

巨石を連行した波浪による 護岸被害の再現実験

阿部 翔太¹・木村 克俊²・鴨崎 直也³

¹ 正会員 八千代エンジニアリング(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 正会員 国土交通省関東地方整備局東京空港整備事務所 (〒144-0041 東京都大田区羽田空港 3-3-1)
E-mail : kmozaki-n83ab@mlit.go.jp

急勾配海底条件下の K 港の護岸において、波浪に連行された巨石の衝突による護岸壁の陥没と、越波によって打ち上げられた巨石が護岸背後に落下することによる舗装の損壊被害が発生した。本研究では、こうした被害の要因となった波浪による巨石の連行特性を明らかにするため、縮尺 1/50 の不規則波を用いた水理模型実験を実施した。巨石を模した球体の直径と比重を変化させて、換算沖波波高と打ち上げ高さの関係を求めた。球体の打ち上げ高さは、越波水塊の打ち上げ高と相関があることから、両者の比と換算沖波波高の関係を示した。波浪により転動した球体の衝突力について波別解析を行い、その不規則代表値と換算沖波波高の関係を求めた。さらに被災時の波浪条件に対して、球体衝突力から衝突エネルギーを求めて陥没量を計算した。その結果、被災時の波浪に対する陥没量の計算値は、現地で発生した陥没量にほぼ一致することを確認した。

Key Words : *boulder, seawall, wave action, damage pattern, hydraulic model experiment*

1. はじめに

礫性海岸では高波時において、護岸前面に堆積した礫石が越波によって打ち上げられることがある。阿部ら¹⁾は、越波に伴う礫石の打ち上げに関する実験的研究を行っている。一方、波浪によって堆積した礫石が転動・衝突することで、コンクリート構造物の摩耗が顕在化している。消波護岸に対しては、名越ら²⁾がスリット式護岸、小関ら³⁾が直積ブロック式護岸を対象として、波浪による摩耗特性を明らかにし、その補修方法を提案している。こうした摩耗現象は、波浪の厳しい条件下ではより顕著となることが想定される。特に離島のような急勾配な海底地形の条件下では、高波が発生しやすい傾向があり、そこに整備された港湾、漁港施設では、高波による礫石の転動衝突や越波連行の被害が報告されている。また、消波ブロックが法先よりも沖側に流出することで、岩礁地形が露出し、岩礁に捕捉された巨石や破損ブロックの残骸が施設被害を及ぼすこともあるため、西谷ら⁴⁾は消波ブロックの法止工における安定性照査に関する検討を行っている。

写真-1 に示す K 港は、日本海側に位置し、急勾配な岩礁地形上に整備された避難港であり、周辺海域で操業する漁船の避泊に利用されてきた。しかし、高波浪の来襲



写真-1 K 港の航空写真

に伴い、消波ブロックが流出したことで、巨石等の転動や打ち上げによる護岸被害が発生した。

本研究は、まず同港で発生した高波に連行された巨石による護岸被害について分析する。さらに同港における被災時の波浪条件に対して、巨石の移動特性を明らかにするとともに、陥没箇所に働く巨石の衝突力を求め、護岸壁の陥没量を推定するものである。

2. K港における護岸被害の分析

(1) 消波ブロックの被災状況

M島K港では消波護岸が採用されており、20t型消波ブロックが設置されている。また護岸前面の海底勾配は1/7の急斜面が続いている。この消波護岸では図-1に示すように、2009年12月31日から2010年1月2日に高波浪が来襲し、写真-2に示すように、消波ブロックの多くが法先よりも沖側に流失した。被災時の高波浪はピーク時で、 $H_{1/3}=6.0\text{m}$ 、 $T_{1/3}=12.0\text{s}$ が観測されており、こうした急斜面に続く岩礁上の消波ブロックの安定性については、佐藤ら⁹⁾が水理模型実験による検討を行っている。

(2) 岸壁エプロン部の被災状況

高波浪時の越波に巨石が連行され、護岸天端を越えて、護岸背後の岸壁エプロン部に打ち上げられた。エプロン上には2個の巨石が確認されており、そのうち大きい方は、写真-3の左に示すような長径1.0m程度の楕円形だった。

巨石のほかに破損した消波ブロックと考えられるコンクリート塊が合計6個確認された。そのうち最大のもは、写真-3の右に示すような長径1.5m程度の楕円形だった。これらの巨塊が落下した際の衝撃力により、写真-4に示すように鉄筋コンクリート製の床板が損壊した。

