

論文 実 RC 建造物の腐食診断におけるコンクリートの細孔容積と塩化物濃度の寄与に関する検討

福山 智子*1・白石 聖*2・兼松 学*3・野口 貴文*4

要旨: 歴史的に貴重な建造物である軍艦島の RC 建造群を対象に鉄筋腐食診断を行い、採取した試料の細孔容積・塩化物イオン濃度といった物性値と電気化学特性値（自然電位・コンクリート抵抗・分極抵抗）の関係性について検討を行った。その結果より、細孔容積と塩化物濃度は、実建造物の電気化学調査結果においても環境条件に起因するデータばらつき判定にある程度の有効性をもつパラメータであることが示された。

キーワード: 鉄筋腐食, 自然電位, コンクリート抵抗, 分極抵抗, 細孔空隙, 塩化物イオン濃度

1. はじめに

長崎県端島（通称：軍艦島）は明治時代から昭和にかけて炭鉱として栄えた、野母半島の西方に位置する無人島である^{1), 2), 3)}。

現在、軍艦島は貴重な海底炭鉱遺構・日本近代化の象徴として注目されており、2009年1月にはユネスコ世界遺産の暫定候補リストに記載された。また、軍艦島には日本最古の鉄筋コンクリート（RC）集合住宅が存在しており、一時は0.06 km²の島に5,200人も人口を擁した狭隘ながらも優れた土地利用を行った「文化遺産」であると位置づけられている³⁾。

このような歴史的・文化的価値をもつ軍艦島の建造物群であるが、炭鉱閉山後に急速に老朽化が進行しており、劣化状態の正確な把握と、それにもとづく建造物の補修が喫緊の課題である。

このような現状を受け、筆者らは島内の建造物の調査を材料・構造両面から多角的に行ってきた。しかし、島

に現存する30以上のRC建造物は、それぞれに築年数、立地条件（劣化外力）、材料の品質、施工の精度などが大きく異なるため、劣化状態と環境条件の相関について典型的に把握することが非常に困難であった。特に鉄筋腐食診断では、電気化学反応に各種イオンがかかわっているため実調査ではデータがばらつきやすく、ばらつきに対してデータの信用度が不明なために腐食に関する判断が下せないということが多く起こりうる。

本報では、データばらつきの影響を排除して鉄筋の腐食状態を評価するためにコンクリートの物性（細孔容積・塩化物イオン濃度）と電気化学特性値（自然電位・コンクリート抵抗・鉄筋界面の分極抵抗）に着目した。軍艦島のRC建造物に対して鉄筋腐食に関する調査を行い、採取した試料の細孔容積と塩化物濃度が電気化学特性値に及ぼす影響について検討した。これをもとに、実際の腐食診断においてこれらの物理的物性値を測定することの有効性について確認した。

