

# 管理型海面廃棄物処分場に用いる 浚渫粘土を主材料とした土質遮水材料の提案

上野一彦<sup>1</sup>・山田耕一<sup>2</sup>・渡部要一<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)  
E-mail:Kazuhiko.Ueno@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>2</sup>正会員 五洋建設株式会社 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)  
E-mail:Koichi.A.Yamada@mail.penta-ocean.co.jp

<sup>3</sup>正会員 (独) 港湾空港技術研究所 地盤・構造部 土質研究チーム (〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1)  
E-mail:watabe@ipc.pari.go.jp

管理型海面廃棄物処分場の多くは軟弱地盤に建設されるため、処分場を囲む護岸には遮水性に加え、地盤変形や波浪、潮汐等の外力に対する追随性を有し、かつ、天然材料のように経年劣化しないものを使用することが望まれる。また、海域に適した施工性を備えていることも重要である。本研究では浚渫工事で発生する海成粘土の難透水性に着目し、これを土質遮水材料として利用することを検討した。その結果、海成粘土にベントナイトを添加することで遮水材料として必要な透水係数を満足しつつ、ポンプ圧送による水中施工を可能とする流動性を保持できるとともに、平均せん断ひずみ $\gamma=4.0\%$ 程度の変形を与えても所定の透水係数を維持できることを確認した。

**Key Words :** waste disposal, coastal area, water interception, permeability, marine clay, bentonite

## 1. はじめに

### (1) 背景

日々の経済産業活動によって生じる産業廃棄物は、中間処理を経て廃棄物最終処分場に埋め立てられる。環境省のデータによると、平成13年度における廃棄物の年間総排出量は約4.5億トンで、うち4億トンが産業廃棄物である<sup>1)</sup>。このうち約10%にあたる約4,200万トンがリサイクルされずに最終処分されている。ここ10年間、産業廃棄物の総排出量は横ばいで推移し、リサイクル率の向上により最終処分量はほぼ半減しているものの、大量の廃棄物が排出し続けていることに変わりはない。一方、廃棄物を受け入れる処分場の状況も深刻である。環境問題を取り巻く社会情勢を反映して、最終処分場の新規許可施設数は激減しており、平成14年4月現在、残余年数は全国平均で4.3年、首都圏に限れば1.1年と非常に厳しく、早急に新たな廃棄物処分場を確保する必要に迫られている。

このような状況の中、処分場1カ所当たりの容量が陸上処分場に比べ平均約20倍と非常に大きい海面処分場が注目されている<sup>2)</sup>。海面処分場は内水位と外潮位との差が小さいため、遮水工に作用する動水勾配を小さくすることが可能である<sup>3)</sup>。また、廃棄物による埋立が終

了すれば、様々な制限はあるものの、将来新たな国土として利用することが可能である<sup>4)</sup>。

平成12年には、平成10年の「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」(総理府・厚生省令)<sup>5)</sup>の一部改正を受け、海面処分場遮水護岸の設計、施工、管理に関する指針を示したマニュアルが出版された<sup>6)</sup>。しかし、省令改正以降、海面処分場が建設される例は少ない。その理由の一つとして、高度な遮水技術が要求されることが挙げられる。海面処分場の多くは厚く堆積した軟弱な粘土層の上に建設されるため、護岸等の構造物の変形、沈下を引き起こし、遮水構造に大きな損傷を与える要因になる。陸上処分場においては遮水シート敷設は最も一般的な工法であるが、海面処分場では水中作業となるため、陸上での敷設に比べて高い施工技術が必要とされる<sup>7)</sup>。粘土ライナーの締固めは、水中では技術的に不可能で、代わりにセメントで固化させることも考えられるが、打ち継ぎ目やクラック発生に対する遮水性の評価が難しい<sup>8)</sup>。また、省令改正以前から海面処分場の遮水護岸構造に広く採用されてきた鋼矢板、鋼管矢板は、近年、継手部遮水性能を従来より高めた工法の研究開発が進められている<sup>9)</sup>。

このように、陸上で有効な遮水技術が海域環境には

適さない、技術的に施工不可能である、あるいは精度良く施工できないことから、海面処分場に適した施工性、信頼性の高い遮水技術の開発が望まれている。

(2) 研究の目的と検討の方法

海面処分場を使用する遮水材料には、遮水性や耐久性といった基本性能に加え、変形に対する追従性と水中における施工性を備えている必要がある。筆者らは、この条件を満たす材料として、浚渫工事等で発生する海成粘土に着目した。海成粘土が有する難透水性については一般によく知られており<sup>10)</sup>、地盤材料としては、その性質上、処理に苦慮してきたが、遮水材料としてはむしろ好都合である。また、海成粘土は無機質の自然材料であり、既に長年に渡り海底に堆積していたことから、海域環境においても経年劣化することなく長期的に安定な材料といえる。処分場建設予定地の港湾内から浚渫して利用すれば材料調達の面でも有利である。なお、土質材料、特にベントナイトは浸出水と接触し、化学的変質により遮水性に影響を及ぼす可能性があるとの報告<sup>11)</sup>もあるが、本研究では管理型の海面処分場での利用を前提としていることから、ほとんど影響はないと考える。施工に関しても、浚渫粘土をベースに固化材を添加し、スラリー状にしたものを水中にトレミー管打設する軽量混合処理土工法や管中混合固化処理土工法等において実用化された技術を用いることが可能である。そこで、本研究では海成粘土の性質を利用し、土質遮水材料として提案することを目的として、遮水性、施工性、変形追従性の3項目について検討した。

遮水性については、前出のマニュアル<sup>6)</sup>によると粘性土等の不透水性材料としての条件は「層厚0.5m以上、透水係数 $k=1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下」とされている。したがって、透水係数 $k=1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下を目標とする。海成粘土は一般的に間隙比によって透水係数が変化するので、ベントナイトの混合により間隙比を調整し遮水性の向上を試みた。段階載荷圧密試験により遮水性の評価をした。

施工性は流動特性により表される。すなわち、土質遮水材料をポンプで圧送し、水中にトレミー管で打設することを想定すると、流動性が低すぎると配管内で詰まり、高すぎると水中打設時に材料分離を起してしまう。そこで、流動特性を制御して施工性を向上させることを目的とし、水ガラスの添加について検討した。流動特性についてはベーンせん断試験、材料分離に対する抵抗性については水中分離抵抗性試験<sup>12)</sup>により検討した。

