

混成防波堤の根固および被覆ブロック安定性に関する研究

川浪 輝恵（環境テクノロジー学，指導教員：岡安 章夫）

1. はじめに

近年，海岸構造物の設計に際しては，供用期間中にその構造物が保持しなければならない性能を規定し，設計を行う「性能設計法」が採用される方向にある．2007年には「港湾の施設に関する技術上の基準・同解説」が仕様規定から性能規定に改定された．合理的な設計を行う上で，被災のメカニズムを解明することは重要な課題であり，メンテナンスを含むライフサイクルでの評価を通じた総合的なコスト削減などにより，多大な利益が期待される．

我が国の防波堤の主流である混成防波堤については，その直立部前面に設置される根固方塊および被覆ブロックが，設計条件を上回る異常波浪の来襲によって，飛散・散乱するという被災事例が発生している．適切な設計および維持管理を行っていく上で，この被災過程やその力学的機構を明らかにすることが重要であるが，研究の蓄積は少なく未だ不明な点が多い．

以上のような背景を踏まえ，本研究は，混成防波堤堤幹部の根固方塊および被覆ブロックを対象に水理模型実験を行い，これらの被災過程やその力学的機構を解明することを目的とした．

2. 実験方法

1) 実験概要

2004年に台風16号による被災があった志布志湾（若浜地区）の混成防波堤堤幹部を対象とし，本学所有のピストン式二次元造波水路（長さ25m,幅1m,高さ2m）において縮尺1/50の模型実験を行った．実海域の地形条件を模して図1のように水路床を設置し，その水平部上に基礎マウンドおよびケーソンによって構成される混成堤模型を設置した．基礎マウンドは1.5cm程度の碎石を用いて，高さ6.0cmになるよう築造し，ケーソンの形状は，幅100.0cm，奥行き40.2cm,高さ26.0cmである．実験の対象となる根固方塊および被覆ブロックには，図2に示すようにそれぞれ長さ10.0cm,幅5.0cm，高さ2.5cmおよび長さ4.0cm,幅4.5cm,高さ2cmのものを使用した．これら二種類のブロックは図3のように防波堤前面に設置した．

本研究で行った実験は，被災過程を調べるための実験（実験Ⅰ）と被災の力学的機構を明らかにするための実験（実験Ⅱ）の二つに大きく分けられる．これら二種類の実験を通して，入射波および堤前で水面変動を計測するため，図1に示したH1～H4の4箇所に容量式波高計を設置した．

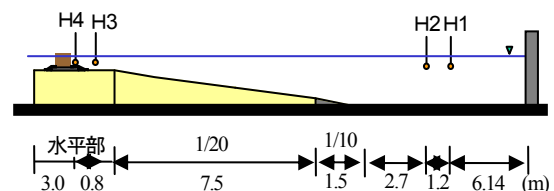


図1 実験水路概要



根固方塊

被覆ブロック

図2 実験模型概要

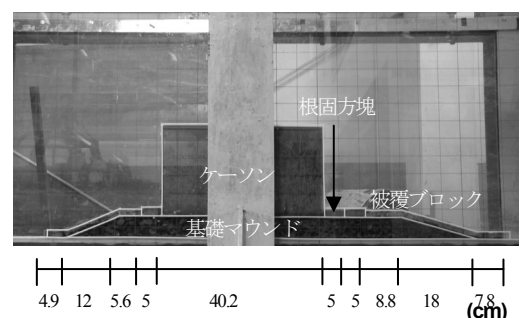


図3 模型設置断面図

2) 実験Ⅰ

実験Ⅰでは、防波堤に規則波を作用させた状態で、根固方塊の挙動を、ガラス側壁越しに側面から目視で観察するとともにビデオで撮影した。現地波浪を参考に、規則波の周期は 2.08s で一定とし、波高については台風来襲時の被災波高 15.6cm(現地換算 7.8m)を基準 (1.0H) として 2 割減の 0.8H から 4 割増しの 1.4H まで段階的に波高を増大させていった。同一波高での波の作用時間は 20 分間であり、波高を増加させる際にはブロックの積み直しは行わずに被災状況を評価した。実験では、表 1 に示すように、ある程度の防波堤の変形を想定し、ケーソン滑動やマウンド沈下の影響についても検討を行った。また、多くの現地被災事例は、マウンド法面部の被覆ブロックの沖側への移動を契機として起きることが知られているが、ここでは根固方塊の安定性に焦点を絞るため、被覆ブロックの沖側への移動が生じないように法先を固定した。

