

石巻港における長周期波の 消波対策に関する検討

EXAMINATION OF WAVE DISSIPATING STRUCTURES TO THE LONG PERIOD WAVE IN THE ISHINOMAKI HARBOR

山田晶子¹・国栖広志²・爲廣哲也³・小平田浩司⁴・平石哲也⁵

Akiko YAMADA, Hiroshi KUNISU, Tetsuya TAMEHIRO, Koji KOHIRATA, Tetsuya HIRAISHI

¹ 正会員 日本海洋コンサルタント株式会社 技術開発第二部 (〒136-0074 東京都江東区東砂 7-19-31)

² フェロー 工博 日本海洋コンサルタント株式会社 技術開発第二部

³ 正会員 財団法人沿岸技術研究センター 調査部 (〒102-0092 東京都千代田区隼町 3-16)

⁴ 国土交通省 塩釜港湾・空港整備事務所 所長 (〒985-0843 宮城県多賀城市明月 1-4-6)

⁵ 正会員 工博 港湾空港技術研究所 海洋・水工部波浪研究室長 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

In this study, 2-dimensional long period wave hydraulic model tests were carried out for various wave dissipating structures ; rubble stone, slit caisson and wave-dissipating block, in order to obtain the long period wave reflection rate. The long period wave energy dissipating in such porous layers were compared for the case with different structure types.

Key Words : long period wave, wave dissipating structure, hydraulic model experiment

1. はじめに

本研究は、石巻港港内における長周期波に対して有効に機能する消波構造物の把握を目的として、断面二次元水理模型実験を実施し、消波構造物の断面形状及び材料の違いによる消波性能について検討を行うとともに、反射率の簡易計算法を用いて消波特性について考察した。

2. 実験概要

(1) 実験設備

水理実験は2次元断面水路を使用し、フルード相似則を適用し縮尺 $S=1/50$ とした。波高は図-1 に示すように消波構造物前面及び内部に容量式波高計を設置し、サンプリング間隔 20Hz で測定した。反射率はエネルギースペクトルによる入反射波分離を行い算定した。

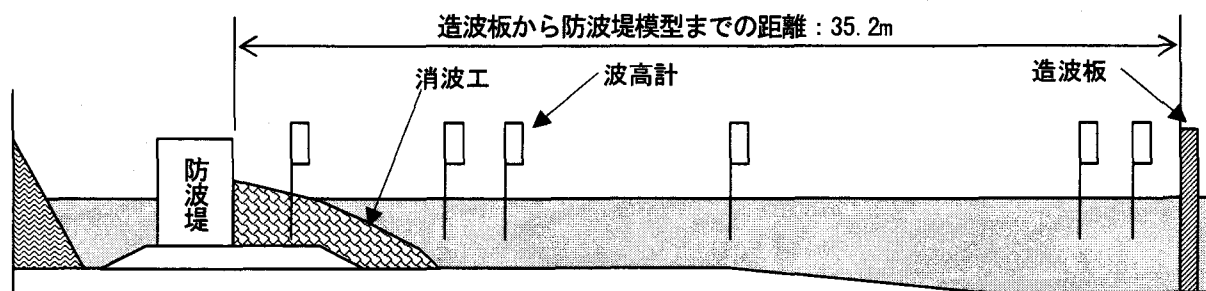


図-1 実験概要図

表-1 2次元造波水路仕様

水槽諸元	L50m×W0.6m×H1.2m		
造波様式	2ウェイモード造波方式 (ピストン型)		
造波方式	電気サーボモーター式 高速駆動部 (最大 75cm/s) :3.7KVA 低速駆動部 (最大 9cm/s) :0.4KVA		
造波制御方式	パソコンによるデジタル制御方式		
発生波特性	発生最大波高	50 cm	
	発生最大有義波高	20 cm	
	発生波周期	0.5~50 s	

