

論文 軍艦島護岸コンクリートの耐久性に関する一考察

審良 善和*1・佐野 清史*2・羽瀨 貴士*3・清宮 理*4

要旨：長期供用されたコンクリート製護岸の耐久性およびコンクリートの品質を評価するため、軍艦島の無筋または鉄筋コンクリート造の施設を検討対象とし、詳細な調査を実施した。その結果、軍艦島の護岸に用いられたコンクリートは、海水および海砂を使用したコンクリートである可能性が高いと考えられた。また、このコンクリート品質の低下はほとんど認められず、圧縮強度や塩化物イオンの浸透に対する抵抗性および中性化に対する抵抗性は、海洋環境下で100年程度の暴露後も高い性能を保持していると推察された。

キーワード：軍艦島、護岸コンクリート、長期耐久性、海水・海砂利用コンクリート、歴史的建造物

1. はじめに

実環境下で長期供用されたコンクリートの耐久性を把握することは、コンクリート構造物の長期性能予測および適切な維持管理を行う上で重要であると考えられる。沿岸域に建設される護岸等のコンクリート構造物は、海洋の影響を強く受けるため、鉄筋コンクリート造では鉄筋腐食が、無筋コンクリート造では海水や波浪などによるコンクリートの劣化が懸念される。

長崎半島の沖合に位置する軍艦島に築造されたコンクリート製護岸は既に82~116年が経過している。長崎半島の沖合に位置する軍艦島は、外洋に位置するため、台風等による高波の影響を頻繁に受ける過酷な環境である。そのため、護岸に補修や補強が施されている箇所はあるが、今なお護岸としての機能を概ね維持しており、このような厳しい環境において100年以上暴露された護岸施設であることを考えると、高耐久性な施設であると思われる。ただし、護岸の一部には、コンクリートのひび割れ、護岸下部の基礎との境界部での洗掘、土砂の吸出しによる背後地の沈下・陥没、護岸本体の海側への移動・前傾が確認されている。これらの変状発生メカニズムは、一般的な護岸構造物の場合とほぼ同じと考えられる。また、上記のほか、軍艦島の護岸における特徴的な変状として、越波した海水や豪雨による雨水等によって護岸天端から後述する天川（石垣護岸）が浸食され、天川と補強コンクリートの界面が肌別れし、補強コンクリートの崩壊に至る場合があることや、排水口部を起点として背面土砂の吸出しが進行しやすいことが確認されている¹⁾。いずれも構造的な変状連鎖であり、コンクリートの耐久性に関する性能低下に起因した変状は確認されていない。

なお、軍艦島護岸に使用されたコンクリートの初期塩化物オン濃度は高く、軍艦島は離島であること、塩分規

制以前の施設であることから、海水および海砂を使用したコンクリートである可能性が高い。著者らは、海水および海砂を用いた自己充填コンクリートの開発研究を進めており、基本特性に関する知見を得ている^{例えば 2)}。ただし、長期供用後の材料性能は不明な点が多い。そこで、長期暴露された軍艦島護岸コンクリートの品質およびその耐久性を評価し、海水・海砂を用いたコンクリートの長期性能を評価することを目的に各種調査を実施した。調査は無筋または鉄筋コンクリート造の施設を検討対象として、現地での詳細調査およびコア採取による各種試験を実施した³⁾。

2. 軍艦島護岸の概要

写真-1に示す軍艦島（正式名称：端島）は長崎半島の沖合に位置する外周約1.2kmの島であり、多くの貴重な近代化産業遺産等が現存しており、文化財や観光資源として注目されている。軍艦島の歴史は明治20年に第1堅坑が開坑され、その後、**図-1**に示すように6回にわたって拡張され、昭和49年1月15日に閉山し、同年4月に無人化した炭鉱の島である⁴⁾。