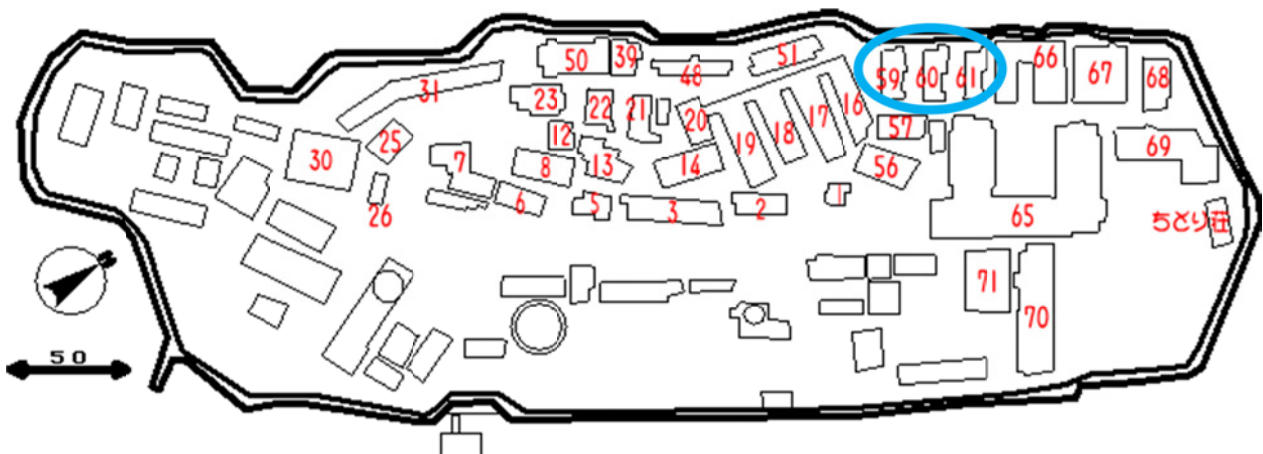


図1 軍艦島全体図⁴⁾

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 特任助教 博士(工) (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科 学部生 (学生会員)

*3 東京理科大学 理工学部建築学科 准教授 博士(工) (正会員)

*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 准教授 博士(工) (正会員)

59, 60, 61号棟 1F平面図

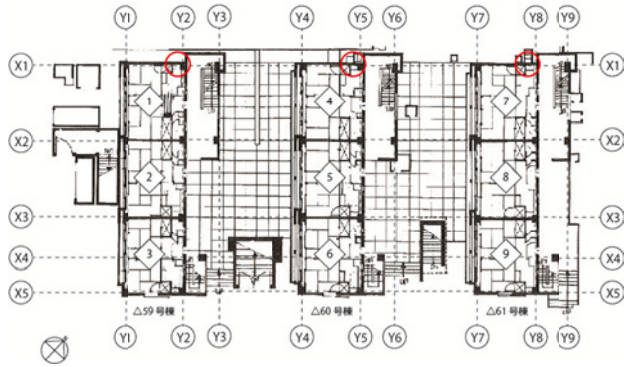


図-2 対象建物と調査箇所⁵⁾

2.1 調査の概要

2.1 調査対象

2012年11月18日～20日に調査を行った。本調査の対象構造物は、図-1に示す島の北西部に位置する59, 60, 61号棟である。3棟ともに1953年築のRC造5階建て住宅であり、海からの距離はほぼ同等であるため、腐食の進行に関する条件は3棟ともに同じであると仮定した。

図-2は、調査箇所を示したものである。各構造物の海に面した壁面(図中赤丸で示す)を対象とした。

2.2 調査項目

各箇所において、(1)電磁誘導法による鉄筋位置探査、(2)ボーリングマシンによるコアの採取、(3)電気化学測定(自然電位・コンクリート抵抗・コンクリート鉄筋間の分極抵抗)を行った。

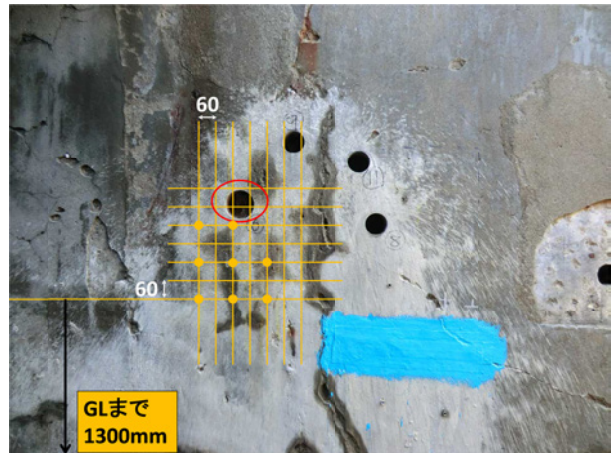
図-3は、鉄筋位置、コア採取位置、電気化学測定点(図中●部)を示したものである。59号棟では異なる高さの鉄筋3本に対して合計8点、60, 61号棟では水平方向に各3点の電気化学測定を行った。電気化学測定の際には測定箇所の水を噴霧し、表面を湿潤状態としてから測定を行った。測定には市販の携帯型鉄筋腐食診断器を用い、コンクリート抵抗・分極抵抗の測定には10Hzと200mHzで10mVの電圧を印可する交流インピーダンス法を採用した。

