

論文 約 100 年間海中で供用されたコンクリート構造物の海中における非破壊検査に関する研究

渡邊 晋也^{*1}・迫田 惠三^{*2}・鉄 芳松^{*3}

要旨: 我が国は, 明治時代以降沿岸域の開発が盛んに行われ数多くのコンクリート構造物が供用されている。現在, 水中にあるコンクリート構造物の点検, 調査は皆無に等しい状態である。そこで, 本研究では, 約 100 年間海中で供用されたコンクリート構造物を用いて海中にてコンクリートの目視検査, 非破壊検査ならびにコンクリートから欠片を採取し室内試験にて細孔構造の測定を行った。その結果, 水中非破壊試験を用いて海中にあるコンクリートの調査を簡便に行うことができることが判明した。また, 細孔構造の結果からも, 調査したコンクリートの品質は水中非破壊検査の結果を裏付けるものとなった。

キーワード: 水中非破壊検査, 海中環境, 長期耐久性, 反発度法, 超音波法, 細孔径分布

1. はじめに

水中に設置された我が国のコンクリート構造物の歴史は約 110 年前に遡る。港湾構造物では 1892 年横浜港防波堤工事 (横浜市), ダムでは, 1900 年に竣工した布引五本松ダム (神戸市) などがある。明治時代以降, 多くのコンクリートが水中へと設置されてきた。これらのコンクリートは, 水中で劣化したものもあれば, 布引五本松ダムや小樽港北防波堤のように, 供用開始約 110 年を経ても現役で役目を果たしている構造物もある。

既設構造物のアセットマネジメントを行う場合, 適切な点検・調査を行い, 既設構造物の現状を把握しなければならない。現在, 我が国には港湾構造物だけでも, 防波堤総延長 558.5 km, 岸壁総延長 886.5 km を有している。しかしながら, 水中におけるコンクリート構造物の点検・調査は大半の構造物において行われていない。また, 実施されている場合でも, 潜水士による目視観察¹⁾が中心で客観的な評価が成されていないものと考えられる。一方で, コンクリートコアを採取し, 調査を行う方法も考えられるが, 労力・コストともに負担が大きく, 広範囲に調査ができないことも考えられる。

そこで, 筆者らは水中で簡易にコンクリートの品質調査を行う為の水中非破壊試験機を作製した²⁾。本論文は, 水中非破壊試験機を用いて海中に約 100 年間曝されたコンクリート構造物のコンクリートの品質調査を行った結果についてまとめたものである。

2. 水中非破壊試験機の概要

2.1 各測定器の概要

(1) 水中反発度法

水中リバンドハンマー試験機を写真 - 1 に示す。水中リバンドハンマーは記録式の NR 型リバウンドハンマー試験機を用いた。本研究では, 市販の NR 型リバウンドハンマーに防水性・耐圧性を付属させる為に, 専用のハウジングケースを製作した。ハウジングケースの材質は耐食アルミニウムで耐圧水深は 60m である。ハウジングケースの寸法は縦 27cm, 横 25cm, 奥行き 13cm である。陸上での重量は 4.1kg, 水中での重量は 1.1kg となっている。潜水士一人でも簡易に取り扱え, 水中での反力を必要としないのが特徴である。また, 市販の NR 型リバンドハンマーには特に改良を加えていない。

(2) 水中超音波法

水中超音波試験機は, 市販の超音波試験機を用いて, 発振子および受振子とケーブルの接続場所に樹脂を用いて防水加工を施した。本研究で使用した発振子はジルコ



写真 - 1 水中リバウンドハンマー試験機

*1 (社)日本建設機械化協会 施工技術総合研究所 研究第二部 博士(工学) (正会員)

*2 東海大学 海洋学部 海洋建設工学科 教授 博士(工学) (正会員)

*3 (株)鉄組潜水工業所 代表取締役

ン酸チタン酸鉛セラミックで 54KHz の超音波を発生させることが可能である。水中超音波試験機の計測方法は、発振子および受振子のみを水中に入れる方法を採用した。したがって、計測する際、コンクリートに発振子および受振子を当てる潜水士と超波伝播時間を陸上および船上で記録する記録係の 2 人 1 組で行う。超音波試験機は、電気信号の減衰などを考慮して、ケーブルの長さを 10m としている。