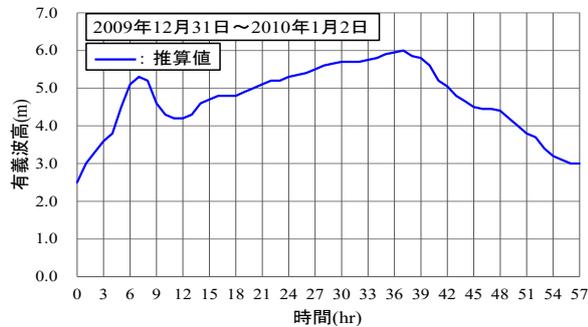


図-1 被災時における有義波高の時間変化

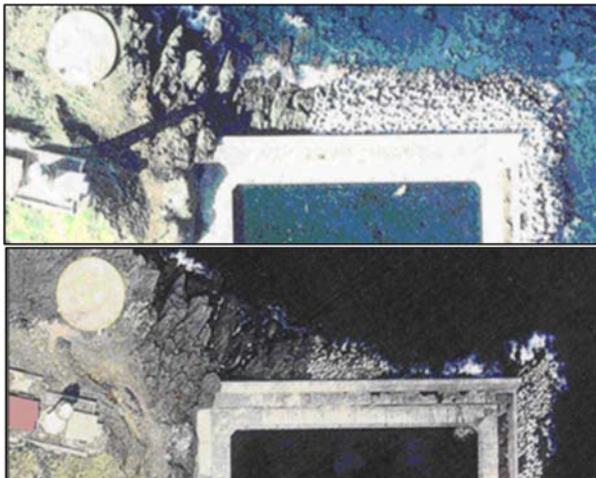


写真-2 消波ブロックの被災状況

(3) 護岸壁の被災状況

図-2に護岸壁の陥没箇所を示す。消波ブロックが流出したことにより、護岸壁が露出し、波浪に連行された巨石や破損した消波ブロックの塊が護岸壁に衝突することで4箇所陥没が生じた。陥没箇所を汀線に近い場所からそれぞれP₁、P₂、P₃、P₄と定義し、図中に陥没の発生箇所をプロットした。写真-5に各箇所における陥没被害



写真-3 打ち上げられた巨石(左)とコンクリート塊(右)



