

論文 かぶりコンクリートが電気化学的鉄筋腐食診断に及ぼす影響要因の検討

野田 貴之*1・福山 智子*2・長谷川 拓哉*3・千歩 修*4

要旨：電気化学的診断法は鉄筋腐食の診断法のひとつであるが、実際の腐食状況と電気化学特性値による腐食評価に差異が生じることがある。本稿では実構造物を対象に実際の腐食状況を目視観察した結果と電気化学的診断法から得た腐食指標値を照合し、差異があることを確認した後、その影響要因として焦点を当てたかぶりコンクリートの塩化物イオン濃度及び細孔構造について検討を行った。その結果、電気化学的鉄筋腐食診断に対する影響要因は細孔構造に関する、粗大空隙径とゲル空隙径の総細孔量である可能性が得られた。
キーワード：鉄筋腐食、非破壊検査、自然電位、コンクリート抵抗、塩化物イオン、細孔容積

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の劣化現象の1つに鉄筋腐食がある。腐食により鉄筋に錆が生じると、体積膨張によりコンクリート表面の剥離・剥落が生じる、あるいは腐食による鉄の溶出などの影響により鉄筋自体に断面欠損が生じ、構造物の耐力低下を引き起こすという問題が生ずる。このように鉄筋腐食による劣化は構造物全体に被害が波及する危険性がある。そのため適切な診断に基づき腐食への対策を講ずることが重要である。

鉄筋腐食の検査手法としては電気化学的診断法が広く用いられている。これは鉄筋腐食が電気化学的現象であることを利用した診断法であり、鉄筋腐食状態を定性的に評価することが可能である。しかしながら、必ずしも実際の腐食状況を正確に診断可能ではなく、未だ発展途上にある。

図-1に電気化学的鉄筋腐食診断法の一例を示す。この例では鉄筋に導線をつなぎ測定対象とする鉄筋との導通をとる。そこに電気的变化を与え応答値を得る。

印加する電圧（電流）は測定部分のコンクリート表面から測定対象の鉄筋間にあるかぶりコンクリート内部を通過するため、測定結果はこの途中にある、かぶりコンクリートの粗密や含水状態、化学組成の影響を受けるため診断が正確に行えないことが考えられる。

そこで本研究では、実構造物調査を行い、その調査結果をもとに、かぶりコンクリートの性状が電気化学的鉄筋腐食診断に及ぼす影響についての検討を行った。電気化学的鉄筋腐食診断に影響するかぶりコンクリートの要因は、A コンクリートの化学組成と B コンクリートの細孔構造の2つを考慮した。本稿の研究の流れを表-1に示す。

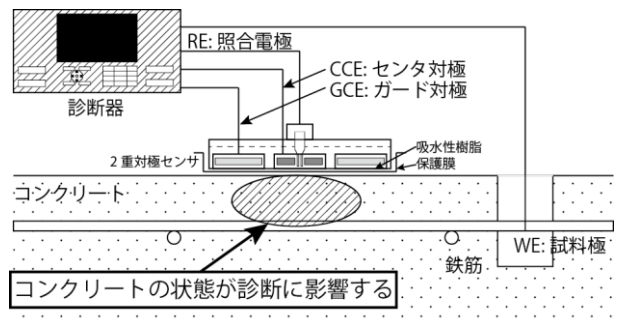


図-1 電気化学的鉄筋腐食診断の例 ¹⁾に加筆

表-1 研究の流れ

起点	電気化学的非破壊検査法による鉄筋腐食評価と実際の腐食状況との相違	
仮定	診断に影響する、かぶりコンクリートの性状 A コンクリートの化学組成 B コンクリートの細孔構造	
手法	実構造物調査(対象:軍艦島内RC造構造物)	
	現場試験	採取コアに対する試験
	腐食目視結果 ↓ a 電気化学的診断法により得た腐食指標値	塩化物濃度分布 A ↓ b 細孔径分布 B
目的	a. 指標値による腐食評価と実際の腐食状況とのズレの有無 b. 腐食指標値と仮定要因との分析検討	
目的	電気化学的鉄筋腐食診断法の適用性の向上	

*1 北海道大学 大学院工学院空間性能システム部門 大学院生 (学生会員)
 *2 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)
 *3 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 准教授 博士(工学)(正会員)
 *4 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工学博士(正会員)

