3次元数値波動水路を用いた防波堤堤頭部の 被覆材移動による被災の検討

Damage Mechanism of Armor Units at the Breakwater Head Using the 3D Numerical Wave Tank

近藤圭央¹・有川太郎²・関 克己³・村川はるみ⁴

Masuo KONDOU, Tarou ARIKAWA, Katsumi SEKI and Harumi MURAKAWA

The rubble mound of composite breakwaters is usually covered with armor stones or armor concrete blocks. However the damage of armor units is almost appeared at the breakwater head. The minimum weights of the armor units at the breakwater head is1.5 times the value of the breakwater trunk. This paper aims to elucidate the damage mechanism of armor units at the breakwater head of a composite breakwater by numerical simulation with a 2 or 3-dimensional numerical wave tank 'CADMAS-SURF' under regular wave action. Numerical results are compared with experimental data. At the last, the numerical wave tank is applied to real disaster of the armor units of the composite breakwater.

1. はじめに

近年,日本近海での大型台風の発生頻度の増加及び冬季日本海側での冬季風浪による高波浪発生頻度の増加等 により,防波堤の被災発生が多くなってきている.被災 が発生しやすい場所は,構造形式が不連続となる地点で あり,堤幹部に比べて構造形式が不連続となる防波堤堤 頭部は被災発生の可能性が高い.通常,防波堤堤頭部の マウンド被覆材の設計では,堤幹部で被覆材の所要重量 をハドソン式によって算定し,この重量を1.5倍した重量 にすることが多い(日本港湾協会,2007)しがしながら, 「斜め入射による混成堤マウンド被覆材の安定性に関する 実験的研究」(高橋ら,1990)の記載にもある通り1.5倍 以上の重量が必要な場合もある.

また,これまでの被覆ブロック移動に関する研究とし て,被覆ブロックのマウンド法先のブロックの移動に関 する研究(谷本ら,1982;大熊ら,2003),一方,近年, 数値波動水路CADMAS-SURF(磯部ら,1999;(財)沿 岸開発技術センター,2001)が実用化され,マウンド被 覆材の被災メカニズムを考慮した高度な設計法の確立を 目的として,数値計算を利用した検討が進められている (松本・高橋,2001;松本ら,2003;大熊ら;2003)しか し,これらの研究は堤幹部を対象とした研究である.

堤頭部に対する設計式や実験式というのは乏しく、さらに、様々な形態があることから、そのすべてを実験することは困難である.一方で、3次元の数値波動水槽は、

$ \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 3 \end{array} $	正会員 正会員	博 (工) 博 (工)	(株)日本港湾コンサルタント (独法)港湾空港技術研究所 (独法)港湾空港技術研究所
4			長岡科学技術大学大学院

コンピュータの発達とともに,実務への適用が現実的に なっている.しかし,数値水槽は,流速等の物理的な緒 量を与えるにすぎず,被害等との関連が不明確であるこ とが問題である.

そこで本研究では、堤頭部の被覆材の安定性にターゲットを絞り、数値水槽を用いた被害検討手法の構築を目 標とし、実験ならびに、シミュレーションを実施するものである.

断面実験との比較による数値水路を用いた被害 率算定方法の検討

被覆材の安定質量は、被覆材上面の流速より安定質量 を計算できるイスバッシュ定数やハドソン式を用いた質 量算定式により計算が可能である.そこで,数値水路か ら得られた緒量から,それらの安定質量を求めるととも に,実験により被害率との関係を検討した.

(1) 実験断面および条件

実験はこれまで行われてきたように,現地の消波ブロ ック被覆堤を参考に,水路内に縮尺1/30程度の模型とし た(図-1).表-1は実験のケースである.

各ケースにおいて,被覆石の動きをビデオ撮影し,ま た,波の作用前後の写真を撮影することにより,被害率 を調べた.波高計および流速計は適宜取り付けた.

