

# 小樽港北防波堤の国際的評価

## A STUDY ON INTERNATIONAL EVALUATION FOR THE NORTH BREAKWATER OF OTARU HARBOUR

関口信一郎<sup>1</sup>・浅田英祺<sup>2</sup>・富岡直基<sup>3</sup>・本山賢司<sup>4</sup>・林誉命<sup>5</sup>  
 Shin-ichiro SEKIGUCHI, Hideki ASADA, Naoki TOMIOKA, Kenji MOTOYAMA  
 and Takanori HAYASI

<sup>1</sup>正会員 工博 (財) 港湾空港建設技術サービスセンター (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目)

<sup>2</sup>正会員 北海道総合研究所 (〒069-0853 江別市大麻高町19-4)

<sup>3</sup>国土交通省北海道開発局小樽港湾事務所 (〒047-0008 小樽市築港2-2)

<sup>4</sup>国土交通省北海道開発局小樽港湾事務所 (〒047-0008 小樽市築港2-2)

<sup>5</sup>国土交通省北海道開発局網走港湾事務所 (〒093-0032 網走市港3)

The North breakwater of Otaru Harbour, which was designed and constructed by Japanese engineers in Meiji Period, was the first modern breakwater facing the open sea in Japan. It has not yet been evaluated in the history of harbour construction throughout the world. The North breakwater in Otaru City is well known to have been constructed by sloping block system which was one of the most mechanical construction methods in those days.

The present study addresses that Colombo breakwater was the complete form of breakwater constructed by sloping block system and the model of the North breakwater. To evaluate the North breakwater, we compared the technical level of the North breakwater with that of the Colombo breakwater by some essential factors of harbour construction technology in the 19<sup>th</sup> century in the world. The study results reveals that the former was superior to the latter in terms of three engineering factors and that the highest technology was adopted in the construction of the North breakwater of Otaru Harbour.

**Key Words :** *sloping block system, Colombo breakwater, estimation of wave forces, concrete under seawater, pell-mell concrete block*

### 1. はじめに

近代における大防波堤工事は1687年に起工した軍港シェルブールを始まりとするが, 本格的な防波堤建設は1800年以降である. 1857~71年の間にドウバーにおいて初めて純然な直立防波堤が築造され, 1869~73年に築造

されたマノラ防波堤はスローピングブロックシステムの有用性を明示し, 1891年にいたってコペンハーゲンおよびハイストにおいて大形のケーソンを製作・曳航・沈設してその内部にコンクリートを填充する方法が実行された.

構造がもつとも単純な捨石堤を初めとし漸次進化し

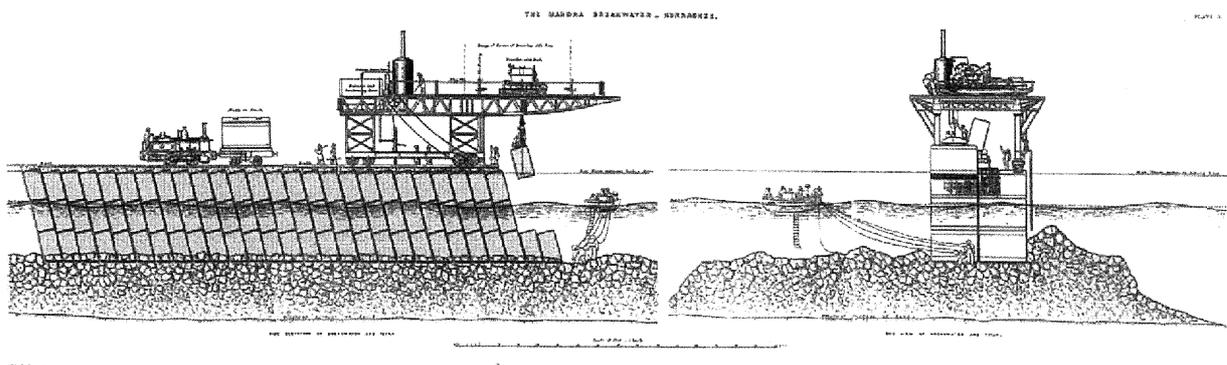


図-1 マノラ港 (カラチ) 防波堤の建設<sup>1)</sup>

て直立堤および混成堤に至るプロセスは、幾多の失敗を教訓とした歴史の上に築かれた。特に海中構造物に対する波浪の動作の解明、耐海水性の大きいコンクリートの製造、海中構造物の構築法は重要かつ緊急な課題であった。