(2) 実験ケース

a) 入射波条件

入射波は表-2 に示すように、周期7ケースと波高2ケースの規則波を用いた。

表-2 入射波条件

ケース	波浪種別	波高(m)		周期(s)	
		現地	実験室	現地	実験室
1、2	長周期波	0.3、0.6	0.006、0.012	30	4.2
3、4	長周期波	0.3、0.6	0.006、0.012	45	6.4
5、6	長周期波	0.3、0.6	0.006、0.012	60	8.5
7、8	長周期波	0.3、0.6	0.006、0.012	75	10.6
9、10	長周期波	0.3、0.6	0.006、0.012	90	12.7
11、12	長周期波	0.3、0.6	0.006、0.012	105	14.8
13、14	長周期波	0.3、0.6	0.006、0.012	120	17.0

b) 構造条件

実験は基本形状 (STEP1) として、以下に示す No.1~No.5 に示す 5 タイプの基本形状に対して実験を行い、消波構造の幅や材料の違いによる反射率の特性について検討した。

- No.1 直立堤 (消波工なし)
- No.2 捨石式消波構造
- No.3 消波ブロック式消波構造
- No.4 両面スリットケーソン+捨石消波構造
- No.5 中詰式両面スリットケーソン+遊水室

図-2 に示す No.1 の直立堤 (消波工なし) は、捨石マウンドからケーソン背後への透過波の影響を把握する目的で不透過 (アクリルマウンド, No.1-1) と透過 (捨石マウンド, No.1-2) の2種類について実験した。

捨石消波構造は、現地スケールで 500kg/個に相当する捨石を想定して実験スケールで直径 (φ) 10mm 程度の丸みをおびた捨石 (空隙率 40.2%) を使用した。

消波ブロック (標準ブロック:A) は、①港内に既設の消波ブロック (16~18t 型, No.3-1)、②完成時の港内波浪に対応した規格 (2t 型, No.3-2) を使用した。

スリットケーソンは平石・永瀬 (2004)¹⁾ や池野ら (2004)²⁾ を参考に前面・背面とも開口率を 20% とした両面スリットケーソンを用いた。

反射率の改善 (STEP2) は、STEP1 で得られた消波特

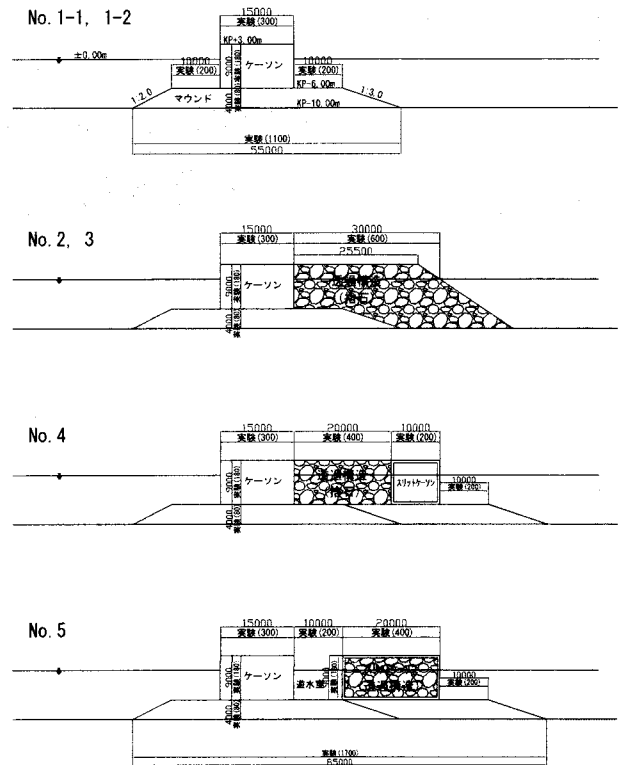


図-2 消波構造物の模型断面 (STEP1)

