

小樽港北防波堤の構造について

A STUDY ON THE STRUCTURE OF THE NORTH BREAKWATER IN OTARU PORT

中村弘之¹・栗田悟²・関口信一郎³

Hiroyuki NAKAMURA, Satoru Kurita, Shin-ichiro SEKIGUCHI

¹(財)港湾空港建設技術サービスセンター 北海道支部 (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目8)

²正会員 工修 北海道開発局 港湾空港部港湾計画課 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2)

³正会員 工博 北海道開発局 室蘭開発建設部 (〒051-8524 室蘭市入江町1番地14)

The North Breakwater of Otaru Port which consists of mound and superstructure, was constructed by the sloping-blocks were settled down by an overhanging crane which is well known as *Taitan*. To ensure the stability of blocks, it is necessary to bond together every block of each separate section.

This paper addresses the way and effects of bonding blocks in the North Breakwater of Otaru Port. Detailed investigations have been made on “the Report of Otaru Port Construction Works” written by Dr. Isami Hiroi who focused on researches of sloping-blocks and infrastructure works of the North Breakwater.

Key Words : Otaru Port, sloping-blocks, superstructure, bond, cramp, dowel joint, rail

1. はじめに

廣井勇博士が設計し，監督した小樽港北防波堤は延長1289mに達する．その構造断面は甲部，乙部，丙部の3部によって異なり，各延長は47m，131.4m，1098.2mとなっていたが，今日では甲部，乙部は埋立地域にある（図-1）．丙部は，当時において最新かつ最高の技術体系であったスローピング・ブロック・システムによって建設された（写真-1，図-2）．このシステムは大英帝国土木学会員によって開発され，マノラ港で初めて大規模に採用された．防波堤の軌道上を走行する積疊機（通称タイターン）によって斜塊（スローピング・ブロック）を据え付け，前進しながら防波堤を築造する一貫機械化工法である（写真-2）．

