礫性海岸を対象とした円柱スリット式護岸 に関する水理模型実験

阿部 翔太1·木村 克俊2·鴨崎 直也3·今井 脩雅4·名越 隆雄5

 ¹正会員 八千代エンジニヤリング(株) 河川部技術第四課(〒111-8648 東京都台東区浅草橋 5-20-8) E-mail:sh-abe@yachiyo-eng.co.jp
²フェロー会員 室蘭工業大学大学院工学研究科(〒050-0071 室蘭市水元町 27-1) E-mail:kimura@mmm.muroran-it.ac.jp(Corresponding Author)
³学生会員 室蘭工業大学大学院環境創生工学系専攻(〒050-0071 室蘭市水元町 27-1) E-mail:21041017@mmm.muroran-it.ac.jp
⁴正会員 日本工営(株)(〒102-8539 東京都千代田区麹町 5 丁目 4 番地) E-mail:B0059@n-koei.co.jp
⁵正会員(一財)北海道道路管理技術センター(〒060-0807 札幌市北区北 7 条西 2 丁目 20) E-mail:nakoshi.takao@rmec.or.jp

礫性海岸においては、波浪による転動石の衝突によって角柱スリット部材の剥離が進行し、鉄筋の露 出が発生している.スリット部材を円柱とすることで、こうした被害を軽減できる可能性がある.本研 究では、縮尺 1/40の不規則波実験により、円柱スリットでは越波水塊の打ち上げを低減できることを示 した.さらに粗石の移動率に対する質量や水深の影響を明らかにした.その上で、縮尺 1/10の段波実験 により粗石を模擬した球体の転動を再現し、スリット部材や後壁に作用する球体衝突力を求めた.円柱 部材の正面における衝突力は、角柱部材の場合の 1.3 倍程度となるが、円周方向に衝突力は小さくなる. 円柱スリットでは、中潮位条件で、開口率が 50%の場合にスリット部に働く衝突力が最大となり、後壁 部についても、中潮位条件で衝突力が最大となることが明らかとなった.

Key Words : *rubble stone, slit type seawall, cylindrical slit wall, wave action, damage pattern, hydraulic model experiment*

1. はじめに

直立消波型護岸は、前浜の消失を最小限に留めること のできる構造形式として、海岸道路等の越波対策に幅広 く活用されてきた.しかしながら礫性海岸においては、 波浪の作用によって海底面上の粗石の転動が生じ、コン クリート部材の摩耗が発生することがある.小関ら¹⁰は、 直積ブロック式護岸の摩耗について報告している.一方、 スリット式護岸について名越ら²⁰は、**写真-1**に示すよう に、スリット角部や後壁において、粗石が衝突すること によりコンクリートが剥離し、鉄筋にも被害が及んでい ることを報告している.これまでスリット部は施工性等 を考慮して角柱部材が用いられてきたが、円柱部材を採 用することで礫性海岸における摩耗被害を軽減できる可 能性がある.

本研究では、不規則波実験により円柱および角柱スリ ット式護岸の基本的な水理特性を確認した上で、護岸前 面における粗石の移動特性を明らかにする.その上で、不 規則波群中の最大波による流れを段波で再現し、スリッ ト式護岸の各部に働く粗石の衝突力について検討する.



写真-1 角柱スリット式護岸の摩耗状況

2. 円柱スリット式護岸の水理特性

(1) 実験方法

2 次元造波水路(長さ24.0m,幅0.6m,高さ1.0m)内 に勾配1/30の海底地形を作製し,図-1に示すようなスリ ット部の断面形状を円柱および角柱とした護岸模型を用 いて,縮尺1/40で,Bret-Schneider光易型の不規則波(1 波群150波)による水理模型実験を行った.スリット部 の開口率εは、円柱、角柱ともに50%とし、正方形断面 とした角柱の辺長と、円柱の直径を一致させた.護岸の 設置水深hは図中に示すように4種類に変化させた.

以下においては、模型量を現地に換算した値を用いる.

