

針尾無線塔の計画・建造に携わった技術者と その時代のコンクリート施工技術についての調査報告 ～ 広井勇博士に繋がる人脈 ～

Report on the engineers involved in the planning and construction of the Hario wireless towers
and the concrete construction techniques of that era

小川 健^{1*}, 日比野 誠^{2*}, 岡林 隆敏^{3*}, 松田 浩^{4*}

Ken OGAWA, Makoto HIBINO, Takatoshi OKABAYASHI and Hiroshi MATSUDA

¹正会員 (公財) 長崎県建設技術研究センター技術部 技術支援幹(〒856-0026 大村市池田 2-1311-3)

²正会員 博士(工) 九州工業大学准教授 工学部建設社会工学科 (〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)

³正会員 工博 長崎大学名誉教授 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

⁴正会員 工博 長崎大学教授大学院工学研究科工学科 (〒852-8521 長崎市文教町 1-14)

*Corresponding Author, E-mail:matsuda@nagasaki-u.ac.jp

針尾無線塔は、日露戦争において無線通信の重要性を認識した旧日本海軍が、1918(大正 7)年に着手し、1922(大正 11)年に完成させた構造物である。この無線塔は約 100 年を経た現在でも、ひび割れ、鉄筋の腐食もなく健全な姿を維持している。本論文はこの無線塔がいかに建造されたのか無線塔の概要と計画・建造に携わった技術者の経歴、および明治中期から鉄筋コンクリート標準示方書(初版)が発行されるまでの期間を“コンクリート技術の黎明期”にとらえて、針尾無線塔着手直前のコンクリートの製造設備、配合、練り方、接合面の処理、搗固め(つきかため)、養生に至る各工程の施工技術の調査内容を記載したものである。

キーワード : *Hario wireless towers, deterioration of concrete, "tsukikatame", laitance*

1. はじめに

19世紀後半、欧米列強諸国は権益拡大に意欲を燃やしアジアに進出してきた。この進出に対し旧日本海軍は、海軍の根拠地として1886(明治19)年に日本の沿岸を5海軍区に分け、日本の最西端地区を守る要として佐世保に鎮守府を設置した。当時、鎮守府と遠く離れた艦船や海外の基地との無線通信は短波を利用していたが、この時代の短波通信技術は電離層の変化の影響を受けやすく、伝播の安定度に不安があった。そこで、日露戦争を契機に長波通信の必要性が高まり、巨大な高さの無線塔施設が求められ針尾送信所が建設されるに至った(写真-1)。



(旧日本海軍針尾送信所学術報告書より)
写真-1 針尾無線塔

2. 針尾無線塔の概要

針尾無線塔の概要を記述する前に、大正時代のコンクリート造りの長大・高層構造物の概要について記す。

まず、当時の構造物は多くが鉄骨造であり、鉄筋コンクリート構造物は少ない。建築物では 1920(大正 9)年に施行された「市街地建築物法」の高さ制限により、丸の内ビル 8 階建て高さ 31m である。次に、橋梁では愛媛県の豊秋橋(T 型桁)橋長 155m、ダムでは岐阜県の大井ダム(重力式)堤高 53m がある。

一方、鉄筋コンクリート塔状構造物(写真-2)は、茨城県の旧日立鉱山精錬所煙突 156m、大分県の旧日鉱佐賀



写真-2 鉄筋コンクリート塔状構造物
(左)旧日立鉱山 (中)旧日鉱佐賀関 (右)旧逓信省
精錬所煙突 精錬所煙突 原町無線塔

関精錬所煙突 168m, 福島県の旧通信省原町無線塔 201m, そして, この旧日本海軍の針尾無線塔 137m(3 本)(写真-1)である. 旧日立鉱山精錬所煙突は排煙の亜硫酸ガスの影響で劣化し築後 78 年の 1993(平成 5)年に下 3 分の 1 を残して倒壊, 旧日鉱佐賀関精錬所煙突はコンクリートが健全であるにもかかわらず, 築後 61 年の 1968(昭和 43 年)に塔頂部 8m が宇和島沖地震の際に折損している. 調査結果では打継目の施工不良が原因ではないかと推定¹⁾される. 旧通信省原町無線塔は築後 62 年の 1982(昭和 57)年に老朽化により解体されている.

佐世保市教育委員会の「旧日本海軍針尾送信所学術調査報告書」によると 3 本の無線塔は, 送信局舎を中心に 1 辺 1000 尺(303m)の正三角形の頂点の位置に配置され, 3 塔はほぼ同じ規模である. 塔体は, コンクリート 1 リフト高さ 1.37m, 全高は 100 リフト 137m である.

図-1 に 1 号塔の詳細寸法およびコンクリート数量(筆者算出), 図-2 に円形基礎の断面寸法と断面別の基礎コンクリートの数量(筆者算出)を示す.

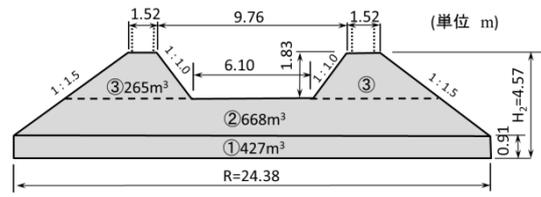


図-2 円形基礎の断面寸法とコンクリート数量



図-3 旧日本海軍の鎮守府位置図

3. 針尾無線塔建造に至る時代背景

19 世紀後半, 欧米列強諸国は権益拡大, 植民地獲得に意欲を燃やしアジアへ進出してきた. この進出に伴い, 前述したように, それらの諸国と対峙するため 1886(明治 19)年に佐世保に鎮守府を設置した(図-3).

佐世保は明治初期までは半農半漁の人口 4,000 人の村であった. 1886(明治 19)年に佐世保鎮守府の設置決定を契機に佐世保は軍人をはじめ役人, 商人等が流入することとなり, 1889(明治 22)年に開庁後は旧日本海軍の前線基地としての軍関連施設の整備と並行して, 人口の急増に対する水道・道路などの都市基盤の整備も重要な任務としていた. そのような中, 1904(明治 37)年には日露戦争が勃発, この戦争において無線通信技術の優劣が勝敗を決する大きな一因であったことから, それまでの通達距離が短い通信技術にかえて, 直接, 国内の各軍港や遠く離れた艦船及び中国大陸の基地との長距離通信ができる無線通信技術の整備が急務となった. そのため高出力の電波と巨大な高さの無線塔施設が求められ, 1913(大正

