

浅海域に設置される複数の材料から 構成された捨石堤への被災度解析の適用

高橋 研也¹・田中 仁²・西畑 剛³

¹ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: kenya.takahashi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

² フェロー会員 東北大学教養教育院 (〒980-8576 宮城県仙台市青葉区川内 41)
E-mail: hitoshi.tanaka.b7@tohoku.ac.jp

³ 正会員 五洋建設(株) 技術研究所土木技術開発部 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1)
E-mail: takeshi.nishihata@mail.penta-ocean.co.jp

砕波帯内から汀線の陸側に至る浅海域に設置される、複数の材料から構成された捨石堤および傾斜堤を対象にした水理模型実験を実施して、作用波数と各構造物の被災度の変化傾向を把握した。汀線の陸側に設置される捨石堤として鉛直に多段積みしたかごマットによる土留め構造を、汀線の海側に設置される捨石堤としてバットレス型消波構造物を、砕波帯内に設置される傾斜堤として消波ブロック 1 層被覆式傾斜堤を対象とした。造波前後に堤体模型を写真撮影し、SfM 解析により被災度を評価した。各々の材料の安定数を算出して被災履歴を考慮したモンテカルロシミュレーションにより現地条件での期待被災度を評価した結果、複数の材料から構成された捨石堤構造では、各々の材料の安定数を算出して最適な維持管理計画を作成する必要があることが示唆された。

Key Words : rubble mound breakwater, several materials, shallow water area, stability number, relative damage level

1. はじめに

近年、海崖侵食対策工や津波浸水防止対策工として汀線の陸側に直立型の防波壁¹⁾が設置されたり、外洋に面した海上橋脚に対して耐震補強工事²⁾が計画されたりすることが増えてきている。これらのような海岸施設・構造物施工時においては、施工ヤードの被災リスクの低減および施工性の向上を行うことが課題として挙げられることがほとんどであり、作用波浪が低減された所望の作業空間を確保するとともに、当該作業空間に供する重機などの足場を海上に確保することが求められる。一般的には、陸から捨石を巻き出しながら等脚台形マウンド(捨石堤)を築造することが多いが、法面を有するために重機足場が当該作業空間から離れた位置となり作業半径が大きくなるとともに、水深が大きくなれば大量の材料および労力を要するという短所もある³⁾。

また、港湾における外郭施設である防波堤として、砕波帯内などの水深が比較的浅い位置においては石やコンクリートブロックを台形状に捨て込んだ構造形式である傾斜堤が用いられることもあるが、こちらも陸から捨石を巻き出しながら施工する場合が多く、天端幅は性能照査上必要な十分な幅であるほか、施工のしやすさ、すな

わち、施工および完成後の維持管理において使用される重機足場としての幅を考慮して決められている⁴⁾。したがって、たとえ既設の傾斜堤が高波浪などによって被災したとしても、安易に天端高をかき上げしたりパラペットなどを設置したりして天端幅を狭くするべきではなく、有効港口幅および航路幅を確保するためには法面形状を改良することも容易ではないことも相まって、石やコンクリートブロックが散乱した侵食部に不足数量分を補充することによる原形復旧を前提とした修繕工事に止まることが多い。

一方、近年の異常気象や台風の大型化に伴い、沿岸部で高波浪の来襲頻度が高まっていると言われており⁵⁾⁶⁾、仮設構造物としての捨石堤や防波堤としての傾斜堤の被災がますます頻繁に発生している。捨石堤は波によって石の散乱が起りやすいことに留意する必要があるが、ある程度変形を許容することも考えられるが、高波浪による作業中断に加えて被災後の原形復旧などがあると大きな手戻りとなり、工費および工期の面から多大なコストが掛かる⁷⁾⁸⁾。また、傾斜堤についても、安定性に関する設計手法が確立されていない港内側被覆ブロックが被災するなど、これまであまり見られなかった被災事例が散見されるようになってきている⁹⁾。今後においては同様の

被害の発生頻度が高まってくるものと考えられ、施設の健全性の悪化および復旧・修繕コストの増加が懸念されるため、来襲する高波浪への対策として、施設の機能の維持および復旧・修繕コストの合理化を目的とした最適な維持管理方法の検討を行う必要がある。

このような背景に鑑み、本研究においては、これらの構造物を対象にした水理模型実験を実施して、作用波数と各構造物の被災度の変化傾向を把握し、それらに基づいた被災度予測解析を試みた。

2. 研究方法

前章で述べた通り、本研究においては砕波帯内から汀線の陸側に至る浅海域に設置される、複数の材料から構成された捨石堤および傾斜堤を対象とした。浅海域においては水深変化に伴って波速が場所的に変化するために波の屈折現象が生じ、水深が浅くなるに従って波の進行方向が等深線に直交するように変化すると同時に波高も変化するため、本研究においては捨石堤法線直角方向から設計波クラスの高波浪を単一方向不規則波として作用させる断面2次元の水理模型実験を行った。

