

円形スリット柱を用いた消波護岸の設計と施工

DESIGN AND CONSTRUCTION OF WAVE ABSORBING SEAWALL USING SLIT-TYPE CIRCULAR COLUMN

新原雄二¹・吉原知佳²・池谷 毅³・稲垣 聡⁴・野口孝俊⁵・宮田正史⁶

Yuji NIIHARA, Tomoyoshi YOSHIWARA, Tsuyoshi IKEYA, Satoshi INAGAKI,
Takatoshi NOGUCHI and Masafumi MIYATA

¹正会員 工修 鹿島建設(株)東京土木支店 (〒135-0064 東京都江東区青海2丁目中央防波堤外側埋立地)

²鹿島建設(株)東京土木支店 (同上)

³フェロー会員 工博 鹿島建設(株)技術研究所 (〒107-8502 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁴正会員 工修 鹿島建設(株)技術研究所 (同上)

⁵正会員 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港3-5-7)

⁶正会員 工修 国土交通省港湾局技術企画課 (〒100-8918 東京都千代田区霞が関2-1-3)

This report describes design and construction work of a wave-absorbing seawall adopted for the seawall connecting the reclaimed land and the piled-elevated platform of the D Runway of the Haneda Airport. The wave-absorbing seawall employed slit-type circular columns. Based on hydraulic model experiments, wave reflection ratio and wave forces in the storm condition were determined to use in designing of the structure. In the construction work, precast PC members were used for the slit-type circular columns and upper slab of the seawall. These precast members could reduce works at the site and make rapid construction possible. Consequently, the 428m-long seawall was completed in about eight months.

Key Words : Haneda Airport, wave absorbing seawall, slit-type circular column, model experiment, wave force

1. はじめに

羽田空港の沖合に建設中の第4滑走路(以下, D滑走路)では, その建設地の一部が多摩川の河口域にかかることから, 川の流れを阻害しないよう河口域を栈橋工法, その外側を埋立工法とする埋立/栈橋組合せ工法が選定された(図-1)。この埋立部と栈橋部を接続する埋立/栈橋接続部(以下, 接続部)の護岸には, 鋼管矢板を支持層まで打設して基礎とした鋼管矢板井筒護岸が採用された(図-2)。

この接続部護岸の上部を直立壁護岸とした場合には, 暴風時の反射波の波峰が栈橋部のカバープレートに達し損傷させるという問題があったことから, 水理実験を行った結果, 円形スリット柱を用いた消波護岸を採用した¹⁾。また, 接続部護岸は全長428mの大規模護岸構造物であり, 施工においては厳しい工期短縮が要請されたことから, 鋼管矢板による仮締切り兼用工法と主要部材のプレキャスト化による大量急速施工を行った。

本論文では, 水理実験に基づく円形スリット柱式

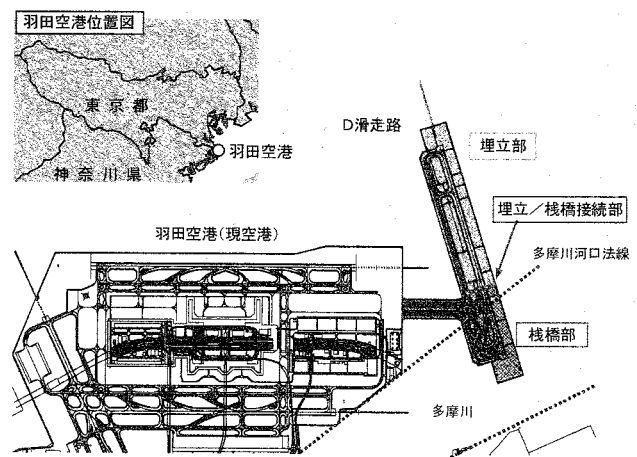


図-1 羽田空港D滑走路位置図

消波護岸の設計波力の設定と, それに基づく暴風時の設計照査について述べる。さらに, 仮締切り兼用工法と主要部材のプレキャスト化による急速大量施工の実績について報告する。

