

遺産としての小樽港北防波堤の 修復方法について

Research on the Restoration of the North Breakwater at Otaru Port as Heritage

関口信一郎¹
Shin-ichiro SEKIGUCHI

1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)

The north breakwater at the Otaru Port, constructed from 1897 to 1908, is a part of our civil engineering heritage and widely known as Japan's first authentic open-sea breakwater. Recent research has found that its foot protection concrete blocks have been displaced and the mound has been deformed. Should it be left as it is, the vertical superstructure might collapse due to scouring. It was therefore decided that the structure would be restored. In the restored structure, the foot protection concrete blocks and the mound should be more stable than the existing ones, because they will be subject to raging waves for many years to come. Restoration worked based on the structure's original design, an approach generally taken in renovating historical buildings, is not appropriate in this case. This paper discusses a basic concept for the restoration project of the north breakwater.

Key Words : Dr.Isami Hiroi, original design, basic concept, foot concrete blocks, mound

1. はじめに

我が国に近代築港の科学と技術が完全な形で具現化されたのは、1897年～1908年に建設された小樽港北防波堤（以後、北防波堤と称す）をもって始まりとする（図-1、写真-1）。北防波堤は延長 1289m、構造断面は3種類に分かれ、主要断面は延長 1098.2m（図-2）、スローピングブロックシステム (sloping block system) によって建設された。19世紀に本格化した世界の築港の歴史の中でも最高の技術を駆使して作られており、我が国のみならず世界的にも貴重な遺産である。特に、波力の推定式から堤体幅を決定したこと、世界で初めて大規模に火山灰を使用し耐海水性のコンクリート塊を製造したこと、方塊を階段状に配置し耐波性の高い防波堤構造としたことに大きな特徴を持つ。¹⁾

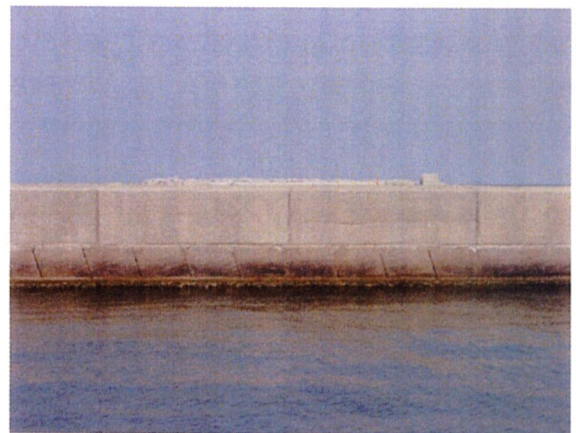


写真-1 北防波堤の現況

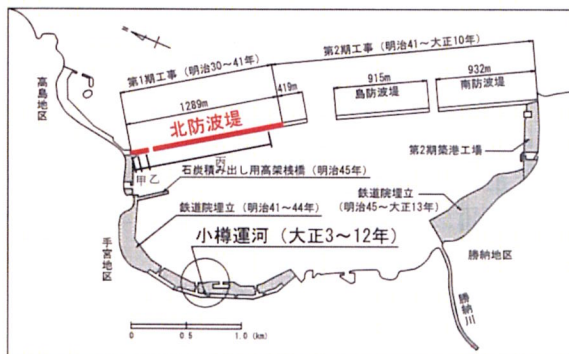


図-1 大正14(1928)年頃までの小樽港建設²⁾

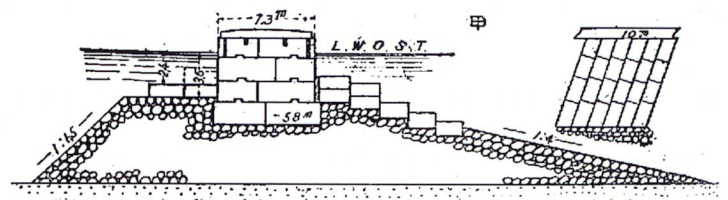


図-2 北防波堤³⁾

第2章において述べるように、近年の現地調査によって北防波堤の現況が明らかになった。上部工は老朽化が進んでるものの本堤を構成する方塊は目視によって健全であることが確認された。さらに音響測深機および深淺測量調査によって港外側にある階