実験に用いた水路は長さ50.0m、幅0.6m、高さ1.2mの還流装置付きの不規則波造波水路である。水路の一端には反射波吸収式造波装置が設置されており、実験中の堤体からの反射波による水路内での多重反射の影響を最小限にとどめた実験を行った。また、水路の一部の壁がガラス面となっており、実験状況を側面および上面からビデオカメラにより撮影するとともに、造波前後における堤体の変形状況を詳細に写真撮影した。実験波は、我が国沿岸における風波のスペクトルの標準形である修正Bretschneider・光易型スペクトルを有する単一方向不規則波とし、水路内の波が安定してから少なくとも200波以上の波群を5回以上繰り返し作用させ、被災しても模型を組み直すことはせずに実験を継続した。容量式波高計を水路内に適宜配置して水位変動を計測しながら水理模型実験を行った。なお、本研究においては、既存の異形ブロック模型の重量に合わせて実験縮尺 λ をFroudeの相似則に従って決定した。

3. 汀線の陸側にある直立壁前面に設置される捨石堤構造

(1) 構造の概要

1章でも述べた通り、近年、海崖侵食対策工や津波浸水防止対策工として汀線の陸側に直立型の防波壁が設置

されることが増えてきている。本章においては、図-1に示すように、このような防波壁施工時に施工ヤードの直前面の汀線上に築造される仮設構造物としての捨石堤（等脚台形マウンド）を、鉛直に多段積みしたかごマットによる土留め構造としたもの¹⁰⁾を対象とする。本構造は捨石による主働土圧および重機足場としての施工時上載荷重に対してかごマット間およびかごマットと海底面の摩擦力により抵抗し、水平波力に対して捨石による受働土圧により抵抗するとしたものであり、側面が鉛直に切り立つために等脚台形マウンドよりも材料費を削減できる。また、かごマットにより堤体内部の捨石が保護されるとともに、たとえ捨石が散乱してもかごマットにより捕捉されるために原形復旧が容易となる。しかしながら、鉛直の多段積タイプの耐波浪安定性は示されておらず、本タイプについては新たに検討を加える必要がある。

(2) 水理模型実験

1/30の一樣勾配模型を2次元造波水路内に設置し、法先を約1/10の一樣勾配斜面で水路床に摺り付け、造波水深を63.5cmとした。縮尺 $\lambda=1/50.0$ として、波浪条件は換算沖波波高 $H_0'=7.5\text{ cm}$ 、沖波周期 $T_0=2.12\text{ s}$ の1種類とした。現地海岸における不陸整正を想定して袋型根固め材もモデル化し、捨石堤模型の天端高や堤体幅は重機施工時を想定した。碎石には比重が2.60のものを選定し、捨石およびかごマットの中詰材の模型には6号碎石（単粒度碎石13-5mm）を、袋型根固め材の中詰材の模型には7号碎石（単粒度碎石5-2.5mm）を使用した。

(3) 結果および考察

図-2に捨石堤模型の被災過程を示す。ここに、 N は波数であり、造波時間を堤前における平均周期で除すことによって算出している。これらは造波終了後に撮影した複数枚の実験模型写真を使用して Agisoft MetaShape Professional Version 1.7.1 による SfM (Structure from Motion) 解析により生成したオルソモザイクと、同様の方法により生成した造波前後の DEM (Digital Elevation Model) データの差分により表わされる捨石堤模型表面の断面変化量分布である。

波数 N の累積に伴って海側の碎石が陸側へ徐々に打上

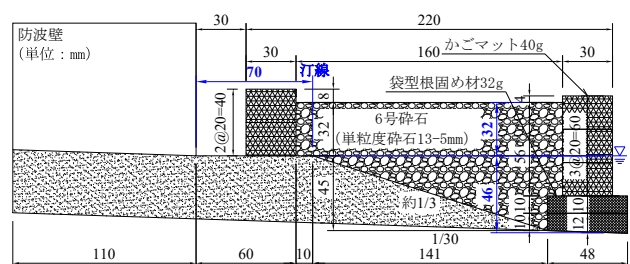


図-1 防波壁模型および捨石堤模型断面図($\lambda=1/50.0$)

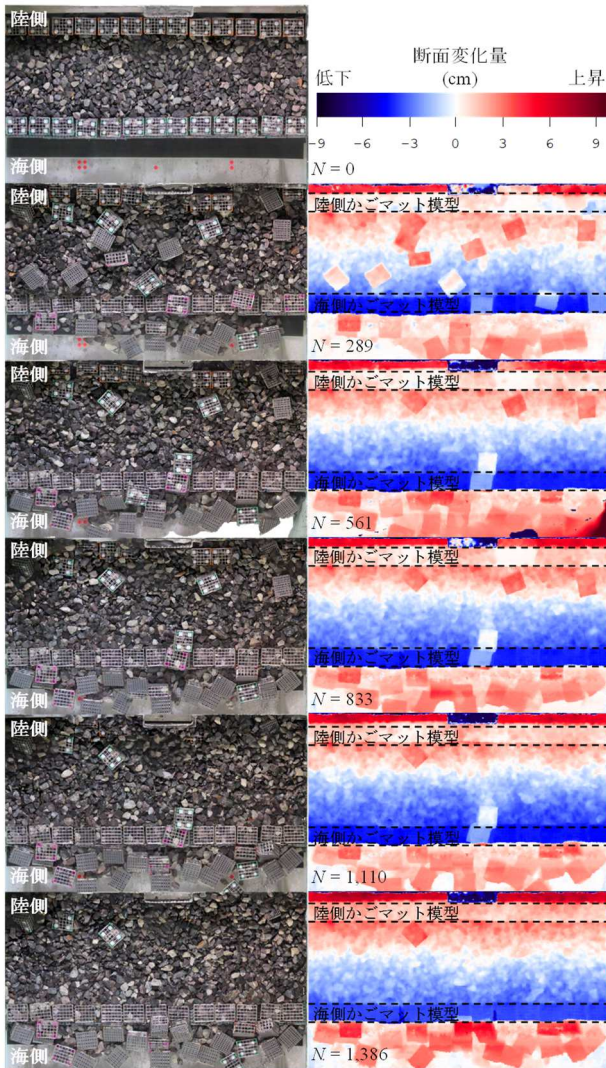


図-2 捨石堤模型の被災過程($\lambda = 1/50.0$)

