

旧函館軍事要塞施設の建設材料特性に関する一考察

A Study on Material Characteristic of Hakodate Military Fortress Facilities

(株) ドーコン ○正会員 小林 竜太 (Ryuta Kobayashi)
函館市土木部 正会員 大久保 市郎 (Ichiro Ohkubo)
(株) リテック 正会員 朝倉 啓仁 (Keiji Asakura)
(株) ドーコン フェロー 進藤 義郎 (Yoshiro Shindo)

1. 序 論

旧函館軍事要塞は、明治期の土木技術の中でも高度な技術を持って建設された軍事施設であり、土木遺構として高い価値を有している。函館市が実施した現況調査報告によると、要塞建設時に用いられた材料は、コンクリート、煉瓦および切石であり、主として凍害により劣化が進行している状態にあることが確認されている。

本論文では、材料レベルにおける安全性および耐久性診断に対する基礎資料を得ることと、建設当時の材料特性を把握することを目的として、代表的な要塞施設からコンクリートあるいは煉瓦のサンプルを採取し、各種の材料試験を実施することによって種々の検討を試みた。

2. 試験項目および試験目的

前述のように、本調査は代表的な要塞施設からコンクリートあるいは煉瓦のサンプルを採取して、各種の材料試験を実施することによって耐久性診断を行うにあたっての基礎資料を得ることを目的とした。各種試験内容等の詳細に関しては後述するが、表－1 には本調査で実施した材料試験項目とその目的を整理して示している。

これより、コンクリートあるいは煉瓦に関する材料の強度に着目した試験は、圧縮強度試験あるいは静弾性係数試験とし、材料の耐久性に着目した試験は、中性化試験、粗骨材の密度および吸水率試験、塩化物イオン含有量試験、細孔径分布試験とした。また、建設当時のセメントの特性を検証することを目的として、セメントの化学組成分析を実施している。表－2 には本調査で実施した試験の数量を各要塞施設別に整理して示している。

3. 試験結果および考察

3. 1 コンクリートおよび煉瓦サンプルの採取

材料試験で用いるコンクリートコア（ ϕ 150mm）は、いずれもアーチ天井部の下面中心位置近傍から採取することとした。コア削孔は電気式のコンクリート用ボーリング装置を用いて行い、冷却水を供給しながら削孔する湿式タイプの装置を採用している。この装置はダイヤモンド粒を埋め込んだ円柱状のビットを高速回転させ、ダイヤモンドの切削力を利用してコンクリートを削孔する装置である。写真－1 にコンクリートの削孔状況を示す。なお、削孔箇所の補修は速やかに行うものとし、補修材には無収縮モルタルを用いた。一方、煉瓦のサンプルは倒壊して放置されているものの中で、その形状が保持されており、かつ損傷等のない健全な煉瓦片を選定した。

表－1 試験項目および試験目的

試験名称	試験目的
圧縮強度試験 静弾性係数試験	建設当時のコンクリート強度は現品質のものと比較して相当低いと想定されることから、その強度と弾性係数を確認し、安全性検討の基礎資料とする。
コンクリートの 中性化試験	中性化は大気中の二酸化炭素がコンクリート内に進入し pH が低下する現象である。このため、耐久性検討の基礎資料とする。
粗骨材の密度および吸水率試験	骨材品質を表す指標の1つである密度および吸水率試験を実施する。
塩化物イオン 含有量試験	初期内在塩分量や塩分の飛来環境を把握するため硬化コンクリート中の塩化物イオン量を測定して検証を行う。
細孔径分布試験	凍害の影響を受けたコンクリート構造に適用される試験の1つであり、本試験を実施してコンクリート耐凍害性に対する基礎資料とする。
セメントの 化学組成分析	建設当時におけるセメント原料の特徴と製造元を特定するための基礎資料を得るために化学組成分析を行う。
煉瓦の強度試験	建設当時に使用されていた煉瓦の圧縮強度を確認し、材料特性を検証する。

写真－1 アーチ天井部のコンクリート削孔状況



3. 2 圧縮強度試験、静弾性係数試験

コンクリートの強度特性を把握することを目的として、各要塞施設から採取したコア供試体に対して圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。試験はそれぞれ JIS A 1108, JIS A 1149 に基づいて実施している。

