

土質系遮水材を充填した箱形鋼矢板壁の 遮水性能評価に関する考察

田中 智宏¹・堤 彩人²・三好 俊康³・吉田 誠⁴・
上野 一彦⁴・永尾 直也⁵・葛 拓造⁵・渡部 要一⁶

¹ 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: Tomohiro.Tanaka@mail.penta-ocean.co.jp

² 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: Ayato.Tsutsumi@mail.penta-ocean.co.jp

³ 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: Toshiyasu.Miyoshi@mail.penta-ocean.co.jp

⁴ 正会員 五洋建設株式会社 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8)

⁵ 正会員 新日鐵住金株式会社 建材開発技術部 (〒100-8071 東京都千代田区丸の内 2-6-1)

⁶ 正会員 港湾空港技術研究所 地盤研究領域 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

管理型海面廃棄物処分場に適用される鉛直壁は、廃棄物と海洋とを隔てる遮水工として重要な役割を担っている。この鉛直壁には遮水性能が要求されることはもとより、遮水工の損傷または欠陥等の方が一の事態に備えたフェイルセーフ（安全装置）を付加することが関係法令や技術マニュアルにおいて要求されている。筆者らのグループは土質系遮水材を充填した箱形鋼矢板壁工法を開発し、廃棄物処分場の鉛直遮水壁として適用し施工している。箱形鋼矢板は二重の継手を有し、これらに遮水処理を施すことで基本遮水性能を確保するとともに、継手部の遮水室内に土質系遮水材を充填することでフェイルセーフを付加している。本研究では開発した鉛直遮水壁の施工性や遮水性能およびその評価手法について、実現場における施工を通じて得られた知見について述べ考察した。

Key Words: waste disposal site, seawall, seepage control work, coefficient of permeability, box-shaped steel sheet pile

1. はじめに

沿岸域に立地する管理型海面廃棄物処分場に適用される鉛直壁は、その背後の廃棄物による埋立地を潮汐等の外力から護る「護岸」としての機能に加え、処分場内の保有水を外海面に漏出させないための「遮水工」としての機能も要求される。このうち後者の機能については信頼性向上のため、2008年8月に技術マニュアルとして「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル(改訂版)」が発行され、遮水工が万が一損傷を受けた場合の遮水機能の低下を想定したフェイルセーフ（安全装置）を付加することが要求されている¹⁾。フェイルセーフとしては、遮水工に直接付加するバックアップ機能、水位管理による移流抑制、検査・モニタリング機能等が考えられている。

遮水と護岸の機能を兼ね備えた鉛直遮水壁として、筆者らのグループは土質系遮水材を充填した箱形鋼矢板壁工法を開発している。箱形鋼矢板は片側2箇所の継手部を

有し、これらに遮水処理を施すことで基本遮水性能を確保するとともに、継手部の遮水室内に土質系遮水材を充填することでフェイルセーフ（バックアップ）としての遮水機能を付加している。

本研究では、名古屋港における管理型海面処分場の鉛直遮水壁として施工された箱形鋼矢板壁に関して、土質系遮水材の品質管理方法や、箱形鋼矢板壁の打設施工性および打設後の遮水性能評価方法について、一連の施工を通じて得られた調査結果や知見について述べる。

2. 土質系遮水材充填箱形鋼矢板壁の概要と課題

(1) 概要

図-1に土質系遮水材充填箱形鋼矢板壁の平面模式図を示す。同図は箱形鋼矢板2函を連結させた状態である。箱形鋼矢板同士は2箇所の継手を嵌合させることで連続

壁を構築する。継手部には予め膨潤性遮水材を塗布しており、二重の基本遮水性能を確保している。さらに、継手部に挟まれた遮水室内には変形追随性が高く且つ難透水性材料である土質系遮水材²⁾を充填することで、フェイルセーフ(バックアップ)機能を付加している。このように、箱形鋼矢板壁工法は全体で三重の遮水機能を有する構造となっている。