げられており、海側かごマット模型の最上段において碎石による受働土圧が期待できなくなった時点で陸側へ滑動・転倒していることが読み取れる。さらに、最初に陸側へ打上げられた海側かごマット模型が強い引き波によって海側に移動、転落している。なお、海側かごマット模型が1個でも破堤すると、そこが水みち(弱点)となってさらに碎石が洗掘されて被害が進行するという破壊モードであった。また、堤前水深を30, 20 mmと浅くしたケースも実施したところ、被害の程度は堤前水深が深く堤前波高が高いほど大きくなっていった。一方、陸側かごマット模型は背後に支えがないために被害が一気に進行するが、防波壁模型に滑動をせき止められるとともに碎石が海側から徐々に打上げられてくるため、実際にはあまり問題にならないものと考えられる。

図-3に碎石およびかごマット模型の安定数 N_S を示す。高橋ほか¹¹⁾によれば、消波工の変形は波作用開始直後に大きく時間の経過とともに落ちつく傾向があるとされており、近似的には波の継続時間の1/2乗に比例するとされている。これを参考にして、横軸として $N_0/N^{0.5}$ を、縦

□ 碎石 ◇ 陸側かごマット模型 △ 海側かごマット模型

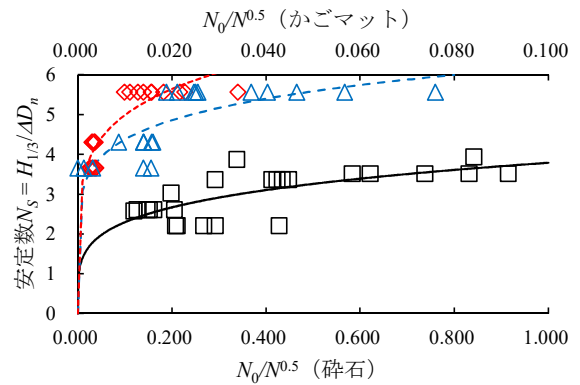


図-3 碎石およびかごマット模型の安定数 N_S

軸として安定数 $N_S = H_{1/3}/\Delta D_n$ をとって実験データを再整理したものである。ここに、 $H_{1/3}$ は有義波高、 $\Delta = S_r - 1$ 、 S_r は捨石またはコンクリートブロックの水に対する比重である。被災度 N_0 は被害の程度を表す被害率の一種であり、堤法線方向の幅 D_n の範囲における移動した模型個数である。 D_n は模型の代表径であり、次の式(1)で示される。

$$D_n = V^{1/3} = (M/\rho_r)^{1/3} \quad (1)$$

ここに、 M は捨石またはコンクリートブロックの質量、 ρ_r は個体の密度、 V は個体の体積である。移動個数としてカウントする方法は平石¹²⁾にならない、元にあった位置から完全に移動したものや回転して跳んだものは1個とカウントし、少し移動したり回転したりしたものの元の位置にあるものを0.5個とカウントした。これに水路幅0.6 mを考慮することによって被災度 N_0 を算出した。なお、碎石の移動個数のカウントは困難であるため、次の式(2)によって碎石の被災度 N_0 を得た。

$$N_0 = \frac{A_0(1 - \gamma_v)D_n}{V} \quad (2)$$

ここに、 A_0 は碎石の欠損断面積であり図-2に示した碎石表面の断面変化量分布から求まる欠損体積を水路幅0.6 mで除したものの、 γ_v は碎石の空隙率である。

この実験データから、以下に示される式を新しい安定数 N_S の算定式として提案する。

- 碎石

$$N_S = 3.79(N_0/N^{0.5})^{0.2} \quad (3)$$

- 陸側かごマット模型

$$N_S = 11.30(N_0/N^{0.5})^{0.2} \quad (4)$$

- 海側かごマット模型

$$N_S = 8.80(N_0/N^{0.5})^{0.2} \quad (5)$$

なお、高橋ほか¹¹⁾においては、被害を全く許さないという考え方を行った場合(被災度 N_0 をゼロとした場合)にも材料の諸元が求められる形を考えて切片を求めているが、本研究においてはある程度変形を許容することも考えられる仮設構造物としての捨石堤を対象としているため切片をゼロとした。

4. 汀線の海側にある直立壁前面に設置される捨石堤構造

(1) 構造の概要

本章においては、汀線の海側に設置される捨石堤構造を対象とする。前章において対象としたような汀線上に設置する捨石堤の場合は、堤前水深が浅いためにかごマットを鉛直に多層積しても捨石からの主働土圧が小さく構造が成立するが、汀線の海側に設置する捨石堤の場合は、堤前水深が深くなるためにかごマットの段数がかさんで捨石からの主働土圧が大きくなり構造が不成立となる。