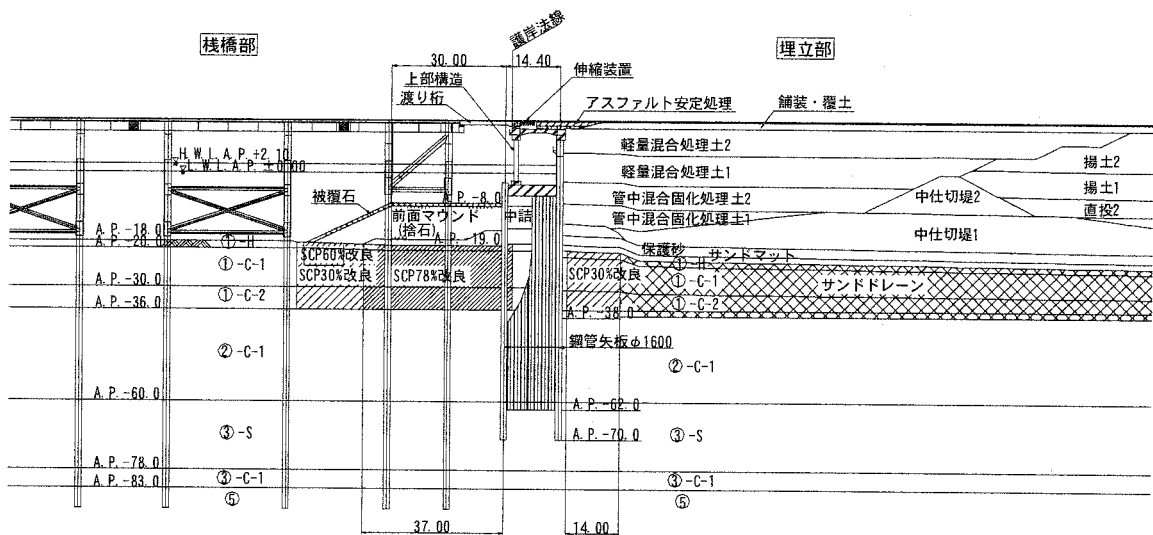


図-2 接続部の鋼管矢板井筒護岸断面図

2. 消波護岸の構造概要

(1) 円柱スリット式消波護岸の採用理由

D滑走路の設計における波浪条件を表-1に示す。暴風時において、D滑走路ではちょうど東京湾口の方角となる南からの波（接続部護岸に対して45°方向）が卓越する。接続部を直立護岸とした場合には、護岸からの反射波が栈橋部の鋼桁に取り付けられたカバープレート（鋼桁の防食のために設置されたチタン製パネル）を損傷させる危険性がある。波の打上がりによって埋立部と栈橋部を繋ぐPC渡り桁に大きな揚圧力が作用するといった問題があった。反射波低減のために消波ブロックを設置する方法は、護岸から栈橋杭までの距離が15mと近いこと、栈橋施工に影響があること、急速施工が要求されるD滑走路工事の中でも接続部護岸は特にクリティカルであり、消波ブロック設置は工程的にも困難であった。そこで、護岸構造自体に消波機能を持たせて反射波を抑え、かつ急速施工が可能な構造及び施工法の検討を行った結果、プレキャスト化した円形スリット柱を用いた消波護岸を採用するに至った。

(2) 消波護岸の構造

消波護岸の断面図と構造概要を図-3及び表-2に示す。最適なスリット形状を調べるための水理実験を実施した結果、スリットの断面として円形、開口率33%を最適断面として選定した¹⁾。そこで、円形スリット柱には遠心成形されたプレキャスト部材を使用し、頂版に埋め込まれたアンカーフレームにボルト接合する構造とした。また、埋立側の背面壁は、鋼管矢板φ1600の中をコンクリートで充填したコンクリート充填鋼管柱列壁とし、鋼管の腐食を防止するため前面をコンクリートで被覆する。スリット柱と背面壁の間に上部PC桁を架設して、その接合部にコンクリートを打設して一体化することで、消波護岸はラーメン構造となる。

表-1 羽田空港D滑走路の設計における波浪条件

	波浪条件
供用時	$H_{1/3}=1.97\text{m}$, $T_{1/3}=5.9\text{s}$, 卓越波向:S
暴風時	$H_{1/3}=4.15\text{m}$, $T_{1/3}=8.3\text{s}$, 卓越波向:S
潮位	L.W.L.: A.P. ±0m, H.W.L.: A.P. +2.1m, H.H.W.L.: A.P. +4.0m