写真-4 岸壁エプロン部の被災状況

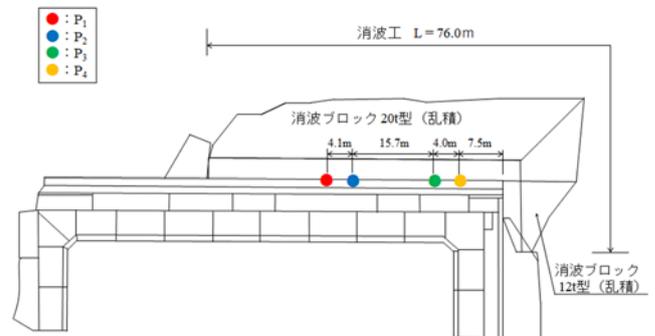


図-2 護岸壁の陥没箇所

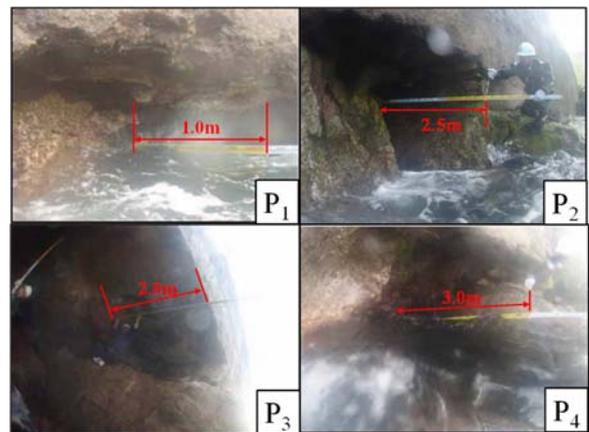


写真-5 護岸壁の陥没状況

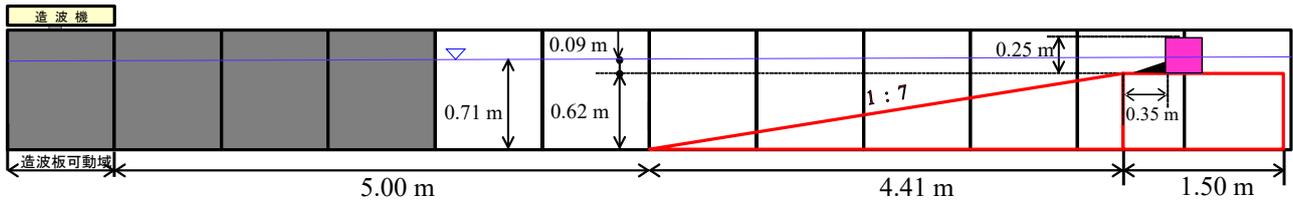


図-3 実験水路の断面形状

の状況を示す。すべての箇所において、静水面付近で陥没が生じているのがわかる。静水面は波圧が最大となる位置であり、こうした箇所では巨石やコンクリート塊の衝突が生じ、陥没が進行したと推察される。また各箇所における陥没量は、それぞれ P_1 が 1.0m、 P_2 が 2.5m、 P_3 が 2.0m、 P_4 が 3.0m であった。以下においては、巨石やコンクリート塊を球体で模擬し、その直径や比重の影響について検討する。

3. 護岸前面における球体の打ち上げ高さ

(1) 実験方法

図-3 に示す 2 次元造波水路（長さ 24.0m、幅 0.6m、高さ 1.0m）内に勾配 1/7 の海底地形を作製し、図-4 に示すように、消波ブロック流出後の P_2 における護岸形状を縮尺 1/50 で再現した。以下、模型量を現地の換算値で表記する。

波浪条件は、周期 T_0 を 12s で一定とし、換算沖波波高 H_0' を 1m~8m の範囲で 8 種類とした。護岸前面の法先部に、直径 D が 0.8m の球体を用いた固定マウンドを設置した。固定マウンド上には球体模型 20 個をランダムに配置し、その直径 D を 3 種類（0.8、1.0、1.5m）、比重 γ を 3 種類（2.0、2.3、2.6）に変化させた。固定マウンドの前面には、沖側への球体の流出を防止するため、金網による柵を設置した。球体の打ち上げ実験では Bretschneider・光易型スペクトルを有する不規則波（1 波群 150 波）を作用させて、球体の移動状況を動画解析し、不規則波群中の最高波に注目して球体の打ち上げ高さ A_{max} を求めた。また球体の打ち上げが発生した際には、水塊の打ち上げ高さ R_{max} を同時に解析した。

(2) 越波水塊の打ち上げ高さ

図-5 に、静水面を基準とした水塊の打ち上げ高さ R_{max} と換算沖波波高 H_0' の関係を示す。実験値の水塊の越波高さは、波高とともに増大し、波高が 5m より大きな条件では頭打ちとなる傾向がある。

図中に示す R_{max} の計算値は合田⁹⁾の碎波指標から求めた最大波高 H_{max} に補正係数 α を乗じて求めた。ここでは、 $\alpha=2.5$ とすることで計算値と実験値が概ね一致しており、