性を考慮し、消波工幅や消波工形状 (切欠) および両面スリットケーソンの前面・背面開口率、中詰材料を変えた検討を行った。スリットケーソン中詰材料として、現地で 1,000kg/個に相当する実験室スケール φ30mm の丸みをおびた石 (空隙率 41.4%, No.5-7) や φ30mm の角を有する割石 (空隙率 48.9%, No.5-8)、標準ブロックに対して複雑な凹凸を有するブロック B (No.5-9) を使用した。ブロック B (乱積) は Madsen ら (1974)³⁾ を参考に、式 (7) に示す係数 α_0 が標準ブロック A (乱積) の 2,100 に比べて 31,000 と 1 オーダー大きい値を示す材料を選定した。なお捨石の α_0 は 800~1500 である。

3. 実験結果

(1) 基本形状 (STEP1) の反射率特性

a) マウンド透過、不透過の影響 (直立堤)

長周期波が直立混成堤に作用した場合、入射した波が捨石マウンドから透過して反射波を過小評価する可能性がある。そこで、図-2 の直立混成堤形状を用いて堤体からの反射率を測定した。実験に用いたマウンドはアクリル製不透過マウンド (No.1-1) と捨石の透過マウンド (No.1-2) である。波の周期と反射率の結果を図-3 に示す。

図からいずれの周期に対しても透過の場合には不透過に比べて 10%~15% 程度小さくなった。長周期波では港外から港内へ入射する波も考えられることから港内から港外への透過波のみの条件では反射率を過小評価する

可能性がある。そこで、本実験ではマウンドを不透過（アクリルマウンド）の条件で実験を行った。

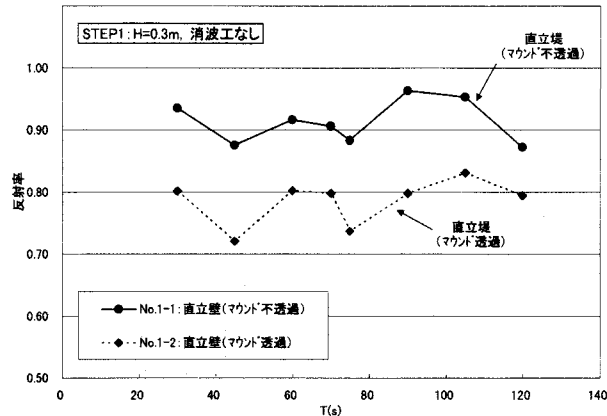


図-3 捨石マウンドの透過特性

b) 捨石および消波ブロック式消波構造

反射率の計算は近藤・竹田 (1983) ⁴⁾、平石・永瀬 (2004) にならって直立透水層内の捨石や消波ブロックによる圧力損失を考慮した簡易法を用いて反射率の検討を行った。

計算では図-4 に示す直立透水堤の反射率と透過率を算定し透過波が不透過壁による再反射を考慮してエネルギー合成した式(1)を用いた。

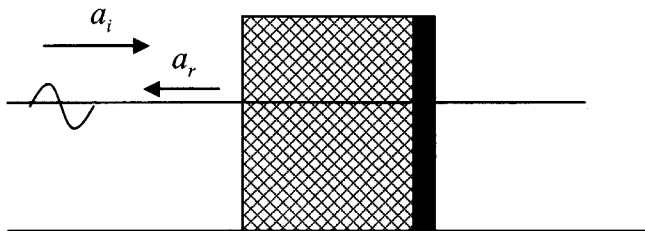


図-4 直立透水層

$$K_R = \frac{a_r}{a_i} = \frac{\sqrt{(K_r a_i)^2 + (K_t \cdot K_i a_i)^2}}{a_i} \quad (1)$$

$$= \sqrt{K_r^2 + K_t^4}$$

ここに、

$$K_r = \sqrt{\frac{(\tau - \lambda^2)^2}{f^2} + 1} \cdot \frac{\left(\frac{kBf}{2\lambda}\right)^{1.15}}{\left(1 + \frac{kBf}{2\lambda}\right)^{1.15}} \quad (2)$$