段状の根固方塊（以下、捨塊と称す）およびマウンドの変形やマウンド法肩に散在する形状の異なる捨塊の存在が明らかになった。既往の修復案⁴⁾においては捨塊およびマウンドを原設計の通りに整え、波浪による変形が生じないようにマウンドの表面を被覆ブロックおよび被覆石で覆いマウンド形状の維持を図ることとしている。しかし、原設計通りに復することを目的に、変形した階段状捨塊やマウンド上に散在する捨塊を除去し、マウンドを整形するには多大な労力と投資を必要とする。また第4章において述べるように、北防波堤を構成する要素は全て設計の意図を有しており、マウンド保護を目的とした被覆ブロック等の設置であっても原設計を尊重しているとは言い難く、それに加えて海洋構造物が波浪の作用を受けて平衡状態に向かって変形する自然の動きを抑止することは物理的、経済的に困難であることは想定に難くない。

上記の厳しい条件下において原設計通り修復することが困難な場合には、北防波堤を設計するに当たっての基本的な考え方を踏まえて修復することが適当である。

本論文においては関連する既往論文をレビューした上で、根本資料から北防波堤設計の基本的な考え方を明らかにし、新たな修復案をまとめる。

2. 北防波堤の現状

北防波堤の主要断面は図-2に示すように、堤体、堤体前後の捨塊および捨石マウンドから構成される。堤体の斜塊の健全性と配列は目視によって調査された。それによると干潮帯において表面剥離がみられ、1部のブロック隅に切り欠きが見られるものの形状、材質とも極めて健全である。斜塊の配列についても隙間なく整然としている（写真-2）。

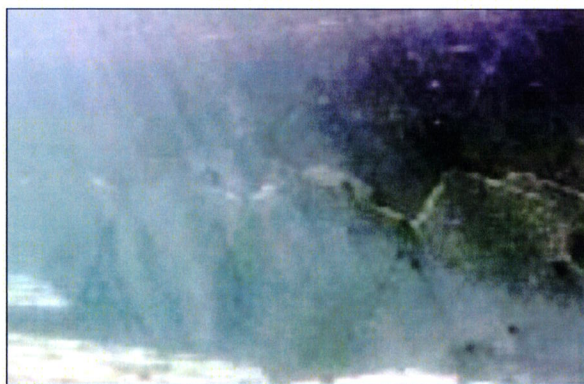


写真-2 堤体の斜塊配列

堤体前後の捨塊の配置と捨石マウンドの形状を明らかにするため、早川ほか⁵⁾はマルチビーム探査と100mピッチの深浅測量調査を行った。マルチビーム探査は、船舶に積載した探査機から120度の角度で海底面に放射された120本の音響ビーム（周波数455KHz）を用いて面的に海底地形を計測する。

測定の結果によると、港内側については大きな形状変化がない。港外側についてはマウンドに洗掘はないが防波堤全延長の約70%の範囲で捨塊が移動している（図-3）。斜塊の移動は堤の中央部が少なく、それより陸側、堤頭部側の順に乱れが大きくなっている。

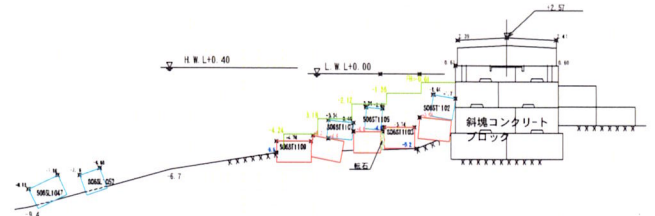


図-3 北防波堤の現状

目視によって調査すると整列した方塊、移動した捨塊とも100年間の波浪の作用により締め固まったマウンドに食い込んでおり、被覆の機能を果たしている（写真-3、写真-4）。

