

シリーズ 港湾技術の創生期に学ぶ～廣井勇に学ぶ OTARU セミナールの活動より～（その7）

材料を巡る情勢と課題への対応－コンクリートの時代的背景－

栗田 悟*

1. はじめに

小樽港北防波堤の主要部分は、コンクリートブロックで作られている。本体はスローピング・ブロック・システムによる斜塊であり、襲来する波浪の圧力を減殺するために前面に階段状に配置したのが捨塊である。本体と捨塊が一体となって、防波堤の効用を発揮する。いずれもコンクリート製のブロックであり、この防波堤の主要部材である。



写真－1 廣井博士(51歳)
(浅田英祺氏提供)

北防波堤の着工は、明治三十年（1897年）であるが、その直前に日本国内では、海水中にコンクリートを使用して、亀裂や崩壊が発生した事故が連続して起こり、政界にとって大きな問題となっていた¹⁾。しかし、廣井博士が設計・監督・施工管理した北防波堤は、コンクリートブロックに一箇の作り損じもなく²⁾、しかも工事が明治四十一年（1908年）に完成した後、今年で九十七年を経過するが、防波堤として充分機能している。北海道開発局小樽港湾事務所の調査によるとコンクリートそのものも健全であると言う結果が得られている³⁾。

このように防波堤のコンクリートをこれほど強固に造ることが出来たのは驚異であるが、一体どうしてこれほどの強固さが維持されているのか。小論はこの疑問に対する正解に少しでも近づこうとするものである。

廣井博士が、築港工事に携わった最初は、「函館港改良工事」であり、二番目が「小樽築港工事」の「北防波堤」の建設である。二つの工事は廣井博士が共に

建設のための調査を行い、「函館港湾調査報文」⁴⁾（北海道庁長官北垣國道宛 明治二十七年十二月二十一日）ならびに「小樽港湾調査報文」⁵⁾（北海道庁長官北垣國道宛 明治二十九年三月十五日）としてまとめている。「函館港湾調査報文」では、セメント性質試験方法を提案し、それを標準としてセメント及びコンクリート（凝結土）試験を行っている。

小論では、廣井博士が著した「函館港湾調査報文」、「小樽港湾調査報文」、「函館港改良工事報文」⁶⁾、「小樽築港工事報文前編」⁷⁾及び「築港卷之一」⁸⁾を中心に、廣井博士のセメント及びコンクリートの課題解明を通じた科学者の基本姿勢について検討したい。まず、函館港改良工事の概要を述べ、ついで工事に先立って実施した「函館港湾調査」の中から、セメント及びコンクリートに関する調査試験を採り上げ、続いて、函館港改良工事实施中に行われたより広範なセメント及びコンクリートに関する調査試験について述べる。その後で、これらの一連の調査試験を実施する必要があった時代背景について述べ、最後に、セメント及びコンクリートに関する調査試験から廣井博士の課題解明にみせた科学者の基本姿勢についてまとめる。

2. 函館港湾調査と函館港改良工事

函館港湾調査は、函館港改良工事のために行われた。改良工事は、港内浚渫工事、防砂堤築造工事、海面埋め立て工事からなり、埋め立て工事は、現在の函館ドックの南側半分から函館漁港にかけて行われた。市街地を拡張し、静穏な造船所予定海面を確保するために行ったものである。

本工事は、明治二十九年（1896年）六月二十一日⁹⁾から明治三十三年（1900年）九月¹⁰⁾まで行われたが、事業主体は国ではなく函館区であった（函館区制は北海道庁統治下の北海道内におかれた特有の地方制度の一種）。このため、函館の工事は区営工事として行われた。工事費は約八十二万円と見積もられ、国からは



図－１ 函館港改良工事埋立（埋築）及び防波堤平面図

函館港改良工事報文 明治三十二年四月 北海道廳函館支廳 卷末図面第十三葉中第一圖より。「船入場」は、現在の函館漁港である。

補助金として二十万円が下附されるとともに、不足する財源をまかなうため、弁天砲台の払い下げを受けて工事の基礎地とし、さらに、区の土地を売却して十七万円を確保、残り四十五万円は函館区が区債を発行して調達している。このとき廣井勇は、道庁技師のまま、函館港改良工事事務所技師長に任命され、函館区長の監督下¹¹⁾、工事の指揮を執った。