小樽港北防波堤（以下、北防波堤と称す）は廣井勇博士が西洋から移植した科学と技術をもとに創意と工夫を凝らして建設した我が国最初の本格的な外洋防波堤である。それを世界で展開された築港の歴史に位置づけることが本研究の最終目的である。

本稿では防波堤の建設における技術水準を評価の視点として北防波堤を位置づける。その方法は次の通りである。

①近代の代表的防波堤のひとつであるコロombo港防波堤が当時の最先端技術であるスローピングブロックシステムによって建設された防波堤の完成形であることを明らかにする。

②北防波堤はコロombo港防波堤をモデルとしていることを明らかにする。

③1800年代以降、緊急の技術的課題であった波力の推定、コンクリートの耐海水性、耐波機能について両防波堤を比較し北防波堤を評価する。

## 2. スローピングブロックシステムによる築堤

### (1) スローピングブロックシステム

スローピングブロックシステムは軌道上を運搬されてきた斜塊（スローピングブロック）を防波堤の端より積層機（通称Titan）によって上下一直線に積み上げて造り進む工法である（図-1）。防波堤の法線方向においては隣層の斜塊はその重量によって後面において相接し、また捨石の沈定に伴い滑下して固定する。それに加えて塊は後方に寄りかかり波力に抗してその位置を保持できるので毎期工事の終わりににおいて終端を防御することは水平積みと比較して容易である点に特長がある。

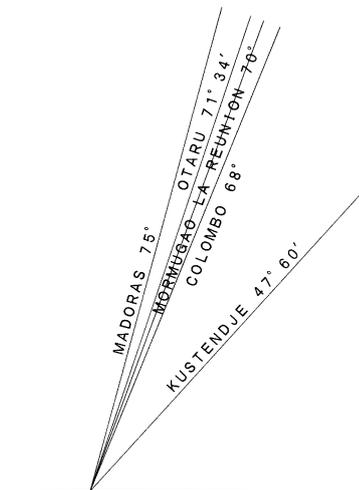


図-2 斜塊の角度

斜塊の角度は水平に対して小さいほど隣層のもたれかかりが大きくなり堅固になるが正確に積み上げにくくなり、さらに斜塊が滑下しにくくなる。それまでの工事例では47° から76° である（図-2）。

### (2) マノラ港およびマドラス港防波堤

スローピングブロックシステムが大規模な工事に採用されたのはマノラ港が初めてであったが、この工法は新規なものではなく、それ以前から用いられていた。その防波堤の特徴は2列の斜塊とその節が上下に通った断面（straight joint）にあった。その設計思想はマウンドや地盤の変形に対し、防波堤を構成する斜塊が法線方向および直角方向に柔軟に対応するところにあった（図-3）。そのため上部工を設けない。

1876年に工事が始まったマドラス港においてもマノラ港の設計思想が受け継がれ、斜塊の前後および上下面に凹凸を設けて接合したものの、その他何らの繋合も施されなかった。両防波堤は塊の一体性が弱いため波浪および地盤の変形に対して脆弱な構造となっている。1881年、完成間近のマドラス港はモンスーンによって大災害を被ることになる。

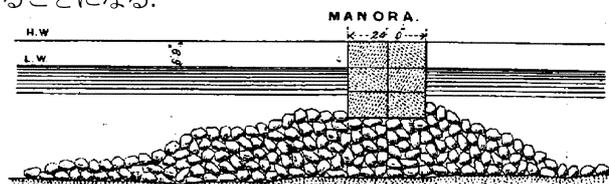


図-3 マノラ港 防波堤 断面図<sup>2)</sup>

### (3) コロombo港防波堤

マノラ港防波堤の弱点については当時の英国土木学会における最高権威のメンバーから指摘があったが上記両防波堤の設計者であるパークス(W. Parkes)は自説を曲げなかった。

