

バーム防波堤の施工例に関する現地調査 —アイスランド、ノルウェーを調査して—

Field survey of Berm Breakwater in Iceland and Norway

大古利勝己*・市村正春**・山崎真史***・金子義勝****

OOKORI Katsumi, ICHIMURA Masaharu, YAMAZAKI Shinji and KANEKO Yoshikatsu

* 前 (財) 沿岸技術研究センター 企画部 研究員

** 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

*** 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

**** 前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員

Berm breakwater is one of rubble mound type sloping breakwater. It is build up of several size-graded layers and the largest stone class is placed on the surface of the berm to reinforce the structure. There is no case of constructing berm breakwater in Japan. Therefore we visited Iceland and Norway to investigate design philosophy and the construction method of berm breakwater.

Key Words : Berm breakwaters, Rubble mound structures, Harbor tranquility

1. はじめに

港湾において、安全かつ効率的な荷役作業や荒天時における安全な避泊を確保するために、港内静穏度の向上を図ることは必須な課題の一つである。(財)沿岸技術研究センターでは、このような課題に対処するために、水理・構造等の様々な角度から港内静穏度の向上に関する調査研究に取り組んできた。機能性、経済性、施工性の向上や、自然環境、社会環境および景観への配慮といった多様な要請に応えるために、常に新しい構造形式の防波堤の技術開発が進められている。

「バーム防波堤」と呼ばれる大粒で厚い被覆層をもつ捨石防波堤はアイスランドをはじめとする北欧に数多く見られ、日本国内には存在しない構造形式の防波堤である。図-1に通常の捨石堤とバーム防波堤の形状を示す。

そこで、アイスランドとノルウェーにあるバーム防波堤を現地踏査し、設計思想や施工方法の調査をすることで、我が国での適用の可能性等を検討した。

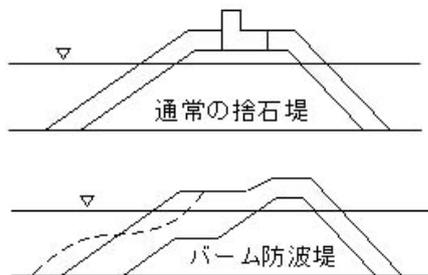


図-1 通常の捨石堤とバーム防波堤の形状

2. バーム防波堤

2.1 バーム防波堤の概要

バーム防波堤は世界で63の設置が報告されており、そ

の内の、29がアイスランド、続いてイラン8、ノルウェー6、カナダ・アメリカ4等であり、アイスランドでの施工事例が多い¹⁾。

バーム防波堤は捨石で築造される防波堤であるが、その原型は19世紀頃のプリマス港(イギリス)、シェルブール港(フランス)等である¹⁾。通常の捨石堤とは形状が異なり小段を有し、大粒形で厚い被覆層を持つ。バーム防波堤とは、小段の捨石断面が年月とともに浸食を受けてS字型を形成することにその名を由来している。急傾斜の従来型の捨石堤では波の作用による影響が生じやすいが、バーム防波堤は被覆層厚を増すことで消波効果を増大し、緩傾斜とすることで個々の石に作用する波力を低減している。