(2) 計算断面

計算には2次元数値波動水路(CDAMAS-SURF/2D)を 用いる. 造波には造波ソース法を用い,減衰領域を両側2 波長分設けている.水槽諸元は28.275m×1.545mで水位 0.357mとした.格子サイズは1.5cmの正方形格子である.

計算断面としては図-1に示す実験断面を再現するがその際,マウンド部およびケーソン本体は障害物データ(空



図-1 実験断面

表-1	実験ケ	ース表

実験目的	case	周期 (T)	波高 (cm)	被覆石 重量	置きなおし (回目)
	1-1	2.61	6.965 ~ 22.027	20~30g (0.54 ~0.81t)	0
	1-2				1
	1-3				2
	2-1			$30{\sim}60g$ (0.81 ~1.62t)	0
	2-2				1
心更质量	2-3				2
必安員重 検討実験	2-4			100g前後 (2.7t前後)	0
	2-5				1
	2-6				2
	3-samen				3
	4-1			200g前後 (5.4t前後)	0
	4-2				1
	4-3				2
	5-1		11.049 ~ 22.027	51.85 ~59.26g (1.4~1.6t)	0
	5-2				1
被害率	5-3				2
検討実験	5-4				3
	5-5				4
	5-6				5

注)被覆材重量の括弧内は現地重量

隙0)とし,消波工は空隙率0.50,慣性力係数1.20,抵抗 力係数1.0として設定している.

(3) 結果および考察

実験時安定質量とハドソン式との比較があまり良くな かった.そこでイスバッシュ式による検討を行う.イス バッシュ式は、入力条件として流速値を用いて評価する.

ここで, M_d :安定重量, ρ_r :被覆材の密度,U:流速, g:重力加速度, y_d :イスバッシュ定数(埋め込まれた石 =1.2,露出した石=0.86), S_r :被覆材の比重, θ :斜面勾 配である.

まず,空間的な実験データおよび数値水路による計算 結果に関する水平流速最大値の比較を行ったところ,法 肩部にピークを持ち,それより岸側では減衰していく様





子は良く対応していた.次に,図-2に実験時の流速と質量の関係を示す.これをみると安定係数を0.86として算定した場合でも安定質量が小さい場合には移動する可能性がある.

よって,おおむね係数を0.86として検討すれば,必要 質量を満足する傾向にある.また,係数が1.2であっても 変化なしの場合がある.変化無しの流速は0.56~0.62で ある.一方で,図-3に被害率と最大流速との関係を示す. 被害率とは一定幅での被覆材総個数に対する移動した個 数の比率である.今回実験したデータの2次近似曲線と 0.56及び0.62の交点をみると被害率は1~3%であり,数 値水路から得られた緒量を用いて,被覆材の安定性を検 討する場合,被害率を対象に検討する場合は1.2で行うこ とができる.

3. 数値波動水槽を用いた堤頭部周辺の検証

ここでは,数値波動水槽を用いて特に3次元性の影響が でる堤頭部周りの検討を行う.まずは,模型実験を行い, そのうえで同様の計算を行って比較した.

(1)実験概要

実験に使用した水槽諸元は全長105m,幅3m,高さ2.5m である.この水槽は水路の途中で幅80cmと幅2.0mの水路 に別れており、本実験では堤頭部周辺の被覆材に関する 実験であり、2.0m水路を用いて実験を行った.実験の条 件は、現地被災事例をもとに、実験縮尺を1/50として波 浪及び模型を設定した.波浪条件は被災時の波浪条件を もとに設定し、波高に関しては、設計波高の0.6,0.8, 1.0,1.1倍の4波高を実験波高とし不規則波を造波した.



図-4 防波堤断面図(単位cm)



写真-1 設置の様子

実験波浪条件は、潮位0.046m,有義波高0.156m,周期 2.08sとした.

実験に用いた断面図を図-4に示す.実験用被覆ブロックは,幅4cm,長さ4.5cm,高さ2.0cm,根固めブロックは幅5.0cm,長さ10.0cm,高さ2.5cm,重さ約240gのものを用いた.写真-1は設置したあとの写真である.

