

# 1922(大正 11)年に完成した重要文化財 「針尾無線塔」の施工方法の考察

小川 健<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 非会員 (公財)長崎県建設技術研究センター (〒856-0026 長崎県大村市池田 2 丁目 1311 番 3)  
E-mail: k\_ogawa@nec.or.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。最近、コンクリート構造物の劣化が深刻な社会問題となっているなか、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。ところが、施工方法は現存している数枚の写真以外よく分かっていない。ただ、この貴重な遺産を構築した建造技術は、後世に継承されなければならない。そこで、これらの写真やコンクリート表面に残る現象および当時の文献を分析した結果、外側の吊足場を上下移動させて施工する方法や、中練コンクリートを使用した搗固法による締固め方法が明らかになった。そして、この搗固法は緻密なコンクリートを生成し、中性化の抑制に有効であることが検証された。

**Key Words:** Hario radio tower, deterioration of concrete, "tsukikatame", dense concrete, carbonation

## 1. はじめに

長崎県佐世保市針尾島にあるオランダの町並みを再現したテーマパーク“ハウステンボス”を左側に見て、国道202号線を南西方向に向かう西海パールラインを走ると、すぐ右手に巨大な3本のコンクリート造りの無線塔が視野に入ってくる(図-1, 写真-1)。

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、各海軍区に鎮守府を置くことを定め、日本の最西端地区を守る要として佐世保に鎮守府<sup>1)</sup>を設置した。

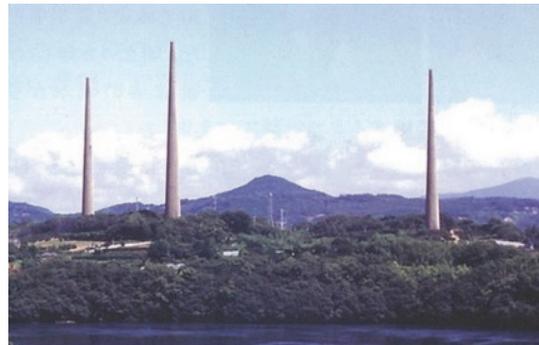
佐世保鎮守府は、海軍の前線基地として軍関連施設の整備に加え、急激に増加する人々の生活に対応するため、

水道ダムや道路橋などの都市基盤整備も重要な任務であった。そのため、当時の佐世保鎮守府の建築科には、その後の海軍省建築局の要職を担うことになる日本を代表する技術者が在職していた。このようななか、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、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<sup>2)</sup>が建設されるに至った。

この送信所の敷地に建てられた針尾無線塔は、大正時代に建造された塔状構造物の中でも唯一現存する日本で最も高い構造物であり、かつ、3本とも現代の構造物と比較しても遜色がない良好な品質を保ち、健全な姿を維



図-1 位置図(☆印)



(旧日本海軍針尾送信所学術調査報告書より)  
写真-1 針尾無線塔

持っている。このように、この無線塔は、当時のコンクリート技術の粋を結集して建造された価値ある構造物であり、後世に継承されるべき貴重な歴史的文化的遺産といえる。

しかしながら、針尾送信所建設に関する記録は、終戦時の海軍の工作で焼却されたと考えられ、無線塔の施工技術を推測できる資料は、6枚の写真以外何ら現存していない。最近、国内では、世界遺産の増加に伴い歴史的土木構造物に対する関心も高まり、戦後に建設されたコンクリート構造物の深刻な劣化と相まって、歴史的土木構造物の研究や保存活動は大きなテーマとなってきている。しかし、これまでの研究では、建造時の時代背景や使用材料の物性、構造物の耐久性などを評価したものが多く、施工技術の研究事例は少ないのが現状である。

このようなことから本研究においては、100年を経てもなお、高品質を保ち続ける無線塔を、当時の技術者が叡智を駆使し、いかに造り上げたのか、施工技術の解明に取り組んだ。さらに、歴史的文化的遺産の価値を解りやすく、そして、再認識できるような“見える化”の資料の作成にも取り組んだ。

以下に、本研究の成果を報告する。

## 2. 無線塔施工技術の調査方法と本論文の構成

針尾無線塔の施工技術の調査にあたって、まず、当時の佐世保鎮守府建築科に在職していた技術者の経歴を調査した。次に、大正時代の国内外の塔状構造物の施工に関する写真や資料を収集し、当時の施工技術を調査するとともに、この施工技術を継承している可能性が高い戦後の塔状構造物の施工に従事した技術者に対して、聞き取り調査を行った。そして、これと平行して、6枚の写真および無線塔のコンクリート表面に残る型枠の跡やさまざまな痕跡をもとに、当時の施工方法やフレッシュコンクリートの性状を推測した。さらに、無線塔の高度な品質を裏付ける目的で、これまで研究対象として取り上げられることが少なかった当時の締固め方法による効果を評価するため、配合を再現して現代との締固め比較実証試験を行い、当時の締固め方法の有効性の解明に取り組んだ。以下に、第3章以降の本論文の構成を示す。

第3章では、無線塔の設計施工に携わった佐世保鎮守府建築科の技術者の経歴を、佐世保市教育委員会編集『旧日本海軍針尾送信所学術調査報告書』<sup>3)</sup>と引用文献より要約した。第4章では、当時のコンクリート造りの長大・高層構造物の規模を、土木学会論文集から引用するとともに、塔状構造物のなかでも唯一現存している針尾無線塔の概要を上記報告書よりまとめた。

第5章では、現存する6枚の写真、国内の歴史的土木遺

産研究者の長崎大学岡林名誉教授提供による資料、当時の文献、土木学会土木貴重写真コレクション、そのほか、大正時代に煙突を建造し、現在も存続している会社からの写真の提供等により、基礎工から完成までの各工種の施工方法を推測した。特に仮設備の要である塔本体に使用したコンクリートミキサーについては、型式と能力を明らかにした。さらに、針尾無線塔の施工技術の導入元についても解明に取り組んだ。

次に第6章では、無線塔の表面に残る型枠の跡から型枠の構造と仕組みを推測した。また、コンクリート打設時の1層の厚さやさまざまな痕跡からフレッシュコンクリートの性状を推測するとともに、当時の文献や無線塔完成9年後に制定された『鉄筋コンクリート標準示方書(初版)』を手がかりに、締固め用具「搗固蛸(つきかためタコ、詳細後述)」による締固め方法の解明に取り組んだ。さらに、塔内部の鋼材ステージの設置理由についても推測した。第7章では、第5、6章において推測した基礎掘削工から塔本体のコンクリート打設までにいたる施工過程を“見える化”する資料として「施工状況推測図」を作成した。特に型枠については、戦後の煙突工事に従事した技術者から昭和40年頃の型枠施工図を入手し、これを参考とした。

さらに、第8章では、『佐世保市教育委員会無線塔強度調査結果』<sup>4)</sup>のデータをもとに、大正時代の搗固法と中性化の進行速度との関係について推論し、無線塔コンクリートの健全度を評価した。第9章では、第8章において推論した搗固法の有効性を、戦後の高度成長期に使用されはじめた内部振動機による締固め方法と比較するため、実証試験を行い検証した。最後に、本研究の成果として第10章にまとめた。

## 3. 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黎明期にあたり、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の建設に挑んでいた。そのようななかで無線塔が建造されることとなった。以下に、この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) 真島健三郎(1873(明治6)年生まれ)<sup>5)6)7)</sup>

1900(明治33)年から佐世保鎮守府建築科に勤務、多くの構造物に鉄筋コンクリートを適用し、日本初の鉄筋コンクリート煙突や鉄筋コンクリート建築を建設した。その後、佐世保港の巨大な立神係船池(詳細後述)の設計施工のすべてに携わり、11年の歳月をかけて1916(大正



図-2 1号塔の詳細寸法およびコンクリート数量

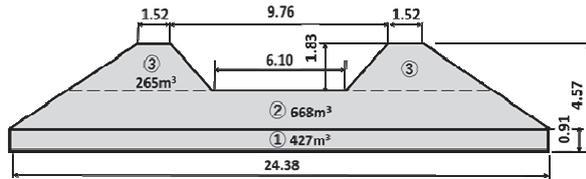


図-3 円形基礎の断面寸法(m)とコンクリート数量

5)年に完成させている。立神係船池施工中には、建築科長に就任し無線塔の設計に携わる。1911(明治44)年に呉鎮守府に転任し、1923(大正12)年に海軍省建築局長に就任している。

(2) 吉田直(1884(明治17)年生まれ)<sup>89)</sup>

1912(明治45)年から真島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。無線塔の設計にあたり、国内のコンクリート造り塔状構造物の調査を行い、主任技師として無線塔建設工事を指揮した。無線塔完成後、佐世保市内の初のコンクリート重力ダムも担当、その後、横須賀鎮守府に転任し、1933(昭和8)年に、真島と同じく海軍省建築局長に就任している。

4. 無線塔の概要

針尾無線塔の概要を記述するまえに、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、建築物では多くが鉄骨造りであり、鉄筋コンクリート構造物は少ない。1920(大正9)年に施行された「市街地建築物法」の高さ制限<sup>10)</sup>により、最も高い鉄筋コンクリート建築物は、丸の内ビル8階建て高さ31m<sup>11)</sup>である。次に、橋梁では愛媛県の豊秋橋(T型桁)橋長155m<sup>12)</sup>、ダムでは岐阜県の大井ダム(重力式)堤高53m<sup>13)</sup>がある。一方、塔状コンクリート構造物は、茨城県の旧日立鉱山精錬所煙突 156m<sup>14)</sup>、大分県の旧佐賀関精錬所煙突 168m<sup>15)16)</sup>、福島県の磐城無線電信局原町無線塔 201m<sup>17)18)</sup>、そして、この針尾無線塔の3本137mである。針尾無線塔を除き他の3本は老朽化等により解体され現存していない。

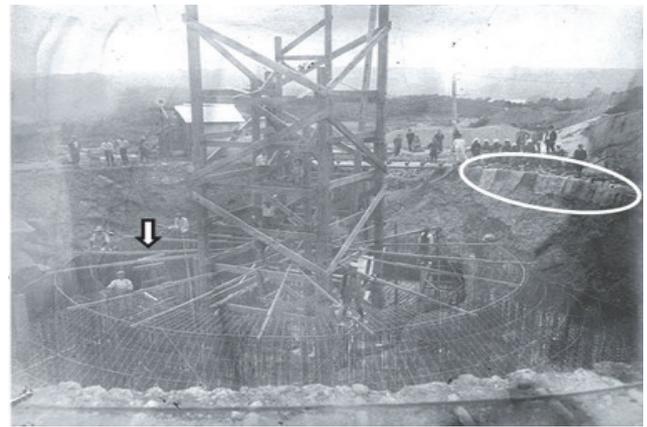


写真-2 基礎鉄筋組立状況(現存写真 1)

『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ている。3塔の規模は、ほぼ同じ大きさである。塔本体は、1リフト高さ1.37m、100リフト137mとして施工されている。

図-2に1号塔の詳細寸法<sup>19)</sup>およびコンクリート数量(筆者算出)、図-3に円形基礎の断面寸法<sup>4)</sup>と基礎コンクリートの数量(筆者算出)の詳細を示す。