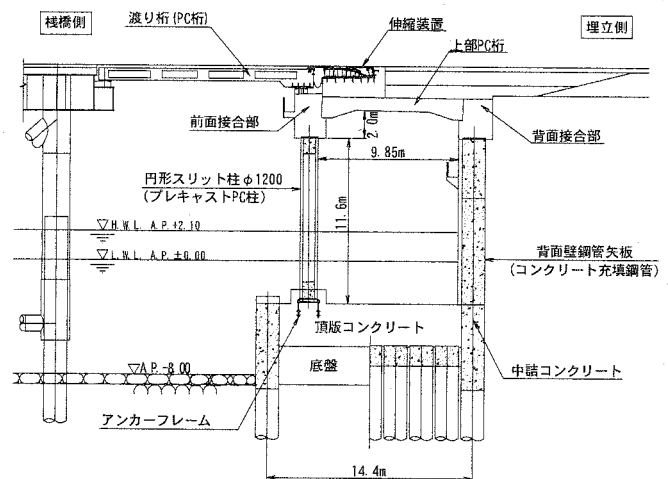


図-3 消波護岸断面図

表-2 消波護岸の構造概要

部位	構造
スリット柱	・プレキャストPC円柱φ1200mm, 中心間隔1.8m ・コンクリート強度 $f'_{ck}=80\text{N/mm}^2$ ・下端はアンカーボルトにより頂版に固定
受台接合部	・現場打ちRC構造 ・コンクリート強度 $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$
上部PC桁	・桁長9900mm, 桁高950mm, 幅900mmのプレキャストPC桁 ・コンクリート強度 $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$ ・現場で滑走路直角方向にPC鋼材で横締めし、版としての一体性を確保
背面壁鋼管矢板	・鋼管矢板を延長し内部にコンクリートを充填 ・発生断面力に対して鋼管矢板断面のみで設計（充填コンクリートは無視） ・前面側に鋼管腐食防止コンクリートを打設

3. 水理実験による波力の評価

(1) 水理実験の目的

稲垣ら¹⁾の研究では、この接続部護岸に用いる最適なスリット形状の選定を目的として、スリットの断面形状、開口率や遊水室内部の形状（ハンチの有無）などをパラメータとして、波反射率や部材に作用する波圧を計測している。この結果、スリットの断面を円形とし、開口率 33%、遊水室内部のハンチ無しとすることに決定した。また、測定した波圧をもとに設計に用いる波力を設定し、消波護岸の構造設計を行った。

本研究では、消波護岸の構造設計が完了後に行った水理模型実験の結果について、稲垣ら¹⁾の結果との比較とともに述べる。この実験では、最終断面の構造詳細部（例えば、点検歩廊、前面受台など）までを再現した模型を用いて、波の反射率の確認と 3 分力計による各部材への作用波力の計測を実施した。また、構造設計で埋立側の背面壁を鋼管矢板と一体化する構造に変更したため、稲垣ら¹⁾の実験で想定していた構造より遊水室幅（スリット柱と背面壁の間の距離、図-4 参照）が広がることになり、その変更も反映させている。

以下、本論文では、稲垣ら¹⁾の実験結果を実験①とし、本研究の実験を実験②として記載する。

(2) 実験方法

実験②は、実験①と同様に直線造波水路（長さ 60m、幅 0.7m、深さ 1.5m）を用いて行った。造波水路内に勾配の海底面を模擬する斜面を設置し、水深相当の位置にスリット護岸上部工および碎石を盛ったマウンドの模型を設置した。模型縮尺はフルード則に従い 1/40 とした。図-4 に消波護岸の模型断面図を示し、写真-1 に実験状況を示す。実験は一方向不規則波を用い、表-1 に示した波浪条件の波を作用させた。

a) 波の反射率の計測

護岸の波の反射率は、護岸前面に設置した 3 本の波高計の出力から入射波分離を行って求めた。なお、ここで計測される反射率は、護岸上部工と前面マウンド全体からの反射率となる。

b) 波力の計測

護岸模型はスリット・背面壁・上床版のそれぞれを 2~3 個に分割し、各分割断面部材に 3 分力計 (F_x, F_z, M_y 成分を計測可能) を取り付けられる構造としており、これを利用して部材波力を計測した。

(3) 実験結果

a) 波反射率

反射率の計測結果を表-3 に示す。実験①・実験②ともに、供用時および暴風時において反射率は 0.5 以下となった。実験①と実験②で反射率の大小が逆転しているのは主に遊水室幅変更の影響で、入射波の波長と遊水室幅の関係によると考えられる。

