

40. 廃棄物海面処分場の護岸構造に関する検討

A study on the construction of a waste disposal site at sea

荒木 健二*, 高木 克実**, 大川 賢紀**, 長澤 大次郎***

Kenji ARAKI, Katsumi TAKAGI, Katsunori OKAWA, Daijiro NAGASAWA

ABSTRACT ; Leaked pollutant from a waste disposal site at sea might develop into a wider environmental problem of sea pollution. In addition to the recently increased performance requirements, the technical manual for the construction of such waste disposal sites still has problems.

Assuming that there was no differential in the seepage from each joint, a study last year showed that the performance of the caisson type seawall was better than the double steel pipe seawall in seepage control performance by advection dispersion analysis. However, seepage control performance of the caisson type seawall included a supposition about bottom construction.

In this study, a rubble mound that had different kinds of seepage control materials filling the gaps in the rubble was suggested for bottom construction of caisson type seawall. Tests were then conducted to determine the efficacy of the different materials. Using a solid reticulation formation resin in the rubble mound, it was confirmed that the construction filled with non-solution micromolecule line seepage control materials had the highest performance. Based on this result it was predicted that seepage control performance would be sufficient even if it was added 100 years later.

KEYWORDS ; waste disposal site at sea, advection dispersion analysis, rubble mound

1 はじめに

日本における廃棄物最終処分場は、内陸から海面処分場へとその依存割合が移項しつつある。それに伴って、廃棄物の海面処分場における遮水技術の要求性能が高まっており、平成12年に港湾空間高度化環境研究センター（WAVE）より発刊された「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル」においても、その遮水構造に関し基本的指針が示されている。しかし、課題は残っており、廃棄物海面処分場周辺環境のみならず、広範囲に渡る汚染に対する信頼性を更に高める技術開発が急務であると考えられる。

現在、ケーソン式管理型廃棄物埋立護岸においては、背面に遮水シートを二重に施工することにより遮水構造を形成しているが、遮水シートの破損等により透水性の高い捨石マウンド部からの汚染物質の漏洩が危惧される。また、遮水シートは水深が増すと敷設出来ない問題もある。

本研究においては、捨石マウンド内に遮水材料を充填することにより、遮水型マウンド構造を提案し、その遮水性能に関する実験的検討を行った。実験は、捨石の隙間に遮水材料を充填した捨石マウンド構造の遮水性能を評価するため、碎石に遮水材料を充填した供試体を作成し、透水試験を実施した。また、地震等による変形後の遮水性能を評価するため、載荷試験を実施し圧縮ひずみを与えた後での透水試験もあわせて実施した。更に、その結果を移流分散解析にフィードバックすることにより、護岸の100年経過後までの遮水性能の検証を行った。

* 三菱重工業株式会社 横浜製作所 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd Yokohama Dockyard & Machinery Works

**三菱重工業株式会社 高砂研究所 Mitsubishi Heavy Industries, Ltd Takasago Research & Development Center

***財団法人 港湾空間高度化環境研究センター Waterfront Vitalization and Environment Research Center

(当時 三菱重工業株式会社 横浜製作所 Former Affiliation : Mitsubishi Heavy Industries, Ltd Yokohama Dockyard & Machinery Works)

2 実験内容

2.1 供試体作成方法

ケーソン式護岸底部の捨石の模擬材料として、碎石を用いた。碎石は 25mm のふるいを通し、19mm のふるいにたまったもののみとし、平均粒径は約 20mm、均等係数は 1 である。その碎石を実際の捨石マウンドの条件と同等の状態で積上げ、その間隙を遮水材料で充填した。充填する遮水材料には、海水中での不分離性、充填性等の検討結果から水溶性高分子系、非水溶性高分子系、セメント系の 3 種類の材料を選択した。また、碎石・遮水材料混合体の寸法は幅 20cm、高さ 20cm、長さ（透水方向）10cm とした。更に、非水溶性高分子系材料については、透水方向の長さの影響を評価するために、長さ 20cm の供試体を作成

した。それと同時に、Figure 1 に示すように、碎石と遮水材料の境界部分の遮水性を評価するために、遮水材料に対する付着力が高い立体網状成形樹脂を碎石間に挟み込み、遮水材のみからなる層を有した供試体も作成した。

Table 1 に、これらの碎石・遮水材料混合体を用い、次節に述べる装置を用いて実施した載荷試験、透水試験の条件を示す。透水試験は載荷試験の前後にて実施し、ひずみによる遮水性能の変化を検討した。また、Case5,6 および Case6' は同一の供試体を用いており、Case6 と Case6' は載荷試験を 2 回実施した後、透水試験を実施したものである。