5. 現存する写真から推測できる当時の施工方法

(1) 基礎鉄筋組立状況写真から分かること

写真-2は基礎の鉄筋組立状況を写したものである。

a) 鉄筋工

高さ約4.6mの基礎鉄筋は脚立(矢印)を利用して組み立てられている。現代であれば足場を基礎全面に1~2段組み立てて施工する高さである。

b) 内足場工

中央の木製内足場は二重構造からなり、内側は、上下に人荷昇降用の空洞(約1.5m×1.5m 人の大きさより推定)を保持した足場を設置している。外側の寸法は約3.5m×3.5mである。

c) 基礎コンクリート工

外周法肩には、コンクリート打設用と考えられる軌道が一周している。また、右側法肩には基礎コンクリートの養生用ムシロ(○印 詳細後述)が準備されていることが分かる。

d) 掘削工

写真-3は、写真-2の内足場背後の軌道部分を拡大した写真である。外周軌道の下地山が一部基礎地盤の高さまで開削され、軌道が栈橋構造(矢印)となっている。これは、塔の外側が緩やかに低くなっている地形を利用し、掘削土の搬出や雨水の自然排水を容易にするために開削して栈橋を架け、軌道を敷設したものと推察する。



写真3 軌道栈橋(矢印)

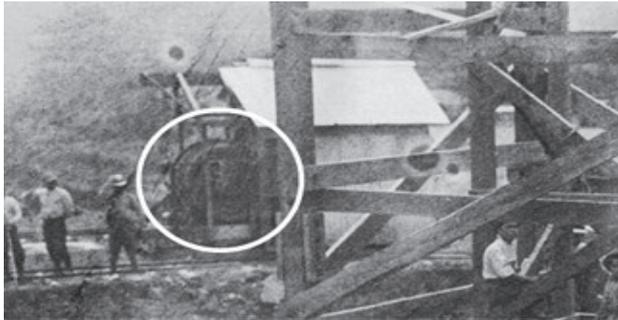


写真4 コンクリートドラム型ミキサー(○印)

e) 仮設備工(コンクリートミキサー設備)

写真4は、写真2の内足場背後の小屋周辺を拡大した写真である。この基礎に使用する予定の丸い形状をしたコンクリートドラム(円筒)型ミキサーが確認できる。旧日本海軍では、針尾送信所着手前の1916(大正5)年に、水深15m・南北576m・東西364mにも及ぶ巨大な佐世保港立神係船池のコンクート岸壁<sup>20)21)</sup>を完成させており、軍事施設である無線塔施工においても、当時入手可能な最大のみキサーが調達できたものと推察する。

当時の海外のコンクリート理論についてまとめた1916(大正5)年発行・日比忠彦著『鉄筋混凝土(鉄筋コンクリート)の理論及びその応用(上巻)』(以下、技術書と略す)には、ドラム型ミキサーの能力について、「最大機種<sup>22)</sup>の1回の混練量は53立方呎(立方フィート)」との記述がある。

ここで、コンクリートミキサーの規格について記す。アメリカでは、体積を「立方呎(立方フィート)」と表記する。

$$1 \text{ 立方呎(立方フィート)} = (0.3048\text{m})^3 = 0.028\text{m}^3$$

日本では、立方尺の体積を尺貫法の単位「切(さい)」と表記する。

$$1 \text{ 切} = (0.303\text{m})^3 = 0.028\text{m}^3$$

よって1立方呎=1切とみなしてよい。

本題に戻って、「53立方呎(立方フィート)」は、約1.5m<sup>3</sup>(公称値)に相当する。無線塔の施工に使用したミキサーがこの機種であれば、1回の混練時間を5分<sup>23)</sup>として



写真5 基礎コンクリート完成(現存写真2)

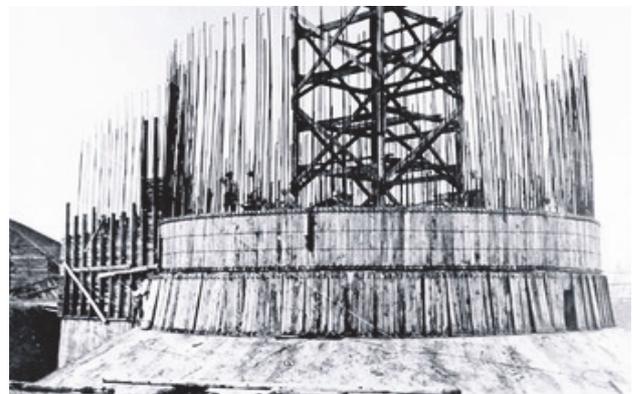


写真6 旧佐賀関精錬所煙突(JX 金属(株)提供)

1時間に18m<sup>3</sup>、20時間で360m<sup>3</sup>になる。機械の調整やロスタイムが発生したとしても、1昼夜で300m<sup>3</sup>程度の混練能力は十分あったものと推測する。

(2) 基礎コンクリート完成後の写真から分かること

写真5の基礎は写真2と別の基礎である。

a) 掘削工

この基礎も周囲の地山の一部を開削しているが、軌道は、地表面の起伏の影響により法肩を一周していない。

b) 内足場工

この写真には、内足場全体の姿が写っている。写真6は、針尾無線塔着手前の1916(大正5)年に完成した当時、世界一の高さ168mの旧佐賀関精錬所煙突(平成25年に解体)着手直後の写真である。内足場方式の特許を持っていたアメリカのウェーバーチムニー社のシステムにより施工されている<sup>24)</sup>。針尾無線塔の内足場も同じ構造であることから、この技術が採用されたことが分かる。余談であるが、旧佐賀関精錬所煙突は、1919(大正8)年のウェーバーチムニー社の「PR誌(長崎大学岡林名誉教授提供)」<sup>25)</sup>の表紙を飾っている。

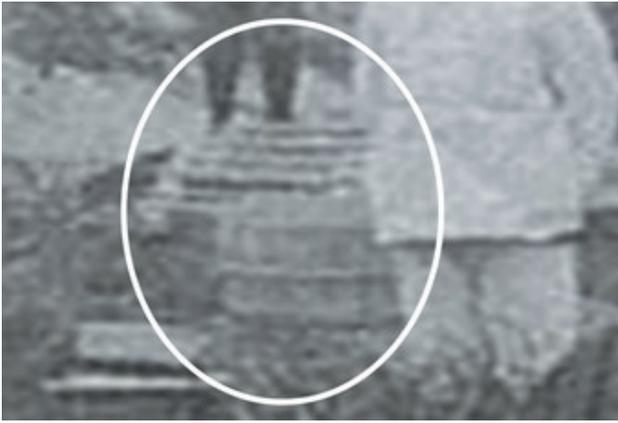


写真-7 コンクリート運搬用桶(○印)



写真-9 コンクリート打設用シュート(矢印)

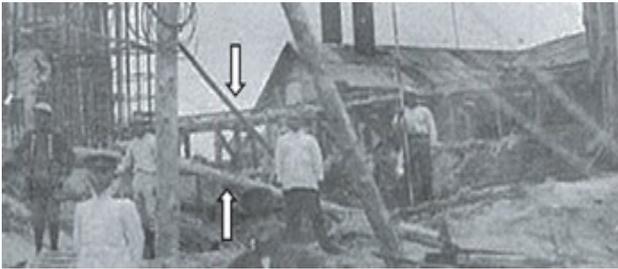


写真-8 軌道栈橋(下向き矢印)と作業通路栈橋(上向き矢印)



写真-10 基礎コンクリート(水抜穴の矢印とリフト割の点線)

### c) 基礎コンクリート工

写真-7は、写真-5の基礎右側を拡大したものである。白い軍服姿の軍人の背後に、円形のコンクリート運搬用桶が数個写っている。ほぼ同時期に施工された長崎市の「小ヶ倉ダム」の施工写真にも、同じ形状の桶にコンクリートを入れて、棒の両端を2人で担いで運搬している状況が確認できる<sup>20)</sup>。さらに、この軍人の右側背後を拡大した写真-8には、基礎コンクリート上部へ向かう栈橋(矢印)が2つ見える。下向き矢印は右側のコンクリートミキサ室から基礎天端へのコンクリート運搬用軌道栈橋であり、上向き矢印は作業通路栈橋である。

写真-9は、写真-5の右端を拡大したものであるが、非常に興味深いものが写っている。当時の用語で「樋卸し」と呼ばれていたコンクリート打設用シュートである。桶から落下させたコンクリートを受けてシュートに導く木杵(右矢印)と、トタンらしきものをU型に加工したシュート(左矢印)が写っている。内足場や外周軌道から勾配をつけたシュートを利用して、指定した位置にコンクリートを落下させていたことが分かる。

写真-10は、写真-5の高さ4.6m、コンクリート数量1,360m<sup>3</sup>(図-2.3参照)の基礎コンクリートを拡大した写真である。現代の施工法であれば、1~2リフトで施工できる大きさである。基礎天端に養生用ムシロが掛けてあるが、この部分が基礎コンクリート最終リフトである。中央の水抜穴(矢印)は、基礎内側凹部に溜まった雨水や養生水を排水するため設置されたもので、凹部底面から上

のコンクリート数量265m<sup>3</sup>を2回(点線)に分けて打設したことを示している。基礎の形状や多くの労力を要する傾斜した仕上げ面積等の制約もあり、その条件に合わせて打設リフトを調整したものと推察する。

次に、基礎コンクリートのスランプを推定する。当時は、まだスランプという概念はなく、配合は容積配合であり構造物の種類によって配合比率を変化させ、鉄筋量や施工性に応じて、水を加えることにより軟らかさを調整していた。

この軟らかさを表現する方法として、「1ヶ月内外に強大な圧力を受ける基礎等は堅練、橋台・橋脚等の普通の圧力を受けるものは中練、建物の壁・柱・床等の鉄筋を有する薄い構造物は軟練」<sup>27)28)</sup>の3つの用語を使い、区分していた。この無線塔の基礎は、強大な強度を求められる構造物に属し、「堅練」により施工されたものと推察する。この3つの用語を単純にスランプ値と置き換えるのは早計であるが、堅練をスランプ5cm以下、中練を8cm程度、軟練を10cm以上とすると、基礎コンクリートは、5cm以下であったものと推定される。また、施工性からスランプを推定すると、基礎の外側表面勾配(約1:1.5)では、スランプ8cmのコンクリートは、基礎表面を流れ落ちて仕上げが難しい。このことから、スランプは、5cm以下の堅練であったことが推定される。一方、基礎内側凹部の表面勾配は(1:1)であり、型枠を組み立てずにコンクリートを打設することは困難である。

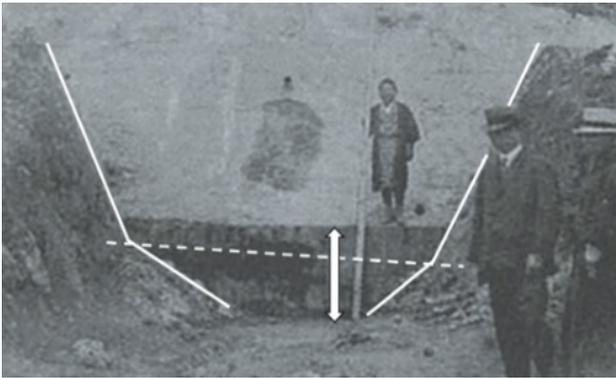


写真-11 切土勾配(実線)・表土と基礎岩盤の境界(点線) および塔基礎鉛直面高さ(矢印)

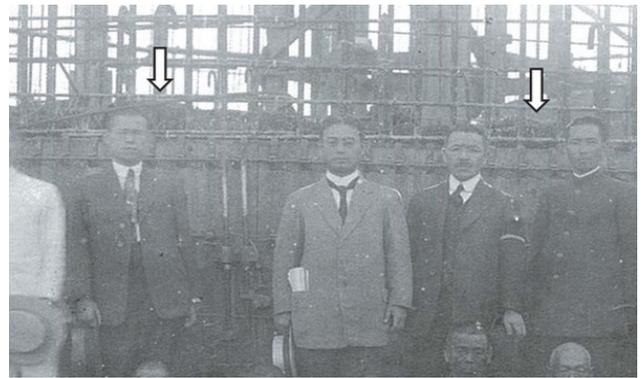


写真-13 塔本体型枠写真(現存写真3)