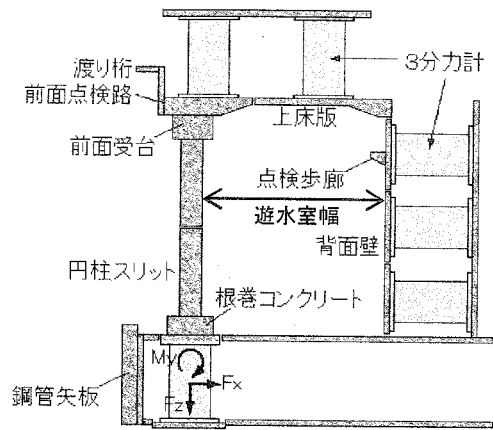


図-4 実験②で用いた護岸模型の構造

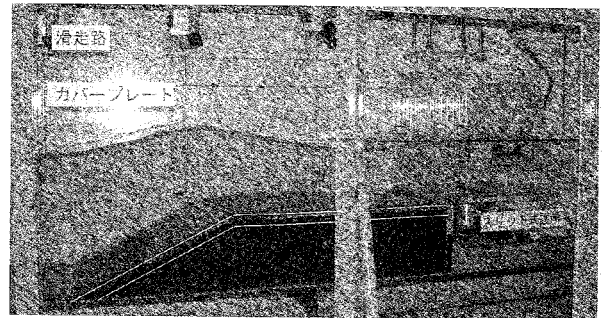


写真-1 実験②の実施状況

表-3 波反射率の計測結果

	供用時 ($H_{1/3}=1.97\text{m}$ M. W. L. AP+1.2m)	暴風時 ($H_{1/3}=4.15\text{m}$ H. H. W. L. AP+4.0m)
実験①	0.385	0.476
実験②	0.468	0.356

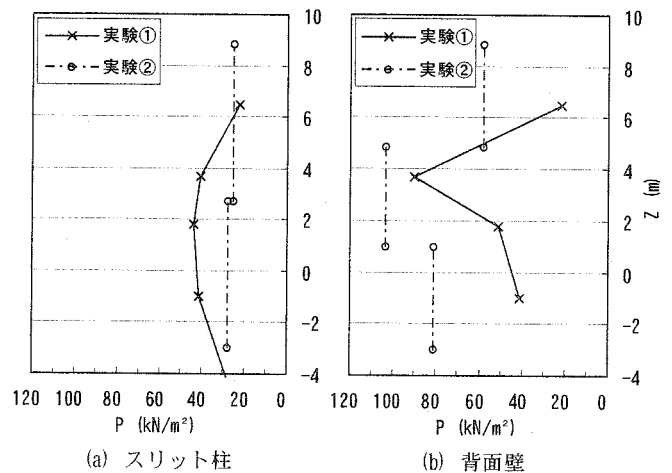


図-5 実験における最大作用波圧

b) 部材作用波力

スリット柱と背面壁それぞれに作用する水平方向の最大波圧について、実験①・実験②の計測値（実験②では波力を波圧に換算）を図-5 に示す。スリット柱では、実験①より実験②の方が波圧は小さくなったが、逆に背面壁では実験②の作用波圧の方が大きくなる傾向となった。実験②では、根巻コン

クリート、点検歩廊など、構造部詳細を忠実に模型化したため、波の当たり方が若干変化したことが理由と考えられる。

c) 波の挙動

実験②では、各構造詳細部における波の挙動の観察も行っており、例えば背面壁の点検歩廊では、下部のハンチ部が波返しとして機能し、歩廊上面には暴風時にも波浪の水塊が当たらないことなどが確認できた。

4. 消波護岸の設計

(1) 設計に用いる波力の設定と設計

a) 消波ケーソンの設計に用いられる波力

直立消波ケーソンに作用する波力について、高橋・下迫らは、直立壁に作用する波力（合田式）に補正係数を導入することにより、波力の作用状況の

異なる代表的な位相に対する波力を与えている²⁾。

$$p_1 = 0.5 \cdot (1 + \cos \beta) \cdot (\lambda_1 \alpha_1 + \lambda_2 \alpha^* \cos^2 \beta) \cdot \rho_0 g H_D$$

