不規則波浪場における非対称没水構造物周りの流れ

A FLOW AROUND SUBMERGED ASYMMETRICAL STRUCTURES IN AN IRREGULAR WAVE FIELD

押川英夫¹・武田宣紘²・吉田秀樹³・田中克己⁴・大波多昌志⁵・Andi Rusdin⁶・小松利光⁷ Hideo OSHIKAWA, Nobuhiro TAKEDA, Hideki YOSHIDA, Katsumi TANAKA, Masashi OHATA, Rusdin ANDI and Toshimitsu KOMATSU

¹正会員 博(工) 九州大学大学院助教 工学研究院環境都市部門(〒819-0395 福岡市西区元岡744)
 ²学生会員 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻(同上)
 ³正会員 工修 前国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所長(〒750-0066 下関市東大和町2-29-1)
 ⁴非会員 国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所技術開発課長(同上)
 ⁵非会員 前国土交通省九州地方整備局下関港湾空港技術調査事務所技術開発係長(同上)
 ⁶学生会員 MSc 九州大学大学院 工学府海洋システム工学専攻(〒819-0395 福岡市西区元岡744)
 ⁷フェロー 工博 九州大学大学院教授 工学研究院環境都市部門(同上)

Characteristics of a flow around submerged asymmetrical structures (we call this structure the BaNK block) in an irregular wave field were experimentally investigated. Komatsu *et al.* (2001) proposed 'BaNK System' in order to cope with beach erosion and shoaling of fairways. So far, regular wave fields and oscillatory ones with constant wave periods have been treated in hydraulic model tests and numerical simulations for the BaNK system. In this study, plural half cylinders are used as the BaNK blocks which are set on the bottom of a wave channel. It was found that vertical circulating residual currents were created over a wide area encompassing the block-set area in the irregular wave field like in a regular wave one. Furthermore, the relationships among the residual currents, the turbulent energy and the Reynolds stress in the BaNK system were estimated.

Key Words : BaNK system, irregular wave, residual current, submerged asymmetrical structure

1.はじめに

著者らは,波浪エネルギーを用いた有効な海岸侵食防 止技術であり,かつ積極的な砂浜の創出技術である BaNK(:Beach and Navigation Keeper)システムを提案してい る^{1)~12)}.本技術は,波浪によって生じる往復流場に非対 称形状を有する構造物(BaNK ブロック)を複数個設置 するだけで,海底付近に波の一周期平均的な一方向流れ (以下では波浪残差流,或いは単に残差流と呼ぶ)を任 意の方向に生成させ得ることから,底質移動の自在な制御を可能とするものである(図-1参照).

本技術は往復流場であればどこにでも適用できるため,海岸侵食の防止,航路埋没の防止,魚の養殖筏周辺の水質・底質の改善,河口閉塞の防止等,様々な応用が可能となる.本システムに関して,これまで小松ら¹⁾, Oshikawa *et al.*⁵⁾,押川ら^{6),9}などにおいて,海岸侵食の防止を主要なターゲットに水槽実験および現地試験を通じて研究開発が進められてきた.次なる展開として,著者



図 -1 波浪場における残差流の生成メカニズム¹⁾



図 -2 実験装置の概略図 [左図(a):装置全体の側面図,右図(b):半円柱型構造物単体の向き]



図-3 不規則波による水面変位の時系列の例

らは航路埋没の防止にターゲットを定め,まずは基礎研究として室内実験に基づく検討を行っている^{7),10)}.

著者らの研究グループでは,従来より規則的な進行波 あるいは振動流場を対象にした室内実験や数値シミュ レーションで BaNK システムの有効性について検討を 行ってきた^{1)-5).7).8).10)-12)}.しかしながら,実海域の波浪 は周期(波長),波向きともに不規則であるため,不規 則波に対する十分な検討も不可欠である.本研究では, 不規則波浪場に対する BaNK システムの適用性を評価す る第一歩として,奥行き方向に一様な2次元不規則波浪 場における本技術の効果を検討した.

2.実験装置および実験方法

実験には図-2に示された全長1600.0cm,幅25.0cm,高さ 60.0cmの鉛直2次元造波水槽を用いた.造波機には水面 波形制御方式による無反射造波¹³⁾が採用されている.ま た不規則入射波の造波には合田らの入・反射波分離推定 法¹⁴⁾が用いられており,Bretschneider-Mitsuyasuスペクト ル¹⁵⁾の係数を修正した合田による以下の式¹⁶⁾を目標の スペクトルとした.

$$S(f) = 0.205 H_{1/3}^{2} T_{1/3}^{-4} f^{-5} \exp\left[-0.75 (T_{1/3} f)^{-4}\right]$$
(1)

ここで,fは周波数,S(f)は入射波の周波数スペクトル, H_{13} は有義波高, T_{13} は有義波周期である.