2. 調査概要

本研究での調査は長崎県の軍艦島に存在する実構造物を対象として2013年6月7日及び8日に行った。

表-2 に調査対象構造物の概要を、図-2 はそれらの軍艦島における配置を示す。調査対象構造物は鉄筋腐食に及ぼす塩害の影響を考慮するため、海に直面した同程度の塩害環境にある66, 67, 68号棟の3棟を選定した。

表-3 に調査・分析計画を示す。調査現場では各棟の外壁面に対して目視による鉄筋腐食状況の記録を行った後、電気化学的特性値の測定に際して、初めに電磁波レーダー法により鉄筋探査を行い外壁面に対しチョークを用いて配筋図を記した後に測定対象とする鉄筋位置を5点決め、それらの箇所に対して霧吹きを用いて湿潤化させた後、携帯型鉄筋腐食診断器を用いて電気化学的特性値の測定を行った。また、各構造物においてコンクリートコア（以下、コア）の採取を外壁面側から実施した。図-3 に各測定実施箇所における電気化学的特性値の測定実施点各計5点及びコア採取箇所を示す。なお、電気化学特性値の測定実施点はひび割れや錆汁の溶出、浮きなどの外観変状のない箇所を打診棒、目視観察などにより選定し、そこにおいて実施した。

表-4 に分析試験に用いたコアの諸元を示す。測定箇所における外壁のかぶり厚さに関してはコアに含まれていた外壁からの鉄筋位置を代用した。

表-2 調査概要

測定構造物	竣工年	規模	構造	建物用途
66号棟	1940年	地上4階+地下1階	RC造	住居+浴場、倉庫
67号棟	1950年	地上4階	RC造	住居
68号棟	1958年	地上2階	RC造	病院

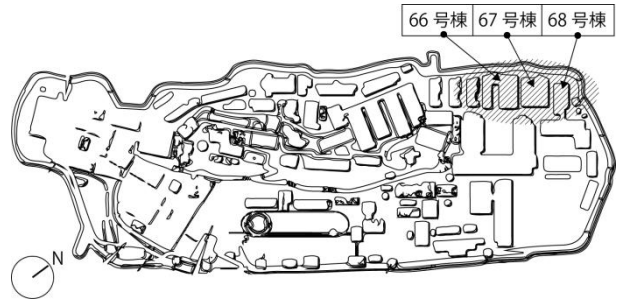


図-2 調査対象構造物の配置 ²⁾に加筆

表-3 調査・分析計画

試験名	測定項目	66	67	68
鉄筋腐食目視	発錆状況	○	○	○
	自然電位	○	○	○
電気化学的鉄筋腐食診断法	分極抵抗	○	○	○
	コンクリート抵抗	○	○	○
中性化深さ測定(JIS A 1152)	フェノールフタレインによる変色	○	○	○
塩化物イオンの電位差滴定(JIS A 1154)	塩化物イオン濃度	○	×	○
水銀圧入法(JIS R 1655)	細孔径分布	○	×	○

