

論文 コンクリート中の鉄筋の電気化学特性にコンクリートの空隙構造が及ぼす影響に関する研究

福山 智子^{*1}・上銘 隆佑^{*2}・白石 聖^{*3}・兼松 学^{*4}

要旨: コンクリート中の鉄筋の電気化学特性がコンクリートの含水状態の影響を受けることはよく知られているが、含水状態は外乱の影響を受けて変動するため、腐食診断に悪影響を及ぼすことになる。これに対し、本研究では、含水状態に影響を及ぼす要因のうち、測定時点で一意に定まるコンクリート空隙の量的特性を用いた電気化学特性のモデル化に関する統計的な検討を行った。その結果、コンクリートの空隙特性を用いた電気化学特性のモデル化の可能性を見出した。

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, 空隙構造

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無人島である¹⁻³。軍艦島には多くの鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物が存在し、様々な歴史的・文化的価値を有している。しかし、現在、これらの構造物は急速に老朽化が進行しており、劣化対策が喫緊の課題となっている。

このような現状を受け、筆者らは島内のRC構造物の劣化状態を把握するため、鉄筋の腐食について電気化学的調査を行ってきた。しかし、自然電位・コンクリート抵抗・分極抵抗（以下、電気化学特性値）が示す値と実際の鉄筋の腐食状況が乖離しているために、腐食の診断に苦慮するケースが多くあった。

この問題に対し、既報⁴)では、この乖離の原因をコンクリートの含水状態変化の一因である空隙特性の差異に求め、採取したコンクリート試料の量的空隙特性が電気化学特性値に及ぼす影響について検討を行っている。その結果、1μm以下の空隙の積算容積が電気化学特性値に影響を及ぼしている可能性が明らかになった。これは、比較的粗大な空隙では環境の変化に応じて水が流入・流出し水分状態が変化するのに対し、微小な空隙では径に応じて溶液の表面張力が決まるために外乱の影響を受けず、図-1に示すようなコンクリート内部の水分の連続性を保つものと考えられるためである。また、測定時点で一意に定まる空隙構造を用いて電気化学特性のモデル化を行うことは、実構造物を対象とした非破壊検査に大きく寄与するものと考えられる。

そこで本研究では、上記を検証するために既報⁴)の研究に引き続き、電気化学的特性値に対する各種空隙特性の影響の有無とその程度について統計的に検討を行った。

2. 調査概要

2.1 調査対象

軍艦島に存在する実構造物を対象として2012年11月と2013年6月に調査を行った。図-2は軍艦島における調査対象構造物の位置を、表-1はその構造物概要を示したものである。すべての対象構造物が島の北西（地図右上）に位置し、護岸を挟んで海に面している。

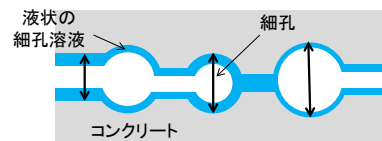


図-1 空隙内部の水分状態の概念図

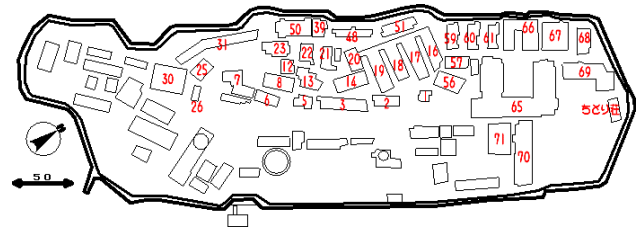


図-2 軍艦島全体図⁵⁾

表-1 調査対象建物の概要⁶⁾のデータに加筆

建物名	建設年	規模	構造	建物用途
59号棟	1953	地上5F+地下1F	RC	住居+地下購買所
60号棟	1953	地上5F+地下1F	RC	住居+地下購買所
61号棟	1953	地上5F+地下1F	RC	住居+地下浴場
66号棟	1940	地上4F+地下1F	RC	住居
68号棟	1958	地上2F	RC	病院