BaNK システムに用いる非対称構造物としては,半円筒(柱)型構造物が有効であることが抵抗力特性や構造物周辺の流れを評価したこれまでの研究から明らかと



なっている^{2),4),6)~12)}.そこで,非対称構造物として円柱 を縦に2等分した半円柱を用いた.球体とは異なり,円 柱を基本形状とする半円柱型構造物では,円柱の直径だ けでなく構造物高さにも自由度がある.ここでは従来の 実験結果⁴⁾等を踏まえてブロックの縦と横の長さの割合 を1/4球型と一致させている.構造物の直径はD = 3.0cm, 高さは1.5cmであり,中心間隔 6.0 cm で従来の研究成果¹²⁾ を踏まえて縦断方向に5列,横断方向に4列の計 20 個を 等方格子状に配置した.

構造物設置領域およびその周囲の流速を NORTEK 社製 の3次元超音波式流速計 VECTRINO(以下,流速計)によ り計測した.一様水深部における静水深を h=30.0cm とし て,目標値として H_{1/3} =5.0cm, T_{1/3} =1.0sの不規則波を造波 した.流速の測定断面は構造物の設置位置の沖側端(半 円柱の中心から 3.0cm 沖側)を原点とする右手系のデカル ト座標系において,縦断方向に構造物の中間となる X=0,60,120,180,240,300,360,420,480,540,600(cm) の11断面,横断方向には水路中央をY=0としてY=0,-3.0(cm) の2断面,鉛直方向には水路床をZ=0としてY=0,-3.0(cm) の2断面,鉛直方向には水路床をZ=0としてO1,0.375,0.75, 15,2.25,30,40,50,70,100,150,200(cm)の12断面と した.また,比較のためにブロックを置かない波のみの 場合において,流速の鉛直分布が原点上で測定されてい る.

無反射造波を行う造波機には容量式波高計が取り付け られているとともに,入・反射波分離¹⁴⁾を行うために 22.0cm離して2本の容量式波高計が水路沖側端から700cm の地点(横断方向には中央)に設置されている.波高に 関してはサンプリング周波数20Hzで2048秒(4096個)の



図-5 X方向流速のスペクトル(Z=0.75cm, Y=-3.0cm)

データが取得されており, 流速の測定は各測点毎にサ ンプリング周波数 50Hz で 180 秒程度のデータが取得さ れている.得られた結果より 8192 個(163.84 秒)の連続 する流速データを抜き出して, 残差流速や FFT(:<u>Fast</u> Fourier Transform)によるスペクトルの算定などの統計解 析を実施した.

3.実験結果および考察

(1)入射波について

実験時に造波された不規則波の例として,図-3に2本の波高計により実験中に計測された30秒間の水面変位の時系列を示す.これより1cmから8cm程度の波高を有する不規則波が造波されていること,また波高計の設置位置の違いに起因する位相のズレを除くと,2本の波形はほぼ同一となっていることが理解される.

実験時に造波された不規則波の水面変位の周波数ス ペクトルの例を,式(1)により求められた目標のスペ クトルと併せて図-4に示す.これより,多少のバラつ きは見られるものの十分な精度で目標とする Bretschneider-Mitsuyasu型のスペクトル形状を有する不規則 波が造波されていることが分かる.さらに,本実験で 用いた不規則波の水面波形をゼロアップクロス法によ



図-6 X方向流速のスペクトル(Z=5.0cm, Y=-3.0cm)

り波別解析したところ,平均値としてH₁₃=5.37cm,T₁₃=1.01s が得られた.したがって,ほぼ目標とする不規則波が発 生していたことがこの結果からも確かめられる.