$$K_t = \frac{1}{1 + \frac{kBf}{2\lambda}} \quad (3)$$

$$\tau = \left(\frac{\lambda}{0.45}\right)^2 \quad (4)$$

$$f = \frac{\lambda}{\sigma} \zeta \left(\alpha + \frac{8}{3\pi} \beta U_2\right) \quad (5)$$

$$|U_2| = a_i \sqrt{\frac{g}{h}} \frac{1}{\left(1 + \frac{kBf}{2\lambda}\right)} \quad (6)$$

$$\alpha = \alpha_0 \frac{(1-\lambda)^3}{\lambda^2} \frac{\nu}{d_r^2} \quad (7)$$

$$\beta = \beta_0 \frac{(1-\lambda)}{\lambda^3} \frac{1}{d_r} \quad (8)$$

ここに

K_R : 合成反射率, K_r : 反射率, K_t : 透過率,
 a_i : 入射波の振幅 ($= H/2$), a_r : 反射波の振幅,
 τ : 慣性係数, f : 抵抗係数, ζ : 形状補正係数,
 U_2 : 水粒子速度の最大値, α_0 : 流速に比例した抵抗係数, β_0 : 流速の 2 乗に比例した抵抗係数,
 k : 波数 ($= 2\pi/L$), σ : 波の角振動数 ($= 2\pi/T$),
 d_r : 捨石又は消波ブロックの代表径, λ : 空隙率,
 B : 堤体幅, h : 水深, g : 重力加速度 (980cm/s^2),
 ν : 水の動粘性係数 ($0.01\text{cm}^2/\text{s}$)

計算では捨石直径 $d_r = 50\text{cm}$, 空隙率 $\lambda = 0.40$, 堤体幅 $B = 30\text{m}$ とした。また Madsen ら (1974) を参考に、 $\alpha_0 = 1500$, $\beta_0 = 1.8$ (石: 乱積) の条件で計算した。

計算は堤体の形状係数として ζ をパラメータとして整理した。

また、抵抗係数 f は式(5)より求めた。ただし、理論式は直立透過堤から導かれた式であるが、水理実験で設定した透過堤は図-2 (No2-1, No3-1) に示すように前面を 1 : 1.5 の斜面に設定したことから、 ζ を 0.2~1.0 のパラメータを用いて抵抗係数 f を補正した。

消波工幅を 30m 一定とした場合の、各消波構造の消

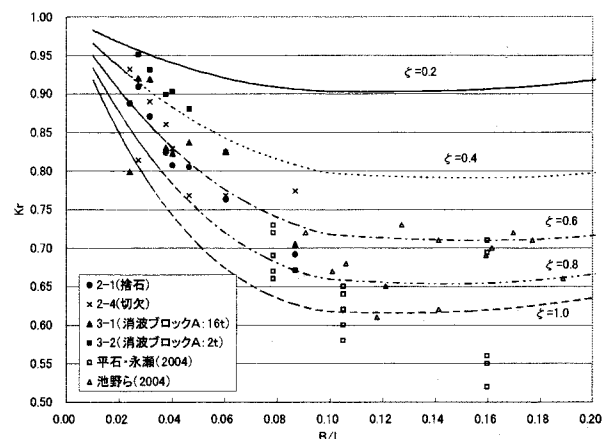


図-5 理論式による反射率計算結果

波性能を図-5に示す。反射率は消波工の幅 B と波長 L の比による相対幅 (B/L) により整理し、図には $B=30$ mに設定した捨石 (No.2-1)、切欠 (No.2-4)、消波ブロック (No.3-1,3-2) の実験結果を示した。また、参考として平石・永瀬 (2004) と池野ら (2004) の結果も示した。図から反射率は相対幅 (B/L) の増加とともに低減することが分かる。また $\zeta=0.4\sim0.8$ 程度の補正係数を用いることにより実験結果を比較的よく説明できることが分かった。平石・永瀬 (2004) の結果が相対幅 (B/L) が 1.0 より大きい条件で反射率が計算値より小さくなるのは捨石の粒径をサンドイッチ状に変化させたことによる抵抗係数 f の増加と考えられ、長周期波の消波対策として有効である。また、捨石と消波ブロック A では材料の違いによる反射率の顕著な差は認められなかった。

