

管理型廃棄物埋立護岸に適用する 根入れ式鋼板セルの遮水性能

Sealing performance of
embedded steel- plate cell as bulk-head for waste disposal

栗尾健司¹・御手洗義夫²・山村和弘³・高橋充⁴
北村卓也⁵・別所友宏⁶

Kenji KURIO, Yoshio MITARAI, Kazuhiro YAMAMURA, Mitsuru TAKAHASHI
Takuya KITAMURA, Tomohiro BESSHO

¹正会員 東亜建設工業株式会社 土木本部土木部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

²正会員 東亜建設工業株式会社 技術研究所 (〒230-0035 神奈川県横浜市鶴見区安善町1-3)

³正会員 東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁴東亜建設工業株式会社 土木本部設計部 (〒102-8451 東京都千代田区四番町5)

⁵正会員 住友金属工業株式会社 建設エンジニアリング事業部 (〒104-6111 東京都中央区晴海1-8-11)

⁶正会員 清水建設株式会社 土木事業本部設計部 (〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3)

More and more use of coastal areas for waste disposal has recently been expected because land-based disposal facilities have faced acute decrease of remaining capacity and large-scale facilities are possible only at coastal areas. While environmental consideration requires sever structural safety for the facilities to protect ambient area from contamination. This study quantitatively investigates sealing performance of embedded steel-plate cell as bulk-head for waste disposal by experiments and three-dimensional seepage flow analysis. Joint between cells is focused.

Key Words: Bulk-head for waste disposal, Embedded steel- plate cell,
Joint, Sealing performance

1. はじめに

近年, 我が国では生活環境の保全, 資源の有効利用の観点から, 循環型社会の形成が進められている。その一方で, 廃棄物を適正に処分するためには, 今後とも安全かつ適正な廃棄物処分場の確保が不可欠であるが, 陸上の廃棄物処分場の残容量が切迫してきており, 大規模計画が可能である海面処分場に対する期待が高まっている。

このような情勢の中, 本研究は, 遮水性に優れた構造形式と考えられる根入れ式鋼板セルを管理型廃棄物埋立護岸へ適用する場合に必要な遮水性能を定量評価するため, その透水経路となりうる継手部に着目し, 遮水性確認実験および浸透流解析を行ったものである。



図-1 管理型廃棄物埋立護岸の概念図

2. 根入れ式鋼板セル護岸の特性

(1) 構造概要

根入れ式鋼板セル護岸は, 鋼板を円筒形に溶接して組立てたセル殻とセル殻同士を接合するアーク(鋼板)を順じ地盤面に打設・根入れさせ, その後セル殻内とアーク部に中詰をすることにより安定が保たれる構造形式である。図-2, 図-3に根入れ式鋼板セル護岸一般図および継手部一般図を示す。

