防災と環境の調和を図れる
低天端有脚式離岸堤「バリアウィンＴ」

山野　貴司

東洋建設株式会社　総合技術研究所　鳴尾研究所

海岸侵食に対しては，海岸の防護だけでなく環境・利用面との調和の取れた対策が求められ，特に外洋に面した侵食海岸では杭によって構造物を支持する有脚式離岸堤が採用されるようになった．一般に異形ブロック式離岸堤では設置水深が大きい場合や海底地形が急勾配になると断面が大きくなるため，有脚式が有利となる．そこで当社では，①大水深でも設置が可能（設置水深10m～20m），②天端高を低くし景観面を考慮，③離岸距離を大きくし沿岸域の利便性を高める，④環境を考慮した低天端有脚式離岸堤「バリアウィンＴ」を開発した．本稿では「バリアウィンＴ」の構造的特徴および防災・環境面の特徴，設計方法および施工手順を紹介する．

キーワード：有脚式離岸堤，海域制御構造物，景観，低天端，海水交換，海岸侵食

１．はじめに

MMZ計画（建設省総合技術開発プロジェクト「海洋利用空間の創成・利用技術の開発」，昭和61年～平成2年）において堤体背後の静穏域を形成する様々な海域制御構造物として新型離岸堤が開発された[1)]．海域制御構造物は，海浜の安定化や背後地の防護など従来求められてきた保全機能はもちろん，堤体背後に広がる静穏海域を利用した海洋性レクリエーションや水産資源の有効利用など，利用面や環境面との調和を目指している．設置される海域は，海底勾配が急勾配でかつ地盤条件が良好でない箇所では，一般的な重力式の離岸堤では設置水深が大きくなり，断面も大きくなるため，杭によって構造物を支持する有脚式離岸堤が採用されてきた．海岸侵食が深刻な箇所もいまだに多くあり，今後も同種の構造物の建設が見込まれている．景観の観点においても，従来の構造に比べてより低天端の構造が求められている．さらに，最近ではさらなる工費の縮減が求められている．

低天端有脚式離岸堤「バリアウィンＴ」は，堤体断面を縮小することで工費の縮減を図った上で，従来の有脚式離岸堤と同等の消波性能を持つだけでなく，高潮位時波浪条件についても一定の消波性能を有し，堤体に作用する波力を低減する構造物である．また，透過性で低天端構造であることから，海水交換は良好であり，海岸からの視界も妨げることがない．

本稿では，「バリアウィンＴ」の構造的特徴および防災・環境面の特徴，設計方法および施工手順について紹介する．

２．「バリアウィンＴ」の構造的特徴

「バリアウィンＴ」は，**図-1** および**図-2** に示すように，床版および上床版をもたない前面壁・中間壁・背面壁の 3 枚の水平スリット鉛直壁と隔壁および側壁で構成される箱型躯体の消波構造物であり，これらを杭で支持する．消波対象水深に対して，背面壁以外の部材は水面下となる低天端構造であるため，海岸からの視界を妨げない．また，天端の一部を除き，ほとんどが水面下であるため腐食環境が最