島の外周に築造された直立式のコンクリート製護岸は既に82~116年が経過している。資料によると、大正末期までは主に長崎特有の天川と呼ばれる赤土と石灰の混合物を凝固材とした岩石を積んだ石垣構造で築造されたが、昭和初期以降はコンクリート構造が用いられた。これは、この島はたびたび台風により大きな被害を受け、護岸も局部的に倒壊や破損を生じたが、コンクリートによる再構築や旧来の天川護岸の海側あるいは陸側にコンクリートを巻き立てる補強がなされてきたことによる⁵⁾。

3. 調査の概要

本調査は、2012年に軍艦島において、現地調査及びコア

*1 東洋建設（株） 総合技術研究所 美浦研究所 博（工）（正会員）

*2 東洋建設（株） 土木技術部 博（工）（正会員）

*3 東亜建設工業（株） 技術研究開発センター 博（工）（正会員）

*4 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博（正会員）

採取を実施し、以下に示す詳細調査を行った。

3.1 調査位置の概要

図-1 に示す No.1～No.5 の位置において調査を実施した。また、同位置の島内側からφ75mm のコアを採取した。コアの採取位置の詳細を表-1 に、調査位置の外観を図-2 に示す。コアの採取位置は、明治 30 年頃～昭和 6 年に拡張された範囲を対象とした。なお、いずれの施設も建設時の詳細な資料はなく、使用材料やコンクリートの配合等は不明である。

護岸コンクリートのうち No.1 および No.2 は現在も供用中の施設である。いずれも供用開始後 81 年は経過しているものと推察される。なお、No.2 は護岸陸側に RC 擁壁が打増しされており、コアはその位置から採取した。一方、No.5 に関しては、明治 30 年頃に拡張された際に建設された護岸であるが、明治 34 年に再拡張されており、島内に残置されたコンクリート護岸を調査対象とした。資料によると明治期にコンクリートを使用した明確な資料がないものの、少なくとも明治 34 年の再拡張までにはコンクリートによる補強が行われていると考えられるため、推定暴露期間は 111 年とした。護岸コンクリートの特徴としては、15cm～30cm 程度の大粒径の骨材（石材）が含まれており、大粒径の骨材を配合したコンクリートの使用、あるいは現在のプレキャスト工法のような施工方法が採用されていたと推察される。

RC 部材の施工時期はいずれも不明である。しかしながら、当時の炭鉄の生産増強体制を考慮すると護岸拡張の直後に建設されたものと推察されるため、推定暴露期間は、拡張年代と同時期と仮定した。使用されたコンクリートの最大粗骨材寸法は 40mm 程度であった。

3.2 検討項目

(1) 目視調査

ひび割れや浮きについて調査した。

(2) 岩種推定

JCI-DD4「有害鉱物の定量方法（案）2.肉眼による構成岩石の構成比率の算定」に準拠し、コンクリート中の粗骨材の岩種を分類するとともに、全粗骨材中の割合（含有率）を求めた。また、モルタルの粉末 X 線回折を行い、細骨材由来鉱物の同定も行った。