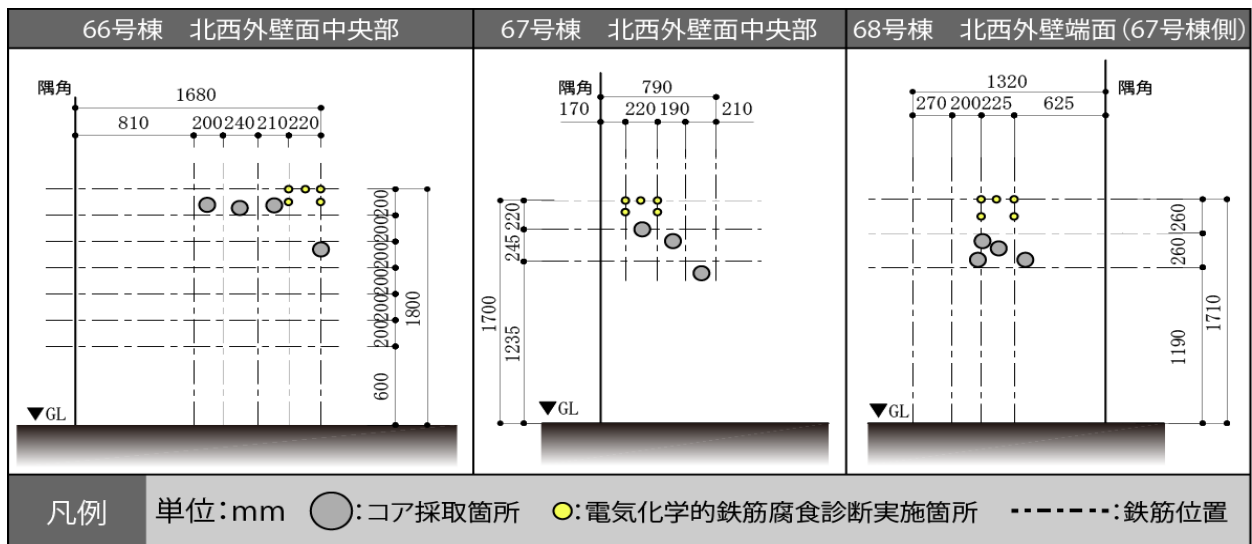


図-3 電気化学的特性値の測定及びコア採取箇所の概要図

表-4 分析用コアの諸元

コア名称	コア全長	仕上範囲(仕上げは全てモルタル)		鉄筋位置 (かぶり厚さ)	中性化範囲	
		外壁側	内壁側		外壁側	内壁側
66-1	213.88mm	0~11.62mm	0~10.76mm	外壁側より144.79mm	0~3.96mm	0~35.39mm
66-2	210.12mm	0~9.207mm	0~9.11mm	外壁側より162.5mm	0~1.23mm	0~27.81mm
67-1	188.63mm	0~10.46mm	-	外壁側より73.49mmと164.41mm	0~3.897mm	なし
67-2	188.64mm	0~26.44mm	-	外壁側より175.77mm	0~6.237mm	0~0.613mm
68-1	162.52mm	0~26.62mm	0~17.7mm	なし	なし	0~0.693mm
68-4	142.07mm	0~23.57mm	-	外壁側より45mm程度	0~1.87mm	0~1.697mm

3. 各棟における外観変状の目視観察結果

66号棟, 67号棟, 68号棟における測定箇所周辺の外観状況をそれぞれ写真-1に示す。

3.1 66号棟における外観変状の目視観察結果

66号棟は対象外壁面下部に斜め方向の深いひび割れと上部に水平方向のひび割れが見られた。対象外壁面中頃にはモルタル仕上げが多少剥落している部分が見られた。但し、鉄筋の露出などは見られず、錆汁に関しては、赤褐色の錆汁が写真の右側に見られる程度である。

3.2 67号棟における外観変状の目視観察結果

67号棟は3棟の中でも比較的健全であり、対象外壁面周辺にひび割れはほとんど見られなかった。対象外壁面上部に1箇所のみ規模の小さなひび割れとそこから滲み出る赤褐色の錆汁が観察された。

3.3 68号棟における外観変状の目視観察結果

68号棟は3棟の中で最も変状の規模が大きく、ひび割れ箇所も多く、対象外壁面上部には濃い赤褐色でよだれ状の錆汁が見られた。また、測定対象とした部分は一層分のモルタル仕上げの剥落が観察された。下部では、黒色の錆汁が斑状に多く滲み出ているところが観察された。

4. 実験概要

図-4に採取したコアに対する試験の流れを示す。分析試験に用いるコアはコンクリートカッターにより約20mm厚にスライスして、円盤状試料とする。更に半分にカットして半月状試料とする。その半月状試料を破砕したものを全塩化物含有率の測定及び水銀圧入法による細孔径分布の測定に用いた。

上記2つの試験により、調査対象建造物の外壁面に対する深さ方向のコンクリート物性（深さ方向の塩化物イオン濃度分布、深さ方向の総細孔量分布）を検討した。

次に、調査現場にて行った電気化学的特性値の測定方法、また本研究において分析対象としたAコンクリートの化学組成及びBコンクリートの細孔構造についての各実験手順を示す。Aは全塩化物含有率の測定、Bは細孔容積の測定が該当する。

4.1 電気化学的特性値の測定

本測定は、RC構造物中の鉄筋腐食指標値（自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗）を得る目的で、携帯型鉄筋腐食診断器を用いて測定を行った。ただし、今回は測定対象とする鉄筋の被測定面積が不明であるため、分極抵抗及びコンクリート抵抗に関してはどちらも見かけの値となった。測定箇所は図-3における3棟の各外壁面図上に示す小さい方の○印であり、配筋について鉄筋が2本交差している部分である交差部2点と鉄筋1本のみの非交差部3点の計5点の内部鉄筋を測定対象とした。測定は、各測定箇所において近傍の鉄筋に導線をつなぎ試料極(WE)とし、照合電極(RE)と2つの対極(CCE,GCE)を組み合わせた2重対極センサを測定対象とする鉄筋直上のコンクリート表面に当て、10Hzと200mHzの高低2つの周波数により交流電流を印加し、それにより得た交流インピーダンス値から分極抵抗値、また同時にコンクリート抵抗値と自然電位値を測定した。