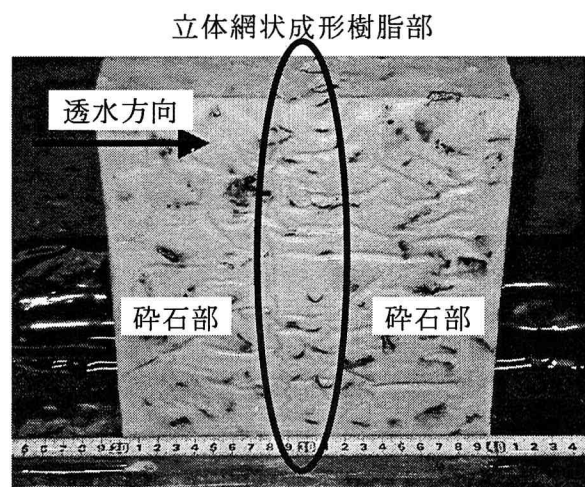


Figure 1 立体網状成形樹脂を有する供試体

Table 1 試験条件

	遮水材料	長さ(cm)	載荷条件	透水試験水圧(MPa)		立体網状成形樹脂
				載荷前	載荷後	
Case1	水溶性高分子系	10	0.235(MPa)	0.008	—	
Case2	非水溶性高分子系	10	0.235(MPa)	0.008	0.008	
Case3	セメント系	10	0.235(MPa)	0.002	—	
Case4	非水溶性高分子系	20	—	0.03	—	
Case5	非水溶性高分子系	20	0.235(MPa) (ひずみ 0.5%)	0.03 (漏水無)	0.1	有
Case6	非水溶性高分子系	20	ひずみ 3.0%	—	0.1	有
Case6'	非水溶性高分子系	20	ひずみ 3.0%	—	0.03	有

2.2 載荷試験

碎石・遮水材料混合体の圧縮ひずみを与えた後の遮水性能を評価するために、Figure 2 に示す載荷試験装置を用いて、実物ケーソンの接地圧 0.235(MPa)、あるいは、供試体のひずみが捨石マウンドの弾性変形範囲である 3% となるまで碎石・遮水材料混合体に一軸圧縮力を載荷することにより圧縮ひずみを与え変形特性を確認した¹⁾。この場合、側方圧力を 0 として載荷しているが、遮水性能を安全側で評価するため、供試体のひずみが大きくなる本方法で試験を実施した。また、変形により遮水性能がどのように変化するかを確認するために、本試験の前後に次に示す透水試験（遮水性能確認試験）を実施した。

2.3 透水試験（遮水性能確認試験）

Figure 3 に示す遮水性能確認試験装置を用いて、供試体の透水係数を算出する。水圧の調整は定量ポンプで行い、水圧と流量が定常状態となった時点での透水係数をダルシー則に従い以下の方法で算出した。

定常状態での単位時間辺りの流出量を $Q(\text{cm}^3/\text{sec})$ 、水頭差を $H(\text{cm})$ 、供試体長さを $L(\text{cm})$ 、供試体の断面積を $A(\text{cm}^2)$ とするとダルシー則より

$$Q=kiA=k(H/L)A, \quad k: \text{透水係数}$$

すなわち

$$k=QL/HA(\text{cm/sec})$$

が成り立つ。

3 解析内容

Figure 4 に解析モデルの概要図を示す。護岸構造物としてケーソン式護岸および二重鋼管矢板式護岸を想定した。シミュレーションには、移流分散に基づく地下水中の溶質移動に関する有限要素解析コードである Dtransu-3D²⁾ を使用した。

ケーソン式護岸の目地部（50m 毎）や二重鋼管矢板の継ぎ手部（2m 毎）の透水係数は、「管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル」³⁾ に基づき、2次元モデルにおける等価な透水係数を求めた。等価透水係数は、ケーソン式護岸が $5.98 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 、二重鋼管矢板式護岸が $1.93 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ となった。

前報告⁴⁾では、マウンドレス工法を想定し、ケーソン式護岸の捨石マウンド部の透水係数を考慮していなかったが、今回の工法では Case6 および Case6' の透水試験結果を用いて設定した。二重鋼管矢板式護岸の中詰め材は一般に用いられる細砂を想定し透水係数を $1.0 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ とした。