59号棟(かぶり厚68mm)の鉄筋の腐食状態を目視で確認したところ断面欠損が生じるほどの発錆が観察できた。60号棟(かぶり厚134mm)の鉄筋の表面には錆が生じているが、鉄筋中心部に錆は生じていなかった。61号棟(かぶり厚95mm)の鉄筋には錆が認められなかった。

3. 分析概要

現地調査で採取したコアをそれぞれ約10mmごとに乾式カッターでスライスし、コンクリートの物性を表面か

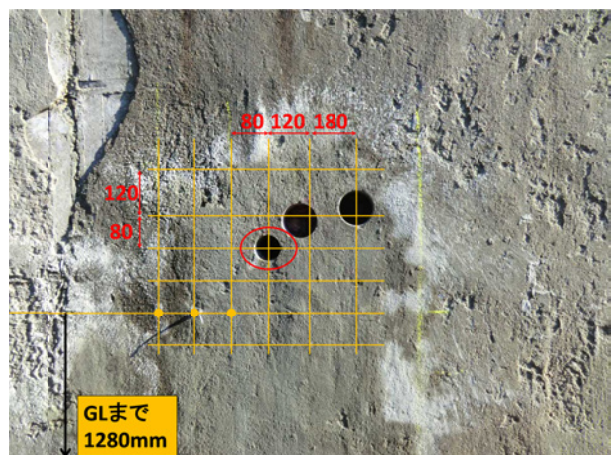
らの深度別に分析した。分析項目は(1)水銀圧入法による細孔径分布測定、(2)全塩化物イオン量分析とした。



(a) 59号棟 (X1-Y2)

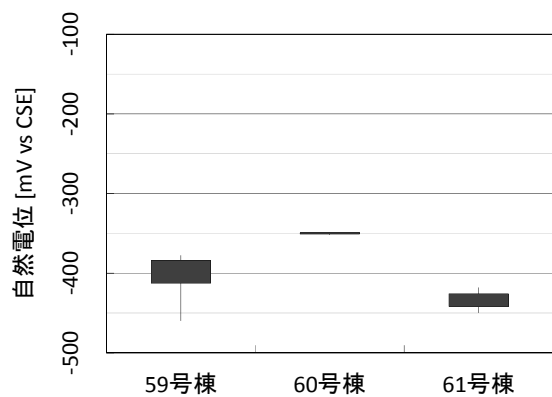


(b) 60号棟 (X1-Y5)

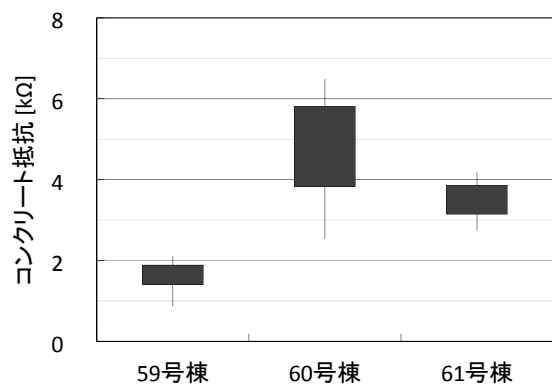


(c) 61号棟 (X1-Y8)