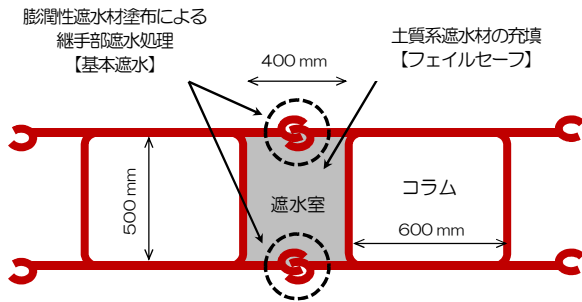


図-1 箱形鋼矢板壁工法の平面模式図

(2) 課題と検討項目

土質系遮水材充填箱形鋼矢板壁を管理型海面処分場の鉛直遮水壁として適用する際に、確実な遮水性能を有する構造とするために、以下のような課題が挙げられた。また、それぞれの課題に対する検討項目も併せて示す。

a) 土質系遮水材の品質管理

箱形鋼矢板壁の遮水室内に充填する土質系遮水材は、一般的に現地の浚渫粘土を母材として製造する。ところが本工事では浚渫粘土が入手できなかったため、購入可能な材料を母材とすることを試み、現場において製造した土質系遮水材の物理特性や品質管理について検討した。

b) 箱形鋼矢板の打設施工性

箱形鋼矢板壁同士を連結させるためには、2 箇所の継手を同時に嵌合させる必要があることから、1 箇所の継手を嵌合させる鋼矢板壁や鋼管矢板壁と比較すると施工性が低下する可能性があった。また、打設施工により継手部に塗布した膨潤性遮水材への影響も懸念されたため、打設速度や継手部の温度を計測し、箱形鋼矢板壁の施工性および膨潤性遮水材への影響について調査した。

c) 箱形鋼矢板の遮水性能評価

前述のように、箱形鋼矢板壁工法は全体で三重の遮水機能を有する構造となっている。過去の実証実験において、処分場全体として要求される遮水性能は満足することは確認されているものの、膨大な数にのぼる個々の継手部の遮水性能を検査・評価することは難しいことが指摘されている³⁾。信頼性の高い処分場を建設するためには、個々の遮水室内において遮水性能を検査・評価できることが望まれるが、その方法は確立されていない。そこで、現場において簡易に遮水性能を評価するために、土質系遮水材の充填前の遮水室内において水張試験を実

施し、遮水性能の評価について検討した。

3. 土質系遮水材の製造および品質管理

(1) 土質系遮水材の物理特性

本工事で使用した土質系遮水材は岡山県笠岡産粘土(以下、笠岡粘土)、米国ワイオミング産ベントナイト(以下、ワイオミング粘土)、細砂および現地海水を混合し、現場にて製造したものである。笠岡粘土とワイオミング粘土は工場製品で、粉体状のベントナイトとして市場に流通している。細砂は JIS A 5308 に規定されるレディーミクストコンクリート用の細骨材を使用している。これらの材料は粒度などが調整され、一定の品質が確保された工場製品である。従来の現地浚渫粘土を母材とした場合と比較すると、物性のばらつきが少ないため、安定した品質の土質系遮水材を製造できると考えられる。また砂分含有量を多くすることで間隙比を小さくし、遮水性に影響することなく圧密沈下に対する抑制効果も期待できる⁴⁾。

表-1 に各材料の物理特性を示す。液性限界は現地海水を用いて試験を行った。ワイオミング粘土は海水に対しても高い膨潤度を示すことから、液性限界も高い値となった。表-2 に土質系遮水材の配合を示す。細砂は土質系遮水材の体積比で 10 %となるよう配合した。図-2 には現地海水を用いて液性限界に含水比調整したワイオミン

表-1 土質系遮水材構成材料の物理特性

項目	材料	ワイオミング粘土	笠岡粘土	細砂
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		2.641	2.688	2.644
液性限界 w_L (%)		227.1	49.3	NP