Table 2 に移流・分散解析に用いた透水係数の値を示す。ここでは、硬地盤のみを対象として検討した。

4 実験結果

4.1 接地圧載荷試験結果

Figure 5 a) に Table 1 に示す Case1,2,3 の接地圧載荷

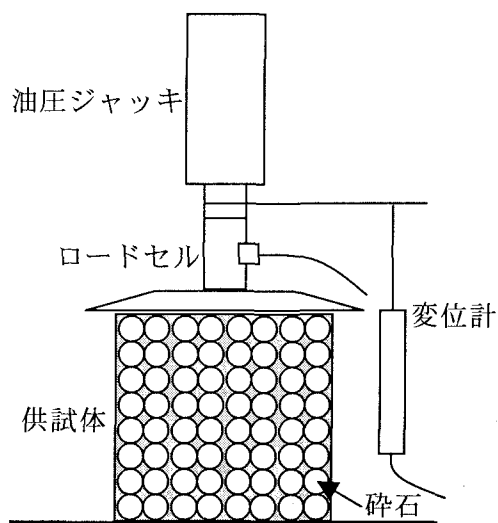


Figure 2 載荷試験装置

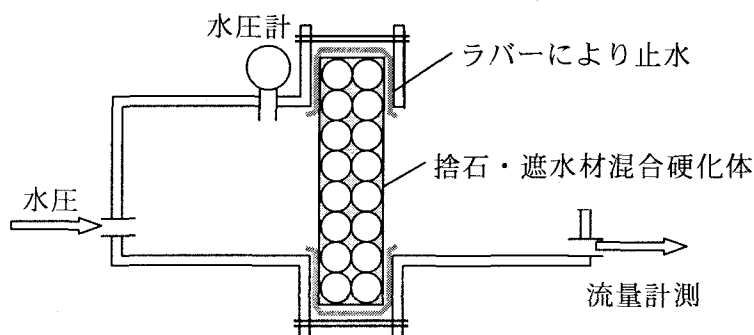
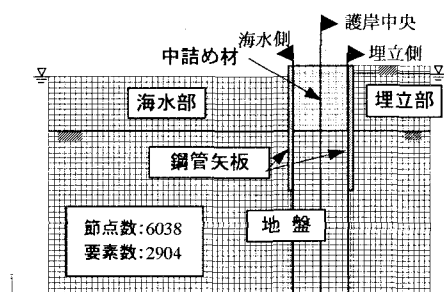
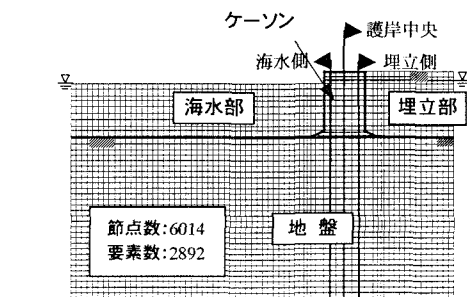


Figure 3 遮水性能確認試験装置



a)二重鋼管矢板式護岸



b)ケーソン式護岸

Figure 4 解析モデル

試験結果を示す。この図より、遮水材料として水溶性高分子系およびセメント系材料を用いた場合、実際のケーソン接地圧（0.235MPa）下に達する前に破壊してしまうことが分かった。このため、強度的にマウンドとして用いることが出来ない。一方で非水溶性高分子材料を用いた場合、ケーソンの接地圧に至るまで応力-ひずみ関係がほぼ線形であり、十分に弾性変形範囲内であると考えられるため、多少変形したときでも遮水性能が維持できると考えられる。

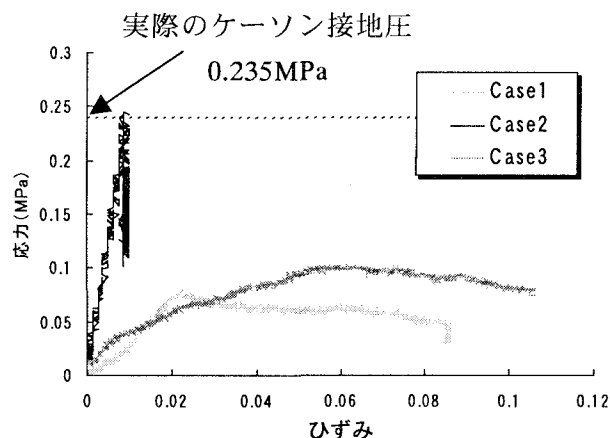
Figure 5 b)に Table 1 に示す Case5,Case6 の接地圧载荷試験結果を示す。Case5 は供試体の幅が20cm となっている上に、中央部に立体網状成形樹脂を設置しているため、case2 と強度が異なっている。また、Case5,6 は同一の供試体を用いており、2 回目に载荷した方がより大きなひずみが生じやすくなっている。したがって、地震等により大きな荷重・変形が発生した後の耐久性に関しては、更なる信頼性確保の観点から、今後詳細な検討が必要である。

