被覆ブロックの孔形状が流況特性に及ぼす影響 に関する基礎模型実験

松下紘資¹・東 良慶²・忞熊公子³・飯干富広⁴・中西 敬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 博(環境) 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:kaseguma@nikken-kogaku.co.jp

⁴正会員 博(環境) 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:iiboshi@nikken-kogaku.co.jp

⁵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:naka24@nikken-kogaku.co.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

本研究では、被覆ブロック孔形状が流況に及ぼす影響の解明を目的とした基礎実験を実施し、開水路流れにおいて脚部を有する平型の被覆ブロックの孔形状の違いが流況特性に及ぼす影響を、粒子画像流速測定法(PIV)を用いて明らかにした。実験では、開口面積がほぼ等しい四角型、丸型、六角型の孔形状の被覆ブロック模型を用いた。実験結果から求めたレイノルズ応力と無次元乱れ強度の分布より、孔形状の違いによる孔内部の流況特性が明らかとなった。また、孔内部全体の無次元乱れ強度の平均値の比較から、 x 軸方向は丸型、 y 軸方向は六角型がそれぞれ乱れ強度が大きいことがわかった。主流部と孔内部の質量交換率および運動量交換率は、六角型が非常に大きいことがわかった。さらに、脚長の違いが孔内部全体の乱れに影響を及ぼすことがわかった。

Key Words : armor block, porosity shape, flow regime characteristic, basic model experiment, PIV

1. はじめに

四方を海に囲まれている我が国では、海岸保全のため、護岸などを保護する目的の平型被覆ブロックや、消波を目的とする立体型ブロックが多く用いられている。これらのブロックはそれぞれの能力が異なることから、目的に応じて別々の構造物が建設されている。したがって、消波・流速低減効果の期待できる被覆ブロックがあれば、海岸保全および建設コストの低減・省資源化に寄与することができる。

被覆ブロックのこれらの性能を評価・把握するには、ブロック孔部が流況に与える変化を解明することが重要である。これまで流れ場における被覆ブロックの研究については、福岡ら¹⁾や田代ら²⁾、忞熊ら³⁾など、多くの研究がなされており、その研究成果によって河川護岸や根固めに使用する被覆ブロックの設計を可能にしている。しかしながら、これらの研究は、被覆ブロック自身に作用する流体力を評価したものであり、孔形状が流況に与

える影響は明らかになっていない。

一方、池田ら⁴⁾や福津ら⁵⁾は、被覆ブロック周辺流れに類似する、河川のわんど部をサイドキャビティ流れとして再現した可視化実験を行っており、わんど部内のレイノルズ応力や乱れ強度の分布により河床形状との関係を示している。このように、開水路に凹部を有する流れに関する研究は例が挙げられるが、凹部形状は単純なものに留まっている。

本研究では、被覆ブロック孔形状が流況に及ぼす影響の解明を目的とし、その基礎実験として、開水路流れにおいて脚部を有する平型の被覆ブロックの孔形状の違いが流況特性に及ぼす影響を、粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, 以下PIVと示す)を用いて明らかにした。

2. 実験の概要

(1) 実験装置と孔部模型

本実験では、図-1 に示す長さ 14.6m、幅 0.4m、深さ 0.23m、勾配 1/1000 で、側壁および計測区間（水路の上流端から 7.2～10.8m 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。側壁から 0.11m の位置に仕切り板を設置し、計測区間中央に透明の亚克力板で作成した有脚平型孔付きブロックの模型（以下、孔部模型と示す）を配置し、その上流側 5m および下流側 2m の区間に孔無しブロックの模型を設置した。孔無しブロック模型の上流側先端部は、流れが衝突しないように嘴状に加工した。

孔部模型を写真-1に、模型寸法を表-1に示す。ここに、 a は流下方向の模型長さ、 b は模型幅、 c は孔部の径、 d は模型高さ、 d' は模型高さから脚部を除いた高さ（部材厚）である。本実験では、被覆ブロックの孔形状として実例の多い四角型および丸型と、隅部への流れの収斂効果が期待できる六角型の3種類を対象とした。それぞれの孔の大きさは、面積がほぼ同じになるように設定した。また、六角型の孔部模型については、ブロックの脚の長さの影響を調べるため、脚長を半分にできるようにした。

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 軸に垂直上向きを y 軸とし、 x, y 方向の瞬間流速をそれぞれ $u=U+u'$ 、 $v=V+v'$ とした。ここに、 u, v は瞬間値、 U, V は時間平均値、 u', v' は変動成分である。画像撮影については、東ら⁹⁾の方法を参考に、ネオジムヤグレーザー（株式会社レーザー製）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。それを水路計測区間底面（孔部模型の下）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、模型中央に照射した。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1/66.7秒間隔で1000枚撮影して（15秒間）PCに記録した。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-2に示す。実験では、流速の遅いケー