c) 両面スリットケーソンの消波特性

両面スリットケーソン+捨石消波構造 (No.4-1) および中詰式両面スリットケーソン+遊水室構造 (No.5-1) の消波特性を図-6に示す。図には比較のため捨石および消波ブロック式消波構造の結果も再掲した。

図から両面スリットの両構造は石および消波ブロック式消波構造の反射特性と同様に相対幅 (B/L) が增大するにつれて減少傾向を示す。ただし、中詰式両面スリットケーソン+遊水室のほう相対幅 (B/L) の小さいところで約 10%程度反射率が小さくなっている。

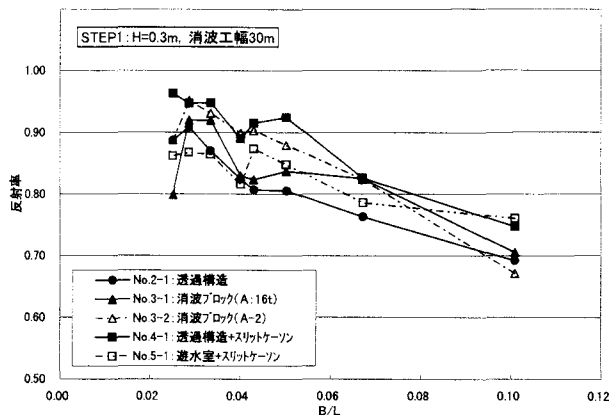


図-6 両面スリットケーソンの消波特性

(2) 反射率の改善 (STEP2)

反射率の改善は図-7に示すような各形式に対して以下の設定を行って反射率の測定を行った。

- No.2 捨石式消波構造
→消波構造幅 (50m), 切欠 (30m, 50m)
- No.3 消波ブロック式消波構造
→消波構造幅 (50m)
- No.4 両面スリットケーソン+捨石消波構造
→消波構造幅 (30m)
- No.5 中詰式両面スリットケーソン+遊水室
→スリットケーソン長 (30m)