2.2 水中非破壊試験機の測定方法について

(1) 水中反発度法

水中反発度の測定方法は、陸上の反発度法で規定されている JIS A 1155「コンクリートの反発度の測定法」に準拠している。本研究では、打撃方向をコンクリート測定面に対して垂直にして行った。したがって打撃方向による反発度の補正は行っていない。

(2) 水中超音波法

陸上の超音波試験には、受振子と振動子が共用された振動子を用いる一探触子法と受振子と振動子を 2 個用いた二探触子法がある。本研究では、二探触子法を用いることにした。二探触子法における振動子および受振子の配置には、コンクリートの相対する面に振動・受振子を対向させて配置する対称法（直接法）、振動・受振子を斜めに設置する斜角法（半直接法）、および振動・受振子を同一面上に配置する表面法（間接法）などがある。測定方法は、橋脚などの小さい部材の場合は対称法で測定ができるが、岸壁、ダム、水路、ケーソンなど対称側に受振子を設置できないコンクリート構造物もある。このことから、本研究では、表面法を用いてコンクリートの品質を調査する方法について検討を行った。この方法は、陸上において主にコンクリートのひび割れ深さを推定する際に用いられることが多い。本研究の対象は、水中にあるコンクリートであることから、ひび割れ部に水が浸透し、微細なひび割れやひび割れ深さなど測定できないことが、室内実験で判明している。したがって、本研究で用いている水中超音波法は、含水したコンクリート内部を伝播する超音波の速度を用いて、コンクリートを評価する方法である。

表面法の測定方法は、両端子を同時に離していく方法で測定を行った。測定距離は対象コンクリートの中心から両端子の中心 50mm, 100mm と 50mm 間隔で 1000mm まで縦波伝播時間を計測した。また、陸上の超音波測定には測定端子面とコンクリート面の間に空隙が生じないように両者を十分に密着させなくてはならない。通常、グリース等を用いるが、水中超音波測定試験の場合、水が両者の間に生じる空隙を埋める役割があることから、特にグリース等の接触媒体を使用しなくてもよいと考えられる。

3. 調査構造物の概要

(1) 構造物の概要

調査を行った函館港弁天地区防波護岸は、1910～1919 年にかけて施工された防波護岸である。函館港は 1890～1892 年にかけて廣井勇博士によって調査、設計報告が行われ、その後 1896～1899 年にかけて函館港改良工事によって近代的な港湾建設がなされた我が国の近代港湾の先駆けの港湾構造物である。その後、第 2 期工事として、本研究で調査した弁天地区防波護岸や西防波堤などが建設されてきた。弁天地区防波護岸の代表的な構造は、コンクリートブロック積み混成堤である。

(2) コンクリートの概要

工事記録³⁾によると、コンクリートブロックは小樽港の工事に習って使用材料に火山灰が使用された記録がある。コンクリートの混合割合は、セメント 1、火山灰 0.8、砂 3.2、砂利・碎石 6.4 である。

明治 30 年代のコンクリートブロックの製作風景を写真 - 2 に示す。コンクリートブロックは、小樽港の築港に習い、セメント混合機およびコンクリート混合機でコンクリートを製作したと記録³⁾されている。

(3) 調査場所

本研究で調査を行った場所の全体図を写真 - 3 に示す。赤色で囲んだ所が、調査対象である弁天地区防波護岸である。防波護岸の裏手には（株）函館どつくの乾ドックがある。この防波護岸は、明治 43 年（1910 年）から大正 7 年（1918 年）にかけて製作された。建設当時は、2 つの防波護岸から構成されていた。その後、昭和 45 年から 47 年（1970～1972 年）に 2 つの防波護岸を 1 つにする工事が行われ、現在の状態となった。本調査では、明治 43 年ごろに製作されたコンクリートブロックと大正 7 年ごろに製作されたコンクリートブロックおよび昭和 45 年に建造されたコンクリートケーソンについて調査を行った。調査場所の詳細を図 - 1 に示す。図中の数字



写真 - 2 明治 30 年代のコンクリートブロックの製作風景（北海道開発局資料⁴⁾より）

は、建設状況や工事記録³⁾をもとに推測した年代の古い順を表している。本研究では、コンクリートブロックの製作年代を次のように考えた。1：明治43年，2，3：大正初期，4，5，6：大正後期（大正7年ごろ），7：昭和45年から47年。以下、この数字を図の凡例に用いる。