(2) 反射および越波特性

反射および越波実験はh=3.0mとし,周期を3種類($T_0=8$, 10, 12s) に変化させた.反射率は、造波機前面に設置し た2本の波高計を用いて、入・反射波の分離計算を行っ て求めた. **図-2** に換算沖波波高 H_0 と反射率 K_R の関係を 示す.波高が小さい条件においては、角柱よりも円柱の 反射率が大きいものの、波高が大きくなるにつれてこの 差は小さくなる.また周期が長い条件ほど反射率の差は 小さくなる傾向がある.

図-3 に,換算沖波波高 Ho'に対する,静水面を基準とした越波水塊の打ち上げ高さ Rmax の関係を示す.角柱スリットは波面とスリット面が正対しているため,波面がスリット前面に衝突し水塊が高く打ち上がる.一方,受圧面が曲面となる円柱スリットにおいては,波面の衝突が起きにくく,打ち上げ高さを低減できる.こうした傾向は,周期が短く波高が小さい条件で顕著となる.

(3) 護岸前面における流況

後述する段波を用いた流速波形と比較するため,前出 の図-1 に示したようにマウンド面から 0.4m の位置にプ ロペラ流速計を設置して,マウンド近傍における流速を 測定した.図-4 に, *h*=0.4m の場合について,周期 *T*₀=10s の換算沖波波高と護岸前面における水粒子速度の不規則 代表値 *u*_{1/n} (m/s)の関係を示す.最大波に相当する *u*_{1/150} については,ややバラつきが大きいが,*H*₀'=5.0~6.0m おい て頭打ちとなる.こうした傾向は *u*_{1/20}および *u*_{1/10}につい ても同様である.

3. 護岸前面における粗石の移動特性

(1) 実験方法

前出した図-1に示すように、円柱および角柱スリット



図-3 周期ごとの越波水塊の打ち上げ高さ

の前面に粗石マウンドを設置して、縮尺 1/40 で粗石の安 定実験を行った.粗石は比重 2.6 の玉石を用い、その平 均質量を 3 種類 (100, 200, 500kg) に変化させた.周期 *T*₀=10s で一定とし、1 波群 150 波の不規則波を作用させ た.水深hは0.4, 1.4, 2.4mの3種類に変化させ,スリ ット部を通過し,遊水室内に残留した粗石の個数をカウ ントし,その値をスリットの本数で除してスリット1本 当りの移動率 λを求めた.さらに,比較のために,スリ ットの位置に直立壁を設置した場合についても安定実験 を行い,スリット幅に相当する部分の粗石の移動率 λを 求めた.

(2) 粗石の移動率と安定数

写真-2の左側は、円柱スリット前面に100kgの粗石を 設置した状況である. 粗石は、白、赤、黄の3種類に着 色し、この順に沖側から配置した. 波高の小さな場合に は、黄色の粗石が多く移動するが、波高が大きくなると 白色および赤色も移動するようになる. **写真-3**の右側は、 水深 *h*=0.4m、換算沖波波高 *H*₀'=5.0m の波の作用後の状 況を示しており、粗石の移動率 λ は 0.02 となった. 移動 した粗石は、後壁の前に溜まる傾向がある.

図-5 に、水深 h=0.4m における換算沖波波高と質量ご との粗石の移動率 λ の関係を示す。粗石の移動率には質 量の影響が顕著となる。移動限界波高は、100kg のとき $H_0'=1.0m$, 200kg のとき $H_0'=2.0m$, 500kg のとき $H_0'=4.0m$ となる。

図-6に、質量*M*=100kgについて、換算沖波波高と水深 h ごとの移動率 λ の関係を示す.水深が小さいほど粗石 の移動が生じやすいのは、砕波後の強い流れが発生する ためと考えられる.