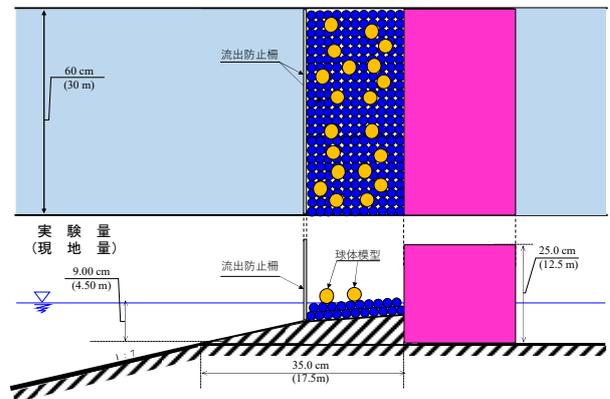


図-4 移動実験に用いた地形と堤体模型

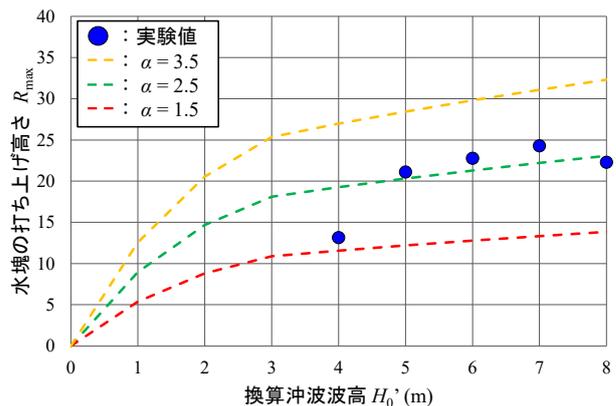


図-5 水塊の打ち上げ高さ と換算沖波波高の関係

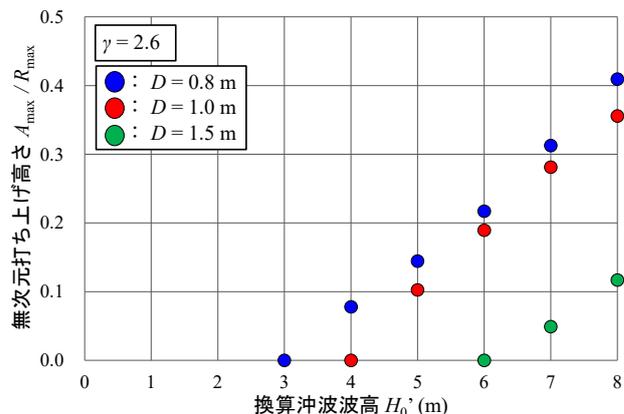


図-6 打ち上げ高さ に及ぼす直径の影響

波高 5m より大きな条件において頭打ちとなる傾向は護岸前面での碎波による影響と考えられる。

(3) 球体の打ち上げ高さ

図-6に、比重 $\gamma = 2.6$ で一定とした3種類の直径 D の条件に対して、球体の打ち上げ高さ A_{max} を水塊の打ち上げ高さ R_{max} で除した無次元打ち上げ高さ A_{max}/R_{max} と換算沖波波高 H_0' の関係を示す。すべての直径において、 A_{max}/R_{max} は波高に比例して増加する傾向が見られた。また、それぞれの直径の球体が打ち上がりはじめる波高は $D=0.8m$ のとき $H_0'=4m$ 、 $D=1.0m$ のとき $H_0'=5m$ 、 $D=1.5m$ のとき $H_0'=7m$ となり、 A_{max}/R_{max} には直径が大きく影響することがわかる。

図-7に、 $D = 1.5 m$ 、3種類の比重 γ の条件に対して、無次元打ち上げ高さ A_{max}/R_{max} と換算沖波波高 H_0' の関係を示す。すべての直径において、 A_{max}/R_{max} は波高に対して増加する傾向が見られた。比重 $\gamma = 2.3$ の球体が打ち上がるのは $H_0'=6m$ となり、現地でのコンクリート塊が護岸を越えた現象を今回の実験では再現できなかった。その理由としては、現地のコンクリート塊は楕円形であり、実験で用いた球体よりも受圧面が大きく、波力をより大きく受けるため、打ち上り易いことが要因と考えられる。また神田ら⁷⁾は直径30cmの粗石の打ち上げを縮尺1/15で再現した際のスケール効果を指摘しており、今回も同様な影響があったと推察される。