ここで、

p_1 ：静水水面における波圧強度

α_1 ：合田式において重複波的成分を表すパラメータ

$\alpha^* = \max |\alpha_1, \alpha_2|$ ： α_2 は合田式においてマウンド高さや海底勾配等による衝撃波的成分を表すパラメータ

β ：波向きと護岸法線の垂線がなす角度(=0°)

$\rho_0 g$ ：水の単位体積重量

H_D ：設計に用いる波高

λ_1, λ_2 ：波力補正係数

また、港湾基準には模型実験に基づく直立消波ケーソンに作用する波力の例が示されている³⁾。これらの消波ケーソンの波力の算定式を表-5にまとめる。

b) 実験結果に基づく設計波力の設定

表-5 直立消波ケーソンの波力の算定式

		合田式	高橋・下迫らの式における補正係数			港湾基準
ケース名称		①	②-1 押し波時Ⅰ スリット部の波力が最大となる位相	②-2 押し波時Ⅱa 遊水室後壁に衝撃的な波力のピークが現われる位相	②-3 押し波時Ⅱb 遊水室後壁に比較的にゆるやかに変化する波力のピークが現われる位相	③消波ケーソン実験例 直立消波ケーソンの模型実験例に基づく
部 位	スリット	1.0	$\lambda_1 = 0.85$ $\lambda_2 = 0.4 (\alpha^* \leq 0.75)$ $0.3/\alpha^* (\alpha^* > 0.75)$	$\lambda_1 = 0.7$ $\lambda_2 = 0.0$	$\lambda_1 = 0.3$ $\lambda_2 = 0.0$	$p_H = 1.0 w_0 H_{max}$
	背面壁	1.0	$\lambda_1 = 0.0$ $\lambda_2 = 0.0$	$\lambda_1 = 20 \ell / 3L' (\ell / L' \leq 0.15)$ $1.0 (\ell / L' > 0.15)$ $\lambda_2 = 0.56 (\alpha^* \leq 25/28)$ $0.5/\alpha^* (\alpha^* > 25/28)$	$\lambda_1 = 1.4 (H_D/h \leq 0.1)$ $1.6-2 H_D/h (0.1 < H_D/h < 0.3)$ $1.0 (H_D/h \geq 0.3)$ $\lambda_2 = 0.0$	上部： $p_{H1} = 2.0 w_0 H_{max}$ 下部： $p_{H2} = 1.0 w_0 H_{max}$
	上床版	—	—	—	—	$p_U = 2.0 w_0 H_{max}$