ス（低流速、平均流速 $U_m \approx 0.14\text{m/s}$ ）と、流速の速いケース（高流速、平均流速 $U_m \approx 0.24\text{m/s}$ ）を実施した。ケース名の01と02は、それぞれ低流速と高流速を表している。さらに六角型孔部模型については、脚長を半分にしたケースと、脚無しのケースも実施した。表中の平均流速 U_m は、孔部の上を流れる流れの安定した位置で計測

図-1 実験装置

写真-1 透明亚克力製孔部模型

（上段：四角型，下段左：丸型，下段右：六角型）

表-1 孔部模型寸法

単位: mm						
形状	長さ a	幅 b	孔径 c	高さ d	部材厚 d'	解析範囲 L
四角型	153	110	93	120	67	85
丸型	153	110	110	120	67	82
六角型	153	110	88	120	67	49

表-2 実験ケース

No.	ケース	孔形状	設定流量 Q (l/s)	設定水深 h (cm)	平均流速 U_m (cm/s): 計測値	レイノルズ数 Re	フルード数 Fr
01	S01	四角型	7	18.2	14.1	8756	0.18
02	S02	四角型	12	18.2	25.3	15707	0.33
03	C01	丸型	7	18.2	12.6	7812	0.16
04	C02	丸型	12	18.2	22.7	14048	0.29
05	H01	六角型	7	18.2	13.0	8049	0.17
06	H02	六角型	12	18.2	23.2	14394	0.30
07	Hsl01	六角型 脚長半分	6	15.5	14.7	9102	0.19
08	Hsl02	六角型 脚長半分	10	15.5	24.5	15169	0.31
09	Hnl01	六角型 脚無	5	12.7	16.2	10020	0.21
10	Hnl02	六角型 脚無	8	12.7	28.0	17357	0.36

された流速であり，詳しくは次章で説明する．本実験におけるレイノルズ数 Re ($Re \equiv U_m h' / \nu$, $\nu = 0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ として計算)は，およそ8000～17000であり，フルード数 Fr ($Fr \equiv U_m (gh')^{0.5}$)は0.16～0.36であった．なお， h' は孔部模型より上の流れの水深であり，孔部模型の上の流れを上主流部，下の流れを下主流部とする．

3. 評価方法

(1) 上主流部の平均流速

図-2に，六角型の撮影画像を示す．解析におけるメッシュ数は，77 (x軸方向) × 47 (y軸方向) グリッドで，1グリッドはおよそ3～3.5mmである．図-3に，ケース01の上主流部孔部中央付近 (図-2の白破線部) の流速分布を示す．境界付近は，せん断不安定の影響により流速が減少している．この傾向は，他のケースも同様であった．よって平均流速については，y軸方向は境界線から上方約2cm分を除外した範囲とし，x軸方向はレーザーが十分に照射された範囲を対象として，これらの範囲内の全グリッド (図-2の青破線で囲った部分) の平均値を用いた．

(2) 無次元乱れ強度

本実験では，ケース毎に水深がわずかに異なっているため，流速が一定値となっていない．そこで，式(1)，(2)に示すように，x方向とy方向の乱れ強度 $\sqrt{u'^2}$ ， $\sqrt{v'^2}$ を平均流速 U_m で除した値を，それぞれ無次元乱れ強度 $\sqrt{u'^2}^*$ ， $\sqrt{v'^2}^*$ とし，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) レイノルズ応力分布

図-4に，ケースS01～H02における孔内部のレイノルズ

図-2 高速ビデオカメラの撮影画像 (六角型)

図-3 孔部中央の上を流れる流れの流速分布 (ケースS01)

図-4 レイノルズ応力の平均値の分布 (上段：低流速、下段：高流速)

図-5 x軸方向の無次元乱れ強度の平均値の分布（上段：低流速、下段：高流速）

図-6 y軸方向の無次元乱れ強度の平均値の分布（上段：低流速、下段：高流速）

応力の平均値 ($\rho u'v'$) の分布を示す。x軸方向の解析範囲Lは、写真-2に示すとおりである。六角型については、図-2の斜線部に示すように孔内部の上流域と下流域の画像が鮮明でないことから、撮影を行った側面の1辺のみ（図-2の赤破線で囲った部分）の結果となっている。