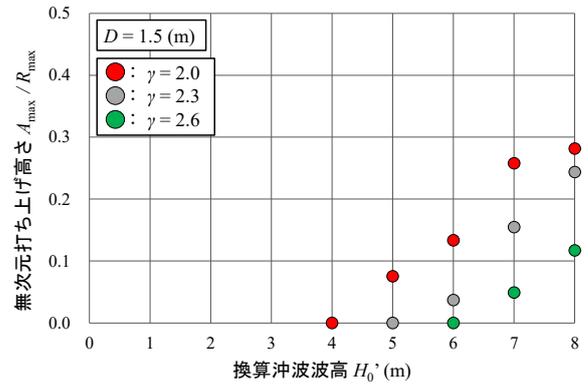


図-7 打ち上げ高さに及ぼす比重の影響

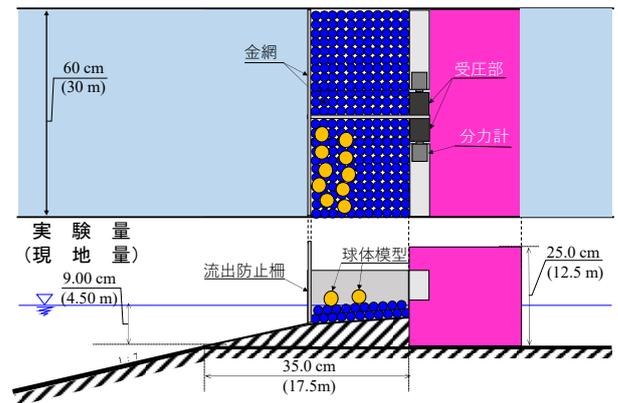


図-8 衝突実験に用いた地形と堤体模型

4. 護岸壁への球体の衝突に関する検討

(1) 実験方法

球体の打ち上げ実験と同じ堤体模型を用い、図-8に示すように水路中央に金網を設置して2分割し、それぞれの護岸壁の中に、 P_2 における陥没箇所と同面積の受圧部を1分力計(定格:10N)に取り付けた。一方では球体模型の衝突力と波力を、もう一方では波力のみを測定した。今井ら⁸⁾は、波浪による転動石の衝突実験を行い、直径が大きいほど移動速度の増加率が大きくなることを示している。本実験では、衝突力のピーク値を捉え易いように現地の岸壁エプロン部に打ち上げられた巨石の中でも直径が最大となる巨石(直径1.5m、比重2.6)を球体で模擬し実験した。実験波は球体の打ち上げ実験と同じ条件とし、サンプリングタイム1msで衝突力および波力を収集した。

(2) 護岸壁への作用波圧

図-9に、 $H_0'=8m$ における波力(青色)と波力+衝突力(赤色)の時間波形を示す。球体は壁に点接触するため衝突力は集中荷重として作用しており、このケースでは波力と同程度の大きさとなっている。また衝突力と波力のピークは一致している。

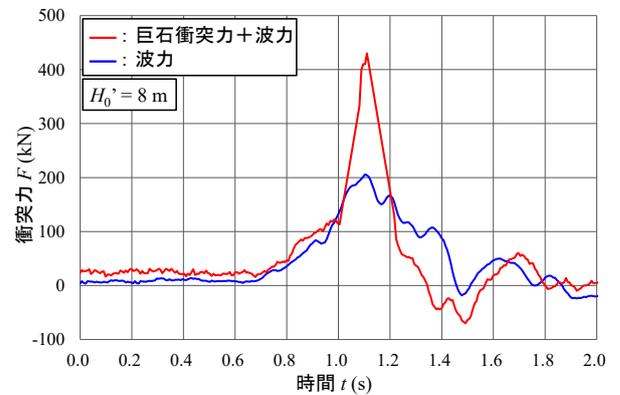


図-9 衝突力および波力の時間変化

図-10に、波圧 p_{max} と換算沖波波高 H_0' の関係を示す。

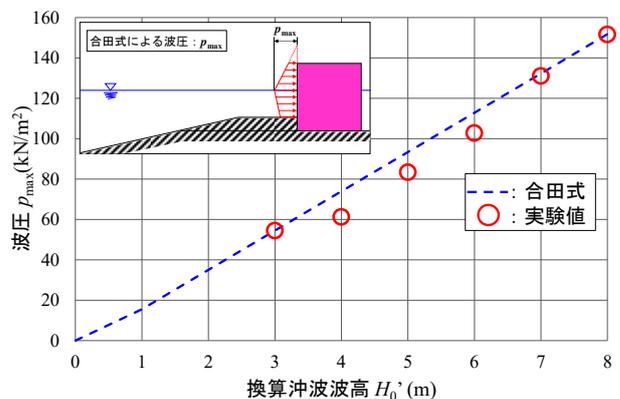


図-10 波圧の実験値と合田式による計算値の比較

実験値の波圧は、波力を受圧面積で除して求めた。 $H_0' = 2\text{ m}$ より小さな条件では、球体が移動せず、受圧部への衝突が見られなかったため、 $H_0' = 3\text{ m}$ より大きな条件の波圧を示す。実験値は波高に比例して増加する傾向が見られた。図中に示す p_{\max} の計算値は静水面における波圧強度で、以下に示す合田⁹⁾の波圧算定式から求めた。

$$p_{\max} = (\alpha_1 + \alpha^*)\rho g H_{\max} \quad (1)$$

ここで、 ρ は海水の密度、 g は重力加速度で、係数 α_1 および α^* は高橋ら¹⁰⁾の提案値を用いた。実験値は $H_0' = 4 \sim 6\text{ m}$ で計算値に比べてやや小さいが、両者は概ね一致していることが分かる。

