

# 海面埋立型廃棄物処分場に用いる 高性能遮水土質材料の配合設計方法の提案

木村 誠<sup>1</sup>・今井 五郎<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 工修 株式会社間組 技術環境本部技術研究所 (〒305-0822 茨城県つくば市苅間 515-1)

<sup>2</sup>正会員 工博 横浜国立大学大学院 工学研究院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79 番 5 号)

海面埋立型廃棄物処分場の底面に遮水材として用いられる土質材料は、陸上処分場のように締め固め施工することが困難であって、一般には水中にポンプ打設される。そのため、打設された遮水材は当初高含水比（間隙比が大きい）状態にあるものの、その時点ですでに十分な遮水性を発揮することが求められる。そして、そのような初期性能を発揮するための配合を決定するには様々な配合ケースを設定して多数の実験を行う必要がある。そのため、多大な時間やコストが費やされる。そこで本研究では底面遮水工を想定し、粘性土を母材とする土質材料に対して施工性・遮水性の実験的な検討を行い、初期遮水性に留意した簡易な配合設計方法を提案することにした。

**Key Words:** coastal waste disposal site, impermeable geomaterial, mixture design, liquid limit

## 1. はじめに

平成 14 年度の環境省の発表によると、廃棄物のリサイクル率は依然低い状態にあり、産業廃棄物の最終処分場の残余年数は全国平均で 3.7 年、特に首都圏については 1.2 年と非常に厳しい状況にある<sup>1)</sup>。日本において、廃棄物処分場のほとんどは陸上の谷地に建設されてきたが、近年は住民の合意形成を得ることが難しい。また、1997 年の産業廃棄物処理法の改正によって設置手続きや設置基準の厳格化が図られた結果、新たに陸域に建設用地を獲得することが非常に困難になってきている。そこで、広大な用地を確保できるという利点を有する海面埋立型の廃棄物処分場に期待が寄せられている。

しかしながら従来の研究は陸域に主眼が置かれていたため、海域立地に対する技術研究は遅れをとっているのが現状である。

廃棄物処分場に求められる最大の課題は「有害物質を含む漏水を少なくし、いかに周辺環境への悪影響を防止するか」ということであり、この対策として、遮水シートと難透水性土質材料を組み合わせた遮水工が敷設されており、特に最近では土質材料の持つ高い物質吸着性に

期待が寄せられている。

陸上処分場では、十分な遮水性が発揮できる状態にまで土質材料を締め固め施工することができる。しかし、海面埋立型処分場においては、土質材料はポンプ打設されるので、締め固め施工は困難である<sup>2)</sup>。したがって、ポンプ打設が可能な十分な流動性を有する遮水材は、打設時に高含水比（間隙比が大きい）状態にある。また同時に均質かつ連続的な打設を可能とする水中分離抵抗性が必要となる。さらに、打設直後の状態においても十分な遮水性を発揮することが求められる。そのため、遮水材料の配合設計方法を確立するためには初期状態に着目して行う必要がある。特に底面土質材料の初期状態以降の遮水性は、廃棄物荷重による圧密に伴う間隙比の減少と共に透水係数も小さくなるため、自動的に保証されると期待できる。

圧密に伴う遮水性の向上は間隙比と透水係数の関係  $e\text{-log}k$  によって検討できる<sup>3)</sup>。 $e\text{-log}k$  関係の線形性は一般に良く知られているが、その関係は個々の配合によって異なるために、種々な配合で実験を行わない限り、想定する初期状態で十分な遮水性を発揮するか否かの判断を下すことはできない。したがって配合を決定するまで

には様々な配合ケースで実験が行われ、多くの時間とコストが費やされている。

そこで本研究では土質材料を用いた底面遮水工を想定し、2つの検討を行った。1つはポンプ打設に関する条件決定(流動性, 水中分離抵抗性)を目的とした実験的研究で、フロー試験と水中分離抵抗性試験を行った。2つ目は配合設計手法を確立するための実験的研究で、圧密試験によって遮水材料の圧密に伴う透水性の変化の検討を行った。それらの検討結果に基づいて、配合の違いによらず透水係数を一義的に評価できる指標を設定することで簡易な配合設計方法を確立することにした。

## 2. 用いた土質材料

本研究では表-1のような物理特性を示す3種類の海成粘土を母材として用い、添加材料としてベントナイトと砂を使用した。なお、含水比調整のための添加水は塩分比(塩質量/蒸留水質量)3.5%、密度 $\rho_w=1.025(\text{g}/\text{cm}^3)$ の人工海水を用いた。3種類の粘土を使用したのは、提案する配合設計手法が多様な粘土に適用可能であることを確認するためであり、海成粘土の産地はそれぞれ中部地方、九州地方、関東地方と異なる。

母材海成粘土N,K,Mの地盤工学的分類(地盤工学会基準 JGS 0051)はいずれも高液性限界の粘土(CH)に属する。

母材海成粘土N,Kは2mmのふるいを、母材海成粘土Mは425 $\mu\text{m}$ のふるいを通したものを使用した。なお、ベントナイトと砂の両者を同時に母材に配合したケースは検討していない。図-1に母材海成粘土と砂の粒度分析の結果を示す。

遮水層に用いる原材料として粘土を選択したのは、①天然の材料であるために長期的な環境負荷が非常に少ないこと、②遮水層にせん断層が発達して水みちができたとしても、クリープという一定応力下で密度増加が進む特長によって自己修復が期待できること、③高い吸着能により汚染物質の拡散を防ぐこと、という3つの理由からである。また海成粘土を選択したのは、海成浚渫粘土を土砂廃棄物としてではなく遮水材料として有効に利用することで、処分場建設の環境負荷の低減を図るためである。

添加材料としてベントナイトを選択したのは、厚い電気二重層による遮水性の向上と、微細な粒径による間隙の充填効果を期待したためである。

砂を選択したのは、打設時スラリーの流動性を増加させることによる施工性の向上と、遮水材料自体の圧縮性を低くすることで圧密沈下の軽減を期待するためである。

図-2に示すように、母材海成粘土の違いによらず、ベントナイトの添加率を増すにつれて液性限界、塑性限

界、塑性指数、粘土含有率が高くなる。逆に、砂の添加率が増すと液性限界、塑性限界、塑性指数、粘土含有率が減少していく。本実験で行った範囲内においては、配合後の遮水材料(以下単に遮水材料と呼ぶ)の液性限界は各添加材料の添加率(乾燥質量比)と線形関係にある。

表-1 母材海成粘土と添加材料の物理特性

	母材海成粘土			添加材料	
	N	K	M	砂	ベントナイト
土粒子密度 $\rho_s (\text{g}/\text{cm}^3)$	2.67	2.78	2.68	2.73	2.67
液性限界 $w_L (\%)$	63.7	52.0	89.5	NP	633
塑性限界 $w_p (\%)$	25.1	24.3	35.4	NP	—
塑性指数 $I_p$	38.6	27.7	54.1	NP	—

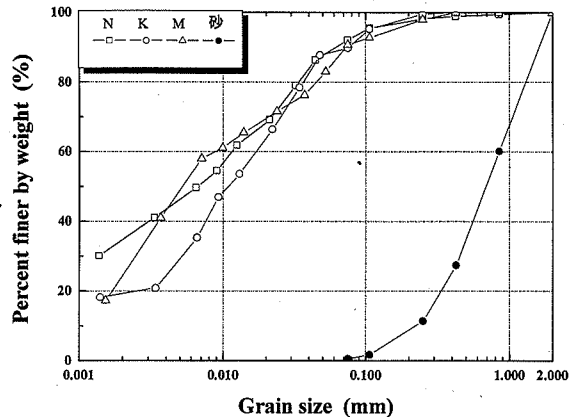


図-1 母材海成粘土と砂の粒度分析の結果

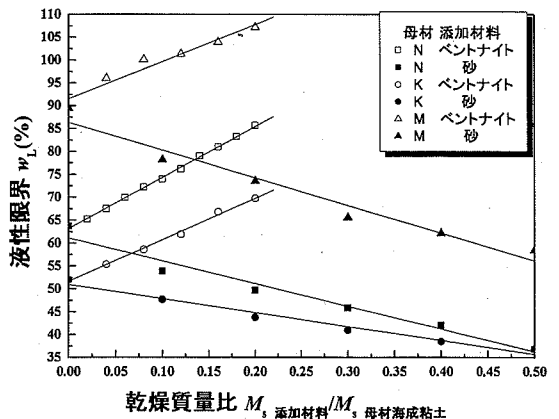


図-2 各遮水材料の液性限界

### 3. 施工性の検討

陸域に建設される処分場の遮水材料は、現場における締固めなどの施工方法により、その設計条件に見合った性能を発揮するように施工される。しかし、海面埋立型処分場では締固め施工を行うことが困難であり、流動状態の土質材料をポンプ圧送して打設される。そのため、土質材料はポンプ打設が可能な流動性と、均質にかつ連続的に打設することができる水中分離抵抗性を兼ね備えている必要がある。