4. 調査概要

本調査対象構造物は、社団法人土木学会が認定している土木遺産であることから、構造物からコア供試体を採取する許可が得られなかった。したがって、本調査は、非破壊試験のみを行った。調査方法のフローチャートを図-2に示す。現地調査では、はじめに潜水士がコンクリートブロック表面の目視観察を行った。その後、エアサnderを用いて、測定対象のコンクリートブロックの表面を研磨した後、水中超音波試験機を用いて表面法より縦波伝播時間を計測した。計測距離は、50mm 毎1000mm まで測定を行った。次に、水中リバウンドハンマー試験機を用いて水中反発度の計測を行った。本調査では2項目の水中非破壊検査を行っている。また、コンクリートブロックの表面から、コンクリートの欠片を潜水士が鑿を用いて採取し、水銀圧入法による細孔構造、全空隙率を測定した。調査したコンクリートブロックは、水深3m（ブロックの下から2番目）のコンクリートブロックを用いている。なお、このコンクリートブロックは、潮汐の影響を受けず、製作されてから、約100年間海中に曝されたコンクリートブロックである。

5. 調査結果および考察

5.1 現場水中試験

(1) 目視観察

潜水士による目視検査¹⁾を行った結果を写真-4に示す。明治43年、大正初期および昭和45年に製作されたコンクリートブロックは、骨材の露出等は無く健全なコンクリートであることが推測される。しかしながら、大正後期に製作されたコンクリートブロックは、粗骨材が露出して表面が劣化していることが確認された。

(2) 水中超音波試験

水中超音波試験の試験風景を写真-5に示す。潜水士が超音波試験機の発振子および受信子を対象のコンクリート構造物に接着させ、船上で超音波の伝播時間を記録している。水中超音波試験の結果から各測定場所における見掛け上の縦波伝播速度を算出した結果を図-3に示す。見掛け上の縦波伝播速度の算出方法は、距離と伝播時間の関係から、原点を通る直線回帰をした時の傾きを評価基準とした。この傾きは、距離と伝播時間の関係より求めていることから本研究では、見掛け上の縦波伝播速度（記号： V_a ，単位： km/s ）として扱うことにした。



写真-3 調査を行った場所の全体図

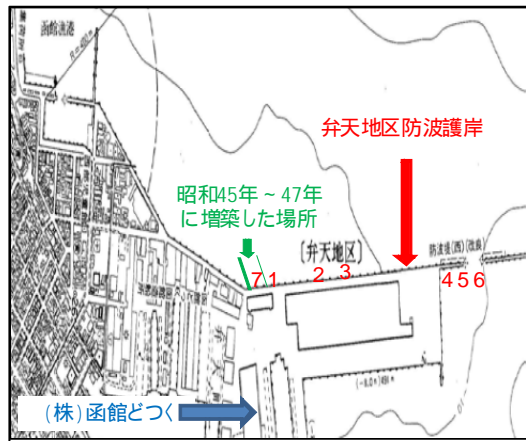


図-1 調査を行った場所の詳細図

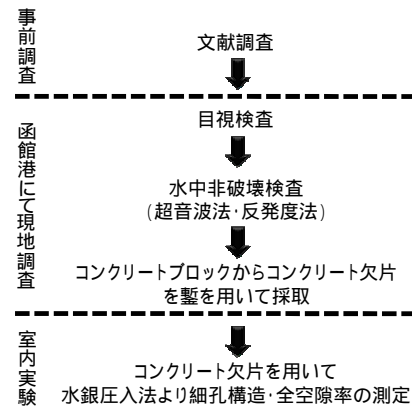
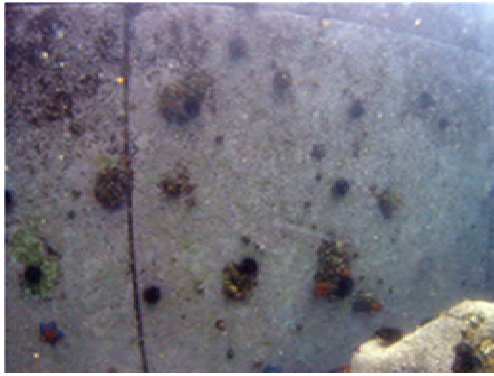