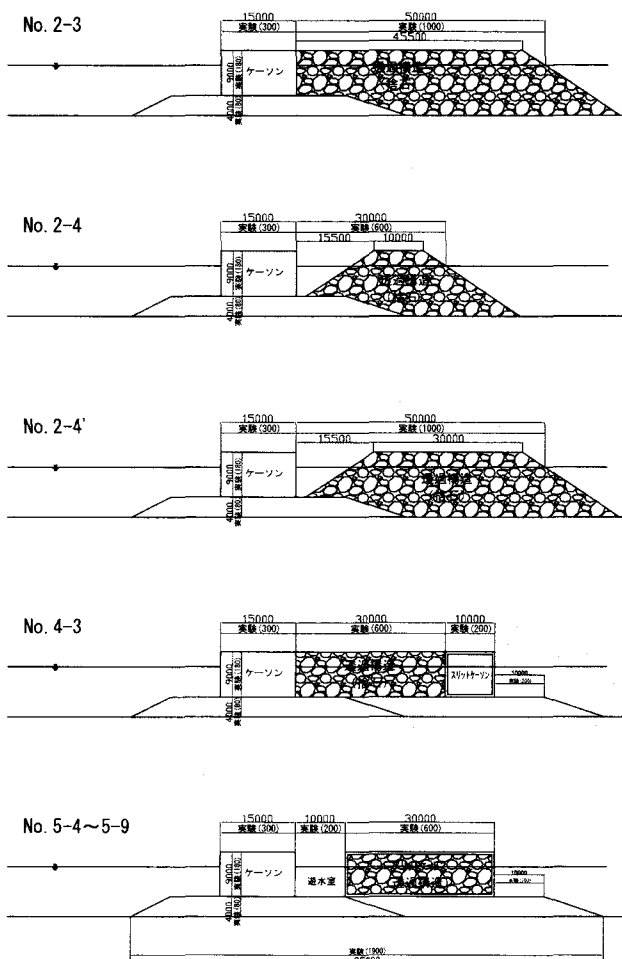


図-7 消波構造物の模型断面 (STEP2)

a) 捨石式消波構造 (No.2)

消波工幅を 50mとした場合 (No.2-3) は 30m (No.2-1) に比べて図-8に示すように反射率が約 10%上昇しており、幅を単純に延長しても消波効果が小さい結果となった。また、切欠を設けた場合 (No.2-4,2-4') も消波工幅 50m (No.2-3) と同様の傾向を示した。図-5の計算値からも相対幅 (B/L) が大きくなって必ずしも反射率は低下せず極小値が存在する。反射率の極小値は計算値から相対幅 (B/L) が 0.1 程度と判断される。

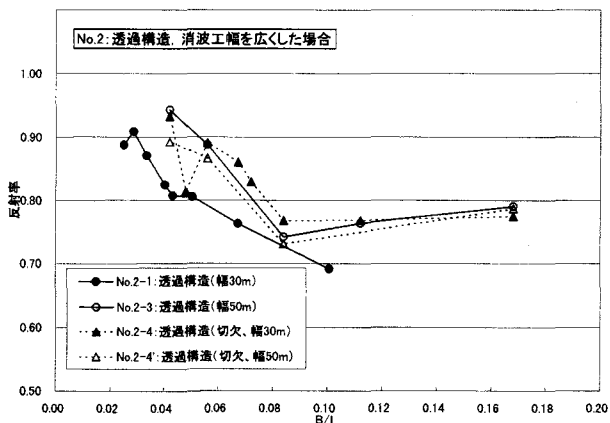


図-8 捨石式消波構造の消波特性
(消波工幅 50m, 切欠 (30m, 50m))

b) 消波ブロック式消波構造 (No. 3)

消波ブロック式消波構造の消波工幅を 50m とした場合 (No. 3-3) と消波ブロック材料を変えた場合 (No. 3-2) の消波特性を図-9 に示す。図から判断すると反射率は相対幅 (B/L) が減少するにつれてほぼ単調に減少する傾向にある。この傾向は捨石式消波構造の極小値を有する傾向と異なる。相対幅 (B/L) が大きくなると波の周期が相対的に小さい条件になることから、消波ブロックの前面勾配による消波効果が大きいものと考えられる。すなわち消波ブロックによる比較的周期の短い 30 s 程度の波の場合に有効な対策と考えられる。

一方、消波ブロックの規格を変えた場合 (No. 3-2) の反射率は標準ブロック (No. 3-1) と大きな違いは認められなかった。

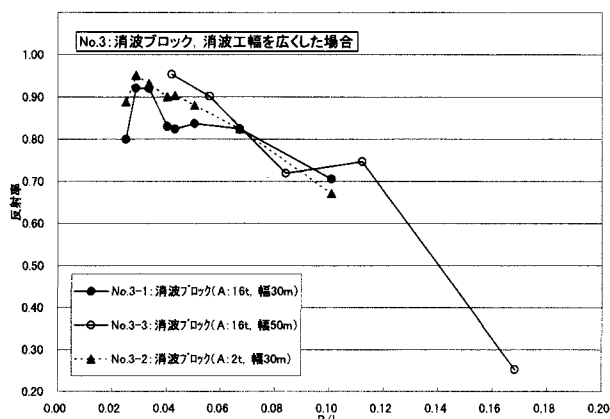


図-9 消波ブロック式消波構造の消波特性
(消波工幅 50m, 切欠 (30m))

c) 両面スリットケーソン+捨石消波構造 (No. 4)