#### (1) 流動性について

##### a) 試験方法

本研究では流動性をフロー値で代表させて検討した。フロー試験は日本道路公団規格「エアモルタル及びエアミルクの試験方法(JHS A 313-1992)」に準拠して行った。

内径 80mm、高さ 80mm の硬化プラスチック製のシリンダーを十分な剛性を持つ版上に置き、設定した配合の試料をシリンダー上端まで空隙を残さないように満たし、シリンダー上端面をならした後、シリンダーを静かに鉛直方向に引き上げる。フローした後の最大と見られる径と、これと直角方向の径を測定し、両測定値の差が 20mm 以下であれば平均してフロー値  $F$  とした。その後、試料を採取し、含水比を測定した。

##### b) 試験条件と試験ケース

フロー値は添加材料の配合量によっても変化するが、試料の含水状態によっても変化するため、様々な配合ケースに対して含水状態を変化させた上で実験を実施する必要がある。したがって、表-2 に示すように母材海成粘土 N に対して乾燥質量比で添加材料としてベントナイトを 0.02, 0.04, 0.08, 0.20, 砂を 0.40, 0.50, K に対してベントナイトを 0.08, 0.20, 砂を 0.30, M に対してベントナイトを 0.08, 0.20, 砂を 0.30 の比で配合した 12 ケースと、それぞれの母材海成粘土に対して、添加材料が無添加である 3 ケースの計 15 ケースの遮水材料について各々の調整含水比を変化させて試験を行った。なお、含水比は材料のフロー値が 80mm-450mm 程度になるように、事前検討結果を参考に調整した。

##### c) 試験結果

本研究で得られた各遮水材料に対するフロー値と含水比の関係( $F$ - $w$  関係)を図-3 に示す。

図-3 に示すように、各母材海成粘土に対してベントナイトの配合量が多いほど同じ含水比に対するフロー値は低く、砂の配合量が多いほど同じ含水比に対するフロー値は高くなる傾向にある。

この  $F$ - $w$  はほぼ線形関係にあるが、含水比を各遮水材料の液性限界で正規化し、フロー値  $F$  を常用対数表示した関係( $\log F$ - $w/w_L$  関係)を図-4 に示す。

その関係は母材によって異なるが、配合の違いによらず母材に特有の挙動を示している。母材が N と K の各遮水材料が近い関係を示しているのは母材の塑性が近いためであると考えられる。フロー値の下限値は実施したシリンダーの内径である 80mm であり、上限値は図-3 より 500mm 程度に収束していくと考えられる。また、フロー値が  $F=80\sim 350$ mm 程度までは線形関係になっている。したがって、遮水材料の流動性は母材海成粘土の違い

表-2 フロー試験の試験ケース

母材 海成 粘土	添加材料	実験ケース	
		乾燥質量比 $M_s$ 添加材料/ $M_s$ 母材	含水比 $w(\%)$
N	なし	0.00	100~125
	ベントナイト	0.02, 0.04, 0.08, 0.20	97.3~125
	砂	0.40, 0.50	56.1~125
K	なし	0.00	91.1~129
	ベントナイト	0.08, 0.20	83.2~157
	砂	0.30	66.5~104
M	なし	0.00	90.9~197
	ベントナイト	0.08, 0.20	107~202
	砂	0.30	77.5~127

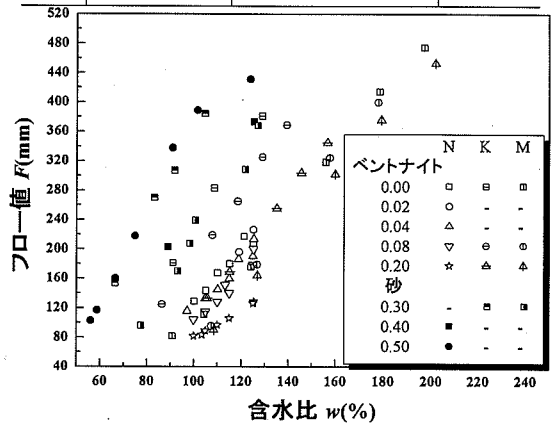


図-3  $F$ - $w$  関係

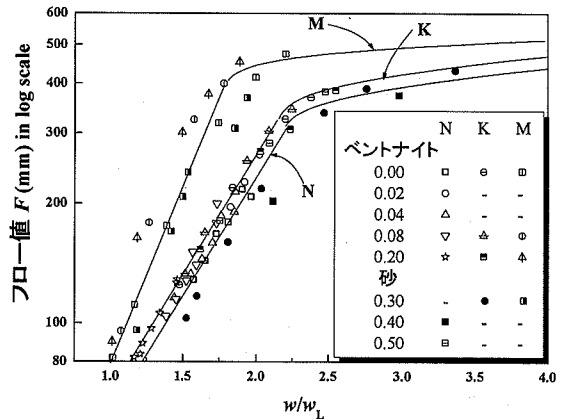


図-4  $\log F$ - $w/w_L$  関係

いや添加材料の種類、配合量によらず、液性限界の2倍程度( $\approx 2w_L$ )までの含水比調整によって効果的に高めることができるが、 $w > 2w_L$ となる含水比調整はあまり意味がないといえる。

## (2) 水中分離抵抗性について

前述したように、流動性だけでなく、遮水材料が水中分離を起こさず均質に連続性を保ったまま打設され得ることもポンプ圧送打設には要求される。すなわち、水中分離抵抗性の検討を行い、分離しない含水比範囲を考慮した上で、流動施工が可能な含水状態の範囲を提案する必要がある。また、施工時の打設による水質への影響を考慮する上でも水中分離抵抗性の検討は必要である。

土田ら<sup>4)</sup>は石炭灰を用いた軽量混合処理土の水中打設時における材料分離抵抗性の評価を行った結果、許される気中フロー値の上限値は $F=300\text{mm}$ であるとし、水中分離を起こすことなく適切に施工が行うことができる指標として $SS < 100\text{ppm}$ 、 $\text{pH} < 10.5$ 以下という値が使用できるとしている。

湯ら<sup>5)</sup>はセメント混合処理土に対して水中打設実験を行って打設方法を検討した結果、打設管を圧着させた圧入方式で水中打設を行う限り、打設による環境負荷は小さく、汚濁拡散は局部範囲に限られることを報告している。

また、今井ら<sup>6)</sup>によれば、海成粘土にベントナイト、セメント、増粘材を配合した試料に対して検討した結果、高含水比の海成粘土については打設速度が $100\text{cm}^3/\text{s}$ 以下であるならば、濁度、pHの値は変わらなかったとしている。

### a) 試験方法

本研究では図-5に示す港湾空港技術研究所開発の分離抵抗性試験装置<sup>4)</sup>を用いてポンプ圧送打設の模型実験を行った。

目標のフロー値に配合設計をした後に、配合試料 $3000\text{cc}$ をシリンダーに投入し、一定の打設速度でピストンを押しながら人工海水の入った円筒状容器に打設する。ホース先端のノズルアダプターを受け容器底面から $24\text{mm}$ の高さに固定し、圧入に近い方式で試験を行った。打設直後に試料表面付近の濁水を速やかに注射器により採取し小ビンに保管し、濁度計・pH計を用いて小ビンに保管された濁水の濁度とpHを計測した。

