# 透過性護岸の安定性および透水性に関する水理実験 Hydrauric Experiments on Stability and Premeability of Revetment

平原光彦\*中村衛\*Mitsuhiko HiraharaMamoru Nakamura平澤哲夫\*土橋吉輝\*\*Tetsuo HirasawaYoshiteru Dobashi福本正\*\*高村浩彰\*\*Tadashi FukumotoHiroaki Takamura

#### 要 約

ポートアイランド沖護岸築造工事は、神戸空港の外周護岸を築造するものである。神戸市は環境 創造施策の主要事項として、市民の環境学習や自然とのふれあいを広げていく目的で人工ラグーン の造成を計画している。当社工事区域には、天端が高い空港護岸とは別に、人工ラグーン内の海水 交換促進のための透過式低天端護岸が築造される。そこで、海水交換用の透過ブロックを有する低 天端ラグーン護岸を再現した水理模型実験を行い、護岸背面の安定性と透過ブロックによる透過量 を把握した。実験結果をもとに、空港機能を阻害することのない護岸の安定性を考慮した構造検討 を行い、最適な護岸の断面設計を行うものである。

- 目 次
- §1. はじめに
- §2. 工事概要
- §3. 水理模型実験の概要
- §4.透水実験結果
- §5. 波浪実験結果
- §6. おわりに

## §1. はじめに

神戸空港は、ポートアイランド(第1期)の南約3km (三宮から約8km)に位置する面積272haの人工島であ る.2,500mの滑走路を1本有し、1日合計で30便、平 成17年度の開港当初は年間340万人の旅客需要を見込 んでいる.空港島と各港や国際線の拠点空港としての関 西国際空港を結ぶ海上アクセス、国内線の基幹空港とし ての大阪国際空港(伊丹)陸上交通アクセスの導入をも 検討している都心型空港である.

神戸市は、空港建設の環境創造施策を推進するにあた り、外郭護岸の緩傾斜化、親水空間創出のための人工ラ グーンの造成など、人と海・自然とのふれあい、人と人 のふれあいを目的とした生涯環境学習施設の導入を検討 している、人工ラグーンの前面にはラグーン内部の海水

\*\*技術研究所技術研究部土木技術研究課

交換促進のために,透過式低天端護岸が築造される.こ の低天端護岸の安定性と透水性に関して,水理模型実験 を行った.

#### § 2. 工事概要

ポートアイランド沖の神戸空港島の造成に伴う護岸総 延長約7kmの内,緩傾斜石積護岸の約830mを築造す るものである.本工事には、ラグーン護岸,西護岸,北 護岸の異なった天端高を有する護岸断面が存在する.特 にラグーン護岸は、海水交換を目的とする透過性の護岸 で、将来は、人工ラグーンとして親水公園の一部とな る.また、神戸空港から明石海峡大橋を望む絶好の ビュースポットになる予定であり、このため低天端の護 岸となる.

- (1)工 事 名:ポートアイランド沖護岸築造工事 (その 6)
- (2)企 業 先:神戸市港湾整備局
- (3)場 所:神戸市中央区港島南町4丁目の地先公有水 面
- (4)工 期:平成11年9月22日~平成14年10月31 日
- (5)施工者: 西松・戸田・大日本・吉田 JV
- (6)工事内容:敷砂工,地盤改良工,基礎工,本体工,ブ ロック据付工,計測工,土質調査工,付帯 工

<sup>\*</sup> 関西(支)港島沖(出)

#### §3. 水理模型実験の概要

### 3-1 実験計画

- (1)本実験は断面2次元実験とする.
- (2)模型実験スケールは25分の1とする.
- (3)実験の対象構造物は、図-1に示す護岸全体である.
- (4)図-1に示す盛砂①,盛砂②および捨石①については 固定床とする.
- (5)捨石②については移動床とし、粒径が 5~30mm の砕 石等によって再現する.
- (6)透過ブロックの開口率は、開口率40%(タイプ A)、
  30%(タイプ B)および20%(タイプ C)の3ケース(計画時の値)を対象とする.
- (7)水理模型実験は、まず、透水実験を行う.設定した3 種類の透過ブロックの透水実験を行い、各開口率に応 じた透過量を把握する.この結果から、将来のラグー ン形成時における海水交換で必要とする最低限の開口 率を決定する.次に、波浪実験を行う.決定した開口 率の透過ブロックを用いて、背面の安定と波高伝達率 に関する実験を行う.



