

# 過酷環境下において長期供用された 軍艦島護岸コンクリートの品質評価

中山大誠\*・柿野陽太\*\*・佐々木謙二\*\*\*・原田哲夫\*\*\*

## Quality Evaluation of the Long-term Exposed Gunkanjima Shore Core in Severe Environment

by

Taisei NAKAYAMA\*, Yota KAKINO\*\*, Kenji SASAKI\*\*\* and Tetsuo HARADA\*\*\*

It is very important to understand the long-term exposed concrete durability in actual environment to conduct appropriate maintenance and long-term performance predict of concrete structure. In this study, the experiment is conducted about compressive strength, carbonation, and chloride ion penetration to research Gunkanjima shore core after long-term service. From the experiment result, it is conformed that shore core in Gunkanjima is general healthy while supersonic waves spread speed and compressive strength of shore core in the surface is slightly small. Moreover it is found that large quality deference exists in respect of carbonation and total chloride ion concentration distribution of core in both of sea side and island inside.

**Key words** : Gunkanjima, Shore, Compressive strength, Carbonation, Total chloride ion concentration distribution

### 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。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、RCでは鉄筋腐食が、無筋コンクリート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。

軍艦島(正式名称：端島)は、長崎半島から西に約4.5km、長崎港から南西に約19kmの沖合に位置し、南北約480m、東西約160m、外周約1.2kmの島である。島の外周は直立式のコンクリート製護岸となっている。護岸は苛酷な環境下にある軍艦島が存続するために不可欠なものである。よって、軍艦島の護岸の構造

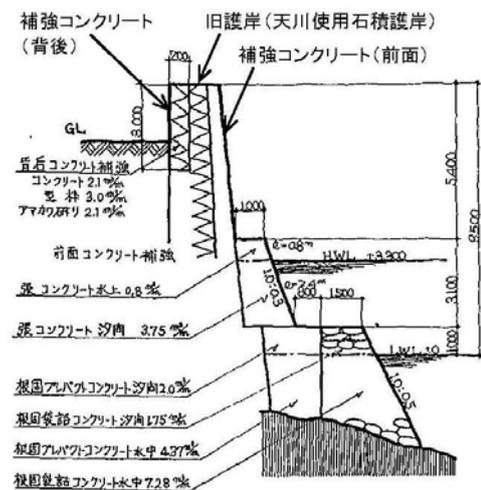


Fig. 1 護岸の構造の一例

令和元年7月12日受理

\* 総合工学専攻 (Graduate Student, Department of Advanced Engineering)

\*\* 福岡県庁 (Fukuoka Prefectural government)

\*\*\* システム科学部門 (Division of System Science)