表 1 実験Ⅰの実験条件

ケース	堤前水深 (cm)	模型の状態
1	30.6	ケーソンが岸側に 1cm 滑動
2	30.6	ケーソンが岸側に 2cm 滑動、 マウンド部が 1cm 沈下
3	26.0	ケーソンが岸側に 1cm 滑動、 マウンド部が 1cm 沈下

3) 実験Ⅱ

実験Ⅱではブロックに作用する流体力を評価するため、圧力計、レーザ流速計 (以下 LDV) およびレーザ変位計を用いた詳細な計測を行った。圧力計は根固方塊上下の圧力差を求めるため、二つの圧力センサーを上下面それぞれの中央部に設置した。LDV はブロック直上の岸沖流速を計測するため、上面の圧力計上 1.0cm の位置に計測点を配置した。レーザ変位計はブロックの移動を検出するために用いた。ブロックの浮上によって反応するように、対象とする根固方塊の上面の一角にレーザを照射した。

計測対象とした根固方塊は、LDV の測定可能距離の制約から、ケーソン直下のガラス側面に最も近いものとした。この根固方塊は、片側の摩擦力が軽減されるため四方がブロックに接触しているものより移動しやすいと懸念されるが、実験Ⅰの結果からその影響は小さいと判断した。また、実験Ⅱでは、越波に伴う防波堤上部からの落下流を抑えるため、水路中央を隔壁に

より二分し、計測を行わない側の堤高を低く設定した。以上のような計測を、表 2 に示す様々な堤前水深および入射波の条件の下で、互いに同期しながら行った。なお、入射波は先と同様に周期 2.08s の規則波であり、各ケースについて 20 波分のデータを取得した。

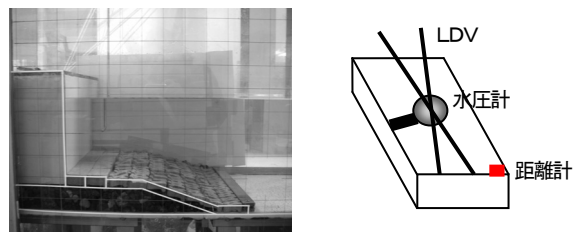


図 4 実験Ⅱでの計測器配置

表 2 実験Ⅱの実験条件

ケース	堤前水深(cm)	入射波高(cm)
1	23.0	5.5~15.7
2	20.0	4.4~14.8
3	18.0	8.1~16.1
4	16.0	8.3~17.4

3. 結果と考察

1) 実験Ⅰの結果と考察

波作用時に観察された特徴的なブロックの挙動を表 3 に示す。

表 3 ブロックの挙動

状態	ブロックの挙動
動揺	微小な動きをする。
滑動	水平方向の移動
浮上	マウンドから剥離する。
傾斜	方塊が天端上の被覆ブロック 端部に乗り上げて傾斜する。
回転	方塊がその場で回転する。
飛散	方塊がその場より抜けだす。

ケースⅠでは、波高ランク 1.0H で根固方塊がケーソン側に滑動を始め、1.2H で傾斜、回転を開始した。波高ランク 1.4H を終えた時点で、沖側に設置した 9 個の根固方塊の内 7 個が傾斜、回転する結果となった。ケース 2 でも波高ランク 1.2H で根固方塊の傾斜が始まり、波高ランク 1.3H で回転した。さらに、このケースでは、根固方塊の前列の被覆ブロックが 3 個飛散

した。ケース3では、波高ランク 1.3H を終了した時点で、根固方塊の移動は岸方向への滑動だけであった。

根固ブロックの挙動が最も顕著に表れたのは、ケース1である。ケース2は、ケーソンと根固方塊との隙間を 2.0cm 設けたことにより、根固方塊が被覆ブロック側に傾斜しにくく、回転も発生しなかった。ケース3に関しては、波高を高くするにつれて防波堤より沖側に離れた地点で砕波したことにより、方塊への作用流体力が低下し、被災が少なかったものと考えられる。

実験Ⅰでは、ケーソンの幅を水路幅に合わせて作成したため、波の越波に伴って防波堤背後の水位が上昇した結果、堤上からの落下流が発生した。実験Ⅰでは図5のように根固方塊直近の被覆ブロックのみが大きく飛散する結果が見られたが、この位置は落下中の着水点と重なることから、落下流の影響によるものと考えられる。なお、落下流を抑制した実験Ⅱではこのような被災は確認されなかった。