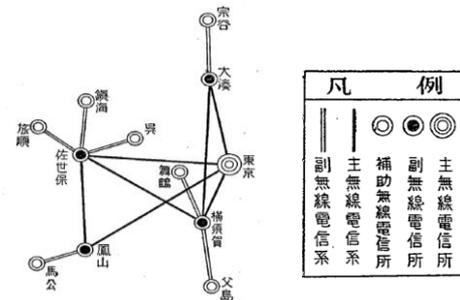


図-4 旧日本海軍の陸上無線通信網

2)年から 1922(大正 11)年にかけて東京(船橋), 台湾(鳳山), 佐世保(針尾)に高さ 100m 余から 200m の巨大な無線塔が建設されるに至った. 無線塔の構造は, 船橋, 鳳山が鉄塔であったのに対し, 最後に着手した針尾無線塔は, 当時の鉄鋼資材価格の法外な高騰により窮余の策として鉄筋コンクリートで建造された²⁾. 図-4 は 1920(大正 11)年までに整備された旧日本海軍の陸上無線通信網³⁾である. さらに, 通信省においても 1920(大正 9)年にアメリカ方面との通信網確立のため高さ 201m の鉄筋コンクリートの無線塔を建造している⁴⁾.

このように明治中期から始まったコンクリートの技術導入の成果は大正時代には世界に誇れる高さの鉄筋コンクリート塔状構造物を構築できるまでに発展してきた.

4. 佐世保鎮守府のコンクリート技術を発展させ, 針尾無線塔の計画および建造に携わった技術者

明治時代末期から大正時代の初期にかけては, ちょうど, 日本における鉄筋コンクリート技術の揺籃期にあたり, 佐世保鎮守府建築科の技術者は, 海軍施設や佐世保市内の都市基盤を整備するため鉄筋コンクリート構造物

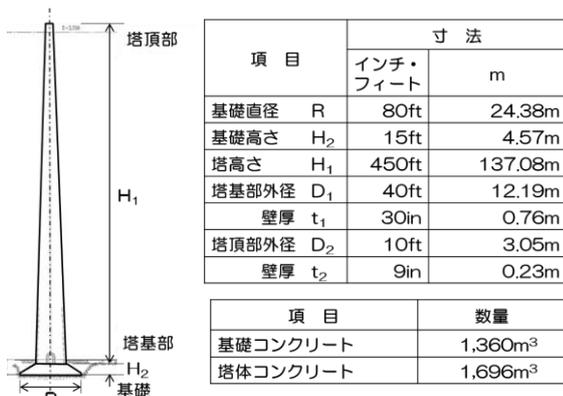


図-1 1 号塔の詳細寸法およびコンクリート数量

の建設に挑んでいた。そのような中で無線塔が建造されることとなった。以下に、この佐世保鎮守府のコンクリート技術を発展させ、無線塔の計画から完成までに従事した技術者について記す。

(1) 吉村長策(1860(万延元)年～1928(昭和3)年)

工部大学卒業後、1年間助教授を務め、1886(明治19)年に長崎県に赴任、港湾工事や水道工事の工師長として調査、測量、設計、監督に従事している。1891(明治24)年には大阪市に転任、日本で最初の重力式コンクリートダムである布引五本松ダムを完成させた後、各都市の水道事業に従事、1899(明治32)年に佐世保鎮守府に転任した。翌年には、北海道庁の小樽築港工事から海軍に配属された真島健三郎も加わり、海軍所管の多くの港湾構造物を完成させている。またこの間に、長崎市水道事業第1回拡張事業の顧問として本河内低部貯水池のコンクリートダム、我が国最初の鉄筋コンクリートアーチ橋を完成させ、佐世保鎮守府建築科のコンクリート技術の基礎を築いた技術者である。1920(大正9)年には海軍省建築局の前身、臨時海軍建築本部長に就任、1923(大正12)年に退官している。ちなみに後任として海軍省建築局長に就任したのは真島健三郎である。

吉村長策は退官後1926(大正15)年から1927(昭和2)年まで土木学会の第14代会長も務めている⁵⁾。

(2) 真島健三郎(1873(明治6)年～1941(昭和16)年)

札幌農学校工学科在学中に、後年「港湾工学の父」と呼ばれた広井勇博士(小樽築港事務所長のち東京帝国大学教授)の指導を受け1896(明治29)年に卒業後すぐに、広井勇博士が責任者として従事していた北海道庁の小樽築港工事に助手として工事にあたった。「小樽築港工事報文前編 職員及工事関係人」のなかに真島健三郎の旧姓「西條健三郎」の名で記録されている。

この工事の大きな特徴は、コンクリートの徹底的な搗固めと、広井勇がドイツで学んだセメントに火山灰を混入することによって耐海水性を向上させる技術⁶⁾を採用して成功を収めていたことであった。同時期、多くの港湾施設整備を急ぐ旧日本海軍の佐世保鎮守府の第一船渠工事が1895(明治28)年に完成したが、セメントの耐海水性の不良により漏水する事故が発生していたことから、真島健三郎は1900(明治33)年に海軍に移り、このドッグ工事に火山灰を混入する技術を用いて見事に完成させた⁷⁾。海軍への移動について広井勇の推薦があったことは想像に難くない。

1903(明治36)年には諸外国の鉄筋コンクリート構造物の視察に出向き、帰国後には100坪の建築物、高さ24m～45mの煙突、3000トンの油槽タンク等の構造物に我が国で初めて鉄筋コンクリートを採用している⁸⁾。そのほか、当時海軍最大と評された幅363m、長さ576m、高さ15mの立神係船池を土堤による海上締切施工で完成させている⁹⁾。

真島健三郎は針尾無線塔の設計を終えたのち、無線塔着手直前の1917(大正6)年には呉鎮守府の建築科長として転出、1923(大正12)年海軍省建築局長に就任している。この年の9

月には関東大震災が発生、震災後、耐震設計の研究を進め、1930(昭和5)年には「地震と建築」を出版している。翌年には土木学会副会長に就任、1932(昭和7)年に海軍を退職している。

(3) 吉田直(1884(明治17)年～1955(昭和30)年)

1908(明治41)年東北帝大北海道農科大学土木学部卒業後、海軍省に入省し横須賀鎮守府に所属、1912(明治45)年から真島健三郎のもとで佐世保鎮守府建築科に勤務、のちに建築科長を務めている。1917(大正6)年に主任技師として針尾無線塔建造予定地の現地調査をするとともに大分県の旧日鉱佐賀関精錬所煙突、福島県の旧逓信省原町無線塔などの調査を経て針尾無線塔の設計に取り掛かり、配合に火山灰¹⁰⁾を取入れて、1918(大正7)年に建造に着手し1922(大正11)年に完成させた。