図-2 調査方法

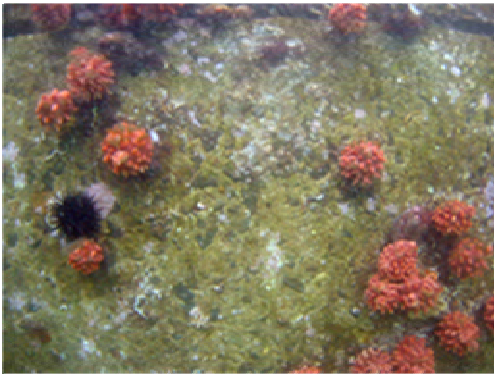
その結果、見掛け上の縦波伝播速度は、 $4.30 \sim 4.75 \text{ km/s}$ という既往の研究²⁾と比較して速い伝播速度が得られた。また、全体的に大正時代に製作されたコンクリートブロックの縦波伝播速度は低い結果が得られた。その中でも、表面に粗骨材が露出していたNo.5に関して、他のコンクリートブロックより速度が遅い結果が得られた。

(3) 水中反発度

水中リバウンドハンマー試験の試験風景を写真-6に示す。水中リバウンドハンマー試験の結果から各測定場所における水中反発度を測定した結果を図-4に示す。水中リバウンドハンマー試験は、調査ポイント1箇所につき2回測定を行っている。1回の測定で、30回の水中



a) 明治 43 年頃に製作されたコンクリートブロック



b) 大正後期頃に製作されたコンクリートブロック

写真 - 4 コンクリートブロックの各製作年代の表面状態



写真 - 5 水中超音波試験の試験風景

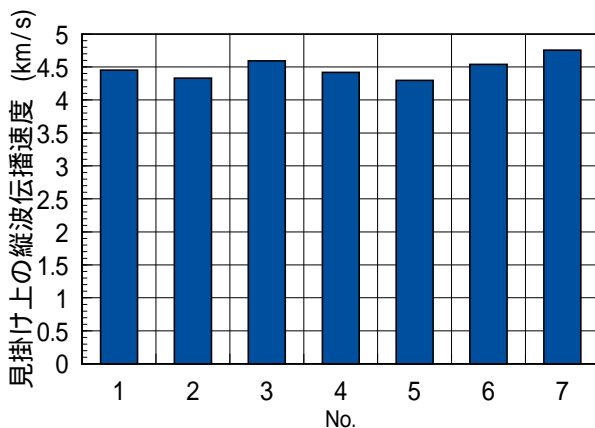


図 - 3 各測定場所における見掛け上の縦波伝搬速度



写真 - 6 水中リバウンドハンマー試験の試験風景

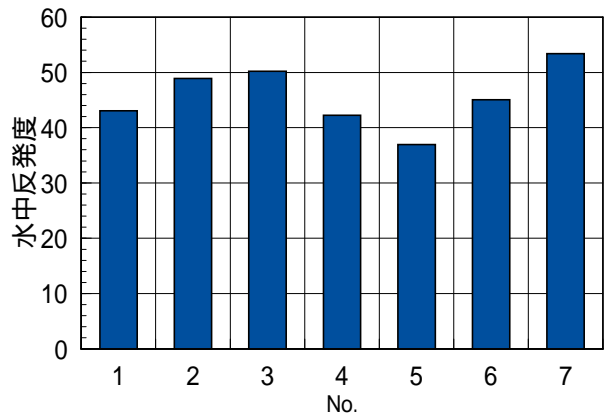


図 - 4 各測定場所における水中反発度

反発度を測定した。各調査ポイントの水中反発度の結果は 2ヶ所の平均を用いている。測定の結果、水中反発度は 37.0 ~ 53.4 と長年月海中に曝されたコンクリートにしては既往の研究²⁾と比較して大きな値を示した。このような結果が得られた理由として、コンクリートに火山灰を混入させていることが考えられる。火山灰を混入することで、ポゾラン反応により長期間強度が発現したものと推測される。また、水中反発度の結果では、昭和時代に製作されたコンクリートが調査した場所では最も大きな値を示した。水中超音波試験同様に、No.5 の大正後期時代の値が他のコンクリートブロックより低い値となった。

(4) 推定圧縮強度

水中非破壊試験法の水中超音波試験および水中リバウンドハンマー試験の測定結果を用いて複合法にてコンクリートの圧縮強度を推定した結果を図 - 5 に示す。推定に用いた圧縮強度推定式は以下の式を用いている。

$$F = -18.55 + 1.27Va + 1.47R \quad (1)$$

ここで、F：推定圧縮強度 (MPa)、V a：見掛け上の縦波伝播速度 (km/s)、R：水中反発度

複合法については、既往の研究報告²⁾を参考にした。その結果、算出した推定圧縮強度は、41.2 ~ 66.0MPaという結果が得られた。既往の研究結果⁵⁾によると、同地域