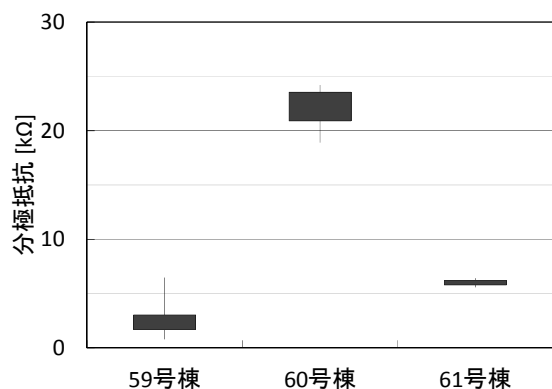
図-3 調査部位



(a) 自然電位

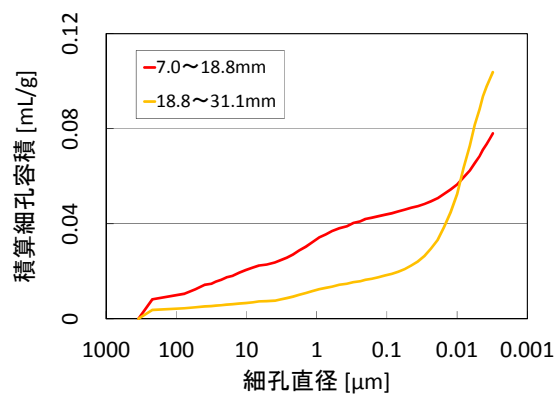


(b) コンクリート抵抗

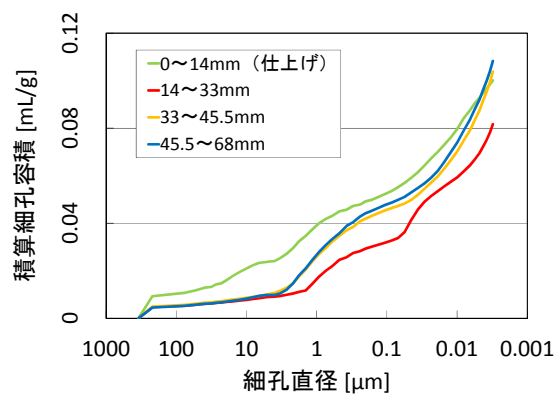


(c) 分極抵抗

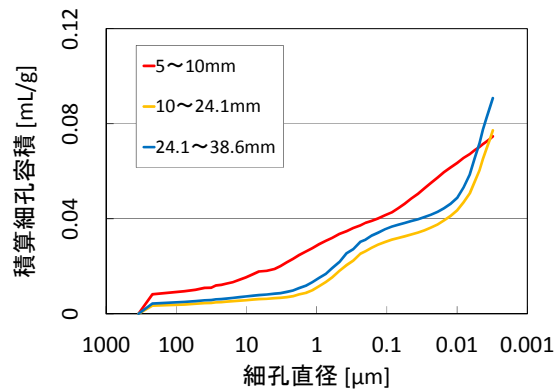
図-4 電気化学特性値測定結果



(a) 59号棟



(b) 60号棟



(c) 61号棟

図-5 セメント硬化体の積算細孔容積分布

4. 調査・分析結果とその考察

4.1 各種電気化学特性値の測定結果

鉄筋の腐食診断において、自然電位の測定とは鉄筋が腐食することによって変化する鉄筋表面の電位から鋼材腐食を診断しようとする電気化学的手法である。鉄筋の自然電位は調査時点での腐食の可能性について診断するものであり、構造物内で腐食の可能性が高い箇所を見つけ出すために用いられる⁶⁾。コンクリート抵抗はコンクリートの組成、セメントペーストの細孔構造、コンクリートの含水量、塩化物イオンなどの塩類含有量などに依存し、コンクリート内でのイオンの移動のしやすさを左右するため、腐食電池内を流れる腐食電流の大きさ（腐

食速度）を支配すると考えられている⁶⁾。コンクリート鉄筋間の分極抵抗は腐食速度と反比例の関係にあるため、調査時点での腐食速度の指標となる。

図-4 は、各建物で測定した電気化学特性値を箱ひげ図で整理して示したものである。この箱ひげ図は、各測定箇所における測定値の第1四分位点と第3四分位点を箱で、最小値と最大値をそれぞれのひげの先端で示したものである。今回のようにコンクリート躯体の連続した面から測定したデータであっても、データにばらつきが見られることが多い。また、腐食状態と電気化学測定値による腐食判定が対応していない場合も多く存在する。これは、電気化学調査に頻繁に起こる問題である。この

問題の要因の1つとして、前述のように導電率に寄与するコンクリート中の細孔溶液の影響があると考えられる。これがかんがみて、次節以降では細孔溶液の存在形態(気体・液体)に影響する細孔構造と、細孔溶液の電気伝導度に寄与する塩化物イオン濃度に着目して分析を行う。