表-2 土質系遮水材の配合

土質系遮水材 1m ³ あたりの質量内訳(kg/m ³)			
ワイオミング粘土	笠岡粘土	細砂	海水
181	570	268	638

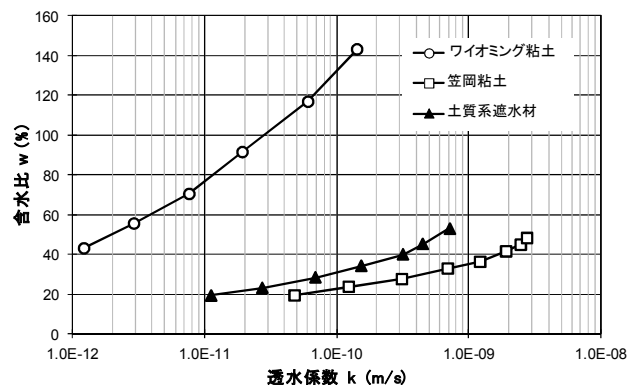


図-2 土質系遮水材及び構成材料の含水比と透水係数の関係

グ粘土と笠岡粘土および土質系遮水材の3試料に対して実施した、段階载荷圧密試験結果から得られた含水比 w と透水係数 k の関係を示す。土質系遮水材の w - $\log k$ 曲線は笠岡粘土単体に対して透水係数が 1/5 程度まで小さくなる方向にスライドしている。これは笠岡粘土に対して、ワイオミング粘土の添加による膨潤効果（遮水性向上と間隙比増大）と、細砂の添加による間隙充填効果がバランスよく影響した結果と考えられる。なお、別途実施した変水位透水試験により得られた土質系遮水材の透水係数は 3.32×10^{-9} m/s であった。

(2) 土質系遮水材の製造打設

土質系遮水材の製造方法として、材料の混合状況を目視確認しながら混練することができる、ミキシングバケット付きバックホウによる製造プラントを用いた方法とした。写真-1 に土質系遮水材の製造および打設状況を示す。台船上に6基の水槽を設置し、水槽ごとに土質系遮水材 10 m³ 分の材料を順次投入してミキシングバケットで混合した。製造手順は、まず予め所定量の海水を注入した水槽内に、笠岡粘土とワイオミング粘土を投入し、混練する。なお両粘土は配合表に基づき、事前に計量混合したものをフレコンバックに詰めて現場に搬入している。その後、均質なスラリーになったところで、現場にて計量した細砂を投入し、さらに十分に混練して製造完了とした。混練完了の判断は次節で述べる品質管理手法に基づいた。製造した土質系遮水材はバックホウにより泥土圧送ポンプに投入し、打設台船まで圧送される。耐圧ホースの先端には打設管が取り付けられており、打設管を遮水室底面まで誘導し、トレミー打設により打ち上げてくることで遮水室内に土質系遮水材を充填する。なお本工事における打設長は 26.8 m、遮水室 1 室あたりの打設量は約 6.7 m³ であった。

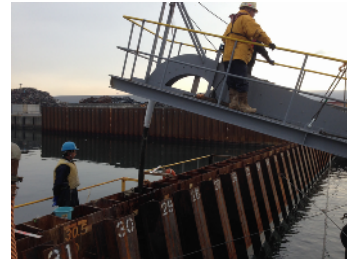
(3) 土質系遮水材の品質管理

土質系遮水材の品質管理手法として、直接透水係数を確認しながら製造するのが理想的であるが、試験に要する時間や設備等を考えると非現実的な手法である。含水比と透水係数の間には図-2 に示したような一義的な関係が見出されるため、含水比の計測により間接的に透水係数を評価することができると考えた。そこで本工事における土質系遮水材の製造においては、含水比試験による品質管理手法を採った。

本工事における土質系遮水材の設計透水係数は 8.0×10^{-9} m/s 以下と定められていたが、品質管理値として安全側である 4.0×10^{-9} m/s と設定した。図-2 に示した土質系遮水材の w - $\log k$ 曲線を外挿すると、この品質管理値に対応する含水比は 66.7% となり、この値を配合設計上の管理値とした。しかし、現場における製造においては計量