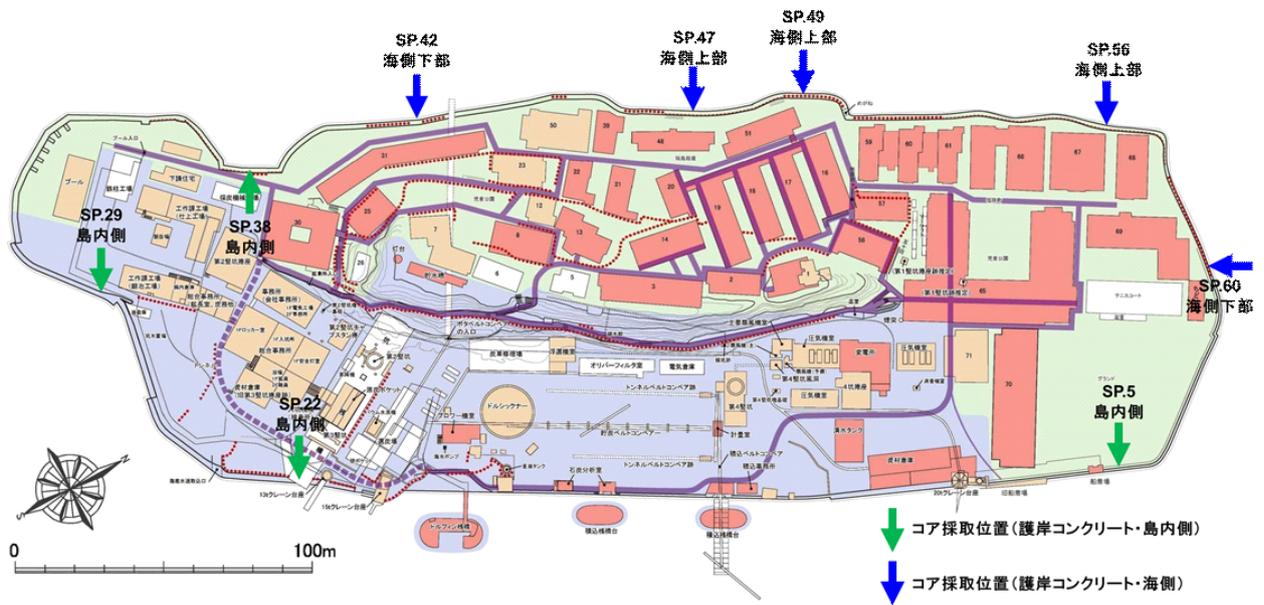


Fig. 2 コア採取位置

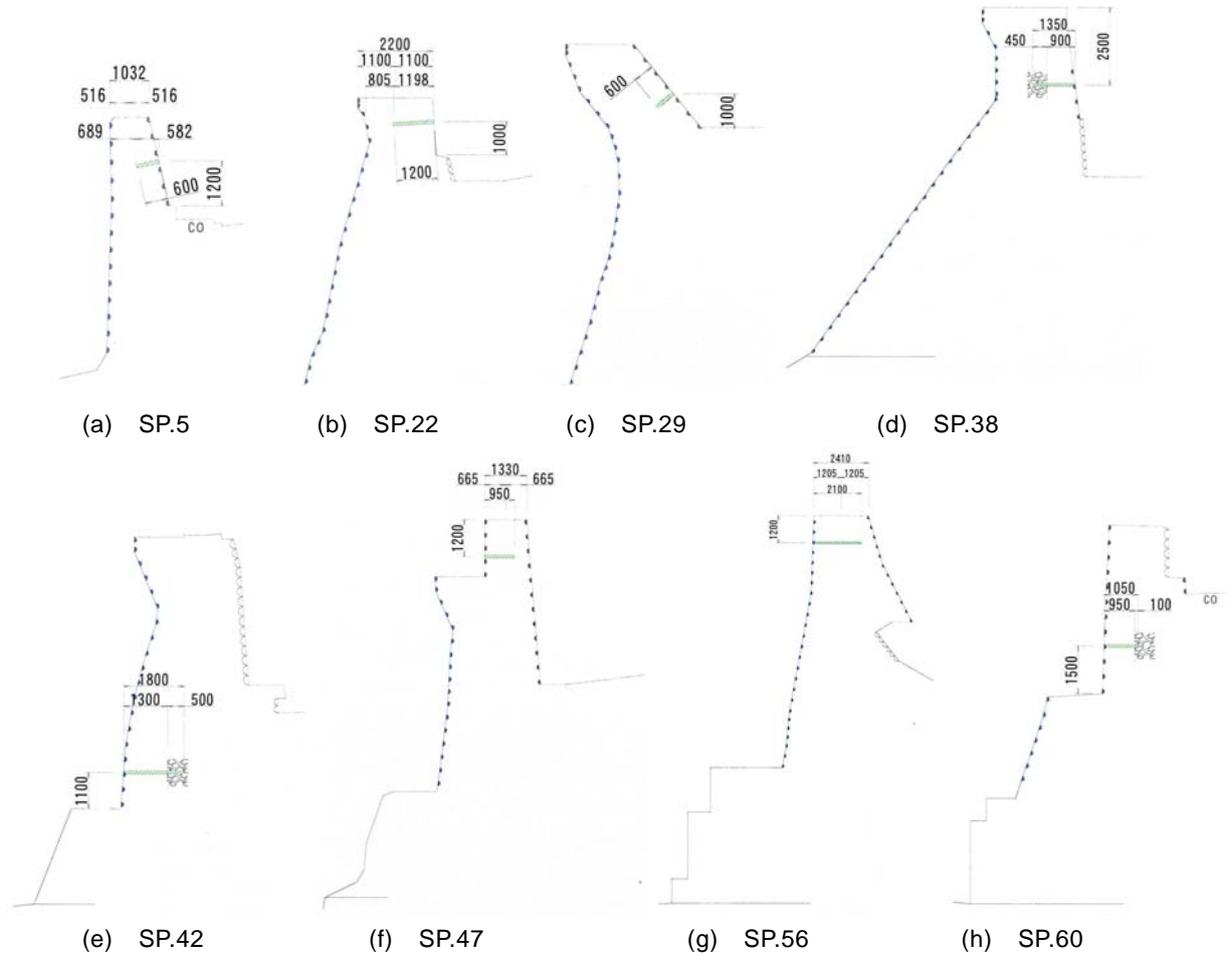


Fig. 3 コア採取位置断面の詳細

的変状や材料特性を把握することは軍艦島の保全にとって重要であるといえる。軍艦島のコンクリート製の護岸の品質については、島内側より採取したコアによる結果が既に報告されている<sup>1)~4)</sup>が、海側の護岸コンクリートの品質、中性化進行、塩化物イオン浸透状況については明らかでない。

本研究では、長期供用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することを目的に、海側、島内側の両方より採取したコアを用いて調査を実施した。

2. 軍艦島の護岸の概要

軍艦島は、明治期以降 6 回にわたって拡張され、現在は島の外周に築造された直立式のコンクリート製護岸によって取り囲まれている。現在の護岸構造の一例を Fig. 1 に示す。資料<sup>5)</sup>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。また、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。

3. 調査概要

3.1 採取コアの概要