4.2 全塩化物含有率の測定

本測定は、各測定箇所における深さ方向の塩化物イオン濃度分布を測定することを目的として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」に準じて行った。試料中に含まれる全塩化物の抽出を行った後、「塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法」によって、試料中の塩化物イオン濃度(%)を算出した。

試料は各棟から採取したコアを円盤状にカットしたものをハンマーなどにより粗砕し、その後たがねを用いて5mm角程度の大きさにセメントペースト部のみを取り出し、乳鉢または振動ミルを用いて、150 μ mふるいを全通させるように微粉碎したものをを用いた。全塩化物の抽出過程において、一回の操作で用いた試料の質量は約2gであり、また測定に影響を及ぼす妨害物質を除去するために過酸化水素水を使用した。電位差滴定には、抽出により得られたろ液を50ml分取し、そこに0.1mol/l塩化ナトリウム溶液を1ml加えたものについて滴定を行った。

また、塩化物イオン電極は感度が不足するため、その補正手段として空試験溶液中に最低限の塩化物イオンを



写真-1 各棟の外観状況

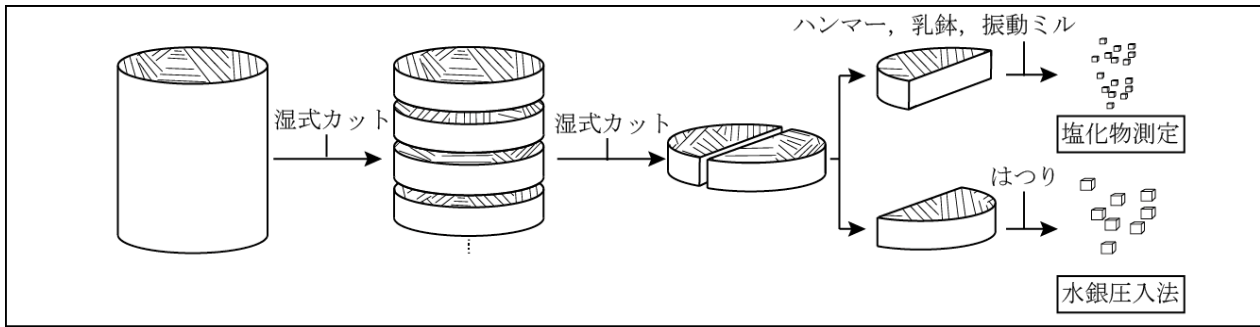


図-4 採取したコアの処理方法の概要

添加したもの（ブランク）についても滴定を行い、電位差滴定の終点を明確化した。ブランクによる滴定量（ V_0 ）を用いて試料溶液に対する滴定量（ V ）を補正した。

全塩化物含有率（ C :%）の計算式を示す。

$$C = \frac{(V - V_0) \times 0.003545 \times f}{W} \times \frac{200}{X} \times 100$$

ここに、 C :全塩化物含有率（%）、 W :試料の質量（g）、 V :試料入り抽出液に対して行った0.1mol/l硝酸銀溶液の滴定量（ml）、 V_0 :ブランクに対して行った0.1mol/l硝酸銀溶液の滴定量（ml）、 X :分取量（ml）、 f :0.1mol/l硝酸銀溶液のファクター（1.003）、0.003545:0.1mol/l硝酸銀溶液1mlの塩化物イオン相当量（g）

4.3 細孔容積の測定

本試験は、コアの深さ方向の細孔容積分布を測定する目的で水銀圧入ポロシメーターを用いて測定を行った。測定に用いた試料は、コアからたがねを用いてセメントペースト部分から約5mm角の小片をはつりだし、それをアセトンに浸漬させ水を停止したものに対し真空乾燥を行い細孔内の水分を除去したものを用いた。測定は、上記の前処理を行った試料に対し低圧（0~345kPa）及び高圧（大気圧~228MPa）の2段階において水銀圧入を行い、圧力と水銀圧入量との関係から細孔径分布を求めた。

水銀圧入法により求めた細孔径分布は、細孔径の大小による影響を考慮するため、細孔径を本試験で測定できる細孔径範囲（約1nm~約35000nm）を視野に入れ、次の4段階に分けて、それぞれの範囲内における細孔径分布を求め、比較検討に用いた。細孔径は、a. 全空隙径（nm）、b. ゲル空隙径（1~10nm）、c. 毛細管空隙径（10~1000nm）、d. 粗大空隙径（1000nm~）の4つに段階分けした。