写真-12 デリッククレーン(矢印)

d) 基礎コンクリートの基礎地盤への根入深さ

写真-11は、写真-5の基礎開削部を拡大したものである。開削部両側の表土の切土勾配は $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 、それが法尻近くになると緩やかになり、その周囲には岩塊が確認できる。この勾配の変化点が、表土と基礎岩盤の境界(点線)と考えられる。基礎コンクリートの矢印の高さが90cmであることから、この箇所では、基礎岩盤に60~70cm根入れていることが分かる。

e) 仮設備工(クレーン設備)

写真-12は、写真-5の内足場背後右側を拡大したものである。木製支柱の簡易なデリッククレーン(矢印)が写っている。無線塔工事に使用した資機材は、海上輸送され、近くの港から軌道を利用して現地に搬入されたことが分かっている。このクレーンは、資機材荷卸し用として設置されたものと推察する。

(3) 塔本体型枠の締付部材と締付器具

写真-13は、塔本体1リフト目のコンクリート打設後、型枠を背にして集合した工事関係者を撮影したものである。中央(上着ポケットに書類)は、無線塔建設を指揮した建築科技士の吉田直主任技師である。

塔1リフト目コンクリート上面には、ここでも養生用ムシロ(矢印)が確認できる。コンクリート養生の重要性が認識されていたことを示している。

写真-14は、写真-13の中央部を拡大したものである。

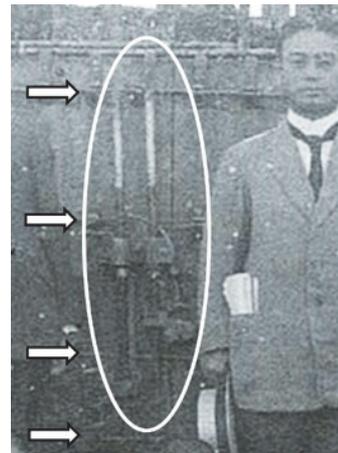


写真-14 4段のワイヤー(矢印)と締付器具(○印)

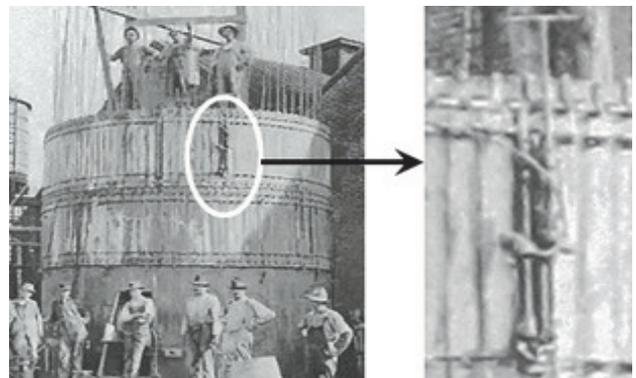


写真-15 ウェーバーチムニー社の型枠締付用と考えられるハンドルが付いた器具(長崎大学岡林名誉教授提供)

型枠施工の重要な要である締付方法を推察できるものが写っている。現代でも円形型枠は、丸鋼やワイヤー、なまし鉄線により外周を締付けることがある。この写真は、不鮮明であるが、型枠に取付けた金物に4段(矢印)の締付材を載せかけているように見える。この写真を大きく拡大すると締付材が微妙に波打っていることから、ワイヤーではないかと推察する。また、○印はワイヤーの締付器具と考えられる。

写真-15は、前述のウェーバーチムニー社のPR誌に掲載されているハンドルが付いたワイヤー締付器具(○

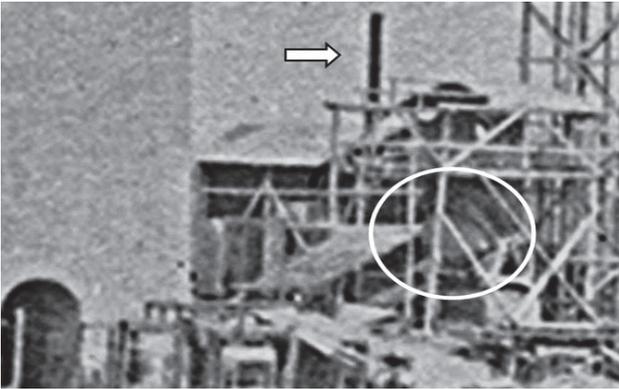


写真-16 1号塔本体施工中のコンクリートミキサー(○印)と動力用蒸気ボイラーの煙突(矢印) (現存写真4)



写真-18 利根川萬生水門工事(1916年)のキューブ型ミキサー (土木学会土木貴重写真コレクションより)

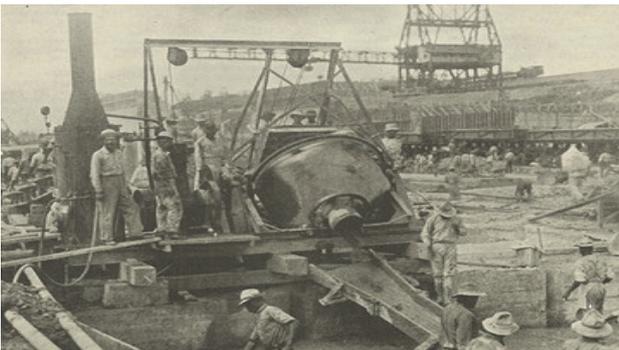


写真-17 Austin社キューブ型ミキサーのカタログ(1916年) (筆者所属 公財長崎県建設技術研究センター所有)

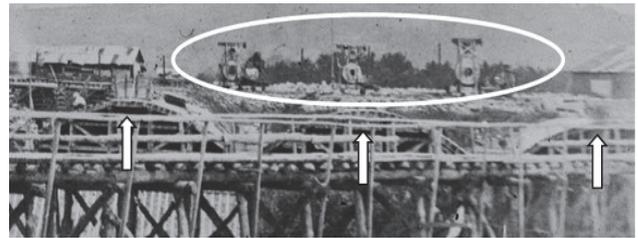


写真-19 3連アーチ構造(矢印)の通信局舎と通信局舎背後のコンクリートミキサー群(○印) (現存写真5)

印)と考えられる写真である。針尾無線塔のワイヤー締付器具とほぼ同じ形状をしていることが分かる。

#### (4) 塔本体施工用コンクリートミキサーの型式

写真-16 は 1号塔本体施工中のミキサー室周辺の写真である。このミキサー(○印)は、立方体の水平対角軸を中心に回転し、胴を傾けて容易にコンクリートを排出できるキューブ(立方体)型ミキサー<sup>29)30)</sup>との名称で呼ばれていたもので、可傾式である。塔本体は、基礎コンクリートより軟らかく中練(詳細後述)のため、排出が容易なキューブ型が選択されたものと推察する。

このキューブ型ミキサーは、針尾無線塔完成直前に着手した同じ旧海軍の呉海軍工廠敷地開削工事でも使用され、その型式は「アメリカAustin社キューブ型56S」との記録<sup>31)</sup>がある。針尾無線塔も同型を使用していた可能性が高い。「56」は56立方呎(立方フィート)、「S」はside loading(横から材料を投入)の頭文字<sup>32)</sup>を表し、1回の混練量は1.57m<sup>3</sup>(公称値)である。1回の混練時間を5分として混練量は、1時間で約19m<sup>3</sup>となる。塔本体の最大打設量(1リフト目)のコンクリート数量37m<sup>3</sup>(筆者算出)に容易に対応できる機種である。無線塔完成以前、民間建築工事では、10切(1回の混練量0.28m<sup>3</sup>)のミキサーが最大であったとの記録<sup>33)</sup>もあるなか、軍事施設の整備には、万全の措置をして臨んでいたことがうかがえる。

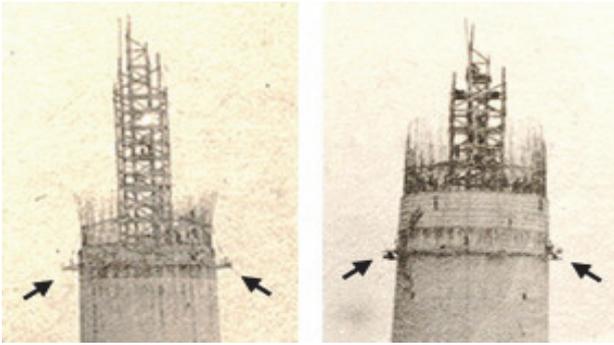
キューブ型ミキサーの参考資料として、1916(大正5)年のAustin社のカタログ写真を写真-17に、また、同時期に施工された利根川萬生水門工事<sup>34)</sup>に使用されたキューブ型ミキサーの写真を写真-18に、それぞれ載せる。この写真-17, 18の左端に写っている煙突状のものは、写真-16でも確認できた動力用蒸気ボイラーである。さらに、写真-17, 18のすべてのミキサーの設備がまったく同じ構造であることも分かる。

#### (5) 通信局舎背後のコンクリートミキサー群と当時のミキサーの変遷

写真-19には、手前に木製軌道栈橋、その後ろに幅約36m・奥行き22m・高さ16m・屋根厚さ80cmのコンクリート造り3連アーチ構造(矢印)の通信局舎<sup>35)</sup>、さらに、その背後には基礎工事でも使用されたドラム型ミキサー(○印)が、正面向き3基、背面向き1基の計4基が確認できる。これは、通信局舎や周辺構造物の異なるコンクリートの配合や数量に対して、迅速に対応できるように多くのミキサーを準備したものと推察する。

ここで、針尾無線塔建設時前後の日本における主なコンクリートミキサーの変遷について触れる。

日本で初めてミキサーが輸入されたのは可傾式のキューブ型であり、1902(明治35)年に神戸港築造工事で使用されたとの記録がある<sup>36)</sup>。その後、キューブ型は盛んに使用されることとなったが、キューブ型の特徴として、回転時の胴の磨耗と衝撃が激しいというのに、函の隅にコンクリートが付着しやすい欠点<sup>37)</sup>があったことから、アメ



(a) 1リフト目型枠の下段 (b) 3リフト目型枠の下段  
写真-20 外足場(矢印) (現存写真6)

リカにおいて円筒のドラム型が開発され、ちょうど、無線塔工事に着手した1918(大正7)年に、日本にも輸入され始めている。しかし、このドラム型は、キューブ型のように胴を傾けることができる可傾式と異なり不傾式であるため、コンクリートの排出が容易ではなく「堅練には不向き」であった。そのため、ドラム型は主に建築現場において使用されることとなった<sup>38)</sup>。

ところで、5章において、無線塔基礎工の堅練コンクリートにドラム型を使用したことについて触れたが、このドラム型の特徴である「堅練には不向き」であることは整合しない。この理由として、輸入直後でもあり、ドラム型の性能を十分に把握することもなく、使用を試みたのではないかと推察する。

その後、ドラム型はアメリカで可傾式に改良され、1935(昭和10)年に至って輸入され使用されるようになった<sup>39)</sup>。このように、針尾無線塔の施工時期は、キューブ型からドラム型への移行期にあたり、可傾式のキューブ型と不傾式のドラム型が併用されていたことが分かる。