Fig. 2 に示す 9 箇所（海側：5 箇所、島内側：4 箇所）においてコアを採取した。コア採取位置の詳細を Fig. 3 に示す。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。参考文献<sup>5)~7)</sup>に記載の写真をもとに施工時期を推定し、コア採取時までの供用期間を推定した結果を Table 1 に示す。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、大粒径の骨材を用いた配合あるいは施工方法が採用されていたと推察される。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 調査内容

(1) 超音波伝搬速度

超音波伝搬速度は、コア表面より 2.5cm ピッチで直接法により測定した。

(2) 圧縮強度・静弾性係数

採取コアを φ75×80~130mm 程度に切断し、JIS A 1107「コンクリートからのコアの採取方法及び圧縮強度試験方法」に従い圧縮強度を測定した。その際に、

Table 1 コアの推定施工時期、供用期間

コア名称	位置	推定施工時期	推定供用期間
SP.42	西部／海側	昭和初期	85 年
SP.47	西部／海側	昭和初期	85 年
SP.49	西部／海側	昭和初期	85 年
SP.56	北部／海側	昭和初期	85 年
SP.60	北部／海側	昭和初期	85 年
SP.5	東部／島内側	昭和 6 年	84 年
SP.22	南部／島内側	昭和前半	80 年
SP.29	南部／島内側	昭和 30 年代	55 年
SP.38	西部／島内側	昭和前半	80 年

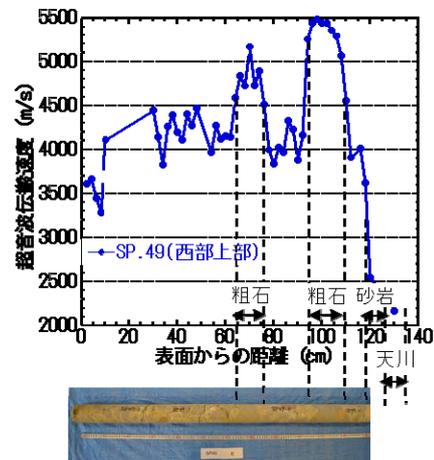


Fig. 4 コアの外觀と超音波伝搬速度 (SP.49)