(2)流速の周波数スペクトル

得られた流速の時系列データより周波数スペクトルを 算定した . 結果の例として , ブロック付近の Z=0.75cm , お よびブロックから鉛直方向にある程度離れた Z=5.0cm での X方向流速uのスペクトルF₀(f)をそれぞれ図-5,図-6 に示す.これらはいずれもブロック上の鉛直断面内(Y=-3.0cm)の結果であり、パラメータはX方向の測定位置で ある.参考として,ブロックが無い場合の結果も併記さ れている.ブロック付近の図-5をみると,X=0~30cmま での範囲では,fがおよそ1.7Hz(以後ではfと呼ぶ)を越え た範囲において,ほぼ-5/3 乗則に従っていると思われる 乱流域が形成されている.ブロック無しの結果とブロッ ク敷設領域を超えた X≥36.0cm では慣性領域が形成されて いないことを踏まえると, X<30.0cm での乱流域の形成は, ブロックによる後流の影響によるものと理解される. ブロック高さの3.3 倍の位置に相当する図-6 では,慣性 領域は形成されていないものの、高周波域においてブ ロック敷設領域内の X=0~24cm のスペクトルのパワーが ブロック無しや X>30cm の場合よりも若干大きくなってお

り,この高さにおいてもある程度はブロックの影響を 受けていることが理解される.

(3)残差流の特性

図-7,図-8に各断面における残差流速のベクトル図 を示す.図中には構造物の位置と大きさを で示してい る.ブロック上の鉛直断面に相当する図-7では,ブロッ ク設置領域の手前の X=0,およびブロックから離れた X≥54cmの測線を除いて,Z≤4cm程度の底面付近において は強い正(岸向き)の残差流が得られていることが分か る.一方,Z=5~20cmの中層付近においては,構造物に よって生じた底面付近の残差流,ならびに波の進行方向 に生じる表層付近の強い残差流(ここでは計測器の制約 から測定されていない)の補償流として負(沖向き)の残 差流が生じている.このような残差流の鉛直分布は従来 から規則波に対して得られている成果¹²⁾とほぼ同様であ る.

ブロックの効果が最も弱くなると考えられる,Y方向 のブロックの中間(Y=0)に相当する図-8では,縦断方向 のブロック敷設領域を超えた岸側の $X\geq30$ の領域におい て図-7の底面付近と同程度の強い岸向きの残差流が生 じている.しかしながらブロック敷設領域内に相当する $6\leq X\leq 24$ の範囲では,3<くのベクトルが岸向きとはなって いるものの,その大きさは領域外($30\leq X\leq 48$)と比較して かなり小さくなっている.このように,Y=0断面におい て敷設領域内の岸向き残差流が小さくなっている理由と しては,Y方向のブロックの設置間隔(s_y)の影響が挙 げられる.本実験では $s_y=60$ cmに固定しているものの,こ の条件は従来の規則波および振動流場の実験において用 いられた条件であり,不規則波浪場において適切な s_y については今後更に検討する必要があるものと思われ る.

上記のように,Y方向の断面によって残差流速に若干 差異はあるものの,残差流が小さくなるY=0においても 底面付近にはほぼ岸向きの残差流が生成されている.ま た図-7,図-8ではともに規則波と同様にブロック敷設 区間を含む広い領域に渡って鉛直残差環流が形成されて いる¹⁾.そこで平均的な残差流を見るため,以降では幅 平均した残差流について検討する.

図 -9 に幅平均された残差流ベクトルの空間分布を示 す.これより,図-7 と同様にブロックの敷設領域およ び,それより岸側の領域には底面付近に強い岸向きの残 差流が生じている.岸向き残差流の生成厚は4cm 程度で あり,ブロック高さの3倍程度と考えられる.また Z=5 ~ 20cmの中層では,沖向き流れとなっている.

次に,不規則波によって得られた本実験の結果と規則 波による過去の実験結果¹²⁾を比較した.なお,本実験の 有義波高・有義波周期と以前用いた規則波の波高(5.0cm)・ 周期(1.0s)はほぼ一致しているものの,比較を容易にする ため無次元化して整理した.結果を図-10に示す.横軸



図-7 不規則波浪場における残差流ベクトル (Y=-3.0cm)



図-8 不規則波浪場における残差流ベクトル (Y=0)



図-9 不規則波浪場における幅平均の残差流ベクトル

は*X/D*,縦軸は*Z/Dであり*,流速ベクトルは波の振幅*a* および角周波数 σを用いて, *a*σ により正規化されている. ただし,不規則波の *a*σ は有義波で求めた *H*_{1/3}/*T*_{1/3} である(は円周率).まず全体的に流れの方向を比較すると,赤いベクトルで示す規則波と黒で示す不規則波のベクトルの方向は,ブロック近傍を含めて非常に良く一致している.一方,ベクトルの大きさに関しては,不規則 波の方が規則波よりもやや小さくなっている.したがっ て,波群の中では有義波という比較的大きな(統計)波 を基準として比較していることを踏まえても,不規則波 では従来の規則波によって得られている残差流生成効果 よりも BaNK システムの効果(残差流の強さ等)が若干 小さくなることが推測される.