埋め立て周囲護岸（石堤）（図－２）は、表面を間知積みという、日本古来の城壁の石積み工法で仕上げている。その土台にあたる要の部分には、コンクリート（凝疑土）ブロックを三段重ねで用いている。その一部は、函館漁港の防波堤とそれに続く護岸の部分に現在も見られる。

函館港湾調査は、図－３にまとめたように、港内深浅測量、海底地質調査、潮流調査、セメント及びコンクリート（凝疑土）試験を明治二十三年（1890年）

から明治二十七年（1894年）にかけて断続的に行っており、廣井博士は道庁技師として明治二十五年（1892年）十一月から携わっている¹²⁾。

3. 函館港で行った「セメント及びコンクリート試験」

報告では、「函館港湾調査報文」附録のほぼ三分の二にあたる10ページ弱を「セメント及びコンクリート試験」の記述に当てている。試験は、「明治二十七年七月一日着手、明治二十七年十一月十九日終了」とある。この中で廣井博士は、「セメント性質試験方法」を提案し、「上磯セメント」（現在の上磯町にある太平洋セメント）の性質を調査・試験対象としている。この試験方法は、日本で最初に定式化されたセメント試験法とみなせよう。

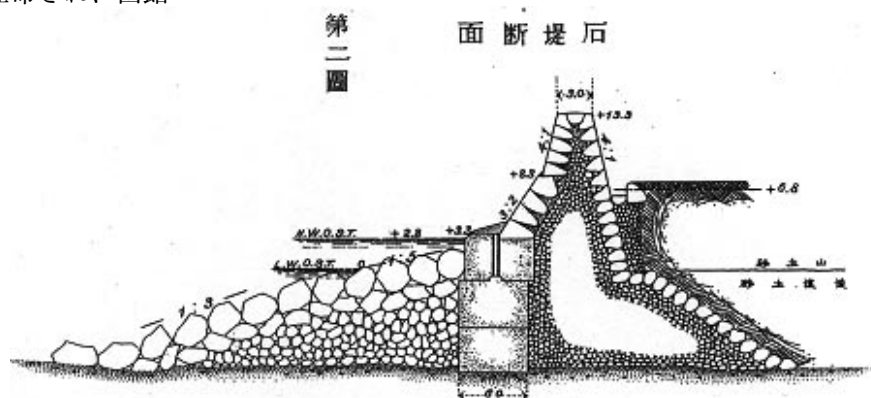
試験項目は、第一試験から第六試験にまたがる六項目から成り、さらにコンクリートを使用する箇所の重要性から、甲種と乙種の二種類に分け、試験基準を変えている。以下に廣井博士の提案したセメント性質試験法の現代語訳（筆者）を載せる。

本工事に使用すべきセメントは、いわゆるポルトランドセメントであり、用途別に、甲乙の二種類とし、下の各項に適合したものとす。

甲種 水上で練って製作し、凝結させるもの。すなわち、塊コンクリート、水上場所詰めモルタルおよびコンクリート用などのものである。

第一 セメントは、酸化マグネシウムを百分の二以上含まないこと。

第二 セメントは、製造後二ヵ月以上風化したも



図－２ 石堤断面図

函館港改良工事報文 明治三十二年四月 北海道廳函館支廳 卷末図面第十三葉中第二圖より。海側の海面上及び陸側埋立地盤上を間知石で積み、内部は裏込め割栗石で充填している。海側の基部はコンクリートブロックを三段に積んでいる。

ことに急な凝結を必要とするものは、三十分間で凝結するものとする。

第五 について試験を施すには、セメント若干を三個に分け、その一つは海水で練り、第二、第三は淡水で練り、いずれも水量は四分の一から三分の一とする。これを三個のガラス板の上に置き、円平形につくって周囲の縁を薄くし、第一、第二は海水に入れ、第三は淡水に入れ、毎日その検査を行い、その薄い縁に少しの異常もないことによって、完全なものと判断する。