表－2 材料試験項目および試験数量

試 験 名	要塞施設名および試験数量				
	御殿山第一砲台	御殿山第二砲台	千畳敷砲台	薬師山砲台	入江山観測所
圧縮強度試験，静弾性係数試験	3	3	3	2	1
コンクリートの中性化試験	1	1	3	2	1
粗骨材の密度および吸水率試験	—	—	3	2	1
塩化物イオン含有量試験	—	—	1	—	—
細孔径分布試験	—	—	1	—	1
化学組成分析	1	2	1	3	1
煉瓦の圧縮強度試験	1	2	—	1	—

表－3 には試験結果一覧を，写真－2 には試験後の供試体の損傷状況例を示している。

これより，圧縮強度試験に着目すると，各要塞施設において比較的大きなバラツキが見られる。これは供試体内部のジャンカ（コンクリート内部の空洞等の欠陥部）の有無の影響であり，ジャンカが内在する供試体では著しく強度が低下することを示している。最も大きな強度が得られたのは薬師山砲台であり，御殿山第二砲台とともに約 30 N/mm^2 の強度が得られている。これは現基準の設計強度 21 N/mm^2 に相当するものと考えられる。一方，御殿山第一砲台，千畳敷砲台および入江山観測所は，薬師山砲台と比較して $1/2$ 程度の強度となっている。しかしながら，ジャンカの影響を無視すれば現基準の無筋コンクリートに対する設計強度 18 N/mm^2 に相当するものと考えられる。また，静弾性係数に関してもその傾向は圧縮強度試験結果とほぼ同様であった。写真－3 には御殿山第二砲台のコンクリートアーチ部を拡大して示している。これより，水平方向の層状に約 $30\sim 50\text{cm}$ の厚さでコンクリートの打設および締固めた形跡が確認され，ジャンカ部分は打継部の下面側であるものと推定される。

日本で初めてセメント規格が制定されたのは 1906（明治 38）年であり，農商務省告示第 35 号「日本ポルトランドセメント試験方法」がこれに当たる。告示によると強度として 12 N/mm^2 以上が規定されているが，本調査対象の函館要塞施設ではほとんどが満足されている。従って，施工法に起因するジャンカの影響を除けば比較的健全なコンクリート材料であるものと考えられる。

3. 3 コンクリートの中性化試験

コンクリートは，水酸化カルシウムの存在により強アルカリ性（ $\text{pH}12\sim 13$ ）を示す材料であるが，年月の経過に伴い空気中の二酸化炭素等の影響を受けて炭酸カルシウムに変化し pH が低下する現象が見られる。この反応が中性化である。中性化の進行によりコンクリートの組織そのものが直接的に劣化することは少ないが，鉄筋コンクリート構造物では内在する鉄筋の不動態皮膜が破壊されることから鋼材の腐食発生が懸念される。これより，本調査対象の要塞施設はいずれも無筋コンクリート構造であり，中性化試験の必要性はないものと考えられるが，耐久性検討における基礎資料の収集を目的としてコンクリートの中性化試験を実施することとした。ここで，本試験にはフェノールフタレイン法を採用することとした。フェノールフタレイン溶液は pH 指示薬であり，

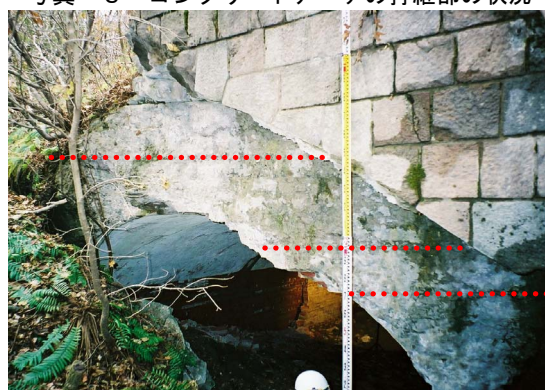
表－3 圧縮強度試験および静弾性係数試験結果

要塞施設名	圧縮強度 (N/mm^2)	静弾性係数 (N/mm^2)
御殿山第一砲台	12.7	$1.17 \text{ E}+04$
御殿山第二砲台	28.4	$1.70 \text{ E}+04$
千畳敷砲台	17.7	$1.13 \text{ E}+04$
薬師山砲台	33.0	$1.81 \text{ E}+04$
入江山観測所	18.8	$1.96 \text{ E}+04$