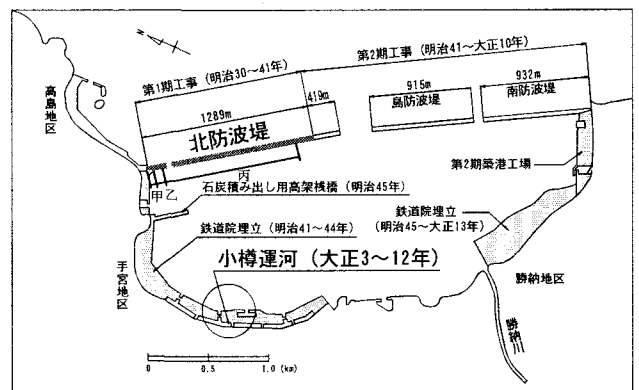


図-1 大正14(1928)年頃までの小樽港建設時期

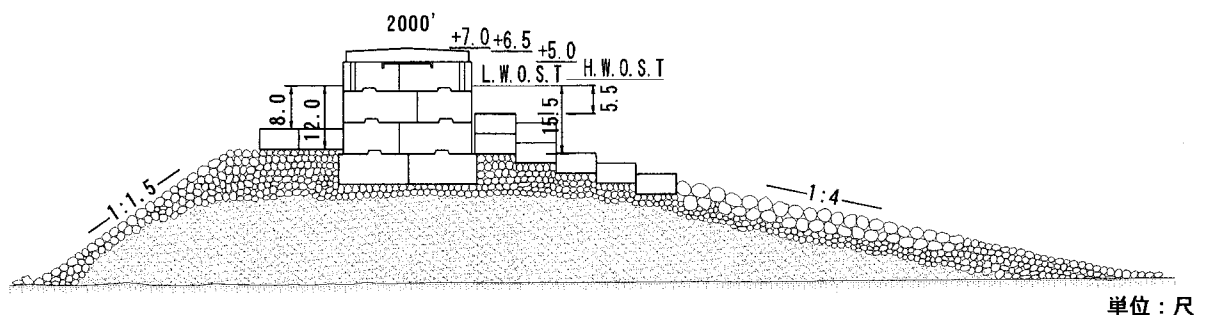


図-2 北防波堤丙部

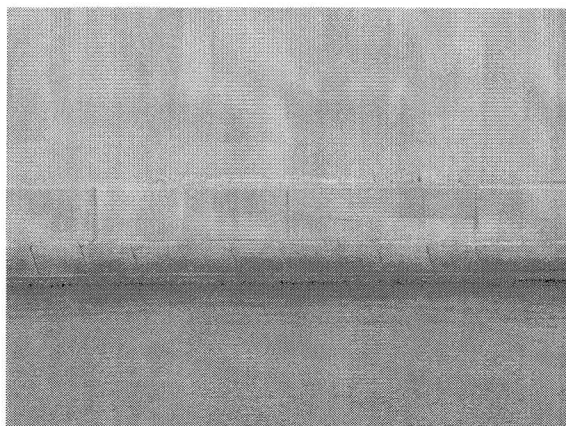


写真-1 北防波堤の現況

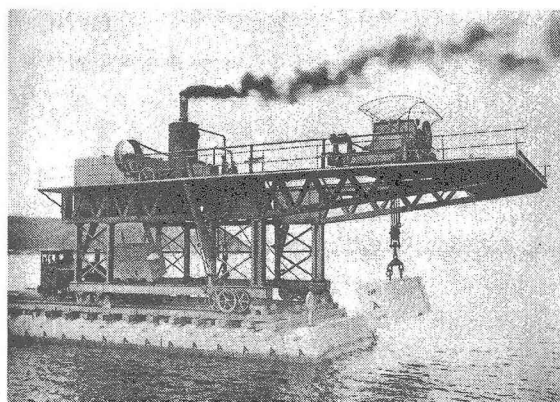


写真-2 積畳機(通称タイターン)による斜塊の据え付け

スローピング・ブロック・システムの特長は、据え付けた斜塊が堤体重量および上載荷重による捨石マウンドの形成に順応することができること、および斜塊の傾斜によって斜塊相互の連結を強化できることにある。また、このシステムによって築造された堤体の課題は塊を接合してその一体性を確保することにあり、そのための種々の技術が考案されている。

本稿においては、第一に北防波堤より取り出され、地上に展示保存されている実物の斜塊を調査代表モデルと定め、「小樽築港工事報文 前編」¹⁾に記述された工法と照合することによって、堤体の一体性確保の観点から北防波堤丙部の構造を明らかにする。第二に、丙部先端と堤頭部の接合部が被災した事例から、一体性確保に用いた技術の効果について考察する。

2. 「小樽築港工事報文 前編」に見る北防波堤丙部の構造

防波堤断面における塊の接合強化に関する記述を「小樽築港工事報文 前編」(以下「小樽報文」と略称)より引用する。以下、本稿における現代語訳は全て浅田英祺訳による。

塊を積み上げる場合、防波堤断面における鉛直方向の目地の配置は重要である。「小樽報文」には次の

様に記述されている。

堤頭ノ塊ハ・・・(中略)・・・成ルヘク接ヲ亂シテ積疊シ以テ相互ノ繼合ヲ計リ且ツ上層ノ塊ハ軌鐵ノ鍔ヲ以テ縦横ニ繫締セリ(「小樽報文」164ページ)

(現代語訳)

なるべく、(塊の)目地を鉛直方向に通さないように積疊し、そうして、おたがいのつなぎあわせをはかり、また、上層のブロックはレール鉄の鍔〔きょう・かすがい〕を使って縦横につないでゆるみのないようにした。

激浪が襲う丙部では、斜塊の重量および塊相互のもたれかかりに加え、塊表面の凹凸および古レールにより連結強化が図られている。すなわち、

丙部ハ殊ニ激浪ノ衝ニ當ルニ依リ個塊ヲシテ畜ニ其重量ニ依リ波浪ニ抵抗セシムルノミナラス其両面ニ設クル所ノ凹凸及ヒ繫鉄ヲシテ各塊相互ノ締結ヲ全フシ更ニ堅固ノ度ヲ加フルコト尠ナカラス(「小樽報文」22ページ)

(現代語訳)

丙部は殊に激浪が当たるため、一つ一つのブロックはブロックそれぞれの重量によって波浪に抵抗するだけではなく、其の両面に凹凸を設け且つ繫鉄(けいてつ)を貫通して各塊相互の締結を施すことによって、更に堅固の度合いを増加させる。

毎年、堤体工事を終える際は、堤の先端の塊が構造上の弱点となるため、特に工夫が施されている。

(毎區ノ)終端附近ニ於ケル塊ニハ其上下面ニ十字形ノ凹凸ヲ設ケ尚ホ上層ノ塊數個ニ古軌道ノ鍔ヲ簷入シテ相互ノ繋合ヲ施セリ(「小樽報文」160ページ)