(a) ミキシングバケットによる混練



(b) トレミー管を用いた遮水室内への打設

写真-1 土質系遮水材の製造及び打設状況

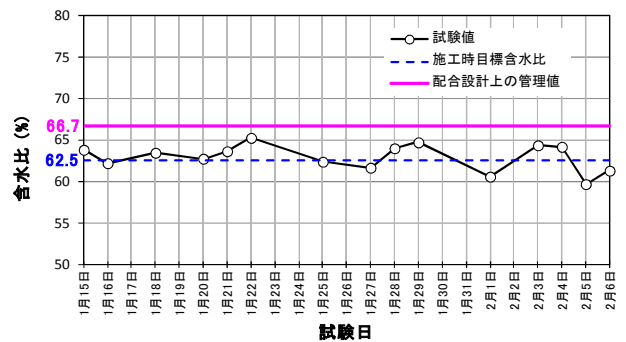


図-3 土質系遮水材製造時の含水比試験結果

誤差や品質のばらつきが生じることが予想された。含水比のばらつきの度合いは、過去の施工実績を元に 4.0 % とし、製造時の目標含水比を $66.7 - 4.0 = 62.7 \div 62.5$ % と設定して含水比管理を行った。なお含水比試験は全水槽（土質系遮水材 10 m³）毎に対して実施し、製造日毎に平均値を求めた。図-3 に含水比試験による品質管理結果を示すが、全ての測定含水比は配合設計上の管理値以下となった。また製造後に任意のタイミングで採取した土質系遮水材に対し、室内透水試験を実施したところ 2.37×10^{-9} m/s であり、品質管理値を十分満足する結果となった。

4. 箱形鋼矢板の打設施工性調査

(1) 調査概要

継手部に膨潤性遮水材を塗布した箱形鋼矢板の施工性を調査するため、継手を嵌合させて打設する連続 10 枚の箱形鋼矢板について、打設速度および打設に伴う継

手部の温度を計測した。図-4 に調査箇所土質柱状図および箱形鋼矢板伏図を示す。打設した箱形鋼矢板の長さは30.5 mで、海底地盤への打込み長さは約21.3 mである。ウォータージェットを併用しながら、バイブロハンマにより振動を与えて打設した。最下端の不透水層への根入れに際しては、ウォータージェットを停止させた状態で打設した。なお箱形鋼矢板の打設前には、継手全長にわたり膨潤性遮水材を塗布している。継手部の温度計測については、写真-2 に示すように海水による温度低下の影響を極力受けぬよう、箱形鋼矢板の頂部に熱電対を設置した。

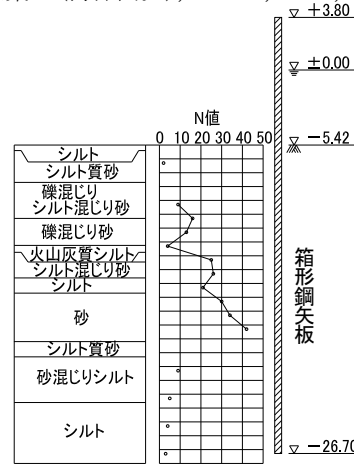


図-4 調査箇所土質柱状図および箱形鋼矢板伏図

(2) 打設時間

箱形鋼矢板の打設速度の指標として、バイブロハンマ稼働時間と箱形鋼矢板打込み残長さの関係を図-5 に示す。計測を実施した10本中9本は概ね一定の速度で打設されていることがわかる。一方、最も打設に時間を要した残りの1本(同図中Box1)のみ、打設開始から6分経過した打込み残長さ10 m付近から打設速度が低下している。ただし、打設速度は一時的に低下したものの、貫入不能になることはなく、長くとも15分程度で打設を完了した。打設途中に継手の競り合いは確認できなかったことから、地盤の貫入抵抗が大きくなったことにより打設速度が低下したと推測される。このように、事前に塗布した膨潤性遮水材や、二重継手による打設時の競りが施工性に及ぼす影響は見受けられなかった。