変形追従性については、現在、規定された基準や評価方法はない<sup>13)</sup>。そこで、後述するように、せん断変形

表-1 海成粘土の物理特性

|                                | 名古屋粘土 | 東京粘土  |
|--------------------------------|-------|-------|
| 土粒子の密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$ | 2.652 | 2.683 |
| 砂分含有量 (%)                      | 6.2   | 1.1   |
| シルト分含有量 (%)                    | 68.6  | 17.9  |
| 粘土分含有量 (%)                     | 25.2  | 81.0  |
| 液性限界 $w_L(\%)$                 | 65.4  | 131.9 |
| 塑性限界 $w_P(\%)$                 | 33.0  | 51.0  |
| 塑性指数 $I_P$                     | 32.4  | 80.9  |
| 強熱減量 $L_1(\%)$                 | 6.5   | 8.9   |
| 有機炭素含有量 (%)                    | 0.7   | 3.9   |

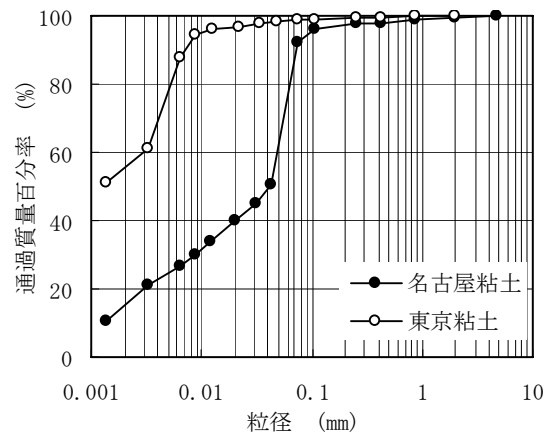


図-1 海成粘土の粒径加積曲線

表-2 圧密試験の試料一覧

| 試料    | 原料土   | ベントナイト添加量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     | 混練後含水比 w (%) | 混練後間隙比 e |
|-------|-------|--------------------------------|-----|--------------|----------|
|       |       | ワイオミング産                        | 国産  |              |          |
| N     | 名古屋粘土 | -                              | -   | 100          | 2.57     |
| NW50  |       | 50                             | -   | 94           | 2.41     |
| NW75  |       | 75                             | -   | 91           | 2.33     |
| NW100 |       | 100                            | -   | 88           | 2.26     |
| NH50  |       | -                              | 50  | 94           | 2.41     |
| NH75  |       | -                              | 75  | 91           | 2.33     |
| NH100 |       | -                              | 100 | 88           | 2.26     |
| T     |       | 東京粘土                           | -   | -            | 190      |
| TW50  | 50    |                                | -   | 171          | 4.44     |
| TW100 | 100   |                                | -   | 155          | 4.03     |
| TH50  | -     |                                | 50  | 171          | 4.44     |
| TH80  | -     |                                | 80  | 163          | 4.18     |
| TH100 | -     |                                | 100 | 156          | 4.03     |

を与えた状態で透水試験を実施する試験装置を開発して検討した。

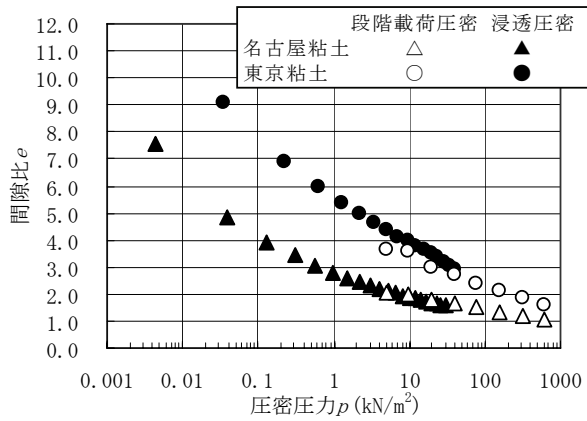


図-2 名古屋粘土と東京粘土の  $e$ - $\log p$  関係

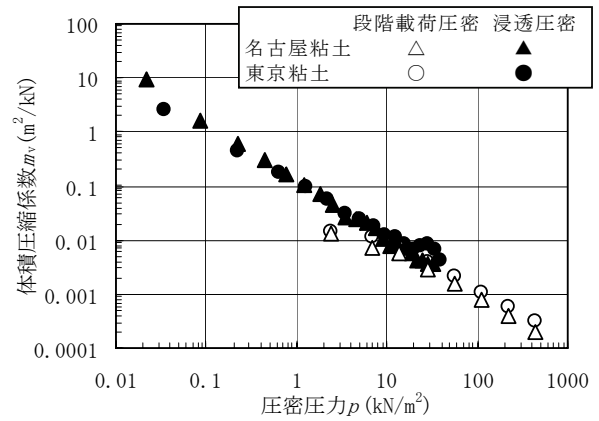


図-3 名古屋粘土と東京粘土の  $m_v$ - $p$  関係

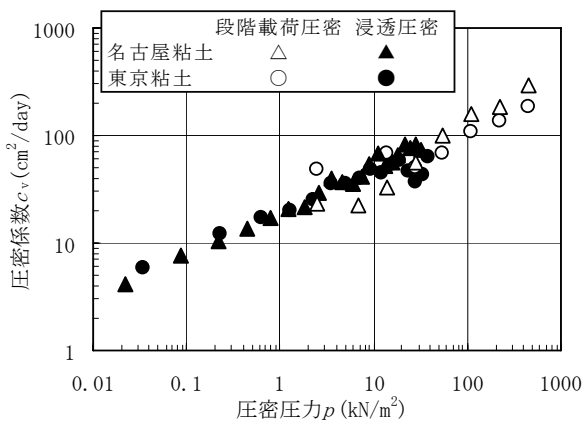


図-4 名古屋粘土と東京粘土の  $c_v$ - $p$  関係

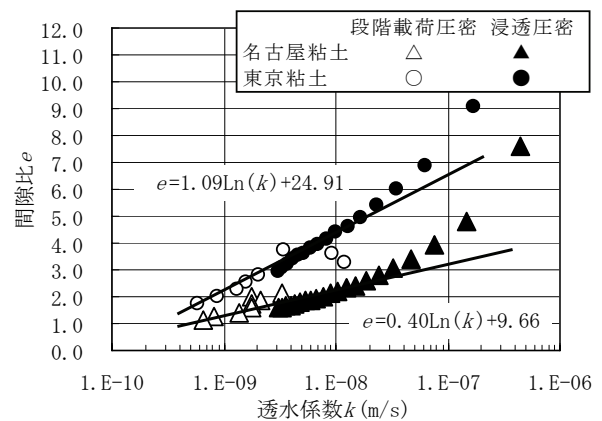


図-5 名古屋粘土と東京粘土の  $e$ - $\log k$  関係

## 2. 試料

本研究では名古屋港と東京港で採取した海成粘土（以下、名古屋粘土Nと東京粘土T）を使用した。表-1に物理特性を、図-1に粒径加積曲線を示す。2mm以下に粒度調整した試料に塩分濃度3%の人工海水を加え、練り混ぜて均質なスラリー状にしたものを原料土とした。原料土の含水比 $w$ は液性限界 $w_L$ の約1.5倍（名古屋粘土Nは $w=100\%$ 、東京粘土Tは $w=190\%$ ）とした。

