率でケーキの広範囲な強度設計が可能であると推定される。

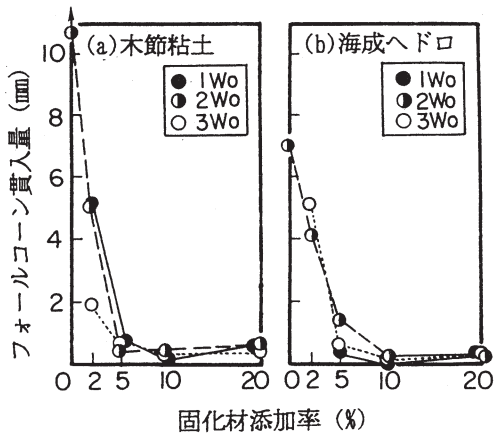


図8 種々の含水状態におけるケーキのフォールコーン貫入量 (普通ポルトランドセメント添加, 1日材令)

次に、固化材の種類によるケーキの強度発現性の比較を試みた。固化材として、NP、SF20、およびLHを、さらに凝集剤ASを取り上げ、2Woに含水比調整した木節粘土による固化材添加脱水のケーキの材令とFcとの関係を図9に示す。これより、特に普通ポルトランドセメント(NP)とセメント系固化材(SF20)のケースにおいて、材令とともに

にケーキのFcは大きく低下し、ケーキ強度が増加する傾向を示している。一方、凝集剤ASは他の固化材に比べて材令による強度の伸びが著しく小さく、通常の凝集剤ではケーキの強度発現にはほとんど寄与しないことが判明した。

なお、脱水ケーキのSEM観察によれば、セメントおよびセメント系固化材を添加したケーキでは、その固化材成分を原因としたカルシウム・シリケート系水和物やエトリンガイトなどの水和物が晶出しており、ケーキの強度発現がこれらの水和物によるものであると考えられた。

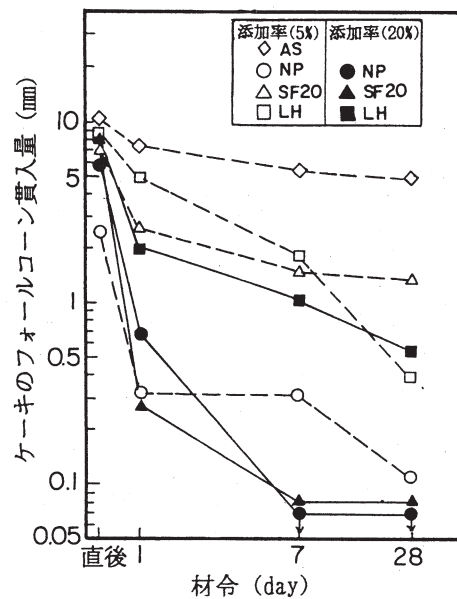


図9 材令とケーキのフォールコーン貫入量との関係 (木節粘土, 調整含水比:2Wo)

#### 4. 結 言

処理後の有効利用をめざした高含水粘性土処理法の新しい試みとして、固化材添加脱水法に関する検討を行った。その結果、以下の結論が得られた。

- ①高含水粘性土に少量の固化材を添加した材料の脱水特性は大きく向上し、セメント固化材やセメント系固化材が、通常凝集剤として用いる硫酸アルミニウムや石灰と同等あるいはそれ以上の脱水特性を有している。
- ②固化材添加脱水法による脱水特性は、土の液性限界と関係し、液性限界の大きな土ほど脱水特性が悪化する傾向を示す。また、液性限界は脱水ケーキの含

水比を決めるひとつの指標となり得る。

- ③ 固化材添加脱水法は通常の固化処理に比較して、同等の処理土強度を得るための固化材量を大幅(1/2以下)に低減できる可能性がある。
- ④ 固化材添加脱水法による脱水ケーキについては、乾燥土に対する固化材添加率によって、汎用性が高く広範囲な強度設計が可能である。
- ⑤ セメント固化材やセメント系固化材による脱水ケーキの強度は材令とともに大きく増加する傾向が顕著である。これは、ケーキ中に保持された固化材もつ水和・凝結作用が主因であると考えられる。

なお、現在、濾室送泥型で固化材添加が可能な実機規模の真空脱水装置を製作し(図10)、泥水シールド現場にて実証試験中である。

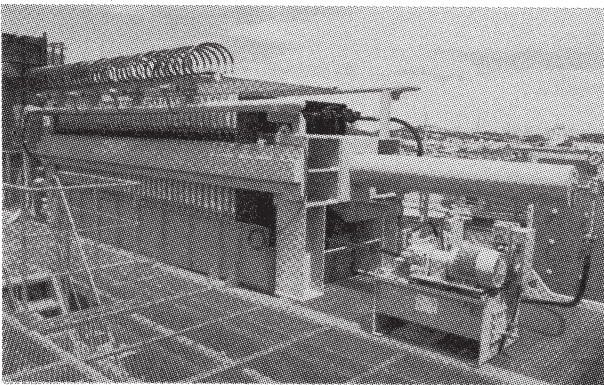


図10 固化材添加脱水式の真空脱水装置

#### 参 考 文 献

- 1) 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, pp. 57~64, 1981
- 2) 滝口健一, 勝又正治, 小口深志, 安田昭彦: 高含水土の改良に関する研究, 前田技術研究所報, Vol. 31, pp. 11~21, 1990
- 3) 小口深志, 滝口健一, 勝又正治, 安田昭彦: 高含水土の改良に関する研究(その2), 前田技術研究所報, Vol. 32, pp. 147~155, 1991
- 4) 安田昭彦, 勝又正治, 小口深志, 滝口健一: 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
- 5) 滝口健一, 勝又正治, 安田昭彦: 高含水土の改良装置の開発(その1), 前田技術研究所報, Vol. 34, pp. 79~

87, 1993

- 6) 勝又正治, 滝口健一, 清水英樹, 安田昭彦, 榎原英正, 高橋和夫: 高含水土の改良装置の開発(その2), 前田技術研究所報, Vol. 35, pp. 183~193, 1994
- 7) 日本粉体技術協会: ろ過・圧搾技術マニュアル, 日刊工業新聞社, pp. 1~23, 1983
- 8) 井出哲夫: 水処理工学, 技報堂, pp. 148~195, 1977
- 9) 化学工学協会: 化学工学便覧(改訂5版), 丸善, pp. 696~723, 1988
- 10) 喜田大三, 辻博和: 圧密脱水を併用した汚泥固化処理の検討, 大林組技術研究所報, No. 18, pp. 95~99, 1979
- 11) 伊藤益光, 飯塚芳雄: セメント微量添加土の乾燥特性について, 第23回土質工学研究発表会, pp. 2341~2342, 1988
- 12) (社)土木学会: 衛生工学実験指導書, (社)土木学会, p. 63, 1977
- 13) 厚生省産業廃棄物対策室長: 建設工事等から生ずる廃棄物の適正処理について, 1990
- 14) 総合的建設残土対策研究会: 総合的建設残土対策に関する報告書, 1990

(1994年11月25日受付)