一般に消波構造を有しない混成堤のマウンド被覆材の 必要質量は、以下に示すハドソン式により求めることが できる.

$$M = \frac{\rho_{\rm r} H_{1/3}^{3}}{N_{\rm s}^{3} (S_{\rm r}-1)^{3}} \tag{1}$$

ここで、Mは石材の質量、 $H_{1/3}$ は有義波高、 N_s は安定 数、 ρ_r は石材の密度、 S_r は石材と水の密度比を表わす. 直 立壁の前面に位置する石材に対しては、安定数 Ns を以 下に示す谷本式(谷本ら³)より求めることができる.

$$N_{\rm S} = \max\left\{A, B\frac{1-\kappa}{\kappa^{1/3}}\frac{h'}{H_{1/3}} + A\exp\left[-C\frac{(1-\kappa)^2}{\kappa^{1/3}}\frac{h'}{H_{1/3}}\right]\right\} (2)$$

$$\kappa = \frac{2kh'}{\sinh 2kh'}\sin^2 kB_{\rm M} (3)$$

ここで、 κ は無次元流速パラメーター、h'はマウンド上 水深、 B_M はマウンド前肩幅、L'はマウンド上における波 長、kは波数 (= $2\pi/L'$)を表わす。谷本式では、A=1.8、 B=1.3、C=1.5 としている。図-7 に、無次元波高 h'/H_{I3} と 安定数 N_s の関係を示す.直立壁の場合は、安定数 N_s は 0.04~0.14 の範囲で、 h'/H_{I3} とともに増大し、既往の谷本





写真-2 波の作用前後の状況



式とは異なる A=0.01, B=2.8, C=0.15 を用いた計算値が 実験値とほぼ一致した. 谷本式は一般的な混成堤の条件 に対して定式化されたものであるが,今回のような水深 の浅い条件に対しても適用できることが明らかとなった.

一方,スリット式護岸については,安定数 N_sが 0.02~ 0.14 の範囲で変化し,角柱に比べ円柱の安定数がやや小 さい.スリット式護岸の場合,後壁からの反射波により 岸沖方向の水粒子速度が大きくなることや,スリット部 での縮流の影響で速い流れが作用することにより粗石が 移動しやすくなり,その傾向は円柱の場合に顕著になっ たものと考えられる.

4. 球体の衝突力に関する検討

(1) 実験方法

2 次元水路(長さ9.0m,幅0.6m,高さ0.4m)におい て、端部に設けた貯水槽のゲートを急開させることによ り段波を発生させた.水路床上には、図-8に示すように スリットの円柱部材と底板部を縮尺1/10で再現した.円 柱スリットの設置本数を3.0本,2.5本,2.0本として、開 口率εを25,35,50%の3種類に変化させた.

円柱スリット模型の内部には、図-9の左側に示すよう に1分力計(定格:50N(模型量))を組み込み、円柱下 部に設けた受圧部(高さ0.40m,幅0.64m)に働く球体 模型の衝突力を測定した.また円柱スリットの取付角度 *θ*を0,30,60,90°の4種類に変化させることで、円柱 スリットにおける衝突力分布を把握した.さらに、円柱 スリットへの衝突力と比較するため、角柱スリット模型 にも図-9の右側に示すように、角柱下部に設けた受圧部

(高さ0.50m,幅0.80m)に働く衝突力を測定した. なお,角柱スリットにおける受圧部は,後壁に働く衝突力にも使用した.

球体模型の比重は 2.6 とし, 直径は 75 cm で一定とし た. 固定マウンドは直径 30cm の球体を 2 層積みとし, 横 6 列,縦 19 列を配置した. 固定マウンド前面の勾配変 化点にはプロペラ式流速計を設置し,水粒子速度の時間 変化を測定した. また図-8 の下側に示すように,底板上 面を基準とした潮位を 0.0~0.6m の範囲で 4 種類(W.L.1 ~W.L.4) に変化させた.

衝突力および水粒子速度の時系列データは、1ms 間隔 (模型量)でサンプリングし、ピーク値解析を行った.

(2) 円柱スリット部に働く衝突力

図-10 に、円柱スリットの開口率 ε=50%、潮位 W.L.2、 正面位置(取付角度 θ=0°)における衝突力 F(kN)の時間 変化を示す.流体力のみの場合と比較すると、流体力の ピークよりやや遅れて衝突力のピークが生じ、その継続



図-12 円柱スリットへの衝突力に及ぼす開口率の影響

時間Δt(s)は0.04s となった.

図-11 に, 潮位 W.L.4 について, 開口率 *ε*=50%の円柱 の取付角度 *θ* ごとの衝突力を示す. 衝突力は水粒子速度 に比例して増加し, 取付角度 *θ* が大きくなるほど衝突力 が低下している.