図-1 低天端ラグーン護岸断面図

#### 3-2 模型の設置状況

透水実験を行うに当たり,沖から岸への流れ(以降, 順流と呼ぶ)と岸から沖への流れ(以降,逆流と呼ぶ) の向きの違いによる平均流量の変動を最小限にするた め,水路の中央に護岸模型を設置した.

実験で採用する上部ブロックの天端高さは,沖積層の 沈下が完了し,洪積層の沈下量を見込んで+5.00 に設 定する.この天端高さでは,L.W.L時には上部ブロッ クに設けてある開口部が露出することとなる.しかしな がら,開口部を有するような水理模型実験では,開口部 が水没していなければならない.そこで,透水実験を行 う際の初期水位をH.W.L程度(+1.75m)と決定した (開港時の水面高さ+3.25mに相当).この値は,3種類 の開口部を用いた実験において,

①最大流量条件下でも開口部が露出しない

②上部ブロック天端を越流しない

という範囲の中で決定したものである.

**写真-1** はラグーン模型の設置状況を示したものである. 捨石②の表面には、1t 程度の石を再現しており、 滑動等の明確化のために天端の石のみを着色している.

図-2に計測器の設置状況を示す.波高計8本,流速 計3本を使用している.また,圧力計は透過ブロック模 型の前面直立壁2個,天端2個および背面直立壁1個を 設置している.



写真-1 護岸模型正面

#### 3-3 実験条件

(1)透水実験

開口率の異なる上部ブロックごとに,流量は0.058 m<sup>3</sup>/sから0.012m<sup>3</sup>/sまでを循環させ,この間を最大10 分割(11ケース)し,条件を決定した.これらは,模 型前後の水位差で6.6cmから0.3cmまでに相当する.

計測は,設定流量1ケースに対し3回行い,解析には その平均値を用いている.各ケース間の待ち時間は約5 分である.サンプリングタイムは0.02s で,4096 個の データを記録している(約82 秒間).流量を変更した場 合は,安定するまで10分間待機することとした. (2)波浪実験

透過ブロックAおよびCタイプに対して波浪実験を 行う.対象とする波浪は、50年確率波(有義波高 4.02m,有義周期8.4s)と10年確率波(有義波高 3.5m,有義周期7.6s)の2種類とする.

波数で 1000 波以上を計測できるように,計測のサン プリングタイムを 0.1s とし,16500 個のデータを記録 している (27 分 30 秒間).



図-2 波高および流速計の設置状況

§4. 透水実験結果 (猿川ら<sup>1)</sup>,明田ら<sup>2)</sup>)

#### 4-1 水位差と流量の関係

順流時と逆流時(図-2参照)において,構造物の前 後で生じる水位差には若干の差異があり,順流時の水位 差の方が大きいことが確認された.これは透過ブロック の前方にある消波ブロックの影響と考えられる.水位差 は,流量の増加とともに増加する.増加傾向は2次曲線 的であり,流量が増加するほど水位の増加率も大きく なっていた.また,開口率の違いによる抵抗が大きいほ ど生じる水位差が大きくなることが確認された.

#### 4-2 流速と流量の関係

計画時に、透過ブロック背面(開口部前面)での流速 が、噴流となって吹き出し、この流れが捨石②の天端上 の石への悪影響が懸念された.しかしながらは、捨石② 上の被覆石が動くことはなく安定していた.流量の増加 とともに流速も増加しており、両者の相関は高い.B および C タイプに比べて、A タイプの流速は多少小さ く、構造物に与える影響は少ないものと判断される.

#### 4-3 断面平均流速と水位差の関係

西守ら<sup>3)</sup>は、断面平均流速と水位差の平方根の関係 から、直線の勾配として透過性能を評価している.流量 Qの水が透過ブロック等を通過する際,流入側の水深 をh,水路幅をBとすれば,流入側の断面平均流速 v は次式で表わされる.

$$v = Q/Bh$$
 .....(1)

護岸の前後に生じる水位差 $\Delta h_a$ が,護岸による摩擦 損失,形状損失によると仮定すると、 $\Delta h_a$ と断面平均 流速 v との関係は、

となる.

ここで, αは損失係数, gは重力加速度 (=9.8m/s<sup>2</sup>) である. (2)式から v は以下のように求められる.