2.2. 調査・分析項目とその手順

各調査箇所において、(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

*1 北海道大学 大学院工学研究院 空間性能システム部門 助教 博士(工学) (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科 学部生 (非会員)

*3 東京理科大学 理工学部建築学科 大学院生 (学生会員)

*4 東京理科大学 理工学部建築学科 准教授 博士(工学) (正会員)

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。

表-2 は採取したコアの諸元を示したものである。コアの採取は外壁側から実施するものとし、中性化深さなどの表記は外壁からの距離を示すものとした。壁部材の場合は、コア抜きの際に内壁まで貫通する場合もあった。

採取したコアは、実験室にて図-3 に示すように厚さ約 20mm の円盤にカットした。各円盤に対し水銀圧入法を適用し、外壁表面から内部にかけて深さ方向の空隙特性の分布を求めた。この際、水銀圧入法適用の前処理として、試料を 24 時間以上アセトンに浸漬したのち 20℃ 環境下にて真空デシケータで保管し、十分に乾燥させることとした。分析に使用したコアの円盤数については、前掲表-2 に示したものとする。

電気化学測定の際には、測定箇所にて水を噴霧し表面を湿潤状態とした上で各箇所 3 点以上の測定を行うこととした。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。

表-2 採取したコアの諸元

建物	コア名称	部材	全長 [mm]	中性化深さ [mm]	かぶり厚さ [mm]	分析円盤数
59 号	59-①	壁	152	—	68	4
60 号	60-①	壁	166	—	134	8
61 号	61-①	壁	178	0.00	—	11
66 号	66-①	壁	182	3.96	104	8
	66-②	壁	181	1.23	119	9
68 号	68-①	壁	140	1.77	—	5
	68-②	柱	138	0.00	—	6

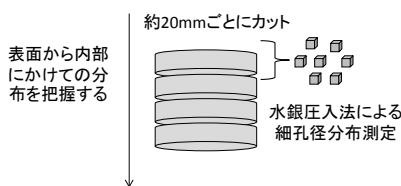


図-3 コアの分析の進め方

3. 電気化学特性値の測定結果とその考察

図-4~6、表-3 は、調査で測定した各構造物の電気化学特性値 24 セットの関係を示したものである。自然電位－コンクリート抵抗間の相関係数は 0.44 を超えており、5% 有意水準で相関があると判断することができる。ここで、自然電位は、鉄筋がおかれた環境の特性を表す指標であるが、コンクリート抵抗による IR ドロップ分も含んだ上で測定値が得られるものであるため、両者の相関は妥当であると考えられる。しかし、自然電位－コンクリート抵抗間の偏相関（両者の相関における分極抵抗の影響を除外したもの）を算定したところ、実際にはコンクリート抵抗は自然電位と相関がない。そのため、本研究の主目的である、コンクリートの空隙特性による電気化学特性のモデル化においては、自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗といった 3 つの電気化学特性それぞれに対してモデルの構築を検討することとする。

影響を除外したもの）を算定したところ、実際にはコンクリート抵抗は自然電位と相関がない。そのため、本研究の主目的である、コンクリートの空隙特性による電気化学特性のモデル化においては、自然電位、コンクリート抵抗、分極抵抗といった 3 つの電気化学特性それぞれに対してモデルの構築を検討することとする。