原料土に添加したNa型ベントナイトには、海水に対しても膨潤性を示すワイオミング産ベントナイトと、一般的な国産ベントナイトの2種類を用いた。水ガラスにはJIS K 1408に規定される白色粉末の第2種メタ珪酸ナトリウムを使用した。

## 3. 遮水性の検討

### (1) 試験方法

難透水性の土質遮水材料について、廃棄物処分場の「遮水材料」としての遮水性能を調べる試験方法は現

時点では規格化されていない<sup>14)</sup>。そのため、一般的には変水位透水試験(JIS A 1218)や三軸試験装置を用いた透水試験等が適用されている。本研究においても、透水係数を直接的に求める透水試験を行うことが望ましいが、間隙比と透水係数の関係を調べるために、段階荷重圧密試験(JIS A 1217)から求まる圧密係数 $c_v$ と体積圧縮係数 $m_v$ から式(1)により透水係数 $k$ を算出した。

$$k = c_v \cdot m_v \cdot \gamma_w \quad (1)$$

ここに、 $\gamma_w$ ：水の単位体積重量である。

圧密試験に用いた試料の配合を表-2に示す。原料土に対し、ベントナイトを添加し、モルタルミキサを用いて3分間練り混ぜたものを内径60mmの円筒アクリル容器に充填し、4.0kN/m<sup>2</sup>で予備圧密させた後、厚さ20mmの寸法に供試体を切り出して圧密リングにセットした。その後、4.9kN/m<sup>2</sup>から628kN/m<sup>2</sup>まで8段階で段階荷重した。段階荷重圧密試験では低応力状態、すなわち、初期の高含水比状態における圧密および透水特性を正確に把握することは難しいことが懸念された。そこで、段階荷重圧密試験の低応力域における適応性を確認するために、ベントナイトを配合しない原料土