透過ブロック内の流速を(3)式とし,得られるCを透 過係数と定義する.透過係数は,その値が大きいほど透 過能力が高いことを意味している.図-3は本実験結果 を順流および逆流毎にプロットしたものである.断面平 均流速は水位差の平方根に比例しており,相関が高いこ とがわかる.図-3から得られた透過係数(直線の傾 き)を表-1に示す.なお,この透過係数は[L<sup>±</sup>·T<sup>-1</sup>] の次元を持っていることに留意する必要がある.



#### 図-3 断面平均流速と水位差の平方根の関係

表-1 直線の傾きから得られた透過係数

	透過係数		
	順 流	逆 流	
А	0.267	0.272	
В	0.255 0.269		
С	0.234 0.263		

#### 4-4 乱流抵抗係数の算定

出口<sup>4)</sup>は、非線型ダルシー則を用いて透過ブロック の透過性能を評価することを試みている.流体運動に関 する運動方程式を次式に示す.

$$-\frac{1}{\rho}\nabla = (\mathbf{p} + \rho \mathbf{g}_{\mathbf{Z}}) = \frac{\nu}{\mathbf{k}_{\mathbf{p}}} \nabla + \frac{C_{\mathbf{f}}}{\sqrt{\mathbf{k}_{\mathbf{p}}}} \nabla^{2} \qquad \qquad \cdots \cdots \cdot (4)$$

ここで、 p は圧力、  $\rho$  は流体の密度、 z は鉛直座 標、 v は流体の動粘性係数、 g は重力加速度、 V は流 速、  $k_p$  は長さの2 乗の次元を持つ係数であり、 C<sub>f</sub> を乱 流抵抗係数と定義する. また、(4)式の左辺は動水勾配 *č*で表わすことができ、見かけの透水係数として  $k_{pe}$  を (5)式のように定義すると、(4)式から(6)式が導ける.

(5)式から得られる 1/k<sub>pe</sub> とそれに対応する実測された 流速(V)をプロットしたものが図-4である.なお, 開口率の異なるブロック毎に表示しているものの,1次 近似曲線の精度を向上させること,理論上,順流と逆流 における値の差は小さいことを考慮し,それぞれを区別 することなく図化している.図より,見かけの透水係数 と実流速は非常に相関が高いこと(線形性が強いこと) が分かる.そこで,図から読み取られる1次近似曲線の 傾きと切片から,見かけの透水係数(1/k<sub>pe</sub>)と乱流抵 抗係数(C<sub>4</sub>)を求めると**表-2**のようになる.得られた 透水係数および乱流抵抗係数は,森田・出口<sup>5)</sup>に示さ れる結果(水平通水路型防波堤の結果)とほぼ同程度の ものであり,これらの値は妥当であるものと考えられ る.



図-4 見かけの透水係数と流速の関係

	$\frac{C_{\rm f}V}{\nu\sqrt{k_{\rm p}}}$	$\frac{1}{k_p}$	k <sub>pc</sub>	C <sub>f</sub>
А	4.939	5.944	0.168	0.020
В	5.791	5.466	0.183	0.025
С	6.318	3.953	0.253	0.032

表-2 透水係数と乱流抵抗係数

#### 4-5 透水実験のまとめ

本工区内に造成予定である人工ラグーン内の海水交換 を考える場合,ここで言う逆流時の透過係数が大きい方 が,内水の停滞を防げるものと考えられる.この場合, ラグーン内に流入してくる海水の量と流出する量は同じ である方が良い.すなわち,この条件を満たすために は,同一の開口率において,順流と逆流の透過係数の差 が小さい方が良いことになる.実験で用いた模型の中で はAタイプにおける差がもっとも小さい(0.005).ま た,透過性を高めるためには,乱流抵抗係数を小さくす る必要があり,Aタイプがもっとも小さくなっている (0.02).

以上のことから, ラグーン内の海水交換のためには, 開口率のもっとも大きい A タイプの透過ブロックが良いものと判断される.

## §5. 波浪実験結果(高橋・下迫<sup>6)</sup>,高橋ら<sup>7)</sup>)

透水実験の結果を踏まえ,透過ブロックは A および C タイプにおいて波浪実験を行い,ブロックの違いによ る波浪変形の状況を把握する.