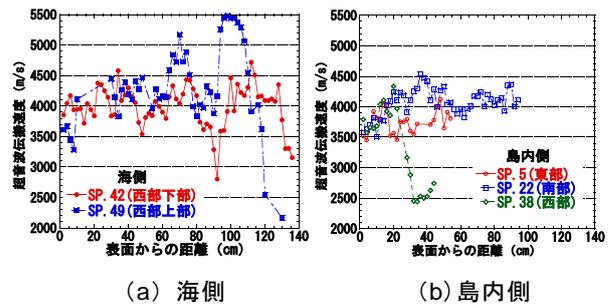


Fig. 5 超音波伝搬速度の深さ方向分布

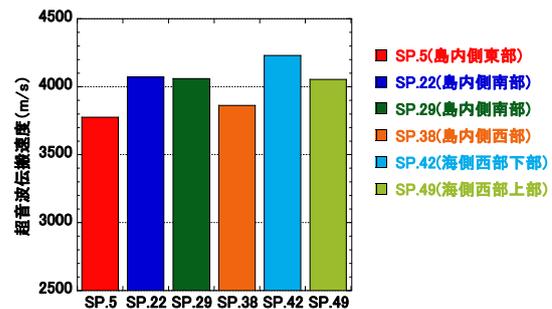


Fig. 6 コンクリート部の超音波伝搬速度

試験体側面に添付したひずみゲージによりひずみを測定し、静弾性係数を算出した。

(3) 中性化深さ

採取したコアの表面部を用い、割裂した後にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、24時間経過後に中性化深さを測定した。

(4) 全塩化物イオン濃度

コア表面から2cmの深さごとに試料を採取し、全塩化物イオン濃度をJIS A 1154「硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法」に準拠し、塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法により測定した。その結果をFickの拡散方程式の解で回帰して、表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を算出した。表面塩化物イオン濃度と見掛けの拡散係数を算出する際に使用した初期塩化物イオン濃度は、外来塩分の影響を受けていないと考えられる深さ40~60cm位置より採取した試料の全塩化物イオン濃度の値を用いた。

4. 調査結果および考察

4.1 超音波伝搬速度

Fig. 4に海側より採取したSP.49コアの外観と超音波伝搬速度分布を示す。このコアのコンクリート部における超音波伝搬速度は、3500~4500(m/s)程度の範囲に分布しており、超音波伝搬速度4500(m/s)以上の部分にはコア断面全体を大粒形骨材(粗石)が占めている。コア内部の120cm程度の位置には、超音波伝搬速度が2500~3000(m/s)程度の石積護岸に用いられていたと思われる砂岩があり、さらにその奥側には超音波伝搬速度が2000~2500(m/s)程度の天川がある。

Fig. 5に超音波伝搬速度の深さ方向分布を示す。海側から採取したコア、島内側から採取したコアともに表面部に超音波伝搬速度がやや低い領域が確認されるが、島内側のコアの方がその範囲が大きい。これは、島内側の方が乾湿繰返しの影響を受けやすく、表面付近の劣化が進んでいるためであると考えられる。しかし超音波伝搬速度が低くなっている領域は、コンクリートの部材厚全体から考えると極限られた表面部分だけであり、超音波伝搬速度の観点からだけではあるが、80年程度経過している過酷環境下にある護岸コンクリートの材料品質としては比較的健全な品質を保っていると言える。

Fig. 6にコンクリート部の超音波伝搬速度の平均値を示す。島内側のコア、海側のコアともばらつきは大きいものの、島内側のコアと海側のコアを比較すると、概ね海側のコアの超音波伝搬速度の方が大きいこ

