

防波堤越流水脈の落水位置が背後施設に与える影響

水圏防災工学研究室 鈴木 樹

指導教官 細山田 得三

1. 序論

東日本大震災では、多くの防波堤が越流水による基礎マウンド洗堀により支持力を失うことで転倒した。先の震災津波以降、防波堤の設計基準が見直され、マウンド洗堀を防止するために被覆工を設置することが義務付けられるなど、耐津波設計ガイドラインの多くが改定された。しかし、越流水塊が被覆工に直接打ち込むことで被覆工が安定性を失い、マウンドの洗堀が進行している事例が改訂後も報告されている。そのため、被覆ブロックの安定性を評価することは「粘り強い」防波堤を実現するために重要な課題となる。被覆ブロックの安定性評価については、被覆ブロック所要質量算定式であるイスバッシュ式が一般的に使用されている。しかし同式による評価方法は、評価式を構成するパラメータである流速とイスバッシュ係数が6乗の係数となること、流速の取得位置が曖昧であることから、被覆ブロックの安定性照査方法として十分な信憑性がないことが近年の研究により明らかにされている。その点、粒子法による複雑流動場の再現性は高く、例えば砂川らの論文では越流後の水脈の流速分布などが高精度に表現されたと報告されている。本研究では、水路実験により水脈落水位置を変更した際の被覆ブロックの被災状況と流況を観測し、また粒子法による数値シミュレーションにより水路実験時に被災したブロックに対して作用流体力を算出する。水路実験と数値シミュレーションの結果より、被覆ブロックの被災軽減のための対策を講じることを本研究の目的とする。

2. 水理模型実験

(1) 実験概要

水路実験は、幅 400mm、高さ 400mm の可変勾配水路（実験時の勾配はなし）で行った。実験の基準断面概要と各種寸法を図-1 に示す。図中の延長断面と記している箇所には、越流水脈の落水位置を変更するために調整構造物を付与した。調整構造物は全部で3種あり、それぞれ図の「延長断面」部分に対して +100mm, +150mm, +200mm の構造物となっている。また、初期港内水深は 12,13,14cm で、流量はそれぞれ 10,20,30,40,50m³/h と変化させ実験を行った。各種測定機器については報告会の際に追記する。

(2) 実験結果

断面 1, 断面 2 では天端部に打ち込み、ブロックが単体で転倒する被災形態となった。断面 3 では法面上部、断面 4 では法面下部に打ち込んだ。以上 4 断面において被災度（各断面被災ケース/各断面総ケース）を比較したところ、被災度が大きい順に、断面 1 > 断面 2 > 断面 4 > 断面 3 となった。この結果の要因としては、断面 1 と 2 では防波堤背後水深が低く、港内水による越流水脈のエネルギーの拡散・散逸（港内水深によるクッション効果）が行われずに直接天端ブロックに水脈が打ち込み高圧力部分となったためと考えられる。その点、断面 3 と断面 4 に関してクッション効果が発揮され、被災は少ない結果となった。また実験状況から、ブロック間のかみ合わせの小さい法尻部では被災が多く、法面のブロック群が抵抗として作用する法面上部では被災が少ない結果となった。図-2 に天端部（転倒被災）と法面部（滑動被災）での被災時スナップショットと、被災時の力のつり合い関係を描載する。

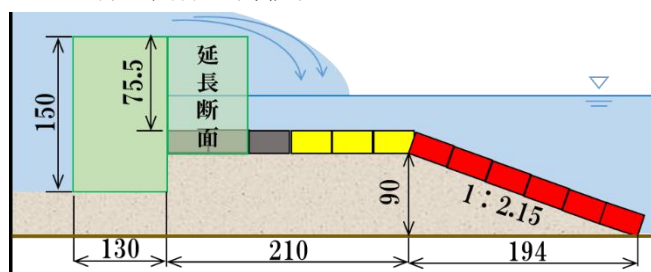
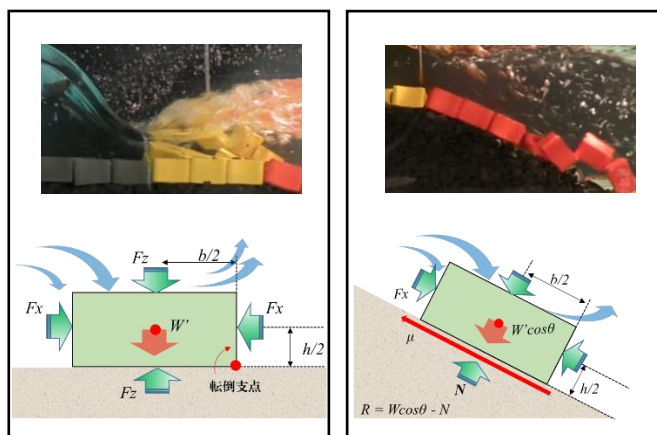


図-1 水路実験防波堤断面



天端部

法面部

図-2 被覆ブロック被災状況（上）と作用流体力の釣り合い（下）

3. 高精度粒子法

(1) 数値解析の概要・適用性

水路実験結果で得られた被災状況を定量的に解釈するために、1. 序論で述べた粒子法を数値シミュレーションツールとして使用し、被覆ブロックに作用する流体力を算出した。図-3は水路実験でのスナップショット上に粒子法シミュレーションの水面形を透過した比較写真である。実験と数値解析の比較・検証の1つであるが、概ね水面形を再現しており適用性を確認できた。その他の流動場に関する比較は報告会にて行う。