無線塔完成後は、佐世保市内の初の転石(ころびいし)コンクリート重力ダムの設計も担当、その後、横須賀鎮守府建築部長に転任し、1933(昭和8)年に、真島健三郎と同じく海軍省建築局長に就任している。局長在職中には横須賀、呉、佐世保、大湊などのドッグ計画の指導も行っている¹¹⁾。この間の昭和11年には土木学会常務委員も務め、1941(昭和16)年に海軍を退職している。

5. コンクリート黎明期の施工技術

黎明期には多くの土木技術者が混凝土(コンクリート)に関する著作物や報告書を執筆している。そのなかから施工技術(混合機、配合、搗固め、養生、接合等)について触れている文献の要点について調査した。「搗固め」とは棒の先で押しつぶすという意味である。

調査にあたって、各著者で異なる用語の呼称について原文表記箇所を除いて下記のとおり統一する。

「混合機・混合器・混和機・混捏機・混製機・捏混機」は「コンクリートミキサーまたはミキサー」に、「塊混凝土・混凝土塊」を「ブロック」に、「搗固め・撞(つき)堅め・搗固・搗き固め」は「搗固め」に、「堅練・硬練」は「硬練り」に統一して表記する。

(1) コンクリートミキサー

主な文献で確認できる我が国におけるコンクリートミキサーの使用の始まりは、1889(明治22)年に外国人技術者を招聘して着手した横浜築港工事の「横浜築港工事用材料混凝土塊調査報告書」の記録にみることができる。1期工事の防波堤工事に使用した機種は英国カレー及びラムの特許のミキサーとの記録がある。この工事ではブロックの粗製濫造によって亀裂が生じ甚大な災害が発生しており、この調査報告書の巻末にはこのミキサーの写真-3が掲載されている。また、1897(明治30)年5月に着工した広井勇指導のもと施工した小樽築港工事の「小樽築港工事報文(前編)」には英国製のケーラー・ラム式のみキサーを使用したと記録しており、日本における築港工事記録をまとめた広井勇の「再訂築港(前編)」にはこのミキサー図-5を掲載している。次に小樽築港工事着

手直後の 1897(明治 30)年 10 月に着手した大坂築港工事の「論説報告大坂築港における混疑塊」の報告書には中心軸の周りを回転する円筒形の特殊な形状のミキサー図-6 を掲載している。英文字表記があることからこれも輸入品であることが分かる。

このように我が国の大型工事では当初から外国のミキサーを輸入し使用していたことが確認できる。既往の研究^{12),13)}では、我が国におけるミキサーの使用開始は 1902(明治 35)年着手の神戸築港工事との研究成果が報告されているが、横浜築港工事までさかのぼることができるようである。

小樽築港工事で使用したケーラー・ラサム式の構造は、三角形の容器内に骨材は両側から鋼製のかき板をチェーンで連結したもので掻き揚げ、セメントは頭部から投入し、水平の回転混合筒より外部に排出する仕組み¹⁴⁾となっている。横浜築港工事で使用したカレー及びラサムと小樽築港工事で使用したケーラー・ラサム、発音が異なるが写真と図面を比較すると同一機種であることが分かる。

このほかに広井勇の「再訂築港前編」にはメッセント式ミキサー、立方(キューブ)式ミキサーの機種も確認できる。図-7 はメッセント式ミキサーである。90 度回転するごとに点線の断面になるような奇形の立方体をなしている。この機種は横浜港でも使用したと記載されてい

ることから横浜港ではケーラー・ラサム式とメッセント式ミキサーの 2 種類を使用していたことになる。

日比忠彦(京都帝国大学教授)の 1916(大正 5)年発行「鉄筋混凝土の理論及び其応用(上巻)」には胴を傾けて排出できる可傾式の立方(キューブ)式ミキサー図-8 を掲載している。広井勇は「再訂築港前編」のなかで、当時最も広く使用されているのはキューブ型と述べている。このキューブ型が日本に初めて輸入して使用されたのは 1902(明治 35)年の神戸港築造工事¹⁵⁾である。写真-4 は 1916(大正 5)年着手の利根川萬世水門工事に使用中のキューブ型ミキサーである。

このようにキューブ型ミキサーは可傾式であるため広く使用されていたが、一方で胴の摩耗と衝撃が激しく、また立方体の函の隅にコンクリートが付着しやすく効率も良くないという欠点を抱えていた¹⁶⁾。おそらく立方体であるため回転力にムラが生じ、かつ容器内の材料も滑らかに移動できなかったものと推察する。

このほか日比忠彦の「鉄筋混凝土の理論及び其応用(上巻)」や阿部美樹志(横浜国立大学都市科学部講師)の 1916(大正 5)年発行「鉄筋混凝土工学」、川口虎雄(熊本高等工業学校教授・校長)の大正 5 年発行「土木工学」には、円筒型(ドラム型)写真-5 と円錐型(コーン型)写真-6 のミキサーも紹介している。また、これら 3 文献発行時に国内での使用実績がなかった円筒形(ドラム型)は 1918

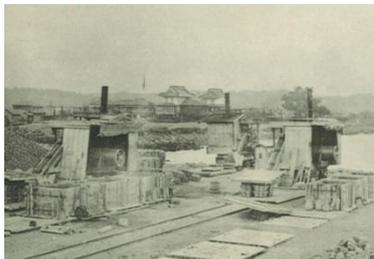


写真-3 カレー及びラサム式ミキサー (横浜築港工事)

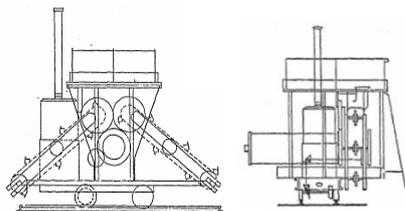


図-5 ケーラーラサム式ミキサー(小樽築港工事) (左)正面図 (右)側面図

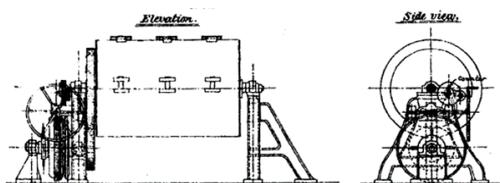


図-6 大坂築港工事で使用したミキサー (左)正面図 (右)側面図

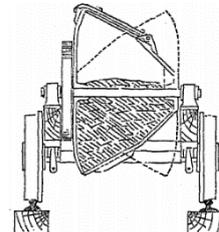


図-7 メッセント式ミキサーの模式図

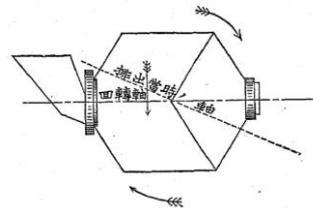


図-8 キューブ式ミキサーの模式図

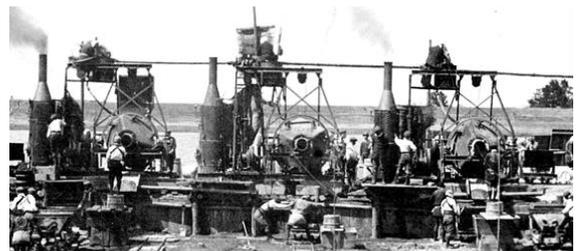


写真-4 キューブ式ミキサー(利根川萬世水門工事) (土木学会土木貴重写真ライブラリーより)