写真-1 軍艦島（端島）

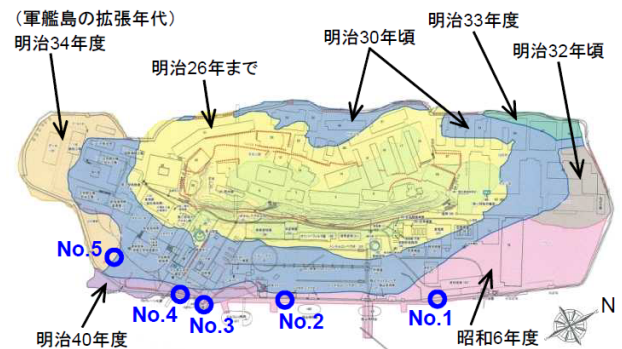


図-1 軍艦島の拡張年代とコア採取位置



No. 1

No. 2



No. 3

No. 4



No. 5

図-2 調査対象部材

表-1 コアの採取位置および部材の概要

No.	採取位置	採取方向	施工時期	推定暴露期間*1	鉄筋	部材厚	備考
1	資材倉庫南東側護岸	陸側	昭和 6 年	81 年	無	不明	大粒径骨材あり*2
2	1 護岸に打ち継いだ擁壁	陸側	明治 6 年以降	不明(81 年)	有	0.17m	Gmax : 40mm 程度
	2 休憩室南側護岸		昭和 6 年	81 年	無	不明	大粒径骨材あり*2
3	15t クレーン台座の梁	貫通	明治 40 年以降	不明(105 年)	有	0.60m	Gmax : 40mm 程度
4	13t クレーン台座背面の壁	陸側	明治 40 年以降	不明(105 年)	有	0.30m	Gmax : 40mm 程度
5	総合事務所南側旧護岸	海側	明治 30 年頃	111 年	無	1.52m	大粒径骨材あり*2

*1：括弧内は護岸の拡張年代から推定した期間、*2：15～30cm 程度の骨材

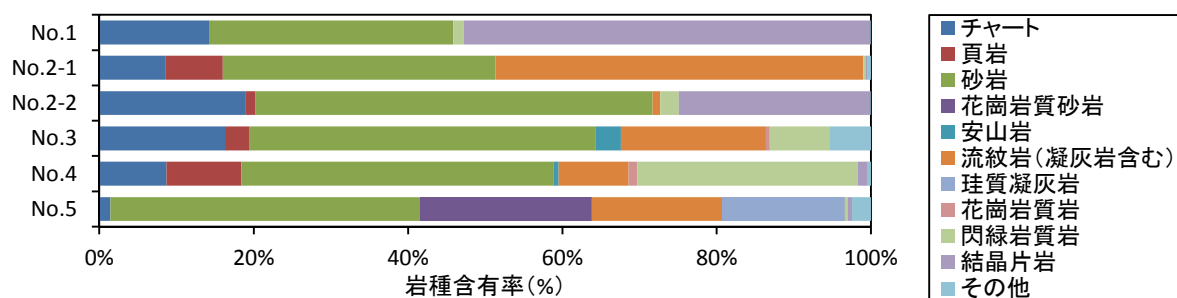


図-3 肉眼観察による岩種分類結果（粗骨材）

(3) 圧縮強度および静弾性係数試験

採取したコアを用いて、大粒径骨材を除いた位置において圧縮強度試験を実施し、深さ方向の圧縮強度および静弾性係数を調査した。

(4) 塩化物イオン濃度

JIS A 1154 および JCI-SC4 に準拠し、全塩化物イオン濃度の測定を行った。また、拡散係数および表面塩化物イオン濃度、初期塩化物イオン濃度の算出は JSCE-G 753 に準拠した。

(5) 中性化深さ

コア 3 本を用い、フェノールフタレイン法により 1 本当たり 10 点測定し、その平均値を中性化深さとした。

(6) 透気試験

トレント法による表面透気試験を行った。

(7) 細孔径

採取したコアの表面から 3~8cm の位置および No.1, No.5 は約 50cm 以深の位置において、水銀圧入法で細孔径分布の測定を行った。なお、分析試料はコアのモルタル部分とした。

(8) 鉱物同定

粉末 X 線回折を行い、セメント硬化体の鉱物構成の確認を行った。分析試料は、No.1,3,5 のコアを用い、モルタル部分を弱い力で粉碎処理を行うことで、極力ペースト部分を採取したものをを用いた。なお、採取位置は、コンクリート表面から 8cm および 60cm (No.1,5) および 30cm (No.3) とした。

4. 結果および考察

4.1 目視調査

無筋コンクリート造である護岸に関しては、島内においてコンクリートのひび割れ、護岸自体の前傾や破損、護岸と岩盤との境界部の空隙、背面土砂の沈下・吸出しなどが確認されている。ただし、調査位置となる No.1 および No.2-2 は健全な状態を維持している。また、No.2-1, No.3 および No.4 は、鉄筋腐食によるひび割れや浮きは確認されたものの、暴露年数を考慮すると比較的健全な状態であった。

4.2 使用骨材の推定

図-3 に肉眼観察による岩種分類結果を示す。いずれの

表-2 粉末 X 線回折による細骨材由来鉱物の同定結果

	1 (護岸)	3 (RC)	5 (護岸)
石英	小	小	中
長石類	小	小	小
雲母類	中	中	小
緑泥岩類	大	小	小
角閃石類	N.D.	小	N.D.
滑石	N.D.	小	N.D.
蛇紋岩	N.D.	小	N.D.