の乾ドックから得られた 100 年経過したコンクリートコア供試体の圧縮強度は、凍結融解作用を受けているのにも関わらず 30～34MPaの圧縮強度が得られている。その結果から、本調査で推定した 41.2～66.0MPaは環境条件、目視観察および非破壊試験の結果から判断して適当な推定圧縮強度ではないかと推測できる。したがって、約 100 年間海中に曝されたコンクリートではあるが、品質は良くあまり劣化を起こしていないことが推測できる。

5.2 室内試験

(1) 細孔構造

水銀圧入式ポロシメータより求めた各製作年による細孔径分布を図 - 6 に示す。細孔構造を比較すると、大正後期に製作されたコンクリートブロックの総細孔量は明治 43 年製および昭和 45 年に製作されたコンクリートより総細孔量が多い結果が得られた。火山灰を混入させた場合の細孔径分布は暴露期間により大きく異なり、27nm 以上の細孔に関しては暴露期間の経過とともに減少し、逆に 27nm 以下の細孔に関しては暴露期間の経過とともに増加するという報告がなされている⁶⁾。しかしながら、大正後期に製作されたコンクリートブロックは、明治 43 年製と比較した場合、既往の研究結果⁶⁾と異なる結果が得られた。この理由を検討したが、明確な回答は得られなかった。推測として、当時のコンクリートブロックの示方配合は、明治 43 年と大正後期では同様の配合を用いていると工事記録から推測できることから、製造時による施工条件や材料の計量誤差などのコンクリートブロック製作時に何らかの影響を受け、このような細孔構造の結果になったと考えられる。

図 - 7 に各年代に製作されたコンクリートの水銀圧入法から求められた全空隙率を示す。その結果、大正後期に製作されたコンクリートブロックの空隙率が最も多く、昭和 45 年に製作されたコンクリートケーソンが最も少ないという結果が得られた。水中非破壊試験で求めた、水中反発度や見かけ上の縦波伝播速度の結果が低くなるとコンクリートの空隙率が多くなるという傾向を示した。したがって、空隙率が多いコンクリートを水中非破壊試験により調査した場合、水中反発度および見かけ上の縦波伝播速度は低下することが空隙率の結果と同様の傾向を示すことが判明した。

6. 結論

約 100 年間海中に曝されたコンクリートブロックの現地調査における目視検査および水中非破壊試験を行った結果および、室内試験で細孔構造を行った結果、以下の知見が得られた。