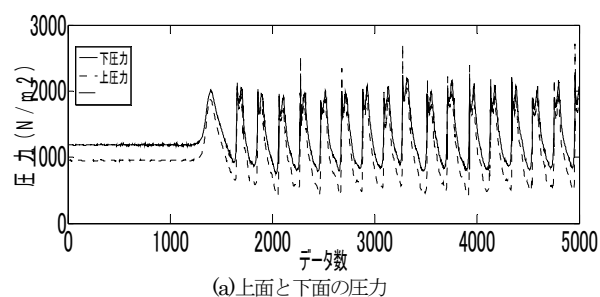


図5 ブロックの被災状況

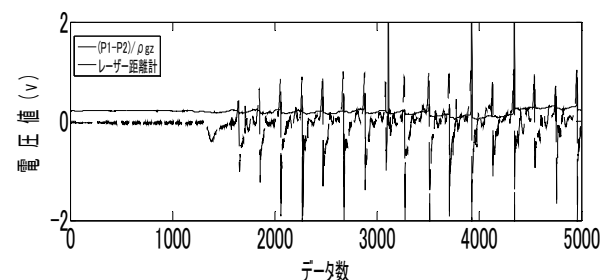
2) 実験Ⅱの結果と考察

実験Ⅱはケーソンと根固方塊に隙間のない設計状態で行ったため、傾斜や回転は発生せず、方塊の挙動は動揺と浮上に留まった。実験Ⅰの結果から、ブロックの水平移動と浮上はほぼ同時に起こっていたため、実験Ⅱでは浮上を被災基準とした。

図6に方塊上面および下面での無次元化された圧力差とレーザ距離計の電圧値を示す。上面下面の圧力差は、計測した圧力差による応力と根固方塊の水中重量の比であり、この圧力差が1以上であれば、理論上根固方塊は浮上すると考えられる。図6では、圧力差が生じている箇所、レーザ距離計の電圧値が高くなっていることが分かる。3波目と6波目でレーザ距離計の反応が異なるのは、根固方塊の動揺と浮上の違いだと推測される。



(a)上面と下面の圧力



(b)圧力差とレーザ距離計の電圧値

図6 浮上が発生したデータ

(1)ブロックの浮上と圧力差

ブロックの挙動を示すレーザ変位計の反応があった箇所の上下面の圧力差を調べた。無次元化された圧力差が 1.02~1.15 で浮上するケースが全体の約六割を占めた。この結果から、上下面の圧力差がブロック重量を超えることで、ブロックの浮上が起きているものと考えられる。また、ブロック浮上および圧力差の最大値は、引き波から押し波に移行し次の峰が現れる直前で生じていた。図7は引き波から押し波に移行する際の典型的な上下面の圧力変化を示している。両面の圧力は引き波とともに降下し、押し波とともに上昇するが、このとき下面の圧力が上面の圧力より早く上昇し始めるため、この間に最大の圧力差が生じ、結果としてブロック浮上が起きることが明らかとなった。

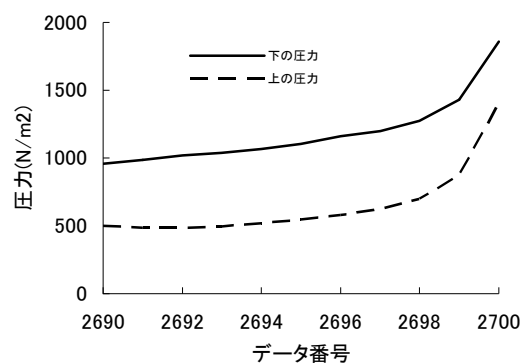


図7 上面と下面の圧力差

(2) 圧力差と流速

次に圧力差と流速の関係について述べる。一般に押し波では岸向き、引き波では冲向きの流れが発生するが、解析の結果、流速が最大、最小の箇所では、ブロックは浮上せず、圧力差も小さい。ブロック浮上が確認された時点では、冲向き方向に比較的に小さい流速を生じるのみであることから、流速の圧力差への寄与は小さいと推測される。