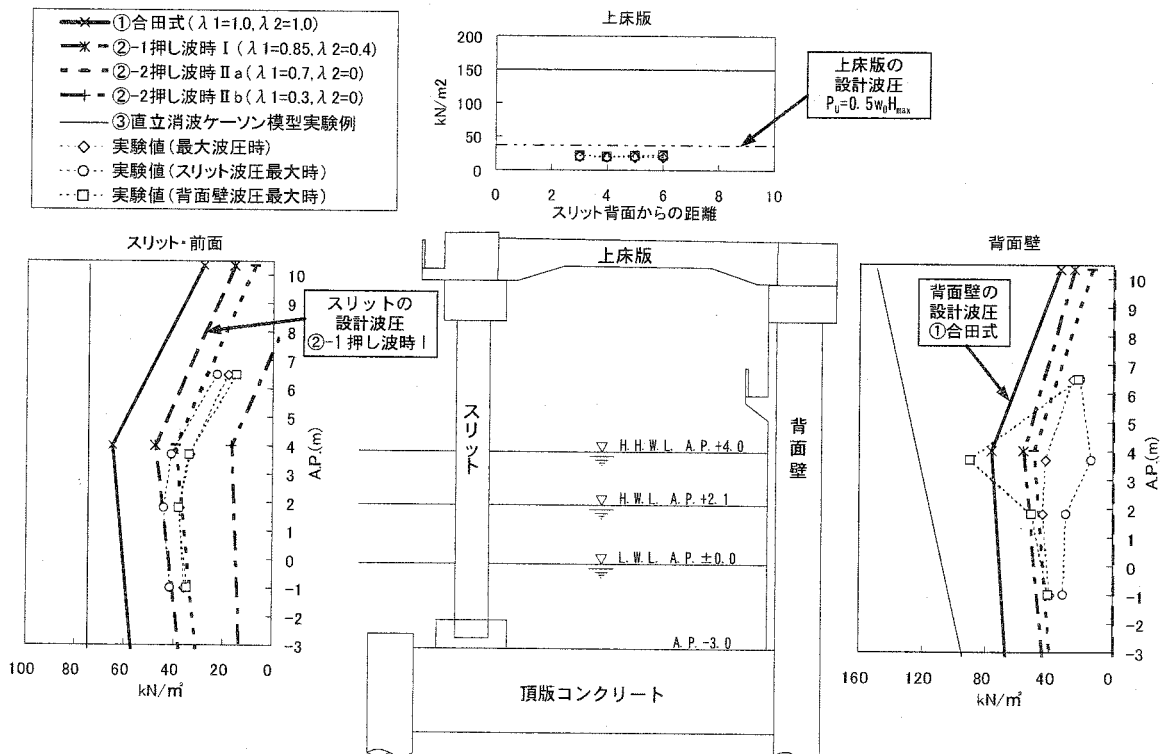


図-6 実験①による波圧の計測結果と各種算定式による波圧の比較

実験①による波圧の測定結果と表-5 に示した各提案式による波圧を図-6 に示す。スリット柱に作用する波圧については、合田式はやや過大であり、高橋・下迫らの式と実験結果はほぼ近いことから、スリットの設計波力は高橋・下迫らの押し波時Ⅰの波圧とした。

上床版の上揚力については、港湾基準の消波ケーソン実験例 ($p_U=2.0w_0H_{max}$) に比べて、今回の実験値は半分以下とかなり小さい。実構造物は全長約428m に渡って連続していて空気が閉じ込められる

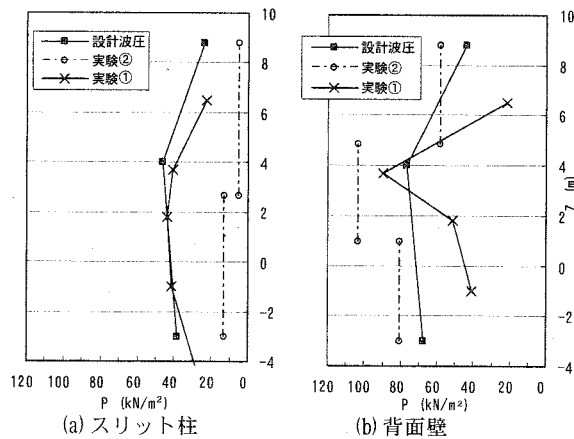
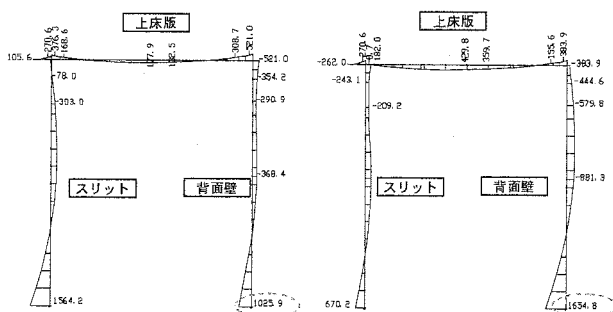


図-7 波力測定結果 (実験②, 背面壁最大時)



実験①に基づく設計波力作用時 実験②による最終断面
図-8 暴風時波力による各部材の発生断面力

ことがないため、水理実験では空気孔を設けた。そのため、空気の圧縮による衝撃的な波圧が作用しなかったことが理由と考えられる。ここでは、上揚力の設計値を $p_U=0.5w_0H_{max}$ とした。

背面壁に作用する波圧の実験結果も、高橋・下迫らの簡便式による押し波時Ⅱa (遊水室後壁に衝撃的な波力のピークが現われる位相) と近い値となっているが、一部で大きな波圧も計測されたことから、合田式による直立壁の波力を設計波力とした。

c) 波力に対する設計

消波護岸の設計では、2次元骨組みモデルを用いて設計荷重を作用させて断面力を算出した。暴風時の設計では、前述したスリット、上床版、背面壁の各部材の最大波力を同時に作用させる場合のほか、単独に作用する場合や2つの部材に作用する場合等、様々な波力の作用組合せを考慮した。