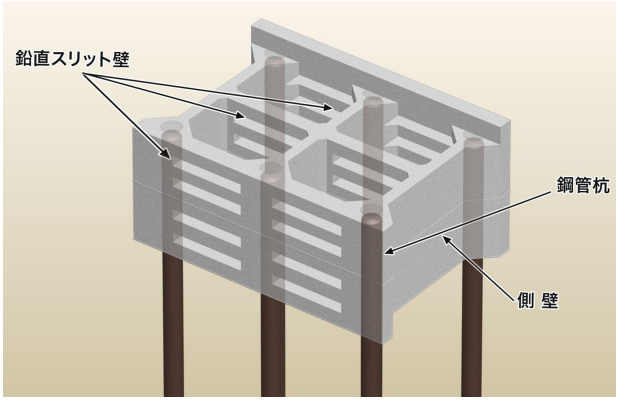

図-1　「バリアウィンＴ」イメージ

も厳しい飛沫帯の影響を受けにくく，杭も大部分が地盤または堤体中となり，直接海中に触れる部分が少ない構造となっている．

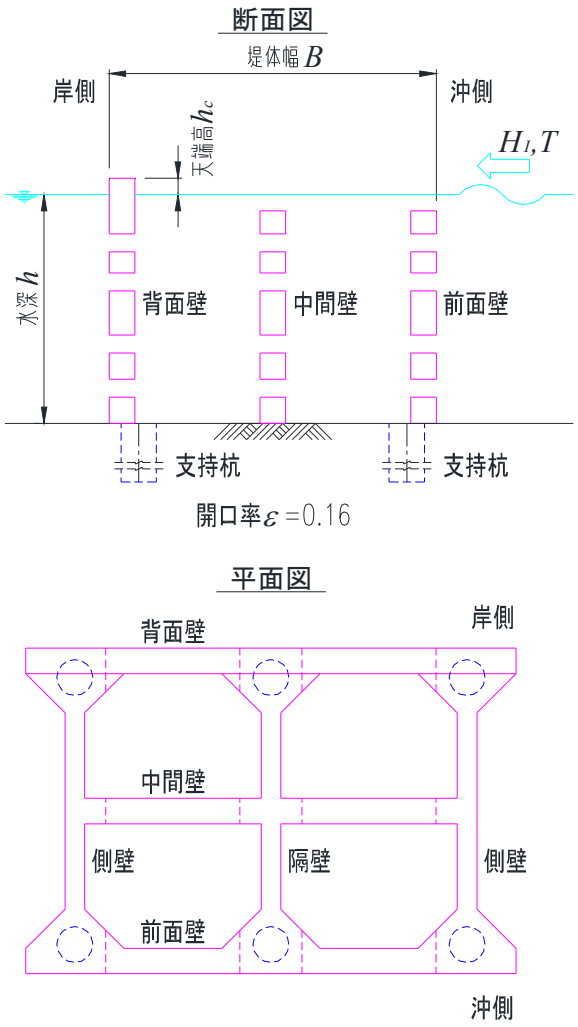

図-2　堤体構造図

3．「バリアウィンT」の防災面の特徴[2)]

近年，ダム建設や海岸・港湾構造物の建設などが進むにつれて河川からの供給土砂量や岸に沿った方向の土砂の移動量の減少により，全国的に海岸侵食が激しくなってきている．海岸侵食の中でも，岸沖方向への漂砂による侵食には，通常の来襲波浪よりも侵食性の強い波浪が来襲し，離岸方向の漂砂量が生じた場合に引き起こされる汀線後退がある．汀線後退による施設・家屋被害，海岸の利用障害，植生の後退等の社会，経済活動の障害となる海浜変形を制御する方法の一つとして，海域制御構造物（離岸堤）の建設がある．低天端有脚式離岸堤「バリアウィンT」は，先述した MMZ 計画において防災および利用面から要求される透過率 K_T≦0.6，反射率 K_R≦0.5 を目標とし，それらを満足する離岸堤である．