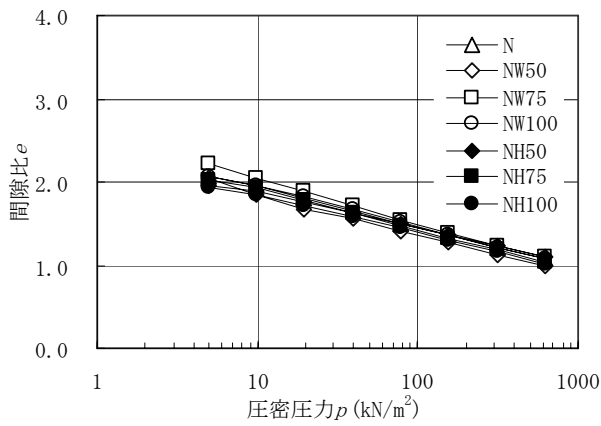


図-6 名古屋粘土とベントナイトの混合土の $e$ - $\log p$ 関係

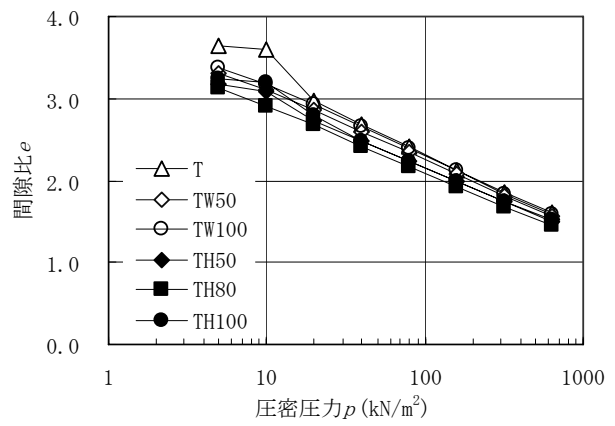


図-7 東京粘土とベントナイトの混合土の $e$ - $\log p$ 関係

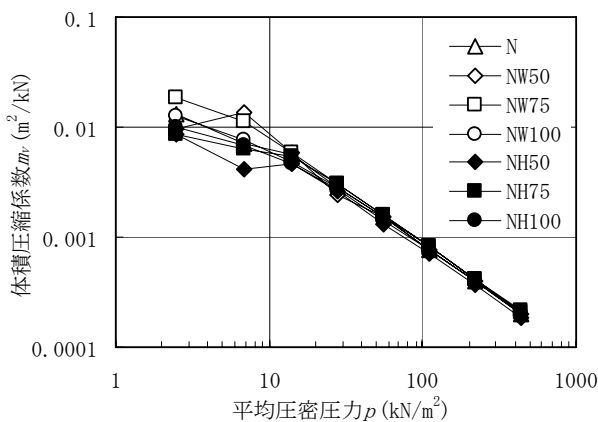


図-8 名古屋粘土とベントナイトの混合土の $m_v$ - $p$ 関係

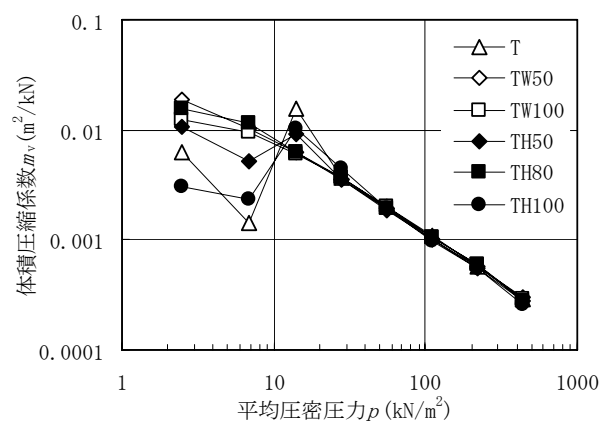


図-9 東京粘土とベントナイトの混合土の $m_v$ - $p$ 関係

(表-2の試料名NとT)については低応力域におけるスラリー状粘土の圧密特性を求めることが可能な浸透圧密試験<sup>15)16)</sup>も実施した。この浸透圧密試験では、原料土に人工海水をさらに加えて、液性限界 $w_L$ の約3倍(名古屋粘土Nは $w=200\%$ 、東京粘土Tは $w=400\%$ )の泥水状にしたものを試料とした。これを直径150mm、高さ400mmの圧密容器内に高さが約200mmになるように投入し、自重圧密させた後に、試料を乱さないように静かに人工海水を圧密容器天端まで注ぎ容器を密閉した。容器の上端に70kN/m<sup>2</sup>、下端に20kN/m<sup>2</sup>の圧力を作用させ、差圧50kN/m<sup>2</sup>の浸透圧を試料に載荷した。圧密終了後、定常状態における浸透水の流量から透水速度 $v$ を求めた。次に間隙水圧計を試料下端から段階的に挿入して試料内の間隙水圧分布 $u$ を測定した。最後に試料を鉛直方向にスライスして含水比 $w$ の鉛直分布を測定した。試験結果の整理において、 $ep$ 関係は含水比 $w$ および間隙水圧分布 $u$ の鉛直分布から求めた。また、透水係数については、間隙水圧分布 $u$ の勾配から求まる動水勾配と透水速度 $v$ からDarcy則を用いて算出した。

## (2) 試験結果

### a) 透水係数の評価手段としての段階載荷圧密試験と浸透圧密試験の比較

図-2に名古屋粘土Nと東京粘土Tについて、段階載荷圧密試験および浸透圧密試験から得られた間隙比 $e$ と圧密圧力 $p$ の片対数関係を示す。両試料ともに浸透圧密試験と段階載荷圧密試験の $e$ - $\log p$ 曲線は、共通する応力範囲においてよく一致している。段階載荷圧密試験の試料は4.0kN/m<sup>2</sup>で予備圧密し、4.9kN/m<sup>2</sup>から載荷を開始しているため正規圧密状態で、 $e$ - $\log p$ 曲線に圧密降伏応力 $p_c$ は見られない。

図-3、図-4には圧密係数 $c_c$ 、体積圧縮係数 $m_v$ と圧密圧力 $p$ の関係、図-5には間隙比 $e$ と透水係数 $k$ の関係を示す。いずれも名古屋粘土、東京粘土ともに試験結果は概ね一致している。なお、図-5において段階載荷圧密試験による $k$ 値は図-3、図-4の $m_v$ 、 $c_c$ の値を用いて式(1)により算出している。一方、浸透圧密試験ではDarcy則に従い透水係数 $k$ を算出している。すなわち、段階載荷圧密試験では間接的に、浸透圧密試験では直接的に透水係