### b) 試験条件と試験ケース

この試験では母材Nを用いフロー値が $F=200\sim 360\text{mm}$ ( $w/w_L=1.76\sim 2.38$ )と非常に流動性の高く、最も水中分離が激しいと考えられる条件下の4ケースについて、打設速度を一定、 $v=30\text{cm}^3/\text{s}$ の下で水中打設した。

### c) 試験結果

結果を表-3にまとめ、フロー値 $F$ と濁度、pHの関係

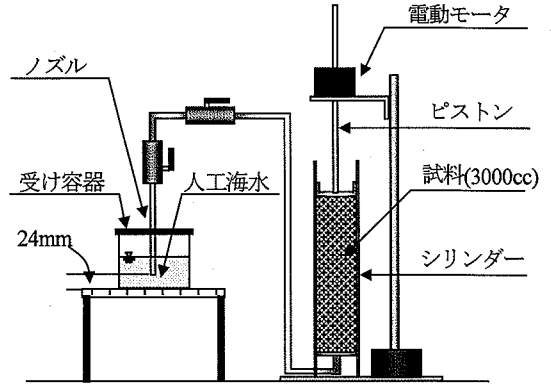


図-5 分離抵抗性試験装置

表-3 水中分離抵抗性試験結果

試料	フロー値 $F(\text{mm})$	含水比 $w(\%)$	$w/w_L$	濁度 (ppm)	pH	打設速度 $v(\text{cm}^3/\text{s})$
N	208	111.8	1.76	1.33	9.05	30.0
	261	129.4	2.03	1.45	9.53	
	288	134.8	2.12	25.2	8.72	
	364	151.7	2.38	35.2	6.30	

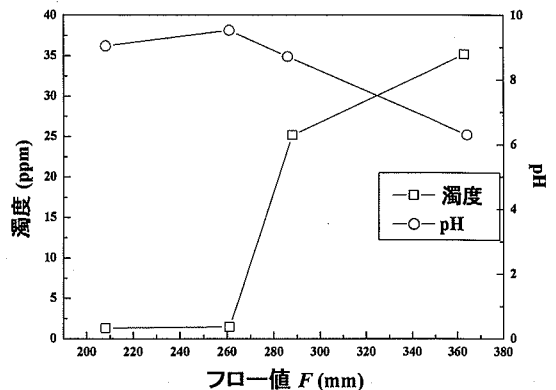


図-6 濁度・pH-F関係

を図-6に示す。

母材Nに対して、非常に高く設定したフロー値に対しても、土田ら<sup>4)</sup>の提案したSS(濁度)・pHの指標値を十分に満足しており、液性限界の2倍の含水比程度まで( $w < 2w_L$ )は水中分離抵抗性を十分に兼ね備えていると判断できる。最近の技術ではフロー値 $200\text{mm}$ 以下でもポンプ排送が可能となっているので、顕著な汚濁拡散を防げる配合も可能であると示唆される。

## 4. 遮水性の検討

本研究では廃棄物処分場の底面遮水を想定して検討を行っている。そこで、廃棄物荷重による遮水材料の圧密がもたらす遮水材料の透水性の変化について検討を行う必要がある。

(1) 実験方法

a) 段階载荷圧密試験

1998年に改正された「一般廃棄物の最終処分場及び産業廃棄物の最終処分場に係る技術上の基準を定める命令」によると、土質材料を用いた遮水材料に関して「層厚50cm以上、透水係数が $10^{-6}$ cm/s以下の粘土等の層に遮水シートが敷設されていること」とされている。海域でポンプ圧送により打設されることを考えると厚さ1m程度は最低でも必要であるため、 $10^{-6}$ cm/s以下の透水係数が保証されれば十分であると考えられる。しかし、本研究では室内試験による検討を実施するため、現場での遮水材料の不均質性を考慮し、 $10^{-7}$ cm/s以下の透水係数を満足すれば十分であるとした。

「土質試験の方法と解説」<sup>7)</sup>によると、 $10^{-7}$ cm/s以下の透水係数を得るための試験方法は、特殊な変水位透水試験と圧密試験の2種類がある。本研究では比較的簡単に実施できる段階载荷圧密試験を選択した。なお、渡部ら<sup>3)</sup>は、変水位透水試験から得られた透水係数は、圧密試験から得られた透水試験の2-3分の1程度であったと報告している。本研究の目的を考えると、この程度の違いであるならば圧密試験から得られる透水係数を基準にして議論を進めても良いと判断した。

試験は日本工業規格「土の段階载荷による圧密試験方法」(JISA 1217)に準拠して行った。約49kPaで予圧密した試料を高さ20mm、直径60mmの円柱供試体に整形し、荷重増分比 $\Delta p/p=1$ として1段階24時間で9.8kPaから628kPaまでの計7段階の载荷を行った。なお、海成粘土N,K,Mを母材とする遮水材料は先に述べた汚濁拡散に関する検討結果を踏まえ、液性限界の2倍( $w=2w_L$ )になるように含水比調整したものを用いた。

段階载荷圧密試験は表-4に示すように、母材N, K, Mに対して乾燥質量比でベントナイトを最大0.20, 砂を最大0.50まで配合した33ケースの遮水材料に対して行った。また、同じ母材Nに対して同じ砂を配合した渡部ら<sup>3)</sup>の実験結果も許可を得た上で検討に用いた。

b) 浸透圧密試験

海面埋立型廃棄物処分場では遮水材料がポンプ打設される。つまり、打設直後は非常に流動性が高く(高含水比)、間隙比の大きな状態にある。そして、その状態であっても期待される遮水性を発揮する必要がある。よって、流動性の高い低応力域(高含水比)での圧密に伴う透水性を検討するために浸透圧密試験<sup>9)</sup>を実施した。

試験は「土質工学会・特殊圧密試験法に関する研究委員会：委員会報告I-6、浸透圧密試験について」<sup>9)</sup>に準拠して行った。

本研究では、図-7のような実験装置を用いて、約4.9kPaで試料を圧密容器内で予圧密した後に、セル圧147kPa、背圧49kPaを作用させた。両タンクのマリオット

ト管先端の鉛直位置を揃えることで両者の位置水頭差が無視できるため、浸透圧として両タンクの差圧である98kPaが常時一定に作用する構造である。なお、供試体の内側への収縮変形等によって供試体内の透水状態が一次的でなくなることを防止し、信頼性の高い透水係数が得られるようにするため、予圧密荷重の約4.9kPaは浸透圧作用時にも作用させ続けた。

浸透圧密終了後、浸透圧を作用させたまま供試体底面よりピックアップを貫入していき、ピックアップが供試体を突き抜けるまで各所定位置での間隙水圧の値を計測

表-4 遮水性の検討に用いた配合ケース

◎：浸透+段階载荷圧密試験 ○：段階载荷圧密試験

添加材料	乾燥質量比 $M_s$ 添加材料 / $M_s$ 母材海成粘土	母材海成粘土		
		N	K	M
なし	0.00	◎	○	○
ベントナイト	0.02	○	-	-
	0.04	◎	○	○
	0.06	○	-	-
	0.08	◎	○	○
	0.10	○	-	-
	0.12	◎	○	○
	0.14	○	-	-
	0.16	◎	○	○
	0.18	○	-	-
	0.20	◎	○	○
砂	0.10	○(渡部ら) <sup>3)</sup>	○	○
	0.20	○(渡部ら) <sup>3)</sup>	○	○
	0.30	○(渡部ら) <sup>3)</sup>	○	○
	0.40	○(渡部ら) <sup>3)</sup>	○	○
	0.50	○(渡部ら) <sup>3)</sup>	○	○

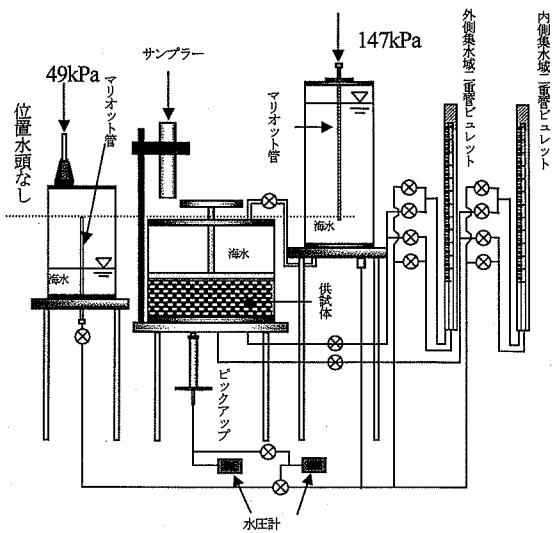


図-7 浸透圧密試験装置

した。その後、浸透圧を開放し、圧密容器内の海水を取り除いた後、サンプラーを用いて内側集水域の試料をサンプリングし、所定の厚さずつ試料をスライスし含水比測定を行った。なお、供試体底面は内・外の2つの集水域に分かれており、結果の整理にはすべて内側集水域から得られた値を使用した。