(現代語訳)

終端付近における塊には、その上下面に十字形の凹凸を設け、なお、上層の塊数個に古レールのかすがいを入れ相互の繋合を行った。

隣接する塊については、接合するための楔を用いた。

塊隣層ノ接合ヲ成セル楔ハ袋詰混凝土トシテ雙凹間ニ挿入シ固ク搗入セリ(「小樽報文」161ページ)

(現代語訳)

塊と塊に接合するクサビは塊同士の凹凹間にコンクリートを固く搗き入れた。

スローピング・ブロック・システムによって築造された堤体の一体化に関する技術は、斜塊自体にか

かわるものと、個別の斜塊に取り付けて、前後左右、上下に置かれた斜塊との一体性を確保する技術に分類できる。斜塊自体にかかわるものとしては、①斜塊の傾斜角度による塊相互のもたれかかりの強さ(Sloping bond)②防波堤断面における鉛直方向の目地を通さないこと③塊の前後あるいは上下に凹凸を設けて隣接する塊との接合を強化することである。

斜塊の傾斜角は据え付けの施工性に関係するほか、1個の塊の重量とともに波浪による塊の脱落に対する安定性を決定する要因となる。北防波堤の場合、斜塊の傾斜角度は水平に対し71度34分となっている。塊の上下面における凹凸及び目地の配置も堤体の一体性を確保する上で重要である。

斜塊に取り付けて一体性を確保する技術としては、①鯨(かすがい, cramp)②斜塊の表面に設けた縦溝に楔としてコンクリートあるいは岩石をはめ込む楔(dowel joint)③鋼材を上下の斜塊に貫通させ空隙にコンクリートを充填して鉛直方向の接合を図る技術がある。なお、③については「小樽港湾調査報文」²⁾において設計に関する記述があるが、実際には使われた事例は未だ確認できない。

スローピング・ブロック・システムによって築造されたマノラ港およびマドラス港の防波堤が波浪によって被災した主な原因として、防波堤断面における斜塊の鉛直方向の目地が通っており、かつ堤体が接合されていない構造であったことが指摘されている³⁾。一方、コロンボ港防波堤においては目地を乱すことで堤体の一体性を強化しており⁴⁾、北防波堤丙部と同様の構造となっている。また、波浪が強くない箇所は並列する塊の間に割石を詰める構造を採っているところも、北防波堤乙部と基本的に同じ構造で、北防波堤はコロンボ港防波堤を直接のモデルとして建設されたとみて間違いはない。

3. 斜塊調査

北防波堤丙部は、図-3に示す3種類のブロックを4段に積み重ね、その上に上部コンクリートを打設

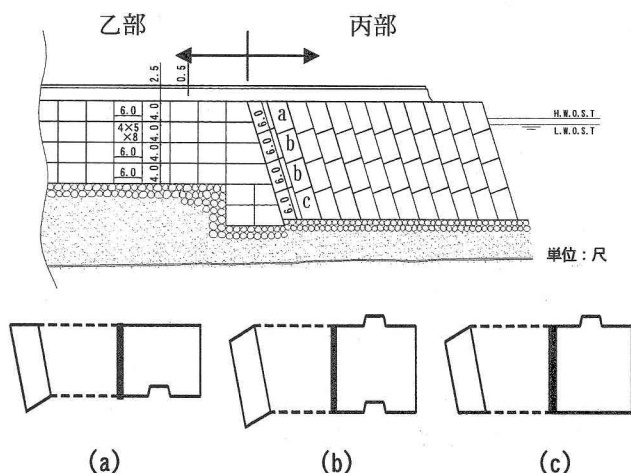


図-3 斜塊の種類

する構造となっている。

小樽港湾事務所構内には1972年に北防波堤の切り通し部から引き上げた斜塊1個が展示してある。この斜塊は図-3(a)に該当し、小樽報文には次の記述がある。

塊及ヒ場所詰混凝土トノ附着ハ到底充分ナルヲ期スルコト能ハサルニ因リ塊ノ鈎孔ニ古軌條ヲ植エ以テ兩者ノ緊結ヲ幫助タラシメ尚ホ伸縮及波力ニ對シ強度ヲ増加スル爲メ縦ニ古軌鐵三條ヲ埋設セリ
(「小樽報文」161ページ)

(現代語訳)

