

管理型最終処分場（広島港出島地区廃棄物埋立護岸）の遮水技術等について

梶村 隆穂

広島県 広島港湾振興事務所 ポートビジネス21建設事業課
(〒734-0011 広島市南区宇品海岸二丁目23-53)



出島地区廃棄物処分場は、全国でも事例の少ない海面埋立の管理型最終処分場であるとともに、平成10年の大幅な技術基準改正後に計画されたものであるため、特殊な遮水技術を多用している。このうち、本文は、遮水構造の要である遮水シートによる遮水技術について、設計方法や個別課題への対応策について述べる。

キーワード 廃掃法、管理型最終処分場、遮水シート、LLDPE、法面滑り対策、高摩擦加工

1. 出島地区廃棄物処分場の計画概要等

(1) 計画概要

出島地区廃棄物処分場は、広島県の西部地域から発生する廃棄物を適正に処理し、生活環境の保全を図るため、広島港出島地区港湾整備事業地内に海面埋立による公共関与の管理型最終処分場として計画した。

当処分場に係る計画概要は表-1及び図-1のとおり。

表-1 出島地区廃棄物処分場の計画概要

項目	内容
位置	広島市南区出島二丁目地先
事業期間	平成14年度～平成22年度
処分場面積	18.12ha
廃棄物埋立面積	16.60ha
埋立容量	264万m ³
廃棄物容量	190万m ³
廃棄物搬入期間	平成23年度から10年間
廃棄物搬入方法	五日市地区積出基地から海上搬入
護岸天端高	C. D. L+8.5m
高潮時設計潮位	C. D. L+6.20m
埋立高	C. D. L+5.5m
場内管理水位	C. D. L+3.0m
埋立後土地利用	緑地

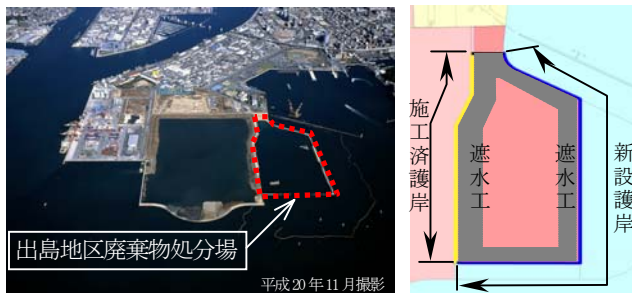


図-1 出島地区廃棄物処分場概要図

(2) 主な経緯

平成14年9月 処分場設置に係る環境影響評価手続き終了
平成15年3月 広島市長から処分場設置許可（廃掃法関係）
平成15年8月 工事着手
平成22年度 廃棄物処分場完成予定

(3) 技術基準（技術省令）の改正

平成10年6月に「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の一部を改正する命令（平成10年総理府・厚生省令第二号）」（改正命令）が公布・施行された。

当時、環境問題がクローズアップされ、住民の環境悪化への不安等に対し、より安全性を高め、監督官庁の審査監督の厳格化を目指すため、構造基準等の強化及び明確化を目的として、技術基準が改正されたものである。

この基準は、基礎地盤、遮水層及び遮水層上部の保護層を備えたものとする等の遮水工の基本構造が明示され、遮水層の二重化や遮水効力の定量基準が規定されるなど、当処分場の遮水構造設計に大きく影響している。

2. 遮水構造の決定

(1) 経緯：技術検討委員会の開催

管理型の廃棄物埋立護岸の設計条件の設定、護岸形式及び遮水工の選定にあたり、有識者で構成する委員会を設置し、平成13年12月から計3回開催し、検討を重ねた。

委員会の名称は「広島港出島地区廃棄物埋立護岸技術検討委員会」とし、委員長は、善功企九州大学大学院工学研究院建築デザイン部門教授（当時）にお願いした。

委員会での検討対象は、設計の基本条件から維持管理計画まで多岐に渡っているが、ここでは、遮水構造の決定経緯について説明する。

(2) 遮水構造の比較検討

護岸構造は、大きく分けて次の二種類の構造を設定し、比較検討した。なお、比較検討は、新設護岸と施工済護岸の遮水構造とでそれぞれ行っているが、以下では新設護岸における検討のみを述べる。