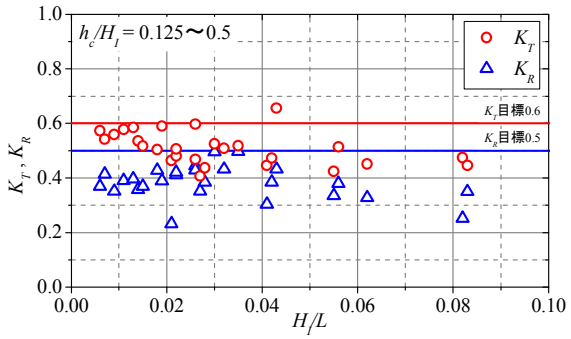

図-3　透過率K_Tおよび反射率K_RとH_I/Lとの関係（水深 h=10m，天端高h_c=0.5m）

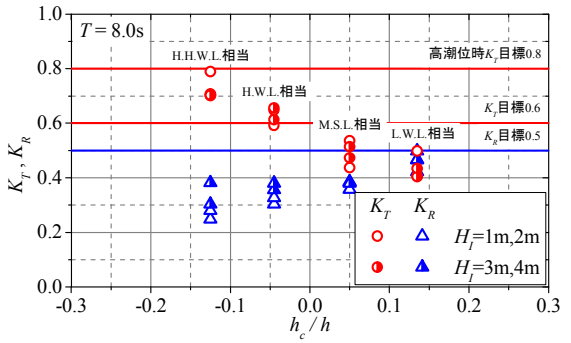

図-4　透過率K_Tおよび反射率K_Rと水深変化の関係（T=8.0s）

図-3 に，消波対象波（周期 T=6s〜16s および波高 H_I =1.0m〜4.0m）に対して天端高を h_c=0.5m とした場合の透過率 K_T および反射率 K_R と波形勾配 H_I/L（設置位置の通過波高/設置位置の波長）との関係を示す．透過率 K_T については一例を除き目標である 0.6 以下を満足し，反射率 K_R についてはすべてのケースで 0.5 以下を満足している．透過率 K_T が 0.6 を超える条件に対しては，天端高 h_c を設定すれ適切に設定することで目標を満足することができ，これについては後述する．

「バリアウィンT」は，高潮位時の波浪条件に対しても所要の消波性能を有する．高潮位の定義については様々考えられるが，設計上考えうる最大潮位である H.H.W.L.相当のときに発生する可能性のある波浪を対象とし，それに対する評価基準として施工実績のある条件である透過率 0.8 以下を目標とした．**図-4** に T=8s の結果を一例として示すが，透過率 K_T は最も潮位の高い H.H.W.L.の条件においても目標値である 0.8 より小さい．T=10s〜16s の条件においても同様の傾向が得られ，いずれのケースも 0.8 以下を満足した．

また「バリアウィンT」は，越波量を低減する機能も有し，設置水深を砕波水深付近とすることで，従来の異型ブロック消波堤の場合と同等以上の越波量低減効果を発揮することを数値計算により確認している [3)]．越波量低減効果に関する詳細については，今年度開催される海岸工学講演会（主催：土木学会，

期間：平成 24 年 11 月 14 日(水)～16 日(金)，開催地：広島市）にて発表予定である．

４．「バリアウィンＴ」の環境面の特徴

(1) 魚礁効果

「バリアウィンＴ」は透過性の消波構造物であり，堤体内部に遊水室を有しているため，魚類の生育の場となることが考えられる．また，砂泥域においては，岩礁的な役割を果たして海藻や貝類が付着し，それを採餌する岩礁性の魚類がい集することが考えられる．**図-5** に示すように，離岸堤が設置されることにより，もともと生息していた砂浜性魚のほか，回遊性魚や岩礁性魚が離岸堤を魚礁として住みつき餌場，休息の場，隠れ場となり集魚効果が期待できる．

(2) 海水交換性

「バリアウィンＴ」は透過性の消波構造物であるため，海水交換性を有する．海水交換性は，海域制御構造物設置前の海浜流や潮流の状況，海岸線の形状，海底地形，さらには海域制御構造物の平面配置に強く影響される．特に「バリアウィンＴ」は，消波時にスリット付近で強い岸向き流れが発生することを水理模型実験および数値計算により確認しており [4),5)]，その効果が海水交換を促進させることが考えられる．

(3) 景観への影響

「バリアウィンＴ」は，基本断面では水面より高い部分はわずか 0.5m と極めて低天端の構造であり，海域の景観に与える影響はほとんどない．また，有脚式構造であるため，従来のブロック積み離岸堤のように，沈下や散乱に伴い形状が崩れることもほとんどない．