第六 固塊の抗張力は、七日後、一平方センチメートルにつき、五キログラムを下回ってはならない。

さらにコンクリートブロック（混疑土塊）を試験的に製造し、海中に設置してその変化を観察しているほか、場所詰めコンクリート試験、袋詰めコンクリートの試験も行っている。廣井博士にとって、函館港の工事に当たって、「混疑土塊」（現代で言う「コンクリートブロック」）を、海中に設置したときの耐久性について、如何なる成分のセメントを使い、如何なる材料を使ってコンクリートを作り、強度発現までの、いわゆる養生の方法を確立し、さらに海中にコンクリートブロックを試験的に設置して耐久性を確認する必要があった。

廣井博士の手でまとめられている「函館港改良工事報文」（明治三十二年四月）の附録にも、工事に必要に応じて行った試験として、調査報文では見られなかったさまざまな条件を設定して十六種類の「セメント特別試験」¹³⁾が行われ、その結果が示されている。

(1) 浸水法（試験饅頭ヲ用ユ）

セメントを海中に置き亀裂が発生するまでの日数を見る。更に、浸水法（試験饅頭ヲ用ユ）で条件を変えて亀裂が発生するまでの日数を試験している。

- 1) 浅野セメントニ粘土ヲ混セシ試験
- 2) 浅野セメントニ沸化セシ石灰ヲ混シ一晝夜ニテ海水中ニ浸セシ試験
- 3) テール水硬石灰¹⁴⁾ヲ海水中ニ浸セシ試験
- 4) 淡水ニ硫酸苦土ヲ混和シテ試験

(2) 抗張力試験（試験法ニヨル）一平方糎（センチメートル）ニ對スル圧（キログラム）

- 1) 浸水ノ場時ニヨリ抗張力ヲ異ニセシ試験
空中・淡水中・海中に於いてその抗張力の違

いを見る。

- 2) セメントニ多量ノ水ヲ加エ空中、淡水并ニ海水中ニ型ヲ置キテ練込ミシ抗張力
セメントに多量の水を加え空中・淡水中・海中に於いて練り込んだときの抗張力の違い。
- 3) 混和砂ノ量ニヨリ抗張力ヲ異ニスルコト
セメントと砂の比率を変えた時の抗張力の違い。
- 4) セメントヲ混和スルノ水量ニヨリ大ニ其ノ強力ヲ異ニス
材料を練る時の水の量による違い。
- 5) 混和砂ノ大小ニヨリ大ニセメントノ強力ヲ異ニス
砂の粒径を変えたときの違い。
- 6) 淡水并ニ海水ヲ以テ練リ圍ヒ所ヲ別ニシタルモノノ試験
加える水の海水と淡水による違いと海水中と淡水中に置いた時の違い。
- 7) 浚渫セシ黒色ノ粘土ニセメントヲ混ジ練込ミタル抗張力
浚渫した黒色の粘土にセメントを混ぜたときの抗張力の確認。
- 8) 混疑土搗固メ法及ヒ練込法ノ優劣ヲ試験
混疑土製造方法としての搗き固めと練り込みの比較。
- 9) 試験砂ノ中ニ少量ノ粘土ヲ混セシトキハ著シク強力ヲ増ス
砂に粘土を混ぜたときの抗張力の変化。
- 10) 純セメント中ニ粘土ヲ混セシ試験
砂を入れない純セメントに粘土を入れたときの耐久性。
- 11) 標本製造ノ時季ニヨリ大ニ其ノ抗張力ヲ異ニス
モルタル・ブリケットの製造時期による抗張力の違い。

(1) の浸水法とは、セメント性質試験法の第五試験のことである。

一方、小樽港湾調査報文の附録にあるセメント試験の項には、「函館港湾調査ノ際定メシ方法ニ據レリ」¹⁵⁾とあって、再説することなく、試験の結果のみを示してある。

小樽港ではコンクリートブロックを防波堤本体の主要材料として使う「スローピング・ブロック・システム」と防波堤本体の前面に設置するコンクリートブロックを階段状に積み上げることによって一体化して波