a) 比較案 1：ケーソン・二重遮水シート護岸

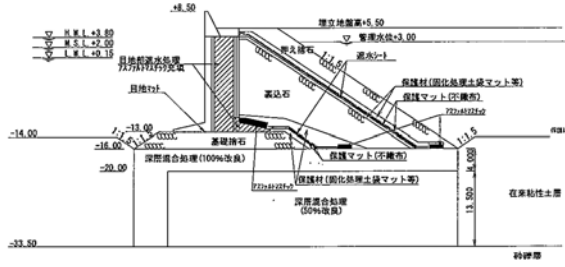


図-2 比較案 1 (新設護岸)

表-2 比較案 1 の構造概要

構造項目	新設護岸(施工済護岸は略)
地盤改良	CDM (深層混合処理) 工法(二重目遮水シート敷設部まで改良)
本體工	ハイブリッドケーソン
遮水方式	二重遮水シート
一重目遮水	ケーソン部：ケーソン本体+目地遮水基礎捨石背後：遮水シート(CDM密着)
二重目遮水	裏込材背後：遮水シート(CDM密着)
遮水シートの構造	保護マットと保護材による多重防護構造
概算工事費	20,400千円/m (L=1,129m)
特徴等	遮水シートは地震時の追随性が有る。アスファルトマスチック採用による施工性と遮水性の向上。

b) 比較案 2：二重鋼管矢板護岸

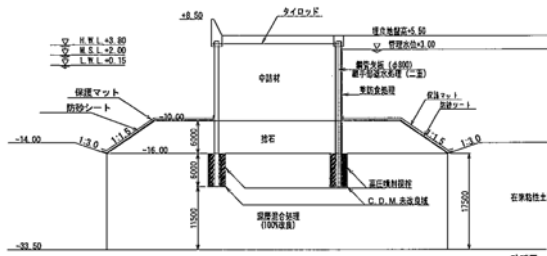


図-3 比較案 2 (新設護岸)

表-3 比較案 2 の構造概要

構造項目	新設護岸(施工済護岸は略)
地盤改良	CDM (深層混合処理) 工法(鋼管矢板根入れ部は高圧噴射攪拌工法)
本體工	二重鋼管矢板+中詰材
遮水方式	背面鋼管矢板継手二重充填遮水+鋼管矢板根入れ部不透水性改良
概算工事費	27,500千円/m (L=1,129m)
特徴等	鋼管矢板継手の二重充填(アスファルトマスチック)。CDMによる矢板長の軽減。根入れ部は鋼管矢板建て込み後充填

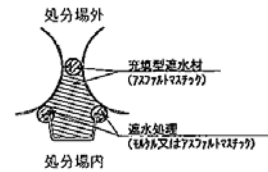


図-4 比較案 2 の継手遮水の構造詳細 (新設護岸)

c) 比較検討結果

当該出島地区は、水深が -10m~-15m と比較的深く、軟弱な粘性土が15m以上堆積している。また、海域は比較的静穏で、波浪による制約が少ない。従って、比較案 1 の場合、比較的水深が深い箇所での潜水作業を伴うものの、作業は可能である。

一方、比較案 2 の場合には、比較案 1 と同様に大規模な地盤改良が必要となり、かつ大口径の鋼管矢板が必要となるため、経済性では比較案 1 が優れている。

比較案 1 では、経済性での優位性に加えて、遮水シートの保護材として固化処理土を用いることにより、遮水シートの浮き上がり防止対策として効果的であるとともに、幾層にも設けることにより、遮水シートの多重防護、多層遮水構造が築造できる。

