

研 究 主 論 文 抄 録

論文題目

施工途中の捨石堤を対象とした被災過程メカニズムの解明と簡易的被災過程シミュレーションの構築

熊本大学大学院自然科学教育部 工学専攻 広域環境保全工学教育プログラム
(主任指導 辻本 剛三 教授)

論文提出者 酒井 大樹

主論文要旨

海上空港など海上に広大な土地を造成する埋立工事では、まず外郭を捨石護岸で囲い、その後捨石護岸の内側を埋め立てる。現場では捨石堤の施工途中に台風等による高波浪によって捨石堤が被災を受けることが問題となっている。この施工手順の内、現場で問題が発生しているのが捨石堤の築造中あるいは築造後である。海上空港などの大規模な埋立工事では、捨石堤の築造を先行して埋立地の外郭となる部分を施工していく。捨石堤の築造がある程度先行したところでケーソンおよび上部工築造と続いて施工されるが、それまでは捨石堤が剥き出しの状態が続くこととなる。このような状態で施工途中に台風等による高波浪が来襲した場合に捨石堤が被災することになる。設計断面から大きく変形した捨石堤を修復する作業は大きな手戻りとなり、工費および工期の面でも多大なコストが掛かる。特に沖縄や九州地方では台風の発生から来襲までの期間が短いために対策を講じる時間が足りず深刻な問題となっている。施工途中の捨石堤の被災に着目した既往研究はほとんど無く、来襲する高波浪に対して被災する程度がよく分かっていないのが現状である。従って、施工途中の捨石堤の被災の程度を把握する知見は重要である。本研究では、施工途中を対象とした捨石堤の被災に関する検討を行った。また、被災過程に関するメカニズムを明らかにし、被災特性を明らかにすることで被災低減対策工の提案を行った。さらに、**OpenFOAM** を用いて捨石堤周辺の流れについて検討した。そして、捨石堤の被災を再現する新たなシミュレーション手法として、移流拡散方程式を解くことで捨石堤の被災過程を再現することを試みた。

第 1 章では、本研究の背景と目的を示した。

第 2 章では、従来の水理模型実験の計測手法では実験に相当の時間を要するため、画像解析手法を導入し、実験効率の向上を図った。構築した画像解析による捨石堤形状の計測手法は、従来手法と比較しても十分に使用できる精度であることが確認できた。また、従来の計測手法では不可能だった時間解像度での計測を実現させるとともに、大幅な実験効率

の向上に繋がった。開発した計測を用いて、施工途中を想定した捨石堤の被災過程を高い時間解像度で評価することができた。捨石堤の被災過程は、天端上の石材が岸側に運ばれることで天端高が低下し、運ばれた石材が岸側法面を転落することで法尻が徐々に伸びていくことを確認した。また、沖側への石材の流出は少なかったが、捨石堤前後の水位差による戻り流れで流出することがわかった。天端幅が広い場合では、天端上に石材が留まる時間が長くなり、岸側法尻まで移動する時間が遅くなることがわかった。また、被災初期の被災速度の評価には、有義波高を初期天端幅で除した相対波高が重要であることがわかった。さらに、波の累積エネルギーを評価することで、捨石堤の被災過程を初期形状パターンで分類することができた。被災率の時間変化は、堤体に作用する波高が重要であることが示唆された。施工途中の捨石堤の被災変形特性について、天端高の低下は、天端幅が広いケースで緩やかになることがわかった。また、各天端幅において捨石堤に作用する波高が大きいほど天端高は低下することがわかった。沖側への被災は高波浪が作用してから現地換算で1時間後にはピークを迎えることがわかった。天端幅の最も狭いケース $WT = 3.0\text{m}$ では岸側被災率が40%を超えることは無かった。しかし、 $WT \geq 6.0\text{m}$ では波高が高いケースでは24時間後の被災率が40%を超えることがあった。相対天端幅 WT/L が小さいほど被災面積比は大きくなった。また、時間経過とともに沖側と岸側の被災面積比は小さくなった。統計学において分布形状の非対称性を示す歪度で捨石堤形状の評価を行った。波形勾配 $H1/3/L > 0.03$ では多くのケースで、波が作用し続けても歪度は負の値となっており、常に岸側に歪んだ形状となることがわかった。捨石堤の変形形状に関しては、相対天端幅 $WT/L \leq 0.025$ で歪度が正となり、 $WT/L > 0.075$ で歪度が負となることがわかった。また、時間経過に伴い、歪度は相対天端幅 WT/L に関係なく負から正に変化することがわかった。