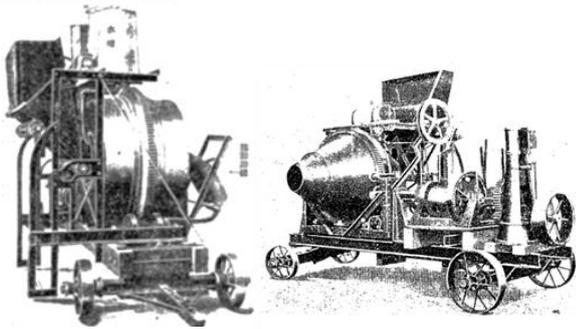


写真-5
シカゴ式ミキサー
(ドラム形)

写真-6
スミス式ミキサー
(円錐形)



写真-7 円筒型(ドラム型)ミキサー(新潟萬代橋
工事)(土木学会土木貴重写真コレクションより)

(大正7)年頃から輸入され使用され始めている。

これ以降、明治から大正初期にかけて広く使用されていたキューブ型ミキサーは内面が滑らかな円筒形(ドラム型)にしたいに駆逐され¹⁷⁾、円筒形(ドラム型)は橋梁やダム、建築工事に広く使用されてゆくことになる。写真-7は1929(昭和4)年竣工の新潟萬代橋で使用された円筒形(ドラム型)ミキサーである。

以上がコンクリート黎明期のコンクリートミキサーの変遷である。

(2) 配合

初期のコンクリートは無筋コンクリートの時代で配合は容積配合である。1889(明治22)年に外国技術者の指導のもと着工した横浜築港工事では、セメント：砂：砂利と割栗石=1：2.8：5.2で施工している。しかし、ブロック亀裂発生原因の調査報告書「横浜築港工事用材料混凝土塊調査報告書」によると、砂の分量に対するセメントの量が少なく海水の侵蝕作用に充分抵抗できないと結論付けている。また、同様にブロック亀裂発生や亀裂の兆候が発生した大坂築港工事の「論説報告大坂築港における混凝土塊」でも、セメント：砂：砂利=1：3.2：4.8では、セメント量が少ないとの調査結果である。

広井勇は「築港卷之一(再版)」のなかで、海外留学中の数多くの実績からセメント：砂の比率は1：2が最良とし、小樽築港工事では、セメント：砂：砂利砕石=1：2：4の配合により着手している。その後、ドイツにおいて、配合の一部に火山灰を利用することによりコンクリート

の海水に対する耐久性が著しく向上することが実証されたことを受け、広井勇も自ら実験を行い良好な結果¹⁸⁾を得たことから明治35年から火山灰を配合に取入れ、セメント：火山灰：砂：砂利砕石=1：0.8：3.2：6.4に変更している¹⁹⁾。当然、横浜築港でのブロック亀裂災害も念頭にあったことは明白である。この小樽港は築後約110年を経た現在でもなお、健全な防波堤を維持しており配合の卓抜さを物語っているといえる。

次に無筋コンクリートの水量について整理する。水量は技術者によって全材料の容積や重量に対する割合の目安を示している。このように、統一された明確な水量の規定はなくコンクリートの強度に影響する要因としてまだ十分に認識されていなかったようで、施工に必要なコンシステンシーは施工を担当する技術者に委ねられていたことが分かる。

ここで一例として、当時の多くの技術者に影響を与えた広井勇の著書に見る水量の目安について記す。「築港卷の一(再版)」では、コンクリートブロックの水量は全体の積量(練り上がり容積)の1割～1割5分、「小樽築港工事報文(前編)」では多くの実績を積み重ねるなかで1割2分～1割4分まで絞り込んでいる。これは水セメント比で38～44%に相当すると推定され²⁰⁾非常に硬練りであったことが分かる。

次に鉄筋コンクリートの配合の調査結果について述べる。我が国での鉄筋コンクリートに関する最初の文献は広井勇の1903(明治36)年「鐵筋混凝土橋梁」である。この著書のなかで、鉄筋コンクリートの配合においてもセメント：砂：砂利砕石=1：2：4を標準とし、粗弱でよいものは1：2.5：5と記している。さらに、鉄道院公示の1914(大正3)年の「鐵筋混凝土設計心得」でも構造物の許容応力強度を1：2：4の例を挙げて説明している。その後も多くの技術者が文献を発表しているが、無筋・有筋にかかわらず広井理論を継承してセメント：砂：砂利砕石=1：2：4を標準としていることが確認できる。技術者のなかでも海外で学位を取得した阿部美樹志は「鐵筋混凝土工学」のなかで、コンクリートの最大の特徴である耐火性にも焦点を当てて論じ、「鐵筋混凝土煙突」の項のなかで、海外の実績を参考に「配合は1：2：3とするのが普通である、又固練りに失せずなるべく軟らかきものを用いる。」と記している。これは、煙突は壁厚が薄く十分な搗固めが期待できないことから、モルタル分を多くして鉄筋との付着を確実にするための配合である。一方、鉄筋コンクリートの水量については、構造物の種類や鉄筋量により「硬練、中練、軟練」の用語を使い分け、日比忠彦は「鐵筋混凝土の理論及び其応用(上巻)」のなかで次のように示している。全材料とはセメント、砂、砂利の総重量である。

硬練・・・全材料の重量の4～6%

中練・・・全材料の重量の7～9%

軟練・・・全材料の重量の10～13%

また、同様に川口虎雄は「土木工学中巻」のなかで次のように示している。

硬練・・・全材料の重量の5%内外

中練・・・全材料の重量の8%内外

軟練・・・全材料の重量の12%内外

以上のように両著者とも鉄筋コンクリートの水量はほぼ同じ値を採用している。しかし、このような全材料に対する2%の水量の差は依然として必要な強度および作業に適するワーカビリティへの影響は大きい状況にあった。

その頃海外では、大正7年にアメリカ人 Abrams が、水セメント比と強度の間には相関関係があるとして「水セメント比説」を発表した。大正11年にはアメリカ留学から帰国した吉田徳次郎(九州帝国大学教授)がこの説を国内に紹介²¹⁾、その後、国内での実証研究が進むことで、その正しさが認められ、鉄道院では昭和のはじめからこの趣旨を取入れ設計施工が行われるようになった²²⁾。