一方、比較案 2 では、比較案 1 と比べ水中施工が少なく施工性に優れているが、CDMへの根入れ部の固化及び遮水処理が難しい。

これらのことを勘案し、本地区では、比較案 1 のケーソン・二重遮水シート護岸 (以下、本護岸という。) を採用することとした。

比較検討結果に基づく実施設計を行い、その後の細部の詳細な設計を経た、最終的な遮水構造は図-7のとおりである。

d) 耐震性の検討

本護岸の遮水機能が、将来想定される大規模地震においても十分確保されることについて次のとおり確認した。設計震度算定時の重要度係数は、1.0でなく1.2とした。

数値シミュレーション (地震応答解析) により、護岸部の遮水シートの伸び率を定量的に把握した。具体的には、地震動継続中の最大変位量及び地震動終了後の残留変位量からそれぞれのシート伸び率を求め、許容値と比較した。なお、廃棄物の物性値の不確実性 (アンノンファクタ) を考慮し、廃棄物が完全液状化した場合もあわせて確認した。解析結果の一例は図-5のとおり。

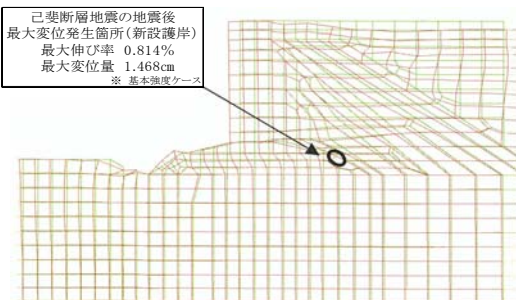


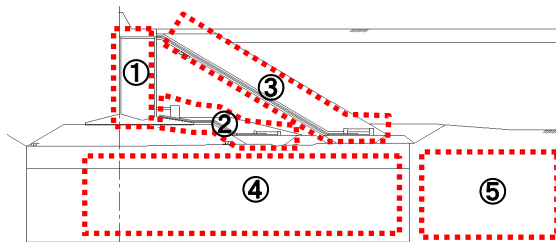
図-5 遮水シートの変位状況の解析結果例

結果は、標準部の遮水シートの伸び率の最大値は1.6%と算定され、各種の遮水シートの伸び率以内(30%(ゴム系)~860%(ポリエチレン系))となり、安全性を確認した。また、隅角部では特異な変動が予想されるため別途検討し、伸び率の最大値が4.8%と算定され、これについても安全性を確認した。(比率は、いずれも新設護岸における完全液状化のケース。)

e) 採用案の特徴

採用した護岸構造の特徴は次のとおりである。

- ① 完全に分離した二重遮水構造である。(図-6)
- ② 保護マット(不織布)と保護材(固化処理土)による多層防護・多層遮水構造である。
- ③ 遮水シートと地盤改良天端(CDM)の接する部分について、アスファルトマスチックで密着させることにより、遮水性を向上できる。
- ④ 地盤改良幅を二重目シートの先までとして、耐震性の向上を図るとともに、圧密沈下に伴う遮水シートの沈下を抑制できる。
- ⑤ ケーソンをハイブリッドケーソン(鋼板と鉄筋コンクリートによる合成版構造のケーソン)とすることにより、ケーソンの目地数を減少させ、水密性と施工性の向上が図れる。



区分	細目	No	遮水方法
側部遮水	一重目	①	ケーソン本体(ケーソン間目地はアスファルトマスチックを打設)
		②	遮水シート(両端部はアスファルトマスチックで密着)
	二重目	③	遮水シート(底面側の端部はアスファルトマスチックで密着)
底部遮水		④	深層混合処理改良地盤
		⑤	在来粘性土層

図-6 遮水方法の説明図

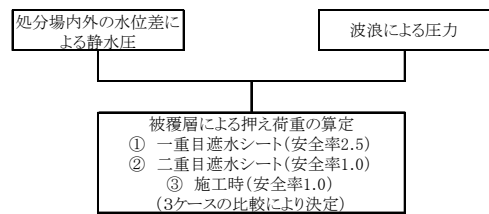
(3) 押え捨石厚さの設計計算

本護岸の設計計算の中で特殊と思われる、押え捨石厚さの検討について以下に述べる。

捨石マウンド部や裏込工背後に敷設する遮水シートは、その遮水機能のため、波浪に起因する圧力や処分場内外の水位差による静水圧が作用する。

よって、遮水工の安定性の確保の観点から、遮水シートの被覆(シートの浮き上がり防止)のため、波浪や潮汐により作用する圧力の合計値より大きな荷重を載荷することとし、本護岸では、押え捨石を計画した。設計数量は、施工済護岸も含めて約52万m³である。