4.2 遮水性能確認試験結果

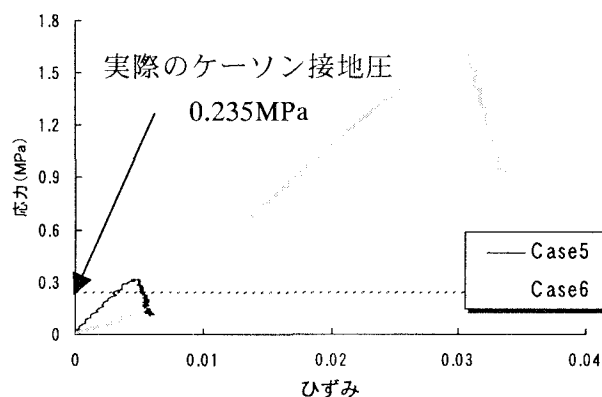
Figure 6 に Table 1 に示したケースについて実施した透水試験より、ダルシー則を用いて透水係数に換算した結果を示す。図中の線は、二重鋼管矢板の継ぎ手部の透水係数（層厚 50cm，透水係数 $1.0 \times 10^{-6} \text{cm/sec}$ ）をケーソンの幅（20m）に換算したものである。この図より、碎石・遮水材料混合体のみでは、継ぎ手の遮水性能に及ばないが、非水溶性高分子と付着力の高い立体網状成形樹脂のような材料を挟み込むことによって、2 オーダー程度透水係数を小さくすることが可能であった。これは、立体網状成形樹脂を用いない場合、表面を海水で湿らせた碎石と遮水材料との付着力が弱い場合、碎石に沿って水みちができてしまうが、遮水材料との付着力が高い材料を挟み込むことにより、碎石と遮水材の間の水みちを断ち切る効果が得られたためと考えられる。

Table 2 解析に用いた透水係数値

ケーソン式		二重鋼管矢板式	
硬地盤	1.70×10^{-7}	硬地盤	1.70×10^{-7}
継ぎ目部 (等価換算)	5.98×10^{-7}	中詰め部	1.00×10^{-3}
マウンド部 (実験結果)	7.88×10^{-6} (Case6) 1.16×10^{-6} (Case6')	継ぎ手部	1.93×10^{-6}



a) Case1~3



b) Case5~6

Figure 5 接地圧载荷試験結果

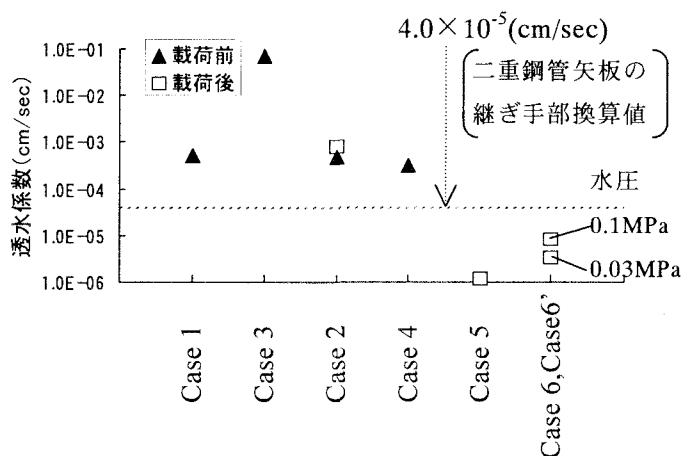


Figure 6 各ケースの透水係数比較

5 解析結果

Figure 7にCase5,6の透水試験結果より算出した透水係数を用いて、ケーソン式護岸を対象とし、汚染物質の移流・分散解析を実施した結果を示す。この図は100年経過後の海側における汚染濃度の鉛直分布を示している。マウンド部分の透水係数が大きくなっているCase6の汚染濃度分布において、海底面付近の漏洩が大きくなっていることが分かる。すなわち、マウンド部分のひずみをより大きく与えたCase6のように、マウンド部の遮水性能が少しでも低下すると、その部分での漏洩がより支配的となってしまう。したがって、汚染物質の漏洩の防止のため、マウンド部分の遮水性能を維持できる許容変形を把握し、場合によっては抑制する対策が必要となる。