写真－2 試験後の供試体の損傷状況例



写真－3 コンクリートアーチの打継部の状況



表－4 中性化試験結果一覧

要塞施設名	平均中性化深さ
御殿山第一砲台	0.4 mm
御殿山第二砲台	1.8 mm
千畳敷砲台	0.9 mm
薬師山砲台	0.7 mm
入江山観測所	1.3 mm

pH 10 以上のアルカリ側で赤紫色に着色することから中性化領域では着色しないのが特徴である。試験方法は、供試体にフェノールフタレイン 1 %エタノール溶液を噴射し、表面から赤紫色に着色する部分までの距離を中性化深さとして測定することで行っている。なお、中性化深さは供試体 1 体に対して計 10 箇所測定し、この平均値をもって中性化深さとした。表-4 には中性化試験結果、写真-4 には試験後の供試体の状況を示している。

これより、いずれの施設においても中性化深さは小さいことが分かる。これは建設当時はポルトランドセメントの普及とともにセメントモルタル混和材として石灰が用いられていたという報告があることから、モルタルの保水性、コテ塗り向上のために消石灰を混入させていた可能性が高い。従って、高アルカリ性を呈す消石灰を表層モルタルに使用していたとすれば、これが要因となって中性化が発生しなかったものと推定される。

3. 4 粗骨材の密度および吸水率試験

コンクリート中の粗骨材の密度は、それが大きいほど緻密で良質な材料であり、一般にコンクリート強度も増加する。また、密度の増加に伴って吸水率が低下するため凍害に対する耐久性が向上することから、現基準では両者に対して制限値が設定されている。従って、ここでは骨材の基本的な性質を把握することを目的として、粗骨材の密度および吸水率に関する試験を実施することとした。本試験は JIS A 1110 に基づいて実施している。

表-5 に試験結果の一覧を示す。なお、表中には現基準の制限値も併せて示している。これより、絶乾密度に着目すると、制限値 2.5 g/cm³ 以上に対して測定結果の平均値は 2.3 g/cm³、また、吸水率に着目すると、制限値 3.0 %以下に対して測定結果の平均値は 5.2%となっており、いずれも現基準値を満足していないことが分かる。特に吸水率に関しては制限値を大幅に超過している。

これより、建設当時のコンクリート打設時における粗骨材の密度および吸水率が不明であることから、この結果は劣化に起因する可能性もあるが、凍害に対する耐久性は比較的低い粗骨材であるものと考えられる。

3. 5 塩化物イオン含有量試験

函館要塞施設はいずれも無筋コンクリート構造であり、塩害による劣化は想定されていないが、建設当時の初期内在塩分量あるいは塩分の飛来環境を把握することを目的として塩化物イオン含有量試験を実施することとした。試験は日本コンクリート工学協会の基準【JCI-SC4：硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法】に基づいて実施することとした。試料採取は JCI-SC8【硬化コンクリート中に含まれる塩分分析用コア試料の採取方法】に基づき、採取されたコアを表面から 10 mm 厚のコンクリート片を 5 層分切り出して（コアスライス法）採取することとした。塩化物イオン量（全塩分）の定量には硝酸銀滴定法を採用した。図-1 に試験結果を示す。

これより、塩化物イオン量分布はコア表面から内部に向かうに従って減少した分布性状を示しており、これは飛来塩分の影響を受けているものと考えられる。また、建設後の経年を 100 年と設定してフィックの拡散方程式を用いて回帰分析した結果も併せて示したが、表面塩分

写真-4 中性化試験後の状況



表-5 粗骨材の密度および吸水率試験結果一覧

要塞施設名		表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
薬師山	No.1	2.466	2.371	3.997
	No.2	2.490	2.392	4.079
千畳敷	No.1	2.462	2.363	4.184
	No.2	2.411	2.291	5.245
	No.3	2.370	2.227	6.449
入江山		2.379	2.219	7.237
平均値		2.430	2.311	5.199
現基準制限値		—	2.5 以上	3.0 以下