(2) 被覆ブロック作用流体力の算定

図-4は断面別でのブロック作用流体力（マウンド法線方向成分）を算定したものである。作用流体力については最大成分を抽出した。図を見ると、断面延長と共に水脈落水位置が遠くなっていること、また作

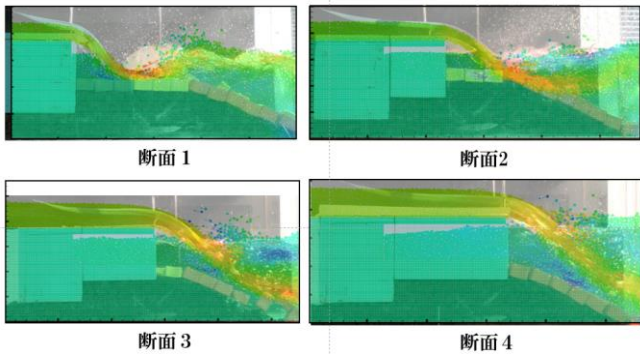


図-3 水路実験と粒子法の水面計比較

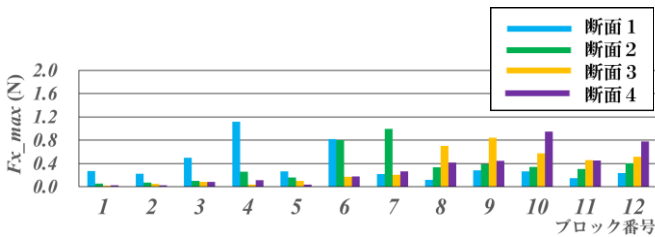


図-4 断面別のマウンド接線方向流体力

表-1 断面1, 流量 30m³/h の転倒モーメント計算

ブロック番号	水中重量	マウンド法線方向に関するモーメント	マウンド接線方向に関するモーメント	転倒作用力	転倒抵抗力
No.1	0.33957	1.81269	1.29938	3.11207	4.66279
No.2	0.33957	3.24445	4.42925	7.67370	6.68195
No.3	0.33957	1.78563	4.87043	6.65606	10.02518
No.4	0.33957	14.10519	2.41903	16.52422	6.95002
No.5	0.33957	4.56258	3.77195	8.33453	6.30872
No.6	0.33957	10.41634	1.95895	12.37529	6.78469

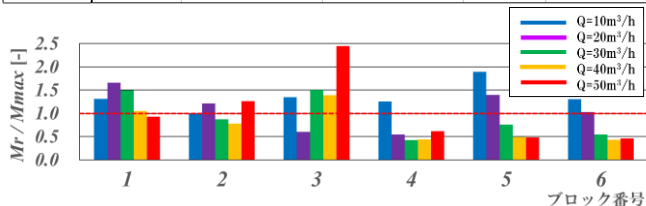


図-5 断面1, 天端ブロックにおける M_r/M_{max}

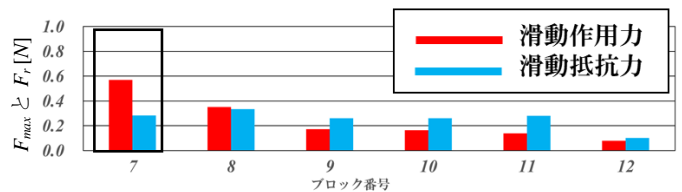
用流体力も断面延長を行うにつれて小さくなっていることが確認できた。

4. 作用流体力と被災の関係性について

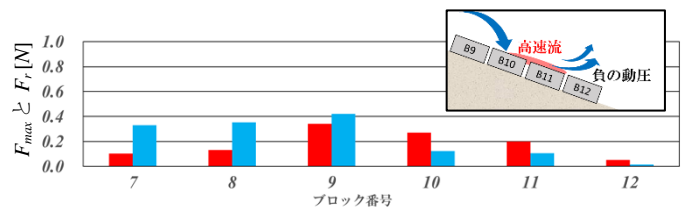
天端部に関しては転倒、法面部に関しては滑動に関する照査を行う。力の釣り合いは図-2を参照されたい。表-1は、天端部における被覆ブロック作用転倒モーメントと抵抗モーメントの計算方法について記載する。図-4には、縦軸には作用転倒モーメント最大値 M_{max} と同時系列の転倒抵抗モーメント M_r の比 (M_r/M_{max}) を示し、横軸は天端ブロック番号を示す。図を見ると実験時に被災が多く発生した B4 から B6 にかけて M_r/M_{max} が 1 を下回っているケースが多く、約 0.5 程度となる場合に被災が発生することが確認できた。図-6の(a)は、実験時に被災が発生しなかったケースでの滑動作用力 (F_{max}) と抵抗力 (F_r) を示した図である。水脈打ち込み位置である B7 では、 $F_{max} > F_r$ となっているが、被災は全く発生しなかった。この理由としては、法面全体が群体として抵抗、つまり ΣF_{max} (1.4272[N]) < ΣF_r (1.521[N]) となったためであると考えられる。一方、図-6の(b)では ΣF_{max} (0.522[N]) > ΣF_r (0.242[N]) であり群体としての抵抗の作用が小さかった。これは B10 と B11 で越流水脈の高速流による負圧が原因で、抵抗値が作用値の 5 割程度の流体力しか有することができなかつたためと考察する。

5. 総括

天端部における転倒被災は、 M_r/M_{max} が 0.5 程度の時に発生することを確認した。また、法尻上部に水脈が打ち込む際は法面全体が群として抵抗し、その合計流体力値で被災関係の評価ができることを示した。



(a) 実験時被災なし



(b) 実験時被災あり

図-6 滑動作用力と抵抗力の比較