## (6) 外部の足場設備

写真-20は施工中の外足場と先行する内足場を写したものである。両写真とも外足場は1段(矢印)である。写真-20(a)は、上から1リフト目型枠の下段に、写真-20(b)は、同じく3リフト目型枠の下段に足場が設置されている。とりわけ、写真-20(b)では、矢印の先に型枠解体作業中の作業員の人影が確認できる。このように、この写真は、1段の外足場を上下に昇降させて施工していたことを示している。

外足場を構成している1組の足場の大きさを、仮に長さ2m・幅80cm程度の鋼製枠と木製足場板からなる構造とした場合でも、重量はわずか30数kg程度(筆者算出)であり、2人の人力作業により十分対応できる重量である。今回の調査のなかで、昭和40年頃も外足場をロープを使って人力により昇降させていたとの情報を、当時の技術者から得ることができた。全周の外足場を数ブロックに分割し、それに見合う作業員を動員することによって短時間で昇降できたものと推察する。

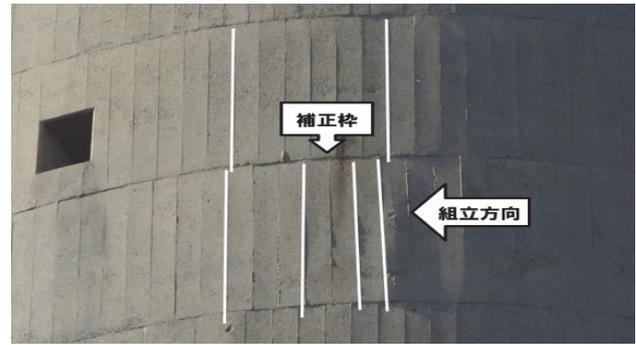


写真-21 型枠傾き補正枠

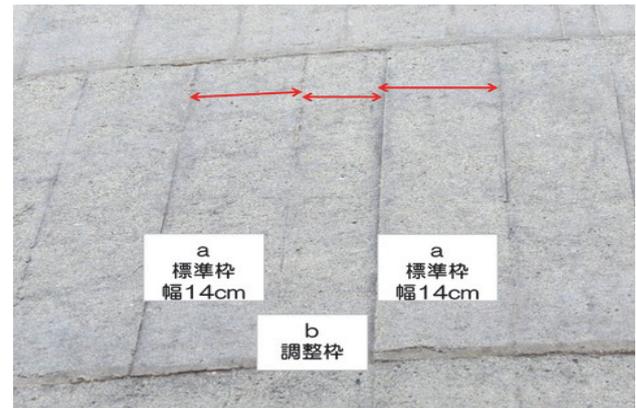


写真-22 型枠円周長調整枠

## 6. 現存する構造物から推測できる当時の施工方法

### (1) 塔本体型枠の構造

#### a) 外型枠の円周方向への傾きを補正する補正枠

無線塔の外型枠単体(標準枠)の寸法は、幅14cm・高さ1.37m、内型枠は幅12cm・高さ1.37mである。塔は高くなるにしたがって直径は小さくなり、円周長も短くなる。上下幅が同じ型枠を使用すると上側が少しずつ円周方向に傾いてくる。そのため、この傾きを補正する型枠が必要となってくる。写真-21は、その傾きと、それを補正している型枠(補正枠)の設置状況をよく示している写真である。

#### b) 外型枠の円周長を最後に調整する調整枠

型枠を一周組み立てると、最終枠は、その隙間に合う型枠(調整枠)が必要となる。写真-22はこの状況がよく分かる写真である。両側の型枠aは幅14cmの標準枠、bは円周長の調整枠である。調整枠は、各リフトのいたるところで確認できる。

#### c) 外型枠の曲面对応

写真-23は塔基部円周方向の曲面を上方から写したものである。茶色線は、標準枠(幅14cm)の縦ライン、赤線は水平方向の表面形状を示す。塔本体の外表面は幅28cmの平面により構成されている。木製型枠は、幅28cmの1枚物よりも入手が容易な幅14cmの物2枚を組み

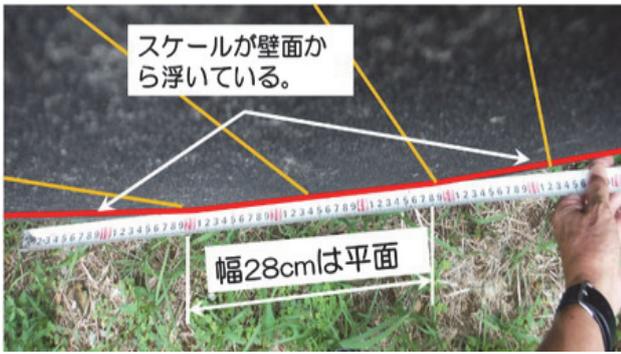
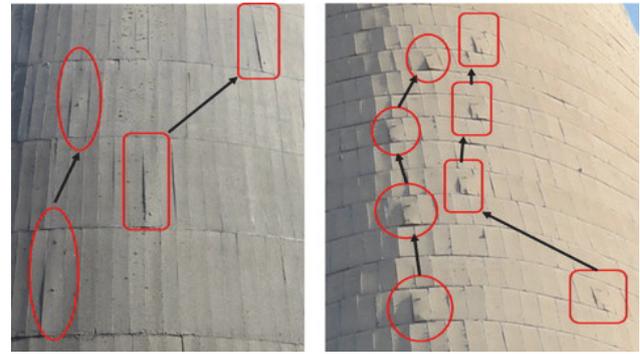


写真-23 外型枠曲面の形状



(a)下位リフト (b)上位リフト  
写真-26 外型枠の転用



写真-24 塔入口(型枠厚さ跡 矢印)

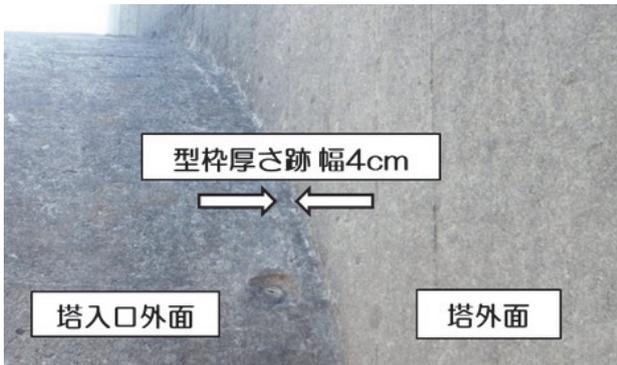


写真-25 型枠厚さ(矢印)

合わせて、2連枠として資材の節減と施工の効率化を図っている。

d) 型枠の厚さ

写真-24は3号塔入口の写真である。入口のコンクリートは、塔本体と同時に打設されている。入口外面上部には、塔本体型枠下端部をアーチ状にくり抜いてコンクリートを打設したため、型枠の厚さを示す跡が写真の矢印部に残っている。写真-25はその局部を写したものであるが、この矢印の幅は厚さ4cmの型枠を使用したことを示している。

e) 外型枠のリフト転用

写真-26は型枠の転用状況を示す写真である。特徴ある外型枠跡から、写真-26(a)下位リフトは2リフト毎に、写真-26(b)上位リフトは3リフト毎に転用したことが分か

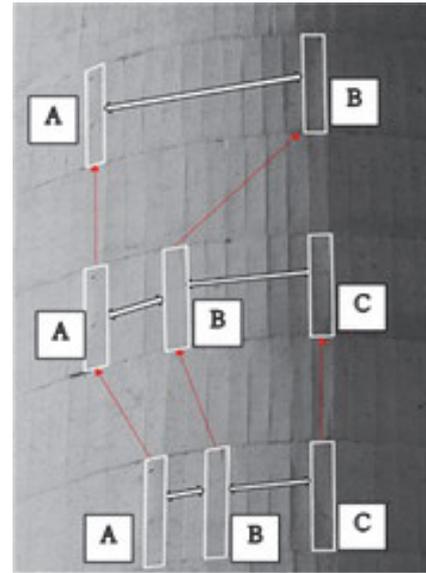


写真-27 特定の型枠の移動先

る。下位リフトは1サイクルの施工数量が多いため、2リフト分の型枠を使用してロスなく施工できたものとする。

しかし、上位リフトに行くにしたがいサイクルタイムは短くなり3リフト分の型枠が必要となったものと推察する。ちなみに、塔基部の外径12mの2リフト分の型枠は、外径8mの箇所では3リフト分として転用できる。

次に、型枠解体転用時の1単位の大きさについて検証した。一般に型枠を解体して移動する場合は、横方向に連なった大枠として取扱ったほうが効率的である。しかし、当時は現代のようなクレーンは存在しない。また、塔頂部は風も強いので、機能的にも劣るウインチを使用して大枠を鉄筋上部から引き込み、内部の限られた作業床に倒して型枠ケレン(清掃)作業をすることになり、これは非常に困難な作業である。このようなことから、大枠の大きさは自ずと制限される。

写真-27は、同じリフトの特定の型枠が次にどこに移動したかを示した写真である。紙面の関係で分かりやすく拡大できないが、型枠ABCの移動先の枠と枠の間隔はそれぞれ異なる。そこにはまったく規則性はない。こ

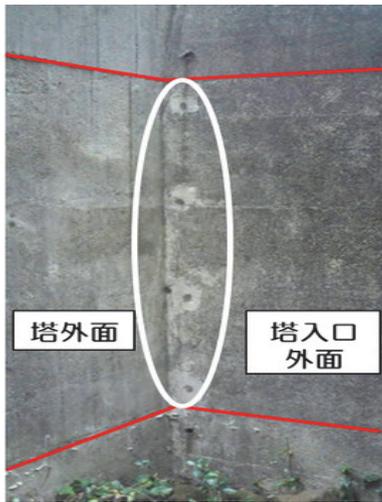
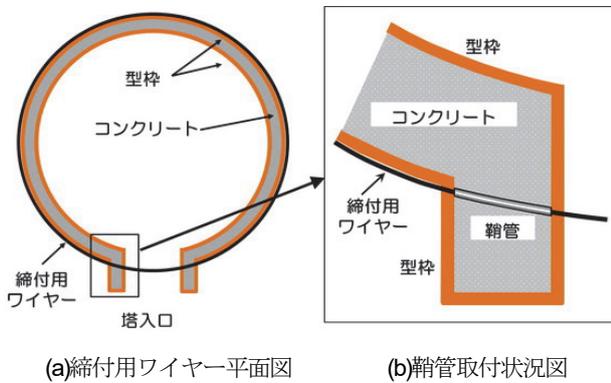


写真-28 締付用ワイヤーを通した4段の鞅管跡(○印)



(a)締付用ワイヤー平面図 (b)鞅管取付状況図  
図4 鞅管取付模式図

のような箇所は数多く確認できる。したがって、型枠解体組立作業は大枠ではなく、2連枠を1単位として取扱ったことを示している。2連枠は、10kg程度(筆者試算)であり非常に軽い。必要な作業員の人数さえ動員すれば全周の型枠を短時間で引き上げることができる。

f) 内型枠の構造

内型枠は幅12cm・高さ1.37mの寸法のもので使用されている。塔内部の上方の型枠跡は目視できないが、外型枠の調整枠や傾き補正枠等、同様の仕組みにより施工されているものと判断する。

g) 外型枠の締付方法

写真-14には、かすかに4段の締付用ワイヤーと考えられるものが写っていたが、これを裏付ける証拠が塔入口側面を写した写真-28で確認できる。

上下の赤線の間は1リフトである。塔入口コンクリートには、ワイヤーを通した4段の鞅管(外径34mm鋼管)が埋め込まれたまま残されており、入口の内壁でも確認できる。4段の締付用ワイヤーを鞅管に通し、外型枠外周を締付けたことは明らかである。