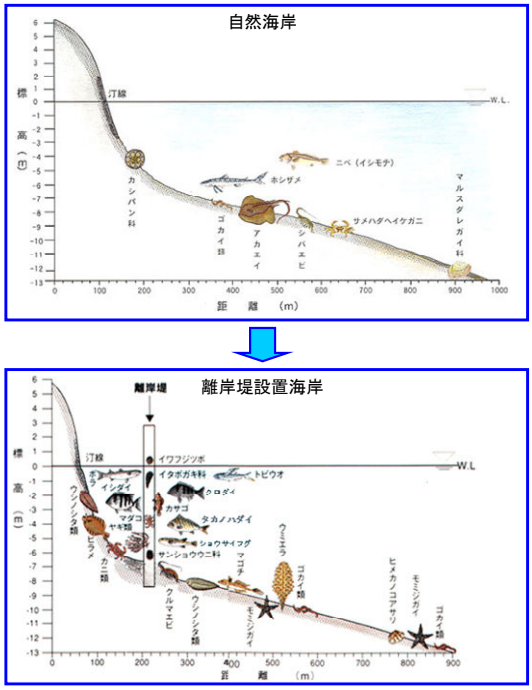

図-5　離岸堤設置による生態系の変化（国土交通省中部地方整備局　静岡河川事務所HPより引用）

５．「バリアウィンＴ」の設計方法

(1) 消波性能[6)]

「バリアウィンＴ」は，3 枚の鉛直スリット壁周辺に発生する渦および多重反射によって波エネルギーの消散を促すことで，消波対象波に対して所定の消波性能を発揮し，堤体背後の静穏域の確保を可能としている（**図-6** 参照）．高潮位時にも一定の透過率を有し，背後地を波浪から防護することが可能である．

消波性能としての要求事項（透過率 K_T・反射率 K_R）を満たすための堤体幅 B は，水理模型実験により得られた相対堤体幅 B/L（堤体幅/設置位置の波長）と透過率 K_T・反射率 K_R の関係（**図-7** 参照）より，下記の算定式を用いて設定することが可能である．

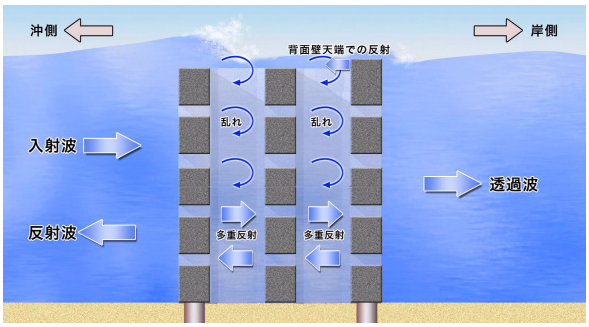

図-6　消波メカニズム

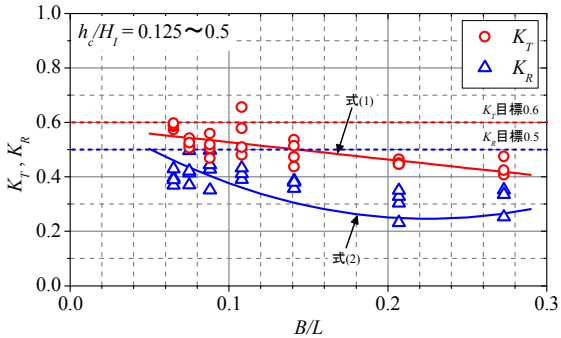

図-7　透過率K_Tおよび反射率K_RとB/Lとの関係（水深h=10m，天端高h_c=0.5m）

表-1　天端高の設定方法

条件	天端高h_c
B/L=0.10～0.12かつH_I/L=0.040～0.045	0.75m
上記以外	0.50m

$$K_T = -0.63(B/L) + 0.59 \quad (1)$$

$$K_R = 8.38(B/L)^2 - 3.77(B/L) + 0.67 \quad (2)$$

天端高 h_c の設定については，水理模型実験より得られた結果から，相対堤体幅 B/L および波形勾配 H_I/L（設置位置の通過波高/設置位置の波長）の範囲により設定する．具体的には**表-1** に示すとおりである．