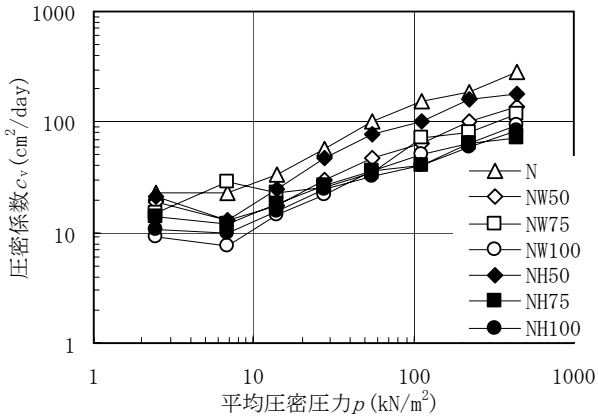


図-10 名古屋粘土とベントナイトの混合土の  $c_v$ - $p$  関係

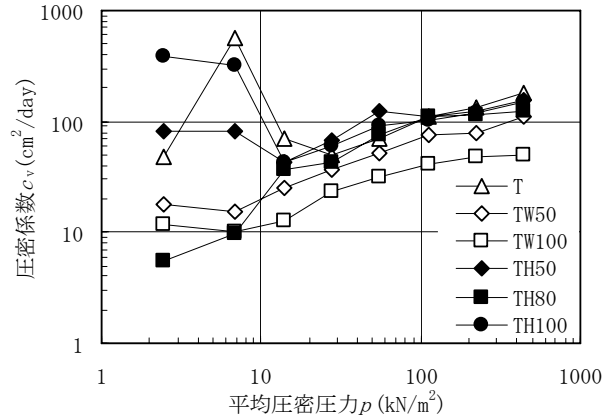


図-11 東京粘土とベントナイトの混合土の  $c_v$ - $p$  関係

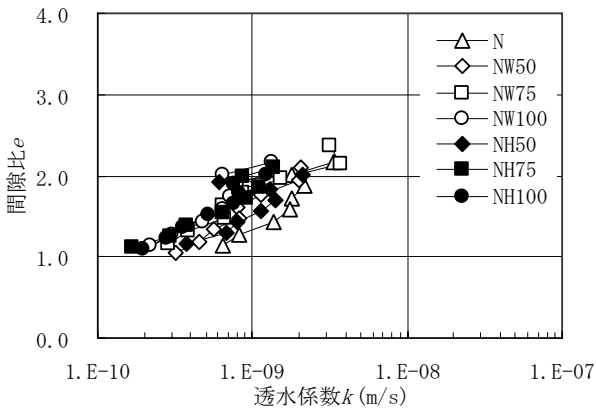


図-12 名古屋粘土とベントナイトの混合土の  $e$ - $\log k$  関係

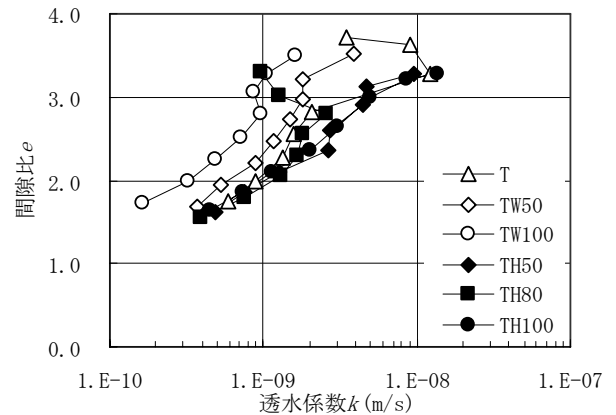


図-13 東京粘土とベントナイトの混合土の  $e$ - $\log k$  関係

数 $k$ を求めている。本来、透水係数 $k$ の評価には直接的に求める試験方法を採用すべきである。また、本研究では透水係数 $k$ の目標値を $k < 1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ としているが、図-5において $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 付近を詳細に計測できているのは浸透圧密試験であり、段階载荷圧密試験では東京粘土は試験範囲の上限、名古屋粘土では試験範囲外にある。したがって、透水係数を求める試験方法としては浸透圧密試験が適切である。しかし、浸透圧密試験はデリケートな試験であり、試験者の熟練度に結果が大きく左右される。一方、段階载荷圧密試験は規格化された土質試験法であり、実務として多くの機関で実施されており、容易に取り扱えるメリットがある。そこでまず、段階载荷圧密試験結果と浸透圧密試験により得られる部分が一致するかどうかを検討した。図-5に東京粘土と名古屋粘土について、両試験から得られた $e$ - $\log k$ 関係と段階载荷圧密試験結果の直線近似を示す。透水係数 $k$ が $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 付近では両試料ともに浸透圧密試験結果と近似線は非常によく一致している。しかし、透水係数 $k$ が $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ より大きい範囲は直線関係では

表現できず、浸透圧密試験結果は近似線よりも徐々に大きくなっている。本研究では遮水材料の透水係数として $1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ 以下を対象としていることから、標準圧密試験結果から得られる近似線で透水係数を評価しても支障はないと判断できる。

なお、図-5の近似曲線より $k = 1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ に対応する間隙比 $e$ を求めると、名古屋粘土Nは2.38、東京粘土Tは4.37となり、いずれも初期間隙比 $e_0$ （名古屋粘土Nは2.57、東京粘土Tは4.95）より小さく、初期状態では $k < 1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ を満足していない。遮水材料として利用するには、さらに間隙比を下げる必要がある。

**b) ベントナイト添加による遮水性向上について**

表-2に示す各試料について、段階载荷圧密試験を実施した。図-6に名古屋粘土Nを原料土としてベントナイトを添加した試料の間隙比 $e$ と圧密圧力 $p$ の関係を示す。図-7には東京粘土Tを原料土としてベントナイトを添加した試料の間隙比 $e$ と圧密圧力 $p$ の関係を示す。どちらも添加したベントナイトの種類や添加量の違いによる差は小さく、原料土の $e$ - $\log p$ 曲線とほぼ一致している。

図-8, 図-9は体積圧縮係数 $m_v$ と平均圧密圧力 $p$ の関係である。载荷初期段階を除くと、いずれの試料もよく一致している。なお、初期段階において、ずれが生じているのは試料が柔らかく、加圧板が安定しなかったためと考えられる。

次に図-10, 図-11に圧密係数 $c_v$ と平均圧密圧力 $p$ の関係を示す。図-10を見ると、原料土である名古屋粘土Nに対してベントナイトの添加量が多い試料ほど $c_v$ の値は小さくなっている。ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは粘土鉱物の中でも粒径が小さく、非常に厚い吸着水層を有している。ベントナイトを加えることにより、土粒子の間隙を充填するとともに、自由水を吸着水として取り込む、すなわち、膨潤効果が期待できる。これにより、同じ大きさの間隙比であっても自由水が減り、圧密係数 $c_v$ も小さくなると予想される。表-2に示したように名古屋粘土Nは粘土分が少ない。ベントナイトを添加することで微細な粘土粒子が増えて $c_v$ が低下したと考えられる。一方、図-11の東京粘土Tを原料土とした場合においても同様の傾向が確認できるが、 $c_v$ が低下するのはワイオミング産ベントナイトを加えた試料TWのみで、国産ベントナイトを加えた試料THはTH80の $p < 10\text{kN/m}^2$ を除いて原料土である試料Tと $c_v$ の値に差は見られない。東京粘土Tは粘土分が多いため、国産ベントナイトを添加しても間隙充填効果は小さく、 $c_v$ に与える影響も少なかったといえる。ただし、ワイオミング産ベントナイトは海水に対しても高い膨潤性があり、 $c_v$ が低下したと考えられる。

図-12, 図-13に各試料の間隙比 $e$ と透水係数 $k$ の関係を示す。図-12の名古屋粘土の場合、原料土Nの $e$ - $\log k$ 関係に対してベントナイトの添加量が多い試料ほど、同一の間隙比に対する透水係数 $k$ は小さい。図-13の東京粘土の場合、国産ベントナイトを添加した試料THに変化は見られないが、ワイオミング産ベントナイトを添加したTWは名古屋粘土と同じく透水係数 $k$ が小さい。これらの傾向は、透水係数 $k$ を前出の式(1)で算出していること、原料土にベントナイトを添加しても $e$ - $\log p$ の傾き、すなわち $m_v$ は変化しないこと(図-8, 図-9)から、ベントナイトを添加すると $c_v$ が小さくなること(図-10, 図-11)と整合する。

以上より、ベントナイトを原料土に添加することで、次の二点が遮水性の向上に寄与すると考えられる。

- 原料土の間隙を充填して間隙比 $e$ が減少して透水係数 $k$ が下がる。
- ベントナイトの添加量が多いほど、同一の間隙比 $e$ に対する透水係数 $k$ は小さくなる。

## 4. 施工性の検討

### (1) 試験方法

ポンプ圧送してトレミー管により水中に打設する施工方法を採用する場合、土質遮水材料はポンプ圧送が可能な流動性と水中での材料分離に対する抵抗性を兼ね備えていなければならない。粘性土は含水比 $w$ によりコンシステンシーが変化する。一般的には、含水比 $w$ が液性限界 $w_L$ まで下がると流動性が失われる。ここで、含水比 $w$ を液性限界 $w_L$ で除して正規化した液性限界比 $w/w_L$ を使うことで、試料によらずコンシステンシー状態を表すことができる。液性限界比 $w/w_L$ を用いて流動限界を表すと $w/w_L=1$ となるが、ここでは安全率を考慮して $w/w_L=1.1$ の状態を流動限界とした。ところで、施工現場では、通常、スラリー粘土の流動性の指標として、迅速かつ容易に求められることからフロー値<sup>17)</sup>を用いることが多い。しかし、液性限界比 $w/w_L$ が1.3以下になるとフロー値は100mm以下となり、測定下限値である80mmに近づく<sup>18)</sup>。本研究では、 $w/w_L=1.1$ まで下げる必要があり、フロー値が測定範囲外となることが予測された。そこで、流動性の指標としてベーンせん断強さを適用することを試みた。液性限界比 $w/w_L$ とベーンせん断強さの関係を調べ、 $w/w_L=1.1$ に対応するベーンせん断強さを流動性の下限値とした。