押え捨石の検討フロー(図-8)及び方法を以下に示す。



※ 静水圧及び波浪による圧力は、一重目及び二重目を同一と設定

図-8 押え捨石厚さの検討フロー

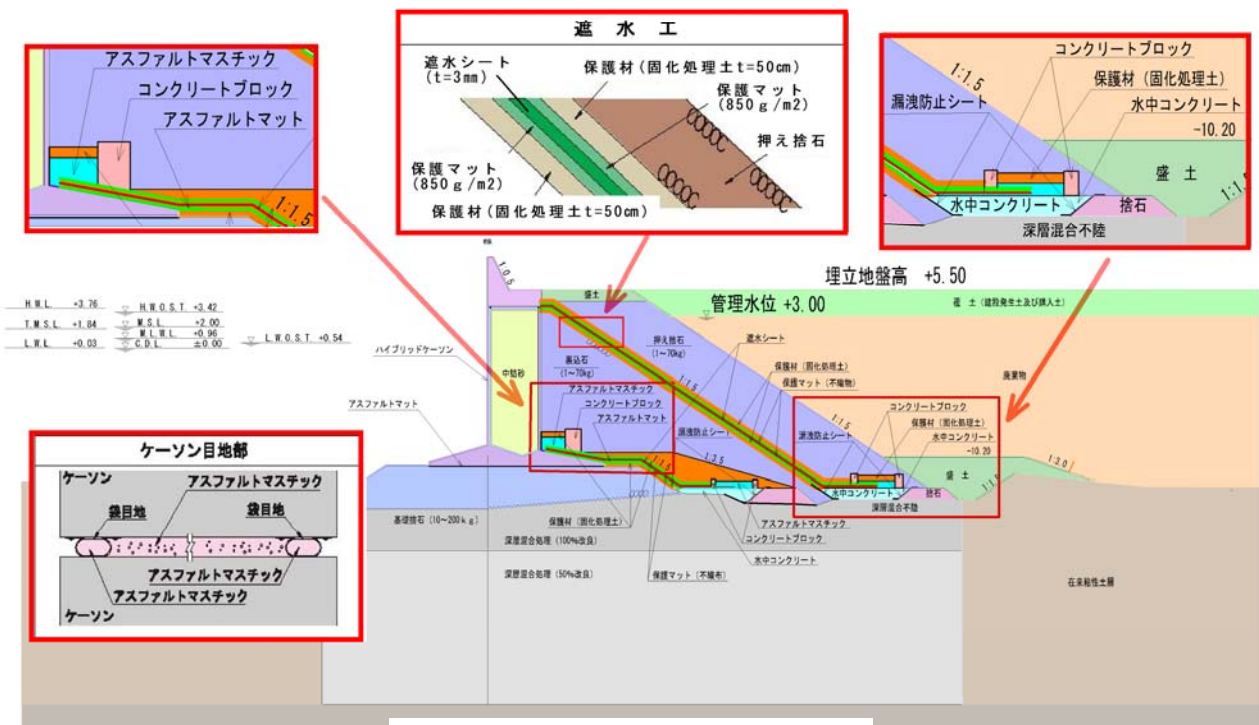


図-7 標準断面図(新設護岸(最終))

ここで、高潮時設計潮位 (C. D. L+6.20m) は、伊勢湾台風規模をルース台風コースに乗せ更にそのコースをずらして気象 (台風) 偏差の最大値を推算し、朔望平均満潮位にこれを加え算出した。(なお、既往最高潮位 (MXHWL) はC. D. L+4.76m。)

a) 処分場内外の水位差による静水圧 (F1)

海面処分場内外の水位差により生ずる静水圧は、処分場外の水位を高潮時設計潮位のC. D. L+6.20mとし、処分場内の水位を管理水位のC. D. L+3.00mとして算定した。

b) 波浪による圧力 (F2)

捨石マウンドや裏込め石の法面に遮水シートが敷設される場合には、捨石マウンド部や裏込め部は、密閉されることとなるため、ケーソン前趾にかかる圧力が減衰せずに遮水シートに作用すると考えられる。