※量的目安：大>中>小>僅か>N.D.

コンクリートも砂岩が最も多く含まれており、含有率は 35%~60%である。しかし、その他岩種の含有率は部材により異なる。施工年代毎に比較すると、昭和 6 年に拡張された No.1 および No.2 の護岸で使用された骨材は同一産地である可能性が高いが、No.2 の RC に使用されたものは流紋岩を多く含む産地が異なる可能性が高い。明治 40 年拡張の No.3 および No.4 に関しては、含有率は異なるが概ね同一の岩種が混在しており、同一産地であると思われる。また、No.5 の護岸に使用された骨材はその他と大きく異なった。いずれも産地は不明であるが、骨材の形状は丸く、粗骨材は玉砂利を島外から輸送してきたものと推察される。また、肉眼観察によって、No.2-1, No.3 および No.4 のコンクリートには貝殻が確認された。

表-2 に粉末 X 線回折による細骨材由来鉱物の同定結果を示す。細骨材は雲母や緑泥岩を多く含むことが確認された。これらの鉱物は粘土鉱物であり、熱変質作用や風化作用を受けた岩石中に多く含まれる。細骨材にこれら岩石起源のもの、またはこれらの鉱物を多く含む粘土塊等が使用された可能性が考えられる。また、No.3 のみ角閃石類、滑石および蛇紋岩が検出された。このことから、他のコンクリートとは異なる材料が使用されたと推察され、これらの岩種は長崎半島の地層に含まれるものであった。このことから、RC 部材に用いられた細骨材は長崎半島より輸送された可能性が高い。

4.3 圧縮強度および静弾性係数

図-4 に圧縮強度の深さ分布を示す。部材によって圧縮強度に差があるものの、いずれのコンクリートも 21N/mm²以上の値であり、構造上十分な強度を保持していると考えられる。また、表層部分の急激な強度低下も認められず、80 年以上経過したコンクリートであっても、

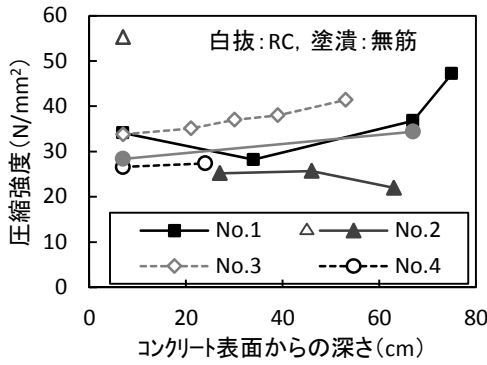


図-4 圧縮強度の深さ分布

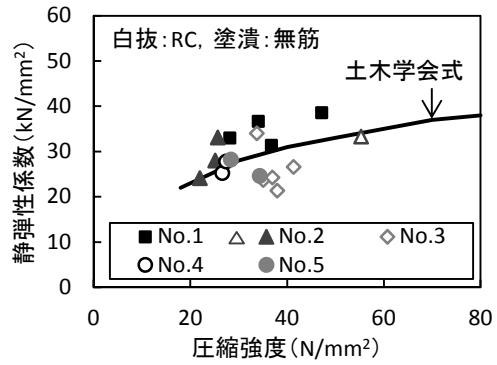


図-5 圧縮強度と静弾性係数の関係

構造上問題となるような強度低下は認められないと考えられる。

図-5 に圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。図中には土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕に示されている関係式（以下、土木学会式）も合わせて示す。若干のばらつきが認められるが、土木学会式と概ね一致している。全体的な傾向をみると、無筋コンクリートの静弾性係数は土木学会式より大きくなる傾向があり、RC の場合、同等または若干小さくなる傾向にあった。特に、はり部材となる No.3 の静弾性係数の低下が大きかった。