ブロックと場所詰コンクリートとの付着は到底十分ではないので、ブロックの鈎り孔に古レールを入れて両者の締結の補助とした。なお、伸縮及び波力に対して強度を増加するため縦に古レール3条を埋設した。

塊の一体性を確保する技術について、上記「小樽報文」と照合しながら確認するため、表面形状およびレーダーによる塊内部の軌鉄形状調査を行った。

斜塊は防波堤より引き上げた当初、健全な状態であったが、長期間の展示によって表面劣化が目立つ状態にある(写真-3)。斜塊の寸法は図-4の通りである。塊中の軌鉄の形状は地中レーダーおよびRCレーダーを用いて解析した。この調査によって、以下の点が確認された。いずれも「小樽報文」の記述とよく一致している。

(1) 軌鉄に関して

斜塊の鈎孔2個には古レールが埋設されており、一方は上部工である場所詰めコンクリートとの連結に用い、他方は鯨として3条の古レールを折り曲げ隣接する塊との連結に使用している(図-4、写真-4)。鯨は専用の金物ではなく、開拓使幌内鉄道の古レールを用いている。

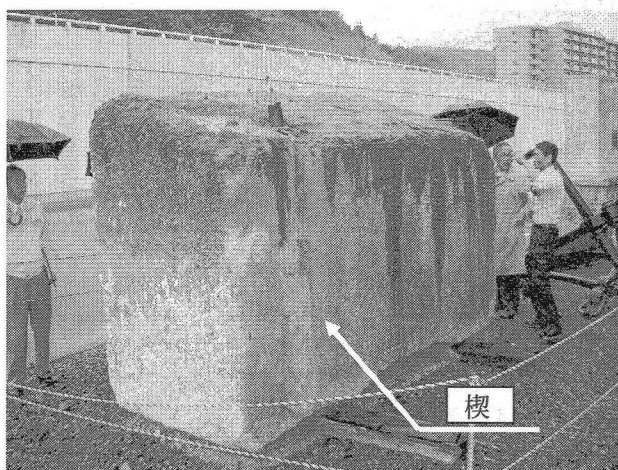


写真-3 斜塊全景

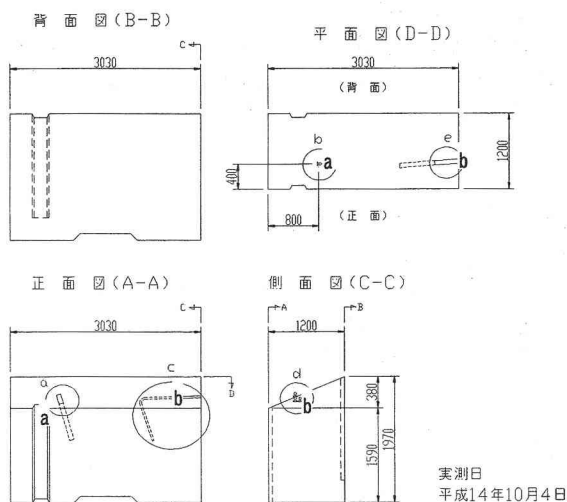


図-4 斜塊実測図

らかなように、孔の底面はインド大低潮面すなわち基本水準面より上にあり、孔内に打設したコンクリートが海水の影響を受けないように工夫されていた。

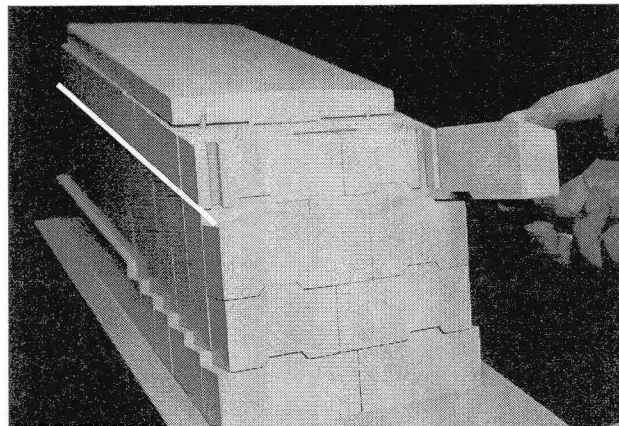