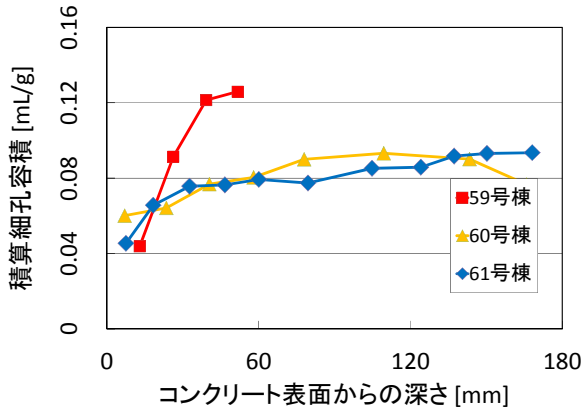


図-6 1 μm 以下の積算細孔容積の深さ分布

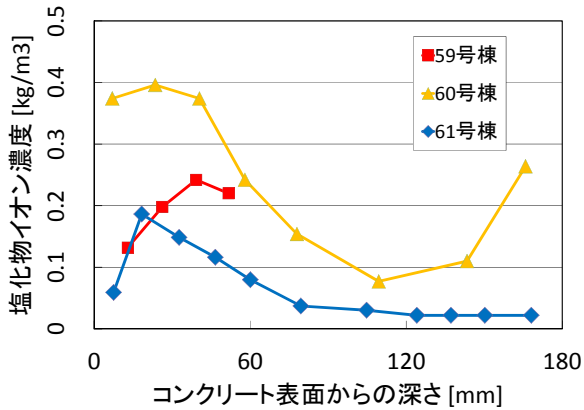


図-7 塩化物イオン濃度の深さ分布

4.2 コンクリートの各種物理的物性値の測定結果

鉄筋腐食は、電子やイオンなどの電荷の移動を伴う電気化学反応である。骨材やセメントは電気抵抗が高いため、電子やイオンの移動経路としては細孔中の溶液が大きな役割を果たすことが予想される。また、コンクリート表面から鉄筋までの電気的な連続性を保つためには、細孔が飽水している必要がある。細孔溶液が蒸発せず常に飽水している細孔径を仮定するために式(1)に示すケルビン式を用いた。

$$RT \ln(h) = -\frac{2\phi_g}{r} \quad (1)$$

ここに、 R : 気体定数 [$\text{m}^2 \text{kg s}^{-2} \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}$],
 T : 絶対温度 [K], h : 相対湿度,
 ϕ_g : 表面張力 [N/m], r : 液滴半径 [m]

式(1)より、RH40%環境下で空隙の直径が1 μmの場合表面張力は約0.00114 [N/m], 直径が70 μmのとき0.0780

[N/m]となる。20℃環境下の水の表面張力は0.0728 [N/m]⁷⁾とされるので、直径1 μm以下の空隙はこの環境下で十分に飽水し電気的な連続性を保っているものと仮定する。

上記の仮定をもとに、一定の相対湿度条件下では飽水状態になっていると思われる1 μm以下の積算細孔容積とコンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度について電気化学的物性の相関を評価する。

図-5は、コアを約10mmごとにスライスした試料の細孔容積分布を水銀圧入法により測定したものである。

図-6は、図-5の結果を基にして、1 μm以下の積算細孔容積とコンクリート表面からの深さの関係をプロットしたものである。

図-7は、JIS A 1154⁸⁾に基づきコンクリート中に含まれる全塩化物イオン濃度を分析し深さの関係を示したものである。

4.3 コンクリートの電気化学的特性と物理的物性の相関

ここで、1 μm以下の細孔を細孔溶液が充填された導体の連続体と仮定し、スライスしたそれぞれのコアを1つの抵抗素子とみなし、鉄筋位置までのスライスの積層を抵抗の直列回路と考える。