4.4 塩化物イオンの初期含有量および拡散係数

測定された塩化物イオン濃度分布³⁾を用い、表-1 に示した推定暴露期間を用いて算出した塩化物イオンの拡散係数 (D_{ap})、表面塩化物イオン濃度 (C_0)、初期塩化物イオン濃度 (C_{ini}) を表-3 に示す。護岸に使用されたコンクリート (No.1, 2, 5) の C_{ini} は $3.1 \sim 4.6 \text{ kg/m}^3$ と高い。軍艦島は離島であり、蒸留水機設置により島内の飲料水を確保していたこと⁴⁾、塩分規制以前の施設であることから、海水を使用している可能性が高いと考えられる。また、コンクリート中の貝殻の混入も確認されており、除塩されていない骨材が使用された可能性もある。ここで、海水中の Cl 濃度を $19,000 \text{ ppm}$ ⁶⁾とした場合、単位水量が 175 kg/m^3 で C_{ini} は 3.3 kg/m^3 程度になる。また、海砂のみを使用した場合の C_{ini} は 1.5 kg/m^3 程度、海水と海砂を使用した場合は 4.8 kg/m^3 程度と予測される。いずれにしても、護岸に使用されたコンクリートは練混ぜ時に海塩を多く含むコンクリートであったと推察される。

一方、RC 部材に関しては、No.3 のみ 1.4 kg/m^3 の C_{ini} が確認された。硬化促進剤としての塩化物塩の利用も考えられるが、本部材には貝殻等が内在しているところもあり、海砂の使用が考えられる。

D_{ap} に関しては、W/C や使用セメントが不明なため十分な評価は難しいが、図-6 に示す圧縮強度と拡散係数の関係には高い相関を示した。このことから、いずれも同じ種類のセメントを使用した可能性が高く、また、極端な拡散係数の低下は認められないと推察される。なお、

表-3 塩化物イオンの拡散係数 (D_{ap})、表面濃度 (C_0)、初期濃度 (C_{ini}) の推定値

No.	暴露面	D_{ap} ($\text{cm}^2/\text{年}$)	C_0 (kg/m^3)	C_{ini} (kg/m^3)
No.1	陸側	0.31	13.6	4.6
No.2-1	陸側	0.11	7.7	0.0
No.2-2				3.1
No.3	陸側	0.26	5.6	1.4
	海側	0.21	5.9	
No.4	陸側	0.59	13.9	0.0
No.5	海側	0.33	9.9	4.0

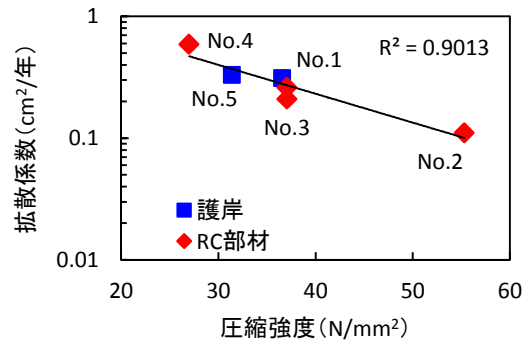


図-6 圧縮強度と拡散係数の関係

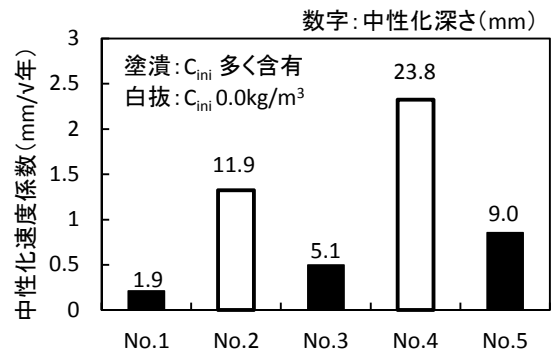


図-7 中性化速度係数

いずれの部材の拡散係数も $0.6 \text{ cm}^2/\text{年}$ 以下であった。また、 C_0 は暴露位置により差が生じ、 $5.6 \sim 13.9 \text{ kg/m}^3$ の範囲にあった。