水中打設時の材料分離に対する抵抗性の評価には「軽量混合処理土工法技術マニュアル」に記載されている水中分離抵抗性試験<sup>19)</sup>を適用した。直径100mm、高さ440mmのシリンダに充填された試料を人工海水を張った容器に、電動モータで一定速度に制御されたピストンにより打設し、1分後に容器内の海水を採取して浮遊物質SSと水素イオン濃度pHを測定し、SS<100mg/l、pH<10.5を満たせば、材料分離に対する抵抗性が確保されているものとした。

表-3に用いた試料の配合を示す。液性限界比 $w/w_L$ を用いることで、試料によらずコンシステンシー状態を表すことができることから、原料土には名古屋粘土のみを使用した。圧密試験の試料と同様、原料土にベントナイトを添加してモルタルミキサで3分間練り混ぜた。NW75-10, NW100-10, NH75-10, NH100-10はさらに水ガラスを10kg/m<sup>3</sup>の割合で添加し、1分間練り混ぜた。試料を縦200mm、横150mm、高さ100mmの容器に充填し、練り混ぜ直後に加え、1日後、7日後、28日後の状態についてもベーンせん断試験を実施した。なお、原料土Nの練り混ぜ直後のベーンせん断試験は $w/w_L=1.0\sim 1.5$ の範囲で6水準の含水比を設定し実施した。

表-3 ベーンせん断試験の試料一覧

| 試料名      | ベントナイト添加量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     | 水ガラス添加量 (kg/m <sup>3</sup> ) | 含水比 w(%) |
|----------|--------------------------------|-----|------------------------------|----------|
|          | ワイオミング産                        | 国産  |                              |          |
| N        | -                              | -   | -                            | 63~100   |
| NW75     | 75                             | -   | -                            | 91       |
| NW100    | 100                            | -   | -                            | 88       |
| NW75-10  | 75                             | -   | 10                           | 91       |
| NW100-10 | 100                            | -   | 10                           | 88       |
| NH75     | -                              | 75  | -                            | 91       |
| NH100    | -                              | 100 | -                            | 88       |
| NH75-10  | -                              | 75  | 10                           | 91       |
| NH100-10 | -                              | 100 | 10                           | 88       |

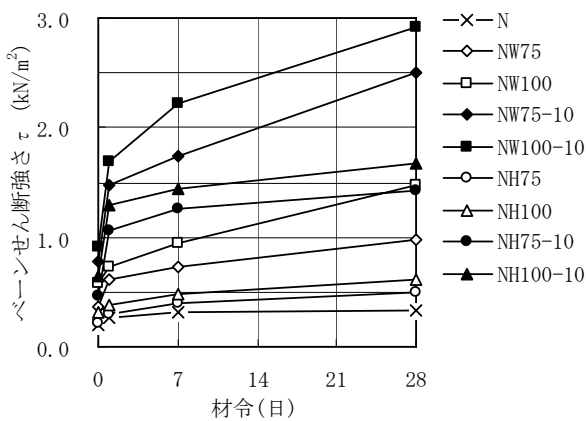


図-15 ベーンせん断強さと材令の関係

(2) 試験結果

a) ベーンせん断試験

図-14に試料Nについてベーンせん断強さと液性限界比 $w/w_L$ の関係を示す。 $w/w_L=1.1$ におけるベーンせん断強さは $0.8\text{kN/m}^2$ であることがわかる。これに基づき、流動性を確保できるベーンせん断強さの限界を $\tau^*=0.8\text{kN/m}^2$ と設定する。

図-15に各試料のベーンせん断強さと材令の関係を示す。まず、試料練り混ぜ直後(図中の材令0日)を見ると、NW100-10以外は $\tau^*=0.8\text{kN/m}^2$ を下回っており、圧送に必要な流動性は確保できている。ベントナイトの種類に注目し、NW75とNH100を比べると、NW75はベントナイト添加量が少ないが、強度は20~40%程度NH100を上回っており、ワイオミング産ベントナイトの膨潤による効果と思われる。また、各試料とも水ガラスを $10\text{kg/m}^3$ 添加することで、強度が約2.0~2.5倍に増加する。なお、いずれの試料も時間が経つとともに、シキソトロピーにより強度が発現している。その度合いは、国産よりワイオミング産の方が1.6~2.0倍大きい。

b) 水中分離抵抗性試験

表-4に水中分離抵抗性試験の結果を試料練り混ぜ直後のベーンせん断強さの値とともに示す。試料Nと

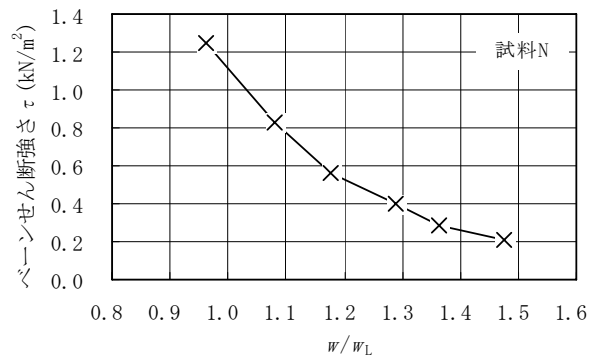


図-14 名古屋粘土のベーンせん断強さと液性限界の関係

表-4 水中分離抵抗性試験の結果一覧

| 試料名      | SS(mg/l) | pH  | 練り混ぜ直後のベーンせん断強さ $\tau$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
|----------|----------|-----|---|
| N        | 106.4    | 8.4 | 0.20  |
| NW75     | 58.9     | 8.4 | 0.37  |
| NW100    | 22.0     | 8.6 | 0.59  |
| NW75-10  | 21.5     | 8.8 | 0.77  |
| NW100-10 | 18.9     | 8.7 | 0.92  |
| NH75     | 110.6    | 8.3 | 0.22  |
| NH100    | 67.4     | 8.0 | 0.31  |
| NH75-10  | 38.1     | 8.2 | 0.47  |
| NH100-10 | 18.3     | 8.2 | 0.64  |