(4)流速の高次モーメントの特性

本システムは, BaNK ブロックの周囲に生じる流れに より底質輸送の制御を図る技術であるが,例えば Russel and Huntley¹⁷⁾によると流速の3次モーメントが底質輸送能 力の指標となることが知られている.そこで,ブロック の中心線上の断面内におけるuの3次モーメントq(<u³>)の鉛直分布を求めて図-11に示す.なお,<>は時 間平均を意味しており,図中のパラメータは測定断面の X座標である.これより,ブロック敷設領域付近($6 \le x \le 30$, $0 < Z \le 3$)ではqの値が非常に大きくなっており,岸向きの 底質輸送が促進されることが期待される.また,残差流 速の結果(図-7)からも推測されるように,qの値は X=48cmまでは正の値が維持されている.これよりブロッ クの岸側には,敷設領域を大きく超えて底質輸送促進効 果が発揮されることが分かった.

次に,乱れエネルギー[k (<u'2>+<v'2>+<v'2>+<v'2>)/2]の評価を行った.u',v',w'はそれぞれX,Y,Z方向の流速変動成分である.ここでは,最終的にブロックにより発生した乱れエネルギーの評価を行うことが目的であるが,図-5,図-6から分かるように単純にkを求めると,ブロックの影響が少ない低周波側のスペクトルのパワーの僅かな違いにkが著しく影響されるため,実験および解析の精度上ブロックの効果(後流の影響)を評価できない.そこでブロックの影響による乱れ(以降では後流成分と呼ぶ)の便宜的な抽出法として,ハイパスフィルターを用いてf_cよりも高周波の成分を全て後流成分とみなした.前述のようにブロック近傍では,ブロックが無い場合よりも流速スペクトルのパワーが増加していることから,このような簡易な方法でも定性的な議論は可能なものと考えられる.

ブロック上の XZ 断面内の乱れエネルギー k の鉛直分 布を図-12に示す.これよりブロック近傍(0_X_30,0~Z≪4) では, k の値が顕著に大きくなっていることが分かる.

ブロック上のXZ断面内のレイノルズ応力(-p<u'w'>) の鉛直分布を図 -13 に示す.p は水の密度(=1.0g/cm³)で ある.なお,レイノルズ応力を求める際には,流速変動 成分が(波動成分も含めた)u',w'として扱われている. これよりブロック近傍の底面付近($0\leq X\leq 18cm$,0< Z< 4cm) ではレイノルズ応力の絶対値が大きくなり,負の値と なっている.これは図 -7 の残差流(平均流)の分布か ら理解されるように,Z=0~5cmのブロックの影響が大 きい領域では,平均流(X方向成分をUとする)のシア-(U/ z)が負となることに対応している.すなわ



図 -10 幅平均の無次元残差流ベクトル (一部分を拡大表示)[黒:不規則波,赤:規則波]



図-11 流速uの3次モーメント(q)の鉛直分布(Y=-3.0cm)



図-12 乱れエネルギー(k)の鉛直分布(Y=-3.0cm)

ち,乱れのプロダクションをレイノルズ応力と平均流速 の勾配の積で評価すると,この領域で乱れが生成されて いるものと解釈される.一方,ブロック設置領域後の X≥36.0cmではレイノルズ応力が小さい(ブロック無しと ほぼ同じ1付近の値となっている)ことから,図-12の kの分布に対応して乱れ(後流成分)が発生していない ことになる.なお,ブロック設置領域末端付近の X=24cm および 30cm ではレイノルズ応力が急激に大きくなり,特 に X=30cm では顕著な正の値となっている.設置領域の 端部では流れが複雑になっていると予想されるため,こ の位置での乱れの評価には Y および Z 方向流速のシアー や圧力変動なども併せて検討する必要があるものと推測 される.

4.おわりに

規則波において従来より有効性が示されてきた BaNK システムについて,本論文では2次元不規則波を用い て BaNK ブロック周辺の流れの特性を調べた.得られた 主要な知見は以下の通りである.