最高権威の一人であるクード卿(Sir J. Coode)が設計したコロombo港防波堤は、マドラス港防波堤とほぼ同時期に起工され、建設当初からライバルとみられていた。コロombo港防波堤の断面は、斜塊に凹凸を設け塊の節を乱し楔(joggle joint)、錬鉄製のレールによって隣層の塊と繋合(cramp)した後、場所詰めコンクリートによって上部工を施工し(capping)堅固な一体化を図る構造になっている（図-4）。コロombo港防波堤の建設によって、スローピングブロックシステムによる設計法が確立したとみることができる。

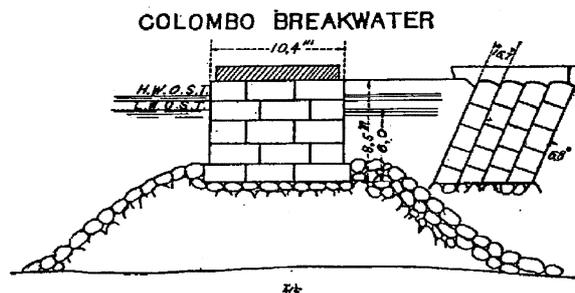


図-4 コロombo港 防波堤 断面図<sup>3)</sup>

### 3. 北防波堤のモデル

廣井勇博士が函館港改良工事や北防波堤建設工事などを監督するにあたり部下の青年技術者に築港工事に関する研究の針路を指示するために著した「築港」においてスローピングブロックシステムによって建設された防波堤としてコロombo, マドラス, マノラ, クステンジー, モウムガオの各港が記述されている(図-5). そのうち港形および防波堤構造が詳述されているのは前2者である. クステンジー港防波堤はマノラ港とは独立に同時期に開発された別システムによって建設され, 斜塊の角度も水平に対し $47^\circ$ と大きい(図-2). モウムガオ港の場合は断面が北防波堤と近似しているが, 斜塊の整合が異なる. マドラス港は既述したように構造が脆弱で, かつ漂砂対策が不完全な失敗例である. 築港の模範的事例として取り上げられているのは唯一コロombo港である.

コロombo港は港形が北防波堤と同形であり(図-6, 図-7)「日本築港史」において小樽港の港口を検討するに際しても参考にしてきたことを伺える以下のような記述がある.

尚ホ外構ニ關シテハ既ニ記シタル如ク港口ノ施設に缺クル處アルヲ以テ波浪ノ侵入甚タシキコトアリ此事タルヤ古倫母港ニ於ケル經驗ニ徴シ豫想セサリシニハ非スト雖モ本港ハ開敞ノ度ニ於テ減スル處アルヲ以テ築堤終了後ノ結果ニ觀ントシタルモノナリ