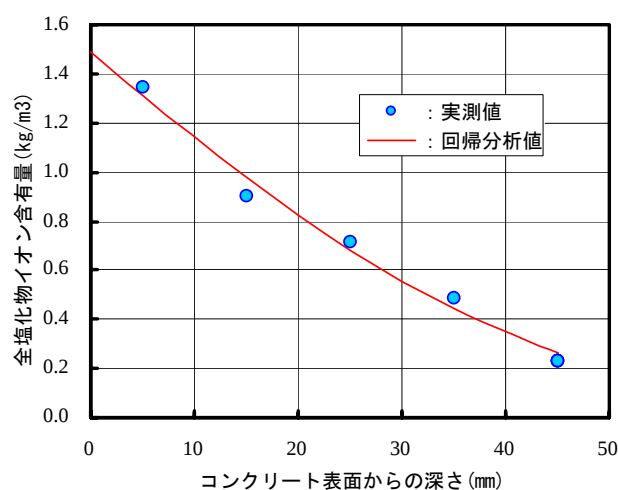


図-1 塩化物イオン量の深さ方向分布図

量は 1.5 kg/m³程度、見掛けの拡散係数は 0.06cm²/年 程度と小さい値であった。これより、函館要塞施設は飛来塩分の影響を受ける環境下にあるものの、直接海洋に面していないため、その程度は小さいものと考えられる。

3. 6 細孔径分布試験

硬化ペーストの耐凍害性には細孔径分布が大きく関与し、一般的には 10³ ~ 10⁴ nm 程度の空隙が多い場合には凍結融解作用による劣化を受けやすいと考えられている。図-2 に採取したコンクリート資料の細孔径分布を示す。これより、千畳敷砲台、入江山観測所ともに小さい細孔径に細孔容積がシフトしており、コンクリート試料中の硬化ペーストは耐凍害性に優れているものと考えられる。従って、千畳敷砲台や入江山観測所で見られた露天部分の著しいスケーリング（凍結融解作用によるコンクリー

トのペースト領域が劣化する現象)は、粗骨材の密度および吸水率試験で得られた結果による主として低品質の粗骨材に起因するものと考えられる。

3. 7 セメントの化学組成分析

旧函館軍事要塞は 1898 (明治 31) 年に工事着工され、1897 (明治 30) 年の小樽港北防波堤の工事着工とほぼ同時期に当たる。当時は日本セメント工業の黎明期であり、1892 (明治 25) 年の北海道セメント (上磯村工場) によるセメント製造の開始、1903 (明治 36) 年の回轉窯の輸入、1905 (明治 38) 年の我が国最初のセメント規格「日本ポルトランドセメント試験方法」の制定される前後の時期に当たる。このような観点から、旧函館軍事要塞の建設に用いられたセメントの特徴や製造元を特定するための基礎資料として、アーチ天井部、レンガ積モルタル部、石積モルタル部よりコンクリート試料を採取して化学組成分析を実施した。ここで、採取したモルタル分の化学組成分析では、強熱減量(ig.loss)と不溶残分(insol)を砂分とみなし、その他の成分がセメント分であると仮定した。化学組成分析の結果を図-3 に示すが、図中には 1897 (明治 30) 年代の日本国内において製造されたセメントの分析値も併せて示している。

これより、分析試料が各施設で 1 箇所であり、また分析結果にバラツキが大きいことから、セメントの供給元を特定するまでには至らなかった。アーチ天井部は明治期のセメント成分とほぼ一致しているが、石灰 (CaO) が若干低く、また苦土 (MgO) は 2~4%と国産品の 2 倍程度の高い値を示した。これは原料である石灰石や粘土に起因するものと考えられる。一方、レンガ積モルタル、石積モルタルも同様の傾向であるが、御殿山第二砲台においてはケイ酸(SiO₂)が極めて少なく、逆に石灰 (CaO)が高い値を示した。これはケイ酸 (SiO₂) の原料である粘土分が少なく、また消石灰 (CaOH) をベースとしたセメントに起因するものと考えられる。しかしながら、これらの化学成分の特異性についてもその原因を特定するまでには至らなかった。