2.2 バーム防波堤の分類

アイスランドにおけるバーム防波堤の中心的な技術者であるシガーダソン等は、バーム防波堤を以下の3つのタイプに分類している²⁾。

① 静的に安定で、変形しない構造

通常の捨石構造の防波堤と類似しており、被覆石、捨石等が法面上を移動しないタイプ。

② 静的に安定で、変形する構造

個々の捨石は波力に対して安定であるが、断面中の変形を許容されたタイプ。

③ 動的に安定で、変形する構造

断面が波力を受けるうちに次第に安定したS字型断面へと変形するタイプであり、被覆石、捨石等が法面上を移動することを許容されたタイプ。

バーム防波堤は、基本的に変形することを許容されており、安定な構造へと変形していくと考えられている。この構造は、図-2に示すような1980年代の初期に採用

されたものを原型としている。設計思想としては、港を防護することは当然であるが、採石場において産出される捨石を、防波堤建設にできるだけ利用することである。

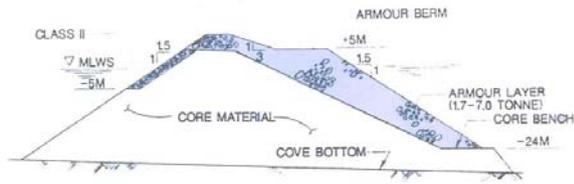


図-2 バーム防波堤原型の概要

①の構造の設計目的は、設置された捨石を完全に保持することであるが、いくつかの小さな変形については許容されている。この構造は、バーム防波堤の原型を元に研究され、時に「アイスランドタイプ」と呼ばれ、静的に安定なバーム防波堤として導入された。アイスランドタイプは、これまで2つのクラスに分類されていた捨石を、7つのクラスに分類している。その最も大きなクラスの捨石は、防波堤を強固なものとするために被覆層に設置するとともに、全体の捨石容量も削減し、より経済的で安定した断面としている。

構造諸元は、設計波に対する許容後退量を指標として決定される場合がある。許容後退量は、理論的、経験的な天端幅の決定方法であり、法面の後退が天端幅の水平部分には及ばないようにするものである。後述するシーレボーク防波堤については、100年確率波に対して、後退量4.3mと設計されている。図-3に後退量の概念図を示す。

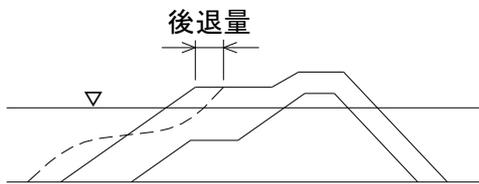


図-3 後退量の概念図

2.3 シーレボークバーム防波堤

変形して安定する構造とは一体どのようなものであるか。今回訪れたシーレボーク港にて現地状況を調査した。シーレボーク港は、ノルウェーの西海岸、スタバングル市の南約50kmに位置する幅の小さい入り江の漁港であり、港外には、リーフや浅瀬はない。同港のバーム防波堤は静穏度確保および用地拡大を目的に、2000年1月に建設が始まり2001年7月に完成している。写真-1,2にシーレボークバーム防波堤の全景ならびに現地調査時に撮影した写真を示す。

シーレボーク港は北極海からの大きな波に曝されており、100年確率波(有義波高 $H_s=7.0m$, 有義波周期 $T_p=14.2s$)に対して、静的に安定なアイスランドタイプのバーム防波堤として設計され、防波堤総延長約500m,

堤頭部の水深約17m, 総捨石使用量640,000 m^3 である。防波堤断面は図-4に示すような多層構造で、様々なクラスの捨石を使用しており、捨石の粒径が大きいものほど、大きな波力を受けるバームの表層に設置されている。図-4の断面中のIに設置する捨石質量は写真-3のような大きさと20~30t, IIは10~20t, IIIは4~10tである。



写真-1 シーレボーク港の全景 (ICS2005より掲載)



写真-2 シーレボーク港バーム防波堤(堤頭部より)



写真-3 シーレボークバーム防波堤の断面I部の捨石

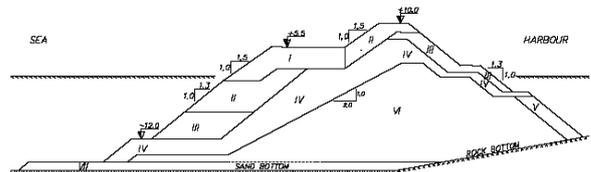


図-4 シーレボークバーム防波堤の断面図

シーレボーク港バーム防波堤は、施工が終わった6ヶ月後の2002年1月と2005年1月の2度にわたり設計波(100年確率波)に達する台風が来襲した。2002年の台風時には、余り変形はなかったが、2005年の台風時には被害を受けている。図-5に被災箇所を平面図を示す。

