消波ブロック形状の違いが 流況特性に及ぼす影響に関する実験的研究

松下 紘資¹・東 良慶²・大熊 康平³・中西 敬⁴・間瀬 肇⁵・平石 哲也⁶

¹正会員 博(工) 日建工学株式会社 技術部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-10-1)

E-mail:matsushita@nikken-kogaku.co.jp

²正会員 博(工) 大阪工業大学准教授 工学部 (〒535-8585 大阪府大阪市旭区大宮5丁目16-1)

E-mail:ryoukei.azuma@oit.ac.jp

³正会員 日建工学株式会社 技術部 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-10-1)

E-mail:ooguma@nikken-kogaku.co.jp

⁴正会員 博(工) 日建工学株式会社 顧問 (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6-10-1)

E-mail:naka24@nikken-kogaku.co.jp

⁵正会員 工博 京都大学特任教授 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:mase.hajime.5c@kyoto-u.ac.jp

⁶正会員 博(工) 京都大学教授 防災研究所 (〒612-8235 京都府京都市伏見区横大路下三栖東ノ口)

E-mail:hiraishi.tetsuya.2c@kyoto-u.ac.jp

性能設計において、消波ブロックの形状特性を考慮するには形状の違いが流況に及ぼす影響を解明することが有効な手段の一つである。本研究では、丸型、角型、くぼみ型の3種類の消波ブロックを対象として、開水路に消波ブロックを設置した水理模型実験を実施し、粒子画像流速測定法(PIV)を用いて消波ブロック形状の違いが周辺流況に及ぼす影響を評価した。実験結果から求めた無次元乱れ強度とレイノルズ応力の空間分布より、ブロック形状ごとの流況特性が明らかとなった。また、丸型よりも角型、角型よりもくぼみ型が乱れを生じさせる能力が高いことがわかった。さらに、形状特性に関する係数と設置空隙率に関する係数を考慮することにより、種類の異なるブロックの波高伝達率を推定できることを示した。

Key Words : block shape, flow regime characteristics, PIV, wave transmission coefficient

1. はじめに

近年、海洋構造物の設計には性能設計が導入されており、港湾施設の設計に用いる「港湾の施設の技術上の規格・同解説(2007)」¹⁾や、漁港施設の設計に用いる「漁港・漁場の施設の設計参考図書(2015)」²⁾では、要求性能に応じて性能規定が示され、この性能規定に応じて性能照査が行われる。しかしながら、消波ブロックの性能照査に用いる透過率等の計算式については、形状による性能の違いが反映されたものは少ないのが現状である。そのため、消波ブロックの形状特性を考慮できる設計法の開発が望まれる。消波ブロックの形状特性を設計に反映するためには、まず形状の違いが流況に及ぼす影響を解明することが有効な手段の一つである。

消波ブロックの性能評価に関して、波高伝達率の計算式については、沼田³⁾が、異なるサイズの消波ブロックを用いた水理模型実験を実施し、Goda⁴⁾の金網フィルター理論に基づいた岩崎⁵⁾の波高伝達率計算式を、傾

斜式ブロック堤に適用できるよう発展させている。しかし、すべて同一種類の消波ブロックを使用した実験結果からの計算式である。大井⁶⁾は、異なる種類の消波ブロックを対象として消波性能の評価モデルを提案しているが、消波ブロック群を円柱群に換算するモデルとなっており、形状特性が直接反映されたモデルにはなっていない。

本研究では、開水路に消波ブロックを設置した水理模型実験を実施し、粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, 以下 PIV と示す)を用いて消波ブロック形状の違いによる周辺流況特性を明らかにする。

2. 実験の概要

(1) 実験装置

本実験では、長さ 10.0 m、幅 0.2 m、深さ 0.2 m で、側壁の全区間および水路上流端から 5.0~8.0 m の区間の底面がガラス製の可変勾配型循環式直線水路を用いた。図