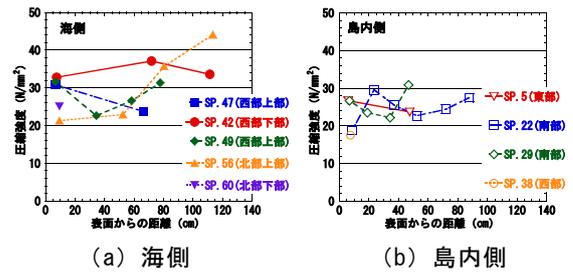


Fig. 7 圧縮強度

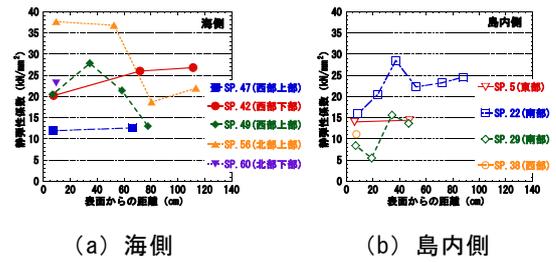


Fig. 8 静弾性係数

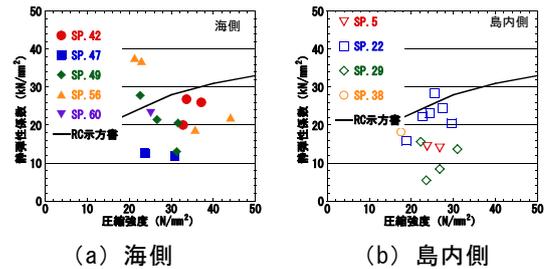


Fig. 9 圧縮強度と静弾性係数の関係

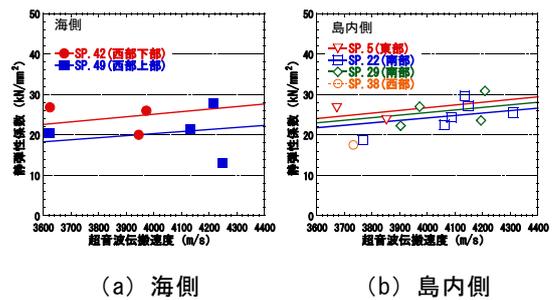


Fig. 10 超音波伝搬速度と静弾性係数の関係

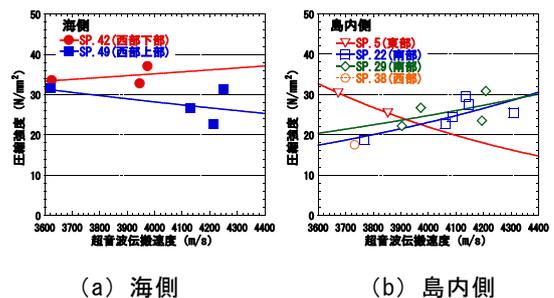


Fig. 11 超音波伝搬速度と圧縮強度の関係

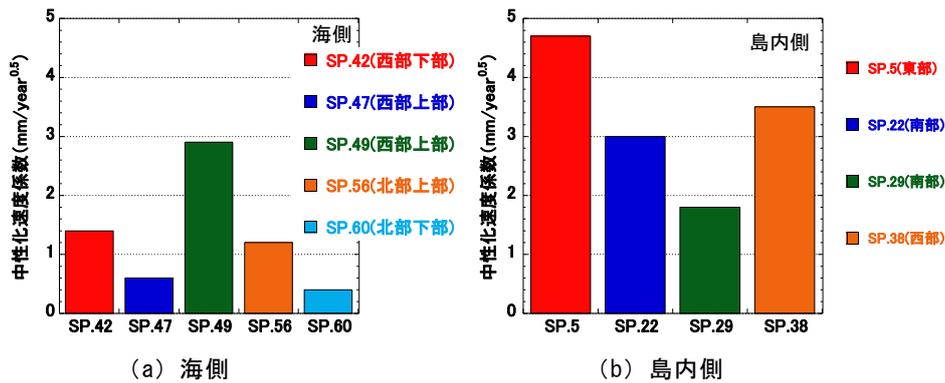


Fig. 12 中性化速度係数

とが分かる。

#### 4.2 圧縮強度・静弾性係数

Fig. 7 に圧縮強度の深さ方向分布を示す。コアにより異なる傾向を示す場合もあるものの、概ね深さ方向で同程度の圧縮強度、または深部のコンクリートの方が圧縮強度がやや大きくなる傾向が認められる。いずれのコアにおいても圧縮強度は  $21\text{N/mm}^2$  程度以上の値であり、十分な強度を保持していると考えられる。海側、島内側いずれのコアにおいても表層部の著しい強度低下はなく、80 年程度経過しているものの構造上問題となるような強度低下は認められない。

Fig. 8 に静弾性係数の深さ方向分布を示す。圧縮強度はおおよそ  $20\sim 30\text{N/mm}^2$  の範囲に分布しているものが多かったが、静弾性係数は同一のコアにおいても差が大きく、表面から同程度の距離における各コア間の差も大きいことが確認される。