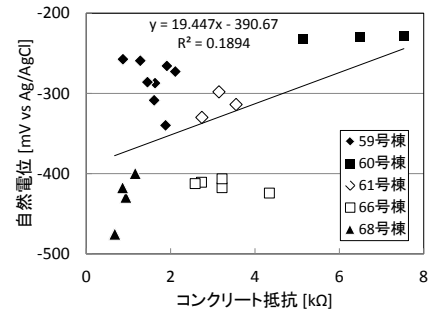


図-4 自然電位－コンクリート抵抗の関係

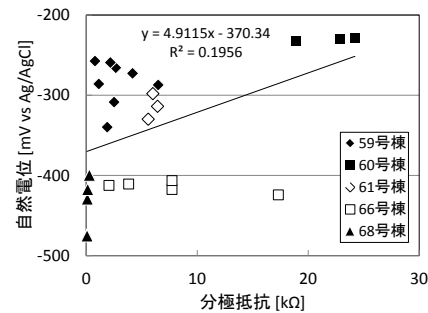


図-5 自然電位－分極抵抗の関係

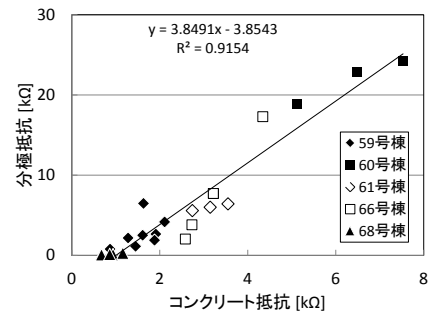


図-6 分極抵抗－コンクリート抵抗の関係

表-3 電気化学特性値間の相関

	自然電位－ コンクリート抵抗	コンクリート抵抗 －分極抵抗	分極抵抗－ 自然電位
相関	0.435	0.957	0.442
偏相関	0.047	0.946	0.099

4. コンクリートの空隙構造特性

4.1 測定結果

表-4、図-7 は、コンクリートの量的空隙特性に関わる要因（見かけ密度、かさ密度、空隙率、空隙（ゲル空隙、毛細管空隙、粗大空隙）の容積積算量と比表面積積算量）をそれぞれ示したものである。ここで、見かけ密度は、セメント硬化体自体とその内部に含まれる空隙を

体積とした場合の密度のことであり、表面細孔は含まれない。かさ密度は、セメント硬化体自体と内部空隙のほかには表面細孔を体積とした場合の密度のことである。また、ここでは、 $0.01\mu\text{m}$ 未満の空隙をゲル空隙、 $0.01\sim 1\mu\text{m}$ のものを毛細管空隙、 $1\mu\text{m}$ より大きい空隙を粗大空隙と仮定している。

表-4 コアの物性

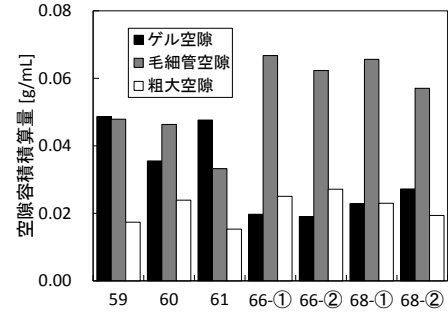
		59号	60号	61号	66号		68号	
		①	①	①	①	②	①	②
A	M	2.42	2.38	2.41	2.47	2.46	2.44	2.40
	S	0.03	0.04	0.03	0.08	0.08	0.01	0.02
B	M	1.90	1.90	1.96	1.93	1.95	1.92	1.92
	S	0.13	0.06	0.05	0.05	0.11	0.04	0.05
P	M	21.4	20.1	18.8	21.6	21.0	21.4	19.9
	S	4.20	2.22	2.10	1.04	2.30	1.54	0.61

A：見かけ密度 [g/mL]，B：かさ密度 [g/mL]，P：空隙率 [%]，
M：平均，S：標準偏差

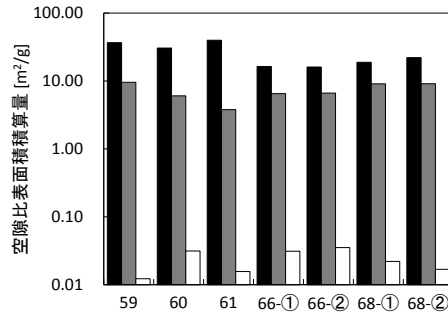
図-7(a)は、上記で定義した各空隙容積積算量の平均値を建物のコアごとに示したもので、図(b)は、同様に比表面積積算量の平均値を示したものである。図(a)より、1953年築の59～61号棟では1940年以降築の66・68号棟と比較してゲル空隙の量が多く毛細管空隙の量が少ないことが読み取れる。また、図(b)より、59～61号棟では66・68号棟と比較して、ゲル空隙に由来する比表面積が多いことがわかった。