スリットケーソン長を一定として消波構造長を基本構造より 10m 長い 30m に設定した場合 (No. 4-3) の反射率特性を図-10 に示す。図には平石・永瀬 (2004) の結果も示した。図から反射率は相対幅 (B/L) の増加に伴ってほぼ単調減少の傾向を示し、消波ブロック式消波構造と同様の結果となった。

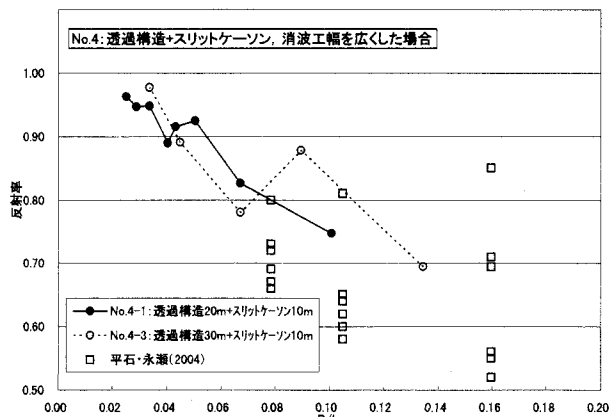


図-10 両面スリットケーソン+捨石消波構造
(消波構造長 30m)

d) 中詰式両面スリットケーソン+遊水室 (No. 5)

両面スリットケーソン長を基本構造より 10m 長い 30m にした場合 (No. 5-4) の反射率特性を図-11 に示す。実験結果からは反射率は相対幅 (B/L) の増加に伴って極小値を示す傾向にある。同図に示す池野ら (2004) の結果は相対幅 (B/L) の増加に伴う反射率の極小値は本実験で得られた結果より小さい。これは本実験で設定したスリットの開口率が 20% であるのに対して池野らの実験では 50% に設定したことによる違いと考えられる。このことより両面スリットの開口率は反射波低減のために重要な要素と考えられる。

図-12 に、スリット開口率及びケーソン中詰を変更した場合の反射率特性を示す。

スリット開口率を前面 50%・背面 20% (No. 5-5)、前面 20%・背面 10% (No. 5-6) と変えた場合は、前面・背面ともに開口率 20% とした場合 (No. 5-4) と顕著な差は生じなかった。

一方、ケーソン中詰を $\phi 30\text{mm}$ の丸みをおびた石 (No. 5-7) と角を有する割石 (No. 5-8) とした場合の反射率を比較すると、割石とした場合の反射率が 5~10% 程度小さくなった。角状の割石の場合には流れを乱すことによる反射率軽減効果があるものと考えられる。また、ケーソン中詰に複雑な凹凸を有するブロック B を用いた

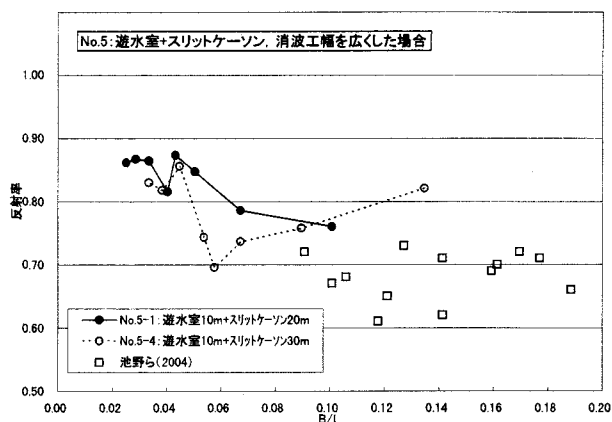


図-11 中詰式両面スリットケーソン+遊水室
(消波構造長 30m)