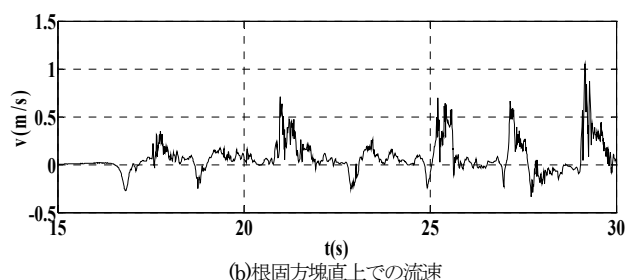
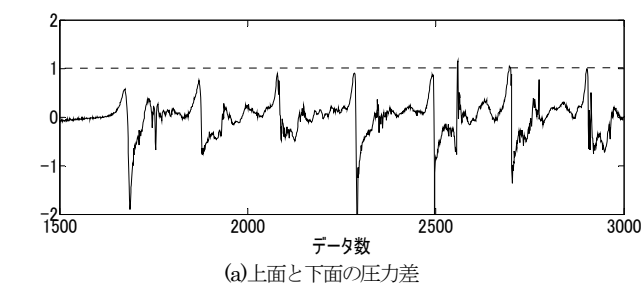


図8 圧力差と流速に関するグラフ

(3) 既往の研究との比較

現行の根固め塊の設計基準は、牛嶋ら(1988)の模型実験が基になっている。牛嶋らは、根固め塊の安定に必要な厚さは、根固め塊の厚さ t と波高 H を用いた無次元量 t/H とマウンド天端水深 d と波高 H の相対水深 d/h を用いた安定重量算定図によって推定できるとした。この結果を受けて木村ら(1992)が算出した近似式(1)が現在の設計に使用されている。

$$t/H = 0.18 \left(\frac{d}{h} \right)^{-0.787} \quad (1)$$

実験Ⅱのブロック挙動の結果と牛嶋の実験結果、木村式を比較したところ概ね一致した。木村式は、適用範囲が比較的周期の長い $h/L=0.091$ に固定されていたが、今回の実験により $h/L=0.063 \sim 0.076$ においても木村式の妥当性が確認された。

しかし、 $d/h=0.63$ では根固め塊は全て安定状態であり、また安定条件内で浮上が発生したケースもあることから、安定重量算定図と根固め塊厚さの算出式には改善すべき点があると考えられる。

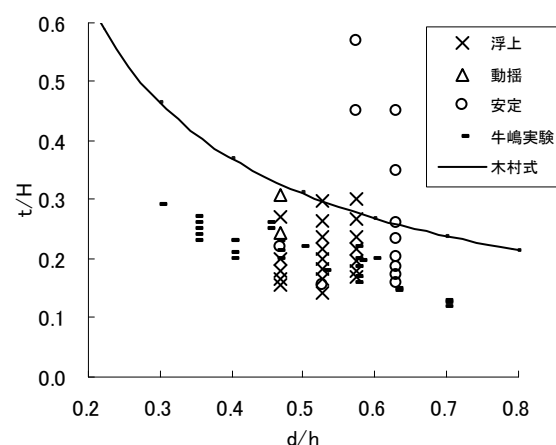


図9 結果と既往の研究との比較

4. 結論

実験で明らかになったことは以下のとおりである。

- ① 根固め塊の被災のプロセスは、動揺、浮上、傾斜、回転、飛散の順で発生し、傾斜と回転に関しては沖側の根固め塊と被覆ブロックの隙間によって発生頻度が異なる。
- ② 実験時に発生した落下流は、ブロック浮上の後に発生することから、ブロックの移動と落下流の関係性は無いものと推測される。
- ③ 引き波から押し波に移行し、水位が上がる際に方塊下面の圧力が上面の圧力より早く上がり始めるため圧力差が大きくなり、根固め塊が浮上する。
- ④ 木村の根固め塊厚さの算定式は、 $h/L=0.063 \sim 0.076$ でも適用できる。
- ⑤ ブロックの浮上が発生するときの流速は冲向き方向だが、流速の値が小さいことから方塊の移動に対する流速による影響は小さいものと考えられる。

被覆ブロックに関しては、法面部に設置した被覆ブロック前面を固定したことにより被覆ブロックの沖への移動は生じず、基礎マウンドの捨石流出や、沈下も発生しなかった。よって、法面部に設置した被覆ブロックの移動を防止することでこれらの被災は軽減できると推測される。

参考文献

- ・(社)日本港湾協会(編): 港湾の施設の技術上の基準・同解説(下), pp.851-852
- ・牛島龍一郎(1988): 根固め塊の安定性に関する実験的研究, 開発土木研究所月報, N0.424, pp.1-14
- ・木村克俊(1996): 混成堤頭部における根固め塊の耐波安定性について開発土木研究所, No.517, pp.2-8