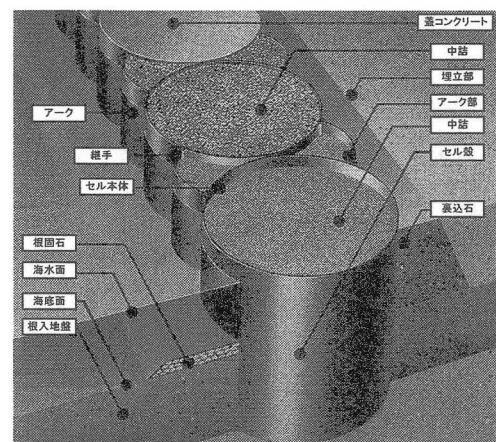


図-2 根入れ式鋼板セル護岸一般図

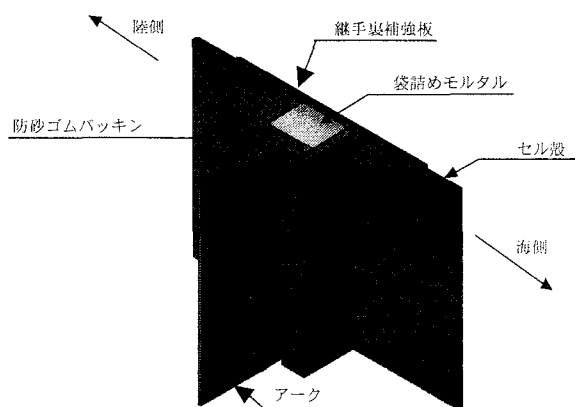


図-3 継手一般図

(2) 遮水特性

根入れ式鋼板セル護岸の遮水性能に関する特徴を以下に示す。

- ・ 本体構造の内、セル殻とアークは、それぞれ鋼板の溶接による一体構造であるため、完全な遮水性を有する。
- ・ 図-1に示すように遮水層(層厚5m以上、透水係数 $1.0E-05\text{cm/s}$ 以下相当)に直接根入れすることにより、堤体底部を経路とする透水を遮断することができる。
- ・ セル殻の直径は一般に10mを越える大径であり、図-4に示すように継手は護岸延長方向にセル1函あたり2箇所であるため、護岸延長あたりの継手数が鋼管矢板式護岸や鋼矢板式護岸と比較して少ない。
- ・ 継手は、図-4に示すように護岸延長方向に2列(海側と陸側)設けられるため、継手部分を遮水材料などで充填することで、二重の遮水壁としての機能が期待できる。

以上より、根入れ式鋼板セルは、鋼管矢板式護岸や鋼矢板式護岸と比較して、継手が少ない点の特徴であり、遮水性能に優れた構造であると考えられる。ただし、その遮水性能を定量評価するには、透水経路となりうる継手部の遮水性を確認する必要がある。

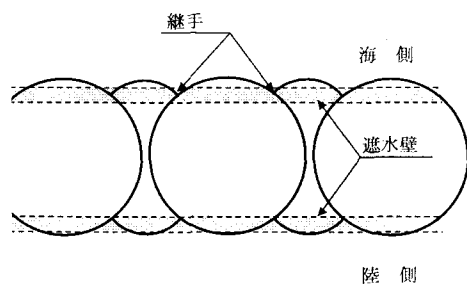


図-4 継手部の遮水性

3. 継手部遮水性確認実験

(1) 実験目的

本実験は、根入れ式鋼板セルを管理型廃棄物埋立護岸に適用するため、護岸としての遮水性の確認を目的とする。

管理型廃棄物埋立護岸の遮水性能としては、護岸を厚さ50cmの連続遮水壁とした場合、「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(以下、改正命令)」に準拠し、透水係数が $k \leq 1.0E-06\text{cm/s}$ であることが要求される^{1) 2)}。

前節で示すように根入れ式鋼板セル護岸の遮水性能を定量評価するには、透水経路となりうる継手部の遮水性を確認する必要があるため、実物大にて継手部の透水実験を行った。

(2) 実験ケースの設定

実験に用いた継手構造は2種類で、継手充填材を従来から施工されている袋詰めの膨張モルタルとしたTYPE-1(標準型、図-5)と、継手鋼材と継手充填材との接合面からの主な漏水要因となりうる袋体を取り除き、膨張モルタルを直接充填したTYPE-2(改良型、図-6)とした。

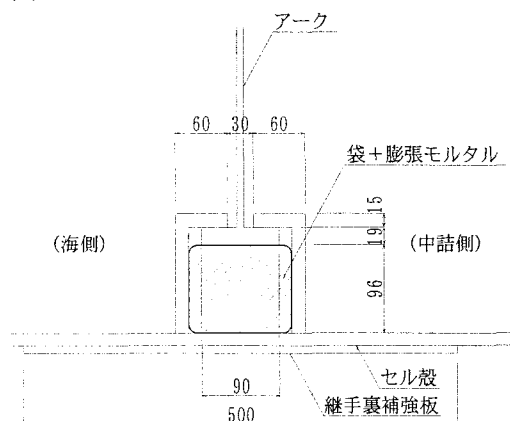


図-5 TYPE-1 (標準型)