(1) 潜水士による目視検査の結果、大正後期に製作されたコンクリートブロックには、粗骨材が露出しているこ

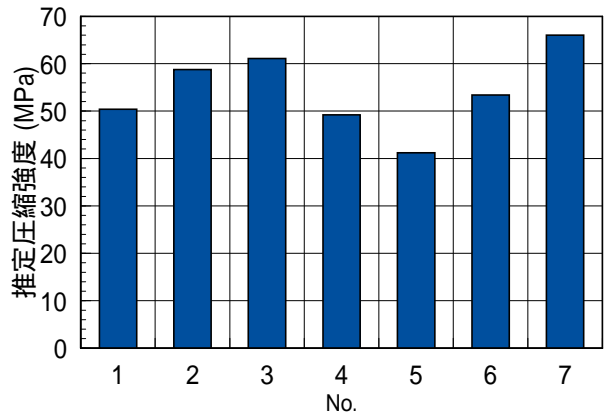


図 - 5 各測定場所における推定圧縮強度

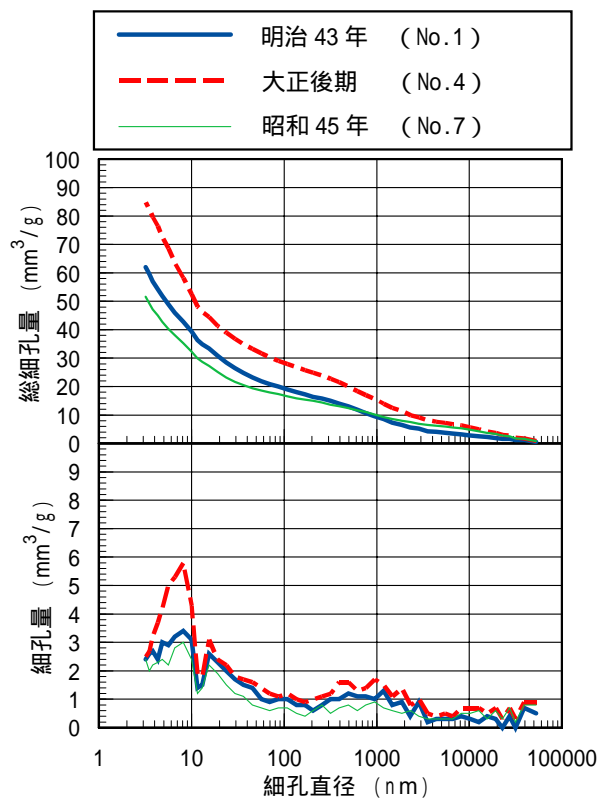


図 - 6 各年代に製作されたコンクリートの細孔径分布

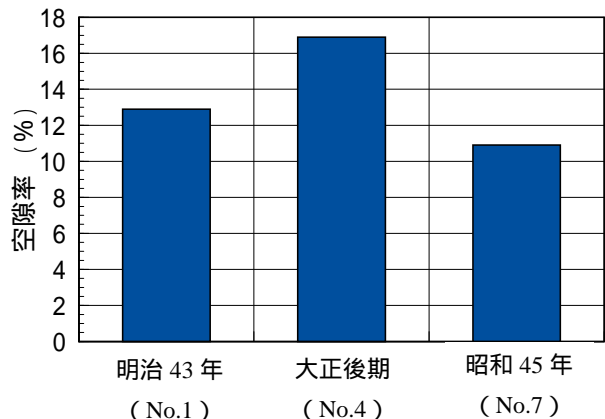


図 - 7 各年代に製作されたコンクリートの空隙率

とが確認された。この結果は、コンクリートブロックの劣化が進行したとは考えにくいことから、製作時に何らかの問題があったのでは無いかと推測できる。

(2)水中超音波試験の結果、見掛け上の縦波伝播速度は4.30 km/s以上であったことから、コンクリートの品質はASTMの規格から「良」とみなされる。また、既往の研究結果²⁾と比べ、本研究で調査したコンクリートは品質の良いコンクリートであることが判明した。

(3)水中超音波試験および水中リバウンドハンマー試験より得られる結果から推定圧縮強度を算出した結果、41.2～66.0MPa と高い圧縮強度を有していることが推定された。

(4)細孔構造を測定した結果、大正後期に製作されたコンクリートブロックの総細孔量は明治43年製および昭和45年に製作されたコンクリートより総細孔量が多い結果が得られた。

以上の結果、約100年間海中に曝されたコンクリートブロックは、顕著な劣化は見られず現在においても性能を維持していることが確認された。コンクリートブロックが劣化を起さなかった理由として、ボゾラン物質である火山灰をコンクリートに混入したことが要因として考えられる。また、水中にあるコンクリートの品質を客観的に評価する方法として、本研究で行った水中非破壊検査方法は有効であると判明した。

謝辞

貴重なコンクリート構造物の調査に際し、国土交通省

北海道開発局 函館開発建設部の皆様、函館市港湾空港部 港湾課の皆様、函館市国際水産・海洋都市推進室の皆様、函館どつく(株)岡田英雄氏、共和コンクリート工業(株)本間公也氏、(株)富士海洋土木 須田新輔氏に御協力を頂きました。また、細孔構造の測定では、(株)大林組 技術研究所 竹田宣典博士の御意見、御協力を頂きました。本研究は科研費(19560463)の助成を受けたものである。ここに付記し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター：港湾構造物の維持・補修マニュアル、沿岸開発ライブラリー No.6 pp.89-111, 1999
- 2) 渡邊晋也, 迫田恵三, 鉄芳松, 武内昭人：水中にあるコンクリートの非破壊検査に関する実験的研究, 東海大学海洋学部紀要, Vol.6, No.1, pp.141-152, 2008
- 3) 北海道廳：函館港工事報文, 1919
- 4) 北海道開発局、函館開発建設部函館港湾建設事務所：函館港みなとづくり百年の歩み、1997.3
- 5) 星野富夫, 辻正哲, 高橋茂, 魚本健人：100年以上供用されているコンクリート構造物の分析と評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.28, No.1, pp.707-712, 2006
- 6) 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], p.254, 1995