図-12 に、潮位 W.L.4 について、円柱スリットの取付角 度 θ=0°の衝突力に及ぼす開口率の影響を示す.開口率 ε が小さくなるほど、スリット部への衝突力は小さくなる. これは開口率が小さい場合、スリット壁からの反射波に よりスリット前面の潮位が上昇するため、球体が転動し にくくなるためと考えられる.

図-13 に、開口率 ε=50%、取付角度 θ=0°として、潮位 を変化させた場合の円柱スリットに働く衝突力を示す. 潮位が W.L.2 で衝突力が最大となっている.また W.L.2 では初期潮位が球体模型の直径の 0.3 倍程度となってお り、流れのエネルギーが効率良く球体に伝わる潮位条件 があることを確認した.

(3) 円柱スリットの後壁に働く衝突力

図-14 に、円柱スリット開口率 ε=50%とした場合の、後 壁に作用する衝突力に対する潮位の影響を示す。潮位が 高い W.L.4 の場合には、後壁とスリットの中間で球体模 型が静止するため衝突力は生じない、W.L.2 において後壁 に作用する衝突力は最大となり、その値は前出した図-13 に示す円柱スリット正面における衝突力の 40~75%程度 となる。

(4) 角柱スリットの各部に働く衝突力

図-15 に、潮位 W.L.2 について、角柱スリットの開口率 ε=50%とした場合の、スリット部と後壁に作用する衝突 力を示す.前出した図-13 に示す同一条件の円柱スリッ ト部の取付角度 θ=0°では、角柱の場合の 1.3 倍程度の衝 突力が作用することが分かる.一方、角柱スリットの後 壁に働く衝突力は角柱スリット部の 60~100%となる. 角柱スリットの場合、円柱スリットに比べて遊水室内の 潮位上昇がやや遅れるが、両者の後壁に働く衝突力には 大きな差は生じていない.

5. コンクリート部材の摩耗量に関する検討

(1) 摩耗量の算定法

現地における開口率 ε=50%の円柱スリット式護岸を想 定して,質量 M=500kg の粗石の衝突による摩耗量を求 める. 波高 H₀'(m),周期 T₀ (s)の時化が R 時間作用した 場合には,図-5より粗石の衝突率λ(=1/n)が得られ, 波群中の上位 1/n の波(1/n 最大波)によって,粗石の衝 突が発生することになる. 平均周期は有義波周期の0.9倍 であることから、R時間に発生する衝突回数Nは、

$$N = \frac{R \times 3600}{0.9 \times T_0 \times n} \tag{4}$$

で求められる. さらに図-4 に示した不規則代表値の実験 結果を補間することにより, 1/n 最大波に相当する水粒子 速度 u_{l/n} (m/s)を求めることができる. 円柱スリットの正 面に作用する衝突力は, 現地の潮位に応じて図-13 を用 いて, 水粒子速度に対応する衝突力 F(kN)が得られる.

衝突速度と衝突力の間に運動量保存則を適用すること で、衝突力の継続時間 Δt (s)から粗石の衝突速度 V(m/s)は、 $V=(0.5F\cdot\Delta t)/M$ となり、粗石の衝突による累積衝突エネ ルギー $E_{R}(J)$ は、以下の式で求められる.

$$E_{\rm R} = \frac{1}{2} N \cdot M \cdot V^2 \tag{5}$$



図-13 円柱スリットへの衝突力に及ぼす潮位の影響



図-15 角柱スリットの各部に働く衝突力

コンクリートの衝撃磨耗に関しては、豊福ら⁴が系統的な室内実験結果に基づいて、以下に示す累積磨耗深さ AD_{M} (mm)の算定式を提案している.

$$AD_{\rm M} = \beta \sqrt{E_{\rm R}} \tag{6}$$

ここで、 β はすりヘリ速度係数で、コンクリートの圧縮 強度の関数として定式化され、標準的なコンクリートの 圧縮強度 24~50 (N/mm²) では β =0.33 が推奨されている.