ここでは、図-4 に示すバットレス型消波構造物¹³⁾を対象とする。すなわち、L型壁構造であるバットレスを捨石堤内に埋設し、捨石の重量および摩擦力により滑動・転倒に対して安定させた土留め構造とすることで、捨石堤側面が鉛直に切り立ち重機足場を作業空間に近接した位置に築造することができるものである。

(2) 水理模型実験

2次元造波水路内に沖側で1/50、岸側で1/10の海底勾配模型を設置し、造波水深を78cmとした。沖波波形勾配 $H_0'/L_0 = 0.021 \sim 0.041$ の範囲で、縮尺 $\lambda = 1/29.2$ として換算沖波波高 $H_0' = 6.9 \sim 17.7$ cm および沖波周期 $T_0 = 1.43 \sim 1.66$ s の5ケースを設定した。消波ブロック模型の効果を確認するため、消波ブロック模型を設置しない状態でも実験した。

(3) 結果および考察

図-5 に消波ブロック模型および砕石の波数 N による実験断面変化を示す。ここに、横軸はバットレス型消波構造物模型背後にある直立壁前面を原点としている。消波ブロック模型および砕石の被災が進行してもバットレス模型に顕著な変位は生じなかった。静水面付近に位置する法肩が侵食されて消波ブロック模型と砕石が海側に崩れる、いわゆるS字型断面に変形する破壊モードとなった。図中には短期的な施工時荷重の作用に対する円弧すべり解析による最小安全率 1.591 であるすべり円も参考までに示しており、破壊線はこれとたまたまではあるもののおおそ一致した。消波ブロック模型が設置されていないケースにおける砕石の破壊モードは設置されているケースのものと同じであったが、陸側へ打上げられた砕石がバットレス模型突出部に捕捉されて被災の進行が抑制されていた。したがって、たとえバットレス型消波構造物の捨石が散乱してもバットレスは安定性を損なわず、捨石堤の原形復旧が容易であると言える。

図-6 に消波ブロック模型および砕石の安定数 N_S を示

す。この実験データから、以下に示される式を新しい安定数 N_S の算定式として提案する。

- 消波ブロック模型

$$N_S = 2.89(N_0/N^{0.5})^{0.2} \quad (6)$$

- 砕石

$$N_S = 4.57(N_0/N^{0.5})^{0.2} \quad (7)$$

- 砕石 (消波ブロック模型なし)

$$N_S = 3.67(N_0/N^{0.5})^{0.11} \quad (8)$$

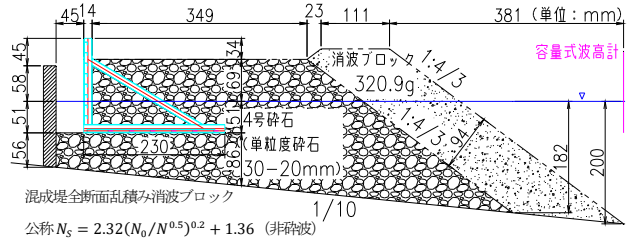
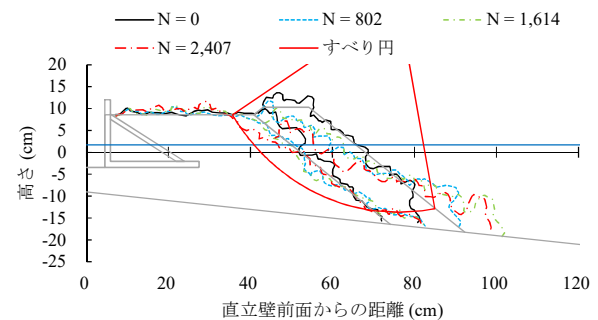
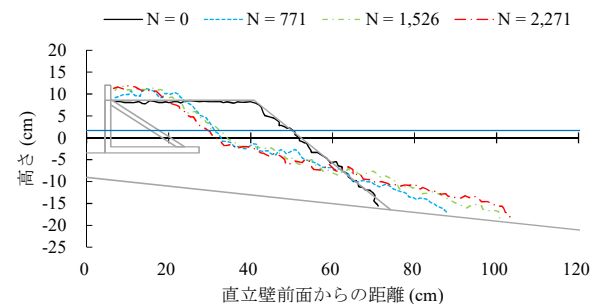


図-4 バットレス型消波構造物模型断面図($\lambda = 1/29.2$)



(a) 消波ブロック模型あり ($H_0' = 17.7$ cm, $T_0 = 1.66$ s, $H_0'/L_0 = 0.041$)



(b) 消波ブロック模型なし ($H_0' = 17.7$ cm, $T_0 = 1.66$ s, $H_0'/L_0 = 0.041$)

図-5 消波ブロック模型と砕石の波数 N による実験断面変化

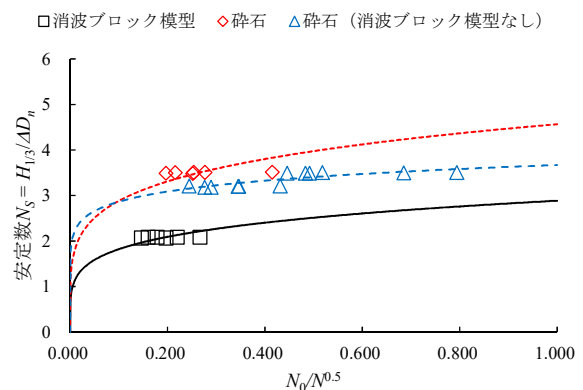


図-6 消波ブロック模型および砕石の安定数 N_S

5. 砕波帯内に設置される捨石傾斜堤

(1) 構造の概要

前章までにおいては、汀線近傍の領域に築造される仮設構造物としての捨石堤（等脚台形マウンド）の法面を鉛直に切り立たせる構造を対象としてきた。しかし、水深が大きくなれば大量の材料および労力を要するという短所もあり³⁾、その適用範囲はやはり汀線近傍に限られると思われる。一方、港湾における外郭施設である防波堤として、砕波帯内などの水深が比較的浅い位置においては石やコンクリートブロックを台形状に捨て込んだ構造形式である傾斜堤が用いられることもあるが、我が国