(注)網掛けは $SS > 100\text{mg/l}$ とする。

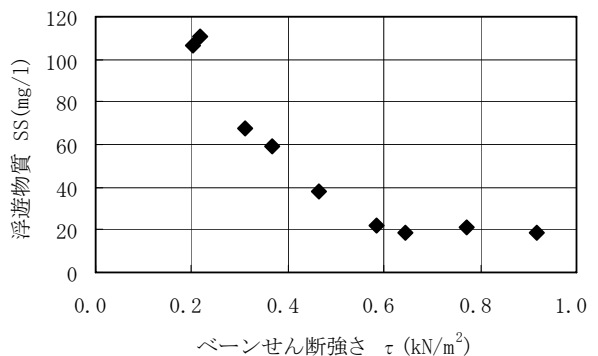


図-16 浮遊物質とベーンせん断強さの関係

NH75以外は $SS < 100\text{mg/l}$ ,  $pH < 10.5$ の指標をとともに満足している。図-16は全試料のSSとベーンせん断強さの関係を示したグラフである。各試料のSSの値とベーンせん断強さの値を比較すると、ベーンせん断強さが大きいほど、水中分離抵抗性が高い傾向にある。指標を満たさなかったNH75も、水ガラスを $10\text{kg/m}^3$ 添加したNH75-10では $SS=38.1\text{mg/l}$ , 水ガラスを加えずにベントナイトを $100\text{kg/m}^3$ 添加したNH100では $SS=67.4\text{mg/l}$ となっていることから、水ガラスあるいはベントナイトを添加すれば、十分な水中分離抵抗性を確保できる。

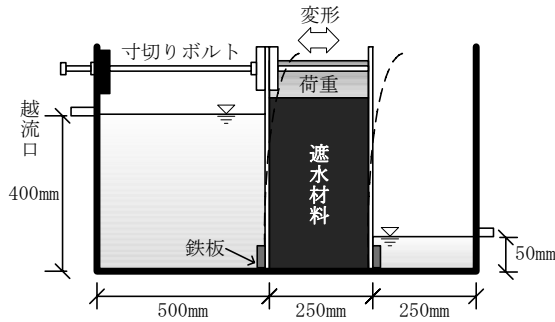


図-17 変形追従性実験概要図

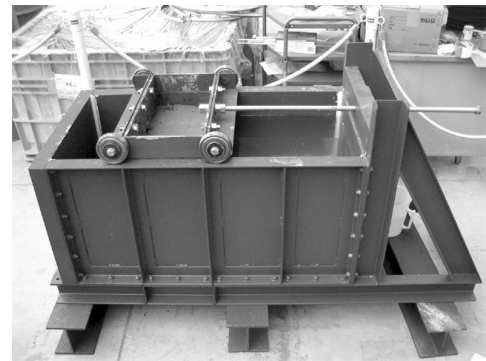


図-18 変形追従性実験土槽写真

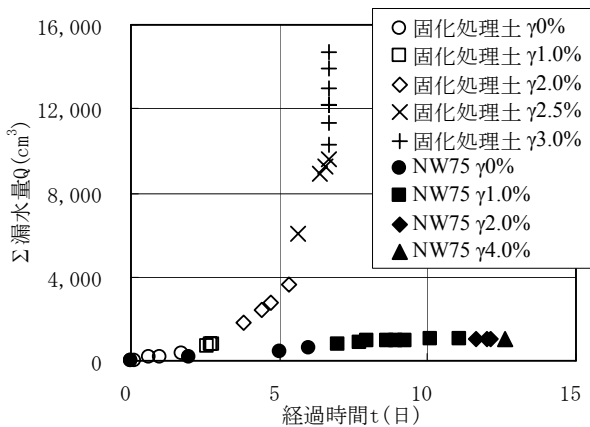


図-19 漏水量の推移

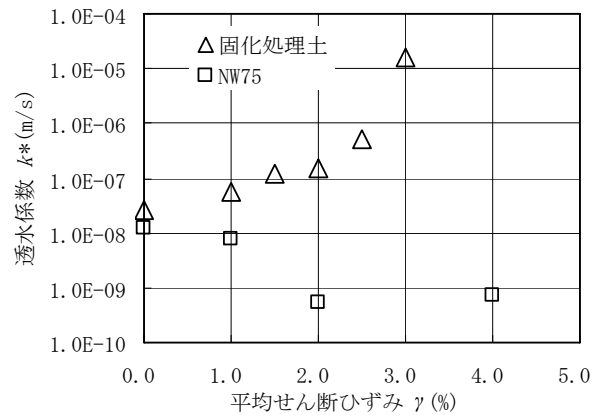


図-20 透水係数とせん断ひずみの関係

## 5. 変形追従性の検討

### (1) 試験方法

液性限界以上の粘性土を用いた土質遮水材料では、変形を与えても亀裂が生じることもなく、また、仮に亀裂が生じたとしても自己修復されると思われる。しかし、この「変形追従性」を定量的に評価する基準・試験方法はないため、図-17、図-18に示す試験装置を用いて検討した。縦500mm、横1,000mm、高さ500mmの鋼製土槽内に、多数の小孔を開け表面に不織布を貼り付けた2枚の亚克力板で仕切られた中央の空間に試料を詰め、試料の片側に人工海水を張り、試料内に水頭差を与えて、試料を浸透して漏れ出す水量 $Q$ を計測した。2枚の亚克力板の下端は土槽に固定されているが、上端は寸切りボルトによって、水平方向に変位を与えられるようになっており、亚克力板の間に充填された試料にせん断変形を与えることができる。試料の天端には $1.0\text{kN/m}^2$ の荷重を加えた。

試料としては、遮水性および施工性を満足しつつ、添加材料が少なく最も経済性に優れるNW75（表-2参照）と比較のため、セメント固化処理土を用いた。セ

メント固化処理土は、名古屋粘土Nを $w/m=2.5$ に含水比を調整した後、高炉Bセメントを原料土に対し $70\text{kg/m}^3$ の割合で添加し、モルタルミキサで3分間練り混ぜた後、実験土槽に充填し、7日間水中養生させた。

試験は水頭差を与えた後、亚克力板の天端を水平方向に5~20mmの範囲で2日おきに変形を増していき、試料に平均せん断ひずみ $\gamma$ （試料天端の水平変位量 $u$  / 試料高さ $H$ ）を1~4%の範囲で与えながら漏水量を計測した。