図-8は、各コアの円盤から測定した各種空隙容積の割合を外壁表面からの距離に基づき配列したものである。

図より、外壁表面では、粗大空隙の量が増加しゲル空隙の量が減少している点が明らかになった。これは、経年や外力を受けて外壁表面が粗になったためと考えられる。図-9は、空隙比表面積の割合を外壁表面からの距離に基づき配列したものであり、空隙容積と同様の傾向を示している。

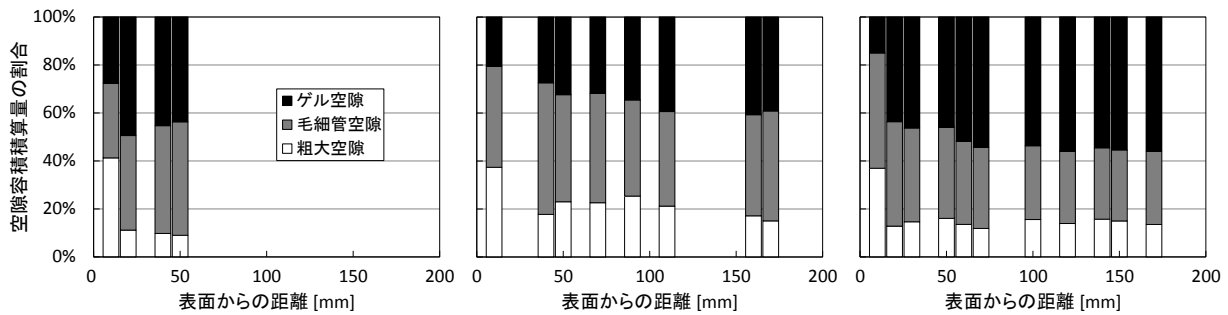


(a) 容積積算量



(b) 比表面積積算量

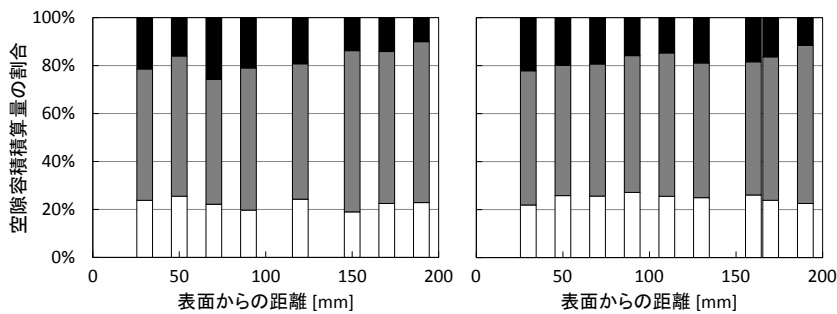
図-7 各空隙径の細孔特性



(a) 59号棟

(b) 60号棟

(c) 61号棟



(i) コア 66-①

(ii) コア 66-②

(d) 66号棟

図-8 各建物から採取したコアの空隙容積積算量の割合 (次ページに続く)