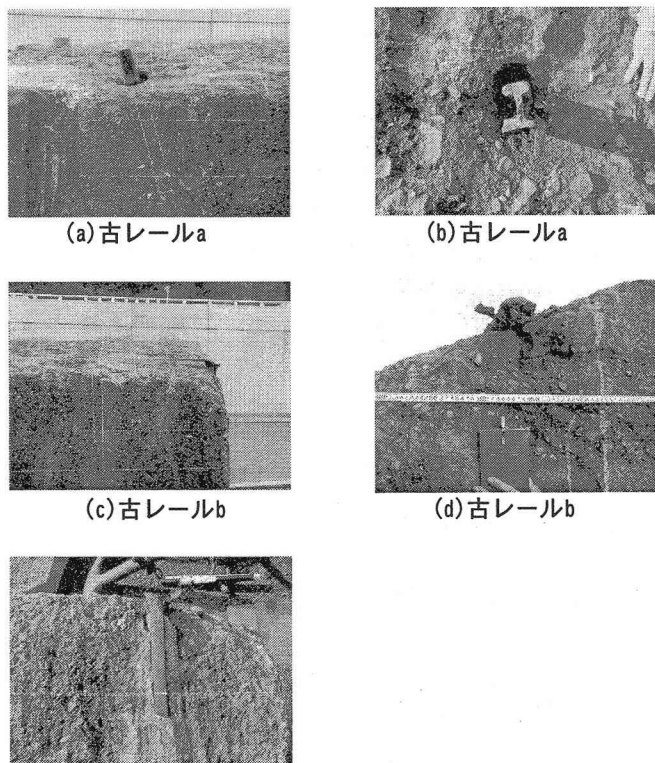


写真-5 北防波堤の模型



(e) 古レールb

写真-4 斜塊の釣孔に埋め込まれた古レール

(2) 縦溝に関して

斜塊前後の表面に設けられた幅約20cm、深さ5.5cmの縦溝は、防波堤法線方向に隣接する塊を接合するために設けられたもので、溝の中に楔として袋詰コンクリートを挿入する。通常の袋詰コンクリートには麻布を袋として用いるが、溝内には麻の繊維は付着しておらず、直接コンクリートを溝に投入して搗き固めたと推定することもできる。

溝の長さは前面が1.60m、背面が1.60mとなっており、写真-5から明らかなように隣接する塊に接すると底面を有する孔を形成する。写真-5の模型側面の水平線は基本水準面である。模型および図-5から明

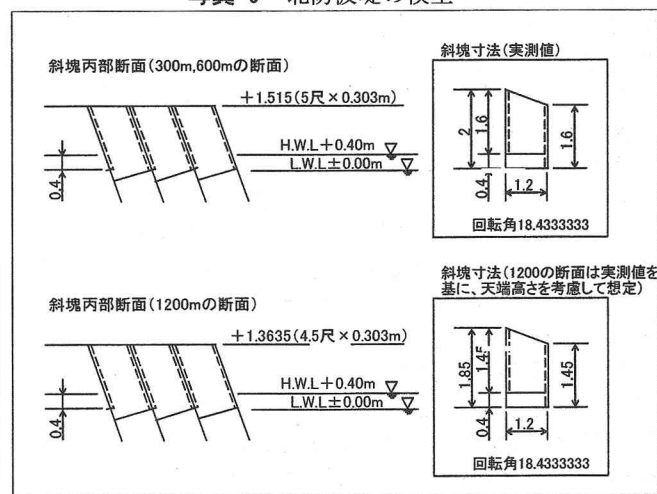


図-5 斜塊の縦溝の位置と水位

4. 北防波堤丙部と堤頭部の接合部における被災

(1) 丙部と堤頭部の接続部の施工

北防波堤丙部の終端部と堤頭部の接合部には塊を用いず、場所詰コンクリートを用いた。すなわち、

堤頭及本堤ノ接續ハ下二尺五寸上十尺幅二十四尺ノ大袋詰混凝土ヲ以テシ鐵棒ニ依リテ堅締セル側板ノ中ニ布設セリ（「小樽報文」164ページ）

（現代語訳）

堤頭と本堤の接続は、下（75cm）、上（約3m）、幅（約7.3m）の、一つの大きな袋詰コンクリートを用いて施し、鉄棒〔てっかん・鉄の長い棒〕によって強く締めた側板の中に布設した。