の力の減殺効果を狙った構造であり、コンクリートブロックが命といってもいいほど主要材料になっているが、函館の調査報文に比べて試験に関する記述は簡明である。

また、廣井博士の港湾工事に関する著書「築港卷之一」の発行が、明治三十一年八月である。つまり、函館港改良工事と小樽北防波堤工事の両方が実施中の時期である。その中のセメント及び混凝土に関する記述には、この函館港の調査及び工事で行った試験の結果が取り入れられている。たとえば、函館港湾調査報文の「セメント性質試験法」は、ほとんどそのまま「築港卷之一」¹⁶⁾に転記されている。

4. 廣井博士がセメント及び混凝土試験を入念に行うことが必要であった背景

廣井博士がセメント及びコンクリート（混凝土）試験を入念に行った背景には、「横浜港コンクリートブロック亀裂事件」がある。明治二十五年十一月に、防波堤の被覆のため海中に設置したコンクリートブロック多数に亀裂が発生していることが発見された件である。製作済みの一万二千余个のうち最終的に千七百九十六個に亀裂を生じたことが確認されている¹⁷⁾。この「事件」は内務大臣に報告され、原因と将来の予防の方法を調査するための委員会が設置された。調査は、明治二十六年三月から八ヶ月間行われたが、報告書に載せてある写真を見れば「亀裂」という表現よりも「崩壊」といったほうが正確であり、適切である。廣井博士も、著書「日本築港史」では、「亀裂・崩壊」と記述している。以下に、横浜港コンクリート崩壊の記述¹⁸⁾の現代語訳（筆者）を載せる。

「要するに、横浜築港に使用した方塊は、その製作が次第に乱雑となり、搗き固めをするため水量を減らした混凝土を、十分搗き固めなかったことにより、多くの空隙を生じ、海水が出入りすることとなったことが、亀裂崩壊の主因と認められる。もし、水量を多くしたとすれば、その結果は、搗き固めたもののような固密なブロックを得るには至らないが、全体の組織は前者に比べて密になり、そのため、亀裂を生じるようなことはなかったであろう。」

このコンクリートに関する事件は政府内部で大変大きな問題となった¹⁹⁾。

当時はこのほかにも、明治二十八年には、海軍の佐

世保のドックで、海水を注水したとたんに水が漏れ出すというセメント混凝土の耐海水性に問題のある事件が起こっており、ふたたび帝国議会で問題となった。事件解決に協力を求められた廣井博士は札幌農学校教授時代の愛弟子の一人で、博士とともに函館港や小樽港で働いた真島健三郎を海軍に異動させている²⁰⁾。

このように海中にコンクリートを据え付けることに對する信頼が無くなっていたとき、廣井博士は函館及び小樽の築港工事を受け持つことになった。

5. 函館港及び横濱港における試験法の比較

廣井博士は、明治二十六年九月十九日横浜港に出張し横浜築港を視察している²⁰⁾。調査委員会が調査している最中である。この後、函館で明治二十七年七月一日に「セメント及び混凝土試験」を開始した。

函館港のセメント試験方法と横浜港でセメント購入時に行った試験方法を比較するため以下に横浜港の試験法の現代語訳（筆者）を載せる。

横浜港のセメント「購入ニ際シ實施シタル試験法」²¹⁾

セメントは工事の初期にはイギリス製を使用し、明治二十四年以来購入したものは、日本製のものに限られた。まさしく、両者の価格（前者は、横浜渡し一トンにつき二十八円、後者は、工事の初期では、二十から二十二円あまり。）は大きくかけ離れているが、その品質に大きな差がないことによる。そして、後者の購入に際して実施した試験法は、以前に前者に行ったものと大差なく、概略を次に示す。

- 1 セメントの重量は、軽く乾いている状態で一立方フィート（0.028立方メートル）につき、八十ポンド（36.29kg）以上であること。
- 1 セメント粉末の割合は、一平方インチ（6.54160平方センチメートル）に5,800の網目をもつフルイを通し、残留分が十二分の一を超えてはならない。
- 1 純セメントの抗張力は、供試塑の切断面一平方インチ（6.54160平方センチメートル）のときは、七日間を経て三百五十ポンド（158.76kg）以上、断面が二、二五平方インチ（14.7186平方センチメートル）であるときは、十日間で一平方インチに対して、四百ポンド（181.436948kg）以上であること。塑は、形成後、二十四時間を経て淡水に浸し置くものとする。その数は、毎回六個とし、その最高を採用すること。