Fig. 9 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〕に示されている圧縮強度と静弾性係数の関係も併記している。海側のコア、島内側のコアともばらつきが大きく、全体的に示方書の関係よりも下側になっている。同程度の圧縮強度における静弾性係数を、島内側より採取したコアと海側から採取したコアで比較すると、島内側のコアの方がやや下側にある傾向が見て取れる。これは島内側の方が乾燥しやすく、乾湿繰返しによる劣化が幾分進みやすかったためと考えられる。

Fig. 10 に超音波伝搬速度と静弾性係数の関係を示す。超音波伝搬速度は、理論的には静弾性係数の平方根と比例関係にあることが知られているが、本研究におけるコンクリートコアにおいても、ばらつきはあるものの超音波伝搬速度と静弾性係数には相関関係があることが確認される。

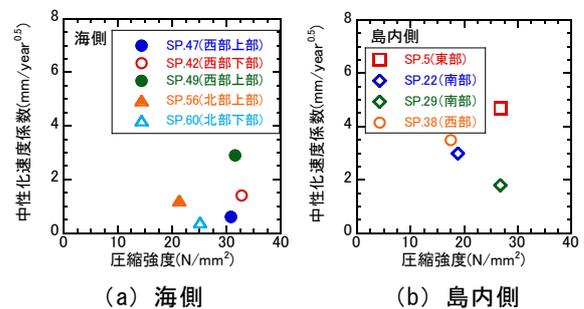


Fig. 13 圧縮強度と中性化速度係数の関係

Fig. 11 に超音波伝搬速度と圧縮強度の関係を示す。超音波伝搬速度と圧縮強度には直接的な関係はないが、コンクリートにおいては一般に圧縮強度が大きくなると静弾性係数が大きくなることから、超音波伝搬速度が大きくなると圧縮強度が大きくなると考えられるが、圧縮強度と静弾性係数の関係が大きくばらついていたり、SP. 49 や SP. 5 のコアにおいては逆の傾向となった。

#### 4.3 中性化

Fig. 12 に  $\sqrt{t}$  則に基づき中性化深さの測定結果より求めた中性化速度係数を示す。海側より採取したコア、島内側より採取したコアのいずれの場合においても、コア採取箇所により中性化速度係数に大きなばらつきはあるものの、概ね島内側のコアの方が中性化速度係数が大きな傾向が認められる。海側から採取したコアでも SP. 49 のように中性化速度係数が島内側のコアと同程度の場合もあるが、護岸の上部より採取しており、比較的中性化が進行しやすい環境にあったためと考えられる。