(2) 波力低減[6)]

躯体が 3 枚の鉛直スリット壁で構成される低天端構造であるため，スリット部で消散される波エネルギーの損失に加えて低天端効果も得られ，水平波力は通常の直立式防波堤に比べて小さくなる．また，鉛直方向を遮る水平床板を持たないため，鉛直波力も極めて小さいのが特徴である．こうした水平波力および鉛直波力の低減効果により，堤体容積の縮減，鋼管杭の直径や肉厚の低減，また杭の根入れ長を短くすることが可能である．

堤体に作用する波力は，合田式で波圧強度を求め，その合力を作用させる．なお，水平波力の算出に用いる波力低減係数λ_1およびλ_2については，**図-8** に示すように水理模型実験により求められた以下の式(3a)，式(3b)を用いて算出する．

$$\lambda_K = 0.6 + 0.5I_r + 0.2(H/h - 1.5) \quad (0 < I_r < 0.4) \quad (3a)$$

$$\lambda_K = 1.0 - 0.5I_r + 0.2(H/h - 1.5) \quad (I_r \geq 0.4) \quad (3b)$$

$$I_r = \frac{i}{\sqrt{H_0'/L_0}} \quad (4)$$

ここに，λ_K：波力低減係数，I_r：サーフ・シミラリティ・パラメタ，H：設計波高，h：水深，i：海底勾配，H_0'：換算沖波波高，L_0：沖波波長(=1.56T^2)である．ただし，非砕波時のλ_Kの平均値が 0.50 であったことから，0.5 を最小値として与えるようにしている．

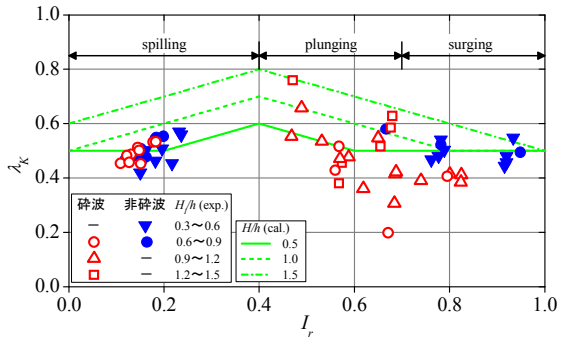

図-8 波力低減率λ_Kとサーフ・シミラリティ・パラメタI_rの関係

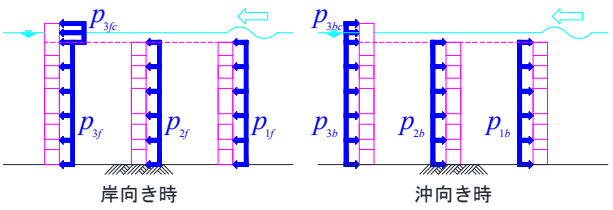

図-9 部材設計に用いる波圧の定義

表-2 部材波圧に用いる無次元波圧$p/\rho gH$の一覧

岸向き時		沖向き時		備考
$p_{1f}/\rho gH$	0.007Ur ($Ur \leq 200$) 1.4 ($Ur > 200$)	$p_{1b}/\rho gH$	0.3	前面壁
$p_{2f}/\rho gH$	0.3	$p_{2b}/\rho gH$		中間壁
$P_{3f}/\rho gH$	0.6	$p_{3b}/\rho gH$		背面壁 水中部
$p_{3fc}/\rho gH$	0.6 ($Ur \leq 50$) 0.2+0.008Ur ($Ur > 50$)	$p_{3bc}/\rho gH$		背面壁 天端部