第3章では、施工途中を対象とした捨石堤の被災に関して被災低減対策工の提案を行った。捨石堤の被災を低減させるという目的は達成できる案を提示することができた。被災範囲の検討より、高波浪が作用した捨石堤の変形は、天端上水深 hc が入射波の有義波高の約1.2倍の深さで留まることが明確となった。この結果より、被災低減対策が必要な範囲は、静水面から入射波の有義波高の約1.2倍の間であると設定した。ネットを利用した被災低減対策工を施すことで被災後の天端高を初期天端高に対して90%程度に維持することができた。これより、被災対策工の範囲を $hc/H1/3 \leq 1.20$ としたことの妥当性が確認できた。被災低減対策工に繊維製ネットと金網という柔軟性の異なる2種類のネットで検討したが、得られる効果に大きな違いは見られなかった。そのため、ネットの選択に関しては現場での施工性を重要視すればいいということがわかった。被災低減対策工を施した場合、作用する波の周期による効果の違いは見られず、いずれも高い効果を確認できた。被災低減対策工の効果について被災率で評価したところ、無対策の場合の被災率は約45%で、被災低減対策工を施した場合は被災率が約20%という結果が得られた。これより、本被災低減対策工は被災する石材量を1/2以下に抑えられるといえる。

第4章では、OpenFOAMを用いて捨石堤の周辺で発生する流れについて検討した。通過波検定より、実験での造波板の動きをそのまま数値計算で再現することで初期波形から水位

変動を良好に再現できることが分かった。また、流速に関しても、水平流速と鉛直流速で良好な再現性が得られた。捨石堤を多孔質体として忠実に再現するには空隙率の設定が重要であることが分かった。本研究における捨石堤の実験条件に対しては空隙率 0.2~0.4 程度が妥当な値であった。捨石堤内の内部水位についても再現ができることが分かった。岸側に捨石堤が変形するのは越波時に岸方向への流速が卓越することが要因と考えられる。第 5 章では、捨石堤の被災過程について移流拡散方程式を解くことで再現することを試みた。主なまとめとしては、波が作用してから 1 時間後（現地換算）までは捨石堤の天端が大きく下がるが、拡散係数 ν を大きくすることで天端高の低下を再現できることがわかった。また、岸側方向への変形については移流速度 C をチューニングすることで再現できた。与えた移流速度 C は 1~1.5, 拡散係数 ν は 17~32 であった。波が作用してから 1 時間（現地換算）を過ぎてからの捨石堤の変形は、徐々に緩やかになることから移流速度 C と拡散係数 ν を小さく与えることで再現した。与えた移流速度 C は 0.2~0.3, 拡散係数 ν は 3~4 であった。実験結果の沖側および岸側の法尻位置を水平方向の解析範囲とすることで、天端高の低下と岸側法肩部は良好に再現できた。第 5 章では、捨石堤の被災過程を移流拡散現象とみなし、一次元移流拡散方程式を解くことで再現するという今までにない全く新しい発想で試みた。実際に捨石堤の被災が起こっている現場では一刻も早く正確な解析結果が求められる。解析の速さという点では複雑な数値解析手法を用いるのではなく、簡易な手法を採用することで現場の要望に応えられる。