3. 8 煉瓦の圧縮強度試験

煉瓦の強度特性を把握することを目的として、各要塞施設から採取した 4 つの煉瓦サンプルに対して圧縮強度試験を実施した。なお、圧縮試験は JIS R 1250【普通レンガ】に基づいて実施している。表-6 に試験結果の一覧を示す。また、表中には参考値として現在の JIS 規格に示されている 3 種煉瓦 (標準品) の規格値を示している。これより、圧縮強度、吸水率ともにバラツキが大きいことが分かる。これは、当時は同一の焼成においても窯内の場所によっては温度が異なり、均一な品質の製品製造が困難であったためと推察される。しかしながら、平均値を用いて比較すると、圧縮強度は 35.1 N/mm²、吸水率は 13.8%であることから、現在の 3 種煉瓦の品質に相当するものと考えられる。従って、吸水率に関しては規格値を満足していないが、強度的には問題ないことから概ね品質の良い煉瓦であるものと考えられる。

4. まとめ

本調査では、旧函館軍事要塞の安全性・耐久性診断で

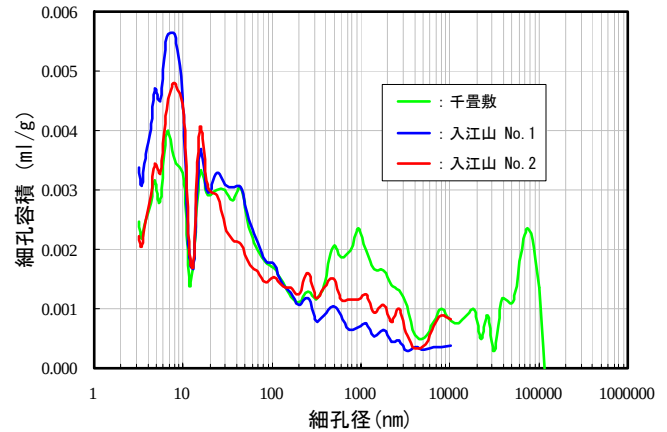


図-2 細孔径分布図

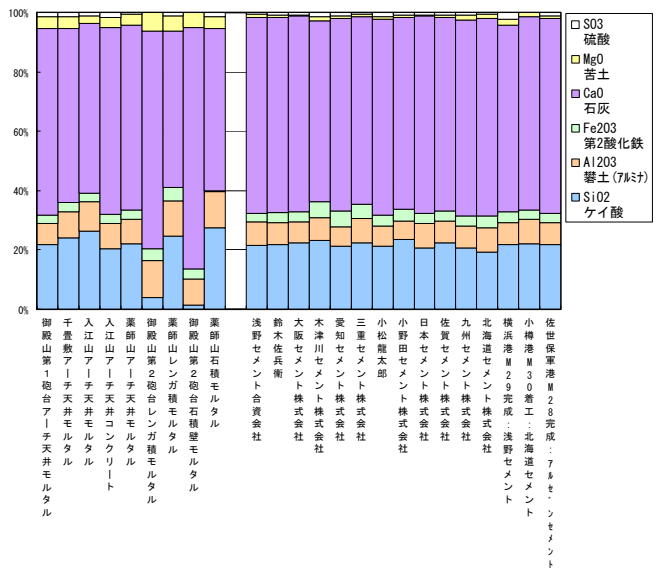


図-3 セメントの化学組成分析結果

表-6 煉瓦の圧縮強度試験結果

試料番号	圧縮強度 (N/mm ²)	吸水率 (%)
No.1	29.8	16.1
No.2	16.2	19.0
No.3	59.3	6.2
No.4	34.9	—
平均値	35.1	13.8
参考値(3種煉瓦)	20.0 以上	13 以下

用いる基礎資料を得ることを目的として、コンクリートや煉瓦のサンプルを採取して強度試験や耐久性試験等の各種材料試験を実施した。その結果、要塞建設に用いられた当時の建設材料に関する基本的な特性が明らかとなり、今後の保存対策検討に必要となるデータが得られた。

【参考文献】

- 1) 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，1995. 11
- 2) 日本セメント株式会社：70 年史 本編，pp.386 (第 37 表：第 5 回内国勸業博覧会セメント試験成績表)