(3) 部材波圧

各鉛直壁における波圧合力が最大となるときの波圧分布は，水理模型実験結果から鉛直方向に概ね一様に分布していたことから，部材設計に用いる波圧としては平均波圧を用いる．ただし，背面壁に関しては水面付近の波圧が大きくなることから，前面壁および中間壁の天端に相当する高さから上の部分を分けて波圧を与える（**図-9** 参照）．各部材波圧の算出に用いる無次元波圧 $p/\rho gH$ は，**表-2** に示すとおりであり，これらの設定値はアーセル数 Ur(=HL^2/h^3)を用いて表す．

6．「バリアウィンT」の施工手順

施工は，**図-10**に示すように，陸上施工（函体製作）と海上施工（据付）に大別される．以下に，それぞれの工程の簡単な説明と施工イメージを示す．なお，本稿では，函体の運搬・設置作業に用いる作業船（起重機船）を小さくすることによる工費縮減のため，函体を上下分割した施工手順となっているが，制約条件によって作業船の小型化が困難な場合には，上下分割を行わず函体を大型化することで急速施工を行うなどの対応も可能である．

(1) 陸上施工

a) 製作ヤード整備（図-11参照）

ヤードの地盤支持力を調査し，不足する場合は砕

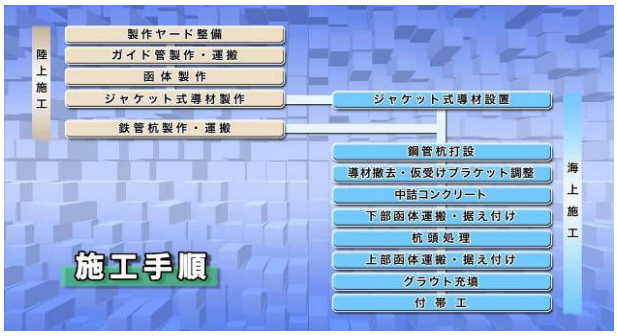

図-10 施工フロー

石等で補強する．函体製作を行うために，ヤードに函台コンクリートを水平に打設する．

b）ガイド管製作・運搬（図-12参照）

上部函体用，下部函体用それぞれのガイド管を工場にて製作する．ガイド管には間隔保持鋼材を取り付け，函体製作中のずれを防止する．また，管内にシアキーを取り付ける．ガイド管の製作が完了した後，製作ヤードに運搬する．ガイド管は函台コンクリートの決められた場所に設置する．

c）函体製作（図-13参照）

上部函体および下部函体を以下の手順で製作する．

外周および内部に足場を設置し，内型枠，鉄筋，外型枠の順に組立を行い，コンクリートを打設する．吊り鋼材およびグラウト充填管は，予めセットしておく．コンクリート養生後，型枠を脱型し，足場を解体する．

函体製作完了後，電気防食用アルミニウム合金陽極，視認ポール，標識灯等の付帯設備を取り付ける．

d）ジャケット式導材製作（図-14参照）

鋼管杭を決められた位置に精度良く打設するために，ジャケット式導材を製作する．

e）鋼管杭製作・運搬

鋼管杭は，メーカーの工場にて製作し，海上運搬で現地ヤードに荷卸しする．現地ヤードにて鋼管杭の外周にシアキーを取り付ける．また，仮受けブラケットのリブプレートも予め溶接する．