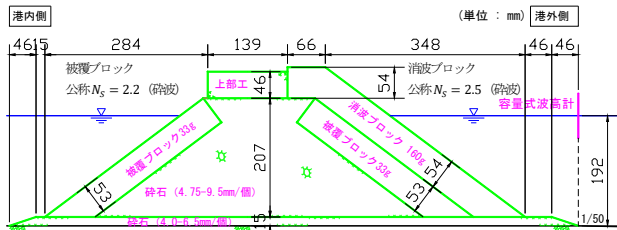


図-7 消波ブロック1層被覆式傾斜堤模型断面図($\lambda=1/64.8$)

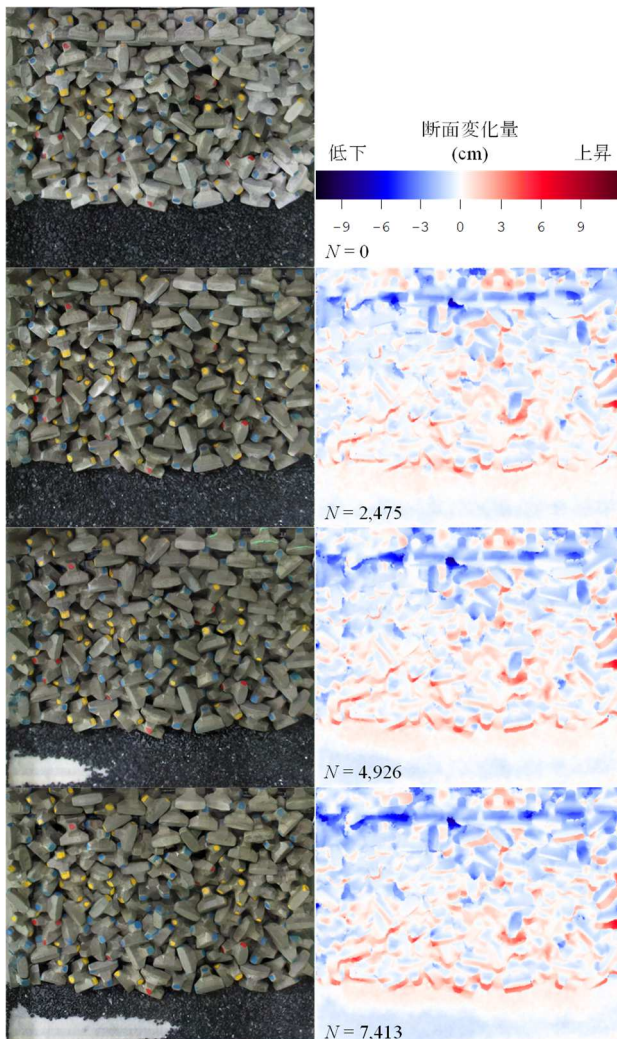


図-8 港外側消波ブロックの被災過程($H_0' = 14.3$ cm, $T_0 = 1.99$ s)

においては混成堤などと比較して適用事例が少なく、維持管理や被災後の修繕に当たっては原形復旧が基本となっている。そこで、本章においては、傾斜堤の代表例として消波ブロック1層被覆式傾斜堤¹⁴⁾を取り上げる。

(2) 水理模型実験

2次元造波水路内に海底勾配1/50の斜面を設け、図-7に示す消波ブロック1層被覆式傾斜堤模型を設置した。縮尺 $\lambda=1/64.8$ にて消波ブロックを160 g、被覆ブロックを33 gのモルタル製模型（比重2.3）とし、被覆ブロック模型に関しては施工実態に合うように静水面以下を二層乱積、以上を二層整積として模型を設置した。

波浪条件については防波堤の設計波（換算沖波波高 $H_0' = 13.7$ cm、有義波高 $H_{1/3} = 12.6$ cm、有義波周期 $T_{1/3} = 1.99$ s）を基本として波高を上下させた5 ケースを設定した。