図4は塔入口部分の鞅管を取付けた箇所の詳細模式図である。

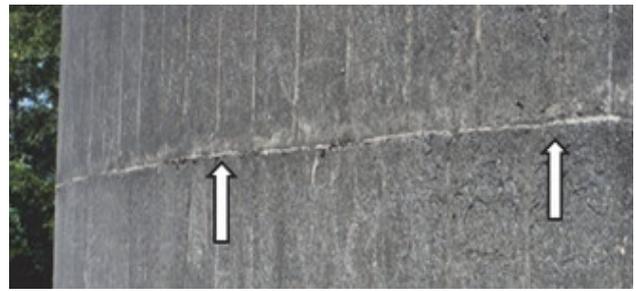


写真-29 打継目のレイタンズ(矢印)

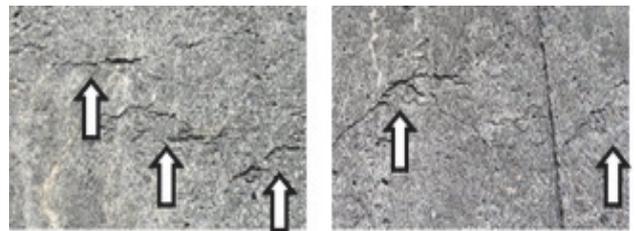


写真-30 沈下ひび割れの現象(矢印)



写真-31 水の分離現象

(2) 塔コンクリートの軟らかさと打込み厚さ

以下の各項において、塔コンクリート表面の諸現象の写真をまず解説し、節末にコンクリートの性状と打込み厚さについてまとめる。

a) 塔コンクリートの打継目

写真-29はコンクリート打継目に見られる白い2~3mm程度の層(矢印)を写したものである。おそらくレイタンズであると推察する。レイタンズは、打継目の付着力を阻害する有害なものと認識され始めたのは1931(昭和6)年以降<sup>40)</sup>であり、無線塔建設当時は、その認識がなく除去されなかったものと考えられる。

b) 塔コンクリート表面の沈下ひび割れ

写真-30はコンクリート表面の沈下ひび割れ現象を写したものである。前述したように当時のコンクリートは、施工性を考慮して水を加えることにより軟らかさを調整していた。余分な水は打設直後のブリージング水となって上昇し、コンクリートに沈下現象を引き起こす。

c) コンクリート中の水の分離現象

写真-31は、コンクリート中の水が分離して打継目の型枠隙間から漏水し、骨材が露出してジャンカ状になった状況を写したものである。



写真-32 型枠から漏れ出たモルタル分(O印)

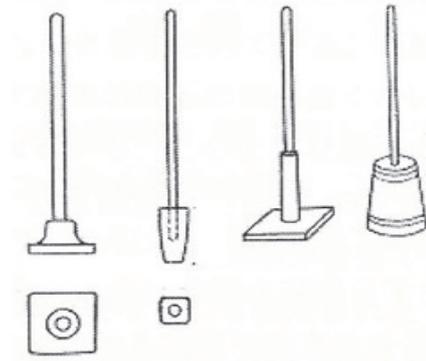


図-5 搦固蝟 (左3本は金属製, 右は木製)

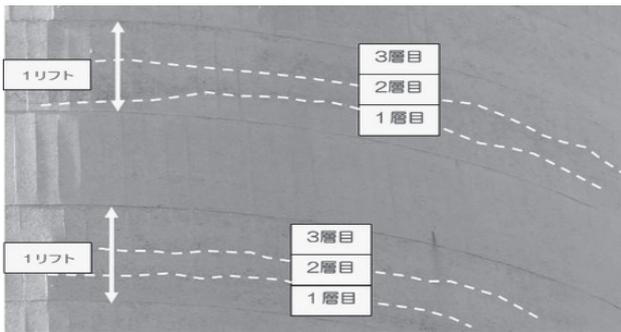


写真-33 1リフト内のコンクリートの層境



写真-34 鋼製ステージ

d) 型枠の隙間から漏れ出たモルタル

写真-32は、型枠の隙間にコンクリートのモルタル分が漏れ出て、硬化した現象を写したものである。約100年を経た現在でも当時のまま壁面に残っている。

e) 塔コンクリートの締固め

写真-33は、1リフト高さ137mを3層に分けて締固めたことを示しており、その1層の厚さは単純計算で40数cmとなる。3塔ともすべてのリフトにおいて3層に分けて締固めている。3塔全体でも層境が明瞭な箇所は非常に少なく、図-5に示すような搦固蝟<sup>41)42)</sup>のみに頼るほかなかった時代の構造物としては、驚くべき成果である。コンクリートの締固め方法について前述の技術書には、「柱状の構造物は堅練で、できるだけ薄層で搦固めよ、鉄筋の交錯があるため堅練で搦固めが困難である時は、むしろ軟練を用いて十分に搦固めたほうが、緻密な仕上げが得られる場合もある。」<sup>43)</sup>と記されている。また、この「薄層」の厚さについて、無線塔完成後の1931(昭和6)年に制定された土木学会の『鉄筋コンクリート標準示方書(初版)』によると、「硬練コンクリートの場合は、一層15cm以下で搦固めよ。」とも記されている。ちなみに、広辞苑によれば、「搦く」とは「棒の先で押しつぶす」という意味である。

f) まとめ

以上のように、a)~e)においてコンクリート表面に残る現象と締固めについて述べてきたが、a)~d)は、すべて中練・軟練コンクリートを打設した場合に観察される

現象である。しかし、この構造物は、前述したように軟練を使用する壁・柱・床等の薄い部材が多い建築物に該当しない。よって、塔のすべてのリフトが、1層の高さ40数cmとして中練コンクリートにより施工されたことを示している。

(3) 塔内部の鋼製ステージとその必要性

写真-34は塔内部の井桁状の鋼製ステージである。高さ137mの区間に10段ほど設置されている。木製の内足場が、この鋼製ステージの中央部分に固定されていたことは明らかである。しかし、塔躯体の施工は、この内足場のみでは施工できない。内足場と塔内壁面との空間を埋める足場(作業床)が必要である。作業床は、鋼製ステージの上に木製支柱を立ち上げ、必要な床高さ毎に足場板を隙間なく敷きつめたものと判断する。なお、鋼製ステージ下の円形状のものは、3塔完成後の塔頂部を結ぶ空中線が、風圧等の影響で切断されないように設置された緩衝装置設備(ダンパー)の一部である。

ところで、塔構造物を鉛直に施工するには、塔の中心点を上方に移してゆく測量技術が必要である。現在でも、高い塔や煙突の測量には簡便な方法として重錘が使用されているが、当時も重錘を使って、固定された上方の鋼製ステージに中心点を随時移設していったものと考えられる。写真-35は現在も使用されている重錘である。腕の太さと比較するとその大きさが分かる。

このほか塔内部には、塔頂部に向かってまっすぐ伸びる鋼製タラップも設置されている。作業員の昇降用とし



(大正鉄筋コンクリート(株)提供)  
写真-35 測量用重錘

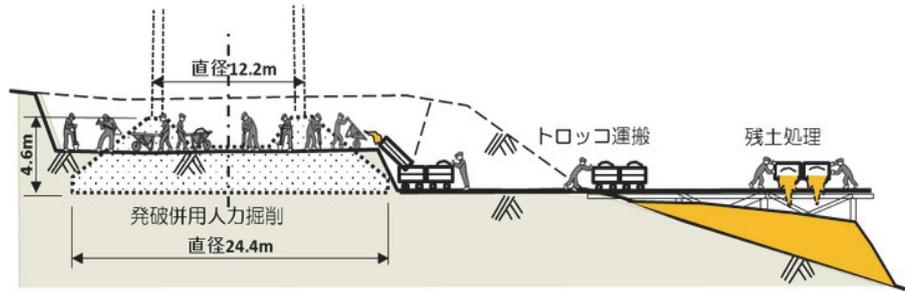


図-6 基礎掘削状況推測図

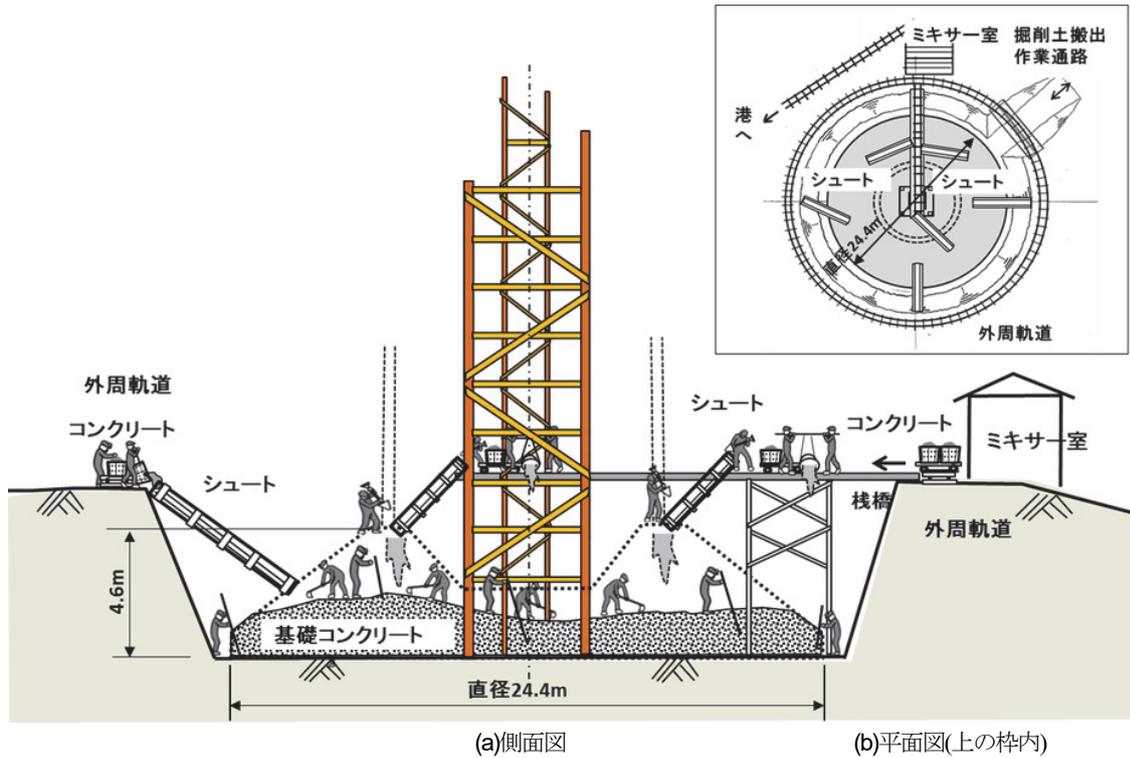


図-7 基礎コンクリート打設状況推測図

て、また、完成後の維持管理用として設置されたものである。

## 7. 各工種の施工方法の推測

### (1) 塔基礎工

#### a) 基礎掘削工

3塔の基礎掘削深さは地形によって異なるが、掘削深さを基礎の高さ程度とすると、1基の掘削数量は約2,500m<sup>3</sup>から3,000m<sup>3</sup>(筆者試算)になる。ちょうどこの大正時代後半から建設機械化の進展が始まるが、掘削数量も少ないことからダイナマイト併用の人力掘削方法とし、周囲の地山を開削した地盤に軌道を敷設して、低くなっている外側の斜面にトロック運搬処理したものと考え。図-6に基礎掘削状況推測図を示す。