図-1に実験装置の全体図を示す。図-1に示すように、単体のブロック模型を水路側面に固定した。PIVの撮影対象粒子は、水の動きに十分に追従する粒径 $100\mu\text{m}$ のナイロン12粒子を用いた。座標系は、流下方向を x 軸、 x 軸に垂直上向き（水路側面に垂直）を y 軸とし、 x 軸および y 軸方向の瞬間流速をそれぞれ $u=U+u'$ 、 $v=V+v'$ とした。ここで、 u, v は瞬間値、 U, V は時間平均値、 u', v' は変動成分である。東ら⁷⁾や松下ら⁸⁾の方法を参考に、ネオジムヤグレーザー（㈱日本レーザー製）を光ファイバーケーブルに通し、シリンドリカルレンズによって厚さ 2mm のレーザーシートとした。それを計測区間底面から、レーザーシート面が流下方向と平行になるようにして垂直上方に照射した。ブロック断面の違いによる流況の変化を比較するため、図-2に示すように、ブロックの底面から 44mm （断面1）と、 30mm （断面2）の位置でレーザーを照射し、計測を行った。画像撮影は、高速ビデオカメラ（DANTEC DYNAMICS A/S 製）を計測部側方に設置し、 2560×1600 ピクセルの画像を $1/100$ 秒間隔で 1000 枚（ 10 秒間）撮影して PC に記録した。

速を実施した。表中の平均流速 U_m は、消波ブロック模型に流れが作用する前の上流部で計測された流速の平均値であり、詳しくは次章で説明する。本実験におけるレ

図-1 実験装置

図-2 計測区間の消波ブロック設置平面図

(2) 消波ブロック

写真-1に示すように、本実験に用いた消波ブロックは、丸型ブロック、脚部が正六角形の角型ブロック、角型ブロックの側面にくぼみを有するくぼみ付ブロックの3種類である（以下、丸型、角型、くぼみ型と示す）。それぞれのブロック模型の大きさはほぼ同じ（高さ 67mm 程度）で、フルードの相似則による縮尺を $1/50$ とすると、ブロック模型は実機で 25t となる。

写真-1 消波ブロック模型

(3) 実験ケース

表-1に丸型の実験ケースを示す。実験ケースは、角型とくぼみ型についても同様である。

ブロックの向きによる違いを比較するため、写真-2に示すように、設置方向を3種類とした。また、流速の違いを比較するため、低流速 $U_m = 0.085\text{ m/s}$ （実物で 0.6 m/s ）と高流速 $U_m = 0.3\text{ m/s}$ （実物で 2.1 m/s ）の2種類の流

写真-2 消波ブロック模型の設置方向

表-1 丸型ブロックの実験ケース

No.	ケース	ブロック	設置方向	計測位置	平均流速 U_m (m/s): 計測値	レイノルズ数 Re	フルード数 Fr
1	T01_A.LC.0.6	丸型ブロック	A方向	LC	0.087	13044	0.07
2	T02_A.LC.2.1				0.314	47040	0.26
3	T03_A.BC.0.6			BC	0.083	12466	0.07
4	T04_A.BC.2.1				0.307	46019	0.25
5	T05_B.LC.0.6		B方向	LC	0.085	12700	0.07
6	T06_B.LC.2.1				0.314	47092	0.26
7	T07_B.BC.0.6			BC	0.083	12447	0.07
8	T08_B.BC.2.1				0.298	44655	0.25
9	T09_C.LC.0.6		C方向	LC	0.095	14227	0.08
10	T10_C.LC.2.1				0.300	45001	0.25
11	T11_C.BC.0.6			BC	0.086	12972	0.07
12	T12_C.BC.2.1				0.285	42803	0.24

イノルズ数 Re ($Re \equiv U_m h / \nu$: $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$, h は水深として計算) は, およそ 12500~47000 であり, フルード数 Fr ($Fr \equiv U_m / (gh)^{0.5}$) は 0.07~0.26 であった. なお, 本研究はブロックが没水した状態を対象としている.

3. 評価方法

(1) 平均流速

図-3 に丸型周辺の流況の撮影画像を示す. 解析におけるメッシュ数は 77 (x 軸方向) $\times$ 46 (y 軸方向) で, 1 メッシュはおよそ 3.5 mm である (0.1 mm / ピクセル). ブロック周辺やブロック下流側は複雑な流れが生じており不安定となっていることから, 平均流速については, 上流側の流れが安定している位置を対象として, 図中の白破線で囲った部分の平均値を用いた.