式(2)は、積算細孔容積と各スライスの厚さをかけたものを足し合わせ、直列抵抗回路 V と定義したものである。

$$V = \sum_{k=0}^n v_k \cdot l_k \quad (2)$$

ここに、 v_k : 1 μm以下の積算細孔容積 [mL/g],
 l_k : 表面から k 番目の試料の厚さ [mm],
 n : 試料の数

積算細孔容積は、コアに占める空隙の割合であり、コアの直径は一定であるので、スライスの厚さをそれぞれかけあわせることにより、各抵抗素子の抵抗特性を代表する値となる。細孔が多くスライスの厚さが薄い場合、断面積が大きく長さが短い導線を仮定できる。細孔が多くスライスが厚い場合は、導体の断面積が大きく長さが長い導体と同等である。

図-8は、式(2)で定義した V をパラメータとして、図-4で示した各電気化学特性値(自然電位・コンクリート抵抗・鉄筋界面の分極抵抗)の中央値との相関を整理したものである。自然電位と V には明確な相関がみられなかったが、コンクリート抵抗と分極抵抗はコンクリートの細孔容積という物理的な特性との相関を持つことがわかった。自然電位は、アノード反応とカソード反応のバランスで決まるというその原理上 V で評価することは困難であるが、コンクリート抵抗と分極抵抗であれば、実構造物を対象とした測定データであっても、 V をパラメータとして評価することができる可能性がある。

同様に、塩化物イオン濃度についても直列抵抗回路を

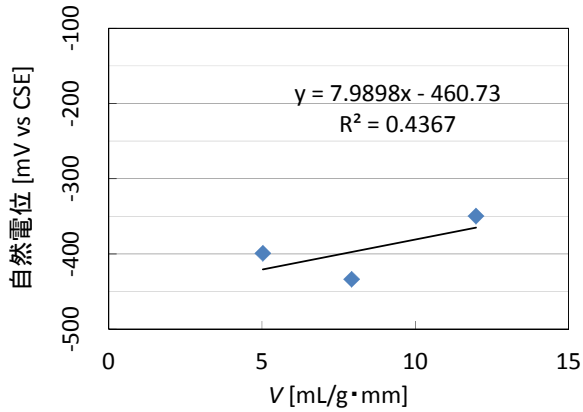
想定した式(3)を別途設定し、図-9のように、塩化物イオン濃度と各電気化学測定値の関係を整理した。

$$C = \sum_{k=0}^n c_k \cdot l_k \quad (3)$$

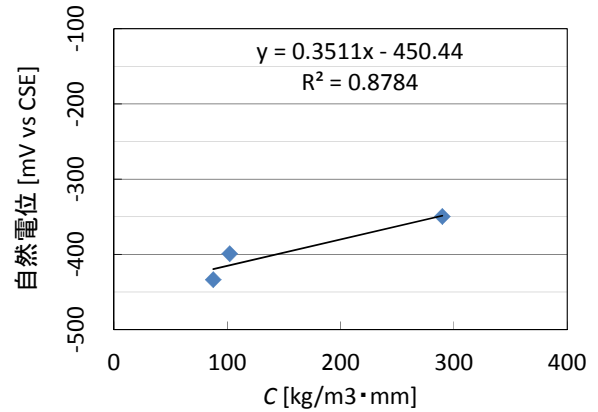
ここに、 c_k : 塩化物イオン濃度 [kg/m³]

塩化物イオンが系内に存在する場合、ブルベール図などからわかるように鉄の存在形態のバランスに影響を及ぼすため、自然電位に与える影響が大きいものと推察され

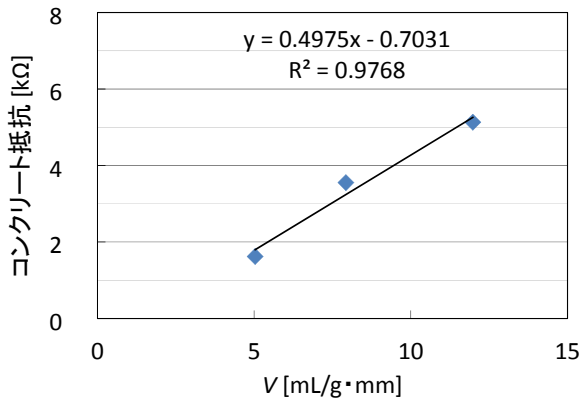
る。しかし、コンクリート抵抗との相関はそれほど見られなかった。これは、塩化ナトリウム水溶液の導電率は、低濃度領域に比べて高濃度になるほど濃度増加に対する導電率の増加が対応しないためではないかと推察するがさらに検討を要する。また、塩化物イオンが存在することにより、鉄筋表面の不動態皮膜の破壊に寄与するため、分極抵抗との相関がみられたものと考えられる。



