水理模型実験および数値計算による 防波堤マウンド法先部被覆ブロックの 被災メカニズムの検討

大東 秀光¹・大江 一也²

¹正会員 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王子3-11-20)

E-mail:daito.hidemitsu@e4.kepc.co.jp

²正会員 関西電力株式会社 電力技術研究所 (〒661-0974 尼崎市若王子3-11-20)

被覆材としてハドソン式を満足する重量の異形ブロックを有する防波堤マウンドにおいて、法先に設置された被覆ブロックのみが被災した事例がある。本研究では、断面水理模型実験および数値計算を実施し、被覆ブロックが被災に至るメカニズムについて詳細に検討した。水理模型実験により、ブロック直上の流れの冲向きの加速度と被災率が高い相関を持つことを確認した。また、数値計算により、ブロック周辺の流れが岸向きから冲向きに変化する際に被覆ブロックに揚力が作用し、ブロック重量が大きいほど大きな揚力が作用することを確認した。

Key Words : Armor block stability, incident wave condition, 2D hydraulic model experiment, Numerical simulation

1. はじめに

被覆材としてハドソン式を満足する重量の異形ブロックを有する防波堤マウンドにおいて、法先に設置された被覆ブロックのみが被災した事例がある。法先部の被覆ブロックが被災するメカニズムについては、岸向き流れの阻害による流速低減に伴う底面付近の揚圧力増大¹⁾や、沖側の隣接ブロックの不存在による拘束効果の低下とブロック近傍流速の増大等によるブロックの安定性低下²⁾など、ブロック周辺の流速と被災との関係が報告されているが、ブロック周辺の波浪場によりブロックが移動し被災に至る詳細なメカニズムについては十分解明されていない。そこで、本研究では、断面水理模型実験および数値計算を実施し、ブロック周辺の流れ場と被覆ブロックの移動との直接的な関係について詳細に検討した。

水路を用いて行った。模型縮尺は1/80とした。

表-1に、実験に用いた被覆ブロック模型の諸元を示す。原設計の20tブロックに加えて、ブロックの重量・大きさによる差異を確認するために重量が50tの異形ブロックによる実験を行った。

表-2に実験の波浪条件を示す。前述のように、ブロックの被災は、ブロック周辺の流速場との関係が報告され

図-1 防波堤標準断面図

2. 水理模型実験

(1) 実験の概要

図-1に示した防波堤を対象に、断面水理模型実験を実施した。図-2に断面水理模型実験の概要図を示す。実験は、長さ50m、幅1.5m、高さ1.8mの二次元不規則波造波

図-2 断面水理模型実験概要図

表-1 法先部被覆ブロック模型

被覆ブロック形状		寸法(mm)		
		L	B	H
20t		42	28	22
50t		57	38	30

表-2 波浪条件

実験 ケース	入射波高 (m)	周期 (s)	波長 (m)	波形勾配
Case-1	0.088	1.67	4.38	0.020
Case-2		1.93	5.83	0.015
Case-3		2.37	8.75	0.010
Case-4	0.113	1.90	5.63	0.020
Case-5		2.19	7.50	0.015
Case-6		2.69	11.25	0.010
Case-7	0.138	2.10	6.88	0.020
Case-8		2.42	9.17	0.015
Case-9		2.97	13.75	0.010

ていることから、底面付近の水平流速が大きく流速場と被災との関係が把握しやすくなるよう長周期の規則波を用いることとした。波高は0.088m, 0.113m, 0.138mで、これは現地スケールで7m, 9m, 11mに相当する。これらの波高について波形勾配0.010, 0.015, 0.020の3ケースの組み合わせによる計9ケースの波浪条件で実験を行った。なお、実験工程の都合上、水槽内に模型が設置された状態から実験を開始したため、波浪条件は造波位置における入射波として与えた。

実験は1つの波浪条件について2ないし3回繰り返し、実験の都度ブロックを初期状態に配置し直して実施した。以下の図中で示す被災率は、これらの平均値と実験のバラツキを記載している。