Fig. 13 に圧縮強度と中性化速度係数の関係を示す。一般的には、圧縮強度が大きくなると中性化速度係数は小さくなる傾向にあるが、海側のコアについては圧

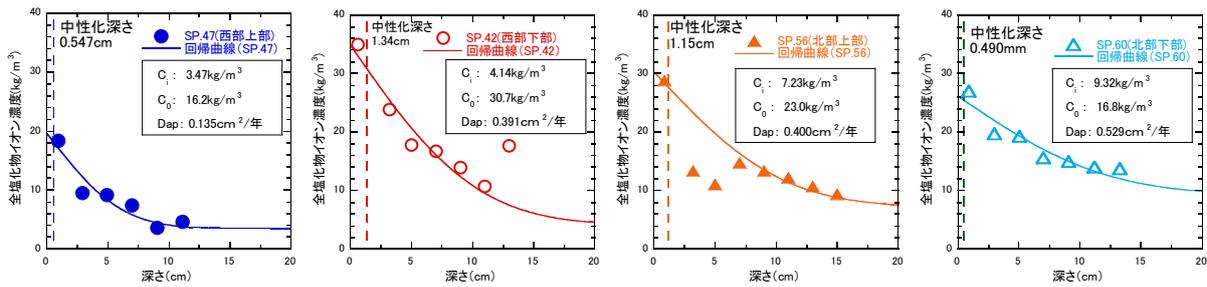


Fig. 14 全塩化物イオン濃度分布(海側)

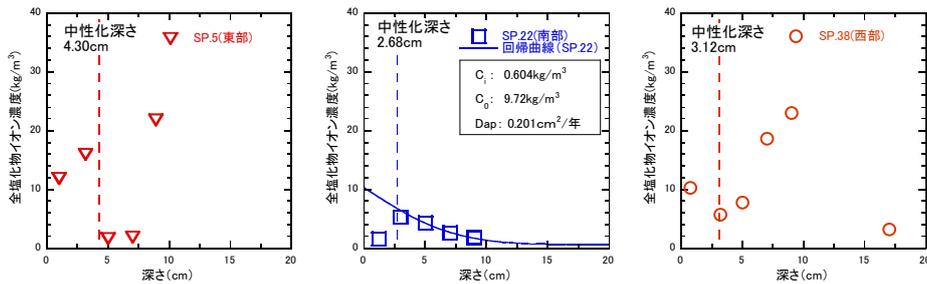


Fig. 15 全塩化物イオン濃度分布(島内側)

縮強度と中性化速度係数に明確に関係は確認されなかった。一方、島内側のコアについては、東部の護岸より採取した SP.5 を除くと、圧縮強度が大きくなると中性化速度係数が小さくなる傾向が確認される。同程度の圧縮強度である SP.5 と SP.29 の中性化速度係数を比較すると、東部の護岸から採取した SP.5 の方が中性化速度係数が 2 倍程度大きくなっている。これは、SP.29 は南部の護岸であり外洋に比較的面しており、越波量が多く島内側護岸表層部が比較的湿潤状態にあり中性化が進行しにくかった一方、SP.5 は外洋に面しておらず、越波量も少なく、比較的乾燥もしやすく中性化が相対的に進行しやすい環境にあったためと考えられる。

#### 4.4 全塩化物イオン濃度分布

Fig. 14 に海側より採取したコアの全塩化物イオン濃度分布を示す。西部の護岸より採取した SP.47 と SP.42 を比較すると、圧倒的に護岸下部の SP.42 の塩分浸透量が多いが、北部の護岸より採取した SP.56 と SP.60 とでは西部ほど護岸上部と下部の差が大きくはない。これは、西部の SP.47 と SP.42 はコアを採取した護岸面がほとんど同じ方向を向いているが、北部の SP.56 と SP.60 はコアを採取した護岸面が 90° 異なっており、向きの違いによって塩分供給量が大きく異なったためと考えられる。また圧縮強度が 20~25N/mm<sup>2</sup>