(2) 実験結果と考察

a)被害の様子

写真-2に0.6倍から1.1倍までの有義波高による被覆材及 び基礎捨石の状態を示す.これをみると全体としては被 覆ブロック及び根固ブロックの被害後に,基礎捨石吸い 出しが発生していることがわかる.波高毎の被覆ブロッ クの移動状況を図-5に示す.ハッチングされたものが,実 験時に移動をした被覆材である.

移動したブロックを観てみると,波高0.6 H_{1/3}の時点では,防波堤港内側の法肩部の被覆ブロックが1個移動した



a) 0.6H_{1/3}のケース



b) 0.8 H_{1/3}のケース



c) 1.0 H_{1/3}のケース



d) 1.1 H_{1/3}のケース

写真-2 被害の様子



図-5 被覆ブロックの移動箇所



写真-3 被覆ブロックの挙動及び模式図

程度であり小規模である.しかし,波高0.8 H_{1/3}以上では 根固めブロックの移動も発生して,移動したブロックの 範囲も広く,来襲する波高が大きくなることにより被災 が範囲も広く成ることがわかる.

また,波高が小さい場合には法肩のブロックの移動程 度であり,法肩のブロック移動が最初に発生し,周辺ブ ロックが移動していき広範囲のブロック移動が発生して いるものと考えられる.

そこで,港内側の角の周辺でのブロックの挙動を確認 するためCCDカメラで撮影した画像を用いて確認した. その映像より,根固めブロックが移動する前に被覆ブロ ックが2個立ち上がりお互いもたれ逢っている状態が確認 できた(写真-3丸印内).

以上のことから,港内側被覆ブロックの変位が初めに 発生して徐々に周辺ブロックが移動して最終的に広範囲 の被覆材移動がおこることを確認した.

また,側面部と角部で流速を比較したところ,防波堤 港内側角のほうが防波堤側面での流速より早く,2倍近く の流速が発生しており,これは,高橋ら(1990)の説明 通り,特に斜めに波が入射した際に角部周辺の大きな流 速が生じる現象を再現しており,実験が妥当であること を示すものである.

(3) 数値波動水槽を用いた解析

CADMAS-SURF/3Dを用いて計算を行い,数値解析と実 験結果との比較を行う.実験値との比較を行う場合には 実験入射波と同様に不規則波による計算が望ましいが,現 在の計算機でも数週間かかり実用的ではない.そこで本 研究では,不規則波に比べて計算時間の短い規則波を用 いて実験結果の再現方法を検討する.

a)解析条件

計算格子は防波堤周辺で2cm×2cm×1cmとして設定した.図-6は,計算領域全体の断面および平面図である.図 中斜線部はエネルギー吸収帯を入れた.

入射波としては.実験に用いた不規則波と同様の波高 0.156m,周期2.08sの規則波とした.

b)解析結果と考察

実験で観測された流速と数値解析結果の最大流速を比



較した.比較結果を図-7に示す.

各地点間の流速の差に関する傾向は同じであるが、ど の地点でも実験値が計算値より大きい結果となっている. これは実験値が不規則波であることに対して、数値解析 が規則波で検討した結果によるものと考えられる.実験 での出現波浪を解析したところ、最大波高0.26mであり周 期3sec 程度の波の出現が確認された.

そこで、有義波は最大波高が1.8倍程度であるこのこと から、流速も1.8倍にすることが妥当と考え、解析値結果 に1.8倍にして、流速からイスバッシュ式より、被覆ブロ ックの必要重量を計算した。使用した定数は、被覆ブロ ックは重量により安定性を保つものであり、表層に露出 した石と同等とみなしてイスバッシュ定数は0.86を用い た.必要重量に満たないブロックの範囲を図-8に示す.お おかた実験で得られた被災範囲となり、今後不規則波の 検討が必要であることがわかる.