波浪条件ごとに法先ブロック位置の重複波高が安定している9～17波程度について法先ブロック位置で波高を計測するとともに、ブロックの上面から3.5cm上方に電磁流速計を設置し、水平および鉛直流速を計測した。また、ブロック移動状況を目視およびビデオ撮影により観察し、ブロック長さの1倍程度移動したブロック数をカウントし、全ブロック数で除し被災率を求めた。

(2) 実験結果および考察

波浪条件別の被災率を図-3に示す。既往の研究^{1), 4)}と同様、同一波浪条件においてはブロック重量が大きい方が被災率も大きくなっている。この要因については、後述する数値解析で詳細に検討する。50tブロックで高い被災率となった波浪条件に対しては、20tブロックでも被災が生じる傾向が認められる。

図-4に、ブロック直上位置における岸向きおよび冲向

図-3 波浪条件別の被災率実験結果

(a) 50tブロック

(b) 20tブロック

図-4 ブロック直上水平流速と被災率との関係

き水平流速の最大値と被災率との関係を示す。全体的には岸向き流速が大きいほど被災率も大きくなる傾向は認められるが、流速が小さいにも関わらず被災率が大きくなるケースも見られる。冲向き流速と被災率の間には明確な関連は認められない。

実験状況を撮影したビデオ映像を詳細に観察すると、ブロックが移動・飛散する形態が幾つかのパターンに分類できることがわかった。具体的には、以下の3パターンに大別できる。

- ①押し波時にブロック先端が勢いよく持ち上がり、続く引き波時に沖側に回転する。
- ②押し波時に一旦岸側に移動あるいは先端が少し持ち上がったのち、続く引き波時にブロック後端が持ち上がり沖側に回転する。
- ③押し波時に一旦岸側に移動あるいは先端が少し持ち上

がったのち、続く引き波時に沖側に徐々にあるいは滑るように移動する。

被災パターンと被災率との関係では、①の被災パターンは被災率が高く、②、③の順で被災率が低くなる傾向がある。また、20tブロックの被災は、被災率は小さいものの、被災する形態はほとんどが①の被災パターンによるものであった。

①の被災パターンは、押し波によりブロックの安定性が著しく低下し被災に至ると考えられるが、②および③のパターンでは、押し波では被災にまで至らないが安定性が低下しマウンドとの摩擦抵抗が小さくなった状態になり、続く引き波によりさらに安定性が低下し沖側へ運ばれる動的な変化によるものと考え、水平流速の時間変化（加速度）に着目した。

図-5 時系列実験結果(Case-1)

(a) 50tブロック

(b) 20tブロック

図-6 ブロック直上加速度と被災率との関係

図-5は、波浪条件Case-1について、法先ブロック位置の水位、水平流速および加速度の時系列を示したものである。流速および加速度は、岸向きが正である。ブロック位置の波高は、防波堤からの反射の影響により、1周期内で2つのピークを持つ重複波となっている。これは、今回の実験で用いた波浪条件すべてで生じており、同一の入射波高でも、周期により法先ブロック位置の重複波高に違いが生じている。押し波による水位ピーク時に岸向き加速度が最大を示し、反射波による水位のピーク時に、水平流速が岸向きから沖向きに変化し沖向き加速度も最大となっている。

加速度の岸向きおよび沖向きの最大値と被災率との関係を図-6に示す。50tブロックは、岸向き加速度と被災率との相関は認められないが、沖向き加速度と被災率は高い相関が認められる。20tブロックは、岸向き加速度とも高い相関が認められた。20tブロックが岸向き加速度、すなわち押し波時の波浪場と相関が高いのは、前述した20ブロックの被災パターンが①の押し波によるものであるという観察結果とも整合する。

3. 数値解析

(1) 計算条件

法先ブロック周辺の波浪場により、ブロックにどのような力が作用しているのかを詳細に検討するため、数値波動水槽(CADMAS-SURF/2D)³⁾による再現計算を実施した。計算条件を表-3に、法先ブロック付近の構造物モデルを図-7に示す。今回の検討では、ブロック重量・サイズの違いによる影響を定性的に評価することを目的とし