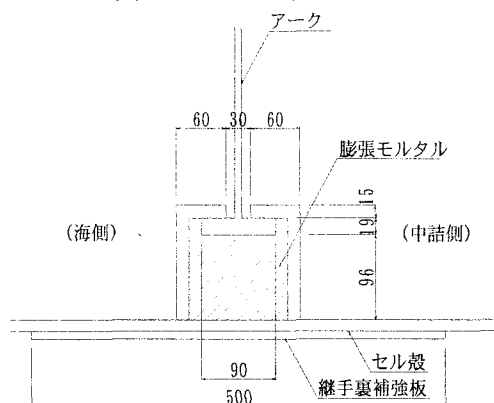


図-6 TYPE-2 (改良型)

実験ケースの設定に先立って、継手部の漏水経路の想定を行った。図-7および表-1に示すように、想定される継手部の漏水経路を大きく分けると、継手鋼材と充填材の接合面からの漏水(経路①, ③)と、継手に曲げなどが生じた場合に充填材内部に発生したクラックからの漏水(経路②)に分類できる。これらは、継手部への外力の作用状態に影響されるも

のと考えられる。

したがって、継手部の外力作用状態を想定し、外力が作用しない状態のCASE-A(常時)、地震外力によって曲げを受けた状態のCASE-B(地震時)、護岸の不同沈下などによりT型継手と継手充填材の付着が切れた状態のCASE-C(ズレせん断時)を設定した。

以上より、継手構造と外力作用状態をパラメーターとして表-1に示す8ケースについて透水実験を実施した。

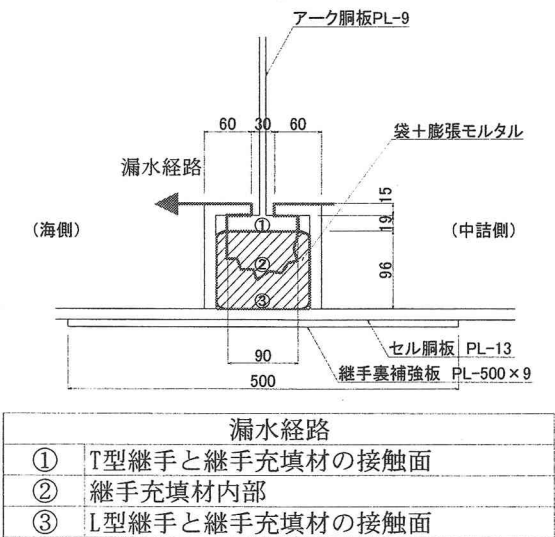


図-7 継手部の漏水経路の想定

表-1 実験ケース

継手構造	外力の作用状態	
TYPE-1（標準型） 袋体＋膨張モルタル	CASE-A	－
	CASE-B ₁	曲げ：縁端ひずみ300μ
	CASE-B ₂	曲げ：縁端ひずみ600μ
	CASE-C	せん断：剥離荷重
TYPE-2（改良型） 膨張モルタルのみ	CASE-A	－
	CASE-B ₁	曲げ：縁端ひずみ600μ
	CASE-C ₁	せん断：剥離荷重
	CASE-C ₂	せん断：剥離荷重の半分