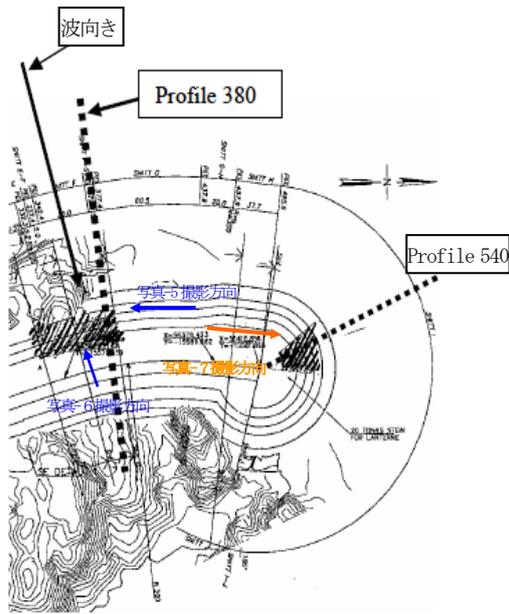


図-5 シーレボグバーム防波堤被災箇所平面図

写真-4 は現地の Profile380 周辺を堤頭部側から防波堤基部方向に、写真-5 は天端部から撮影したものである。完成断面としては、赤い破線で示す形状であったと考えられるが、実線で示すような形状に変形している。小段より下部には変形が見られるが、それより上部や天端高には影響がない状況が確認できた。



写真-4 Profile380 (堤頭部側から撮影)



写真-5 Profile380 (天端部から撮影)

また、写真-6 は堤頭部 Profile540 周辺である。こちらも、小段がなくなるほど大きく変形しているが Profile380 周辺と同様に、小段より上部には変形はなく、

天端高も確保されている。小段より下部の捨石は海中に移動し、結果的により緩傾斜な法面勾配となり、個々の捨石における安定性は増加している状況がうかがえた。



写真-6 Profile540

シーレボグ防波堤は、安定性モデル試験が行われている。モデル試験の結果から、設計波に達する台風が来襲した場合は、バームにかなりの後退があると予測されていた。しかしながら、実際の被災状況は、それよりもかなり小さなものであった。これは、モデル試験では乱積みされている被覆層の捨石が、実際の施工においては、互いの捨石の噛み合わせを重視して施工されているためと考えられている。

我々も現地において、防波堤先端まで歩行により調査を行ない、被覆層は、それぞれの捨石が動かないように互いの位置関係を考慮しながら施工された状況を確認することができた。

このように設計されるバーム防波堤の捨石質量について、他の構造形式の塊重量と比較したものが表-1 である。シーレボグバーム防波堤は、テトラポッド使用時よりも重量が軽くて済むと同時に、1 万年確率波 (有義波高 $H_s=9.3\text{m}$) に対しても、変形し安定する構造であることがわかる。

表-1 塊重量比較表

	シーレボグ港 バーム防波堤	通常の捨石	テトラポッド堤
100 年確率波 $H_s=7.0\text{m}$	25t	43t	30t
	後退量 4.3m	法面勾配=1:2 被災率 S=2	法面勾配=1:1.5
10000 年確率波 $H_s=9.3\text{m}$	25t	112t	69t
	後退量 8.3m	法面勾配=1:2 被災率 S=2	法面勾配=1:1.5

2.4 ケフラビーク港・グランダビーク港の調査

アイスランドにおいては、ケフラビーク港ならびにグランダビーク港のバーム防波堤を現地調査した。

ケフラビーク港は、アイスランドの首都レイキャビークの南西約 40km の位置にあり、軍事物資の輸送基地として整備された。

アイスランドタイプであるバーム構造の防波堤が採用されており、港周辺の採石場で産出した材料を使用している。

ケフラビーク港バーム防波堤の被覆石には、5~8t の捨石が使用されており、背後が軍用施設であるために幅広い断面となっている。写真-7 に現地調査時に撮影した写真を示す。