表-3 計算条件

実験縮尺	1/80
造波方法	造波境界
差分スキーム	VP-DONOR 0.2
慣性力係数CM	1.2
抗力係数CL	1.0
空隙率（捨石マウンド）	0.4

図-7 法先部周辺の構造物計算メッシュ

図-8 実験波高と計算波高の比較 (法先ブロック位置重複波)

て、法先部の被覆ブロックは矩形の不透過構造物としてモデル化した。構造物周辺のメッシュサイズは、 Δx , Δz とも1cmとした。法先ブロック図中の法先ブロックは2列並んだ状態を示しており、以下の計算結果に対する検討では、沖側1列分を対象としている。

前述したとおり、実験は模型を設置した状態で実施したため通過波は計測していない。このため、模型が設置された状態における法先ブロック位置の重複波高の実験値と合うように造波波高を調整した。図-8に実験および再現計算の法先ブロック位置の波高を示す。

(2) 計算結果および考察

図-9に、法先ブロックに作用する揚力と被災率との関係を示す。揚力は、静水圧成分を除いたブロックの上および下面の圧力値をブロック長にわたり積分して波力を求め、下面波力から上面波力を引いたもので、単位は水

図-9 揚力計算結果と被災率との関係

路幅1mあたりの値(N/m)である。50tブロック、20tブロックとも揚力が大きいほど被災率も大きくなる傾向は認められるが、50tブロックでは、被災率が小さいケース、すなわち、被災パターン②、③のケースについては、揚力と被災率との間に明確な相関は認められない。

図中には、ブロックの水中重量を破線で記載している。ブロック重量以下の揚力でも被災が生じており、計算で得られた揚力は被災に対して過小評価となっている。

ブロック重量による揚力計算結果の違いについて、20tブロックよりもブロック高さおよび重量の小さい15.6t方塊ブロックに対する計算を行った。ブロックの寸法は、幅と長さが20tブロックと同じで、実スケールで高さが1m、重量が15.6tである。この15.6t方塊ブロックについては、大東ら⁴⁾が今回の実験で用いた異形ブロックよりも高い安定性を示すことを実験で確認している。

図-10は、波浪条件ごとの揚力の計算結果を示している。図には、50tおよび20t異形ブロックの計算結果も併記し、各ブロックの水中重量を破線で示している。いずれの波浪条件においても、ブロック重量が大きいほど揚力も大きくなっており、被災の傾向と整合する。また、15.6t方塊ブロックの揚力計算値はすべてブロック重量を下回っているが、重量が大きくなるに従い揚力計算値は過小評価となっている。しかし、ブロックには揚力以外にもブロック表面に沿う流れによるせん断力や抗力も作用し、ブロックのサイズが大きくなるほどこれらの力も大きく作用すると考えられる。したがって、今回実施した数値計算は、定性的には水理模型実験を再現できていると考えられる。

次に、水理模型実験と同様、波浪場の動的な変化について考察する。図-11に、50tブロックに対する波浪条件Case-1の時系列計算結果を示す。Case-1の被災形態は、③のパターンである。上から、法先ブロック位置の水位、ブロック直上の水平流速、ブロックに作用する揚力の時系列である。

ブロックに作用する揚力は、1周期内で2つのピークを持ち、2つめのピークは、水平流速が岸向きから

図-10 ブロックサイズによる揚力計算結果の比較

図-11 時系列計算結果 (Case-1)

図-12 揚力第2ピークと被災率との関係 (50tブロック)

沖向きに変わる直後、つまり、水理模型実験で沖向き加速度が最大となるタイミングと一致する。

そこで、2つめの揚力ピークと被災率との関係を整理したものが図-12である。図-9と比較すると、被災率が小さいケースについて揚力との相関が向上していることがわかる。