(3) 護岸壁に働く衝突力

衝突力の時間波形データを1波ごとに区切り、衝突力を大きい方から並べて上位30波を解析対象としてそのピーク値を求めた。図-11に、衝突力と換算沖波波高の関係を示す。ここで不規則波の $1/n$ 最大波に対応する衝突力を $F_{1/n}$ として表わす。 $H_0' = 3\text{ m}$ より大きな条件では、波高とともに衝突力が増加していることがわかる。また波高が大きくなるとともに、 $F_{1/150}$ と $F_{1/30}$ の差が大きくなる傾向がある。

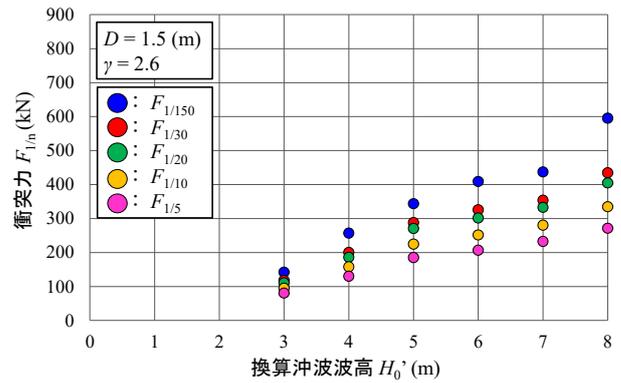


図-11 衝突力と換算沖波波高の関係

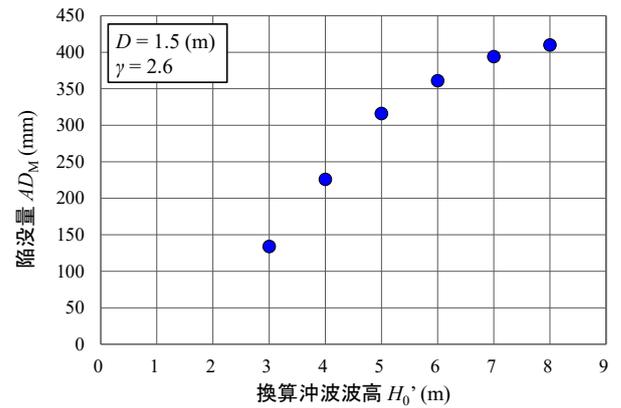


図-12 陥没量と換算沖波波高の関係

5. 護岸壁の陥没量に関する検討

(1) 陥没量の算定法

実験によって求められた衝突力を用いて、作用した波浪によって護岸壁で生ずる陥没量の推定を行う。運動量保存則を用いることにより、巨石の衝突力を $F(\text{N})$ とすると、質量 $M(\text{kg})$ の巨石の移動速度 $V(\text{m/s})$ は、以下の式で求めることができる。

$$V = \frac{0.5 \times F \times \Delta t}{M} \quad (2)$$

ここで、衝突力の時間波形を三角形で近似し、衝突力の継続時間を $\Delta t(\text{s})$ とする。1波群150波中の上位30波の大きい方から i 番目の波における巨石の移動速度を V_i とすると、巨石の衝突による累積衝突エネルギー $E_R(\text{J})$ は、以下の式で求めることができる。

$$E_R = \frac{1}{2} M \cdot \sum_{i=1}^{30} V_i^2 \quad (3)$$

コンクリートの衝撃磨耗に関しては、豊福ら¹¹⁾が室内

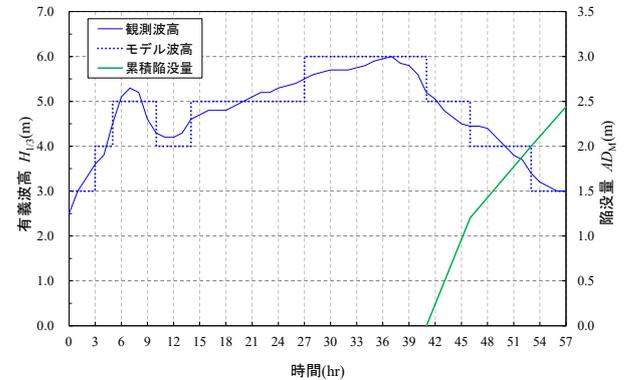


図-13 有義波高と陥没量の時間変化

実験で鉄球を自由落下させることによってコンクリートの陥没を再現し、以下に示す陥没量 $AD_M(\text{mm})$ の算定式を提案している。

$$AD_M = \beta \sqrt{E_R} \quad (4)$$

ここで、 β はすりへり速度係数で、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 $24 \sim 50 (\text{N/mm}^2)$ に対しては $\beta = 0.33$ が推奨されている。