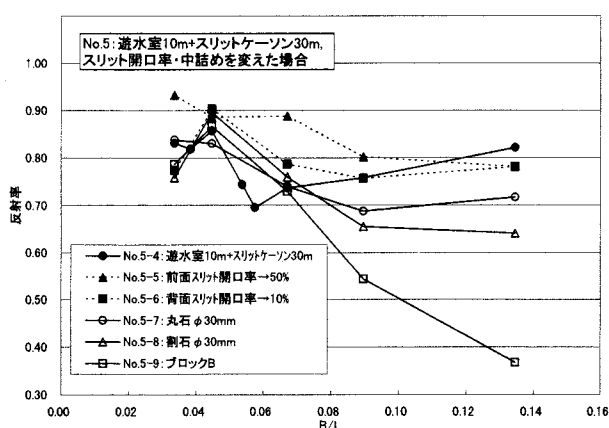


図-12 中詰式両面スリットケーソン+遊水室
(スリット開口率・中詰を変更した場合)

場合 (No. 5-9) は、さらに反射率の低減効果が見られたことから、ケーソン中詰材料の粒径及び形状が、反射率に大きく影響を及ぼしていることが分かる。

4. まとめ

本検討では、石巻港をモデルとした長周期波に対する消波構造物について、消波構造物の断面形状及び材料の違いによる消波性能について検討を行った。

その結果、

- ・ マウンドを透過する長周期波は、いずれの周期に対してでも 10%~15%程度であった。
- ・ 捨石式消波構造 (No. 2) の反射率は、相対幅 (B/L) の増加に伴って減少した。また、抵抗係数 f に $\zeta = 0.4 \sim 0.8$ 程度の補正係数を用いることにより実験結果を比較的よく説明できた。また、消波工幅を 50m とした場合は 30m の場合に比べて反射率が約 10% 上昇し、幅を単純に延長しても消波効果が高くない結果となった。計算値より反射率は相対幅 (B/L) が 0.1 程度で極小値を示す。
- ・ 消波ブロック式消波構造 (No. 3) の反射率は、相対幅 (B/L) が増加すると単調減少する。
- ・ 両面スリットケーソン+捨石消波構造 (No. 4) の反射率は相対幅 (B/L) の増加に伴ってほぼ単調に減少し、消波ブロック式消波構造と同様な傾向を示した。

- ・ 中詰式両面スリットケーソン+遊水室 (No. 5) の反射率の極小値は池野ら (2004) の実験結果よりも大きくなった。これはスリットケーソンの開口率が異なるためと考えられ、開口率は反射波低減に対して重要な要素であると考えられる。また、ケーソン中詰を $\phi 30\text{mm}$ の丸石と角を有する割石とした場合、割石の方が反射率が 5~10% 小さくなった。割石の場合は流れを乱すことによる反射波低減効果があると考えられる。

謝辞：本検討を実施するにあたっては、東北大学田中教授、(独) 港湾空港研究所米山室長をはじめ、宮城県土木部、東北地方整備局港湾空港部、仙台港湾空港技術調査事務所の関係機関各位により構成された「平成 16 年度石巻港雲雀野地区静穏度検討委員会」において、多大なご指導ご助言を頂いた。ここに記して、深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 平石哲也・永瀬恭一：長周期波対策護岸の最適構造に関する実験，海岸工学論文集，第 51 巻， pp. 721-725, 2004.
- 2) 池野勝哉・熊谷隆宏・森屋陽一・大島香織・関本恒浩：長周期波を対象とした直立消波構造物の開発，海岸工学論文集，第 51 巻， pp. 731-735, 2004.
- 3) Madsen, O. S. and S. M. White: Reflection and transmission characteristics of porous rubble mound breakwater, *Tech. Rept. No. 207, Persons Lab., Dept. of Civil Engrg., MIT*, 1974.
- 4) 近藤俊郎・竹田英明：消波構造物，森北出版， p. 275, 1983.