- (1)BaNK ブロックとして半円柱型構造物群を海底に設置 することにより,不規則波浪場においても底面付近 に残差流を発生させることが可能であり,その生成 厚は構造物の高さの3倍程度である.また残差流と 同様に,流速の3次モーメントからも底質輸送の促 進効果が期待される.
- (2) 残差流の方向は規則波と不規則波で一致する.
- (3)不規則波の波高・周期に対して有義波を代表量として規則波と比較すると、不規則波において生じる残差流の大きさは、規則波よりも若干小さくなる。
- (4)BaNK ブロック敷設領域内の底面付近では乱れエネル ギーが増加しており,その際,レイノルズ応力の絶 対値の増加が乱れエネルギーの増加と岸向き残差流 の生成に寄与している.
- 謝辞:本実験を行うにあたり,九州大学大学院工学研究 院技術員の藤田和夫氏に多大なる援助を頂いた. ここに記して謝意を表する.

参考文献

- 小松利光,齋田倫範,小橋乃子,安達貴浩,柴田卓也:方 向抵抗特性をもつ海底小規模構造物を用いた海底近傍の物 質輸送の制御,水工学論文集,第45巻,pp.1087-1092,2001.
- 2) 押川英夫,小松利光,柴多哲郎,深田剛教:振動流場にお ける非対称没水構造物の方向抵抗特性に関する実験的研究, 水工学論文集,第47巻,pp.805-810,2003.
- 3) 押川英夫, 柴多哲郎, 小松利光: 非対称没水構造物による 波浪残差流生成特性, 水工学論文集, 第48巻, No.2, pp.1255-1260, 2004.
- 4)押川英夫,國澤義則,鞠承淇,小松利光:振動流場における非対称没水構造物の抵抗特性,海岸工学論文集,第51巻, No.1, pp.671-675,2004.
- 5) Oshikawa H., Komatsu T. and Hashida M.: Control of substance transport due to plural submerged asymmetrical roughness in wave fields, Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management, Volume 1, pp.1017-1022, 2005.



図-13 レイノルズ応力の鉛直分布(Y=-3.0cm)

- 6) 押川英夫,張信一郎,鞠承淇,小松利光:地行浜における BaNK システムの現地試験,水工学論文集,第49巻, No.2, pp.1309-1314,2005.
- 7)押川英夫,國澤義則,吉田秀樹,谷川晴一,黒田祐一,藤 田和夫,小松利光:非対称没水構造物を用いた航路埋没防 止技術に関する基礎的研究,海岸工学論文集,第52巻, No.1, pp.486-490,2005.
- 8)押川英夫,小松利光:振動流場における非対称没水構造物
 周りの流動解析,水工学論文集,第50巻,pp.817-822,2006.
- 9)押川英夫,張信一郎,井芹寧,堀田剛広,小松利光:閉鎖
 性人工海浜の変形とその制御の試み,海洋開発論文集,第
 22巻,pp.905-910,2006.
- 10) 押川英夫,國澤義則,沖田翔吾,吉田秀樹,山内洋志,黒 田祐一,藤田和夫,小松利光:非対称没水構造物群による 海底近傍の物質輸送の制御,海岸工学論文集,第53巻, No.1, pp.746-750,2006.
- 11) 押川英夫,國澤義則,吉田秀樹,藤田和夫,小松利光:波 浪場における非対称没水構造物周りの流れ,海洋開発論文 集,第23巻,pp.877-882,2007.
- 12) 押川英夫,武田宜紘,吉田秀樹,田中克己,大波多昌志, 小松利光:波浪と流れの場における非対称没水構造物群に よる残差流生成特性,海洋開発論文集,第23巻,pp.883-888, 2007.
- 13)平口博丸,鹿島遼一,川口隆:水面波形制御方式による無 反射造波機の不規則波実験への適用性,第35回海岸工学講 演会論文集, pp.30-34, 1988.
- 14)合田良實・鈴木康正・岸良安治・菊地治:不規則波実験に おける入・反射波の分離推定法,港湾技研資料, No.248, pp.1-23, 1976.
- 15) 光易恒:海洋波の物理,岩波書店,210p.,1995.
- 16)合田良實:[増補改訂]港湾構造物の耐波設計 波浪工学 への序説,鹿島出版会, pp.17-21, 1990.
- 17) Russel, P.E. and Huntley, D.A.: A Cross-Shore Transport "Shape Function" for High Energy Beaches, Journal of Coastal Research, Vol.15, No.1, pp.198-205, 1999.

(2007.9.30受付)