ケーソン前趾に作用する圧力Pwは、直立壁に作用する波力 (合田式) により算定した。

c) 押え荷重の算定

遮水シートの安定性を確保するためには、処分場内外の水位差による静水圧の合力F1と、波浪による圧力の合力F2の合計よりも大きな押え荷重が必要となる。この押え荷重は次式により求められる。

$$F1 + F2 = \frac{1}{f} \times P$$

P : 試行くさび法で求めた被覆層に対する

受働抵抗の合力 (kN/m)

f : 安全率

ここで、二重目遮水シートの安全率は1.0と設定した。これは、外水位の設定を高潮時設計潮位としていること、検討対象が水圧であり推算誤差がないこと、対象が二重目シートであること等を踏まえて設定した。

また、一重目シートの敷設が全て終えた段階での安定性の確保も確認することとした。(施工時の検討)。

結果的には、二重目シートの敷設位置をケーソンの肩から敷設することにより、裏込め石の施工によって必要厚は確保されるという結果になった。

なお、検討結果の例は、表-4及び図-9のとおり。

表-4 押え捨石厚の検討結果例

検討ケース	被覆層の天端幅 (m)	決定幅
一重目遮水シート	5.50	9.90
二重目遮水シート	9.90	

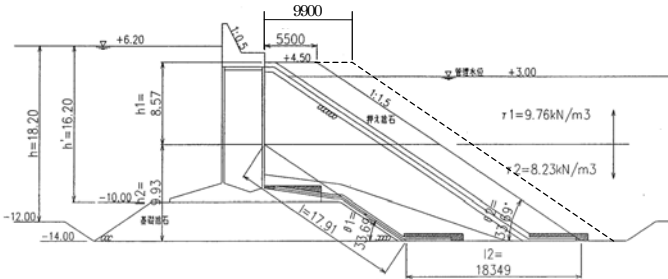


図-9 護岸及び被覆層の諸元

3. 遮水シートの材質等の決定

(1) 材質選定における経緯と考え方

以下では、遮水シートの材質選定における設計の考え方や経緯等について述べる。

遮水工として使用される遮水シートの種類には、合成ゴム系・合成樹脂系やアスファルト系等がある。このうち、合成ゴム系・合成樹脂系の遮水シートは、応力-ひずみ曲線において、ひずみ増分に対して応力増分が比較的小さいもの、中程度のもの、大きいものを、それぞれ低弾性タイプ、中弾性タイプ及び高弾性タイプと分類²⁾されている。このうち、本護岸では中弾性タイプを使用することとして、遮水シートの性能を産業廃棄物処理施設設置許可申請書に明記した (表-5)。

表-5 遮水シートの要求性能

項目		試験方法	基準		
基本特性	厚さ	JIS K 6250	1.5mm以上		
	遮水性	JIS L 1099	1×10 ⁻⁹ cm/s相当以下		
	引張性能	引張強さ	JIS K 6251	140N/cm以上	
		伸び率	JIS K 6922	400%以上	
	引裂性能	引裂強さ	JIS K 6252	70N以上	
		せん断強さ	JIS A 6013	70N以上	
接合部強度性能		JIS K 6850	80N/cm以上		
耐久性などに係る特性	耐候性	引張強さ比	JIS A 1415	80%以上	
		伸び率比		70%以上	
	紫外線変化性能	引張強さ比	JIS K 6257	80%以上	
		伸び率比		70%以上	
	熱安定性	引張強さ比	JIS K 7114	80%以上	
		伸び率比		80%以上	
	耐薬品性	耐酸性	引張強さ比	JIS K 7114	80%以上
		耐アルカリ性	引張強さ比	JIS K 7114	80%以上
	安全性 (溶出濃度)		昭和48年環告第13号 昭和46年環告第59号	基準値以下	

この要求性能を1.5mmの厚さのシートで満足するものとして、本護岸では、直鎖状低密度ポリエチレンシート (Linear Low Density Polyethylene~LLDPE) を全国で初めて海面処分場で使用することとした。