写真-7 ケフラビーク港バーム防波堤

また、グランダビーク港は、ケフラビーク港よりも南方約20kmの位置にある漁港である。元々、漁港への入り口は狭く水深に限界がある上に、漁港に入港するためには2度曲がる必要がある過酷な条件であった。そのため、十分な模型実験を踏まえ、港内を護るために両側にバーム防波堤を建設し、直線が入港する水路が確保された。図-6にグランダビーク港のバーム防波堤平面図を示す。

現地調査においても、写真-8のようにバーム防波堤外側では、波が押し寄せ、バーム防波堤の前面で碎波しているが、港内側の静穏度は確保されている状況が確認できた。



図-6 グランダビークバーム防波堤平面図



写真-8 グランダビーク港バーム防波堤

3. おわりに

今回の現地調査においては、バーム防波堤の現地調査に先立ち、アイスランドのホフン市において、6月5日～8日の日程で開催されたICS2005に参加し、バーム防波堤に関する最新の研究成果について知見を収集した。

バーム防波堤は、今回調査した各港とも、材料である捨石を産出する採石場が港の直近に存在し、その輸送コストは非常に小さいと考えられる。特にシーレボーグバ

ーム防波堤については、港湾内の岩山を材料とすることで、バーム防波堤を施工すると同時に港湾施設用地を造成することが可能であるという利点もあった。また、その建設コストは1,200円/m³程度と我が国では考えられない安価なものであった。

実際に現地調査の移動中にも、数多くの岩山や岩盤の海岸線を見ることができた。我が国が、狭い領土の中で埋立てを行い、平地を確保してきた歴史があるように、アイスランドやノルウェーにおいて、岩石を切り崩し施設整備を行うとともに、それを防波堤として利用することは当然のことだと思われた。

一般的にバーム防波堤は大断面となり、我が国で建設した場合には、かなりの高価格となり、経済性と港湾の利便性において他形式に劣ると考えざるを得ない。また、材料の生産場所や輸送コストも考慮すると、施工できる場所も限定されると考えられる。しかしながら、芯材に破壊したコンクリートの残骸を利用すると廃棄物処理にもなることや、この種の防波堤は魚礁としても活用できること、さらに、我が国では、現在、防波堤の設計は通常50年確率波を対象としており、性能設計への移行、ライフサイクルコストを考慮した時の耐用年数の考え方(50年から100年とした場合)から、ケーソン式と比較しバーム構造は被災時の修復が容易であること等を考慮すると、将来においてバーム防波堤適用の可能性はあるのではないかと考えられる。

4. 謝辞

本調査の実施に際しては、当時、(独)港湾空港技術研究所の地盤・構造部長であった白石氏をはじめ、アイスランドの防波堤を案内して頂いたアイスランド港湾局のシガーダソン氏ならびにノルウェーシーレボーグバーム防波堤を案内して頂いたノルウェーシーレボーグ港管理責任者のシューセン氏には大変お世話になりました。また、ICS2005に参加しておられた鳥取大学 上田教授、京都大学 高山教授、(独)港湾空港技術研究所 栗山室長ならびに、CDIT機関誌(No. 18 2005)に掲載した際に、ご意見を頂いた(財)災害科学研究所の榎木所長にも大変お世話になりました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) S. Sigurdarson, O. B. Smarason and G. Viggosson: Port Engineering, 5th edition, Chapter3 Berm Breakwater 2003
- 2) Sigurdur Sigurdarson et al :Sirevag Berm Breakwater, design, construction and experience after design storm. Coastal Structure 2003, Portland, Oregon, ASCE
- 3) ギリス・ピガソン, シガーダ・シガーダソン (以上 アイスランド港湾局), 上田茂訳:アイスランドの捨石防波堤(バームタイプ防波堤), (財)沿岸技術研究センター機関誌 1993