### (2) 試験結果

漏水量の経時変化を図-19に示す。セメント固化処理土は変形を与えると $\gamma=2.0\%$ で漏水量が増え、 $\gamma=2.5\%$ にした時点で、クラックが入り漏水量が急激に増えた。一方、NW75は $\gamma=4.0\%$ で与えても、クラックは認められず、漏水量は少なく増加する傾向は見られなかった。

図-20には漏水量からDarcy則に基づいた次の式(2)により求めた見掛けの透水係数 $k^*$ と平均せん断ひずみの関係を示す。

$$\Delta Q = A \cdot k^* \frac{\Delta h}{L} \cdot \Delta t \quad (2)$$



ここに、 $\Delta Q$  : 時間  $\Delta t$  における漏水量、 $A$  : 透水断面積、 $\Delta h$  : 水頭差、 $L$  : 透水長、 $\Delta t$  : 計測時間である。

固化処理土と試料NW75ともに初期の透水係数に大きな差はないが、固化処理土はせん断ひずみが増えるにしたがい透水係数は徐々に大きくなり、クラックが認められた $\gamma=2.5\%$ の時点で、試験開始時の見かけの透水係数 $k^*=1.0 \times 10^{-8} \text{m/s}$ に対して3オーダー以上大きくなった。これはクラックが水みちとなり透水係数が大きくなったためであると考えられる。これに対し、NW75は平均せん断ひずみが増大しても、透水係数が大きくなることはなかった。

なお、変形追従性の評価方法として検討すべき課題はあるが、同一条件において土質遮水材料とセメント固化処理土の変形追従性について定量的に評価できたと考える。変形追従性については、今後、より確実な試験方法の確立が重要である。

## 6. 結論

海面処分場の遮水工に用いる遮水材料として、海成粘土を主材料とする土質遮水材料を提案し、遮水性、施工性、変形追従性について実験的検討を行い、以下の結論を得た。

- (1) 海成粘土を主材料としてベントナイトを添加混合することで間隙が充填され遮水性が向上する。
- (2) ベントナイトの添加量が多いほど、同一間隙比に対する透水係数は小さくなり、遮水性が向上する。
- (3) ベントナイトあるいは水ガラスを加えて、ベーンせん断強さを $0.3 \sim 0.8 \text{kN/m}^2$ の範囲に調整することで、ポンプによる圧送性と水中打設時の材料分離抵抗性の両方を満足することができる。
- (4) セメント固化処理土では亀裂が入り遮水性が維持できなくなる程度の変形を与えても、提案する土質遮水材料は変形に追従し亀裂が入ることなく遮水性を維持できる。

**謝辞** : 本研究は独立行政法人港湾空港技術研究所、横浜国立大学および五洋建設株式会社の共同研究成果の一部であり、故今井五郎教授の多大なご協力に感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 環境省 : 平成16年度版環境白書, 第4章, 第1節, 2004.

- 2) 清水恵助 : 最終処分場にみる技術と問題点 海洋 (海岸) 埋立地, 土木学会誌, 第85巻, 第3号, pp.15-18, 2000.
- 3) 渡部要一, 土田孝, 山田耕一, 鶴飼亮行 : 海面処分場の特徴と変形追従性遮水材の開発, 土と基礎, 第51巻, 第8号, pp.32-33, 2003.
- 4) 藤田賢二 : 国土デザインとしての廃棄物対策, 土木学会誌, 第85巻, 第3号, pp.31-33, 2000.
- 5) 総理府・厚生省令 : 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, 1998.
- 6) (財)港湾空間高度化センター : 管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル, pp.30-34, 2000.
- 7) 土田孝, 渡部要一, 織田幸伸, 今村聡, 根岸彰範 : 沿岸域の廃棄物埋立地における地盤環境の評価と改善に関する研究, 港湾空港技術研究所資料, No.1025, pp.58-67, 2002.
- 8) 小泉哲也, 神藤明彦, 土田孝, 山本修司, 五月女洋, 山田耕一 : 廃棄物埋立護岸に用いる不透水性材料の遮水効果に関する実験, 土木学会第56回年次学術講演会講演集, 第VII部門, pp.34-35, 2001.
- 9) 沖健, 鳥崎肇一, 喜田浩, 吉田節, 坂口裕司, 吉野久能 : 鋼矢板鋼管矢板を用いた鉛直遮水壁の遮水性能の評価, 第5回環境地盤工学シンポジウム発表論文集, pp.53-58, 2003.
- 10) 田中洋行, 榎原基生 : 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, 1991.
- 11) 今村聡, 末岡徹 : ベントナイト・砂混合土の化学的安定性, 第31回地盤工学研究発表会講演集, pp.331-332, 1996.
- 12) (財)沿岸開発技術研究センター : 港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル, pp.付2.1-付2.7, 1999.
- 13) 小峯秀雄 : 廃棄物処分場遮水ライナーに関する試験項目・試験方法の現状調査, 土と基礎, 第51巻, 第8号, pp.5-8, 2003.
- 14) 勝見武, 嘉門雅史 : 粘土ライナーの透水試験と遮水性能の評価について, 土と基礎, 第51巻, 第8号, pp.23-24, 2003.
- 15) 今井五郎, 鶴谷和夫 : 浸透圧密試験について, 特殊圧密試験に関するシンポジウム発表論文集, pp.85-95, 1988.
- 16) (社)地盤工学会 : 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, pp.421-422, 2000.
- 17) 日本道路公団 : 日本道路公団試験方法, 第3編コンクリート関係試験方法, pp.163-166, 1999.
- 18) 北詰昌樹, 和田耕造, 木俣陽一, 川田忠彦 : 管中混合固化処理土の流動特性と出来形勾配, 第37回地盤工学研究発表会講演集, pp.893-894, 2002.
- 19) (財)沿岸開発技術研究センター : 港湾・空港における軽量混合処理土工法技術マニュアル, pp.付2.1-付2.7, 1999.

(2007.11.12 受付)

## PROPOSAL OF SEALING GEOMATERIAL FOR WASTE DISPOSAL SITES IN COASTAL AREA

Kazuhiko UENO, Koichi YAMADA and Yoichi WATABE

Coastal waste disposal sites have been built on soft ground along coastal areas. Therefore, sealing materials used in impervious seawalls need to be highly workable at waters and flexible enough to behave in accordance with ground movements and to use a non-deterioration natural materials. In this study, we have endeavor to use marine clay as sealing geomaterial. The study has confirmed that geomaterials treated by adding bentonite to marine clay keep its ability conform flexibly to conform flexibly to transformation and to be workable at waters, while satisfying a required coefficient of permeability.