陸上処分場ではポリエチレン系のシートは多くの使用事例があるが、従来の製品は比重が1.03未満であり海中に沈まないため、海面処分場では塩化ビニル系のシートであるPVCシート (低弾性タイプ) が使用されていた。

しかし、平成15年にポリエチレン系シートで高比重のものが新たに開発されたため、本護岸でこれを使用することとしたものである。

今回使用することとしたLLDPE (高比重) シートの特徴は次のとおりである。

基本特性	強度特性に優れる (PVCと比べ、引張強さ約2倍、伸び率約1.5倍、引裂強さ約3倍。通常のPVCは上記要求性能の引裂強さを満たさず。)
耐久性に係る特性	熱による品質変化 (強度低下等) は殆どない
安全性に係る特性	安全基準 (溶出濃度) を満足
比重	1.21
経済性	PVCに比べ劣る (滑落対策必要)

(2) 遮水シートの厚さの設定

遮水シートの厚さは、沈下検討や実証試験も実施しながら、3.0mmを使用することとし、設置許可申請書に明記した。以下に、遮水シートの厚さの決定経緯について述べる。

a) 施工済護岸における圧密沈下の検討

これまで本文では、新設護岸の検討部分を抽出して述べてきたが、沈下検討は施工済護岸についてのみ行っているため、施工済護岸の概要から述べる。

施工済護岸の標準横断面図は図-10のとおりであり、この護岸は、鋼製ケーソンが既に内護岸として施工済みであったところに遮水工を新たに計画した護岸であるため、ケーソン自体を遮水層と出来ない点や、遮水シートの端部を在来粘性土層に定着させる点で、これまで述べてきた新設護岸とは遮水構造が大きく異なる。

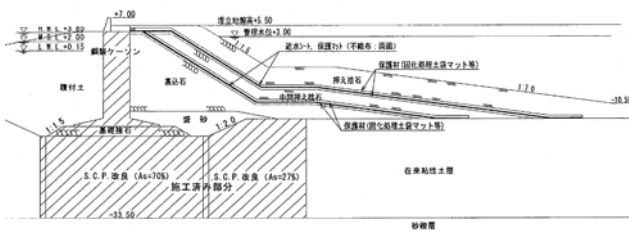


図-10 標準断面図 (施工済護岸)

この施工済護岸では、在来粘性土層に遮水シートを敷設するため、廃棄物の埋立に伴い圧密沈下が生じることとなる。前述の技術検討委員会では、地盤を連続体として捉える有限要素法によって圧密沈下による遮水シートの伸び率を算定している。(修正カムクレイ理論に基づく弾塑性有限要素法解析。)

結果は図-11のとおりであり、解析期間の100年における最大伸び率(隣接節点間の相対変位による)は、15.4%となった。この結果、伸び率の許容値(30%(ゴム系)~860%(ポリエチレン系))を満足し、安全性の確保を確認した。

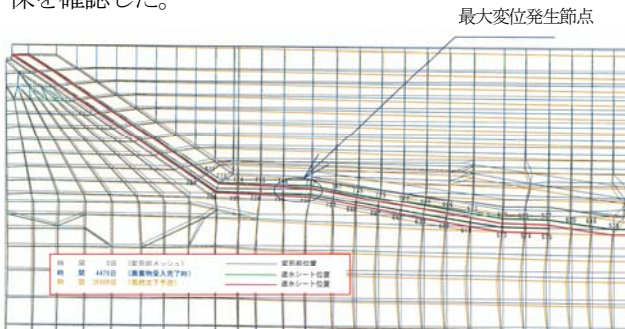


図-11 最終沈下量発生時等の変形図 (一部)

b) 遮水シート厚さの決定

沈下検討で得られた伸び率15.4%により、1.5mm厚の遮水シートを使用した場合には、沈下による伸びにより1.27mmの厚さとなる。しかし、一般的に遮水シートの最小厚は1.5mmとされているため1.5mm厚の遮水シートは使

用できない。

次に、2.0mm厚の遮水シートでは、15.4%の伸びが発生すると1.69mmの厚さとなる。しかし、遮水シートの原反同士の接合の際に行う熱溶着作業や、遮水シート接合時に展張した際の熱膨張による歪みの発生などにより、遮水シート厚に対する悪影響が懸念され、 $1.69 - 1.50 = 0.19\text{mm}$ の余裕では不十分と考えられる。