マルチビーム探査は広域的にマウンドの形状をとらえることができるが、目視のように捨塊の状態を計測する精度は期待できないため修復に必要なデータは入手できない。今後、深浅測量と目視により、方塊とマウンド全体の詳細な現況図を作成する必要がある。



写真-3 階段状に形成された方塊



写真-4 マウンド上に散在する方塊

3. 水理模型実験

北防波堤の現況調査により港内外の捨塊およびマウンドの変形が認められた。そこで、井元⁶⁾はマウンドと被覆石の変形過程を明らかにする水理実験を行った。平面水槽の寸法は、29.7m×23.3m、深さ1.0m（図-4）であり、モルタル水平床上に図-5の模型を設置した。実験縮尺は1/50とし、堤体幅Bを14.5cm、堤体天端高 h_c を5.6cm、水深hを29.2cm、構内側マウンド水深 h_1 を7.3cm、被覆石の設置範囲を0.4mとした。模型の設置範囲は10.0mとし、そのうち中央部1.0mに模型を設置し計測対象範囲はそのうち0.6mとした。実験波のスペクトルはBretschneider・光易型波、有義周期 $T_{1/3}$ は1.78sの1種、有義波高 $H_{1/3}$ は3.0cmから9.0cm（現地換算値1.5mから4.5m）で1.0cm毎に7種とした。波の入射角 β は 40° とした。有義波高4.0mは設計波に相当する。

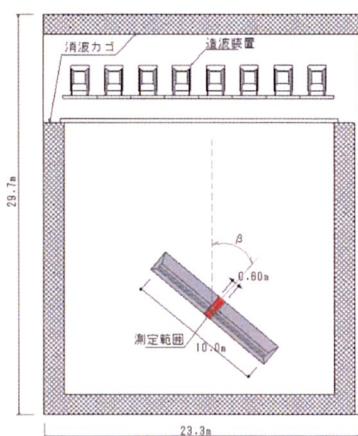


図-4 実験施設

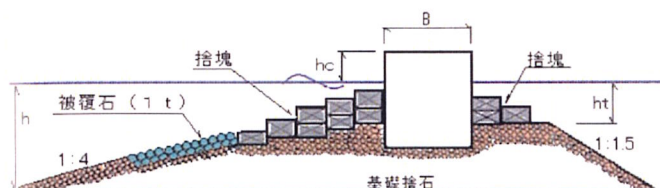


図-5 実験模型

実験は波高の小さい波から作用させ、波高毎に被覆石および捨塊の被害個数を目視により確認した。波の作用波数は1波群200波として3波群を連続して作用させた。波高毎に被覆石の並べ直しは行わず、累計を被害個数とした。被覆石の被害個数は、法線方向に2分割、水深方向に4分割し、各区分の石に着色して区分外に移動した石を被害とした。捨塊は半個長以上の移動もしくは設置場所から立ち上がった場合を被害とした。被覆石および捨塊の被害率D(%)はそれぞれ（被害個数/全個数）、（被害個数/表層の全個数）とした。

有義波高と被災率の関係を図-6に示す。被覆石の移動は波高3.0mから始まり4.0mまではほぼ一定の割合で増加し、それ以上の高さでは急増する。方塊の

移動は波高4.0mで始まり急増する。被覆石、捨塊とも設計波に相当する4.0mにおける被災率は10%を超える程度であり、それ以降被災率が急増している。有義波4.0mが作用した場合の被覆石の移動はマウンド法肩付近に限られている（写真-5）。

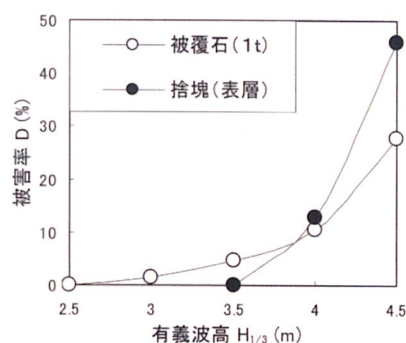


図-6 有義波高と被害率



写真-5 捨塊・被覆石の移動 ($H_{1/3}=4.0m$)