Figure 8に二重鋼管矢板式護岸およびケーソン式護岸を対象とし、100年経過後の汚染物質の拡散状況を濃度のコンター図で示す。Table 2に示したように硬地盤（透水係数： 1.70×10^{-7} ）を想定しているため、地盤部分への漏洩はほとんどないことが確認できる。また、非水溶性

高分子材料に立体網状成形樹脂を組み合わせた構造により、二重鋼管矢板式護岸よりもケーソン式護岸の方が汚染物質の漏出を抑制できることが分かる。また、本構造形式では、3%のひずみを与えた後も透水係数は 7.875×10^{-6} と非常に小さいため(Case6)、コンター図に示したように、100年経過後のマウンド部においても遮水性能を確保できていることが確認できる。また、ここで解析したマウンド部の透水係数は、実際に想定される護岸内外の水位差3m相当の水圧約0.03MPa(Case6')よりも大きな0.1MPa(Case6)を用いたときの結果であり、透水係数は約2倍の大きさとなっているため、実際にはより高い遮水性能が期待できる。

Figure 9にFigure 8に示した2ケースについて、汚染濃度の鉛直分布の経年変化を示す。二重鋼管矢板式護岸においては、海底面より上方の護岸部分からの漏洩が支配的となっており、全体的に均一に漏洩している。中詰め材として、例えば粘性土を用いることで漏洩を低減させることが可能である⁴⁾が粘性土は地震時の挙動や施工性等についての検討が不十分であるのが現状である。一方、ケーソン式護岸は目地部の少ない構造であるため、マウンド部分からの漏洩が支配的である。更に、護岸本体の透水係数はケーソン式護岸の方が小さいため、汚染物質の漏洩に対してかなり時間を稼ぐことが可能となる。また、汚染漏洩のモニタリングに関しては、マウンド部分に注目して実施することで効率的な監視が可能となる。

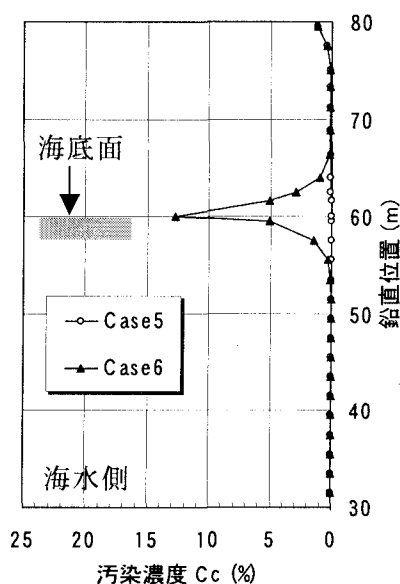
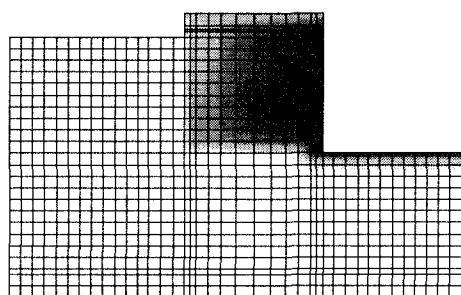
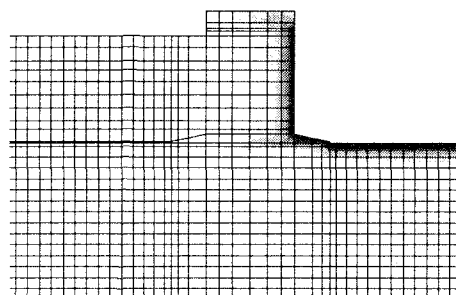