(2) 最終断面の波力 (実験②) による検証

実験②において3分力計で計測した波力を用いて最終断面の設計照査を行った。最終断面に作用する波力では、背面壁に作用する波力が実験①に基づく設計値よりも大きくなったことから、背面壁に作用する波力が最大となる同時刻の波力を各部材に作用させて照査した。背面壁最大時の波圧分布を図-7 に、それによる発生断面力を図-8 に示す。最終断面では背面壁下端の断面力が増加したものの、部材耐力の余裕代で対応できる範囲であり、最終的な消波護岸の断面で問題ないことを確認した。

5. 消波護岸の施工

(1) 施工の基本方針とフロー

羽田空港D滑走路工事では急速大量施工が要求されるため、海象条件に左右されない施工方法が必要であった。特に接続部護岸工事は、埋立部と栈橋部という異なる構造物の境界部分に位置することから、

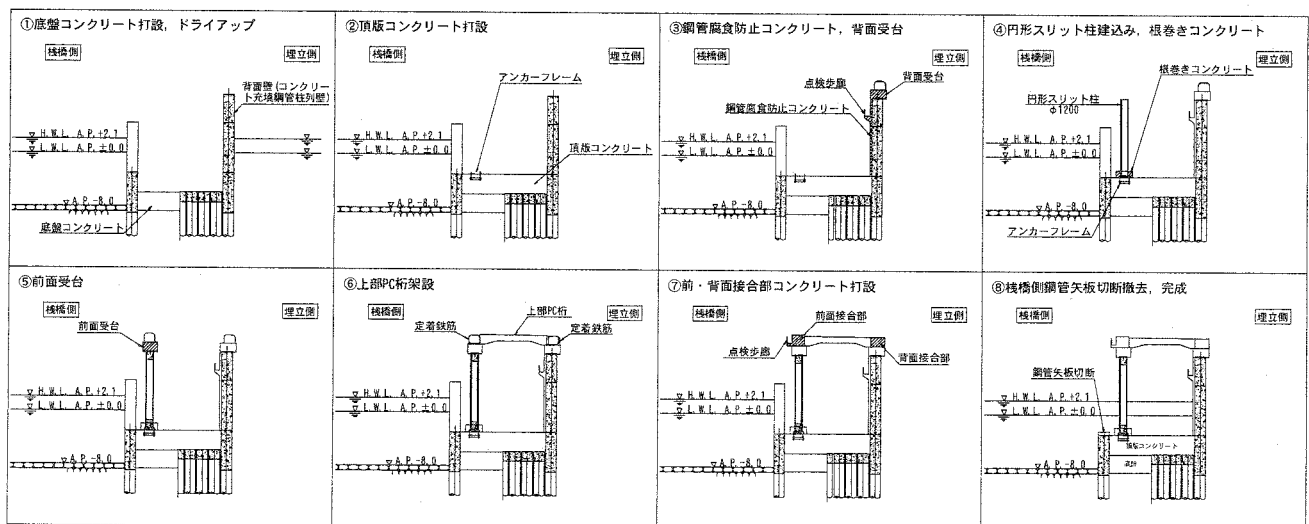


図-9 消波護岸の施工ステップ図

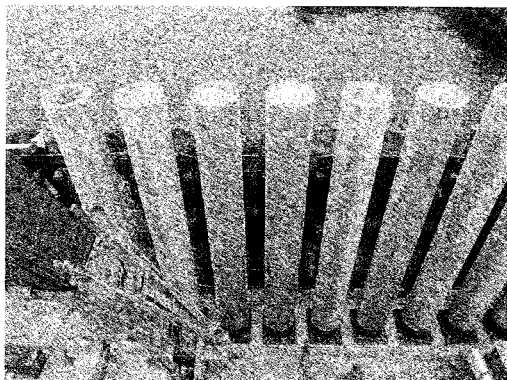


写真-2 スリット柱建込み状況

全体工程に影響を及ぼさないよう埋立工事及び栈橋工事との干渉を極力少なくしなければならなかった。このような制約条件に対し、接続部の消波護岸の施工では、鋼管矢板基礎による仮締切り兼用工法を採用して、消波護岸の躯体構築をドライアップした気中施工で行うことにより海象条件の影響を軽減するとともに、円形スリット柱及び上部 PC 桁をプレキャスト化し、背面壁をコンクリート充填鋼管とすることによって、現場での鉄筋組立、型枠作業を減らし急速施工を可能とする工法を採用した。接続部の消波護岸の施工ステップを図-9 に示す。