このように特定の機関で採用されることになった水セメント比説は、昭和6年に公の機関である土木学会の「鉄筋コンクリート標準示方書(初版)」のなかで、配合はセメント、細骨材および粗骨材の容積比をもって表し、材令28日における圧縮強度に応じた使用水量を使用セメントの重量百分率(水セメント重量比)をもって表すこととした。ここに至ってようやく水量の曖昧な区分に終止符が打たれた。それまでの容積比により設定することを習慣としてきたこともあり、取り違えることがないように「水セメント“重量”比」と表記している。

ここで参考として容積配合1:2:4の2%の水量の差を日比忠彦の「鉄筋混凝土の理論及び其応用(上巻)」に掲載されている例²³⁾をもとに水セメント比の差を推定する。この例の単位体積重量の測定方法は示されていないが、各材料の1ℓ当たりの単位体積重量は、セメントおよび砂を1.23kg、砂利を1.76kgとしている。

容積配合 1:2:4 の重量	セメント 285kg, 砂 570kg, 砂利 1630kg
全材料の重量	285+570+1630=2485kg
2%の水量の差	2485×0.02=50kg
水セメント比の差	50÷285×100=18%

この例では2%の水量の差は水セメント比に換算すると18%もの差がある結果となった。

「鉄筋コンクリート標準示方書(初版)」では、このほかに、それまで技術者によって異なっていたセメントの重量についても1,500kgを1m³と規定した。さらに、鉄筋コンクリート標準示方書付録5章の「ウォーカーピリチー試験に関する標準方法」のなかでスランプ試験、フロー試験等についても標準方法を示している。

その後も「鉄筋コンクリート標準示方書」は改定され、容積配合については1936(昭和11)年版まで続き、1936(昭和15)年版において容積配合と重量配合の並記となり、1936(昭和24)年版に至ってようやく現代と同じ重量配合に改訂された。

(3) 混凝土(コンクリート)の練り方の種別

明治22年に着工した横浜築港工事、明治30年に着工した小樽築港工事・大阪築港工事ではコンクリートの練り方の区分の表記はない。明治31年発行の広井勇の「築港巻之一」に至ってコンクリートの一般的な練り方を「搗固混凝土・煉込混凝土」の2種類に区分して説明している。「煉込混凝土は比較的多量の水を加えて粘体状になるもの、搗固混凝土は凝結に要する水量程度とし、蒸発や石材の吸収に対し多少余裕を与える程度の水量をもって練るもの(一般に堅練という)の2種類がある。」と記している。

この後、広井勇は前述の「鉄筋混凝土橋梁」のなかで、鉄筋コンクリートの配合は「容積配合で硬煉法により模型(型枠)に填充する。搗固めが困難である場合はやや水量を増加して専ら充実の完全を期すべし。」と記しており、明治41年に着手した二期工事の「小樽築港工事報文(後編)」において広井勇の後任である伊藤長左衛門(北海道庁技師)は、「函塊(ケーソン)の周壁は、1層21cmを搗固法による外若干練込法によれり。」と記し、搗固法を標準として施工している。また、明治45年1月に発行された鶴見一之(仙台高等工業学校教授)・草間偉瑛武(早稲田大学教授)共著の「土木施工法」の練り方の記載内容は広井勇の「築港」と全く同じである。

このように鉄筋コンクリートであっても水量が多い煉込混凝土ではなく搗固混凝土である硬煉法を推奨している。この「鉄筋混凝土橋梁」発表11年後の大正3年に公示された鉄道院の「鉄筋混凝土橋梁設計心得」では、「搗固めの後、表面に僅に水分の滲出する程度のものを乾混凝土、水量が乾混凝土におけるより多量なるも膠灰(モルタル)が礫又は碎石より分離するほど多量でないものを湿混凝土」との呼称で区分している。いずれにしても両文献の用語は異なるものの、コンシステンシーに大きな差はなかったものと推察する。鉄筋コンクリートであっても「搗固法を標準」と位置付けていることについて、煉込法は搗固法と比較して「凝結力が減じ、多孔になりやすく、重量は百分の三の差がある。」²⁴⁾、さらに「煉込混凝土の強度は搗固めたるものに及ばず、2か年に亘る実地試験結果によれば圧縮強度は、前者は後者の半に過ぎず。」²⁵⁾等の煉込法の欠点が実証されることにより、煉込混凝土・湿混凝土の積極的な使用を回避するねらいがあったものと判断する。

このような中で鉄筋コンクリートが明治30年代中頃から次第に橋梁、煙突、建築、油槽等に使用され普及するにつれて、多くの学者や諸機関が鉄筋コンクリート関連の技術書や心得書を執筆するようになった。代表的な文献として明治45年1月に国内外の文献を参考に高等工業学校の講習教材として発行された鶴見一之・草間偉瑛武共著の「土木施工法」、大正5年1月に海外の膨大な著作物と国内の情報をまとめて発行された日比忠彦の「鉄筋混凝土の理論及び其応用(上巻)」、大正5年4月に海外

の土木理論や力学に関する研究成果をまとめて発行した阿部美樹志の「鐵筋混凝土工学」、一般土木技術者を対象に大正5年11月に発行された川口虎雄の「土木工学」等が挙げられる。なかでも日比忠彦と川口虎雄は、前項で述べたように構造物の種類によって「硬練・中練・軟練」に分類し、それぞれの水量を全材料に対する重量比(%)で示している。ここで初めて軟らかいコンクリートを「中練・軟練」に区分している²⁶⁾。この区分は、現場技術者によって水量が一致せず、ややもすると施工性を優先させる傾向があることから品質を無視した軟らかいコンクリートを安易に採用することがないように明確に示したものである。

(3) 搗固めと接合面(層境)の処理

我が国におけるコンクリートの施工は、各機関が外国から招聘したお抱え技術者の指導のもとでスタートした。しかし、明治22年に着工し明治29年に竣工した横浜港築港一期工事では、前述のように膨大なブロックに亀裂が生じるという大災害が発生した。この調査報告書によると「セメントの砂に対する分量がやや少ない。小割栗石の形状が大きく内部に空隙を生じる。搗固めが不十分である。」等の原因²⁷⁾を指摘しており、そのなかに、一層30cmで搗固めたコンクリートブロックの製造法には接合面の処理手順に関する事項は一切確認できない。層厚30cmは文献を照査する限り最も大きい値である。