Figure 7 移流・分散解析結果

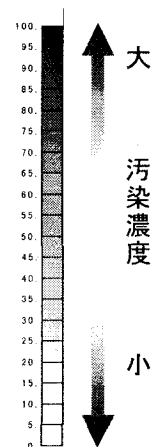


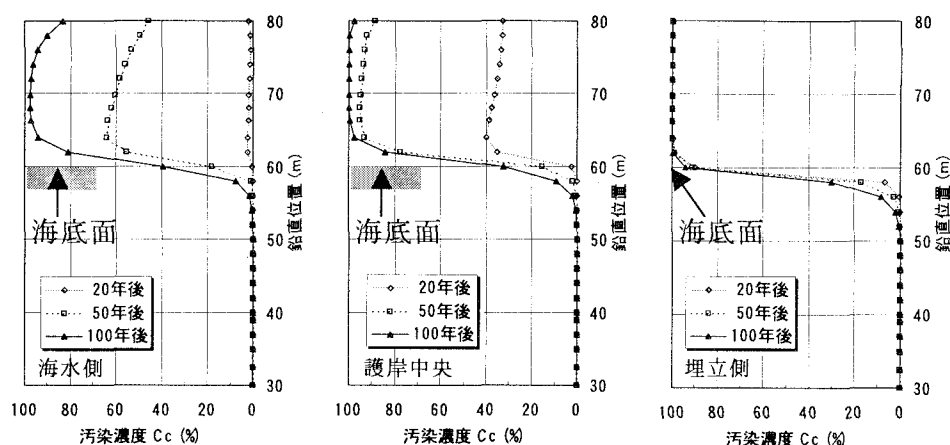
a) 二重鋼管矢板式護岸



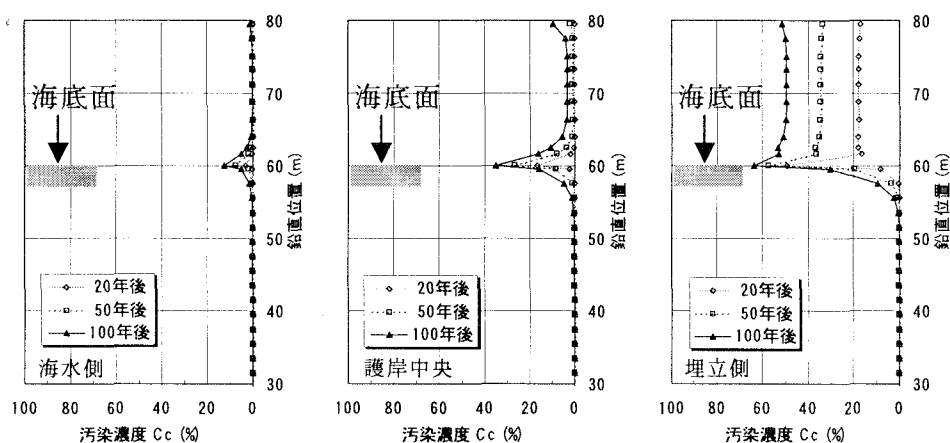
b) ケーソン式護岸(Case6)

Figure 8 100年経過後の汚染物質の拡散状況





a) 二重鋼管矢板式護岸



b) ケーソン式護岸(Case6)

Figure 9 汚染濃度の鉛直分布

6 結論

本研究においては、遮水材料3種類を用いて、ケーソン式護岸構造物の底面部の遮水性能を実験的に評価するとともに、その値をもとに汚染物質の移流・分散解析を実施し、100年スケールでの遮水性能を評価した。以下に、本研究により得られた結論を述べる。

- ・ 非水溶性高分子系遮水材料を碎石の間隙中に充填したものが最も高い遮水性能を有することが明らかとなった。さらに、立体網状成形樹脂を用い、遮水材料のみからなる層を有した供試体は、更に遮水性能が向上し、3%のひずみを与えた後においても、二重鋼管矢板式護岸の継ぎ手部分以上の遮水性能を有するため、地震や不等沈下に対しても有効である。
- ・ 碎石・遮水材料混合体を用いた透水試験により得られた透水係数を、汚染物質の移流・分散解析に用いることにより、マウンドにひずみを3%与えたとしても、100年スケールにおいて汚染物質の漏洩を二重鋼管矢板式護岸に比べて抑制可能な構造であることが確認できた。

また、今後は実用性を考慮しリサイクル材による遮水材料の開発を行っていくものとする。

<参考文献>

- 1) 土質工学会：粗粒材料の変形と強度, 1986
- 2) 西垣誠, 菱谷智幸, 橋本学, 河野伊一郎：飽和・不飽和領域における物質移動を伴う密度依存地下水流の数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.511/III-30, pp. 135-144, 1995.
- 3) 港湾空間高度化環境研究センター(WAVE)：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル, 2000
- 4) 荒木健二, 大川賢紀, 長澤大次郎：管理型廃棄物処分場の遮水性に関する解析的検討, 第10回地球環境シンポジウム講演論文集, pp. 283-288, 2002.