4.5 中性化速度係数

図-7 に中性化速度係数を示す。中性化速度係数は、中性化深さの測定値と推定(供用)期間から算出した。中性化深さは部材により差が見られたものの、いずれも中性

化深さは非常に小さく、中性化速度係数で 0.2~2.3mm/ $\sqrt{\text{年}}$ となった。これは沿岸域においては中性化の進行が小さくなる⁷⁾ためであると考えられるが、 C_{ini} を多く含有したコンクリートの中性化速度係数が小さくなる傾向を示した。図-8 に物質透過性の観点から、塩化物イオンの拡散係数と中性化速度係数の関係を示す。拡散係数と圧縮強度の関係(図-6)では高い相関が得られたものの、中性化速度係数との関係では C_{ini} が 0.0kg/m³のものに比べ、 C_{ini} を多く含有したコンクリートの中性化速度係数が小さくなる傾向にあることから、中性化の進行速度は C_{ini} の含有量の違いによる影響が考えられる。

4.6 透気係数

図-9 に表層透気係数の結果を示す。なお、透気係数は調査点 No.6~No.8 として、コア採取箇所以外に測定した南西側護岸(明治30年および34年拡張)の結果も併せて示す。いずれの場合も非常にばらつきが大きく、同一部材であっても表層の性状は大きく異なることが予想される。透気係数の平均値から、護岸に使用されたコンクリートは「極劣」の評価となり、RC部材においても評価は「劣」となった⁸⁾。いずれも表層品質は劣化傾向にあることが分かる。また、その進行は護岸コンクリートの方が大きくなる可能性が高い。ただし、劣化層の深さは不明であるが、硬度低下や多孔化など表層品質の劣化はおおよそ中性化深さの範囲までと考えられる⁹⁾ことから、部材の極表層のみが劣化していると推察される。

また、透気係数のばらつきに関して、RC部材と護岸に区別し、測定した結果を用いた累積度数分布を図-10に示す。護岸コンクリートは全体的に劣化傾向にある。一方で、RC部材の方が護岸に比べ劣化の進行は緩やかで、50%程度は健全な状態を維持していると考えられた。

4.7 細孔量

図-11 に細孔量分布を示す。なお、比較1として、海水および海砂を用いた自己充填コンクリート(高炉セメントB種, W/C0.45, 海水浸漬, 材齢1年)²⁾および比較2として、干満帯に15年暴露したコンクリート(普通ポルトランドセメント, W/C0.45)¹⁰⁾の結果を併せて示す。なお、分析試料の採取位置は、比較1は同じであるが、比較2は表面から4.5cmの位置である。総細孔量はそれぞれ異なるが、軍艦島で供用されたコンクリートは緻密な構造であると推察される。また、ゲル空隙と考えられる10nm以下の細孔量は、軍艦島のコア、比較結果に関わらず同程度であり、急激な低下とそれに伴う10nm以上の空隙の増加も認められないため、長期暴露に伴う品質の低下は認められないと思われる。また、コンクリートの表面近くとなる深さ5.5cmと内部となる50cmの空隙構造の変化に関しては、No.1およびNo.5の結果から、若干の差は認められるが概ね同程度であった。

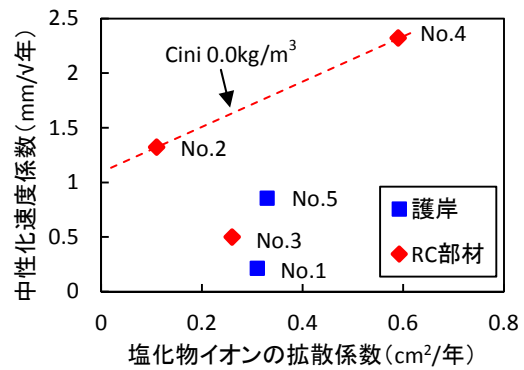


図-8 Clの拡散係数と中性化速度係数の関係 (測定点: 4点)