図-12には、図-11に示した衝突力から、式(2)~(4)を用いて計算した1波群150波による陥没量と換算沖波波高

H_0' の関係を示している。陥没量は $H_0'=3\sim 5\text{ m}$ では直線的に増加するのに対し、 $H_0'=6\sim 8\text{ m}$ では頭打ちになる傾向がある。その要因としては、ある程度波高が大きくなると護岸前面で砕波するため衝突回数が頭打ちになると考えられる。

(2) 陥没量の試算結果

現地においては、前出の図-1 に示した波浪が作用することにより、消波ブロックの流失が発生したと考えられている。西谷ら⁴⁾は、当該施設の消波ブロックの変状に関する再現実験を行い、 $H_0'=3.0\text{ m}$ 以上でブロックの流出が始まり、41 時間経過時に全体の半数の消波ブロックが沖側に移動し、護岸壁の前面が露出したことを確認している。このことから、現地においては波浪作用後 41 時間経過後に、沖側に移動したブロックと護岸壁との間に捕捉された巨石や破損ブロック塊が護岸壁への衝突を開始したと仮定した。

現地の護岸壁 P_2 前面における巨石の質量 M を 4600kg (直径 1.5m 比重 2.6) とした場合の陥没量の推移を図-13 に示す。水理模型実験は波高を 1 m 刻みで変化させため、これを直線近似することにより簡易モデル化し、有義波高の時間変化に対応した陥没量を求めた。

前出の図-11 より衝突力を読み取り、(2)式および(3)式から累積衝突エネルギーを算出し、(4)式より 1 時間毎の陥没量を計測した後、累積陥没量を算出した。その結果、波浪作用後の最終陥没量は 2.44m となり、現地の護岸壁 P_2 における陥没量 2.50m と概ね一致している。

6. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) K 港における 2009 年 12 月 31 日から 2010 年 1 月 2 日に高波浪が来襲した際の被災状況を分析し、護岸壁の陥没被害の発生状況と、護岸背後のエプロン上に落下した巨石やコンクリート塊の大きさや散乱状況を示した。
- (2) 実験値における水塊の打ち上げ高さ R_{\max} は、合田の砕波指標から求めた最大波高 H_{\max} を 2.5 倍に補正することで、概ね一致することを示した。さらに無次元化した球体打ち上げ高さ A_{\max}/R_{\max} に及ぼす直径と比重の影響を明らかにした。
- (4) 実験で得られた波圧は、合田式から求めた波圧の計算値に概ね一致することを示した。また、護岸壁には、波力と同程度の衝突力が作用していることを明らかにした。
- (5) 現地における被災時の波高に対して、直径 1.5m の巨石の衝突による護岸壁の陥没量は 2.44m となり、現地

の護岸壁 P_2 における陥没量 2.50m と概ね一致していることを示した。

本研究では、現地における巨石やコンクリート塊の打ち上げ特性および護岸壁への衝突特性を明らかにした。今後は、直径の異なる場合や混合粒径の場合などを想定した実験を行い、被害対策の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による助成を受けて実施された。ここに謝意を表す。

REFERENCES

- 1) 阿部翔太, 木村克俊, 越智聖志, 上久保勝美, 名越隆雄: 道路護岸における越波に伴う粗石の打ち上げの再現実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 71 号, B-67, 2015. [Abe, S., Kimura, K., Ochi, M., Kamikubo, K. and Nakoshi, T.: Hydraulic model tests on boulder run-up by wave overtopping on a coastal road, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers(Hokkaido)*, Vol.71, B-67, 2015.]
- 2) 名越隆雄, 木村克俊, 嶋崎皓輝, 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), Vol.75, No.2, pp.I_815-I_820, 2019. [Nakoshi, T., Kimura, K., Shimazaki, K., Murakami, Y. and Murata, Y.: Analysis of wave-induced abrasion of a slit type seawall constructed on a rocky coast, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol. 75, No.2, pp.I_815-I_820, 2019.]
- 3) 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. [Koseki, N., Kimura, K., Nakoshi, T., Shimazaki, K. and Murata, Y.: Abrasion damage of block masonry seawall on gravel coast due to wave action, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.76, No.2, pp.I_576-I_581, 2020.]
- 4) 西谷尚峻, 木村克俊, 阿部翔太, 山本泰司: 急勾配海底条件下の消波護岸の高波被害とその対策に関する検討, 土木学会第 78 回年次学術講演会講演集, 2023 (投稿中). [Nishiya, N., Kimura, K., Abe, S. and Yamamoto, Y.: Damage patterns of block mound seawalls due to high Waves for steep foreshore conditions, *78th Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers, 2023 (Now Submitting).*]
- 5) 佐藤涼祐, 木村克俊, 横道立樹, 名越隆雄: 急斜面に続くリーフ上の消波護岸の高波被害事例の分析, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.74, No.2, pp.I_31-I_36, 2018. [Sato, R., Kimura, K., Yokomichi, T. and Nakoshi, T.: Damage patterns of the block mound seawall on a reef with steep foreshore conditions due to storm waves, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.74, No.2, pp.I_31-I_36, 2018]
- 6) 合田良実: 浅海域における波浪の砕波変形, 港湾技術研究所報告, 第 14 巻 第 3 号, pp.59-106, 1975. [Goda, Y.: Deformation of irregular waves due to depth-controlled wave breaking, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.14, No.3, pp.59-106, 1975.]
- 7) 神田魁斗, 木村克俊, 関口卓也, 阿部翔太, 名越隆雄: 海岸道路における粗石を連行した越波による車両被害事例