(2) 円形スリット柱の製造・据付

円形スリット柱の製造は、基礎杭として一般的に利用されているPHC杭と同様に、遠心力締固めと常圧蒸気養生による方法を用いた。設計基準強度 80N/mm^2 、水セメント比26%の高強度コンクリートである。軸方向のPC鋼棒とフープ筋には塩害に対する耐久性を高めるためエポキシ樹脂塗装鋼材を使用した。工場で製造したスリット柱は積出し岸壁まで陸送し、現場まで台船で海上輸送した。スリット柱の建込みにはクレーン付き台船を使用し、夜間作業で頂版コンクリート中に埋め込まれたアンカーフレームに建込みボルト接合した（写真-2）。

(3) 背面壁の施工

背面壁は鋼管矢板の中にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼管柱列壁である。鋼管の腐食防止のため鋼管矢板の遊水室側に打設した被覆コンクリートには膨張コンクリートを使用し、ひび割れ防止鉄筋（エポキシ樹脂塗装）を配置してひび割れ発生の抑制に努めた。また、背面壁には、供用後の維持管理において、遊水室内部の点検が可能となるよう点検歩廊を設置した（写真-3）。

(4) 上部PC桁の施工

消波護岸のラーメン構造の上床版に相当する上部PC桁も、工場で製造したプレキャスト部材を現場まで輸送し、200t吊り起重機船で前背面の受台上に架設した。上部構造は護岸延長方向に10ブロックに分

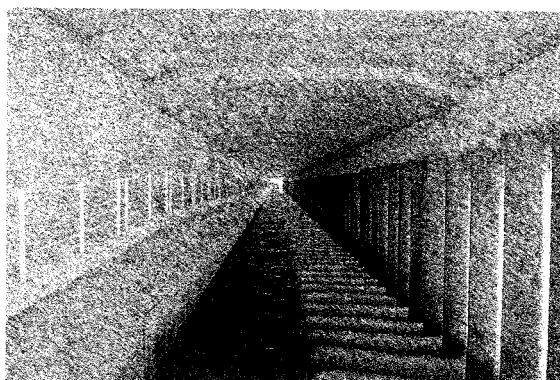


写真-3 遊水室内部の点検歩廊（左側）

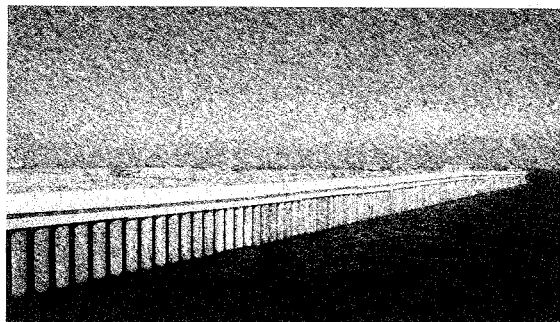


写真-4 接続部の消波護岸完成状況

割されており、PC桁間に間詰めコンクリートを打設した後、1ブロックごとに横締めして一体化した。上部PC桁の両端部からは定着用のループ形の鉄筋が出ており、接合部コンクリートを打設して円形スリット柱並びに背面壁と接合した。

6. おわりに

水理実験による波力を基に、プレキャスト PC 部材によるスリットを構造部材として使用するという過去に例のない消波護岸の設計を行った。また、仮締切り兼用工法とプレキャスト部材の利用等により、消波護岸の施工は最初のブロックをドライアップした 2008 年 11 月末から、最終の上部 PC 桁の接合が完了した 2009 年 7 月末まで、約 8 ヶ月間で完了することができた（写真-4）。D滑走路工事は 2010 年 8 月末竣工、同年 10 月供用開始予定である。このD滑走路の完成により羽田空港の利便性が増し、我が国の発展に益々貢献することを願う。

参考文献

- 1) 稲垣聡, 向原健, 池谷毅, 新原雄二, 宮田正史, 野口孝俊: 鋼管矢板井筒護岸に適用したスリット式消波構造, 第 32 回海洋開発シンポジウム, 海洋開発論文集, 第 23 巻, pp. 1105-1110, 2007. 7.
- 2) 高橋重雄, 下迫健一郎, 佐々木均: 直立消波ケーソンの部材波力特性と耐波設計法, 港湾技術研究所報告第 30 巻第 4 号, 1991. 12.
- 3) (社) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下), 2007. 7.