(3) 継手供試体の製作

a) CASE-A(常時)の場合

長さを15cmとして継手供試体を作成し、膨張モルタルを打設し、28日間養生する。

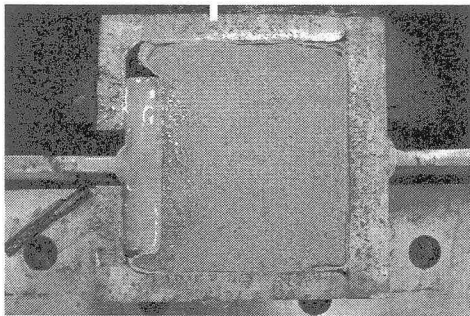


写真-1 継手供試体製作状況

b) CASE-B(地震時)の場合

長さ2.5m程度の継手鋼材を作成し、膨張モルタルを充填し、28日間養生した後、図-8、写真-2に示すように2点による曲げ载荷を行った。载荷の方向や曲げひずみ量は、事前に水深15.0m、設計震度 $k_h=0.2$ 、セル殻直径26.0mの護岸断面を想定した三次元FEM解析で求めた。载荷方向は、アーク鋼板側(T型継手)から継手方向に向かって行い、地震時の試算応力の1.5倍(縁端ひずみ300 μ)と3.0倍(縁端ひずみ600 μ)を与えたもので行った。次に、载荷後の継手鋼材から長さ15cmの継手供試体をダイヤモンドカッターにて切り出した。供試体の切り出し位置は、図-8に示すように継手鋼材中央部の曲げモーメントが最大かつ、均一な部分とした。

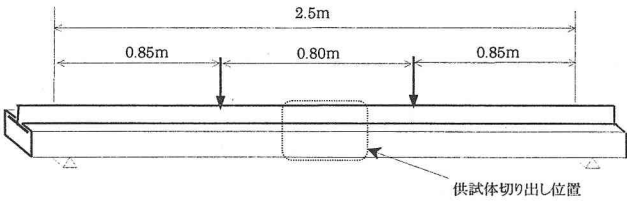


図-8 曲げ载荷点と供試体切り出し位置

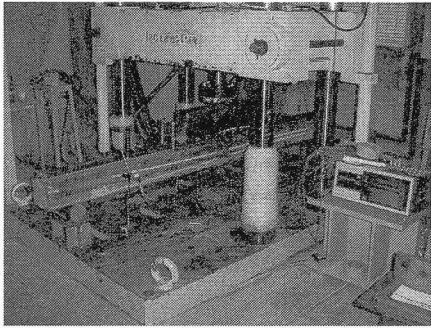


写真-2 曲げ载荷実施状況

c) CASE-C(ズレせん断時)の場合

長さを15cmとして継手供試体を作成し、膨張モルタルを打設し、28日間した後、写真-3に示すようにT型継手を継手断面と垂直に载荷し、T型継手と継手充填材の付着を切った(TYPE-2については、T型継手と継手充填材の付着を切るのに要した荷重の半分で载荷したケースも実施した)。

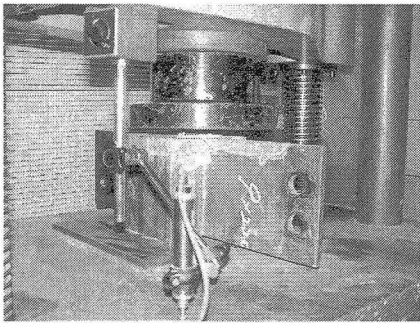


写真-3 ズレせん断载荷実施状況

(4) 透水実験

a) 実験装置と計測方法

実験装置は、図-9に示す鋼製の円筒形モールド（内径φ400mm）の中央部に供試体を設置し、水圧槽部分に水を充満させた後、一定のピッチで加圧し、大気圧状態にある一方の半円部分に供試体部分から漏水する構造となっている。また、ボルトや止水パッキン等で供試体以外の部分からの漏水を防止した形となっている。加圧は、図-10に示すように2重管ビュレット内の水を介して、空気圧で载荷した。漏水量の測定は、2重管ビュレット（500cc）内の水位変動（＝水圧槽への注水量＝継手供試体からの漏水量）として計測した。