この横浜築港一期工事竣工翌年には、我が国未曾有の工事と言われた小樽築港工事に着手しているが、広井勇は「小樽築港工事報文(前編)」の中で「塊(ブロック)混凝土の搗固めは堅練り一層18cmを大蜻で15分間搗固め、水が表面に滲み出したら小蜻で隅々を搗固める。一層の搗固めを終わるときは熊手を以てその表面を掻き荒らし、次層の填充に掛る。」としている。表面を掻き荒らす作業は横浜港の失敗事例も念頭にあり層境の一体化を図るための策である。防波堤主要部分のブロック(高さ1.8m)の場合、搗固時間は10層150分を要することになる。そのため人力作業では作業効率が低く1日のブロック製作個数が限定されることから、小樽築港工事の半ばには圧気を使用した搗固能力500回/分の搗固機²⁸⁾図-9を製作して施工、この結果を「再訂築港(前編)」のなかで「往復運動毎分250回、一面坪(3.2m²)を搗固めるに約3.5分を要する。人力の比に非ず。」と記載し絶大な威力があったことを示している。おそらく、この搗固め時間の短縮はコンクリートが新鮮なうちに次層に取り掛かることによって、上下層の一体化や品質の均一性にも大きな効果をもたらしたものと考えられる。

次に横浜築港工事と同様にブロックの亀裂破壊を起こした大坂築港工事では1層24cmを3種類の施工方法により搗固めている。1・2種は搗固め時間に40分以上を掛け、2種はさらに耙(くまで)で表面を掻き荒らし接合面の処理する方法、3種は搗固め時間を18分に抑えて空気暴露時間短くして耙(くまで)で表面処理する方法である。

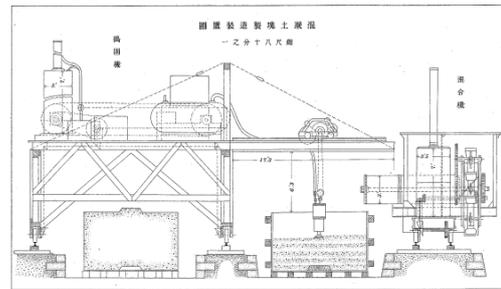


図-9 混凝土塊製造装置図(右端混合機はケーラーサム式ミキサー)(小樽築港工事報文(前編)参考文献6)より)

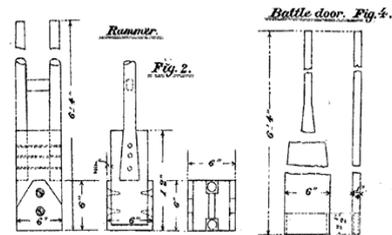


図-10 (左から)12kg ランマー(蜻)の正面図・側面図・底面図と4.5kgの羽子板状の胴突正面図と側面図

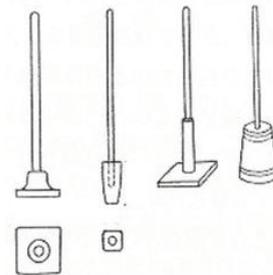


図-11 搗固蜻(左3本は金属製、右は木製)

この結果、主に1・2種施工のブロックに亀裂が発生している。これは層境を一体化させるためには3種施工の空気暴露時間を短くして層境の表面の掻き荒らしすることが重要であることを物語っている²⁹⁾。

図-10は大坂築港工事で使用した外国製の12kgの蜻と4.5kgの羽子板状の胴突の図面である。英文字で“ランマー(Rammer)”と表記している³⁰⁾。

このほか、鶴見一之・草間偉瑤武共著の「土木施工法」や川口虎雄の「土木工学中巻」には先端の形状が異なる図-11のような搗固蜻を載せ、用途を説明している。また、川口虎雄は「人力搗固めは労苦多く工事が粗雑に流れるので圧搾空気を利用した機械蜻を用うれば出来上りの品質は良好である。」と記載している。これは広井論文に倣ったものと考えられる。そのほかの文献も「人力搗固め」の方法は広井論文に沿った手順を記載している。

以下に、当時の搗固蜻使用状況を確認できる写真を掲載する。

写真-8は1901(明治34)年に竣工した「佐世保軍水道第一拡張(岡本貯水池)調査報告書」の貯水池外周壁施工中の写真である。白枠内に柄の長い搗固蜻(棒)を持った労働者が14人ほど確認できる。

写真-9 は 1916(大正 5)年の利根川萬世水門工事の基礎鉄筋コンクリート施工中の写真である。鉄筋コンクリート用搗固蝋を持った女性労働者が確認できる。搗固蝋の先端がわずかに膨らんでいることから図-11 の左から 2 番目の種類の搗固蝋と判断する。

写真-10 は 1926(昭和元)年の長崎市小ヶ倉ダム施工中の写真である。白枠内に横にして置いてある搗固蝋が確認できる。写真-11 は白枠内の拡大写真である。搗固蝋の先端が円錐台状で図-11 の右端の搗固蝋と同型であることが分かる。

次に、鉄筋コンクリートの搗固めについて整理する。広井勇の「鉄筋混凝土橋梁」の発行から土木学会の「鉄筋コンクリート標準示方書(初版)」の発行まで 28 年間もの期間がある。この間の鉄筋コンクリートの搗固方法について文献を照査すると、当初は硬練りを標準としていたが、家屋、橋梁、擁壁等各種の鉄筋コンクリート構造物が普及するにつれて、広井は「硬練法により搗固め、局部の搗固め困難なるものはやや水量を増加させる。」³¹⁾、鶴見一之・草間偉瑛武は「鉄材と混凝土の接着を十分完全にするためモルタルを多くし、水分を増したものをを用いることが多い。搗固めに際し空隙を充填しなければ多孔になる。」³²⁾、日比忠彦は「鉄筋混凝土工事では堅練を使用して十分なる搗固をなすことはほとんど不可能な場



写真-8 佐世保軍水道第一次拡張工事の貯水池工事施工状況写真 (佐世保軍水道第一拡張調査報告書より)



写真-9 利根川萬世水門工事基礎コンクリート施工状況(土木学会土木貴重写真コレクションより)

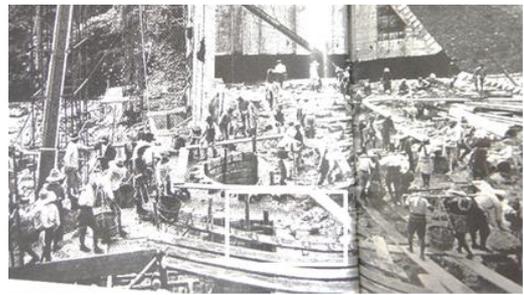


写真-10 長崎市小ヶ倉ダム施工状況写真 (長崎水道百年史より)