浸透圧密試験は、表-4に示すように、母材Nに対して乾燥質量比でベントナイトを最大0.20まで配合した6ケースの遮水材料に対して実施した。実験には先に指摘したように液性限界の2倍( $w=2w_L$ )に含水比調整した試料を使用した。

(2) 実験結果

図-8、図-9に段階荷重圧密試験と浸透圧密試験によって得られた  $e-\log p$ 、 $e-\log k$  関係を合わせて示した。どちらの関係も、段階荷重圧密試験と浸透圧密試験の結果はばらつきの範囲内で一致しており、低応力域(高含水比)を含めて線形な関係を認めることができる。

a) 圧縮特性について

図-10、図-11は  $e-\log p$  関係より得られた圧縮指数  $C_c$  と  $e-\log p$  関係の切片  $\Gamma$  (有効応力 1kPa 時に相当する間隙比) と各遮水材料の液性限界の関係である。

これらの関係は母材海成粘土や添加材料の違いによらない固有の線形関係を示している。より多くのベントナイトを配合(液性限界上昇)するほど圧縮指数  $C_c$  は大きく、また、より多くの砂を配合(液性限界低下)するほど圧縮指数  $C_c$  は逆に小さくなる傾向を示している。液性限界が大きいほど圧縮指数  $C_c$  が大きいという事実は多くの研究者によって報告されている<sup>10)</sup>。この関係から、試料の圧縮性は液性限界によってほぼ決定されるといえる。それと同様に、より多くのベントナイトを配合すると  $\Gamma$  はより大きく、逆により多くの砂を配合すると  $\Gamma$  はより小さくなる。

すなわち細粒分が多い(液性限界が高い)試料ほど少しの応力の変化(圧密)でより効果的に間隙を小さくすることができる。この意味で、ベントナイトという粒径が小さく、厚い電気二重層をもつ材料を配合し大きな間隙を充填し、かつ材料の液性限界を高めることは遮水性の向上に有効である。また、遮水材の圧縮性を低下させ、遮水材料の圧密沈下を軽減することが要求されるならば、砂を添加することが望まれる。

$\Gamma$ も液性限界と明瞭な線形関係にあることから、液性限界の大きさが分かれば遮水材料の圧縮特性はある程度まで推定できる。

$$e = \Gamma - C_c \log p' \quad (1)$$

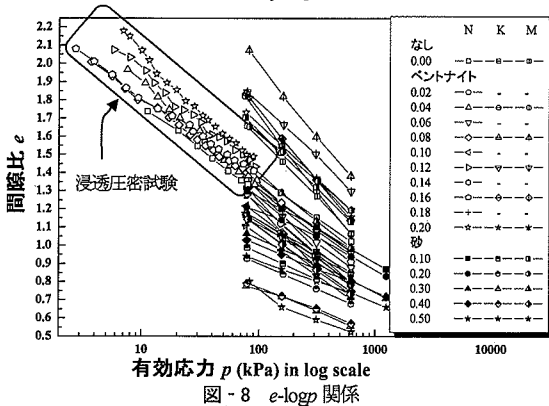


図-8  $e-\log p$  関係

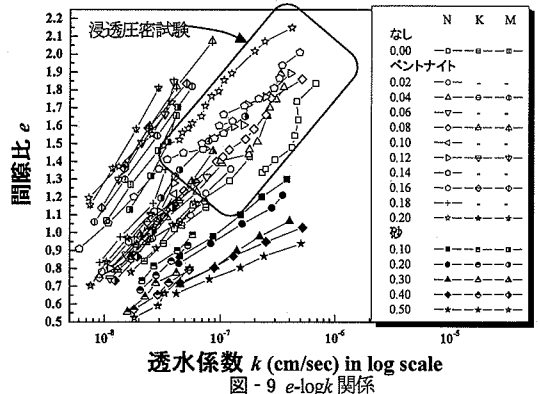


図-9  $e-\log k$  関係

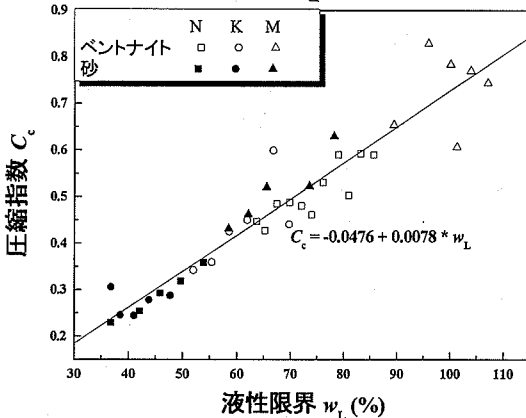


図-10  $C_c-w_L$  関係

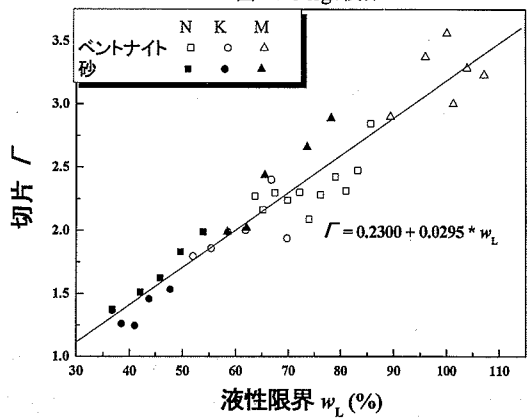


図-11  $\Gamma-w_L$  関係

b) 透水特性について

図-9より、同じ間隙比に対する透水係数はベントナイト配合量が多いほど(液性限界が高い)低い値を示し、砂配合量が多いほど(液性限界が低い)大きな値を示している。厚い電気二重層をもつ微小粒径のベントナイトを配合すると自由水の透水断面積が相対的に減少すると考えられ、同じ大きさの間隙比に対しても高い遮水性を発揮するといえる(間隙比算出にあたり、炉乾燥で蒸発する電気二重層の水は自由水と見積られる)。

図-12は $e$ - $\log k$ 関係の傾きである $C_k$ と液性限界との関係、図-13は $e$ - $\log k$ 関係の切片 $\Gamma_k$ (透水係数が1cm/s時に相当する間隙比)と液性限界との関係である。

$$e = \Gamma_k + C_k \log k \quad (2)$$

より多くのベントナイトを配合(液性限界上昇)するほど $C_k$ と $\Gamma_k$ の値は大きくなり、逆に、より多く砂を配合(液性限界低下)するほど $C_k$ と $\Gamma_k$ が小さい傾向は $C_k$ 、 $\Gamma$ と液性限界の関係と同じである。しかし、図-12、図-13共に母材や添加材料の違いによるばらつきが大きく、液性限界だけで透水特性を知ることは困難である。

図-14はベントナイトを配合した段階載荷圧密試験結果を同じ応力レベルごとに整理した $e$ - $\log k$ 関係である。図-15は砂を配合した結果を同じ応力レベルごとに整理したものである。図-14のベントナイトを配合したものについては、ばらつきはあるが、図中点線のように各応力レベルで $e$ - $\log k$ 関係は配合量に対して緩やかな傾きを示す傾向にあり、配合量が多い場合ほど、間隙比の僅かな減少に対して、非常に高い遮水性を発揮している。これは非常に粒径の小さいベントナイトを配合することによる間隙の充填によるものと、先に述べた自由水の透水断面積の減少によるもの考えられる。

図-15の砂の配合については、配合量が多い場合ほど間隙比の大きな低下に対し、透水係数の変化が見られない。そこで、実験で行った配合の範囲内では砂は母材粘土中に浮いているようになっており、骨格を形成してい