水中における袋詰コンクリートの施工方法については、「築港巻之一」⁵⁾に詳しい。

水中ニ混凝土ヲ布設スルニハ煉込法ニヨラザルヲ得ズ而シテ之ヲ行フニハ潜水鐘ヲ用ユル外ハセメントノ洗ヒ去ラルハヲ防ク爲メ簀若ハ袋ヲ用ユルヲ以テ常トス簀ハ水中ニ在リテ上ヨリ底ヲ開キ得ルノ装置ヲ爲シ其積量ハ三乃至五立方尺ニテ可ナリトス袋ヲ用ユル場合ニアリテモ亦タ簀ノ如ク水中ニテ容易ニ上ヨリ開放シ得ル様ニナスヲ要ス簀若ハ袋ハ水底ニ達スルニアラサルヨリハ之ヲ開放スヘカラス是レセメントハ水中ニ在リテハ其流失最モ多ケレハナリ(現代語訳)

水中にコンクリートを布設するには、煉り込み法(陸上でコンクリートを練り混ぜる)によらざるをえず、このため、潜水鐘を用いる以外は、セメントが洗い去られるから、これを防ぐために、通常は箱もしくは袋を用いる。箱には水中で上から底を開くことが出来る装置をつくり、その体積は3ないし5立方尺(約0.28~0.46m³)でよいとされ、袋を用いる場合でも、箱のように、水中で容易に上から開放できるようにしなければならない。箱もしくは袋は水底に達していないとこれを開放してはいけない。これはセメントが、水中にあっては流出が最も多くなるからである。

北防波堤1,289mの丙部の終端部と堤頭部の接合部における場所詰コンクリートは、箱あるいは袋を用いた水中コンクリートのことである。施工の方法を図-6に示す。

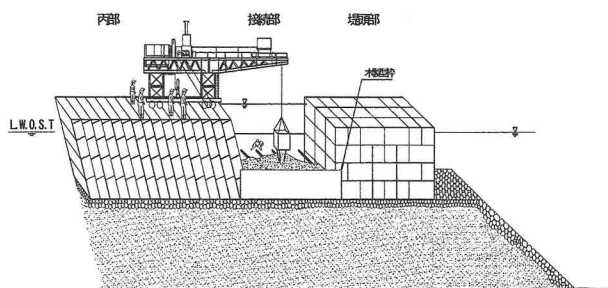


図-6 場所詰コンクリートの施工(想像図)

(2)接合部の被災

1988年10月28日に北海道南岸を通過した低気圧による大時化によって、北防波堤丙部と堤頭部の接合部が被災し、丙部先端2列およびその先の場所詰コンクリート部分2段打ちの上段が0.8m~1.6m港内側に滑動した(図-7、写真-6)。

この大時化の波高は、当時の水先案内人の目視によれば6mとされている。これを襲来最大波とすれば、現在の設計波(表-1)にほぼ匹敵する時化であったとみることができる。

表-1 北防波堤の設計波諸元

潮位	波向	(50年確率波)					水深
		最大波高 Hmax(m)	有義波高 H1/3(m)	周期 T(sec)	修正後入射角 β(°)		
H.W.L	N	6.6	3.7	12.4	25		-11.2
L.W.L	NNW	6.6	3.7	12.6	24		-11.2

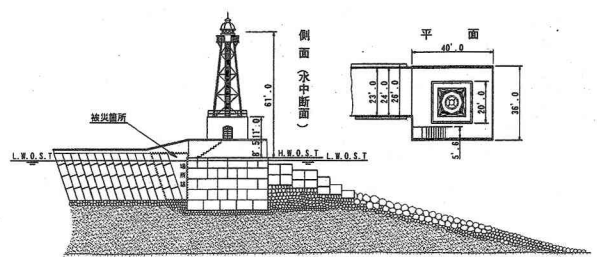


図-7 被災箇所縦断 単位:尺

写真-6の中央2列のブロックが丙部先端の最上段の斜塊であり、その手前が水中コンクリート部分である。当時、水中コンクリートの施工については完全を期しがたいとされており、打継目に弱点があったと推定できるようなのである。また、斜塊と水中コンクリート部は古レールによって固く連結して一体化を図ることが必要とされるが、小樽報文に該当する記述は見当たらない。さらに、写真-6を見る限り、先端の斜塊には鋲を施した形跡がないことから、そのことも被災の原因とみなすことができる。