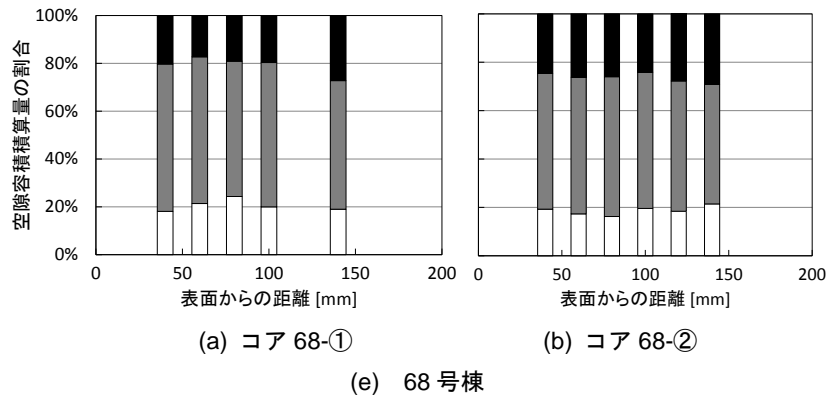


図-8 各建物から採取したコアの空隙容積積算量の割合

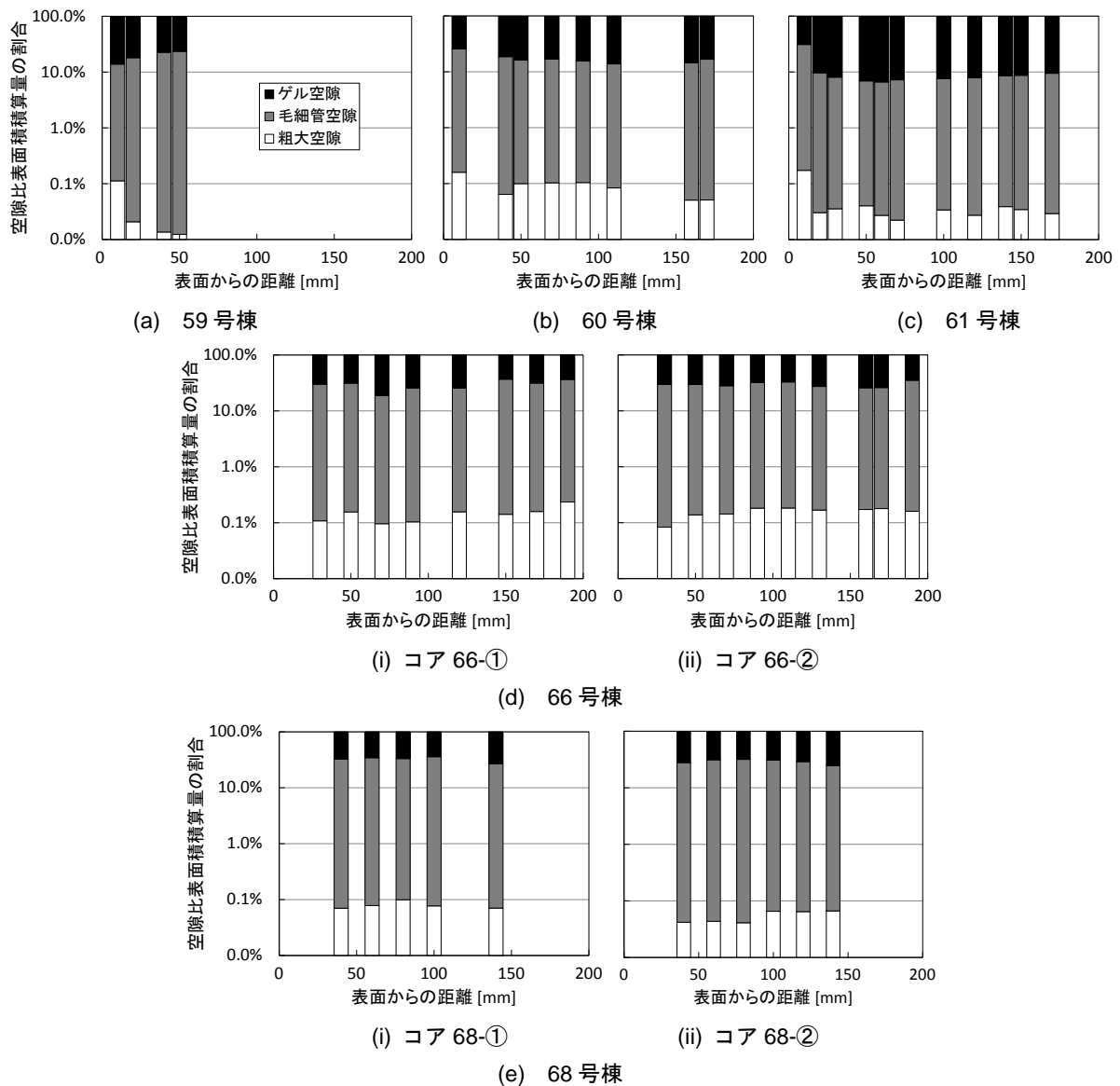


図-9 各建物から採取したコアの空隙比表面積積算量の割合

4.2 電気化学特性と空隙構造の相関に関する検討

電気化学特性値を目的変数、コンクリートの空隙構造に関わる要因を説明変数として重回帰分析を行うためには、もっとも影響度が大きい指標を選定し、その要因の物理的意味を考察する必要がある。空隙特性と物理現象

との関連を検討するために、主成分分析と因子分析を用いて空隙特性を整理したのちに回帰分析を行った。

4.2.1 空隙構造に関する主成分分析

主成分分析は、複数が存在する変数をより少ない変数にまとめることが目的とした分析であり、少数の成分にで

きるだけ多くの情報を集約するように主成分を定めるものである。主成分1にもっとも多くの情報が集まり、次いで主成分2、主成分3と後になるにつれて情報量が少なくなるように配分される。主成分分析により、コンクリートの空隙構造を代表する総合指標を作成することを目指した。

表-5は、主成分分析の対象としたコンクリートの空隙特性を表す要素（左から1列目）と、主成分分析により算定された主成分1から主成分4まで（左から2~5列目）を示したものである。図-10は、主成分の順に寄与率を示したスクリープロットである。ここで、寄与率とは、それぞれの主成分が元データのどの程度の情報を担っているかを示す量であり、情報量の乏しい後半の主成分を切り捨てる判断に用いられる。この図より、主成分3以降の寄与率が低いため、主成分1と主成分2がコンクリートの空隙特性を代表することになる。