(3) 結果および考察

図-8に港外側消波ブロック模型の波数 N による断面変化を示す。ブロック模型の顕著な移動や散乱は見られな

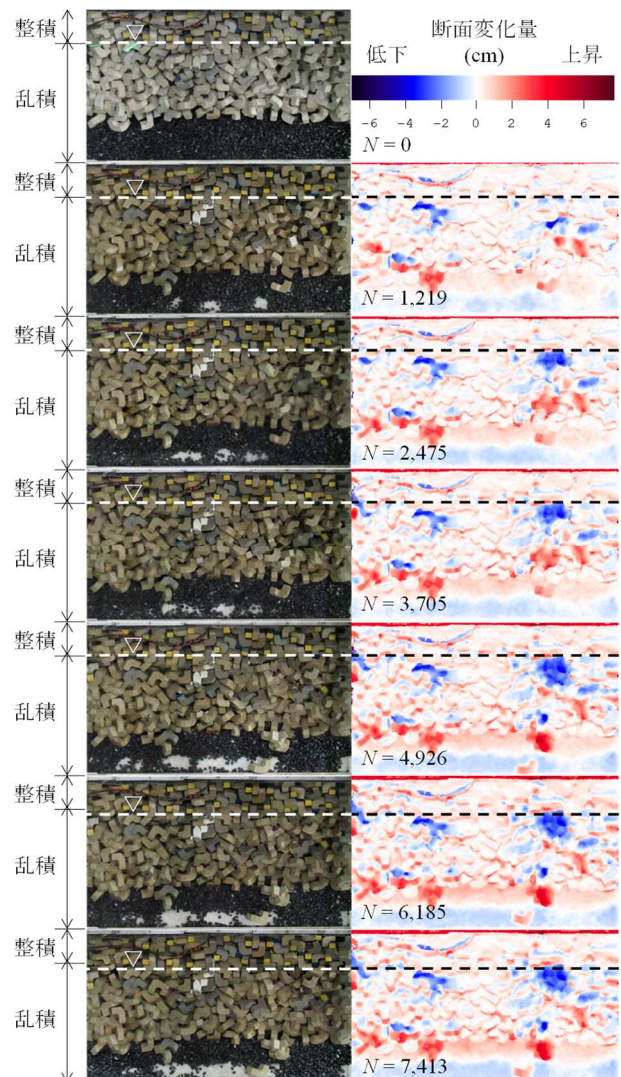


図-9 港内側被覆ブロックの被災過程($H_0' = 14.3$ cm, $T_0 = 1.99$ s)

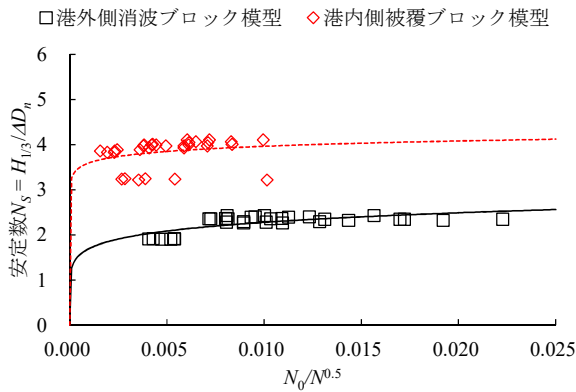


図-10 港外側消波ブロックと港内側被覆ブロックの安定数 N_S

いが、上部工模型および基礎砕石がやや港内側へ変位することで静水面付近において全体的な沈下が認められる。

図-9に港内側被覆ブロック模型の波数 N による断面変化を示す。静水面以上の整積部は被災しなかった一方で、それ以下の乱積部上端に被災が集中して法先に被覆ブロック模型が脱落したことが分かる。

図-10に港外側消波ブロック模型と港内側被覆ブロック模型の安定数 N_S を示す。この実験データから、以下に示される式を新しい安定数 N_S の算定式として提案する。

- 港外側消波ブロック模型

$$N_S = 4.11(N_0/N^{0.5})^{0.13} \quad (9)$$

- 港内側被覆ブロック模型

$$N_S = 4.81(N_0/N^{0.5})^{0.04} \quad (10)$$

6. 捨石堤の維持管理に向けた被災度解析の適用性

(1) 解析方法

1 回の高波浪に対する各種材料の被災度 N_0 は式(3)~(10)によって求めることができる。しかし、材料の被災度 N_0 の進行を予測するに当たっては、主要外力である波浪の統計的変動性や各種条件の不確定要因を考慮する必要がある。そこで、本章においては、高橋ほか¹¹⁾と同様に被災の履歴を考慮したモンテカルロシミュレーションにより期待被災度を算出することとした。

(2) 解析条件

高波浪の出現回数と極大波高の算定は、沖波の高波浪の極値統計分布 (Weibull 分布, $k=1.40, A=1.69, B=5.08$) から年 1 波を抽出することとし、その出現確率や堤体前面の波浪諸元推定のための波浪変形に対しては、長尾¹⁵⁾に従って考慮することとした。なお、被災度の増分のばらつきについては、高橋ほか¹¹⁾が検討している被災度の増分 ΔN_0 (平均値) とその時の標準偏差 $\sigma_{\Delta N_0}$ の関係を準用

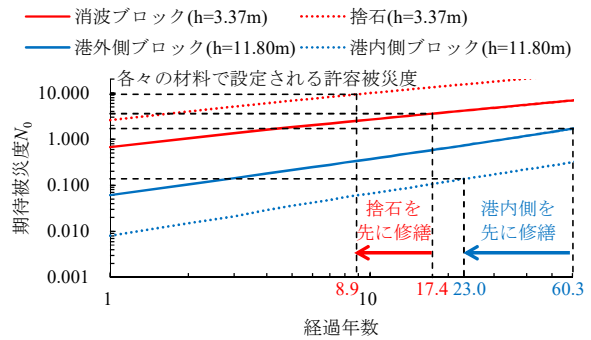


図-11 被災度解析に基づく経過年数ごとの期待被災度 N_0

した。波数は $N = 1,000$ とし、繰返計算回数を 10,000 回として 100 年間の期待被災度を計算した。乱数は Mersenne Twister により発生させた。解析ケースはバットレス型消波構造物 (設置水深 $h = 3.37$ m) および傾斜堤 (設置水深 $h = 11.80$ m) とし、海底勾配は 1/50 とした。