HARBOUR OF COLOMBO

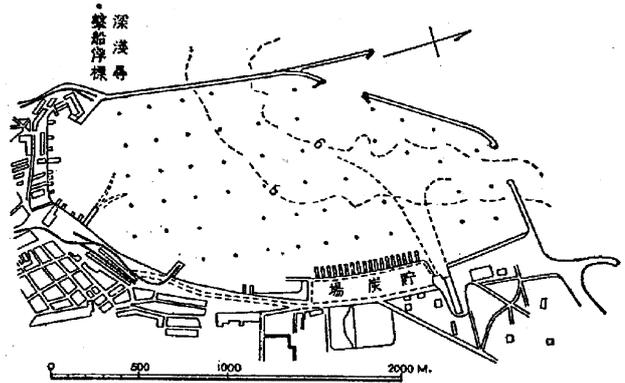


図-6 コロombo港<sup>3)</sup>

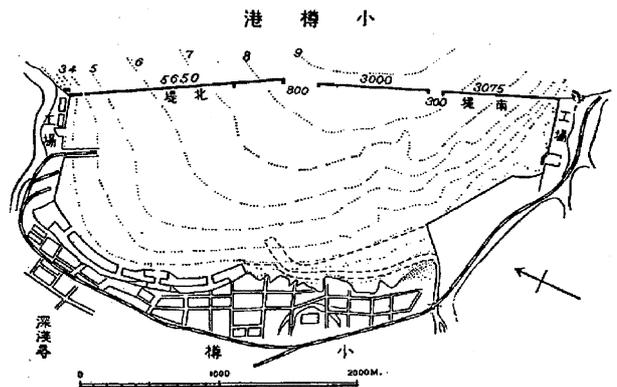
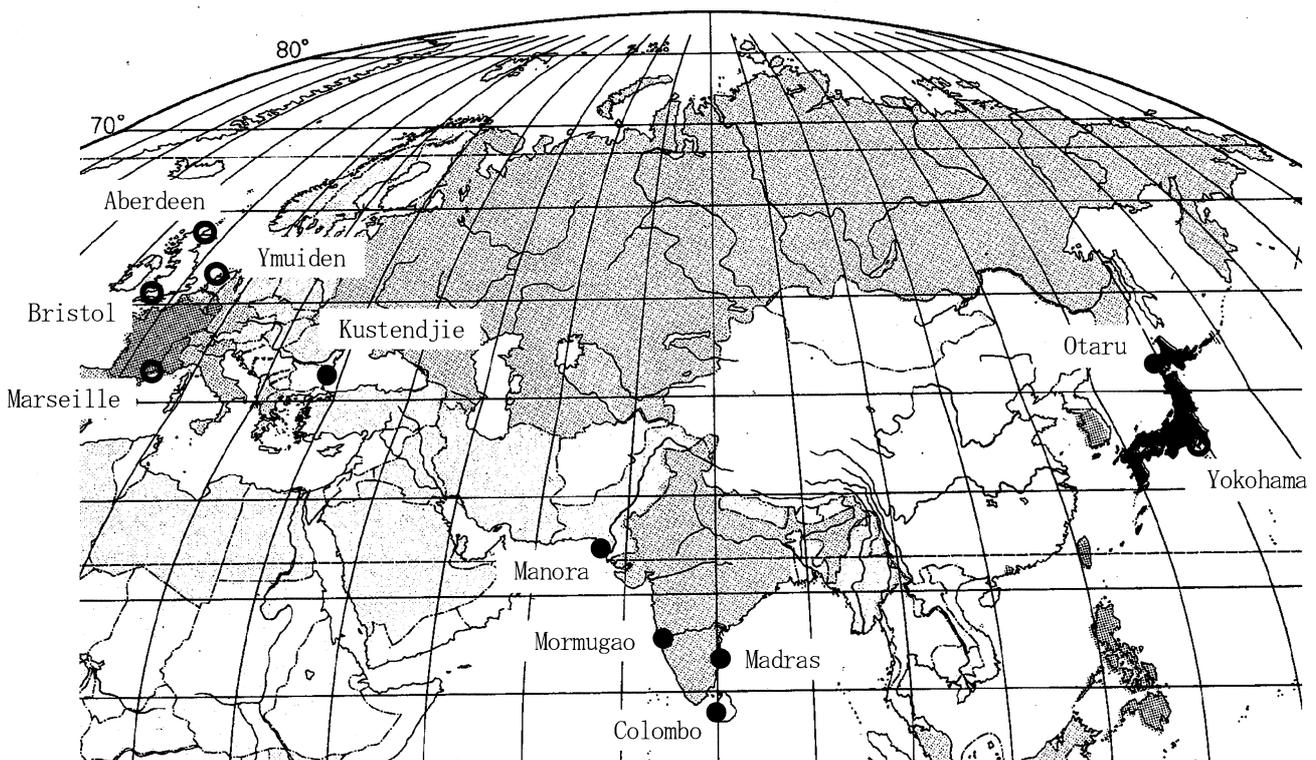