ないと仮定した。実際に、砂を配合した遮水材料の母材粘土部分(砂に対して以下マトリックスと呼ぶ)の間隙比 $e_{matrix}$ を算出し、透水係数との関係を検証した。その結果を図-16に示す。

砂を除いたマトリックス部分の間隙比 $e_{matrix}$ の算出は以下の通りで、計算上の概念図を図-17に示す。

遮水材料の供試体高さを $H$ 、実質高さを $H_s$ とすると圧密試験から得られる間隙比は次のように表される。

$$e = \frac{H}{H_s} - 1 \quad (3)$$

ここで、遮水材料中の砂の実質高さを $H_{ssand}$ とすれば、遮水材料のマトリックス部分の間隙比は次のように算出される。

$$e_{matrix} = \frac{H - H_{ssand}}{H_s - H_{ssand}} - 1 \quad (4)$$

砂の実質高さ $H_{ssand}$ は配合された砂の乾燥質量 $M_{ssand}$ 、

砂の土粒子密度 $\rho_{ssand}$ 、遮水材料の供試体面積 $A$ とすると次のように算出される。

$$H_{ssand} = \frac{M_{ssand}}{\rho_{ssand} \cdot A} \quad (5)$$

母材海成粘土に対する砂の乾燥質量比を

$$\eta = \frac{M_{ssand}}{M_{smatrix}}$$

とすると、式(5)は以下のように置き換えることができる。

$$H_{ssand} = \frac{\eta}{\rho_{ssand} \cdot A} M_{smatrix} \quad (6)$$

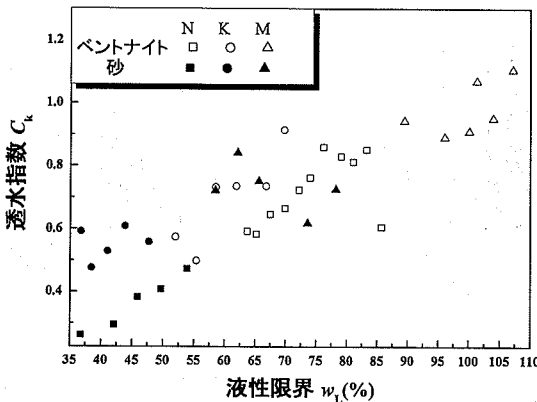


図-12  $C_k$ - $w_L$ 関係

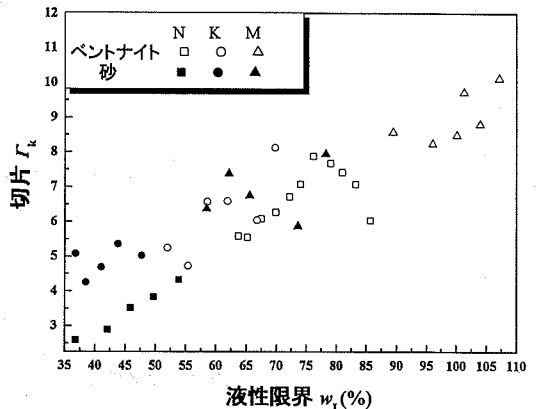


図-13  $\Gamma_k$ - $w_L$ 関係

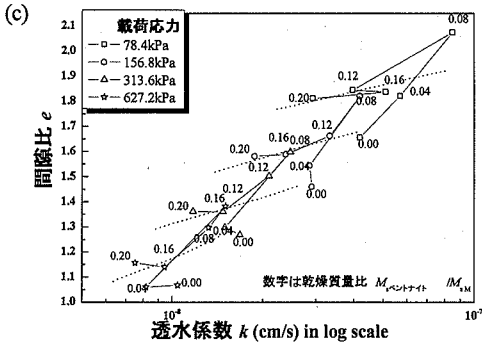
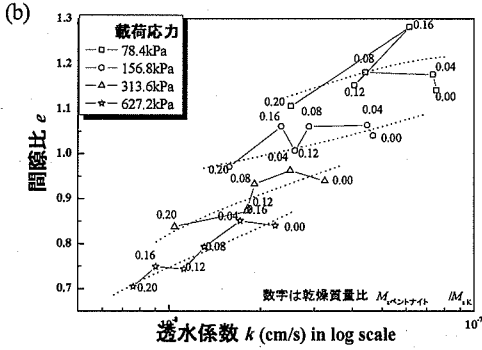
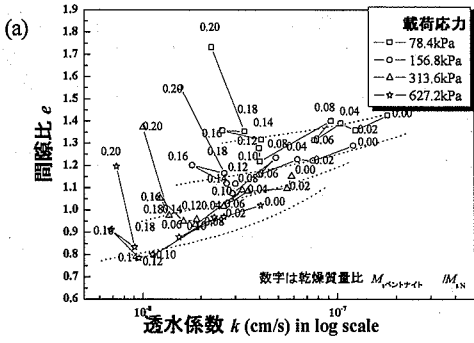


図 - 14 同じ応力レベルで整理した  $e$ - $\log k$  関係 (ベントナイト配合: (a)母材海成粘土 N (b)K (c)M)

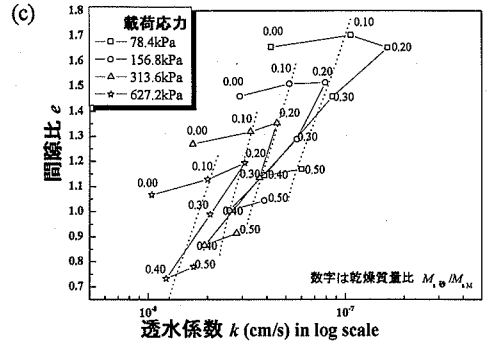
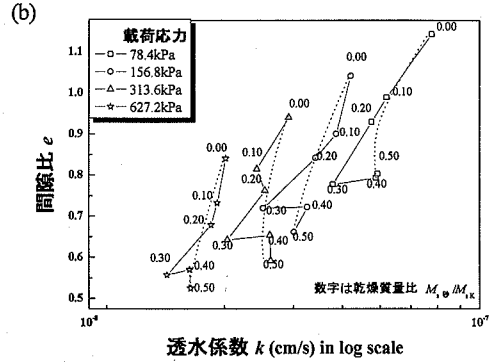
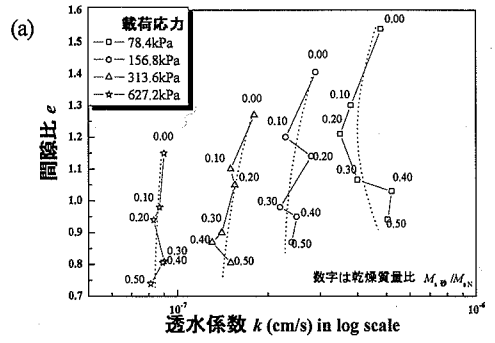


図 - 15 同じ応力レベルで整理した  $e$ - $\log k$  関係 (砂配合: (a)母材海成粘土 N (b)K (c)M)

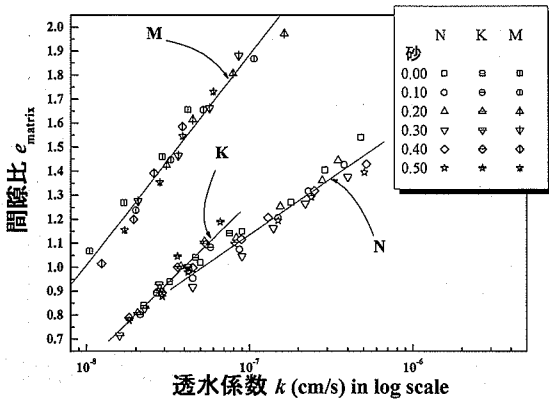


図 - 16  $e_{matrix}$ - $\log k$  関係

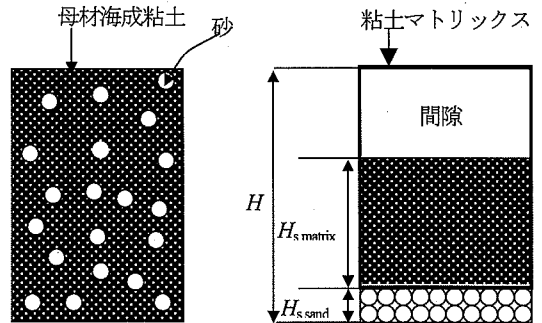


図 - 17 砂を配合した遮水材料中の粘土マトリックス



遮水材料の乾燥質量を  $M_s$  とすると  $M_{s\text{matrix}}$  は

$$M_{s\text{matrix}} = \frac{1}{1+\eta} M_s$$

となるので、式(6)に代入すると以下のようになる。

$$H_{s\text{sand}} = \frac{1}{\rho_{s\text{sand}} \cdot A} \frac{\eta}{1+\eta} M_s \quad (7)$$