写真-2 継手部の温度計測状況

(3) 打設時の継手温度

図-6 に計測した打設時の継手温度の時刻歴を示す。計測はサンプリング周波数1Hzで実施した。計測を実施した10本の箱形鋼矢板に関し、打設時の最大継手温度について図-7 に纏めた。最大継手温度は最も高くても100度程度であり、同図に併せて記した膨潤性遮水材の耐久温度160度を下回ることが確認された。図-6において、前節で述べた最も打設に時間を要した箱形鋼矢板(同図中Box1)に着目すると、打設開始直後と6分経過後付近で継手温度が上昇しており、打設速度の低下と対応していることがわかる。これは、一時的に静止状態となった箱形鋼矢板が動き始めるときに摩擦抵抗が大きくなったため、継手温度が上昇したのと考えられる。しかしながら、例え一時的に継手温度が上昇したとしてもその保持時間は短く、すぐに温度が低下することが確認された。これらのことより、箱形鋼矢板打設によって膨潤性遮水材に悪影響を及ぼすことはなかった。また例え継手の温度上昇が見られたとしても一時的なもので、膨潤性遮水材に影響を及ぼすほどの温度には至らないことが確認された。

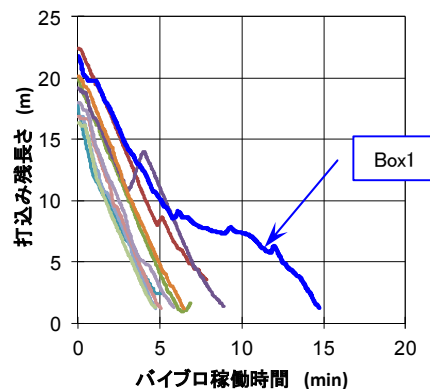


図-5 バイブロ稼働時間と打込み残長さの関係

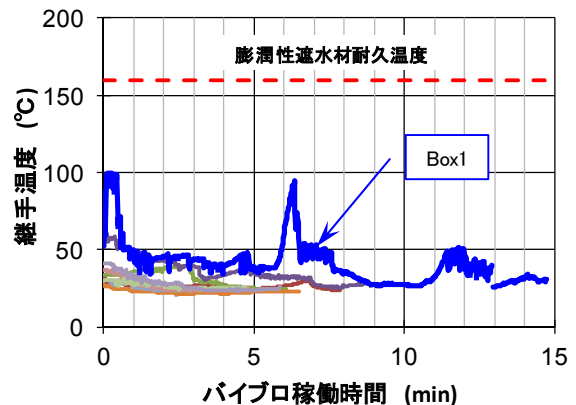


図-6 打設時の継手温度時刻歴

5. 箱形鋼矢板の遮水性能評価

(1) 試験概要

箱形鋼矢板の遮水性能を現地において簡易に評価するために、継手に挟まれた遮水室内で実施した水張試験の概要を図-8に示す。

水張試験は土質系遮水材充填前に実施する。遮水室内に水を張り、小型間隙水圧計により遮水室とコラムにおける内水位および外水位（潮位）を計測した。水張試験の状況を写真-3に示す。箱形鋼矢板壁では膨潤性遮水材を塗布した継手部、つまり側面遮水工の遮水性を評価する。側面遮水性能は文献5)を参考に、壁厚 D に対する換算透水係数 k_e の値を任意に設定し、式(1)により計算した内水位の経時変化と、実測した遮水室内水位を比較することで評価した。

$$h_m(t + \Delta t) = h_m(t) + \frac{k_e \cdot S \cdot L \cdot \Delta h \cdot \Delta t}{D \cdot A} \quad (1)$$

ここに、 $h_m(t)$ は時刻 t における内水位、 S は壁体延長、 L は壁体長さ、 Δh は内外水位差、 A は継手内平面積である。海面処分場では鉛直遮水壁背後の地盤を含めて、便宜上、壁厚0.5 mの透水係数に換算した換算透水係数 k_e を用いて遮水性能を評価する³⁾。「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル(改訂版)」においては、側面遮水の換算透水係数 k_e は 1.0×10^{-8} m/s以下であることが要求されている。これに倣い、本検討において2箇所の継手を合わせて壁厚0.5mと仮定し、遮水室内水位の変化を図-9のようにモデル化し換算透水係数 k_e を計算した。またコラム内水位の減少は蒸発および底面からの透水に起因するものと考え、実測した遮水室内水位はコラム内水位を用いて補正した。