一方、図-13に示すように、20tブロックについては2つめの揚力ピークは非常に小さく、50tブロックとは異なる結果となったが、このことは、20tブロックの被災は押し波により被災する①のパターンであったという実験結果と整合している。

図-14および図-15は、波浪条件Case-1に対する揚力の第2ピーク時刻のブロック上面と下面の水平流速および波圧の計算結果である。横軸は、ブロックの計算メッシュで、左端をブロック沖側先端位置で揃えている。波圧は、出力結果から静水圧を差し引いた値である。ブロッ

図-13 揚力時系列計算結果 (20tブロック, Case-1)

図-14 揚力第2ピーク時刻におけるブロック上下面の水平流速 (Case-1)

図-15 揚力第2ピーク時刻におけるブロック上下面の波圧 (Case-1)

ク下面の流速は、ブロック先端を除き大きな差はないが、上面の流速は50tブロックのほうが大きな値となっている。これは、50tブロックのほうがブロック高が高いため流れが阻害され、ブロック上面に早い流れを生じさせているためであると考えられる。波圧は、20tブロックでは上下面でほとんど差はないが、50tブロックは、上面の早い流速に伴い上面の波圧が大きく低下していることがわかる。ブロック高が高くなることによるブロック上面の圧力低下に伴う揚力の増加が、ブロック重量の増加を上回るため、引き波時の安定性が低下すると考えられる。

5. まとめ

本研究では、断面水理模型実験および数値波動水槽 (CADMAS-SURF/2D)を用いた数値計算により、防波堤マウンド法先部に設置された被覆ブロックの被災メカニズムについて検討を行った。実験および数値計算により得られた結果は、以下のとおりである。

①水理模型実験の観察結果から、法先部被覆ブロックの被災形態は、押し波により安定性が著しく低下する形態と、押し波から引き波に移る際の流速の変化により生じる揚力により安定性が低下し、引き波により沖側に移動する形態があることを確認した。

②水理模型実験の計測結果から、ブロック周辺の流速場と被災との関係は、流速よりも流速の変化 (加速度)

と被災率との整合性が高く、被災率の大きな50tブロックについては、冲向きの加速度との間に高い相関が認められた。

- ③数値計算によるブロックに作用する揚力は、定性的には水理模型実験の被災率と整合することを確認した。
- ④ブロックサイズの大きい50tブロックでは、引き波時にもブロックに大きな揚力が作用し、被災パターンの②および③は、この引き波時の揚力が大きく影響していると考えられる。

謝辞：水理実験にあたっては、(株)日本工業試験所・新幸弘行氏の協力得たことを記して、謝意を表する。

参考文献

- 1) 有光剛, 川崎浩司. マウンド法先部の被覆ブロックの安定性に及ぼす入射波条件の影響. 海洋開発論文集. 第26巻, pp.501-506, 2010.
- 2) 大熊義夫, 興野俊也, 柴崎尚史, 安田勝則, 中野修: 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, 2003.
- 3) (財)沿岸開発技術センター. 数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発. 沿岸開発技術ライブラリーNo.12, 457p, 2001.
- 4) 大東秀光, 有光剛, 川崎浩司. 防波堤マウンド法先部被覆ブロックの耐波安定性に関する平面水理実験. 土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.67, No.2, pp.226-231, 2011.

A STUDY OF DAMAGE MECHANISM OF ARMOUR BLOCKS AT TOE OF RUBBLE MOUND FOUNDATION USING 2D HYDRAULIC MODEL EXPERIMENT AND NUMERICAL SIMULATION

Hidemitsu DAITO and Kazuya OOE

The damage of armor blocks occasionally occurs at the toe of a mound foundation of a breakwater although the block weight is larger than the one calculated by the Hudson equation. This paper aims to elucidate the mechanism in detail by conducting 2D experiment and 2D numerical simulation. By 2D hydraulic model experiments, acceleration of the offshore flow on the block has a high correlation with damage of the armor block. By 2D numerical calculation, the lifting force exerts on the armor block when the flow direction around the block transitions to offshore from onshore, and a large lifting force to act as the weight of a large block.