ケースS01とケースS02の四角型の低流速と高流速をみると、孔内部下流域上側に向けてレイノルズ応力が大きくなっている点など、値の大きさは異なるものの全体の

分布状況はほぼ一致している。この傾向は、丸型のケースC01とケースC02、および六角型のケースH01とケースH02も概ね同様であった。このことから、孔形状が同じであれば、流速に関わらず孔内部のレイノルズ応力はほぼ同じ分布となるものと考えられる。

次に、孔形状ごとの分布状況を比較すると、四角型と丸型は、孔内部と上主流部との境界線（赤破線の上辺にあたる位置）の少し下に正のピークが生じている。一方、

六角型については、コンターラインが境界線から孔内部に向けて弓なりの形状となっていることから、境界線を囲い込むようにコンターラインが位置しているようであり、境界線上でレイノルズ応力が大きな値を示すものと考えられる。このことから、六角型は、四角型と丸型に比べて孔内部と上主流部の間で、より大きな運動量交換が生じているものと推察される。また、下主流部と孔内部との境界において、高流速についてはいずれの孔形状においても上側境界線付近と同様の傾向が現れていた。低流速については、値の差が小さく目立った差は現れていない。

高流速のピーク絶対値出現位置について、四角型は孔内部下流域上側 ($x/d=0.85$, $y/d=0.95$ 付近) に発生しており、丸型は孔内部下流域下側 ($x/d=1.40$, $y/d=0.10$ 付近) に発生している。六角型については、正と負のピーク絶対値は同程度であり、上下の境界線を囲むようにそれぞれ発生していることがわかる。これは、本実験では評価対象となっていない孔内部の上流域および下流域に大規模な渦が発生しており、上下の主流部から流入してくる流れの影響も加わって孔中央の上下の境界線付近の乱れが大きくなったものと考えられる。

(2) 無次元乱れ強度分布

図-5および6に、ケースS01～H02におけるx軸方向とy軸方向の孔内部の無次元乱れ強度の平均値の分布をそれぞれ示す。

ケースS01とケースS02の四角型の低流速と高流速の分布をみると、x軸方向とy軸方向のいずれも孔内部下流域から上流域上側に向けて値が大きくなっており、全体的な分布状況は同じである。値についても、ピーク値以外は概ね同じである。丸型と六角型についても、分布状況と値は概ね同じであった。

ピーク出現位置をみると、四角型のx軸方向は上の境界線上に現れているが、y軸方向は、上の境界線よりも少し下の下流域に現れていた。x軸方向については、主流部と孔内部とのせん断不安定によるものであり、y軸方向については、上主流部の流れが孔部下流側の壁に衝突して発生した渦と、下主流部の影響によって孔内部下流域中央から下側にかけて発生した大規模な渦とが重なった位置に現れたものと考えられる。丸型については、x軸方向は孔内部下流域の上側、中央、下側に分割してピークが現れているが、y軸方向は下流域中央に現れていた。六角型は、いずれの軸方向も上の境界線上と下の境界線から少し上方にピークが出現していた。これらより、孔形状の違いにより、孔内部の乱れ強度のピーク出現位置が異なることがわかる。全体的に、四角型と丸型は乱れ強度とレイノルズ応力の分布が異なる傾向にあるが、六角型は比較的同じ分布傾向にあるようである。

(3) 無次元乱れ強度の比較

孔内部全体の無次元乱れ強度の平均値を求め、孔形状ごとの乱れ強度の比較を行った。図-7に比較結果を示す。横軸は流速、縦軸は孔全体の無次元乱れ強度の平均値である。両軸方向ともに、高流速場よりも低流速場の方が高い値を示していることから、本実験条件においては、孔内部でみると相対的に低流速場の方が高流速場よりも乱れに及ぼす影響が大きいことがわかった。また、x軸方向については四角型、六角型、丸型の順で値が大きく、y軸方向については四角型、丸型、六角型の順となっている。このことから、各軸方向の乱れ強度は孔形状によって異なることがわかる。ただし、六角型については、先述のように孔内部全体の平均値となっていない点に注意が必要である。

(4) 脚長の影響

脚長が孔内部の乱れ強さに与える影響を調べるため、六角型について、脚の長さを半分にした形状（脚半）と、脚無し形状（脚無）における孔全体の無次元乱れ強度の平均値を比較した。図-8に比較結果を示す。横軸と縦軸は図-7と同様である。両軸方向ともに、無次元乱れ強度の平均値の大きさは標準、脚半、脚無となっていることから、脚の長さを長くするほど孔内部全体の乱れに及ぼす影響が大きくなることがわかった。また、脚無しケースの乱れ強度の分布において、上境界線上にピークが発生する点や、孔内部全体に大規模渦の発生が推測される点など、禰津ら⁵⁾の実験結果と一致していた。