図-7に有義波高4.0mが作用した場合の越波による港内側のマウンド断面と捨塊配置の変形を示した。マウンド法肩と中央部に洗掘が生じる。マウンド法肩の洗掘が進み捨塊が傾き、さらなる波の打ち込みによって方塊は移動する。図中には捨塊の移動状況を付してある。

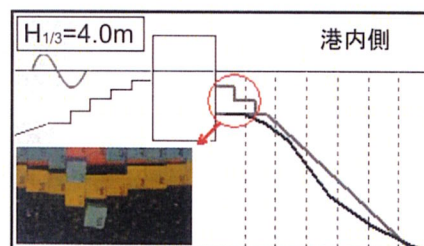


図-7 港内側マウンド状況

上記の実験においては、次の点が指摘される。

- ①捨塊が移動を始める限界波高を求めていないので、ハドソン式を適用する場合に必要な安定数が決定できない。そのため、設計波に対し安定な捨塊重量を正確には予測できない。
- ②模型による水理実験では、当然、100年を超える時間に1098mの防波堤延長に作用した波浪と捨塊、

マウンドの変形の履歴を追跡することが出来ないため現実の状態を再現できない。通常の捨塊、被覆石の安定実験と見なすべきである。

つぎに井元⁷⁾は捨塊がない状態で波を長時間作用させた場合の堤体の変形状況を水理実験によって確認した。港外側の階段状捨塊がない状態で設計波高4.0mが6000波作用した場合のマウンドの変形を図-8に示す。マウンドの変形は4000波で収束しておりマウンドの変形が著しいが堤体の倒壊には至っていない(写真-6)が、堤体の上部工が浮き上がり斜塊間に隙間が生じており安定の限界状態にある。

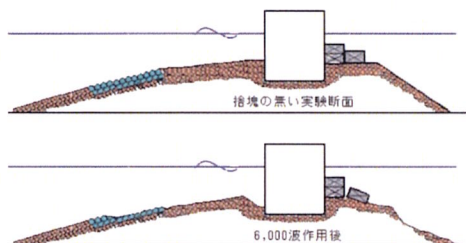


図-8 マウンドの変形状況



写真-6 実験による堤体の変状

実際の堤体は楔と鉄レールによって最上段の斜塊相互が連結され、さらに上部工によって一体化されており⁸⁾、かつ根固めが強固であることから模型実験結果ような堤体の変形はない(写真-7)。

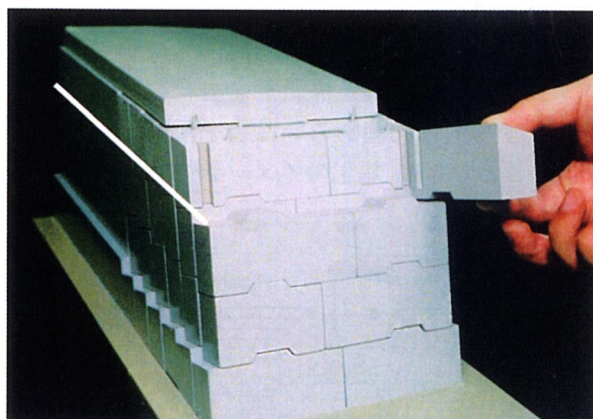


写真-7 北防波堤の模型⁸⁾

4. 北防波堤の工学的評価

(1) 既往文献からの評価

現地調査より堤体の健全性は保たれている。マルチビーム調査から、階段状捨塊の表層の列が乱れている範囲は防波堤全長の約70%に及ぶが、捨塊に期待されている根固と碎波によって堤体を保護する機能は十分保持している。

水理実験によれば、設計波に相当する4.0mにおける被覆石、捨塊の被災率は10%強であり、移動があっても小さい。建設後100年を経過したマウンドは締め固まって安定状態にあり、水理実験結果に見られる規模の、さらなる法肩の洗掘が生じる可能性は小さい。捨塊の重量はおおむね適切であり、場所によってやや小さいところがある。図-6によると有義波高が3.5mから4.0mの間に現状の捨塊が移動していることから、ハドソン式を用いると現状の1割～5割の範囲で重量を増すことで捨塊の安定を確保できると推測できる。