#### 5-1 経時変化

水深 H.W.L: 73.2cm, 有義波高 16.08cm, 有義周 期 1.68s における波高, 流速および波圧の経時変化を一 例として図-5 に示す(透過ブロックは A タイプ). 護 岸の前面に設置している波高計 W5 の最大値に追随し て,開口部から出てくる流速(正の値)と波圧が大きく なっていることがわかる.





## 5-2 波高伝達率

図-6 は各波高計測点で得られた有義波高を示したも のである. 横軸は,入射波計測の基準位置としている波 高計W2からの距離を取っている. 有義波高は統計解析 処理によって得られた値である. また,上図が A タイ プの結果,下図が C タイプの結果をそれぞれ示してい る. 両タイプとも消波の状況や,水深が深くなる場合は 消波効果が低くなることなど,同様な傾向となってい る.

入射波に対する波高伝達率をまとめたものが表-3である.ここで示す伝達率とは、入射波有義波高(W2) と岸側の有義波高(W6あるいはW8)との比であり、 計測された値を用いて算出している. 水深が浅い場合(L.W.L),最も岸側のW8の伝達率 は護岸背後W6の伝達率より小さくなっている.W6か らW8までの距離は約11m(実機スケールで約275m に相当)である.これは,W6の波高が小さいため, W8に到達するまでに,更に減衰したものと考えられ る.

一方,水深が深い場合(H.H.W.L),W6の値とW8 の値にほとんど差が無い結果となっている.水深が小さ い場合,透過ブロックのAタイプ(1~4)よりCタイ プ(5~8)の方が小さくなっているものの,その差はほ とんど無くなっている.透過ブロックの違い(開口率の 違い)が護岸背後の透過波に及ぼす影響は小さいといえ る.

そこで、水深毎に護岸背後の伝達率として透過ブロックA およびC における W6 および W8 での平均値を求めた.その結果、50 年確率波における伝達率は、それぞれ H.H.W.L で約 27.7%, H.W.L で約 15.2%, L.W.L で約 8.8% となる.10 年確率波では、約 13.5%







となった.

#### 5-3 セットアップ量

各波高計測点で得られた平均水面の変化を解析した. 護岸の前面にある波高計W5を境に,沖側ではセットダ ウン,岸側ではセットアップの傾向にあることが分かっ た.また,AタイプよりもCタイプの方が変動が若干 大きくなっている.特に,H.H.W.L時(水深 81.2cm) では,その傾向が顕著であり,他の2つの水深における セットアップの値はゼロ近傍を推移しているのに対し て,H.H.W.L時にはプラスの値をどの計測位置でも 確認できた.なお,岸側のセットアップ量は非常に小さ く,この値が護岸および将来的に造成される汀線の安定 性に悪影響を及ぼすことはないものと判断される.

# **5-4** 最大波圧(山本<sup>8)</sup>,高橋ら<sup>9)</sup>)

沖合の入射波(W2)に比べ,構造物前面の波高(W5)は,減衰しているものの,最大波圧は,W5での 波高が最大となった場合に発生していることが時系列 データから確認されている.また,最大波圧はどのケー スにおいてもP2の値が最も大きくなっている.

波圧の計測結果の一例として、Aタイプの透過ブ ロックを用いた場合における50年確率波での結果を図 -7に示す. 横軸に波高計W5における最大波高を,縦 軸に最大波圧を取ってプロットしている. 水深が H.W.L時(73.2cm)において,直立面に作用する波圧 が最大となっている. L.W.L時には,前面の消波ブ ロックで波エネルギーがほとんど減衰していること, H.H.W.L時には,越流となって天端を越えていくこと などのため,H.W.L時に最も波圧が大きい結果となっ たものと考える. この傾向は,透過ブロックをCタイ プに変えた場合でも同様であった.



W5 での最大波高との関係

# 5-5 反射率

表-4は各実験条件における反射率を示したものであ る.ここで算出された反射率は、図-2に示すW1およ びW2で計測された記録に、入反射波分離処理を施し得 られた値である。AタイプとCタイプとの反射率の差 はほとんど見られず、透過ブロックの前面に配置された 消波ブロックと前方の固定床によるものであると考えら れる。AタイプおよびCタイプの結果を平均すると、 50 年確率波においてL.W.Lでは0.36, H.W.Lでは 0.34, H.H.W.Lでは0.27となる。また、10 年確率波 のH.W.Lでは0.30となる。

表-4 護岸模型の反射率

- Nr izr	平均反射率		
小休	Aタイプ	Cタイプ	
L.W.L (16.6m)	0.364	0.358	
H.W.L (18.3m)	0.345	0.336	
H.H.W.L (20.3m)	0.275	0.270	
H.W.L (18.3m)	0.301	0.291	

#### **5-5 波浪実験のまとめ**(早川ら<sup>10)</sup>)

波浪実験結果から,消波性能および最大波圧は,開口 率による差がほとんど無いことが確認された.