よって、3.0mm厚の遮水シートを使用することとした。

また、実証試験のうち耐圧試験の結果、初期強度に比べ1割程度の強度低下が確認されたが、LLDPEでは許容値を十分満足するレベルである。

なお、遮水シートについては、現場搬入前と搬入時に基本特性の試験を行っている。最近の試験結果例は表-6のとおり。

表-6 遮水シートの試験結果例

項目	基準	試験結果	
		t=1.5mm (H18.9.7)	t=3.0mm (H21.1.22)
厚さ	1.5mm以上	1.54	3.13
遮水性	$1 \times 10^{-9}\text{cm/s}$ 相当以下	8.9×10^{-13}	7.9×10^{-13}
引張性能	引張強さ	524	957
	伸び率	400%以上	620
引裂性能	引裂強さ	145	262
	接合部強度性能 せん断強度	80N/cm以上	170

※ 1.5mmの試験は、3.0mmの試験結果を1.5mm厚に換算するために行ったもの。

(3) 異種材料間の滑落対策

a) 滑落対策の必要性

LLDPEはPVCと比べ摩擦係数が小さいため、本護岸のような緩勾配とはいえない多層構造(図-12参照)では、遮水工に沿った法面での滑り破壊の可能性が懸念された。

よって、異種材料間における摩擦係数を室内試験により確認したうえ、安定性と対策方法の検討を行った。

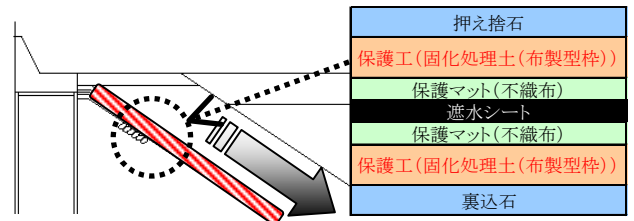
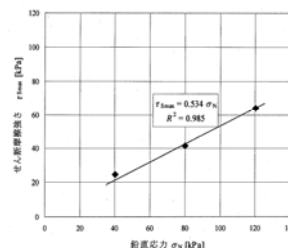


図-12 本護岸の遮水工の多層構造 (イメージ)

b) 摩擦係数設定のための試験

摩擦試験は、「土質工学会基準案 土とジオテキスタイルの摩擦特性試験方法: JSF T941-199X」に準じて、水浸状態において一面せん断による摩擦試験を実施した。この試験結果の事例は図-13及び表-7のとおり。



鉛直応力 (kPa)	せん断摩擦強さ (kPa)	摩擦係数
40.1	24.6	
80.0	41.7	
120.3	63.9	

図-13 摩擦試験結果例 (遮水シート-保護マット)

表-7 異種材料間の摩擦係数例

材料の組み合わせ	摩擦係数
① PVC - 保護マット	0.35
② LLDPE - 保護マット	0.257
③ LLDPE (高摩擦) - 保護マット	0.534
④ 布製型枠-保護マット	0.207
⑤ 布製型枠-保護マット(高摩擦)	0.408
⑥ LLDPE (高摩擦) - ASマット	0.662

※出島地区20-2工区試験結果による (①を除く)

c) 法面滑りに対する安定検討の概要

検討フローの概要は図-14のとおり。

検討対象の材料の組み合わせが非常に多いため、簡易なせん断試験を実施し、組み合わせの絞込みを行ってから、一面せん断試験を実施し、安定検討に用いる摩擦係数を算出した。

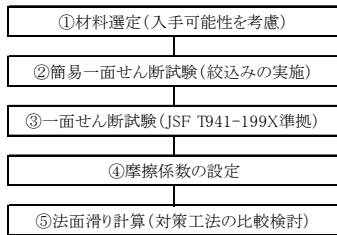


図-14 法面滑り検討フロー

法面滑りの検討は、極限平衡法により行い、押え捨石層及び保護工（固化処理土）層の土塊を剛体とし、遮水工間でのすべりについて、法面全体と法面部分の滑りの2つについて行った。法面全体の検討のモデルは、図-15のとおり。