また、実験結果によると設計波に対し階段状捨塊による碎波がない場合には堤体は安定の限界状態にあるが、実際の北堤の構造は楔、鉄レール、上部工による斜塊の連結によって一体性が確保され、かつ捨塊が波力を低減するので、適切な安定性が確保されていると筆者は評価する。ただし、1988年10月に低気圧による大時化によってスローピングブロックの終端部と場所打ちコンクリートの堤体に滑動が生じたことから、堤体の滑動抵抗に大きな余裕はないと思われる。その部分は構造上最も弱い部分ではあり、所定の品質確保がむずかしい場所打ちコンクリートを用いたことが原因のひとつと考えられるが、被災の原因は特定できていない⁹⁾。

(2) 防波堤配置と階段状捨塊の評価

極限まで細く低い北防波堤は、設計波の主方向に対し斜めに位置して、波撃が堤の一方より漸次他方へ移るように計画されて可能となった。階段状捨塊によって段階的に波力を削減し、本堤に斜めに時間差をもって作用させ、波エネルギーを分散させる。越波は水塊となって落下するのではなく、あたかも水柱が堤に沿って堤上を駛走する様相を呈する¹⁰⁾(写真-8)。



写真-8 エネルギーを放散して北防波堤を駛する越波

『築港』¹¹⁾において、防波堤に対し波浪の進路が直角である場合は防波堤の全延長において同時に波撃を受けるのみならず反動が激しくなるので、激浪の方向が一定である港湾においては防波堤を波浪の進路に対し多少斜めにすると波撃は堤の一方より漸次他方へ移るとし、最適な斜角は75度内外としている。

『小樽築港工事報文』¹²⁾によれば、堤の高さは当初、乙部において干潮面上7尺、丙部の終端において9尺の予定であったが、工事中に得た経験に照らしてこれを6尺以上にする何らの必要も認められないのみならず、その高さを加える時はますます波撃の反動を強烈にする不利があることから6尺から6尺7寸に止めたとしている（下線は筆者による）。防波堤の主な効用は港内の静穏である。要するに波浪の斜め入射と階段状捨塊を用いることによって時間差を利用した波エネルギーの作用と分散を図り、北防波堤の高さを6尺以上にしても静穏の効用が増加しないことを確認して、防波堤における最小の費用と完全な効用を追求したのである。

水理実験によると、捨塊が堤体前面にない場合には設計波に対し安定の限界にあるが、実際には少なくとも1層の捨塊があり、堤体も一体性が確保されている。100年を経過した堤の現状に基づき考察すると、廣井勇博士が工学会において講演したように、政府から投資される予算の範囲内で北防波堤を完成させるために波動の計算上ようやく許される構造に設計されている¹³⁾ことが証明された。防波堤の建設はいうにおよばず設計も過去の工事経験に照らして決定されていた時代において、科学と技術の光を当てることにより、適切な設計がなされていたのである。

5. 修復の基本案

現在まで実施された調査、水理実験についてはすでに指摘したような補強が必要であるけれども、北防波堤の修復案は設計者の基本的な方針を踏まえると、ひとつに収束するであろう。

(1) 完全な設計とは

港湾の設計について廣井博士は次のように述べる。

- ①「完全ノ設計ハ最モ僅少ナル工費ヲ以テ防波ノ効用全キヲ期スルニ外ナラス」¹⁴⁾（完全な設計は最も少ない工費によって防波の完全な効用を図ることに他ならない）。北防波堤は建設期間に日露戦争をはさみ資材の高騰があったにもかかわらず、予算総額220万509円に対して1万1443円の残額を残して工事を完了している。『築港』¹⁵⁾には工学的記述に加え、低基載壁堤（混成堤）の経済的なマウンド厚さを算出する式を掲載していることにもその基本的態度が表れている。