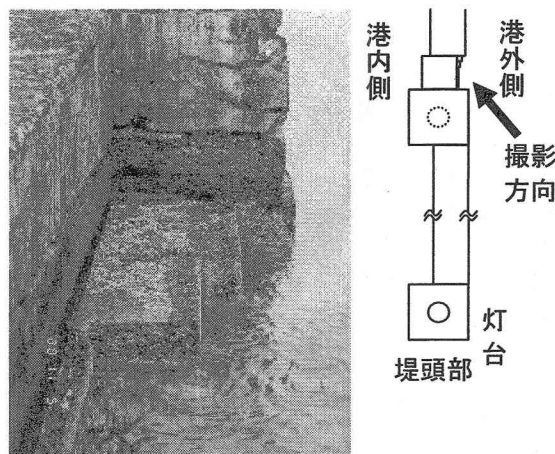


写真-6 堤頭部と丙部の接合部の被災

5. 結論

北防波堤丙部の構造を明らかにするために斜塊を調査し、「小樽報文」と照合した結果、以下の点が明らかになった。

- ①堤体の一体性は斜塊の傾斜、斜塊の目地の配置、古レールを鋲とする隣接塊との連結、斜塊表面の縦溝に袋詰コンクリートを挿入する楔によって確保されている。
- ②堤体最上段の斜塊を調査した結果、斜塊相互および上部工との連結方法は「小樽報文」の記述と一致している。
- ③防波堤設計図によると、鋲として専用の金物を用いているように見えるが、実際は古レールを用いている。この点にも廣井博士の経済合理性を追求する姿勢を強くうかがうことができる。

- ④袋詰コンクリートの楔の先端が基本水準面より上となるように、斜塊の縦溝が作られている。
- ⑤防波堤丙部先端と堤頭部との接合部において被災が発生した。その原因としては、水中コンクリートの施工が不完全であったことおよび斜塊と水中コンクリートの間に上記の連結技術を施さなかったことによる可能性を否定できない。

6. あとがき

廣井博士が技術者の榮譽をかけて設計し、監督した小樽港北防波堤は、一世紀の星霜を経た現在も堅固である。極めて安定した堅牢な防波堤を建設できた要因を挙げるのに枚挙にいとまはないが、とりわけ徹底した調査・研究に基づいた周到な計画・設計と、その建設に当時最先端の技術であったスローピング・ブロック・システムを採用したこと、および建設材料として天然の石材に匹敵するコンクリート⁷⁾の製造方法を確立したことがあげられる。スローピング・ブロック・システムについては本稿で述べた通りである。

廣井博士が「要スルニ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」⁸⁾と述べていることから明らかなように、北防波堤は外洋防波堤としてほとんど例のないくらい細い堤体と少ない工費をもって完成した。

細い堤体を可能にした主な要因は

- ①波力の算定が適切であったこと。
- ②斜塊を連結して堤体の一体性を確保することにより波力に対し堤体全体で対抗できたこと。
- ③許容できる越波の範囲で堤体の高さを極力抑えて堤体に作用する波力を小さくしたこと。
- ④波浪が斜めから作用するように防波堤を配置したこと。
- ⑤捨石マウンドの勾配を緩やかにし堤体前面に階段状に方塊を配置することによってマウンドの安定および碎波の効用を図り、堤体に作用する波力を減少させたことである。

Schulze⁹⁾は、北防波堤の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。しかし、その設計にこそ、慎重かつ周到な計画・設計によって100年にわたって誤りがないように、経済的かつ堅牢な永久構造物を築造しようとした廣井博士の使命感と強靱な意志が貫かれているとみなして差しつかえないであろう。

引用文献および参考文献

- 1) 北海道廳：小樽築港工事報文 前編，1908.7.
- 2) 北海道廳：小樽港灣調査報文，p.20，1896.
- 3) Hugh Henry Gordon Mitchel, M.Inst.C.E. : The alternation of the form of Madras Harbour, Minutes of Proceedings., paper No.4012, pp.130-153.
- 4) Sir John Kyle : Colombo Harbour Works, Ceylon, The Minutes of Proceedings, vol. LXXXVII. , Paper No.2164, pp.76-92, 1886.
- 5) 廣井勇：築港 卷之一，工學書院，p.192，1898.8.
- 6) 廣井勇：築港 卷之一，工學書院，p.194，1898.8.
- 7) 廣井勇：築港 卷之一，工學書院，p.202，1898.8.
- 8) 廣井勇：築港 卷之二，工學書院，p.10，1899.3.
- 9) F.W.Otto Schulze : Seehafenbau Band II, Ausbau der Seehäfen, p.80, 1913.