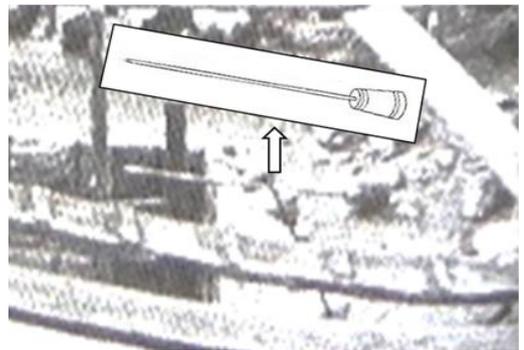


写真-11 白枠内拡大写真と搗固蝋

合が多い。水湿混凝土を用いるときは鉄筋の周囲を完全に包圍し得る点において寧ろこれを推奨する。」³³⁾などと微妙に変化してきている。緻密なコンクリートを生成する硬練りか、それともしっかりと充填できる軟練りか、この二律背反する問題にいかに対応するか技術者の苦悩の跡が見て取れる。

一方、搗固め層厚は鉄筋量によって異なるようである。鉄筋コンクリートの層厚を記載した文献は少なく、広井勇は橋梁(アーチ橋)では、箇所異なるが最大で 12 cm³⁴⁾、伊藤長左衛門は小樽築港工事(後編)で函塊(ケーソン)は 21cm³⁵⁾で施工したと記録している。このように技術者の裁量に任されていたようである。そして「鉄筋コンクリート標準示方書(初版)」に至って前述したように「所要強度に応じて試験のうえ水セメント重量比を定めることとし、3 種類の材令 28 日における所要強度の標準の水セメント重量比を示している。搗固めは適当な器具で十分に搗均し、硬練りコンクリートを使用する場合は層厚は 15cm 以下」とのみ規定している。

以上のように、コンクリート黎明期の搗固方法の経緯を列記したが、現代で使用するような内部振動機はまだ一般に普及していない。内部振動機は昭和 9 年国鉄信濃川工事局がフランス製³⁶⁾を輸入し初めて使用している。また、国内のダムでは昭和 10 年に宮崎県塚原ダム建設工事においてフランス製³⁷⁾、アメリカ製のほか国産初めての数種類の型式の製品も使用している^{38), 39)}。写真-12 は塚原ダムに納入した国産最初の振動機と同型タイプ(直径 10cm と 15cm)の振動機の写真である。

このようにして国内で使用され始めた内部振動機であ

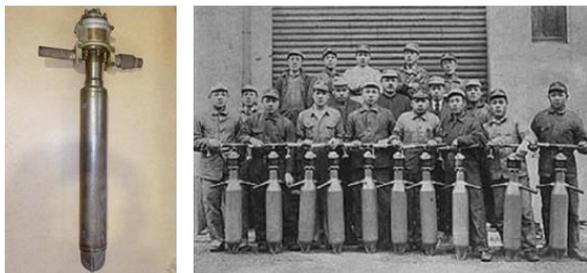


写真-12 塚原ダムで使用された振動機と同型タイプの（φ10cm(左)とφ15cm(右))の写真(エクセン(株)提供)

るが、使用方法については何ら統一されたものではなく、「鉄筋コンクリート標準示方書(15年版)」に至って「振動機を使用する場合には、コンクリートの配合、水量、振動時間其の他に責任技術者の支持を受くべし。」と条項が追加されている。

次に、接合面の処理について整理する。ブロック亀裂災害を起こした横浜築港工事では、1層30cmを16ポンド(約7kg)の杵(きね)で搗固め、その中に中割栗石を並べた後、次層に取り掛かっており、接合面の処理をした記録はない⁴⁰⁾。一方、小樽築港北防波堤工事では前述のように搗固機を使用して徹底した搗固めを行い、接合面はその表面を掻き荒らし次層の填充に取り掛かることとしている。この処理方法により、13,000個余りの塊(ブロック)のなかで一つの作り損じがなかった実績を残している⁴¹⁾。この偉大なる成果はその後の技術者に多大なる影響を与え、この処理方法が継承されていくことになる。

このような経緯のなかで、川口虎雄が1916(大正5)年発行「土木工学」において新旧コンクリートの打継面において「コンクリートが硬化を始めるとその表面に汁液が滲出し固結してレイタンス(Laitance)となり悪結果を及ぼす。」⁴²⁾と指摘しており、我が国で初めてレイタンスについて触れている。その後も、レイタンスが構造に与える影響について1917(大正6)年の「米國混凝土及鐵筋混凝土調査聯合委員會報告」やその後の15年間に亘る吉田徳次郎、坂田時和らの多くの技術者の論説報告や討議を経て、ようやく1931(昭和6)年発行の「鉄筋コンクリート標準示方書(初版)」のなかの「接合」の節で「作業を中止したる時、レイタンスを除去し表面を充分粗にすべし。」と規定された。2017制定の「コンクリート標準示方書(施工編)」でもこの「粗にする。」表現は受け継がれている。

(4) 養生

ブロックが亀裂崩壊を起こした横浜築港工事では、コンクリート打設完了後一切養生を行っていない。報告書には亀裂崩壊原因の一つに打設翌日に「型枠を外し日光に暴露し乾燥防止を予防していない。」⁴³⁾ことを指摘している。

広井勇は「築港巻之一」に「型枠は3日間を経て取り

外し2週間はムシロで覆い、1週間は水を注ぐ。」と記し、また、鶴見一之・草間偉瑳武は「土木施工法」のなかで「最初の1週間は注水し湿気を失わないようにする。注水を怠ると十分凝結せず微細な亀裂を組織に生じる。」と詳しく説明している。

このように当時の技術者は、横浜築港工事以後、養生の重要性を唱えているが公の標準的な養生方法を規定したものはなかった。その後、1931(昭和6)年に至って、「鉄筋コンクリート標準示方書(初版)」が制定され、この示方書の第二節・養生の項において「コンクリートの露出面は葎(ムシロ)、布、砂等を以てこれを覆い、これに散水して少なくとも7日間常に湿潤状態を保つ。」と規定されるに至った。

以上が文献に見る施工方法の調査結果である。

6. おわりに

佐世保鎮守府の技術者の経歴を詳細に調査するなかで、軍事施設に限らず増加する市民の生活を守る都市基盤整備にも積極的にコンクリート構造物を取入れ挑戦していたことが分かった。また、針尾無線塔建造技術の原点が真島健三郎を介して小樽築港工事責任者広井勇博士に辿り着くことができたのは大きな収穫であった。この無線塔は、品質重視を貫いた広井勇から真島健三郎へ、真島健三郎から吉田直に継承された叡知の結晶といえる。

次に、明治中期から「鉄筋コンクリート標準示方書(初版)」が発行されるまでを“コンクリート技術の黎明期”ととらえて、我が国のコンクリート施工技術の変遷について当時の文献を詳細に調査した。