(2) 摩耗量の試算結果

モデル時化として、潮位が W.L.2 の条件下で、波高 H_0 ' =4.0m、周期 T_0 =10.0s の波浪が 6 時間継続したと仮定する. 護岸前面における粗石の質量を 500kg とした場合、 図-5 より粗石の移動率 λ =0.007 (=1/150) となり、6 時間の衝突回数は 16.8 回となる. 図-4 より水粒子速度 $u_{1/150}$ =3.0m/s となり、図-13 より衝突力は 15kN となる. 衝突力の継続時間 Δt =0.04s を用いると、累積衝撃エネル ギー E_R は 1512 (J) となる. これを式(6)に代入すること により摩耗量は 12.8mm と推定することができた.

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す.

- (1) 円柱スリットは、角柱に比べて、反射率はわずかに増加するが、越波水塊の打ち上げ高さを低減できる.
- (2) スリット式護岸の前面においては,直立壁に比べて 粗石の移動が生じやすい.粗石の安定限界質量を求め, 安定数 Ns と無次元波高 h'/H_{1/3} 波の関係を示した.
- (3) 円柱部材の正面における衝突力は、角柱部材の場合

の1.3 倍程度となるが、円周方向に衝突力は小さくなる. またスリット開口率が 50%、中潮位(W.L.2)の条件で衝突力が最大となる.

- (4) 後壁部については、中潮位(W.L.2)の条件で衝突力 が最大となり、スリット形状の影響は生じていない.
- (5) モデル時化に対して, 円柱スリットの正面部の摩耗 量は12.8mm と推定した.

本研究では、円柱スリット式護岸の礫性海岸への適用 性を示した.今後は円柱部材の摩耗対策としての防護工 について検討を行う予定である.

謝辞:本研究はJSPS科研費 課題番号20K04697ならびに (一財)港湾空港総合技術センターによる助成を受けて 実施された.ここに謝意を表する.

参考文献

- 小関成美,木村克俊,名越隆雄,嶋崎皓輝,村田良英:礫 性海岸に建設された直積みブロック式護岸の波浪による 摩耗事例の分析,土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_576-I.581, 2020.
- 名越隆雄,木村克俊,嶋崎晧輝,村上友翼,村田良英:礫 性海岸に建設されたスリット式護岸の波浪による摩耗事 例の分析,土木学会論文集 B3 (海洋開発),75 巻 2 号 pp.I_815-I_820, 2019.
- 3) 谷本勝利,柳生忠彦,村永努,柴田鋼三,合田良実:不規 則波実験による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する 研究,港湾技術研究報告第21巻,第3号,pp.3-42,1982.
- 4) 豊福俊泰,永松武則,鶴窪廣洋,豊福俊英:コンクリートのすりへりの進行予測に関する研究,土木学会論文集 B3 (材料・コンクリート構造),72 巻 4 号, pp.380-399,2016.

(Received February 3, 2022) (Accepted May 9, 2022)

HYDRAULIC MODEL TESTS ON CYLINDRICAL SLITT TYPE SEAWALL FOR GRAVEL COAST

Shota ABE, Katsutoshi KIMURA, Naoya KAMOZAKI, Yuga IMAI and Takao NAKOSHI

Slit type seawalls have been constructed in order to decrease wave overtopping for the safety of coastal areas, because of their good cost performance. However, the rectangular members of slit type seawall were seriously damaged by abrasion due to wave action on gravel coast. In this paper, the differences of hydraulic performances between cylindrical and rectangular slit type seawall were examined by irregular wave tests with the model scale of 1/40. The wave splash height of cylindrical slit type seawalls can be decreased than that of rectangular ones for shorter wave period conditions. The motion of spherical model due to wave action was reproduced by dam-break type tests with the model scale of 1/10. The relationship between the collision force and the flow rate was shown for both slit types. The collision force distribution of the cylindrical slit wall was shown, and the collision force at the top position was found to be 1.3 times larger than that of the rectangular slit wall. It was found that the collision force of the backwall was smaller than that of the slit wall. The effect of slit opening ratios and water levels were also discussed for cylindrical slit type. Based on the test results, the calculation methods of the abrasion speed of cylindrical slit wall were proposed for the typical wave and period conditions.