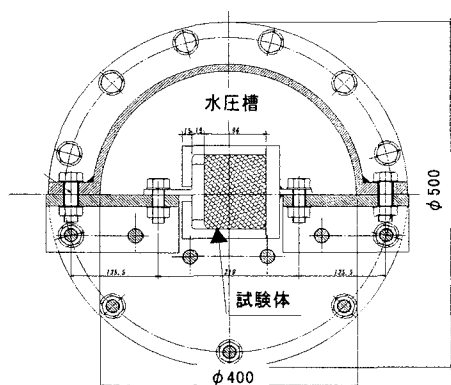


図-9 円筒形モールド構造図

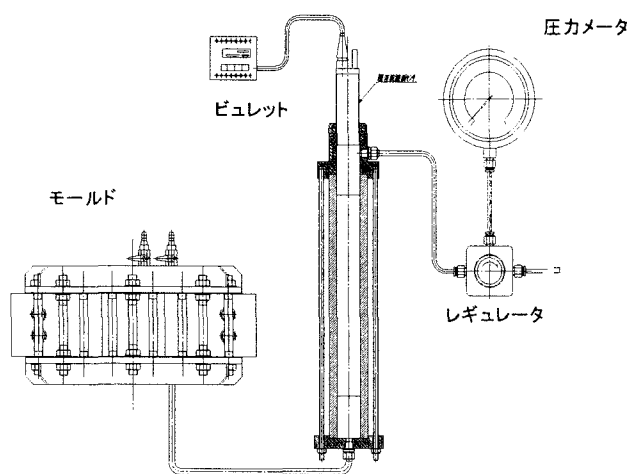


図-10 透水実験装置

b) 载荷ステップと水圧管理

透水実験は、表-2に示す载荷ステップにて段階的に水圧を载荷した。各段階の水圧上昇は、レギュレータを手動にて操作し、1ステップ当り10秒程度で上昇させる。なお、各ステップの载荷時間は1時間とし、圧力メーターにて減圧しないように定圧管理を行った。

表-2 载荷ステップ

载荷ステップ	1段階	2段階	3段階	4段階	5段階	6段階	7段階
载荷水圧 (kPa)	10	20	30	50	100	200	300

4. 実験結果の評価

(1) 換算透水係数による遮水性能評価

a) 換算透水係数の算出方法

根入れ式鋼板セル護岸の遮水性能を評価する場合、透水実験結果から算定した換算透水係数 ke を用いることができる。換算透水係数の算定は、ダルシー則を用いて行い、「改正命令」に準拠して継手部の浸透路長を50cmの壁体幅と見なした場合の換算透水係数 ke が $1.0E-06$ (cm/sec) 以下となれば遮水工としての遮水性能を満足できるものとして評価した。

式(1)に換算透水係数 ke の算定式を示す。なお、図-11に示すように継手は海側、陸側の2箇所となるが、換算透水係数の算定においては、この効果を安全側に捉え、海側あるいは陸側一方のみを考慮するものとした。また、一般的な根入れ式鋼板セルの最小直径を考慮して護岸延長10m当りに継手が1箇所あるものと仮定して評価した。

$$Q = A \cdot V = A \cdot ke \cdot i = A \cdot ke \cdot \frac{h}{L} \cdots (1)$$

$$ke = \frac{Q \cdot L}{A \cdot h}$$

ここで、 Q は浸透量（透水実験計測値）、 A は断面積（供試体幅15cm×想定継手間隔1,000cm）、 V は浸透流速、 ke は換算透水係数、 i は動水勾配、 h は水頭差（载荷水圧）、 L は換算浸透路長（50cm）を表す。