主成分1は主に各空隙径（ゲル空隙、毛細管空隙、粗大空隙）の容積、ゲル空隙の比表面積といった空隙そのものに関する情報で構成されていることが読み取れる。また、主成分2ではコンクリートのかさ密度、空隙率が大きな割合を占めている。

表-5 主成分分析結果

	主成分1	主成分2	主成分3	主成分4
みかけ密度	0.194	-0.317	-0.298	0.745
かさ密度	-0.066	-0.565	-0.163	0.155
空隙率	0.248	0.458	-0.043	0.427
ゲル容積	-0.404	0.313	0.101	0.327
毛細管容積	0.437	0.186	-0.311	-0.072
粗大容積	0.424	-0.028	0.439	0.049
ゲル比表面積	-0.414	0.294	0.163	0.298
毛細管比表面積	0.202	0.387	-0.494	-0.130
粗大比表面積	0.387	0.027	0.558	0.135
標準偏差	1.935	1.702	1.110	0.908
累積寄与率	0.416	0.738	0.875	0.966

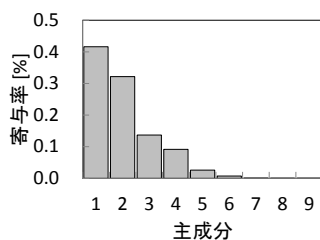


図-10 各成分への寄与率に関するスクリープロット

4.2.2 空隙構造に関する因子分析

因子分析では、データ間に何らかの共通因子が存在すると仮定し、その因子を見つけ出すことが目的となる。

表-6は、コンクリートの空隙特性を表すデータに対して行った因子分析の結果を示したものである。因子1で大きな因子負荷を有している要因として、かさ密度、空隙率、毛細管空隙の容積積算量、毛細管空隙の比表面積