図-7 小樽港<sup>3)</sup>



— 凡 例 —  
 ● : スローピングブロックシステムによる建設港  
 ○ : コンクリート塊の崩壊が発生した港

図-5 港湾の位置<sup>4)</sup>

(現代語訳) なお、外構に関しては、既に記述したように、港口の施設に欠けるところがあるから、波浪の侵入が甚だしいことがある。この点については、コロンボ港における経験に照し、予想しなかったわけではないのであるが、本港は開敞の度合いが小さいところがあるため、築堤終了後の結果を觀ようとしたものである。

北防波堤丙部の断面は図-8に示すように塊の節を乱し繋合方法もコロンボ港防波堤と近似している。さらに「築港」においては波力の推定法を検証するに際しコロンボ港防波堤における堤体幅の設計変更を参考にした記述がある。

以上述べたことから、北防波堤はコロンボ港がモデルであることは明らかである。

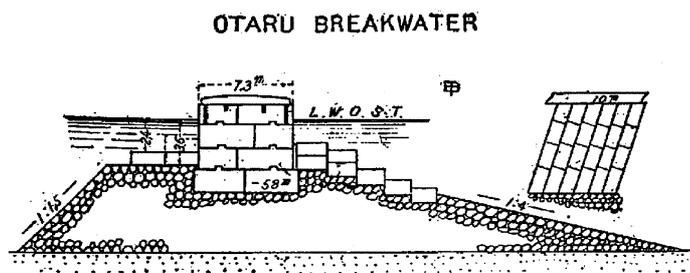


図-8 小樽港 北防波堤 断面図<sup>9)</sup>

#### 4. 国際的評価の方法

##### (1) 廣井博士 苦心惨憺の結晶

欧米の最先端の土木工学を修得し周到な準備のもとに、満を持して我が国初の本格的な外洋防波堤の建設に邁進した廣井博士にして、予想を遙かに超えた自然の威力との10年にわたる舌筆に尽くしがたい壮絶な苦闘が待ち受けていた。

要スルニ本工事ハ僅カニ一條ノ築堤ニ過キスト雖モ施工上ノ困難ト歳月ノ多キヲ要セルコト他ニ多ク其比類ヲ觀サル所ニシテ其工費ノ如キ堤一尺ニ附約五百圓ニ該リ一見多額ノ費用ヲ要セルカ如シト雖モ諸外國ニ於ケル同種工事ニ比スルトキハ亦タ頗ル廉價ナルヲ認ムル所ナリ(「小樽築港工事報文 前編」)

(現代語訳) 要するに本工事は単に一条の築堤にすぎないといっても、施工をする上での困難なことと長い歳月を要したことは他に多くその例を觀ない。またその工費にいたって防波堤一尺(約30.30cm)が約五百円にあたり一見多額の費用を要したようであるけれども諸外国における同種工事に比べると極めて廉価であることを認めるところである。

予算の制約がある中で北防波堤を完成に導いた幾つか

の要素がある。そのうち特に工学的に重要な3要素を評価項目として選定し、19世紀の代表的防波堤であり北防波堤のモデルとなったコロンボ港防波堤と比較する方法によって、世界の防波堤建設における北防波堤の工学的評価を行う。評価項目は①波力の推定②耐海水性の高いコンクリートの製造③耐波性の高い防波堤構造である。

##### (2) 波力の推定

1800年に入って諸外国では国防上あるいは通商上港湾の重要性を認識して大規模な築港工事に乗り出した。しかし波浪の動作が未解明であったために、防波堤の建設はそれまでの工事例を参考にしながら進められたようである。防波堤における堤体幅の決定も例外ではなかった。

コロンボ港防波堤においては築堤を始めて基点より約400mに達した時点で被災を受け堤体幅を7.3mから10.7mに設計変更した。

それに対し、北防波堤の堤体幅および斜塊の重量は波力の計算から導かれている。工学会における小樽築港工事の演説において廣井博士は次のように述べている。

(前略) 二四尺ト云フノ大海ニ向ッテヤル防波堤ニハ随分小サイ方デアアルマシテ、殆ト例ノ無イ位ノ細イノデアリマス、是ハ非常ニ大キクシテ置ケバ安全ニハ相違アリマセヌガ、小樽港ニ政府カラ出シテ呉レル金ハ凡ソ分ッテ居リマシテソレニ對シテヤラナケレバナラヌノデアリマスカラ、思フ存分ナコトハ出来マセヌ、詰リ波動ノ計算上漸ク許スト云フダケノ幅ニシタノデアリマス。