(3) 解析結果

図-11 にバットレス型消波構造物および傾斜堤の被災度解析に基づく経過年数ごとの期待被災度 N_0 を示す。これまでは、バットレス型消波構造物は消波ブロックのみ、傾斜堤は港外側消波ブロックのみに着目して設計および維持管理がなされてきたが、本研究において提案した新たな安定数算定式を考慮すると捨石および港内側被覆ブロックの方が許容被災度を超える年数が早くなることも考えられ、複数の材料から構成される複合構造物の場合は、各々の材料の被災度についても確認しながら最適な維持管理計画を作成する必要があるものと考えられる。

7. 結論

汀線の陸側に設置される捨石堤として、鉛直に多段積みしたかごマットによる土留め構造を対象とした。海側の砕石が陸側へ打上げられて、最上段の海側かごマット模型が砕石による支えを期待できなくなり陸側へ滑動・転動した。また、汀線の海側に設置される捨石堤として、バットレス型消波構造物を対象とした。静水面付近に位置する法肩が侵食されて消波ブロック模型と砕石が海側に崩れる、いわゆる S 字型断面に変形する破壊モードとなり、破壊線は円弧すべり解析によるすべり円と一致した。さらに、消波ブロック 1 層被覆式傾斜堤を対象とし、上記捨石堤と併せ新しい安定数 N_S の算定式を提案した。

以上の安定数 N_S を用いて被災履歴を考慮したモンテカルロシミュレーションにより現地条件での期待被災度 N_0 を算出した。ただし、実験を行った 3 構造形式とも、単一の天端高で検討しているため、これが安定数 N_S の結果に影響する可能性があることに注意が必要である。