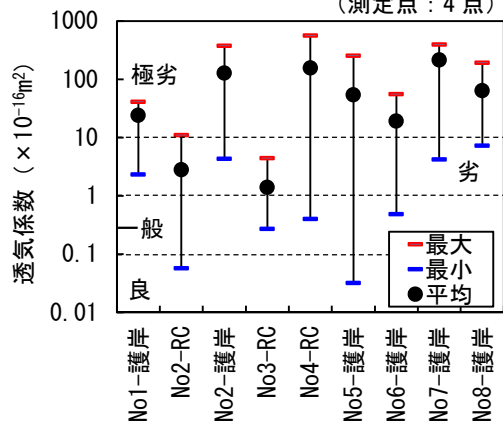


図-9 表層透気係数

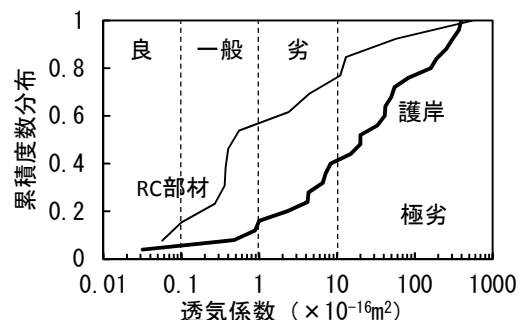


図-10 表層透気係数の累積分布

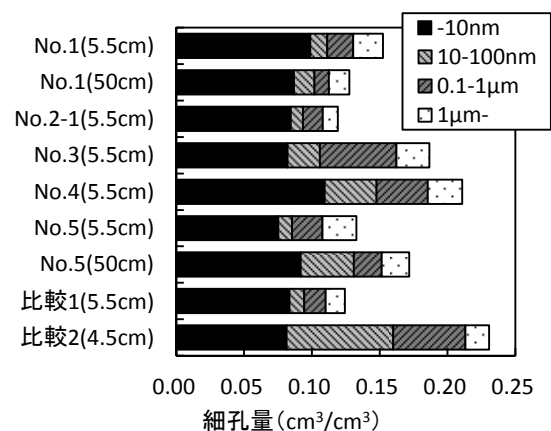
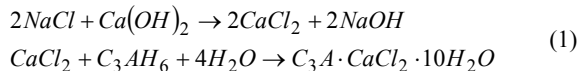


図-11 細孔量分布

4.8 X線回折結果

図-12 に粉末 X線回折により得られた回折ピークから同定したフリーデル氏塩 (Fr), エトリングライト (Et) お

よび水酸化カルシウム (Po) の X 線強度を示す。なお、分析に供したコアは、いずれも初期塩化物イオンが内在している No.1, No.3 および No.5 である。結果から、Et 量はいずれのコンクリートも少なく、ほぼ同等のピーク強度となった。一方、Fr のピーク強度は大きく、長期暴露後も固定化された塩化物イオンの解離は殆どないと推察される。ただし、No.5 のように表層部の Fr 量が低下している場合もあり、中性化等により解離する可能性はある。また、Fr および Po は、コアの違いにより大きな差が生じた。No.5 は Fr 量が非常に多いものの、Po 量が少ない。一方で、No.3 は Fr 量が少ないものの、Po 量が非常に大きな結果となった。それぞれの X 線強度の相関を図-13 に示す。結果は高い相関を示しており、塩化物イオンの固定に水酸化カルシウムが影響していると推察される。このメカニズムは不明であるが、恐らく式 (1) に示す反応が進む際に水酸化カルシウムが消費したことによると推察される。



5. まとめ

軍艦島護岸で長期間供用されたコンクリートの耐久性について検討を行った。なお、護岸および一部の RC 部材には海水や海砂が使用されたコンクリートである可能性が高いと考えられる。