(2) 海上施工

a）ジャケット式導材設置（写真-1参照）

ジャケット導材を支持するH鋼杭を打設し，ジャケット導材を決められた位置に取り付ける．

b）鋼管杭打設（写真-2，図-15参照）

鋼管杭は，ジャケット式導材を利用し，決められた位置に精度良く打設する．また，高さについては，

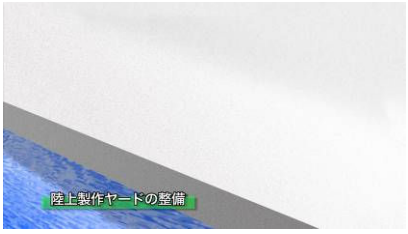

図-11　製作ヤード整備

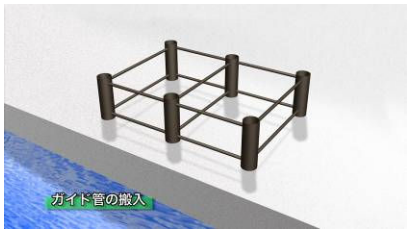

図-12　ガイド管製作・運搬

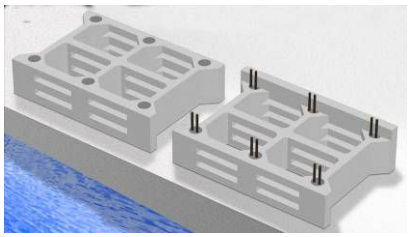
図-13　函体製作

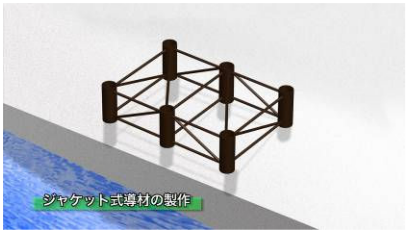

図-14　ジャケット式導材製作

写真-1　ジャケット式導材設置例

写真-2　ジャケット式導材を用いた鋼管杭の打設例

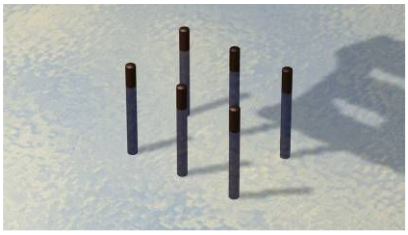
図-15　鋼管杭打設

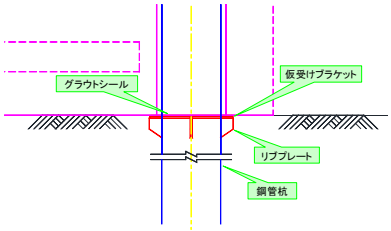

図-16　仮受けブラケット調整

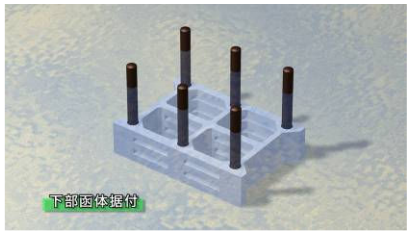

図-17　下部函体据え付け

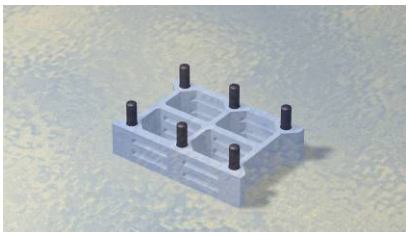
図-18　杭頭処理

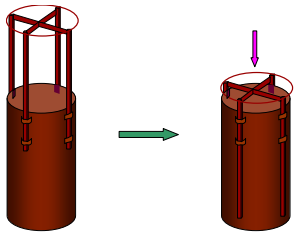
図-19　スライド定規取り付け

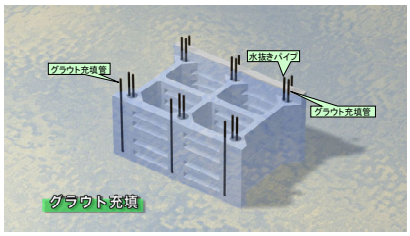

図-20　グラウト充填

図-21　施工完了

シアキーやリブプレートの位置が決められているため，精度良い打ち止まりが重要となる．高くなると高さ調整が出来ないことから，高止まりだけは避けるようにする．

c）導材撤去・仮受けブラケット調整（図-16参照）

1函体分の鋼管杭の打設が完了した後，導材を撤去し次の函体設置場所に移る．

導材を撤去した後，仮受けブラケットのリブプレートの高さを測量し，仮受けブラケットを水中溶接で取り付ける．

d）中詰コンクリート

鋼管杭の中詰めとして，コンクリートを決められた高さまで充填する．なお，予めコンクリート製の円柱を作成し，鋼管内に挿入した後，グラウト充填する事も可能である．

杭頭部には函体挿入治具を取り付ける．

e）下部函体運搬・据え付け（図-17参照）

下部函体を起重機船で吊上げ，据付位置まで運搬する．杭をガイドとして，函体を据付ける．

f）杭頭処理（図-18，図-19参照）

下部函体据付け後，杭の高さを決められた高さとするため，水中切断を行う．全ての杭が水中に没するため，四隅の杭にスライド式定規を取り付け，定規を水上に見えるようにしておく．

g）上部函体運搬・据え付け

上部函体を起重機船で吊上げ，据付位置まで運搬する．杭をガイドとして，函体を据付ける．

h）グラウト充填（図-20参照）