図-8 計算結果の1.8倍の流速から得られる被災範囲 (イスバッシュ定数0.86の場合)

4. 現地被災事例の検討

最後に,数値波動水槽を用いて,実際にS港で発生した 堤頭部の被災事例の検証を行う.

(1) 被災の概要

平成19年に発生した台風4号によりS港における堤頭部 の被災状況を図-9に示す.被災状況は、被覆ブロック及 び根固めブロックが移動し、基礎捨石が吸い出され、ケ ーソンも港内側に0.7m程度滑動した.

(2) 適用計算

a)解析条件

入射波条件は被災時の波浪状況より,波高7.8m,周期 14.7sの規則波により検討した。検討範囲は,堤頭部周辺 を180m×300mの範囲を対象とし,鉛直方向は-14.5m~ 20.0mの34.5mとした。格子数は水平方向1.0m,鉛直方向 0.5mで総格子数は3.726.000格子である。

b) 解析結果と考察

図-10には被覆材表面における最大流速を1.8倍した分布 図を示す.この結果は既往の論文と同様に入射波の対辺 方向の角で流速が大きい範囲が存在することが分かる.こ の流速値を用い前述と同様にイスバッシュ定数0.86を用 いて算定された必要重量と現地被覆材の重量を比較して 重量不足の範囲を図-11に示す.被災範囲全体には達して いないが,角部において質量不足となる範囲が存在する.

5.まとめ

数値波動水槽を用いて被覆部の被災を検討することを







図-11 重量不足範囲(イスバッシュ定数0.86の場合)

試みた. 主要な結果を以下に示す.

- 被覆石の実験より、被害率とあわせた検討をするとイスバッシュ定数を1.2とするとよいことがわかった。
- ② 堤頭部の実験と数値解析の比較より,不規則波の実験 結果と規則波の数値解析結果を比較するためには流速を 1.8倍としイスバッシュ定数0.86で重量を算定し重量不 足被覆材と実験で移動した範囲が定性的に合致した.ま た,同手法を用いて,災害の再現計算したところ被災範 囲は狭いが定性的には被災を再現することができた.

今後については、より実現に近い検討を行う必要性よ り不規則波を用いた計算が必要である.そのためには時 間短縮が重要でありデータ作成等の工夫する必要である.

また,被覆材同士の噛み合わせや構造物同士の摩擦及 び構造物の移動による周辺への影響等の研究実験を行い. これらのメカニズムを解明して,CADMAS-SURF/3Dへの 対応及び,他の解析手法との連成により,実現現象を数 値解析できるシステムの確立が重要である.

参考文献

- 磯部雅彦・余 錫平・梅村幸一郎・高橋重雄(1999) : 数値 波動水路の開発に関する研究,海岸工学論文集,第46巻, pp.36-40.
- (財)沿岸技術研究センター(2001):数値波動水路の研究・ 開発 沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 296p.
- 大熊義夫・興野俊也・柴崎尚史・安田勝則・中野 修 (2003) :流速場における混成堤断面の被災状況の相違に よるブロック安定性検討,海岸工学論文集,第50巻, pp.751-755.
- 高橋重雄・木村克俊・谷本勝利(1990):斜め入射波による 混成堤マウンド被覆材の安定性に関する実験的研究,港 湾技術研究所報告,第29巻,第2号.
- 谷本勝利・柳生忠彦・村永 努・柴田鋼三・合田良実 (1982):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,港湾技術研究所報告,第21巻,第3号.
- (社) 日本港湾協会(2007):港湾の施設の技術上の基準・同 解説, 1467p.
- 松本 朗・高橋重雄(2001):流速場に基づく混成堤マウンド被覆材の高度設計法,海岸工学論文集,第48巻, pp.911-915.
- 松本 朗・半沢 稔・高橋重雄(2003):モンテカルロ法に よる混成堤マウンド被覆石の移動シミュレーション,海 岸工学論文集,第50巻,pp.781-785.