(2) 無次元乱れ強度

本実験では, 式(1)および(2)に示すように, x 軸方向と y 軸方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$, $\sqrt{v'^2}$ を平均流速 U_m で除した値

図-3 高速ビデオカメラの撮影画像
(丸型ブロック, 断面2, 高流速のケース)

を, それぞれ無次元乱れ強度 $\sqrt{u'^2}^*$, $\sqrt{v'^2}^*$ とし, 相対的な比較を行った.

$$\sqrt{u'^2}^* = \sqrt{u'^2} / U_m \quad (1)$$

$$\sqrt{v'^2}^* = \sqrt{v'^2} / U_m \quad (2)$$

4. 実験結果と考察

(1) 無次元乱れ強度の空間分布

図-4 および図-5 に, A 方向で高流速のケースの x 軸方向における断面1 と断面2 のブロック形状ごとの無次元乱れ強度の平均値の空間分布をそれぞれ示す. いずれの図も, 目視観察の状況と同様にブロック周辺および下流側に乱れが生じていることから, 正常に可視化されているものと推察される. 実験では下側からレーザーを照射しており, ブロックの上方部分は模型の影となることから, 値がゼロとなっている.

断面1 における分布をみると, 丸型に比べて角型とくぼみ型の方が乱れの生じている幅が広がっている. これは, 丸みを帯びた形状と角張った形状による流れの剥離へ与える影響の差が顕著に現れたものと考えられる. ピーク位置をみると, いずれのブロックもブロック周辺と下流側に出現しているが, 下流側のピークについては, ブロック通過直後から下流に向かうにつれて徐々に値が大きくなっていることがわかる.

続いて断面2 における分布をみると, 下流側の下端から上端まで乱れが生じており, 断面1 に比べて乱れの影響範囲が広いことがわかる. ピークについては, ブロック通過直後から下流に向けて徐々に値が大きくなっており, 断面1 と同様の傾向であった.

図-4 A 方向で高流速のケースの断面1 における x 軸方向の無次元乱れ強度の平均値の分布

図-5 A 方向で高流速のケースの断面2 における x 軸方向の無次元乱れ強度の平均値の分布

図-6 丸型ブロックに対するA方向で低流速のケースのx軸方向における無次元乱れ強度の平均値の分布

図-7 A方向で高流速のケースにおけるレイノルズ応力 (kN/m²) の平均値の分布

図-6に、丸型に対するA方向で低流速のケースのx軸方向における無次元乱れ強度の平均値の分布を示す。値の大きさは異なるものの、断面1、断面2ともに高流速と同傾向の分布状況となっていた。図-4および図-5の高流速のケースでは、ブロック設置位置から上流側に向かって角状に乱れが生じているが、低流速ではこのような分布は現れていない。このことから、流速が増すと上流側への乱れの影響が大きくなることがわかる。

(2) レイノルズ応力の空間分布

図-7に、A方向で高流速のケースのブロック形状ごとのレイノルズ応力 ($-\rho \bar{u'v'}$, kN/m²) の平均値の空間分布をそれぞれ示す。上段は断面1、下段は断面2である。(a)の丸型断面1の分布をみると、ブロック設置位置 ($x/h = 0.7 \sim 0.9$, $y/h = 0.3 \sim 0.5$) の下流側右下 ($x/h = 1.0 \sim 1.4$, $y/h = 0.3$) にマイナス値のピークが生じており、そこからさらに下流側の右上 ($x/h = 1.3 \sim 1.7$, $y/h = 0.5$) にプラス値のピークが生じていることから、カルマン渦が形成されていることがわかる。(c)の角型と(e)のくぼみ型の断面1については、プラス値とマイナス値の分布に丸型のような傾向は現れなかった。これは、実験の流速が比較的早く、流れの剥離への影響が大きい角張った形状については、流れがブロックに作用した直後から複雑な乱れが生じているためだと考えられる。

断面2については、いずれのブロックについても、ピ

ーク値は異なるもののx軸方向の乱れの生じている範囲 ($x/h = 1.3 \sim$ 下端) はほぼ同じだった。一方、y軸方向については、丸型に比べて角型とくぼみ型は広範囲に乱れが生じている。特にプラス値については、丸型の分布は $y/h = 0.6 \sim 0.7$ の範囲に留まっているが、角型とくぼみ型は $y/h = 0.6 \sim 0.9$ まで広がっており、広範囲にわたって乱れが生じていることがわかる。