#### b) 基礎コンクリート工

基礎コンクリートは写真-2、写真-8の状況から、法肩の軌道や内足場への軌道栈橋を利用して打設したことは明らかである。図-7に基礎コンクリート打設状況推測図を示す。

### (2) 塔本体工

#### a) 塔足場工

前述したように、塔内部の足場は、中央部の内足場と鋼製ステージの上に組上げた作業床を隙間がないように敷き詰め、外足場は型枠に取付けた専用の金物(後述 図-9型枠施工図のブラケット差込用枠参照)に差し込んで固定したり、ロープにより吊下げて使用したものと考え。図-8に足場平面推測図を示す。

#### b) 塔鉄筋組立工

塔本体鉄筋工の施工状況を示す写真は現存していない。塔頂部への資材運搬において最も大きな課題は、曲線状

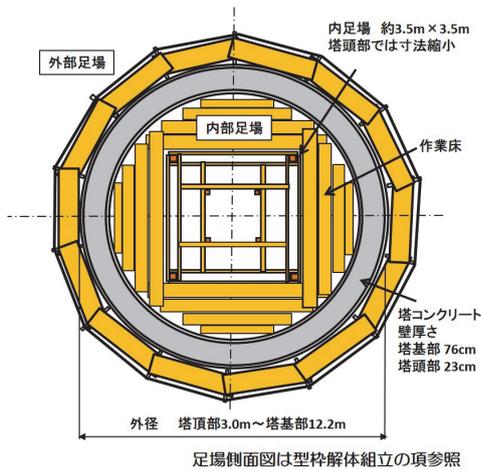


図-8 足場平面推測図

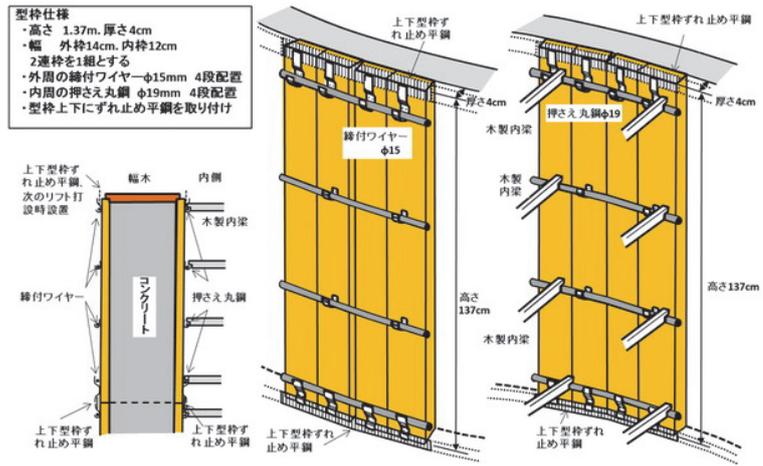


図-10 塔型枠構造推測図  
(a)型枠断面図 (b)外型枠詳細図 (c)内型枠詳細図

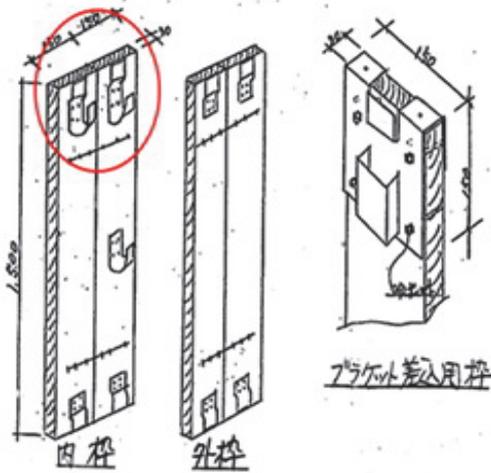


図-9 昭和40年頃の煙突工事の型枠施工図  
(大正鉄筋コンクリート(株)提供)

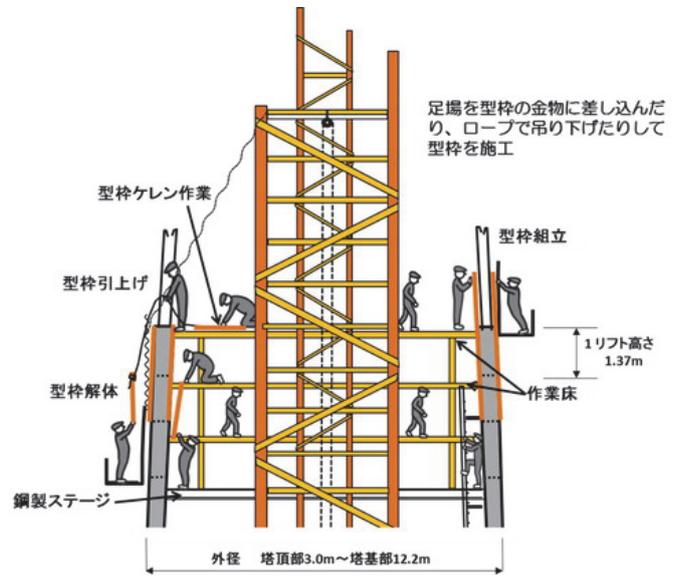


図-11 塔型枠解体組立状況推測図

の帯鉄筋の運搬である。このような施工条件の場合、外部の索道を利用することが一般的であるが、塔の遠景写真に索道らしきものは写っていない。帯鉄筋の径は細いため人力により容易に加工できることから、直線状の鉄筋を内足場内の空洞部を通して吊上げ、塔頂部にて加工したものと推察する。

c) 塔型枠の構造と組立解体

図-9は1965(昭和40)年頃施工されたある煙突工事の型枠施工図の一部である。型枠は2連枠であり高さ1,500mm・幅150mm・厚さ30mm, 外型枠はなまし鉄線7段締付け, 内型枠は丸鋼φ19を3段配置し, 内梁によって押えつけるようになっている。また, 内・外型枠の上下端部は, 型枠ずれ止め防止用の平鋼を挿入する構造になっている。そのほか, ブラケット足場のフックを差し込む金物も取付けられている。ここで写真-14の締付用ワイヤーを載せかけている金物(最上段矢印部)と, 図-9○印を比較してみると同じような形状をしていることが確認できる。

現代では, 向かい合う型枠の間隔を保持するためにセパレーターを使用する。大量に使用され始めた時期が1955(昭和30)年以降であることから, この時期まで外周をワイヤーやなまし鉄線を使用して締付け, 内側を丸鋼により押えつける工法が継承されてきたものとする。そこで, 図-9の施工図と写真-14をもとに, 当時の針尾無線塔の型枠の仕様と構造推測図を図-10に, 塔型枠解体組立状況推測図を図-11に, 塔型枠平面推測図(部分図)を図-12に示す。

d) 塔コンクリート打設工

前述のように, 内足場の中央部は地上部から塔頂部まで, 人荷昇降用の空洞(約1.5m×1.5m)を保持した構造となっている。1965(昭和40)年頃の煙突工事の施工では, この木製足場が単管足場になり, 中央部は同じく空洞になっている。この空洞内を, ウインチによりコンクリートバケットを吊上げ, 塔頂部においてシュートを使用して打ち込み, 内部振動機による締固め方法が採用されて

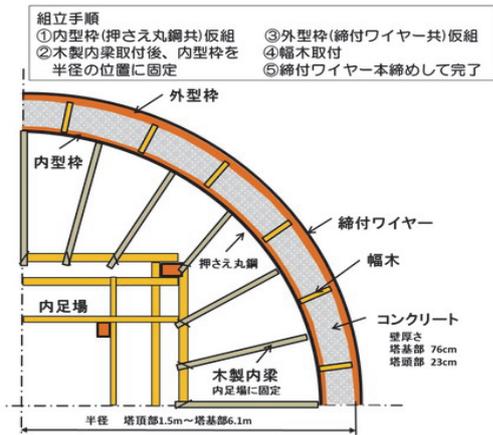


図-12 塔型枠平面推測図(部分図)

いる。大正時代と昭和40年頃の施工方法は、締固方法を除いて大きな相違はなく、無線塔施工時の技術力の高さがうかがえる。図-13に塔コンクリート打設状況推測図を示す。

### 8. 無線塔コンクリートの健全度

#### (1) コンクリートの圧縮強度と中性化深さ

塔基部3箇所コンクリート圧縮強度と中性化深さの調査結果を、『佐世保市教育委員会無線塔強度調査結果』より表-1に転記する。

中性化とは、コンクリートが空気中の炭酸ガスを吸収してコンクリートのアルカリ性を低下させる現象をいう。中性化は鉄筋の不動態皮膜を損い耐腐食性を低下させる。

#### (2) 塔基部の鉄筋のかぶりと配筋

塔基部鉄筋のかぶりと配筋を表-2に示す。中性化の進行が鉄筋まで及んでいないため、まったく腐食もなく健全な状態である。

#### (3) まとめ

近年、戦後の高度成長期に施工されたコンクリート構造物の劣化が問題になっているが、この針尾無線塔の調査結果は、ほぼ100年を経ようとしている現在でも極めて健全な状態を維持していることを証明している。

ここで注目すべきことは中性化深さである。中性化の要因として、一般にコンクリートを構成する材料や配合、施工方法、養生方法及び期間、周辺環境等があげられる。特に配合の水セメント比の大きさに影響される。一般に、水セメント比が小さいと緻密な組織が生成され、反対に大きいと空隙が多い組織となる可能性がある。緻密な組織の生成は炭酸ガスの侵入を抑制できる。

この無線塔の中性化深さは、外部平均20mm、内部平均38mmであり、当時のほかの構造物と比較しても中性

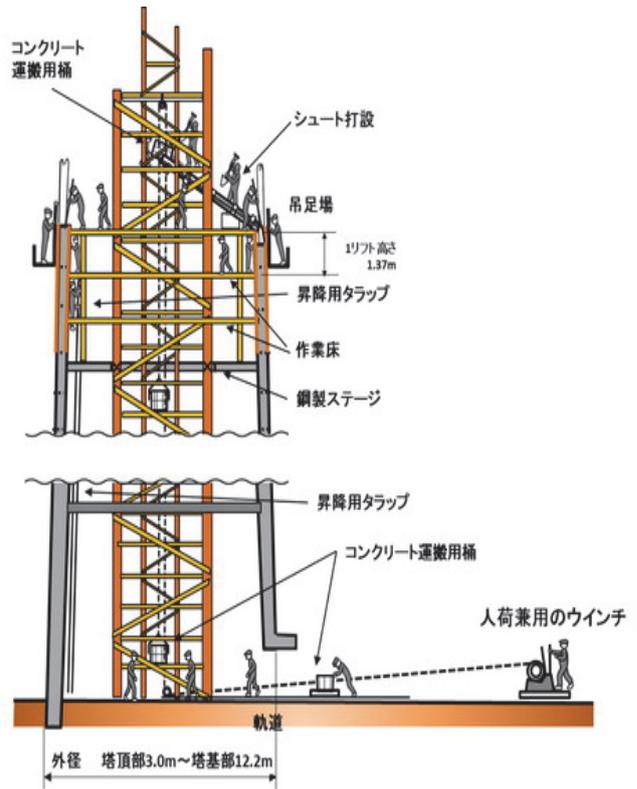


図-13 塔コンクリート打設状況推測図

表-1 塔基部コンクリート圧縮強度と中性化深さ

	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) 3個の結果	中性化深さ (mm) 3個の平均値
外部	23~25	20
内部	27~34	38