よって、式(4)と式(7)から粘土マトリックスの間隙比  $e_{\text{matrix}}$  を算出することができる。

図 - 16 は  $e_{\text{matrix}}\text{-log}k$  関係を示している。それぞれの関係は母材の違いによって異なるが、同じ母材に対しては砂の配合量によらず固有の線形関係を示している。このことから、砂の配合は遮水材料の見かけの間隙比を小さくするだけで、透水特性に関しては与せず、透水特性は粘土マトリックスの母材の特性に支配されていることが分かる。

## 5. 透水係数の評価

圧密試験から得られた  $e\text{-log}k$  関係を用いて配合設計方法を確立するためには、 $e\text{-log}k$  関係が母材や配合の違いごとに異なる線形性を示すという問題を解決する必要がある。そのためには、母材や配合の違いによらずに一義的な関係を示す指標を間隙比の代わりに設定しなければならない。

透水係数  $k$  を予測する方法は古くから数多くの研究者によって検討されており、間隙径や粒径、粒度、コンシステンシーなどを指標とする研究が多い。

Lapierre ら<sup>11)</sup>は間隙径を透水係数  $k$  と結びつけようとする4つの理論モデル(Capillaryモデル, Hydraulicモデル, Marshall probabilisticモデル, Juan and Holts probabilisticモデル)を、原位置不攪乱試料と再構成試料を用いた実験結果と比較を行い検討した。その結果、間隙径と透水係数には関連性を見出せたが、いずれのモデルも実験値とはかけ離れた結果となったことを報告している。

田中ら<sup>12)</sup>も Lapierre らと同様に世界中の種々の粘土に対して4つのモデルの適用性を検討したが理論と実測値は大きくかけ離れた結果を得たとしている。しかし、供試体の間隙径を代表させる値として、全間隙の50%が水銀で満たされた時の圧力に対する間隙径  $D_{p50}$  を定義し、Capillaryモデルに対する間隙径パラメータ(Pore-size parameter, PSP)を  $D_{p50}$  だけで代表させた  $nD_{p50}^2$  は透水係数と良い関係を示したと報告している。また、Mesri ら<sup>13)</sup>によって提案された透水係数を間隙比だけでなく活性度 ( $Ac$ )と  $2\mu\text{m}$  以下の粘土含有率( $CF$ )によって関連付け

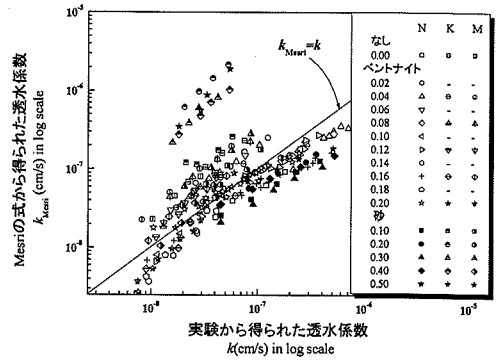


図 - 18 Mesri の提案式の適用性の検討

た式(8)の適用性を検討したが良好な結果は得られなかったとしている。

$$k = 6.54 \times 10^{-9} \left( \frac{e/CF}{Ac+1} \right)^4 \quad (8)$$

本研究においても浸透圧密試験、段階載荷圧密試験によって得られた透水係数と式(8)により得られる透水係数とを比較し、図 - 18 のように Mesri の式の適用性を検討した。透水係数の大きさをある程度予測できることは分かるが、ばらつきが非常に大きいという結果を得た。

福田ら<sup>14)</sup>は粒度分布から得られる間隙指標を用いて透水係数の推定式を提案しており、Hazen や Creager の式に比べて幅広い粒度分布に対して透水性が推定できると報告している。

上に示された間隙径や粒径、粒度と透水係数の関係は非常にばらつきが多く精度に欠ける。そのため、精度の高い透水係数が要求される遮水材料の配合設計にそれらを適用することには問題がある。また、それらを配合設計に適用すると、期待する透水係数から逆算された間隙径や粒径、粒度、活性度が設計パラメータとなる。しかし、それらを母材の選定条件とすることが困難であることは容易に想像できる。

著者らは、図 - 9 のように母材や配合の違いごとに異なる  $e\text{-log}k$  関係が存在するのは、粘土粒子を覆う電気二重層に原因があると考えた。粘土鉱物は自由水ではない電気二重層をもっており、それは塑性の高い粘土ほど厚く自由水ではない。しかし、間隙比  $e$  は電気二重層の水と自由水の両方を含めて計算される。つまり含水比から求めた間隙比  $e$  は両方の水を間隙としており、透水のための間隙を表現していない。したがって、塑性の高い、厚い電気二重層をもつ粘土ほど間隙比  $e$  が透水という面では過大評価されている可能性が大いにあり得る。それは透水係数が過小評価されていることと同じことである。

厚い電気二重層をもつベントナイトを配合することで、

図-12に示したように同じ間隙比であっても高い遮水性を発揮したことから、電気二重層の厚さの影響を考慮すべきであると考えられる。そこで本研究は電気二重層の厚さの効果を液性限界で代表し、それと透水係数との関連性を検討した。液性限界は図-2のように添加材料の配合量とユニークな関係を示しており、設計パラメータとしても十分適用できると考えられる。

拡散二重層理論に基づき、液性限界と透水係数を関連付けた検討が金ら<sup>15)</sup>によって報告されている。金らによると、液性限界時の間隙比で圧密試験から得られる間隙比を正規化することで、試料によらず透水係数とユニークな関係( $\log(e/e_L)$ - $\log k$  関係)を示したと報告している。液性限界時の間隙比( $e_L$ )は飽和度  $S_r=100\%$ と仮定すると以下のように算出される。

$$e_L = w_L \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad (9)$$

本研究で得られた結果を用いた  $e/e_L$ - $\log k$  関係を図-19に示す。母材海成粘土の違いに応じたユニークな関係はわずかに異なるが、母材が同じであるならば添加材料や配合量によらずに正規化間隙比( $e/e_L$ )と透水係数は一義的な関係を示していることが分かる。金らの理論研究では  $\log(e/e_L)$ - $\log k$  の直線性が示されているが、本研究では正規化間隙比( $e/e_L$ )を常用対数表示しない方が良好な線形関係が得られた。

この線形関係は浸透圧密試験から得られた低応力域(高含水比)においても成り立つため、幅広い透水係数、応力域において適用できる。

また、金ら<sup>15)</sup>によると正規化間隙比( $e/e_L$ )と有効応力  $p'$  との間にもユニークな関係が得られるとされているが、本研究から得られた結果は図-20に示すように非常にばらつきが有り、透水係数のようなユニークな関係は得られなかった。

## 6. 配合設計方法

図-9からも明らかなように圧密が進行すると間隙比の減少に伴って透水係数は低下する。したがって、配合設計を遮水材料の初期状態に対して構築している限り、その後の遮水性は保証される。

初期状態は2つに分けることができる。一つはポンプ打設が終了した時点であり、既にその状態で期待される透水係数を発揮する遮水材料を打設すること。つまり、ポンプ打設時の含水比を非常に低く設定して打設することが望まれる。もう一つはポンプ打設から廃棄物荷重荷までの間の自重、あるいは水圧変動等による圧密が終了した後において期待される透水係数を発揮する遮水材