背面の安定性については, H.W.L 時に 50 年確率波 が襲来した場合, 捨石②の天端法肩が被災する可能性が あることが確認された.実験中に移動した被覆石は,小 さ目のもの(実機スケールで約 800kg)であったことを 考慮すると,法肩付近に水塊が突入することを防ぐため に天端幅を延長すること,あるいは,大き目の被覆石を 敷くことなどで対応することが可能であると考える.

護岸内の静穏性等を検討する際は,表-5を参照し, 先の静穏度に関する数値計算結果を踏まえた上で実施す る.

表一5 対応する水深と伝達率および	「反射率の関係
-------------------	---------

	天端高さ (m)	50年確率波を対象とした水深		
施工時	+5.0	L.W.L	H.W.L	H.H.W.L
開港時	+3.5	-	≒L.W.L	≒H.W.L
伝達率	-	0.07	0.15	0.29
反射率	_	0.36	0.34	0.27

## § 6. おわりに

透水実験および波浪実験結果を以下にまとめる. 透水実験:

- 本論文で定義した透過係数および乱流抵抗係数を用いて、実スケールでの検討を行うことが可能である.
- ②海水交換を良好にするためには、開口率は大きい方が良い.

波浪実験:

- ①開口率の違いによる波浪特性の変化は小さい.
- ②衝撃波圧はH.W.L時のブロック上端で最も大きくなる.
- ③波圧の変動は波高の経時変化に依存している.
- ④背面の捨石天端については再検討の必要性が考えられる.

謝辞:本水理模型実験の計画,実施およびデータ整理に 際して,大阪大学大学院工学研究科教授 出口一郎博 士,同助手 荒木進歩博士から多大なるご指導を賜っ た.ここに記して,謝意を表します.

#### 参考文献

- 1) 猿川 弦,水野雄三,笹島隆彦,木村克俊,高橋哲 美:消波ブロック被覆型有孔堤の海水交換特性に関 する研究,海岸工学論文集,第40巻,pp.971-975, 1993.
- 2)明田定満,山本泰司,木村克俊,三船修司:消波ブ ロック被覆型有孔堤の海水交換,海洋開発論文集, 第14巻, pp. 531-534, 1998.
- 出口一郎:透過性構造物による波の変形,土木学会 水理委員会,水工学シリーズ94-B-7,16p, 1994.
- 西守男雄、日比野忠史,豊田政史,細川恭史,石原 込一,森下正志,鶴谷広一:海水交換型防波堤の透 過量評価手法の提案,港湾技術研究所報告,第38 巻第2号, pp. 63-96, 1996.
- 5) 森田修二, 出口一郎: 通水路型防波堤の通水特性に 関する研究, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.273-278, 2000.
- 6) 高橋重雄,下迫健一郎:防波堤の耐波設計,港湾工 学専門技術者水工コース研修テキスト, p. 85, 1996.
- 7)高橋重雄,半沢 稔,佐藤弘和,五明美智男,下追 健一郎,寺内 潔,高山智司,谷本勝利:期待被災 度を考慮した消波ブロックの安定重量―消波ブロッ ク被災堤の設計法の再検討,第1報―,港湾技術研 究所報告,第37巻,第1号,pp.3-32,1998.
- 山本泰司,木村克俊,谷野賢二:消波ブロック被覆 型有孔堤の設計波力,開発土木研究所月報,No. 518, pp. 8-14, 1996.
- 9) 高橋重雄,下迫健一郎,上部達生:衝撃砕波力に対する防波堤ケーソンの動的挙動,港湾技術研究所報告,第33巻,第2号,pp.59-86,1994.
- 早川哲也,渡部靖憲,鈴木孝信,木村克俊,土井善和,工藤貴弘:混成堤における越波水の打ち込み特性と被覆材の安定性,海岸工学論文集,第45巻, pp. 691-695, 1998.