表-2 塔基部鉄筋のかぶりと配筋

	かぶり (mm)	配筋(錆は全くなく健全である)
外部	88	軸鉄筋(縦方向) φ32-177@
		帯鉄筋(円周方向) φ19-200@
内部	95	軸鉄筋(縦方向) φ16-177@
		帯鉄筋(円周方向) φ13-250@

化の進行は遅い方である<sup>44)</sup>。ところで、この無線塔の中性化の進行は内部より外部が遅い。中性化の進行に関する既往の研究<sup>45)46)</sup>において、雨水がかかる構造物の外部は内部に比べて湿潤状態に置かれることが多く、炭酸ガスの拡散が進まないことにより中性化の進行が遅くなる、との成果が示されている。無線塔の外部の中性化の進行が遅いことも、同様の要因によるものと判断する。このほかに、昭和初期の軍事施設のなかには、近年の混和剤(減水剤)を使用した同じ強度レベルのコンクリートより毛細管空隙が少なく、緻密なコンクリートがあるとの研究も報告<sup>47)</sup>されている。

戦後の高度成長期のコンクリートの施工方法は、コンクリートポンプ車を使用して圧送し、内部振動機を使っ



写真-36 試作した金属製の搗固蝸(先端直径 10cm)

て締固める方法が一般的になった頃であるが、コンクリートポンプ車の出現は大量施工が可能となった一方で、押しやすい軟らかい配合が求められるようになった。こうして施工された構造物の中には無線塔の中性化速度を上回る構造物も多く発生している。大正時代のコンクリートの締固め方法は搗固蝸による搗固法であり、前述の技術書には、「堅練は表面に水を呈するまで永く搗固めよ、中練は相当なる搗固めをせよ、軟練は充分なる搗固めをせよ。」<sup>48)</sup>と記されている。おそらく長時間をかけて搗固めていたことが読み取れる。この長時間の搗固めが緻密なコンクリートを生成し、中性化の抑制にも寄与しているのではないかと推察する。

## 9. 無線塔コンクリートの健全度の検証

### (1) 締固め方法とコンクリートの性状

大正時代の無線塔の搗固めと戦後の高度成長期の内部振動機による締固めの施工方法の違いが、コンクリートの性状にどのような影響を与えるのか、同一容積配合のブレンコンクリートを用いて試験体を作製し、ブリージング量、中性化速度と相関性が高い見掛密度・圧縮強度・細孔径分布と容積について、下記の要領で比較試験を実施し検証した。

#### a) 試験概要

試験体の大きさは内部振動機(φ40)の効果範囲を考慮して50cmの立方体とした。試験体は搗固法2個、内部振動機締固法1個の型枠を準備し、図-5を参考に、写真-36のような先端直径10cmの搗固蝸を試作して搗固め試験体を作製した。詳細な試験概要を表-3に示す。

#### b) コアの採取

コアの直径は、JIS規格に基づいて骨材寸法の3倍以上のφ100mm、高さ200mmとした。コア採取位置は図-14(a)に示す平面位置とし、図-14(b)のように上下段に分けて3本ずつ採取して、その平均値を評価の対象とした。

表-3 試験概要

配合	<p>1. ブレンコンクリート セメント：普通ポルトランドセメント 容積配合：当時の鉄筋コンクリートの標準配合は、セメントC:砂S:砂利G=1:2:4であったが、軍事施設は富配合であったとの報告<sup>49)</sup>を参考に1:2:3とした。</p> <p>2. スランプ：水量Wを調節して中練8cmとした。</p> <p>3. 水セメント比：59%となった。</p> <p>4. 空気量：打設直前の試験結果は0.5%であった。</p>								
	<p style="text-align: center;">配合表(kg/m<sup>3</sup>)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>セメント C</th> <th>砂 S</th> <th>砂利 G</th> <th>水 W</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">310</td> <td style="text-align: center;">735</td> <td style="text-align: center;">1095</td> <td style="text-align: center;">182</td> </tr> </tbody> </table>	セメント C	砂 S	砂利 G	水 W	310	735	1095	182
セメント C	砂 S	砂利 G	水 W						
310	735	1095	182						
試験体の寸法	一辺50cmの立方体 型枠の内側には漏水防止用のビニール袋を取付けた。								
打設	工場で練り始めてから30分後に打設開始、60分後に打設完了、 打設時の気温 5~6°C								
締固め方法	<p>1. 搗固め 試験体はA、Bの2水準 搗固蝸は直径10cmを使用</p> <p>2. 内部振動機締固め 試験体はCの1水準 内部振動機はφ40mmを使用</p> <p>3. 締固め時間 “相当なる搗固め”時間について、当時の文献のなかに手がかりとなるものは一切見当たらない。そこで今後の研究の出発点の“試案”として、搗固蝸にて試験体50cm四方をくまなく1巡するのに要する搗固時間2分を基準に、次のような搗固時間とした。内部振動機による締固めは、現代の標準の時間15秒とした。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験体Aの搗固め (以下A法と略す) 搗固時間：工場で練り始めて、60分後から22分間に1巡×3回搗固め(延べ6分間搗固め)</li> <li>・試験体Bの搗固め (以下B法と略す) 搗固時間：搗固め過ぎた場合の変化を調べるために、工場で練り始めて、60分後から46分間に4巡×3回搗固め(延べ24分間搗固め)</li> <li>・試験体Cの締固め (以下C法と略す) 締固め時間：工場で練り始めて、70分後に内部振動機で15秒間締固め</li> </ul>								
養生等	冬期につき試験体は6日間の湿潤保温養生、 保温養生温度 10~15°C その後11日目まで屋外湿潤養生、12日目にコア採取、 コアは28日目の圧縮試験当日まで屋外自然養生								
試験項目	<p>1. ブリージング量</p> <p>2. 見掛密度</p> <p>3. 圧縮強度</p> <p>4. 細孔径分布</p>								

### (2) 検証試験結果

#### a) ブリージング量(図-15)

ここでいうブリージング量は一辺50cmの立方体から表面に上昇してきた水の総量を示す。ブリージング量は、

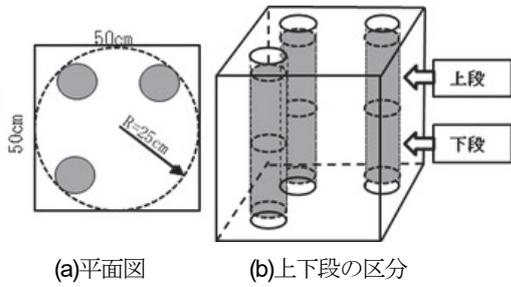


図-14 コア採取位置

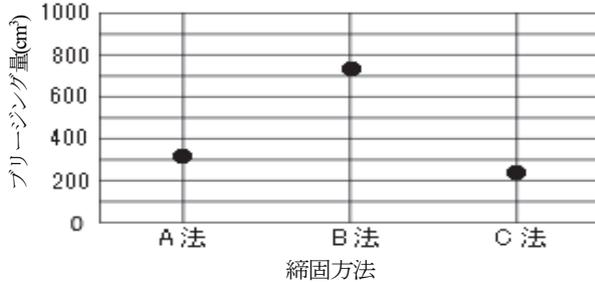


図-15 締固め方法とブリーディング量の関係

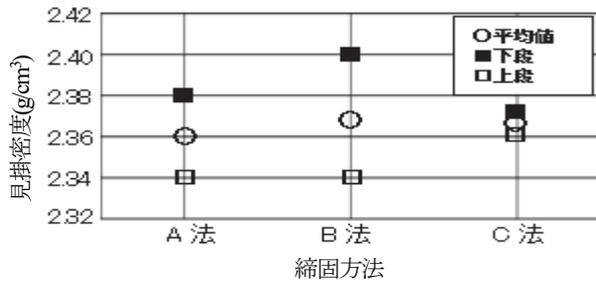


図-16 締固め方法と見掛密度の関係

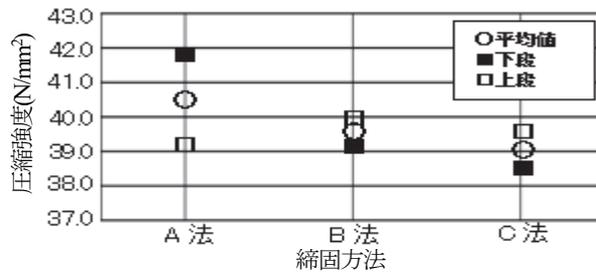


図-17 締固め方法と圧縮強度の関係

内部振動機によるC法より搗固機によるA・B法が多く、特に長時間搗固めたB法は内部振動機締固めC法の3倍にも及ぶ量に達した。

b) 見掛密度(図-16)

見掛密度はA・B・C法によって大きな差は見られなかったが、長時間搗固めたB法がわずかに高い値を示した。

c) 圧縮強度(図-17)

大正時代から現代までセメントの粒径、粒度分布および化学組成は大きく変化し、品質は比較できないほど改良されている。そのため今回は、4週圧縮強度そのものの数値ではなく、締固め方法の相違による相対的な強度の

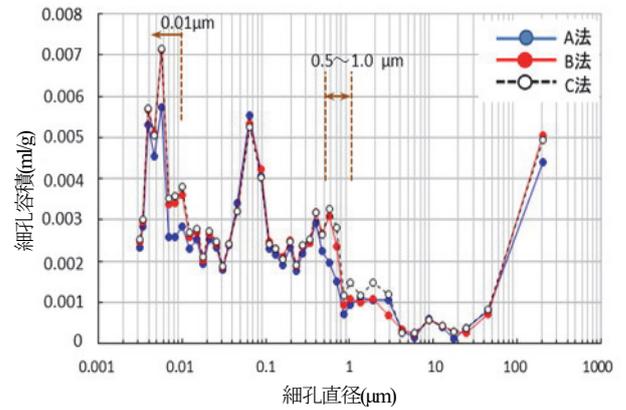


図-18 細孔直径と細孔容積の関係

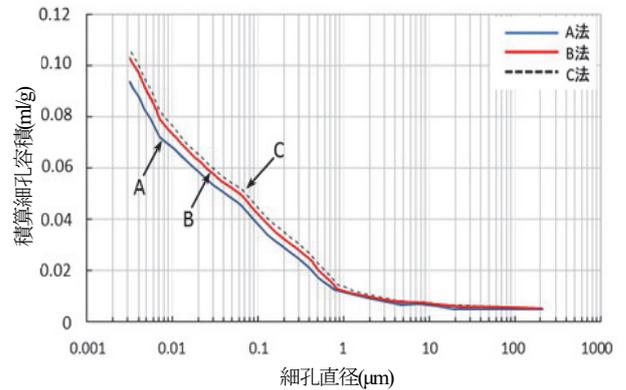


図-19 細孔直径と積算細孔容積の関係

表-4 細孔数値データ

項目	単位	A 法	B 法	C 法
全細孔容積	ml/g	0.0934	0.103	0.106
細孔率	%	18.7	20.1	20.7

細孔率：試料容積に対する細孔容積の割合

比較に視点を置いて検証した。

今回の圧縮強度試験の結果は、A>B>Cとなり、内部振動機締固めより搗固機が高い値を示した。

d) 細孔径分布試験

無線塔施工当時のコンクリートの種類は、プレーンコンクリートで、空気量は現代に比べて非常に少ない。今回の試験体作製時の空気量測定でも0.5%と少ない結果となった。空気量は中性化抵抗性を示す指標のひとつであるが、特に積算細孔容積が小さいほど緻密なコンクリートであり、中性化に対する抵抗性は大きいといえる。