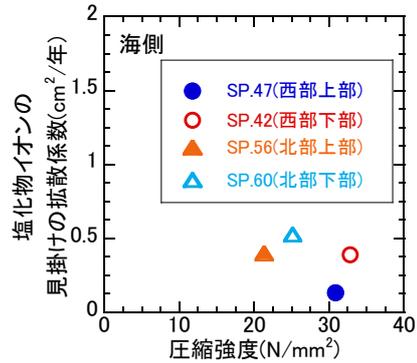


Fig. 16 圧縮強度と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の関係

程度である SP.56 や SP.60 の塩分浸透域の全塩化物イオン濃度分布の傾きは、圧縮強度が 30N/mm<sup>2</sup> 程度である SP.47 や SP.42 の傾きと比べてなだらかであり、より内部まで塩化物イオンが浸透している傾向が確認される。

Fig. 15 に島内側より採取したコアの全塩化物イオン濃度分布を示す。西部の島内側からコアを採取した SP.38 と同じ西部の海側からコアを採取した SP.42、SP.47 と比較すると、SP.38 の表層部の塩分浸透量は SP.42、SP.47 よりも小さくなった。一方で、中性化による塩分の濃縮により、内部の塩分浸透量は SP.42、SP.47 よりも大きくなった。他の島内側から採取した

SP.5, SP.22 も中性化による塩分の濃縮が見られ、海側から採取したコアとは異なる傾向が確認された。

Fig. 16 に圧縮強度と見掛けの拡散係数の関係を示す。護岸海側上部より採取した SP.47, SP.56 と、護岸海側下部より採取した SP.42, SP.60 とに分けてみると、それぞれの場合において圧縮強度が大きくなると見掛けの拡散係数が小さくなる傾向が確認される。これは、圧縮強度、見掛けの拡散係数ともに水セメント比と関係があるためと考えられる。また護岸上部と下部とで圧縮強度と見掛けの拡散係数が別の関係となるのは、実構造物の見掛けの拡散係数は材料本来の物質移動抵抗性だけでなく、環境条件の影響も含んだものとして評価されるためであり、直接的な海水の影響をより高頻度で受ける護岸下部の方が見掛けの拡散係数が大きくなっている。

## 5. まとめ

本研究により得られた知見は、以下の通りである。

- (1) 海側、島内側ともに護岸コンクリートコアの超音波伝搬速度や圧縮強度は、表面付近においてがやや小さくなったものの、概ね健全であることが確認された。
- (2) 護岸コンクリートの中性化速度係数は、海側と島内側とで大きく異なり、島内側の中性化速度係数が大きいことが確認された。
- (3) 海側の護岸コンクリートの塩分浸透状況は、コア採取位置の方位や高さにより大きく異なることが確認された。

謝辞：本研究は、長崎市の特別の許可のもと実施されたことを付記し、関係各位に謝意を表します。

また本研究は、科学研究費助成事業（科学研究費補助金（基盤研究(B)）、課題番号：15H04027）の一環として実施したものである。ここに記して、関係各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 清宮 理, 羽淵貴士, 佐野清史, 内藤英晴, 原田哲夫: 軍艦島の歴史的なコンクリート護岸の現況調査, コンクリート工学, Vol.51, No.12, pp.975-983, 2013.12
- 2) 羽淵貴士, 佐野清史, 内藤英晴, 清宮 理: 軍艦島におけるコンクリート製護岸の健全度調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp.1441-1446, 2013.7
- 3) 審良善和, 酒井貴洋, 田中亮一, 佐々木謙二, 清宮理: 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, アップグレードコンクリート論文報告集, 第13巻, pp.145-150, 2013.11
- 4) 審良善和, 佐野清史, 羽淵貴士, 清宮理: 軍艦島護岸コンクリートの耐久性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.754-759, 2014.7
- 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) 端島閉山40周年記念事業実行委員会編: GREAT HASHIMA 大いなる端島, 忘羊社, 2014.7
- 7) 「想像と記憶 (端島・軍艦島)」ホームページ: <http://www6.cncm.ne.jp/~hashima/>