予め取り付けてあるグラウト充填管にパイプを接続し，下部からグラウトを充填する．1m程度充填できたら，上部からグラウトを充填する．水抜きパイプからグラウトが出てきたら，充填できたものと判断する．

i）付帯工

吊り金具，グラウト充填管等を水中切断し，切断穴に樹脂モルタルを跡埋めする．また，陽極接続ピースを水中溶接する．施工完了時のイメージは図-21のようである．

7．おわりに

「バリアウィンT」は，所要の消波性能および波力低減効果を持った上で，海水交換機能および低天端による景観への影響に配慮した，防災と環境に調和した有脚式離岸堤である．

因みに，杭式構造物で問題となる局所洗掘に対しても，当社では対策工法を考案しており，その効果について移動床水理模型実験にて確認している[7),8)]．

なお，「バリアウィンT」および「局所洗掘対策工法」においては，下記の認証および特許出願を行っている．

○ 建設技術審査証明（建技審証第0905号）
　低天端有脚式離岸堤「バリアウィンT」
○ 特許出願（特願2008-227185）
　「海域制御構造物」
○ 特許出願（特願2010-36182）
　「海域制御構造物及びその施工方法」
○ 特許出願（特願2012-1196）
　「堤脚部の洗掘防止工法及び堤脚部の洗掘防止構造」

参考文献

1) 建設省土木研究所：MMZ 計画策定の手引き（案），土木研究所彙報，第 57 号，1992.
2) (財)土木研究センター：低天端有脚式離岸堤「バリアウィンT」，建設技術審査証明報告書，建技審証第 0905 号，54p，2010.
3) 藤原隆一：直立透過式構造物を消波工とした遊水部を持つ直立護岸の越波低減機能，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.68，No.2，2012（印刷中）.
4) 藤原隆一，山野貴司，野村浩二：低天端有脚式離岸堤の局所洗掘に関する水理模型実験，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.67，No.4，pp.208-213，2011.
5) 藤原隆一・山野貴司：杭により支持されるスリット式離岸堤の局所洗掘に対する CADMAS-SURF/3D の適用性，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.67，No.2，pp.741-745，2011.
6) 山野貴司，藤原隆一，野村浩二：低天端有脚式離岸堤の消波性能と波力特性について，海洋開発論文集，第 26 巻，pp.969-974，2010.
7) 藤原隆一，山野貴司，野村浩二：低天端有脚式離岸堤の局所洗掘に関する水理模型実験，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.67，No.4，pp.208-213，2011.
8) 山野貴司，藤原隆一，野村浩二：海底勾配の違いによる低天端有脚式離岸堤の洗掘特性と対策工の効果に関する実験的研究，土木学会論文集 B3（海洋開発），Vol.68，No.4，2012（印刷中）.