試験片を各試験体の高さ方向中央部付近から採取し、水銀圧入式ポロシメーターにより、強度や耐久性に関係する0.002~200μmの範囲の細孔量を測定した。

図-18の細孔直径に対する細孔容積の分布は、ほぼ、同様の傾向を示すが、A法は0.01μm以下と0.5~1μmの範囲で他の試料より少ない値を示した。

図-19と表-4によると、それぞれの積算細孔容積に大き

な差はないが、積算細孔容積は $A < B < C$ の順で内部振動機締固法より搗固法が少ない結果となった。

### (3) 試験結果の考察

#### a) 締固方法与ブリージング量・見掛密度・圧縮強度

延べ24分間搗固めたB法搗固め2回目の3巡目からは、搗固蝸を試験体の底まで容易に挿入できなくなるとともに、モルタル分が表層に集中し、その後のブリージング量はA・C法よりはるかに多い現象が生じた。おそらく、骨材が下方に沈降し材料分離を起こしたものと推察した。また、B法の見掛密度はわずかに高くなったものの、圧縮強度は延べ6分間搗固めたA法より小さい値となった。このように、B法は、長時間の搗固め過ぎにより材料分離現象が発生したが、コンクリートの品質を低下させるほどの影響はなかったことを示す結果となった。

#### b) 締固方法与積算細孔容積

「相当なる搗固め」のA・B法は、戦後の高度成長期の内部振動機による一回の締固めのC法より、積算細孔容積は少なく、圧縮強度は大きい結果となった。この「相当なる搗固め」は緻密なコンクリートを生成することに寄与し、中性化の抑制に有効な締固方法であると推察した。

#### c) まとめ

今回、中性化の進行に影響する要因として締固方法も関係しているのでは、との視点で試験を実施した。試験結果は見掛密度、圧縮強度にわずかなバラツキが見られたが、これは、それぞれ1試験体からのコア供試体であることと、試験体の上下段のコンクリート性状の差の影響が含まれているものと推察した。しかしながら、この「相当なる搗固め」は、1回の内部振動機による締固めに優る施工方法である、という傾向を示しているものと判断した。今回は試料が少なく信頼性に疑問が残るため、適正な「相当なる搗固め」の時間については今後の検証が必要と考えている。

## 10. おわりに

本研究の成果を以下に要約する。

### (1) 基礎掘削工

基礎掘削工は、施工数量が小規模であることから人力施工とし、塔の外側が緩やかな地形であることを利用して、地山の一部を開削した箇所から掘削土砂を搬出していた。こうすることで雨水も容易に自然排水できたものと推察した。

### (2) 資機材の搬入荷卸し

資機材の荷卸しは木製支柱の上に簡易デリッククレーンを組み立て使用していた。

### (3) 無線塔の施工に外国技術を導入

内足場や型枠締付方法は、アメリカ・ウェーバーチムニー社のシステムを採用して施工していた。また、コンクリートミキサーも当施設が国策の軍事施設ということもあり、当時、民間工事(建築工事)では入手できないような大型の型式のものが、アメリカから輸入され使用されていた。

### (4) 足場工

塔内部の足場は、中央の内足場と鋼製ステージから組み上げた作業床により構成されていたものと推察した。さらに、外足場は、1段足場を昇降させることにより型枠組立解体工に対応していた。

### (5) 型枠

無線塔は上方に向かうにしたがって周長が短くなるため、型枠は下位リフト2リフト分を準備して施工を開始し、上位リフトでは3リフト分に転用して施工していた。さらに、型枠は、外周に4段配置したワイヤーにより締付けていた。

### (6) コンクリートの施工

基礎は堅練コンクリートを使用し、桶に入れて軌道上を移動させシュートを利用して打設していたことが明らかとなった。塔本体は中練コンクリートを使用し、塔頂部まで桶をウインチにより吊上げ、内足場からシュートを利用して1リフト高さ1.37mを3層に分け、打設していた。また、養生用ムシロが打設直後のコンクリート表面に確認できることから、コンクリート養生の重要性が認識されていたことも分かった。ただし、コンクリート打継目のレイタンスは、当時有害なものとの認識がなく除去されなかったことが、現在でもコンクリート表面で確認できる。

### (7) コンクリートの健全性(中性化抵抗性)

当時のコンクリート締固方法である「搗固蝸による相当なる搗固め」は、戦後の高度成長期の「内部振動機による締固め」に優る緻密なコンクリートを生成することができ、中性化の抑制に有効な締固方法であることが検証された。

### (8) 本研究成果のまとめ

以上が本研究の成果である。無線塔の当時の高度な施工技術が解明され、施工過程を「施工状況推測図」とし

て“見える化”することによって、より身近な重要文化財として再認識されればと願っている。その結果として、この文化財に多くの人々が関心を寄せ、この価値を共有することにより、次世代に引き継がれるような保存活動につながっていくものと期待している。

最後に、本研究に際し、当時の多くの技術書に触れ、誠実なコンクリートの施工に必死で取り組んできた先人技術者の熱意に接することができた。この姿勢は現代の技術者も学ぶべきものが多く、筆者が所属している(公財)長崎県建設技術研究センターにおける、建設技術者を対象とした研修講師としての今後の活動にも、大きな励みとなる研究であった。

**謝辞:** 本研究の調査にあたり、歴史土木遺産研究者の長崎大学岡林名誉教授に多くの資料の提供や多大なご教示賜りましたこと、ここに深謝いたしますとともに、『旧日本海軍針尾送信所学術調査報告書』を提供いただきました佐世保市教育委員会、貴重な助言をいただきました長崎県技術士会、煙突施工中の資料や写真等の提供をいただきましたJX金属(株)、大正鉄筋コンクリート(株)、京誠工業(株)、(株)名興機械製作所、および試料の分析をしていただきました(株)太平洋コンサルタントの皆様にお礼を申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 佐世保市史編纂委員会編纂：『佐世保市史 通史編下巻』, pp.53-58, 2003.4
- 2) 佐世保市史編纂委員会編纂：『佐世保市史 軍港史編上巻』, pp.425-429, 2002.4
- 3) 佐世保市教育委員会編集：『旧日本海軍針尾送信所学術調査報告書』, 2011.8
- 4) 佐世保市教育委員会：『旧日本海軍針尾送信所無線塔強度調査』, 清水建設, 2009.
- 5) 志岐叡彦：『序説佐世保軍港史』, pp.218-226, 1989.8
- 6) 山根 巖：我が国への鉄筋コンクリート橋導入の技術史的研究, pp.138-139, 2002.5
- 7) 前掲 3), pp.45-61
- 8) 前掲 2), pp.425-429
- 9) 前掲 3), pp.45-61
- 10) 内務省：市街地建築物法施行令 4 条, 1919.
- 11) 大澤昭彦：建築高さの歴史の変遷(その 1), 土地総合研究, p.21, 2008.
- 12) 小林茂敏, 河野広隆, 丹野弘：耐久性の優れたコンクリート構造物(道路構造物), 土木学会論文集, 第 378 号/V-6, p.38, 1987.2
- 13) 水越達雄：コンクリートダムの施工方法の変遷, 土木学会論文集, 第 384 号/V-7, p.2, 1987.8
- 14) 土木学会誌第 3 巻第 4 号：日立鉾山の現況, p.1120, 1917.8
- 15) 日本鉾業(株)編：『佐賀関精錬所五十年のあゆみ』, pp.48-58, 1965.
- 16) 大森房吉：文部省震災予防調査会編, 震災予防調査会報告, 第 97 号甲, p.18, 1921.11
- 17) 前掲 16), p.25
- 18) 三上栄朗：『原町無線塔物語』, pp.88-126, 1977.9
- 19) 前掲 3), p.22
- 20) 前掲 5), pp.218-226
- 21) 前掲 3), pp.50-53
- 22) 日比忠彦：『鉄筋混凝土(鉄筋コンクリート)の理論及びその応用(上巻)』, p.125, 1916.
- 23) 谷口三郎：『土木施工法-土工・基礎工・混凝土工』, p.542, 1933.
- 24) 前掲 3), p.56
- 25) Weber Chimneys:The Highest Chimney in the World,1919.8
- 26) 長崎市水道局編：『'91 長崎水道創設 100 周年 NAGASAKI WATER 100』, pp.28-29, 1991.5
- 27) 前掲 22), p.116
- 28) 川口虎雄：『土木工学 中巻』, pp.398-399, 1916.
- 29) 前掲 22), pp.127-128
- 30) 前掲 28), p.422
- 31) 岡本直樹：機械化土工のあゆみ, 土木施工, p.68, 2009.8
- 32) 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, 1952.6
- 33) 高橋久雄, 中根淳：コンクリートと施工法, 建築におけるコンクリート施工機械の移り変わり, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学, Vol.19, No.9, p.66, 1981.9
- 34) 土木学会：土木貴重写真コレクション利根川改修工事写真集
- 35) 前掲 3), pp.10-16
- 36) 前掲 32), p.6
- 37) 吉田徳次郎：『コンクリート及鉄筋コンクリート施工法』, p.168, 1942.
- 38) 鳥田専右：建築における練りませ・締め固め・養生方法の移り変わり, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学, Vol.19, No.4, p.59, 1981.4
- 39) 前掲 32), p.6
- 40) 土木学会：『鉄筋コンクリート標準示方書(初版)』, p.30, 1931.
- 41) 鶴見一之, 草間偉嗟武：『土木施工法』, p.78, 1912.
- 42) 前掲 28), p.431
- 43) 前掲 22), p.117
- 44) 沢木大介：長期間経過した実構造物中のセメント硬化体のキャラクターリゼーション, 東京工業大学博士論文, pp.90-121, 2010.
- 45) 和泉意登志, 押田文雄：経年建築物におけるコンクリートの中性化と鉄筋の腐食, 日本建築学会論文報告集, 第 406 号, p.5, 1989.12
- 46) 本名英里香, 阿久津裕則, 氏原菜摘, 伊代田岳史, 濱崎仁：異なる環境条件が中性化進行に与える影響とその診断法の検討, (一社)日本非破壊検査協会シンポジウム, p.319, 2015.8
- 47) 沢木大介, 田中敏嗣, 黒田一郎, 米倉重州夫：竣工から約 70 年を経た構造物から採取したコンクリートの諸性状, 日本コンクリート工学会, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, p.601, 2008.
- 48) 前掲 22), pp.116-117
- 49) 前掲 47), p.600

(2018.6.5 受付)

## A CONSIDERATION OF CONSTRUCTION METHODS OF THE HARIO RADIO TOWER COMPLETED IN 1922 THAT HAS BEEN DESIGNATED AS NATIONALLY IMPORTANT CULTURAL PROPERTY

Ken OGAWA

The construction of the Hario Radio Tower commenced in 1918 and was completed in 1922 by the former Imperial Japanese Navy, which came to recognize the importance of radio communications during the Russo-Japanese War. While the deterioration of concrete structures has recently become a serious social problem, this radio tower, which was constructed approximately 100 years ago, maintains its integrity without cracks or rebar corrosion. However, except for a few extant photographs depicting the construction's progress, we have no clear picture of the construction methods used. Nevertheless, it is necessary to pass on to future generations the construction techniques used to build this precious heritage. From an analysis of these photographs, phenomena remaining on the concrete surface, and documents of the period, it became clear that the tower was built while moving the external suspended scaffolding vertically; the concrete was compacted using the pounding "tsukikatame" method that employs medium-consistency concrete. Furthermore, the study verified that this pounding method produces dense concrete and is effective for suppressing carbonation.