- 1 セメントは、凝結するに当たり、変形を生じてはならない。すなわち、薄い縁をもつ平円板は、形成後、すぐに淡水に浸し、二十四時間を経て、裂け目やひびが生じないこと。

函館港湾調査報文の試験法と比較すると、以下の点に違いが認められる。

横浜港の試験では、

- (1) 酸化マグネシウム（苦土）の含有割合の確認なし。
- (2) 抗張力は純セメントを使用。
- (3) 形積の変化は、直ちに淡水中へ入れ、二十四時間後の変化を見るのみ。
- (4) 凝結時間の開始と終了の確認なし。

となっている。

つまり、廣井博士の提案している試験法のほうがより詳細にわたり精密になっており、横浜築港のブロック亀裂崩壊が、発生した明治二十五年十一月から、たった一年七ヶ月であるが、最新の知見により試験法を当時の技術水準では必要かつ十分なものに改良した。特に(3)の形積の変化は、廣井博士の提案する試験法の第五に当たるが、廣井博士は、第五試験を以下のように述べている。

「第五ノ試験ハ最モ重要ノモノトス。蓋シ、之ニヨリテ、セメントノ耐海質ノ一端ヲ知ルコトヲ得ベキモノナレハナリ。」²²⁾ 現代語訳（筆者）は、「第五の試験は、最も重要なものである。恐らく、これによってセメントの耐海水性の性質の一端を知ることが出来るからである。」

この第五試験は、四週間の間、亀裂発生の有無を確認することとしている。これに対して横浜港の試験は二十四時間まで確認すればよいことになっていて耐海水性に関する試験の姿勢に大きなへだたりがある。

6. 廣井博士の課題解明の基本姿勢

以上のように横浜港などの事件が発生した後に、海中に設置する混凝土ブロックを製作して使用しなければならなかった廣井博士は、コンクリートに関するさまざまな問題を函館港湾調査と函館港改良工事の中で試験し、解決していかなければならなかった。

著書「築港卷之一」を見れば、抗張力試験機を開発し、セメントの化学的反応を研究しているドイツのミ

ハイリスをはじめとして、セメント及びコンクリートに関してヨーロッパの最新の文献を精査し、その中から必要で効果的な試験項目を選択し、試験方法を組み立て、確認していたことがわかる。

さらに、著書「築港卷之一」²³⁾には、

「幾多ノ試験方法中、最モ廣ク施工セラレ、且ツ、適当ナルモノハ、獨逸仕様、並ビニ、試験方法ナルヘシ。然レトモ、セメントノ製造、未タ、充分発達セザル國ニ於イテハ、多少之ヲ変改セサルヲ得サルヘシ。」現代語訳（筆者）は、「多くの試験法の中で、最も広く施工され、そして適切なものは、ドイツ式のマニュアルと試験法であろう。しかしながら、セメントの製造がまだ十分発達していない国においては、多少これを変更せざるをえない。」

とあり、原理的にドイツ式マニュアルと試験方法をモデルとする立場である。

小樽の北防波堤は、セメント及びコンクリートに関しては、函館港湾調査及び函館港改良工事で得た知見を活用して建設されたと考えられる。そのため、モルタル・ブリケットに関する試験結果を公表している廣井博士の記述では、「函館及び小樽で行った試験」となっている²⁴⁾。

廣井博士にとって、函館港湾調査及び小樽港湾調査は、双方が連続している調査である。築港技術にとってセメント・コンクリートの耐海水質の問題は、日本のみでなく、ヨーロッパ諸国でも解決すべき緊要の課題であった。そのため廣井博士は、横浜築港のコンクリートブロック亀裂崩壊事件を十分観察するとともに分析を加えた。そうして、時代の最先端の科学と技術の知見をドイツ・フランス・イギリスなどの先進国からいち早く取り入れ、まず、函館港湾調査でドイツの試験法を手本とし、それを改良したセメント試験法を組み立てて実験で確認し、小樽港湾調査で追試を行い、函館港改良工事では、不十分だった試験に様々な項目を追加し、充実したデータを得て、小樽港北防波堤工事を成功に導いたものとみなせよう。