(中略) 詳細ハ「築港」ニ記シテ置キマシタ

(現代語訳) 24尺(7.27m)というのは大海に向かって造る防波堤には随分小さい方であり殆ど例のないくらい細いのです。これは非常に大きくしておけば安全には相違ありませんが、小樽港に政府から出してくれる金額はおおよそわかっておりますから、思う存分なことは出来ません。つまり波動の計算上ようやく許すだけの幅にしたのです。(中略) 詳細は「築港」に記述しておきました。

(下線は筆者による)

世界でも例のないほど細い、大海に向かう防波堤は波動の計算によって可能となった。

「築港」においては波力の計算を次のように展開する。すなわち、波動の衝突によって生じる圧力計算の方法は射水が衝突する場合に等しく式(1a)で表される。したがって波浪の動力はその速度、すなわち大海にあつては長さにより浅い所では高さおよび水深による。

$$p = \frac{\omega v^2}{g} \quad (1a)$$

ここに

g : 重力加速度(m/sec<sup>2</sup>)

v : 射水速度(m/sec)

$\omega$  : 水の重量 (tf/m<sup>3</sup>)

$p$  : 衝突により生ずる圧力 (tf/m<sup>2</sup>)

防波堤における波浪衝突の圧力を計算するには、その付近の深さをもって波浪の高さとし、ラッセルが案出した水深が特に浅い場合の波動に対する速度の式(1b)により速度を計算し、水分子の速度を波浪の速度と等しいとして式(1a)により計算して平均圧力を得ることが出来る。波頭における最高圧力はその値を超えるものがある。

$$v = \sqrt{g \left( d + \frac{h}{2} \right)} \quad (1b)$$

ここに

$v$  : 波の速度 (m/sec)

$d$  : 水深 (m)

$h$  : 波の高さ (m)

上述の式を展開した結果求められる波力式は、廣井博士が1919年に東京帝国大学工学部紀要に発表した波力式  $p = 1.5\omega h$  (通称、廣井式) と同形になる。

廣井博士はこの波力式の妥当性を函館港、コロンボ港等の実例をもとに確認し北防波堤の設計に採用した。廣井博士は1899年以降、東京帝国大学教授を本務とし北海道庁技師を兼務としており、上述の波力式はそれ以後、北海道諸港の防波堤設計に用いられた。翌年には港湾に関する重要事項を決定する港湾調査会委員を命ぜられていること、および「築港」が出版されていることから、全国の防波堤建設に用いられた可能性は小さくない。

波力の推計が可能になったことによる、工学上の進歩および経済的防波堤建設に対する貢献は極めて大きい。

### (3) 耐海水性の高いコンクリートの製造

1892年に発見された横浜港におけるコンクリート塊の崩壊と同様の被害は、欧州にあってはオランダのアムイデンを始めとしアバジーン、マルセーユ、ブリストル等においても発生しており、フランスにおいてはカンゾロー、ドイツ国ではミハエリス等により研究が進められた(図-5)。コンクリート塊の耐海水性は緊急かつ重要な課題であった。

ポルトランドセメントは硬化に際し多量の水化石灰を遊離させ、海水中に含まれる硫酸マグネシウムの作用によって生じた硫酸石灰は結晶するとその容積がもとの石灰と比較し大きく膨張し全体が分壊していく。しかしその現象は一般に表面にとどまり、一度凝結した密な塊の中を侵すことはない。もし品質不良なモルタルを海水に浸す前に十分に凝結させなかった場合にはもっとも速やかに海水の作用が現れる。またどのようなモルタルであろうとも砂礫に混ぜ全体に夥多の空隙が存在する場合、もしくは層を形成して搗き固めたものを海水に浸した時は海水が透入してついに破壊される。コンクリート塊の亀裂および崩壊はこれが原因であることを後年、廣井博士は結論づけている。