図-7 孔形状ごとの孔内部の無次元乱れ強度の平均値
(左：x軸方向、右：y軸方向)

図-8 脚長ごとの孔内部の無次元乱れ強度の平均値（六角型）
(左：x軸方向、右：y軸方向)

(5) 質量交換率と運動量交換率

孔内部と主流部（上・下）との物質交換および運動量交換を示す指標として、上境界線における質量交換率 M と運動量交換率 θ を、池田ら⁴⁾や禰津ら⁵⁾を参考に次式のように定義した。

$$M = \frac{1}{\rho U_m L} \int_0^L \rho |V| dx \quad (3)$$

$$\theta = \frac{1}{\rho U_m^2 L} \int_0^L \rho u' v' dx \quad (4)$$

図-9に、各形状の高流速場のケースにおける質量交換率 M および運動量交換率 θ を示す。本実験では、運動量交換率は負の値となった。いずれも四角型と丸型に比べて、六角型は絶対値が非常に大きな値となっていることがわかる。このことから、六角型は上主流部と孔内部において、大きな質量交換、運動量交換が生じているものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、開水路流れにおいて脚部を有する平型の被覆ブロックの孔形状の違いが流況特性に及ぼす影響を明らかにするため、水理模型実験およびPIV解析を実施した。その結果、孔形状ごとの孔内部の流況、および乱れ強度の特性が明らかになった。本研究で得られた主要な結論は以下のとおりである。

- 1) レイノルズ応力と無次元乱れ強度の分布より、孔形状の違いによる孔内部の流況特性が明らかとなった。
- 2) 孔内部全体の無次元乱れ強度の平均値の比較から、 x 軸方向は丸型、 y 軸方向は六角型がそれぞれ乱れ強度が大きいことがわかった。
- 3) 脚の長さを長くするほど、孔内部全体の乱れに及ぼす

図-9 質量交換率 M と運動量交換率 θ

影響が大きくなることがわかった。

4) 主流部と孔内部の質量交換率、運動量交換率は、六角型が非常に大きいことがわかった。

本研究では、孔形状の違いによる乱れ強度の相対的な比較を行った。今後は消波ブロックも対象に加え、波浪場における実験を実施していきたい。

参考文献

- 1) 福岡捷二，藤田光一，森田克史：護岸法覆工の水理設計法に関する研究，土木研究所資料 2635 号，76p，1988。
- 2) 田代洋一，飯干富広，藤井伸之，高島清光，石川潤弥，山村明，松岡智：護岸ブロックの水理特性に関する実験的研究，河川技術論文集，第 15 巻，pp.357-362，2009。
- 3) 倅熊公子，前野詩郎，吉田圭介，高田大資，山村明：射流場の護岸根固めブロックに作用する流体力評価，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.69，No.4，pp.L691-L696，2013。
- 4) 池田駿介，古池智明，杉本高：不透水制群を有する流れの構造に関する実験的研究，水工学論文集，第 43 巻，pp.281-286，1999。
- 5) 禰津家久，鬼束幸樹，矢野勝士：河床形状がわんど流れに及ぼす影響に関する研究，水工学論文集，第 46 巻，pp.559-564，2002。
- 6) 東良慶，田中裕介，平石哲也：海底の土砂輸送に関する基礎的実験；粒子と流体の同時計測，土木学会論文集 B2（海岸工学），Vol.69，No.2，pp.L1466-L1470，2013。

(2016.3.16 受付)

BASIC MODEL EXPERIMENT ON THE EFFECT OF POROSITY SHAPES OF ARMOR BLOCK ON FLOW REGIME CHARACTERISTICS

Hiroshi MATSUSHITA, Ryoukei AZUMA, Kimiko KASEGUMA,
Tomihiko IIBOSHI, Takashi NAKANISHI and Tetsuya HIRAISHI

Armor blocks and wave dissipating blocks have been used very often for the purpose of coastal protection in Japan. Therefore, if there is an armor block which can be expected on wave-dissipating and flow velocity reduction effect, it is possible to contribute to coastal protection, construction cost reduction and resource saving. To evaluate and understand these performance of armor blocks, it is important to elucidate the impact of the hole shape of armor block on the flow regime. In order to investigate the efficiency of the blocks, the series of hydraulic experiment was carried out. It revealed the characteristic of stream regime by the difference in porosity shape at flow by using PIV. In the result, it was found that the stream regime inside the porosity differs for the square, round and hexagonal shape hall. It was also found that turbulent intensity differs for the velocity which flows in the porosity and the length of the leg.