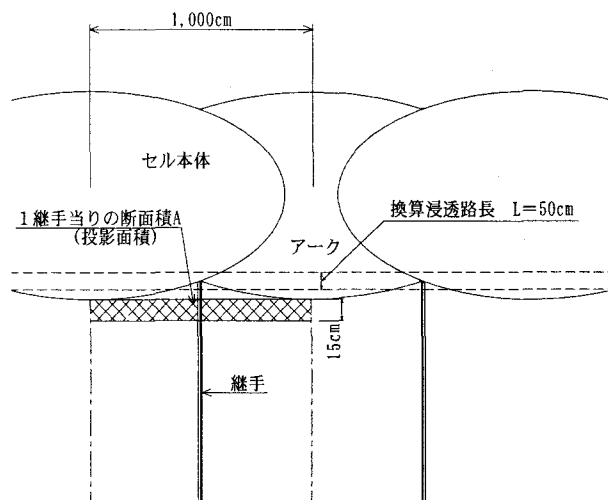


図-11 今回の実験における換算透水係数の考え方

b) 換算透水係数の算定結果

図-12に透水実験結果を用いた根入れ式鋼板セル護岸の換算透水係数の算定結果を示す。

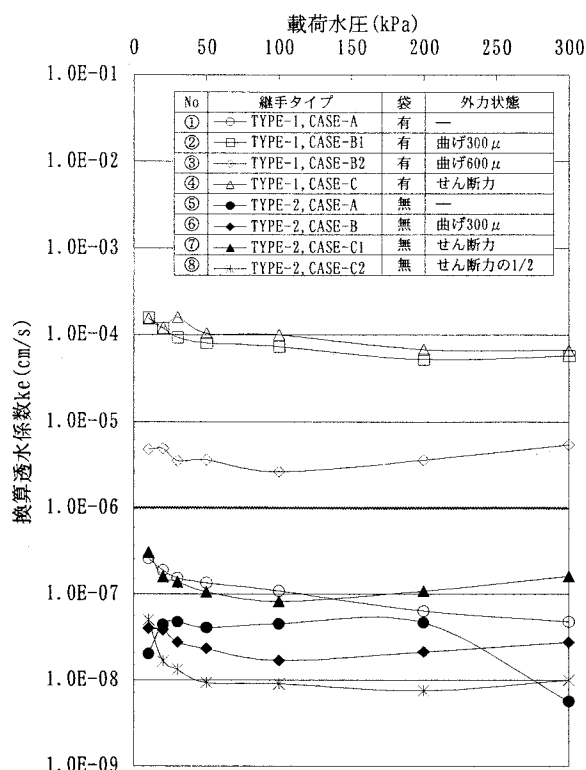


図-12 換算透水係数 k_e の算定結果

c) TYPE-1(袋有)の考察

外力が作用CASE-Aのみが遮水工と見なせる換算透水係数 $k_e \leq 1.0E-06$ (cm/sec) を満足する結果となった。曲げやズレせん断の外力が作用したCASE-B, CASE-Cはともに、载荷後の供試体の充填材部分には目視で確認できるクラックは認められなかった。しかし、継手鋼材と継手充填材の袋（グラウトジャケット）との付着が切れ、その部分が透水経路となることで、遮水性能が低下し、所定の換算透水係数を満足出来なかったものと推測される。したがって、膨張モルタルの打設に袋（グラウトジャケット）を用いる場合は、継手部になんらかの外力が作用した場合において遮水性能が低下する恐れがあることが示唆される結果となった。

d) TYPE-2(袋無)の考察

すべてのケースにおいて遮水工と見なせる換算透水係数 $k_e \leq 1.0E-06$ (cm/sec) を満足する結果となった。なお、どのケースも、ほぼ同等の換算透水係数が得られており、袋無しのタイプでは、継手部になんらかの外力が作用した場合でも遮水性能にはほとんど影響がないものと評価できる。

また、CASE-B（曲げ载荷）では、充填材自体に目視で確認できるクラックが生じたものの、遮水性の低下は認められなかった。これは、継手内部が充填材で完全に充填されている場合、継手部分は拘束され体積変化がゼロに近い状態のため、クラックが生じても大きな透水経路とはならなかったものと推測される。

(2) 三次元浸透流解析による遮水性能評価

a) 解析概要

本解析は、根入れ式鋼板セル護岸の全体系を対象として三次元浸透流解析により護岸延長1.0m、1日当りの漏水量を算定し、遮水工とみなせる壁体幅50cm、透水係数 $1.0E-06$ cm/s 相当の連続壁の漏水量と比較する目的で行ったものである。

解析モデルは図-13に示すように隣接する鋼板セルの中心間の1ブロックとし、支持層である砂層までをモデル化した。なお、解析は、海側陸側の水頭差を2.0mとし、定常状態で行った。