廣井博士は、函館港改良工事と小樽北防波堤工事という二つの築港工事で与えられた機会を十分に生かし切って、築港現場に科学を持ち込んだ。入念な準備を行い、局所局所に最適の技術を確立するために試験をし、その結果を確認し、更に工事実施中に遭遇する問題を粗末に扱わず丁寧に確認し、不都合があればまた試験をして改良策をみ出す。科学者や技術者にとっ

て当たり前の探求姿勢であろうが、博士は一世紀以上前の築港現場に立って、これを実践した人である。この姿勢と精神が、小樽北防波堤を創りあげたと考えている。

参考文献

- 1) 臨時横濱築港局編纂：横濱港築港誌、p236-360、明治29年7月
- 2) 工學會：工學會誌 第217巻 明治33年3月
- 3) 早川篤・飯田純也：小樽港北防波堤の現状と改修断面 独立行政法人北海道開発土木研究所月報、No.626、2005年7月
- 4) 廣井勇：函館港湾調査報文、明治27年12月21日
- 5) 廣井勇：小樽港湾調査報文、明治29年3月15日
- 6) 北海道廳函館支廳：函館港改良工事報文、明治32年7月11日
- 7) 廣井勇：小樽築港工事報文前編、明治41年7月18日
- 8) 廣井勇：築港卷之一、工学書院 明治31年8月
- 9) 北海道廳函館支廳：函館港改良工事報文、p82、明治32年7月
- 10) 工學會：工學會誌第224巻 明治33年11月
- 11) 北海道廳函館支廳：函館港改良工事報文、p66、明治32年7月
- 12) 浅田英祺：年譜 近代日本の歩みと小樽築港、小樽築港百周年記念行事記念講演会「廣井勇と小樽の人びと」配布資料、平成10年2月19日
- 13) 北海道廳函館支廳：函館港改良工事報文 附録、pp211-223、明治32年7月
- 14) 廣井勇：築港卷之一、工学書院、p106、明治31年8月、「テール産水硬石灰（一名シヨウ、イズローリック）ハ佛國ローン河畔ニ於ケル産地ニ於テ採掘セル石灰石ヲ燒キ後沸化シテ之ヲ製スルモノニシテ多量ノ硅酸ヲ含ミ概シテ能ク海水ノ作用ニ抗スルヲ以テ地中海ノ諸港ニ在リテハ六十餘年來之ヲ使用セリ」、現代語訳（筆者）は、「テール水硬石灰（別名シヨウ＝イズローリック）は、フランスのローン河畔の産地で採掘される石灰石を焼き、その後沸化して製造するものであり、多量のケイ酸を含みたいいては良く海水の作用に耐えるため、地中海の諸港では六十年以上も使用している。」
- 15) 廣井勇：小樽港湾調査報文、p37、明治29年3月15日
- 16) 廣井勇：築港卷之一、p143-147、工学書院、明治31年8月
- 17) 工學會：工學會誌、第149号、明治27年5月
- 18) 廣井勇：日本築港史、pp2-7、p83、丸善株式会社、大正15年5月
- 19) たとえば、和田寿次郎：浅野セメント沿革史、p150、浅野セメント株式会社、昭和15年
- 20) 浅田英祺：年譜 近代日本の歩みと小樽築港、小樽築港百周年記念行事記念講演会「廣井勇と小樽の人びと」配布資料、平成10年2月19日
- 21) 廣井勇：日本築港史、pp3-pp15、p73、丸善株式会社、大正15年5月
- 22) 廣井勇：築港卷之一、p147、工学書院、明治31年8月
- 23) 廣井勇：築港卷之一、p143、工学書院、明治31年8月
- 24) たとえば、廣井勇：築港卷之一、p159、工学書院、明治31年8月



栗田 悟*

国土交通省
北海道開発局
港湾空港部
港湾計画課
課長