- の分析, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.76, No.2, pp.I_971-I_976, 2020. [Kanda, K., Kimura, K., Sekiguchi, T., Abe, S. and Nakoshi, T. : Analysis of vehicle damage due to wave overtopping with rubble stones on coastal roads, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol. 76, No.2, pp.I_971-I_976, 2020.]
- 8) 今井脩雅, 木村克俊, 宮武 誠, 山本泰司, 名越隆雄, 阿部翔太: 波浪による転動石の鋼製栈橋への衝突の再現実験, 土木学会論文集 B3(海洋開発), Vol.77, No.2, pp.I_229-I_234, 2021. [Imai, Y., Kimura, K., Miyatake, M., Yamamoto, Y., Nakoshi, T. and Abe, S. : Analysis on damage of rubber protectors for steel platform due to collision of rubble stones activated by wave action, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)*, Vol.77, No.2, pp.I_229-I_234, 2021.]
- 9) 合田良実: 防波堤の設計波圧に関する研究, 港湾技術研究所報告 Vol.12, No.3, pp.31-69, 1973. [Goda, Y. : A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwaters, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.12, No.3, pp.31-69, 1973]
- 10) 高橋重雄, 谷本勝利, 下迫健一郎, 細山田得三: 混成防波堤のマウンド形状による衝撃砕波力係数の提案, 海岸工学論文集, 第39巻, pp.676-680, 1992. [Takahashi, S., Tanimoto, K., Shimosako, K. : A proposal of shocking wave force coefficient for composite breakwater with mound, *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, Vol.39, pp.676-680, 1992.]
- 11) 豊福俊泰, 永松武則, 鶴窪廣洋, 豊福俊英, 中山慎也: 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E2(材料・コンクリート構造), Vol.72, No.4, pp.380-399, 2016. [Toyofuku, T., Nagamatsu, T., Tsurukubo, H., Toyofuku, T. and Nakayama, S. : Studies on progress estimation method of abrasion depth of concrete structures, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2 (Materials and Concrete Structures)*, Vol. 72, No.4, pp.380-399, 2016]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

HYDRAULIC MODEL TESTS ON SEAWALL DAMAGES DUE TO WAVE ACTION WITH BOULDERS

Shota ABE, Katsutoshi KIMURA and Naoya KAMOZAKI

At the seawall of Port K under steep seabed conditions, the vertical wall was subsided due to the collision of boulders activated by the waves, and the pavement behind the seawall was damaged due to the boulders with overtopping waves. In this study, hydraulic model tests with irregular waves in a scale of 1/50 were conducted to clarify the characteristics of boulders activated by wave action that caused such damages. The relationship between equivalent offshore wave height and boulder run-up height was obtained by changing the diameter and specific gravity of a sphere model imitating boulders. Since the run-up height of the sphere has a correlation with the run-up height of the overtopping water mass, the relationship between the ratio of the two and the equivalent offshore wave height was shown. The collision forces of a sphere rolled by waves were measured by dynamometer, and the relationship between the irregular representative value and the equivalent offshore wave force was obtained. Furthermore, for the wave conditions at the time of the disaster, the amount of subsidence was calculated by obtaining the impact energy from the impact force of the sphere.