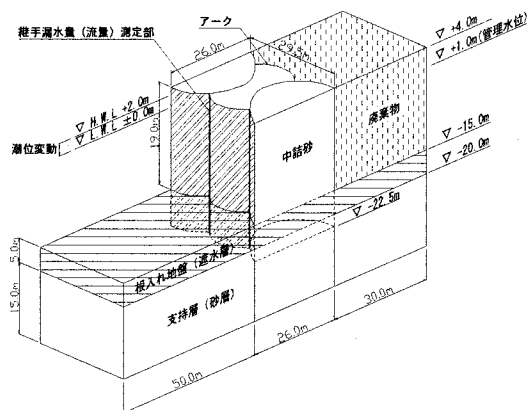


図-13 解析モデル

b) 透水係数

解析要素に与える継手部（処理あり）の透水係数は、袋無しで膨張モルタルを充填した継手（TYPE-2）の常時（CASE-A）の透水実験結果と等価になるように設定した。すなわち、図-14に示すように継手部要素は実験によって得られた透水量が、透水面積 A を均等に透過するものと考えた。

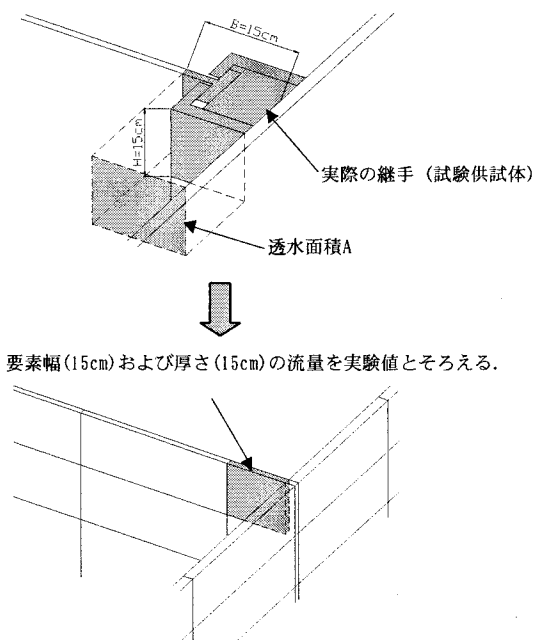


図-14 継手部モデル化の考え方

また、継手要素の透水係数については、完全に処理をしたもの、処理をしないもの、処理に不具合等があるもの想定した。表-3に本解析に用いる透水係数を示す。

表-3 透水係数一覧

種別		透水係数 (cm/s)
中詰砂(砂層)		1.0E-02
根入れ地盤(遮水層)		1.0E-05
支持層(砂層)		1.0E-02
廃棄物		1.0E-01
継手要素	(処理あり)	9.6E-07
	(処理なし)	1.0E-02
	(不具合あり)	9.6E-06
		9.6E-05

c) 解析ケースおよび結果

解析ケースは、継手処理を行う位置と継手要素の透水係数をパラメーターとして設定した。

具体的には、表-4に示すように継手処理を海側+陸側の両側に行ったCASE1、海側のみ継手処理を行ったCASE2、継手処理を行わないCASE3、継手処理の不具合を考慮したCASE4、CASE5とした計5ケースについて行い、護岸延長1.0m、1日当りの漏水量を算定し、壁体幅50cm、透水係数1.0E-06cm/s相当の遮水壁の漏水量と比較した。

表-4 護岸の漏水量(護岸延長1.0m、1日当り)