積算量の4つが挙げられる。因子2ではゲル空隙の容積積算量、ゲル空隙の比表面積積算量の2つが挙げられる。図-11は、因子1と因子2を構成する要素の因子負荷の分布を示したものである。毛細管空隙については、因子1だけでなく因子2の因子負荷も有しており、因子1と因子2の特性を併せ持っているといえる。逆に、ゲル空隙については因子2の負荷が大きく因子1の負荷は0である。ここでは空隙特性自体が水の移動特性と相関があると仮定している。共通因子を水分移動に関連した2因子と考えた場合、因子1は空隙のマクロな特性を表しており外乱の影響を受けた水分の移動特性（管内流れ）を、因子2はミクロな空隙の特性を代表していることから、外乱の影響を受けない水分特性を表しているとの仮説をたて、以降の回帰分析におけるモデル化の際に因子1、2それぞれの影響を考察することとする。

表-6 因子分析結果

	因子1	因子2	因子3	因子4
みかけ密度	0.000	-0.223	0.000	0.968
かさ密度	-0.715	-0.346	-0.207	0.569
空隙率	0.897	0.257	0.344	0.000
ゲル容積	0.000	0.933	-0.300	-0.187
毛細管容積	0.809	-0.544	0.193	0.000
粗大容積	0.106	-0.320	0.937	0.000
ゲル比表面積	0.000	0.929	-0.285	-0.222
毛細管比表面積	0.778	-0.107	0.000	-0.107
粗大比表面積	0.193	-0.210	0.843	0.000

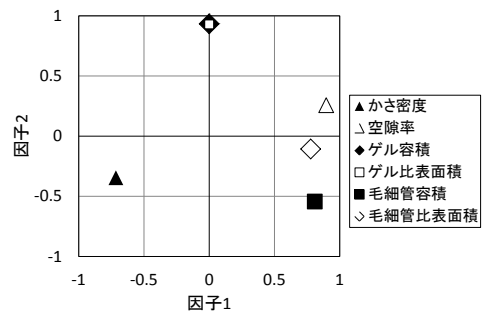


図-11 因子1と因子2の因子負荷に関する関係

4.2.3 電気化学特性値を目的変数とした回帰分析

コンクリートの量的空隙特性を代表する要素を説明変数として用い、コンクリート中の鉄筋の電気化学特性を目的変数とした回帰分析を行った。このとき、説明変数を1つずつ追加する変数増加法をとり、F値とF比により変数選択を行った。ここで、F値は観測された分散比（回帰の分散を残差の分散で除したもの）のF検定であり、表-7の例では有意Fの値が0.18であるので有意水準82%で意味のある回帰モデルと判定することとなる（ただし、一般的には有意水準5%で回帰モデルの有効性を判定する）。また、F比は、本報においては変数を追加したことによる残差の変化率とし、表-8の例に示す

ように、変数追加前の残差平方和から追加後の残差平方和を差し引いたものを残差の分散で除したものとする。F 比の変化量が小さければ、変数を回帰式に追加したことによる説明能力の向上が見込めないということになる。

表一七 自然電位－毛細管空隙容積積算量の
回帰分析における分散分析表

	自由度	変動	分散	観測された分散比	有意 F
回帰	1	15583.07	15583.07	3.02	0.18
残差	3	15503.55	5167.85	—	—
合計	4	31086.61	—	—	—

表一八 自然電位－毛細管空隙容積積算量の
回帰分析における F 比

変数追加	残差平方和	残差平方和の差分	残差の分散	F 比
変数なし	31086.61	—	—	—
毛細管容積	15503.55	15583.07	5167.85	3.02