その結果、沿岸部で 100 年程度暴露されたコンクリートであるが、硬化体の組成や細孔空隙構造に大きな変化はなく、コンクリートの品質の低下はほとんどないと推察される。コンクリートの耐久性としては、極表層部(中性化深さの範囲)に劣化は認められるものの、圧縮強度、塩化物イオンの浸透抵抗性および中性化抵抗性ともに高い性能を保持していることが明らかとなった。

謝辞

本調査は、長崎市の委託を受けた日本建築学会軍艦島コンクリート構造物劣化調査 WG (主査：東京大学野口貴文准教授)の活動の一環として実施されたものである。また、本研究は、長崎市および長崎県のご指導・ご協力のもと、早稲田大学清宮研究室、長崎大学原田研究室、(独)港湾空港技術研究所、五洋建設(株)、東亜建設工業(株)、東洋建設(株)および BASF ジャパン(株)により共同で実施した。実施にあたりご協力いただいた関係各位に謝意を表します。

参考文献

1) 羽瀧貴士ほか：外洋にて長期間供用された直立式の軍艦島コンクリート護岸の健全度、コンクリート構

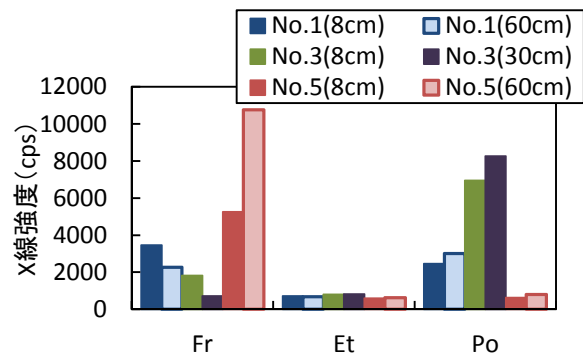


図-12 水和生成物の X 線強度

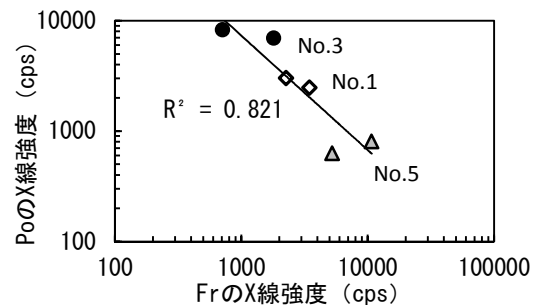


図-13 Fr および Po の X 線強度の関係

造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.13, pp.139-144, 2013.11

- 2) 竹中寛ほか：海水および海砂を用いた自己充てん型コンクリートの基礎特性、コンクリート工学年次論文集、Vol.29, No.1, pp.1912-1917, 2012
- 3) 審良善和ほか：長期供用された軍艦島護岸コンクリートの品質に関する一考察、コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、Vol.13, pp.145-150, 2013.11
- 4) 前川雅夫：炭坑誌—長崎県石炭史年表
- 5) 阿久井喜孝、滋賀秀實：軍艦島実測調査資料集 追補版、東京電機大学出版局、2005.3
- 6) (財)沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物の防食・補修マニュアル、沿岸技術ライブラリー、No.35, p.22, 2009
- 7) 島崎泰ほか：海洋環境下に長期暴露した各種セメントを用いたコンクリートの物性と鉄筋腐食、セメント・コンクリート論文集、Vol.65, pp.326-333, 2012.2
- 8) 土木学会：構造物表層のコンクリート品質と耐久性検証システム研究小委員会 (JSCE335 委員会) 第二期成果報告書、コンクリート技術シリーズ、No.97, 2012
- 9) 山路徹ほか：海洋環境におけるコンクリートの劣化性状および劣化指標に関する研究、土木学会論文集 E, Vol. 66, No. 1, pp.21-37, 2010.1
- 10) Tarek U. M.ほか：Long-term durability of concrete made with slag cements under marine environment, 港湾空港技術研究所報告、Vol.42, No.2, pp.155-191, 2003