REFERENCES

- 1) 黒澤亘, 真田修, 増井大: 海岸汀線部における消波ブロック等護岸工事, 土木建設技術発表会概要集, pp. 264-271, 2012. [Kurosawa, W., Sanada, O. and Masui, D.: Kaigan-teisenbu niokeru shoha-block-tou gogan-kouji, *Doboku-kensetsu-gijyutsu-happyoukai Gaiyoshu*, pp. 264-271, 2012.]
- 2) 田口薫, 下岡英智, 塩野智也, 吉保範明, 増田兼士: 鋼製止水函体(NDR)を用いた親不知海岸高架橋の耐震補強工事, 橋梁と基礎, 第54巻, 第7号, pp. 30-36, 2020. [Taguchi, K., Shimooka, H., Shiono, T., Yoshiho, N. and Masuda, K.: Aseismic reinforcing work by NDR of the Oyashirazu coastal viaduct, *Bridge and Foundation Engineering*, Vol. 54, No. 7, pp. 30-36, 2020.]
- 3) 社団法人電力土木技術協会: 火力・原子力発電所土木構造物の設計—増補改訂版—, 1102p., 1995. [Japan Electric Power Civil Engineering Association: *Karyokugenshiryoku-hatsudensyo Doboku-kouzoubutsu-no-sekkei, Zouho-kaiteiban*, 1102p., 1995.]
- 4) 国土交通省港湾局監修: 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2218p., 公益社団法人日本港湾協会, 2018. [Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, Ports and Harbours Bureau: *Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan*, 2218p., The Ports & Harbours Association of Japan, 2018.]
- 5) 関克己, 河合弘泰, 佐藤真: 日本沿岸の季節別波浪特性の経年変化, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 67, No. 2, pp. I_1-I_6, 2011. [Seki, K., Kawai, H. and Sato, M.: Long-term variability of wave characteristics around the Japanese coasts, *Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean*, Vol. 27 (Special Feature), pp. I_1-I_6, 2011.]
- 6) 関克己, 河合弘泰, 佐藤真, 川口浩二: 全国港湾海洋波浪観測長期データに基づく日本沿岸の季節別波浪特性の経年変化, 港湾空港技術研究所資料, No. 1241, 27p., 2011. [Seki, K., Kawai, H., Satoh, M. and Kawaguchi, K.: Long-term trend in seasonal wave characteristics on Japanese coast based on NOWPHAS data, *Technical Note of the Port and Airport Research Institute*, No. 1241, 27p., 2011.]
- 7) 坂本香, 前田昇, 木村広幸: 橋梁の波浪対策工事—北陸自動車道・親不知海岸高架橋—, 土木施工, 第45巻, 第2号, pp. 82-86, 2004. [Sakamoto, K., Maeda, N. and Kimura, H.: Kyouryou no harou-taisaku-kouji, *Hokuriku-jidousyadou Oyashirazu-kaigan-koukakyou, Civil Engineering Journal*, Vol. 45, No. 2, pp. 82-86, 2004.]
- 8) 酒井大樹, 辻本剛三: 捨石堤の被災過程を再現する簡易的数値解析手法, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 77, No. 2, pp. I_247-I_252, 2021. [Sakai, D. and Tsujimoto, G.: The simple numerical analysis for reproducing the damage process of rubble mound, *Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean*, Vol. 37, pp. I_247-I_252, 2021.]
- 9) 熊田広幸, 佐藤英樹, 寺嶋修平: 東通原子力発電所ドローンを活用した発電所港湾構造物の調査, 電力土木, No. 401, pp. 47-50, 2019. [Kumata, H., Sato, H. and Terashima, S.: Higashi-dori-genshiryoku-hatsudensyo drone wo katsuyou-shita hatsudensyo-kouwan-kouzoubutsu no tyousa, *Electric Power Civil Engineering*, No. 401, pp. 47-50, 2019.]
- 10) 高橋研也, 相馬裕, 石井敏雅, 西畑剛, 道前武尊, 横島隆広: 汀線の陸側にある防波壁に作用する砕波後の不規則波圧に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 74, No. 2, pp. I_1063-I_1068, 2018. [Takahashi, K., Souma, Y., Ishii, T., Nishihata, T., Michimae, T. and Yokohata, T.: Experimental study on random wave pressure after wave breaking acting on seawall on land side of shoreline, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 74, No. 2, pp. I_1063-I_1068, 2018.]
- 11) 高橋重雄, 半沢稔, 佐藤弘和, 五明美智男, 下迫健一郎, 寺内潔, 高山知司, 谷本勝利: 期待被災度を考慮した消波ブロックの安定重量—消波ブロック被覆堤の設計法の再検討, 第1報—, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第1号, pp. 3-32, 1998. [Takahashi, S., Hanzawa, M., Sato, H., Gomyo, M., Shimosako, K., Terauchi, K., Takayama, T. and Tanimoto, K.: Lifetime damage estimation with a new stability formula for concrete blocks—Study on wave-dissipating concrete blocks covering horizontally composite breakwaters, the first rept.—, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol. 37, No. 1, pp. 3-32, 1998.]
- 12) 平石哲也: 蛇かごタイプの消波工の耐波安定性について, 京都大学防災研究所年報, 第58号, B, pp. 305-314, 2015. [Hiraishi, T.: Stability for waves of compacted rubble type wave dissipating block, *Annals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ.*, No. 58 B, pp. 305-314, 2015.]
- 13) 塩畑英俊, 宇山友理, 高橋研也, 西畑剛, 山下徹, 三好俊康, 林規夫, 大久保泰宏: バットレス型消波構造物の開発, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 74, No. 2, pp. I_49-I_54, 2018. [Shiohata, H., Uyama, T., Takahashi, K., Nishihata, T., Yamashita, T., Miyoshi, T., Hayashi, N. and Okubo, Y.: Development of wave absorbing breakwater using buttress, *Annual Journal of Civil Engineering in the Ocean*, Vol. 34, pp. I_49-I_54, 2018.]
- 14) 高橋研也, 佐貫宏, 菅原弘貴, 高土居剛, 中村友邦, 熊田広幸, 千葉直樹, 寺嶋修平, 田中仁: 消波ブロック1層被覆式傾斜堤の港内側被覆ブロックの耐波浪特性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 76, No. 2, pp. I_811-I_816, 2020. [Takahashi, K., Sanuki, H., Sugahara, H., Takadoi, G., Nakamura, T., Kumata, H., Chiba, N., Terashima, S. and Tanaka, H.: Experimental study on structural resistiveness against wave action of port side armor block of single layer wave dissipating concrete block covered sloping breakwater, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B2 (Coastal Engineering)*, Vol. 76, No. 2, pp. I_811-I_816, 2020.]
- 15) 長尾毅: ケーソン式防波堤の外的安定に関する信頼性設計法の適用, 土木学会論文集, No. 689, I-57, pp. 173-182, 2001. [Nagao, T.: Reliability based design way for caisson type breakwaters, *Doboku Gakkai Ronbunshu*, No. 689, I-57, pp. 173-182, 2001.]

(Received February 9, 2023)

(Accepted May 11, 2023)

APPLICATION OF RELATIVE DAMAGE LEVEL ANALYSIS METHOD TO RUBBLE MOUND BREAKWATER COMPOSED OF SEVERAL MATERIALS IN SHALLOW WATER AREA

Kenya TAKAHASHI, Hitoshi TANAKA and Takeshi NISHIHATA

In this study, a new rubble mound breakwater structure is proposed, which has a vertical cut on the side of the rubble mound breakwater as a temporary structure to be built on the sea during the construction of coastal facilities and structures. In addition, the structural resistiveness against wave action of the sloping breakwaters is clarified. Hydraulic model tests were carried out to determine the relative damage level of each structure depending on the wave number. Based on these results, I also studied the maintenance and management methods.

It is proposed that the rubble mound breakwater (isosceles trapezoid mound), which is a temporary structure constructed on the shoreline in front of the construction yard during the construction of upright coastal dikes, should be an earth retaining work made of vertically stacked basket mats. A new rubble mound breakwater structure that can be installed on the seaward side of the shoreline is also proposed. The L-Type buttresses are embedded in the rubble mound breakwater, and the weight and frictional resistance of the rubble stone stabilizes the structure against sliding and overturning. The structural resistiveness against wave action of sloping breakwaters, which are used as breakwaters in relatively shallow water such as in the surf zone, is examined. Based on these results, as a new attempt, new formulae for calculating the stability number of the materials used in these structures were proposed by evaluating the relative damage level using DEM (Digital Elevation Model) data.

Finally, the new formula for calculating the stability number proposed above is applied to the relative damage level analysis method. As a result, it was shown that it is necessary to calculate the stability number and predict the relative damage level for each material in the rubble mound breakwater structure composed of several materials.