CASE	継手処理	透水係数 (cm/s)				漏水量 (cm³/d/m)
		中詰	根入地盤	海側継手	陸側継手	
1	海側+陸側	1.0E-02	1.0E-05	9.6E-07	9.6E-07	1,295
2	海側のみ	1.0E-02	1.0E-05	9.6E-07	1.0E-02	2,174
3	処理なし	1.0E-02	1.0E-05	1.0E-02	1.0E-02	1,340,676
4	海側+陸側	1.0E-02	1.0E-05	9.6E-06	9.6E-06	11,554
5	海側+陸側	1.0E-02	1.0E-05	9.6E-05	9.6E-05	100,053
壁体幅50cm、透水係数1.0E-06cm/s相当の遮水壁						65,664

d) 考察

壁体幅50cm、透水係数1.0E-06cm/secの連続壁に、水頭差2.0m(解析と同等)を与えて計算した漏水量(以下、基準漏水量と称す)を解析結果と比較すると、継手処理なしのCASE3および継手処理の不具合を考慮して透水係数を100倍にしたCASE5を除き、セル護岸からの漏水量の方が小さくなることが確認できた。特に、CASE1の海側と陸側の両側に継手処理を行ったケースでは基準漏水量の約1/50、CASE2の海側のみ継手処理を行ったケースでは、約1/30であった。したがって、根入れ式鋼板セルを管理型廃棄物埋立護岸に適用した場合の優れた遮水性能が証明された。

5. 結論

(1) 継手部遮水性確認実験による知見

継手処理の膨張モルタル打設に袋(モルタルジャ

ケット)を用いた場合(TYPE-1)と用いない場合(TYPE-2)では、TYPE-2が高い遮水性能を示す。また、常時、地震時、ズレせん断時を想定した外力作用状態においてもTYPE-2は遮水性能にほとんど影響がなく、高い遮水性を示すことがわかった。

(2) 三次元浸透流解析による知見

継手部遮水性確認実験結果より得られた継手部の透水係数を用いて根入れ式鋼板セル護岸全体系を対象とした三次元浸透流解析を実施した結果、継手処理を海側の片側のみに実施した場合でも「改正命令」で求められる基準漏水量の約1/30の漏水量となり、十分な遮水性能が得られる結果となった。

以上より、根入れ式鋼板セルを管理型廃棄物埋立護岸へ適用した場合の優れた遮水性能が定量的に評価された。また、継手処理の膨張モルタル打設は、袋(モルタルジャケット)を用いず、直接打設することが望ましいことがわかった。

なお、今後の実施工上の留意点としては、膨張モルタルを直接打設する場合、継手内土砂の完全排土やモルタルの漏えいを防止する処置が必要な点などがあげられる。このような排土にかかわる施工フローや図-15に示すモルタルの漏えい防止ゴム(海底面まで設置)を使用した継手構造等については、文献3)に詳細が記載されているので参考にされたい。

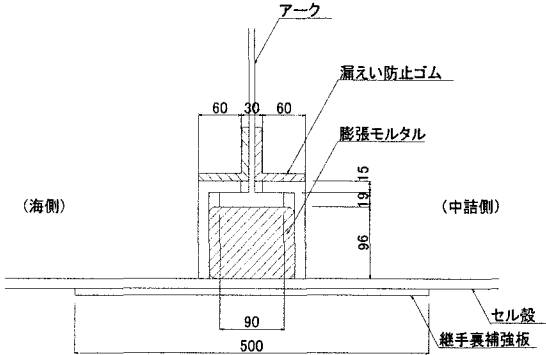


図-15 漏えい防止ゴム設置位置(モルタル打設時)

謝辞：本研究は、根入れ式鋼板セルを管理型廃棄物埋立護岸へ適用するため、(財)港湾空間高度化環境研究センターと根入れ式鋼板セル協会にて共同研究を行った成果の一部である。「根入れ式鋼板セルの管理型廃棄物埋立護岸への適用に関する共同研究委員会」にてご指導いただいた、善委員長及び各委員の方々に感謝の意を表する。

参考文献

1) 管理型廃棄物埋立護岸設計・施工・管理マニュアル、(財)港湾空間高度化環境研究センター、2000。
2) 廃棄物海面処分場の施工要領(案)、(社)日本埋立浚渫協会、2001。
3) 管理型廃棄物埋立護岸への根入れ式鋼板セル 利用指針、(財)港湾空間高度化環境研究センター、2003。