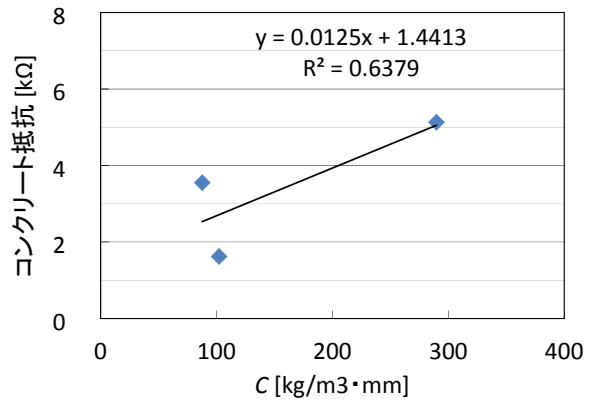
(a) 自然電位



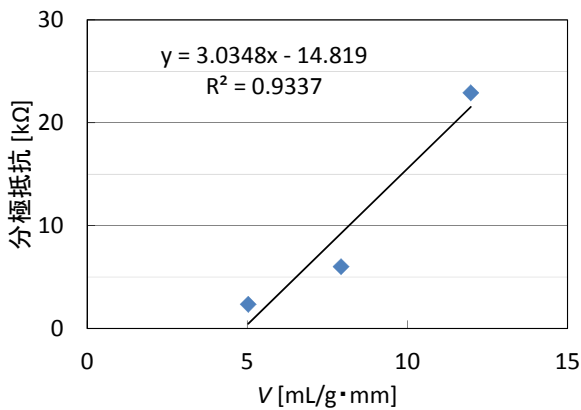
(a) 自然電位



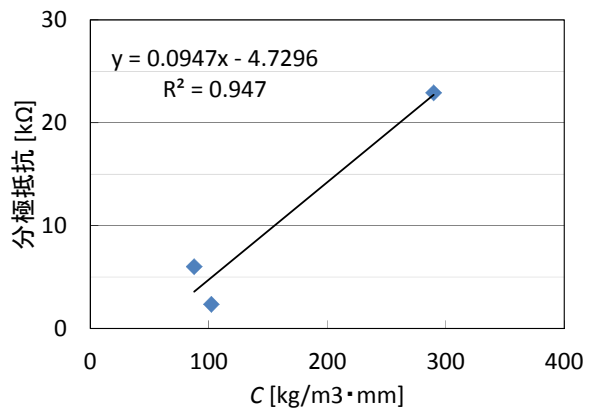
(b) コンクリート抵抗



(b) コンクリート抵抗



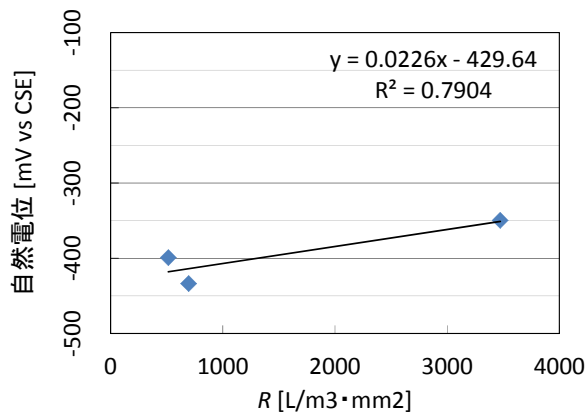
(c) 分極抵抗



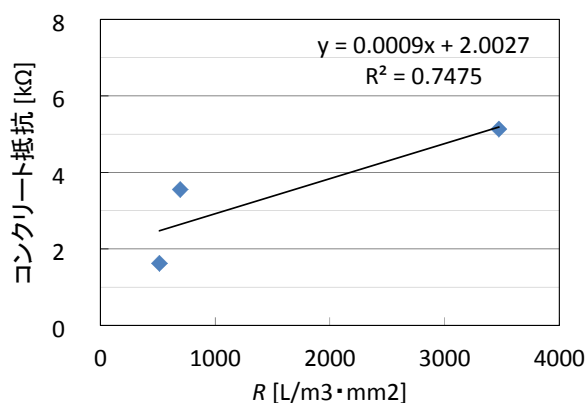
(c) 分極抵抗

図-8 電気化学特性値と積算細孔容積との相関

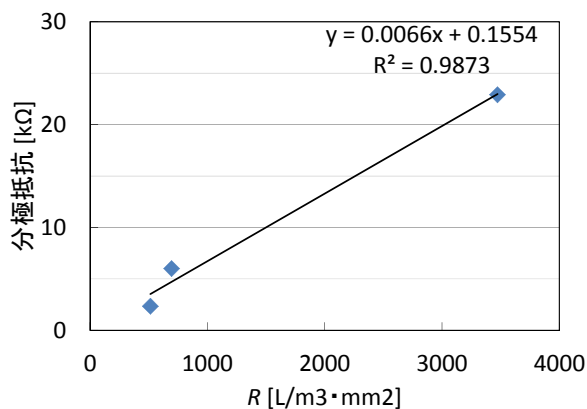
図-9 電気化学特性値と塩化物イオン濃度との相関



(a) 自然電位



(b) コンクリート抵抗



(c) 分極抵抗

図-10 電気化学測定値と
コンクリートの物理的物性値との相関

式(4)は、コアのスライスが形成する抵抗素子に細孔容積と塩化物イオン濃度の情報を付与して直列抵抗回路を評価するものである。

$$R = V \cdot C \quad (4)$$

図-10は、コンクリートの物理的特性値と電気化学的特性値の相関を検討したものである。各電気化学特性値と直列抵抗回路を想定したパラメータの間にはある程度の相関を見ることができる。この結果より、コンクリー

ト中の細孔とそこを満たす細孔溶液をコンクリート中の主な回路とみなし、細孔容積と塩化物イオン濃度をもとに電気化学的測定値を解釈することは、現時点のデータの範囲では妥当性があるものとする。

5. まとめ

以上の結果より、コンクリートの物理的物性である細孔容積と塩化物イオン濃度は、実構造物の電気化学調査結果と相関があり、電気化学測定値と鉄筋の腐食形態が一致しない場合でも、物理的物性で結果を整理することで、合理的説明が困難にみえる測定値のばらつきを説明することができる可能性が示唆された。