(3) レイノルズ応力の空間平均値の比較

各ブロックにおける乱れに及ぼす影響の大きさを比較するため、ブロック下流側のレイノルズ応力絶対値の平均値を求めた。角型とくぼみ型は下流側のy軸方向下端から上端まで乱れが生じていたことから、計算範囲については、x軸方向は下流側のブロック端から下流端まで、y軸方向は下端から上端までの全域(図-3の赤破線で囲った部分)とした。

図-8にA方向の断面1におけるレイノルズ応力絶対値の平均値の比較を示す。いずれのブロックも低流速と高流速とでは大きな差(7~12倍)が生じていることから、流速が早い方が乱れに及ぼす影響が大きいことがわかる。高流速の結果をみると、角型とくぼみ型はそれぞれ 3.88×10^4 と 3.57×10^4 で同等の値となっているが、丸型は 2.25×10^4 で他のブロックに比べると40%程度小さな値であった。断面1については、方向が変わっても形状はほぼ同じであるため、他方向も同様の傾向であった。

続いて、図-9に断面2における方向毎のレイノルズ応力絶対値の空間平均値の比較を示す。(a)のA方向の高流速の結果をみると、角型とくぼみ型は 5.43×10^4 と 6.70×10^4 であり、丸型の 2.70×10^4 に比べるとそれぞれ2.0倍と2.5倍の値が得られた。B方向とC方向についても同様であり、丸型よりも角型とくぼみ型の方が大きな値となった。次いで、角型とくぼみ型を比較してみると、いずれの方向においても角型よりもくぼみ型の方が大きな値を示している。全方向の結果を平均すると、低流速については角型が 5.36×10^5 、くぼみ型が 6.85×10^5 となり、くぼみ型が角型に比べて約28%大きな値となった。同様に、高流速では角型が 5.39×10^4 、くぼみ型が 6.12×10^4 となり、くぼみ型が約14%大きな値となった。これらの結果より、丸型よりも角型、角型よりもくぼみ型の方が乱れを生じさせる能力が高いことがわかる。

例えば、消波ブロック傾斜堤について、大熊ら⁹⁾は、丸型とくぼみ型の波高伝達率を計測しており、図-10に示すように設置空隙率56.5%のくぼみ型の波高伝達率について、設置空隙率50%の丸型とほぼ同じ値が得られている。くぼみ型は丸型に比べて設置空隙率が6.5%大きな値となっているものの、乱れを生じさせる能力が高いことから、設置空隙率の小さな丸型と同等の消波性能が得られたものと考えられる。

(4) 波高伝達率算定式への適用性の検討

沼田³⁾は、消波ブロックの波高伝達率 K_T の算定について、式(3)を提案している。

$$K_T = 1 / \left\{ 1 + 1.184 (B/d)^{0.895} (H/L)^{0.5} \right\}^2 \quad (3)$$

ここで、 B は静水面の堤体幅、 d はブロックの高さ、 H/L は波形勾配である。式(3)にはブロック高さが考慮されているが、異なる種類のブロックであっても規格が同じであれば大差はなく、計算結果はほぼ同じ値となる。そこで、式(3)にブロックの形状特性に関する係数 K_{sh} と設置空隙率に関する係数 K_{po} を組み込むことを考える。

K_{sh} については、本研究で得られた断面2における丸型とくぼみ型のレイノルズ応力平均値より、くぼみ型に関して $K_{sh} = 1.52$ (=くぼみ型の全方向の平均値/丸型の全方向の平均値)の実験定数を設定した。 K_{po} については、それぞれのブロックの設置空隙率より、 $K_{po} = 0.885$ (=丸型の設置空隙率/くぼみ型の設置空隙率 = $50/56.5$)とした。ここでは、試行的にこれらの係数を平方根として式(4)のように組み込んだ。

$$K_T = 1 / \left\{ 1 + \sqrt{K_{sh}} \cdot 1.184 (\sqrt{K_{po}} \cdot B/d)^{0.895} (H/L)^{0.5} \right\}^2 \quad (4)$$

式(4)を用いて計算した丸型とくぼみ型の波高伝達率の比と、大熊ら⁹⁾の実験による丸型とくぼみ型の波高伝達率の比の比較を図-11に示す。丸型とくぼみ型の計算

図-8 A方向の断面1におけるレイノルズ応力(絶対値)の空間平均値

(a) A方向

(b) B方向

(c) C方向

図-9 設置方向毎の断面2におけるレイノルズ応力(絶対値)の空間平均値

図-10 消波ブロック堤の波高伝達率と沖波波形勾配の関係