- ②「技術者千歳ノ榮辱ハ懸テ設計ノ上ニ在リ之カ用意ノ慎重遠圖ヲ要スル亦タ以テ了スヘキナリ」¹⁶⁾（技術者が千年にもわたって問われ続ける誉れと辱めは設計の立て方にかかっている。そのための用意は、よく行きとどいて、遠大なばかりごとでなければならぬ）とし、百年にわたってすべからず用意周到な設計であること¹⁴⁾を要求している。

(2) 捨石マウンドは自然平衡状態を模範

上記の2項目を踏まえ捨石マウンドの修復について検討する。その際、次の方針に注目する。

- ③「（粗石堤ハ）最モ適当ナル断面ハ・・・中略・・・同種ノ石材ニシテ多年波浪ノ力ニ依リ動揺セラレ自然平衡状態ニ達シタルモノニ倣ヒ之ヲ定ムルヲ以テ良計ナリトス」¹⁷⁾（捨石によって築かれる粗石堤の最も適当な断面は、同種の石材が多年にわたる（同種の）波浪の力によって動揺され自然平衡状態に達した状態になって決定するのが良い）はとして捨石マウンドの自然平衡状態を重視している。

- ④「捨石防波堤ノ一種ニシテ良好ナル石材ヲ得ル能ハサル地ニ於テ殊ニ工事施設ノ急速ヲ要スル場合ニ在リテハ混凝土塊ヲ投入シテ築堤ヲ為スコト亦タ稀ナラス是レ即チ捨塊堤（Concrete-Mound Breakwater）ナリトス」¹⁸⁾（捨石防波堤の一種にして、良質な石材を得ることができない地において急速施工を要する場合には、コンクリート塊を投入して築堤することも珍しくない。これが捨塊（コンクリートマウンド）堤である）として捨石と捨塊が同じ機能を有することを述べ、名称にその意味を表している。

以上の点を踏まえると、マウンド部については100年間の波浪により締め固められ自然平衡状態にあることから、散在する捨塊を含め現状のままとし手を加えない方が良策である。設計に当たって、その状態は考慮されていたと見なすべきである。

(3) 補充を考慮した階段状捨塊

階段状捨塊は廣井博士が考案した可能性が高い。方塊を用いて階段状に築堤する方法は特に地中海の諸港において広く採用された。その効用は階段状捨塊と同様であるが、下層の塊が上層の塊の重量を受けることができないため塊が脱出させられ全体の崩壊につながる欠点がある（図-9）。階段状の捨塊についてはそれらの欠点に鑑み、後から捨塊の補充が可能な構造に改良されたと見ることができる。

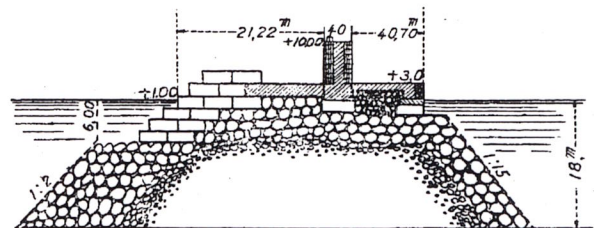


図-9 ジェノバ港ガリーラ堤¹⁹⁾

したがって、階段状捨塊の修復に当たっては、重量が足りず移動した表層のみ安定が保たれる捨塊に変更する。下層の捨塊は根固めを緩めるおそれがあるので現在の状態のままとする。もし階段状捨塊の形状を原型に忠実に修復しようとした場合には、マウンドに固着した下層の捨塊を一旦除去しマウンドの高さを合わせる工事の後、捨塊を据え付け直す作業が必要となり経済的、技術的に大きな負担を強いるばかりでなく、その形状を長く保持することは絶えず厳しい波激を受ける環境では難しい。階段の形状と安定性を重視すべきであり原設計にこだわる必要はない。

南堤の構造は図-10 に示すように、北防波堤における階段状捨塊の転動が頻繁にあったことに鑑み、直立部の基礎を低くし背後に捨石を堆積して直立部を補強することによって良好な結果を得ている²⁰⁾。階段状捨塊の安定は建設中からの課題であった。そのことから原設計より、むしろ捨塊の安定に重点を置くべきである。