なお、安全率については、埋立期間中の限られた期間に対する安定検討であることから必要安全率を1.10とするとともに、地震時については検討の対象外とした。

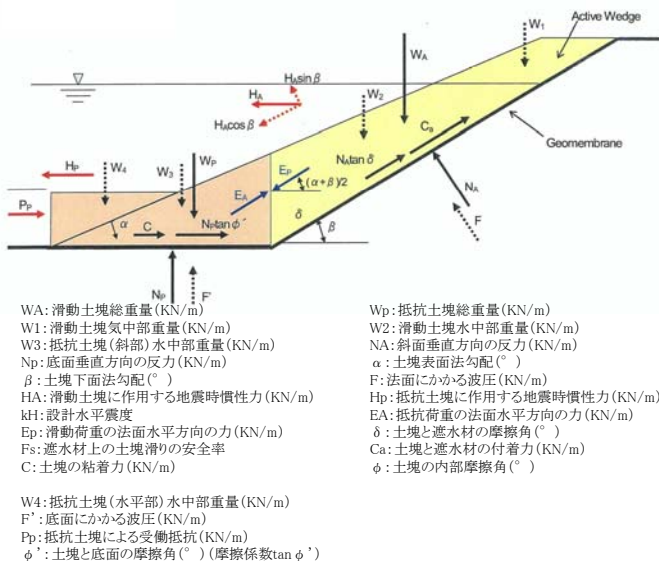


図-15 法面滑り検討モデル (法面全体)

d) 検討結果 (対策工法)

入手可能な使用材料候補の摩擦係数(0.2~0.6)により法面滑り計算を行ったところ、裏込の安定性の確保のためには、押え捨石の法尻部にカウンター（捨石）を設置

し滑動抵抗を持たせることが必要と判明した。

これを前提として、摩擦係数を3ケース設定し、比較検討を行った(表-8)。ケース3は、ケース1と比較すると、使用材料を高摩擦化することで摩擦係数を大きくすることができ、一方でカウンター量を少なくできる。

表-8 法面滑り比較検討結果

	ケース1	ケース2	ケース3
摩擦係数	0.35	0.40	0.50
使用材料	PVC 不織布 布製型枠	LLDPE(高摩擦) 不織布 布製型枠	LLDPE(高摩擦) 不織布(高摩擦) 布製型枠
費用	1.000	1.125	1.204
カウンター量(m ²)	41.6	26.1	15.5
費用	1.000	0.660	0.314
全体費用	1.000	1.104	1.165

※ 布製型枠は全て高摩擦。カウンター量は断面量の一例を記載

この比較検討結果や使用可能(入手可能)材料の摩擦係数、及び処分場容量確保の観点から、本護岸では必要な摩擦係数を0.40以上と設定し、これに対応した材料を使用するとともに、所要のカウンター材を計画することとした。(図-7 標準断面図(新設護岸(最終))参照)

なお、施工の際には、現場搬入前と搬入時に前述の摩擦試験を行って、所定の摩擦係数となっていることを確認している。実際に使用している材料と概ねの摩擦係数は表-9のとおりである。

表-9 使用材料と摩擦係数

材料	使用材料	摩擦係数
遮水シート	LLDPE(高摩擦)	0.5~0.6
保護マット	長繊維不織布(布製型枠側の面を高摩擦)	
布製型枠	特殊織布(#300)	0.4~0.6

4. おわりに

遮水シートによる遮水工に関し、上記の一連の検討を通じて、遮水性能の確実性をより万全なものとするのが可能となったものと考えている。

この他にも、本護岸では、アスファルトマシックによる端部密着方法の詳細や固化処理土(保護工)における急勾配の薄層打設といった課題について、技術的検証や実証実験などを行い、確実な施工を行ってきた。また、当処分場の工事は、これから最終締切りに向けた工事の山場を迎える。これらの取組み結果については、機会を改めて報告したいと考えている。

参考文献

- (財)港湾空間高度化センター、港湾・海域環境研究所：管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル
- (社)全国都市清掃会議：廃棄物最終処分場整備の計画・設計要領