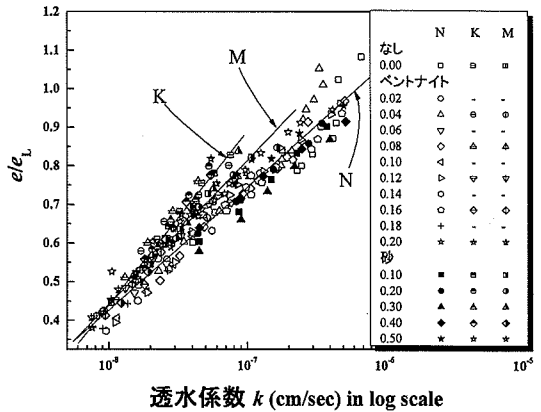


図-19  $e/e_L$ - $\log k$  関係

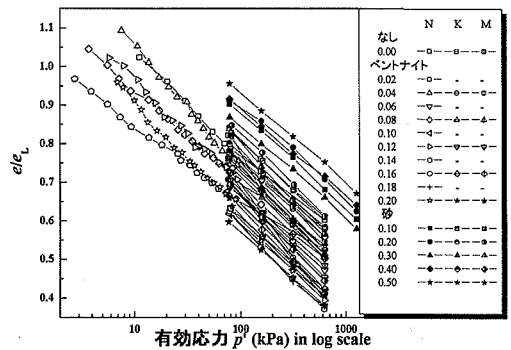


図-20  $e/e_L$ - $\log p'$  関係

料を配合設計することである。

そこで本研究では、図-19によって得られた  $e/e_L$ - $\log k$  関係を用いて、上記2つの初期状態に対して配合設計の検討を行った。

### (1) ポンプ打設直後を想定した配合設計

前述した通り、ポンプ打設直後を想定して配合設計を行う場合には、遮水材料が打設段階で既に低い遮水性を示す必要がある。

そこで、本研究で得られた実験結果を用いて、透水係数  $k=10^{-6}$ - $10^{-7}$  cm/s を満足するには、どの程度の含水比で打設する必要があるのか検討した。

図-19に示したように母材粘土が決まれば添加材料や配合量の違いによらない一義的な  $e/e_L$ - $\log k$  関係がある。つまり所定の透水係数  $k$  に対して、添加材料、配合量によらない指標  $e/e_L$  が一つだけ決まるということである。

図-19において、母材を N,K,M とする遮水材料の  $e/e_L$ - $\log k$  の関係式は以下の通りである。

$$N: \frac{e}{e_L} = 2.977 + 0.319 \log k \quad (10)$$

$$K: \frac{e}{e_L} = 4.046 + 0.451 \log k \quad (11)$$

$$M: \frac{e}{e_L} = 3.429 + 0.373 \log k \quad (12)$$

式(10),(11),(12)に透水係数  $k=10^{-6}, 10^{-7} \text{cm/s}$  を代入すると,  $e/e_L$  は表-5のように算出される。

ここで, 飽和度  $S_r=100\%$  とすると,  $e/e_L=w/w_L$  であるから表-5より, 母材海成粘土Nを用いた遮水材料は図-21のように  $0.774w_L \leq w \leq 1.06w_L$ , Kを用いた遮水材料は  $0.889w_L \leq w \leq 1.34w_L$ , Mを用いた遮水材料は  $0.818w_L \leq w \leq 1.19w_L$

表-5 各透水係数時の遮水材料の  $e/e_L$

$k \text{ (cm/s)}$	$e/e_L$		
	N	K	M
$10^{-6}$	1.06	1.34	1.19
$10^{-7}$	0.744	0.889	0.818

$\leq 1.19w_L$  の範囲内で含水比調整をしてポンプ打設をすれば, 打設直後から透水係数  $k=10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/s}$  を発揮することができるということになる。塑性の高い母材や, ベントナイトを配合した遮水材料の場合にはそのような低い含水比に調整して十分な流動性を確保することが難しく打設することは困難である。しかし, 先の検討により, 遮水材料の透水特性は粘土マトリックスに支配されるということから, 積極的に砂を添加して遮水材料の流動性を高めることで, 透水特性は同程度でもポンプ打設することは可能であると考えられる。

しかし, 打設直後の状態で同じ大きさの含水比状態を保持できるかどうかの信頼性の検討は行っていない。

## (2) 初期応力状態を想定した配合設計方法

打設された遮水材料に作用する初期応力による圧密が

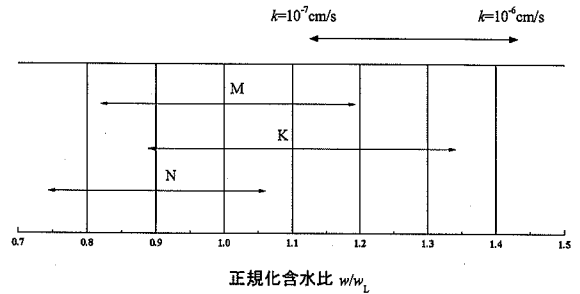


図-21 ポンプ打設直後に十分な遮水性を発揮する含水比調整範囲 ( $w_L$ =配合後の遮水材料の液性限界)

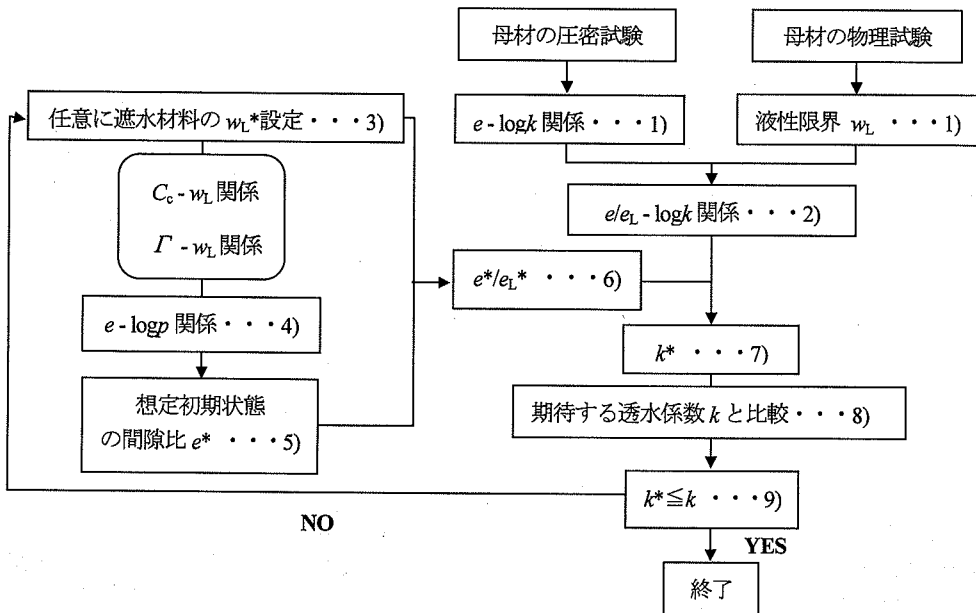


図-22 配合設計のフロー (( )内の数字は配合設計手順)

終了した時点で想定した透水係数を発揮できる材料となるように、図-22に示すような現場の初期応力状態に留意した簡易な配合設計方法を構築した。以下にその設計手順を示す。

- 1) 母材粘土の圧密試験，物理試験によって母材の  $e$ - $\log k$ ，液性限界  $w_L$ (%)を得る。
- 2) 1)に基づき，母材の  $e/e_L$ - $\log k$  関係を求める。(この関係式はこの母材に対してはどのような配合に対しても適用される)
- 3) 任意に遮水材料の液性限界  $w_L^*$ を設定する。
- 4) あらゆる遮水材料に適用できるとした  $C_c$ - $w_L$  関係， $\Gamma$ - $w_L$  関係を用いて，この任意に設定した液性限界  $w_L^*$ を示す遮水材料の  $e$ - $\log p$  関係を算出する。
- 5) 4)の  $e$ - $\log p$  関係を用いて原位置で想定される初期応力  $p$  に対する  $e$  を求め，それを  $e^*$  とする。
- 6) 求めた  $e^*$  と任意に設定した液性限界  $w_L^*$  時の間隙比  $e_L^*$  から  $e^*/e_L^*$  を求める。
- 7)  $e^*/e_L^*$  を手順2から得られた  $e/e_L$ - $\log k$  関係に代入し透水係数  $k^*$  を求める。
- 8) 求めた透水係数  $k^*$  を原位置で期待される透水係数  $k$  と比較する。
- 9)  $k^* \leq k$  の条件を満足していれば，この液性限界  $w_L^*$  を示す材料は期待される以上の遮水性を原位置の初期想定応力下で発揮するということになる。よって母材をこの液性限界  $w_L^*$ (%)を示す材料になるように配合を行えばよいということになり，配合設計終了となる。なお，母材に対する配合材料の乾燥質量比と液性限界との関係は図-1のように線形関係にあるため，その配合は容易である。つまり線形な関係にあると仮定して，母材を含む最低2ケースの配合に対する遮水材料において液性限界試験を実施すれば，液性限界と乾燥質量比との線形関係を仮定できるので目標とする液性限界に対する乾燥質量比を決定することができる。また， $k^* \leq k$  の条件を満足していない場合は，再度  $w_L^*$  を任意に与えるという作業に戻る。なお， $w_L^*$  の設定次第により，透水係数の過大設計を招く恐れがあるため，期待する透水係数に近くなるようにトライアルで設定することが望まれる。