(2) 試験結果

図-10に水張試験の結果を示す。図中には実測した内水位および外水位と併せて、式(1)により換算透水係数 k_e をいくつか変えて計算した内水位の経時変化を示している。また、同図(b)は(a)の縦軸のみを拡大したものである。継手部から漏水が確認されるような状況を想定し、換算透水係数 k_e を 1.0×10^{-6} m/sと仮定して計算した場合、計算した内水位は実測した外水位と連動して、大きく変動することがわかる。一方で、継手部の遮水性が極めて高い状況を想定し、換算透水係数 k_e を 1.0×10^{-8} m/sと仮定して計算した場合、計算した内水位は外水位変動の影響を受けず、また時間経過に伴う内水位の低下はほとんど現れないことがわかる。

実測した内水位は、所々短時間局所的な低下は見られるものの、実測した外水位と連動せず、大局的には時間

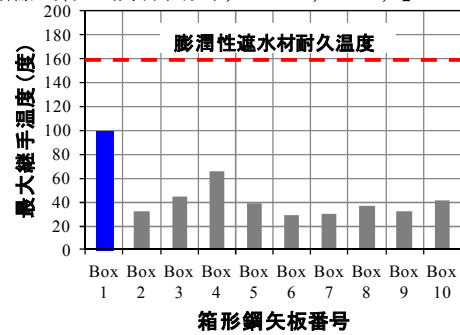


図-7 打設時の最大継手温度

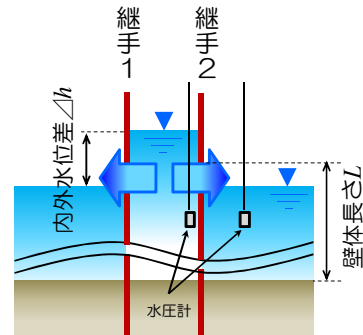


図-8 水張試験概要



写真-3 水張試験の状況

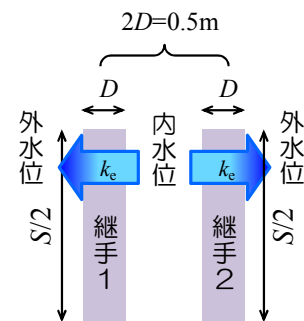


図-9 遮水室の透水モデル平面模式図

経過に伴う内水位の低下はほとんど観測されていない。実測した内水位は、換算透水係数 k_e を 1.0×10^{-10} ~ 1.0×10^{-9} m/sとして計算した内水位の間に位置することから、当該遮水室の換算透水係数 k_e の値は 1.0×10^{-9} m/s以下であると判断され、要求される遮水性能を有していると考えられる。

6. まとめ

管理型海面処分場の鉛直遮水壁として施工された箱形鋼矢板壁に関し、一連の施工を通じて実施した種々の調査・試験より、以下の知見を得た。

- (1) 購入可能な材料で構成した土質系遮水材の物理特性や製造工程について述べた。品質管理については含水比試験による手法を実施したところ、品質管理値を十分満足する結果が得られた。
- (2) 二重継手を有する箱形鋼矢板打設の施工性について調査したところ、継手に事前塗布した膨潤性遮水材や、二重継手による打設時の継手の競り合いが施工性に及ぼす影響は見られなかった。また打設時に継手の温度上昇が見られたが、膨潤性遮水材に悪影響を及ぼす程の温度上昇ではなく、例え一時的な温度上昇が生じたとしても、すぐに温度は低下した。
- (3) 土質系遮水材充填前の遮水室内に水を張り、一定期間の水位変化を観測するという簡易な方法により、継手毎の遮水性能を容易に評価できることを示した。また、本工事において施工した箱形鋼矢板壁の換算透水係数は、土質系遮水材充填前においても、関係法令に基づいて技術マニュアルに記述された値以下であった。