電気化学測定で得られる指標がそもそも現時点での腐食状態について評価する手法であるため、今回の検討手法では、過去に発生した錆量などを直接に評価することはできない。これは、測定を定期的に継続することによって差分で腐食を評価できるものとする。

今回の調査では測定点数が少ないので、今後は点数を増やしてさらに精査を行いたい。

謝辞

本論文の作成に際し、長崎市市役所・谷本氏、栗脇善朗氏、東京大学大学院工学系研究科・北垣亮馬講師、田村政道技術職員、西尾悠平氏、前田誠也氏、定金駿介氏、古市涉平氏、東京理科大学・中野昌宏氏、林瑞紀氏に多大なご助力をいただいた。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 軍艦島を世界遺産にする会：軍艦島 住み方の記憶、軍艦島を世界遺産にする会、p.13, 2008
- 2) 伊藤千行, 阿久井喜孝：軍艦島 海上産業都市に住む, 岩波書店, p.42, 1995
- 3) 長崎文献社：軍艦島は生きている！, 長崎文献社, pp.16-17, p.35, 2010
- 4) 軍艦島を世界遺産にする会：
<http://gunkanjima.hayabusa-studio.com/>
- 5) 阿久井喜孝, 滋賀秀實：軍艦島実測調査資料集, 東京電機大学出版局, 1984
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術基礎編'11, コンクリート工学協会, 2001
- 7) National Institute of Standard and Technology：
<http://webbook.nist.gov/chemistry/>
- 8) JIS A 1154 硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンイオンの試験方法