廣井博士がコンクリートに取り組む特徴的な姿勢は、使用する材料の質・配合・製法・処理の全てに配慮が行き届き系統的に研究・実験を行って照査・確認・評価をした上で実際に応用している点にある。

もっとも安全なモルタルの配合は実験およびラ・ロシェーユ港の事例からセメント1・砂2の配合であるとした。コンクリートの配合(積量)は当初、セメント1・砂2・砂利碎石4、1902年からは耐海水性および経費低減のため世界で初めて大規模に火山灰を用いることとし、本塊についてはセメント1・火山灰0.8・砂3.2・砂利碎石6.4の構成とした。コロンボ港の場合はセメント1・砂2・碎石6の配合であった。

コロンボ港を始め英国の諸港が自然自重によって圧迫してコンクリート塊を製造する練り込み法に依ったのに対し、搗き固め法によって密度が高く耐海水性の優れたコンクリート塊を製造した。

後年、廣井博士は小樽、函館両港の築港工事のため製造したコンクリート塊について、火山灰の有無にかかわらず、いささかの異常もなく固結の度を増進しているようで特に外面はことごとく海草に覆われて海水の侵入を防いでいるなど耐久性については天然の石材と変わらないと結論づけている。

北防波堤は他に例がないほど高密度で耐海水性の優れたコンクリート塊を製造している。

### (4) 耐波性の高い防波堤構造

コロンボ港防波堤が経験から堤体幅を決定しているのに対し、北防波堤は波力の計算から堤体幅を決定し波力計によって計測しながら対応策をとる極めて科学的なアプローチを採用している。

波力計ノ示度ハ意外ニ高く往々一方米ニ對シ四十噸ニ達セルコトアリテ將來堤ノ安固上頗ル寒心スヘキモノアリ (小樽築港工事報文 前編)

(現代語訳) 波力計の示度は意外に高く往々1m<sup>2</sup>に対し40トンに達することがあり将来防波堤の安定上極めて心配なものがあつた。

そこで堤終端より2200尺にわたって堤の背面において捨石の高さを高くして堤がすり動くのに対抗させ、堤頂の場所詰コンクリートに鉄筋数条を加えて臥桁として効用を発揮させた。

堤の高さは当初9尺としていたが6尺以上とする必要がないこと、および高さを増すと波撃の反動がますます強烈になる不利があることから6尺から6尺7寸とした。

堤の前面には階段状に方塊(捨塊)を配置し捨石の移動を防ぎ、かつ激浪の衝突力を減利することにして、堤の背面にも塊2列を配置し、堤頂を超え構内に直降する水勢に対し捨石を保護し堤を支える効果も持たせている。

捨塊を用いて防波堤を建設する方法は特に地中海の諸港において広く採用された(図-9)。特にイタリアにおい

ては方塊を階段状に配置する方法が普及した。捨塊に切欠を設けたり (図-10) やや後方に傾斜させ、より安定させる方法 (図-11) もとられた。

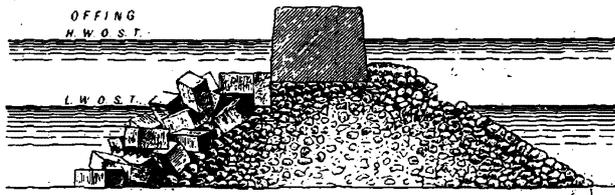


図-9 捨塊によるマウンドの根固<sup>6)</sup>

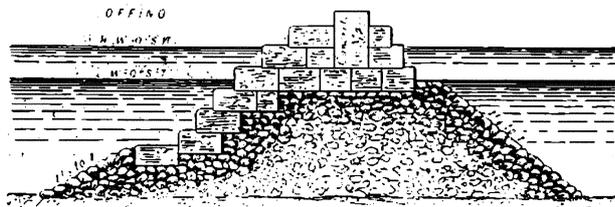


図-10 階段状捨塊堤<sup>7)</sup>

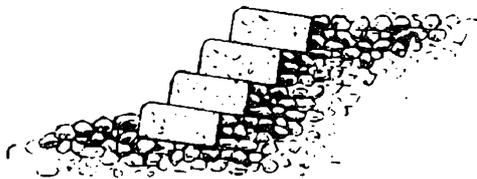


図-11 傾斜捨塊<sup>7)</sup>

堤の前面に塊を階段状に積み上げる方法は普通の投入法と比較して費用がかさみ、直立に積み上げたものと比較すると下層において上層の重量を受けない欠点がある。それにもかかわらず採用される理由は、砕波の効果が大きいことおよび捨石の量を減ずることができる点にある。