以上より、土質系遮水材充填箱形鋼矢板壁はバックアップ機能およびモニタリング機能を備える信頼性の高い遮水工であることを確認した。

謝辞：本研究は国立研究開発法人港湾空港技術研究所、新日鐵住金株式会社および五洋建設株式会社の三者における共同研究の一環として実施した。また本工事に関する種々の調査・試験の実施に際しては、名古屋港管理組合より多大なる協力を得た。ここに記して深甚の謝意を表する。

STUDY ON THE IMPERVIOUS PERFORMANCE OF BOX-SHAPED STEEL SHEET PILE WITH CLAYEY GEO-MATERIAL

Tomohiro TANAKA, Ayato TSUTSUMI, Toshiyasu MIYOSHI, Makoto YOSHIDA, Kazuhiko UENO, Naoya NAGAO, Takuzo KUZU and Yoichi WATABE

Box-shaped steel sheet pile with clayey geo-material has been constructed in order to apply as impervious seawall of the waste disposal site in coastal area. Box-shaped steel sheet pile has double joints where are sealed by water-swelling sealant, and it is secured a basic impervious performance. By filling the clayey geo-material into the chamber that sandwiched the joints as a fail-safe, the impervious performance of box-shaped steel sheet pile is improved. Field installation and permeability test for box-shaped steel sheet pile were conducted to demonstrate the workability and the impervious performance in the field. As results, breakage of box-shaped steel sheet pile did not occur during installation, and it was possible to install accurately. In addition, by simple method of observation on the change in water level, the impervious performance of box-shaped steel sheet pile was able to be evaluated easily.

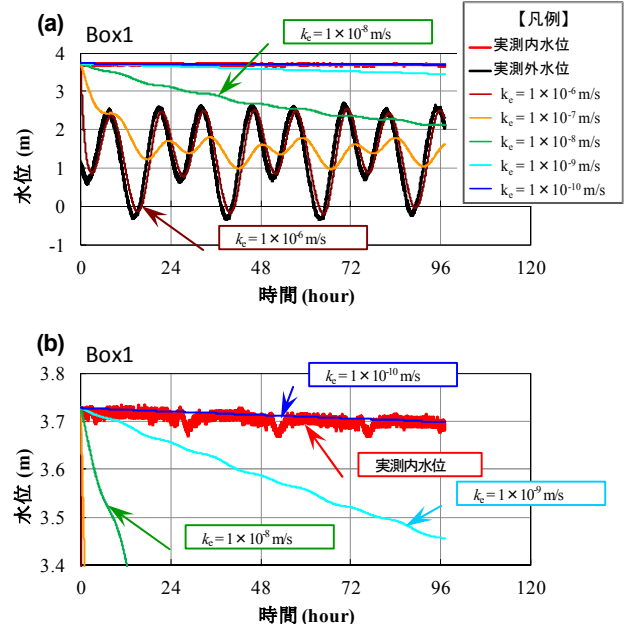


図-10 水張試験の結果

参考文献

- 1) 財団法人港湾空間高度化環境研究センター：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル（改訂版），134p., 2008.
- 2) 上野一彦，山田耕一，渡部要一：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，土木学会論文集 G, Vol. 64, No. 2, pp. 177-186, 2008.
- 3) 渡部要一，吉野久能，柿本龍二，山田耕一，鶴飼亮行，沖健，岡由剛，喜田浩，永尾直也，望月武，木下雅敬：鋼製遮水壁の遮水性能と適用性に関する研究，港湾空港技術研究所資料，No.1142, 65p., 2006.
- 4) 渡部要一，土田孝，斎藤邦夫，山田耕一，上野一彦：粘土系遮水材料における微視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.
- 5) 渡部要一，鶴飼亮行，伊野同：管理型廃棄物埋立処分場の遮水性能，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，VII-166, pp. 329-330, 2003.