その結果、なかでも我が国での「コンクリートミキサー」は大型工事において当初から輸入された製品が使用されていたことが判明した。次に、「配合」の搗固め、接合面の処理、養生については、その重要性を認識していなかった築港工事においてブロックの亀裂破壊災害が発生している。一方、広井勇は小樽築港工事報文の「混凝土塊製造方心得」⁴⁴⁾のなかで搗固めの方法と時間、接合面の処理方法、養生期間を細かく規定し、労働者がこれを忠実に遵守したことによりブロック一個の作り損じもなく工事を終えている。この「心得」がこの偉大なる成果をもたらしたものと考える。

また、この業績は国内の学者に絶大なる影響を与え、コンクリート技術に関する当時の多くの著者は広井勇博士執筆の「築港」や「小樽築港工事報文」を教書としていることが明らかとなった。

最後に、現代のコンクリートの配合・製造から養生までの作業が分業されているのに対し、当時の技術者はこの一連の作業を不可分の作業ととらえて必死に技術の習熟に努め、多様なコンクリートの性質を理解しようと真摯な態度で取り組んでいた姿勢を学ぶことができた。この姿勢は現代の技術者も改めて見つめ直す必要があると実感させられるものであった。

謝辞

本研究の調査にあたり「旧日本海軍針尾送信所学術調査報告書」と「佐世保軍水道第一拡張(岡本貯水池)調査報告書」を提供いただきました佐世保市教育委員会にお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) (株)ジャパンエナジー, 大煙突の記録, pp.228-232, pp.245-249, 1994.
- 2) 電波監理委員会: 日本無線史第十巻 海軍無線史, pp.46-56, 1951.
- 3) 電波監理委員会: 日本無線史第十巻 海軍無線史, p.418, 1951.
- 4) 電波監理委員会: 日本無線史第一巻上 無線技術史, pp.49-53, 1951.
- 5) 土木学会ホームページ歴代会長紹介 吉村長策 (最終閲覧: 2022)
- 6) 広井勇: 小樽築港工事報文(前編), pp.132-136, 1908.
- 7) 工学会・啓明会編: 明治工業史土木編, 第九編軍事土木第九篇, 軍事土木, pp.880-881, 1929.
- 8) 十川嘉太郎・真島健三郎: 工事画報, 鉄筋コンクリートの思ひ出, 1935.
- 9) 工学会・啓明会編: 明治工業史土木編, 第九編軍事土木第九篇, 軍事土木, pp.882-883, 1929.
- 10) 土木学会日本土木史(大正元年～昭和 15 年), p.780, 1965.
- 11) 土木学会日本土木史(大正元年～昭和 15 年), p.784, 1965.
- 12) 河上房義: 建設の機械化, コンクリートミキサーの話, 建設機械化施工協会, 第 28 号, p.6, 1952.
- 13) 岡田清: 土木における練りませ・締固め・養生の移り変わり, コンクリート工学 Vol.19, No.5, p.71, 1981.
- 14) 広井勇: 小樽築港工事報文(前編), p.92, 1908.
- 15) 河上房義: 建設の機械化, コンクリートミキサーの話, 建設機械化施工協会, 第 28 号, p.6, 1952.
- 16) 吉田徳次郎: コンクリート及び鉄筋コンクリート施工法, p.168, 1942.
- 17) 河上房義: 建設の機械化, コンクリートミキサーの話, 建設機械化施工協会, 第 28 号, p.6, 1952.
- 18) 故広井工学博士記念事業会編: 工学博士 広井勇伝, 工事画報社, pp.55-56, 1930.
- 19) 広井勇: 小樽築港工事報文(前編), p.142, 1908.
- 20) 長瀧重義: コンクリートの長期耐久性(小樽港百年耐久性試験に学ぶ), 技報堂出版, p.96, 1995.
- 21) 長瀧重義, 中山紀男, 白山和久: やさしいコンクリートの知識(その9) 配合(調合), コンクリート工学, Vol.16, No12, p.74, 1978.
- 22) 鉄道院: 鉄道技術発達史III第 2 編施設 2, p.1729, 1959.
- 23) 日比忠彦: 鉄筋混凝土の理論及び其の応用(上巻), p.115, 1916.
- 24) 広井勇: 築港巻之一, p.175, 1898.
- 25) 広井勇: 再訂築港(前編), pp.132-134, 1913.
- 26) 日比忠彦: 鉄筋混凝土の理論及び其の応用(上巻), p.116, 1916.
- 27) 高山甚太郎, 妻木頼黄, 中澤岩太, 眞野文二, 倉田吉嗣: 横浜築港工事用材混凝土塊調査報告書, 工学会誌 149 巻, p.265, 1894.
- 28) 広井勇: 小樽築港工事報文(前編), 巻末付録, 1908.
- 29) 島重治: 大阪築港に於ける混凝土塊, 工学会誌 272 巻, pp.134-135, 1905.
- 30) 島重治: 大阪築港に於ける混凝土塊, 工学会誌 272 巻, 巻末 PL.VI, 1905.
- 31) 広井勇: 鉄筋混凝土橋梁, 工学会誌 253 巻, p.291, 1903.
- 32) 鶴見一之・草間偉瑛武: 土木施工法, pp.92-93, 1912.
- 33) 日比忠彦: 鉄筋混凝土の理論及び其の応用(上巻), p.226, 1916.
- 34) 広井勇: 鉄筋混凝土橋梁, 工学会誌 253 巻, p.292, 1903.
- 35) 伊藤長右衛門: 小樽築港工事報文(後編), p.152, 1924.
- 36) 林茂木(林自動車社長 現社名エクセン(株)): 米寿記, p.42, 1972.
- 37) 土木学会日本土木史(大正元年～昭和 15 年), pp.1025-1026, 1965.
- 38) 岡田清: 土木における練りませ・締固め・養生方法の移り変わり, コンクリート工学, Vol.19, No.5, p.73, 1981.
- 39) エクセン(株)社内報 EXEN news, 第 6 号, 1991.
- 40) 高山甚太郎, 妻木頼黄, 中澤岩太, 眞野文二, 倉田吉嗣: 横浜築港工事用材混凝土塊調査報告書, 工学会誌 149 巻, p.241, 1894.
- 41) 故広井工学博士記念事業会編: 工学博士 広井勇伝, 工事画報社, p.51, 1930.
- 42) 川口虎雄: 土木工学中巻, p.429, 1916.
- 43) 米國混凝土及鉄筋混凝土調査聯合委員會報告: 土木学会誌第 3 巻第 3 号, pp.806-807, 1917.
- 44) 広井勇: 小樽築港工事報文(前編), pp.144-147, 1908.

(2022.06.30 受付)