北防波堤の場合は根固めに砕波の効用を持たせたものであるが、上記の欠点に加え一部の塊が脱落した場合、全体の崩壊につながる可能性をも回避できる利点がある。Schlzuは、堤前面の階段状方塊についてやりすぎがあったかもしれないと指摘している (図-12)。コロombo港の場合は根固めに袋詰コンクリートを配置している。

すなわち、北防波堤の場合は計算によって堤体幅を決定しているために堤体幅に余裕がないので、堤の前面および背後に方塊を配置して波動の動作による堤体および捨石への影響を小さくして耐波性の向上を図っている。

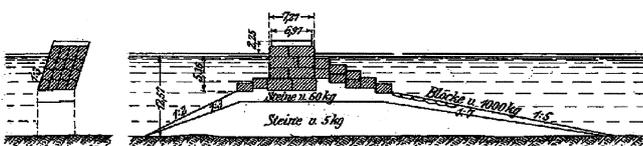


図-12 北防波堤の塊配置<sup>8)</sup>

## 5. 結論

- 1) コロンボ港防波堤は当時の最先端技術であるスローピングブロックシステムを採用した防波堤の完成形である。
- 2) コロンボ港防波堤は北防波堤のモデルである。
- 3) ①波力の推定②耐海水性コンクリートの製造③耐波性に優れた防波堤構造の3評価項目による国際的評価の方法を提示した。
- 4) 北防波堤はコロombo港防波堤と比較し、3評価項目とも優れた技術によって建設されており、その技術水準は国際的にみて極めて高い。
- 5) 北防波堤は当時における最高技術を用いた防波堤である。

謝辞：(独) 港湾空港技術研究所耐波研究室 下迫健一郎室長より資料の提供を頂いたことに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 浅田英祺：シビルエンジニア廣井勇の世界、北海道開発局小樽開発建設部、表紙、1999。
- 2) L.F.Vernon-harcourt: *Harbours and docks*, vol.II, Clarendon press, plate 7, 1895.
- 3) 文献1), 裏表紙。
- 4) GRAND NEW WORLD ATLAS, 全教出版株式会社, 1992.
- 5) 文献1), 裏表紙。
- 6) William Shield: *Harbour construction*, Longmans, Green, & Co., p.211, 1895.
- 7) 文献6), p.213.
- 8) F.W.Otto Schulze: *Seehafenbau Band II, Ausbau der Seehafen*, p.79, 1913.
- 9) 廣井勇：築港前編 第4版, 丸善株式會社, 1924.
- 10) L.F.Vernon-harcourt: *Harbours and docks*, vol.I, Clarendon press, 1884.
- 11) Brysson Cunningham: *Harbour engineering*, Charles griffin & company, limited, 1908.
- 12) Hugh Henry Gorodon Mitchel: *The alternation of the form of Madras harbour*, *Minutes of proceedings*, No.4012.
- 13) William Henry Price: *The Manora breakwater, Kurrachee*, *Minutes of proceedings*, vol.XLIII, 1875.
- 14) John Kyle: *Colonbo harbour works, Ceylon*, *Minutes of proceedings*, vol.LXXXVII, No.2164, pp.76-91, 1886.
- 15) 廣井勇：日本築港史, 丸善株式會社, 1927
- 16) 北海道廳：小樽築港報文 前編, 1908.
- 17) 廣井勇：「小樽築港工事」演説, 工學會誌, 217巻, 1900.
- 18) 廣井勇：築港 卷之一, 工學書院, 1898.