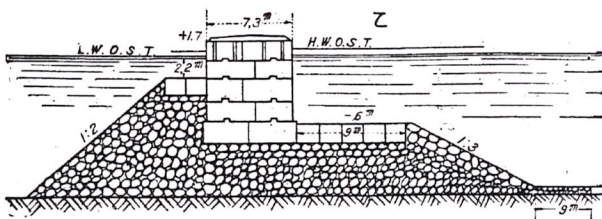


図-10 小樽港南防波堤²¹⁾

(4) 上部工は最高品質の耐海水性コンクリート

本堤は天端が低く越波等による老朽化が著しい。本体の上部工については建設当時における世界最高品質の耐海水性コンクリートを用いていることから同等品質の材料と施工で修復すべきである。

6. 結論

100年を経過した北防波堤の設計は適切であることが水理実験から証明された。その修復にあたっては、原設計通りに修復することは技術的に難しく、経済的負担が極めて大きく、効果の持続時間が短いことから適当ではない。自然作用を考慮し当初の設計の考え方を踏襲することによって必要最小限の修復が可能となる。

マウンド部については100年間の波浪により締め固められ自然平衡状態にあるので、散在する捨塊を含め手を加えない。

階段状捨塊については、重量が不足し移動した箇所のみ捨塊を補充する。その際、階段の形状と捨塊の安定を重視し、原設計の出来高にこだわらない。

上部工は、最高品質の耐海水性コンクリートに

よって修復する。

北防波堤は世界的にも貴重な遺産である。修復に当たっては現況から詳細な調査を実施し後世に記録を残す計画を作るべきである。また、将来の適切な維持管理をめざし定期的に防波堤の形状を調査するモニタリングシステムを構築すべきである。

なお、マウンド上には階段状の捨塊のうち移動した表層の捨塊だけではなく数種類の形状の捨塊が数多く存在しており、その経緯と理由が未解明である。

7. おわりに

北防波堤は、廣井勇博士によって計画から設計、施工まで系統的に企画され実施された。それを解説し評価しながら修復案を練り上げる必要がある。

その後の改良と標準化の作業によって現在あるような低基混成堤の設計体系へと収斂し港湾建設の効率化をもたらしたが、豊穡な近代港湾工学の原点からみると特定の範囲に限定され精緻化、定型化された港湾工学に帰着したと見る事もできる。その体系外にある北防波堤を修復するに当たっては、現代の港湾技術者が持つ特質を強く認識しておく必要がある。

参考文献

- 1) 関口信一郎・浅田英祺・富岡直樹・本山賢司・林誉命：小樽港北防波堤の国際評価，土木学会海洋開発論文集，VOL22，pp.697-702，2006。
- 2) 中村弘之・栗田悟・関口信一郎：小樽港北防波堤の構造について，土木学会海洋開発論文集，VOL.21，p.13，2005。
- 3) 廣井勇：第5版 築港 前編，丸善株式会社，p.381，1924。
- 4) 早川篤・井元忠博・飯田純也・窪内篤：小樽港北防波堤の健全度調査および改修，土木学会海洋開発論文集，VOL.21，pp.25-30，2005。
- 5) 文献4)に同じ。
- 6) 井元忠博：小樽港北防波堤の構造に対する実証的アプローチ，北海道土木開発研究所月報，第625号，pp.49-56，2005。
- 7) 同上，pp.52-54。
- 8) 文献2)，pp.15-16。
- 9) 文献2)，p.16。
- 10) 北海道廳：小樽築港工事報文 前編，pp.156-157，1908。
- 11) 文献3)，pp.233-234。
- 12) 文献10)，p.156。
- 13) 廣井勇：「小樽築港工事」演説，工学会誌，217巻，1900。
- 14) 廣井勇：築港卷之二，工學書院，p.10，1899。
- 15) 文献3)，P.362。
- 16) 廣井勇：築港卷之一，工學書院，緒言，1898。
- 17) 文献14)p.12。
- 18) 同上，p.36。
- 19) 文献3)，p.324。
- 20) 同上，p.355。
- 21) 同上，p.381。