### (3) 初期応力状態を想定した配合設計方法の検証

(2)で提案した，遮水材料の初期応力状態に留意した簡易な配合設計方法について検証を行った。検証手順は提案したフローに基づいて行った。また，設定する遮水材料の液性限界と応力状態は実際に実験で用いた遮水材料と同じ値を使用した。これは，遮水材料の物理特性と応

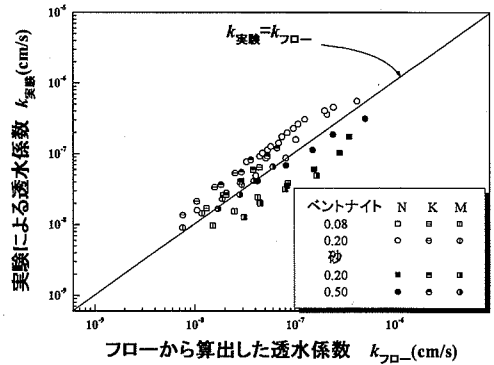


図-23 初期応力状態を想定した配合設計方法の検証結果

力状態を同じにすることで，フローによって算出された透水係数を実験結果の透水係数と比較することができるからである。

検証は母材粘土3種類(N・K・M)に対してベントナイトを乾燥質量比で0.08,0.20配合したものと，砂を乾燥質量比で0.20,0.50配合した遮水材料の計12ケースについて行った。

検証結果として，フローによって算出された透水係数  $k_{\text{フロー}}$  と実験により得られた透水係数  $k_{\text{実験}}$  との比較結果を図-23に示す。

多少のばらつきはあるものの推定される透水係数は実験結果とほぼ同じ値を示しており，ばらつきは透水係数  $k$  の値で±10%程度である。よって，初期応力状態に基づいた配合設計方法の有用性を確認できた。

## 7. 結論

本研究では，粘土質材料を母材とする遮水材料を作成し，遮水材料の打設時における初期状態に留意した配合設計の構築を目的として施工性，遮水性の両面から実験的な検討を加え，以下の結論を得た。

- (1) 遮水材料を，その液性限界の2倍程度までの範囲で含水比調整を行うことで自在に流動性を改善できる。また，その範囲内においては水中分離や環境に対する負荷は非常に少ない。
- (2) 粒径が小さく厚い電気二重層を持つベントナイトを配合することによる間隙の充填効果および遮水材料の遮水性の向上が確認できた。
- (3) 遮水材料中の砂は浮いているような状態で，骨格を形成しない限り，遮水材料の透水性には寄与せず，遮水性は粘土マトリックスである母材粘土に支配される。
- (4) 砂を添加することによる流動性の増加と圧縮性の低

下が確認できた。

(5)正規化間隙比と透水係数との一義的な関係( $e/e_1$ - $\log k$ 関係)が得られた。その関係は母材粘土によって若干異なるが、添加材料や配合量の違いにはよらずに決まる。

(6)  $e/e_1$ - $\log k$  関係を用いて、2つの初期状態(ポンプ打設直後と打設後の任意の状態)に留意した配合設計方法を構築した。

(7)(6)の設計方法による誤差は透水係数  $k$  の値で  $\pm 10\%$  程度である。

本研究は、材料の品質や実験条件が均質な室内試験から得られた結果の範囲内で配合設計方法を構築している。原位置での施工においては、材料の品質のばらつきや施工に伴う不均一性、応力条件の変動などの問題が想定される。したがって、提案した配合設計手法の原位置施工への適用性を検討する必要があるが、それについては今後の検討課題とする。

謝辞: 本研究は第一著者が、横浜国立大学大学院に在学中に実施した五洋建設株式会社との共同研究であり、研究を進めるにあたって、研究費用の一部と試料を提供して頂いたことを感謝いたします。また、既往の実験結果を提供していただいた港湾空港技術研究所の渡部要一氏に厚く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 環境省：平成十四年度版環境白書, 2002.
- 2) 福田賢二郎, 杓木次郎, 佐藤謙二, 平沢甲一, 高根享亮：土質系変形追随遮水材を用いた海面廃棄物埋立処分場の遮水工の建設—クレイガード工法の適応—, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.535-536, 2003.
- 3) 渡部要一, 土田孝, 斉藤邦夫, 山田耕一, 上野一彦：粘土系遮水材料における微視的構造と透水係数の関係, 第47回地盤工学シンポジウム論文集, pp.381-388, 2002.
- 4) 土田孝, 輪湖建雄, 松下弘志, 吉原正博：軽量混合処理土の水中打設時における材料分離抵抗性の評価, 港湾技研資料 No.884, 24p., 1997.
- 5) 湯怡新, 宮崎良彦, 落合英俊, 安福規之, 大嶺聖：セメント混合処理土の水中打設における海水への影響, 土木学会論文集, No.708/III-59, pp.211-220, 2002.
- 6) 今井五郎, 早矢仕雅弘, 佐藤幸孝：高止水性を目的とした土質材料の流動特性と水中不分離性, 第35回地盤工学研究発表会, pp.1187-1188, 2000.
- 7) 土質試験の方法と解説-第一回改訂版- : pp.334-382, 2000.
- 8) Imai, G. : Development of a New Consolidation Test Procedure Using Seepage Force, Soils and Foundations Vol.19, No.3, Sept. pp.45-60, 1979.
- 9) 特殊圧密試験方法に関する研究委員会(1988)：浸透圧密試験について, 委員会報告 I -6, pp.85-95, 1988.
- 10) 田中洋行, 榊原其生：港湾地域における土の一次性質の統計解析, 港湾技研資料 No.719, 36p., 1991.
- 11) Lapierre, C., Leroueil, S. and Locat, J. : Mercury intrusion and permeability of Louiseville clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, pp.761-773, 1990.
- 12) 田中洋行, 田中政典, 利藤房男, 大向直樹：土の構造と透水係数, 粘土地盤における最新の研究と実際—微視的構造の観察から長軟弱埋立て地盤対策技術まで—に関するシンポジウム, pp.37-40, 2002.
- 13) Mesri, G, Kwan Lo, D. O. and Tao-Wei Feng : Settlement of embankments on soft clays, Proceeding of Settlement '94, Vertical and horizontal deformations of foundations and embankments, Vol.1, pp.8-56, 1994.
- 14) 福田光治, 宇野尚雄：透水係数に関する粒度分布と間隙指標, 土木学会論文集, No.561/III-38, pp.193-204, 1997.
- 15) 金亨柱, 吉国洋, 鶴ヶ崎和博：拡散二重層理論による圧縮性および透水性の評価, 土質工学会論文報告集, Vol.31, No.3, pp.175-184, 1991.

(2003. 5. 27 受付)

## PROPOSAL OF MIXTURE DESIGN OF HIGHLY IMPERMEABLE GEOMATERIALS FOR THE USE OF COASTAL WASTE DISPOSAL SITES

Makoto KIMURA and Goro IMAI

Highly impermeable geomaterials which will be used in coastal waste disposal sites can be constructed only by pumping installation. For this reason, the fluidized materials of high water contents must satisfy the requirements of no water pollution and no discontinuity under water as well as high impermeability at the time of their installation.

Based on a series of experimented work by the use of sea bed clays mixed with bentonite or sand, a new method to define the mixture design of them has been proposed on the basis of only the liquid limit of the mixed material.