表一九 回帰分析により算定した相関係数, F 値, F 比

目的変数→	自然電位			コンクリート抵抗			分極抵抗			
	相関	F 値	F 比	相関	F 値	F 比	相関	F 値	F 比	
密度	みかけ	0.20	0.75	0.12	0.46	0.44	0.79	0.58	0.31	1.51
	かさ	0.34	0.57	0.40	0.09	0.89	0.02	0.23	0.71	0.17
空隙率	0.28	0.64	0.34	0.33	0.59	0.36	0.24	0.70	0.18	
容積	ゲル	0.71	0.18	3.01	0.01	0.99	0.00	0.02	0.98	0.00
	毛細管	0.71	0.18	3.02	0.30	0.63	0.29	0.22	0.72	0.16
	粗大	0.26	0.67	0.22	0.41	0.50	0.59	0.45	0.44	0.78
比表面積	ゲル	0.05	0.94	0.01	0.36	0.55	0.46	0.22	0.72	0.15
	毛細管	0.23	0.71	0.16	0.02	0.97	0.00	0.02	0.98	0.00
	粗大	0.48	0.41	0.90	0.74	0.15	3.71	0.66	0.22	1.97

表一九は電気化学特性値を目的変数、各空隙特性を説明変数として1対1で行った回帰分析における分析結果を示したものである。網掛けで示したものの以外の要因では、相関係数が小さく、F 値が過大となり、また F 比の向上も見込めなかったため、それらの要因で構成された回帰モデルは意味を見出すことが困難なモデルであると判断した。また、自然電位を目的変数として説明変数を増加させた場合には、毛細管空隙とゲル空隙では、これらを単体で加えることによる説明能力は大きく向上するが、同時に用いた場合の相関係数は 0.73、F 値 0.47、F 比 2.29 となり、説明能力は向上しない結果となった。分極抵抗については、みかけ密度と粗大比表面積を用いて回帰分析を行ったところ、相関係数 0.96、F 値 0.08、F 比 21.75 となり回帰式の当てはまりがよい結果となっているが、これは、主成分分析や因子分析で得られたような空隙の特性を代表する要素ではない。本報ではサンプル数が少ないため自由度が低く、また多重共線性の問題もあるため、さらなる検討を要する。

自然電位が空隙の容積によって説明される理由の1つ

として、空隙特性と水分の関係から鉄筋の酸化還元反応に寄与する化学種の濃度への影響が考えられる。また、空隙の比表面積はコンクリートの静電容量に影響を及ぼすため、コンクリート抵抗や分極抵抗といった抵抗成分に対する説明変数として妥当であると考えられる。

5. まとめ

かぶりコンクリートの量的空隙特性が鉄筋の電気化学特性に及ぼす影響について、空隙の容積や比表面積を用いてモデル化できる可能性を示したが、電気化学特性のすべてを本手法では説明できないことも同時に明らかとなった。コンクリートの化学的組成の影響のほか、交流インピーダンス法を適用した際の鉄筋の分極面積の問題なども考慮しなければならないものと考えられる。また、本報では粗大空隙・毛細管空隙・ゲル空隙を便宜的な径で分類したが、水分の挙動と対応した分類を再度検討する必要があるものとする。

今後は、労力を要するコア抜きではなく鉄筋のはつりにより得られる破片に対する本報の結果の適用性の確認や、コンクリートの含水率・静電容量・空隙特性間の相関に関する検討も研究に組み込み、実用的な電気化学的非破壊検査の展開を目指す。

謝辞

本調査は、長崎市の特別な許可により実施されたものである。また、本研究は JSPS 科研費若手研究(B) 24760446 の助成を受けたものである。本論文の作成に際しては、長崎市世界遺産推進室、東京理科大学理工学部・内田貢氏、北海道大学大学院・田里礼香氏をはじめとする皆様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、2010
- 4) 福山智子, 白石聖, 兼松学, 野口貴文：実 RC 構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、コンクリート工学会年次論文集、Vol.35, No.1, pp.1891-1896, 2013
- 5) 軍艦島を世界遺産にする会：
<http://gunkanjima.hayabusa-studio.com/home/ju-zhu-de-gou-zao-wu-pei-zhi-tu>
- 6) 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、1984.3