5. 実験結果

5.1 電気化学的特性値による腐食判定と目視観察による実腐食状況の相関

表-5 に自然電位及び目視による腐食判定結果と分極抵抗及びコンクリート抵抗の平均値を示す。なお、自然

電位による腐食判定は表-6に示すASTM C 876の腐食判定基準を用いた。ASTM C 876では、銅硫酸銅電極（C.S.E.）を照合電極として用いているが、本測定では照合電極として銀塩化銀電極（Ag/AgCl）を用いたため、標準水素電極を基準とした電位差により補正を行った。また、目視による腐食評価は、今回の対象構造物が重要文化財であり鉄筋のはつり取りは行わなかったため、写真-2に示すようなコア側面、またはコア採取後の外壁内部に見られる鉄筋断面の変状及び鉄筋断面周囲の腐食厚さの目視観察により行い、指標化は表-7の鉄筋腐食グレード表に準じて行った。

表-5 では自然電位による腐食の定性的判断の妥当性を検討したが、自然電位による判定が実際の腐食状況と一致しないという結果になった。

表-5 自然電位による判定と目視結果との照合結果

対象建物	自然電位 [mV vs. Ag/AgCl]		分極抵抗 [kΩ]	コンクリート抵抗 [kΩ]	鉄筋目視	
	測定平均	ASTM			グレード	錆評点
66号棟	-414.24	C	3.42	4.49	1	0
67号棟	-239.24	C	78.50	500.40	1	0
68号棟	-439.16	C	1.04	0.12	4	6

表-6 自然電位による腐食判定基準³⁾

自然電位 E_{corr} [mV vs. Ag/AgCl]	判定
$-80 < E_{corr}$	A:90%以上の確率で腐食なし
$-230 < E_{corr} \leq -80$	B:不確定
$E_{corr} \leq -230$	C:90%以上の確率で腐食あり

表-7 鉄筋の腐食グレード表⁴⁾

グレード	錆評点	鉄筋の状態
1	0	黒皮の状態、または錆が生じているが全体的に薄い緻密な錆であり、コンクリート面に錆が付着していることはない
2	1	部分的に浮き錆があるが、小面積の斑点状である
3	3	断面欠損は目視観察では認められないが鉄筋の全面または全長に渡って浮き錆が生じている
4	6	断面欠損を生じている

次に同程度の自然電位を示しているにも関わらず66号棟と68号棟の間で腐食実態に差異が生じた点について、コンクリート化学組成と細孔構造の観点から検討を行う。67号棟に関しては、全塩化物含有率及び細孔容積のデータが不足していたため、今回は検討を除外した。

5.2 電気化学特性値間の相関

図-5 は、コンクリート抵抗-分極抵抗間とコンクリート抵抗-自然電位間の相関を検討したものである。収まりの都合上、図-5の左側縦軸と横軸は対数表示してある。

かぶりコンクリートの抵抗は、含水率・塩化物イオン量・水セメント比などによって変化するかぶりコンクリートの性状を示す重要なファクターである⁵⁾。調査結果より、かぶりコンクリートの抵抗は鉄筋とコンクリートの界面の抵抗である分極抵抗にも大きく影響を及ぼしていることが確認できた。また、自然電位の測定値とも相関が確認された。よって、自然電位は鉄筋の腐食状態のみならずかぶりコンクリートの性状にも影響されており、自然電位のみでは腐食診断を行うのは困難であることが再確認された。

5.3 かぶりコンクリートの各種要因が及ぼす影響

図-6, 7, 8, 9にそれぞれ全空隙径, 粗大空隙径, 毛細管空隙径, ゲル空隙径に対する総細孔量の深さ方向の分布を示す。また図-10に各建物の塩化物イオン濃度分布を示す。表-8は、各建物のCI濃度(化学組成)と総細孔量(細孔構造)を対象として5%有意水準の分散分析を実施し、かぶりコンクリートが持つ特性が各建物の間で有意に異なっているかについての検討を行った結果を示したものである。



(66号棟 グレード1, 鉄筋断面には薄茶色の錆が少し見られる程度であり、周囲はほとんど錆びていない)
(68号棟グレード4, 鉄筋断面は黒色の錆が見られ断面に傷が見られる。周囲にも錆が見られる。)

写真-2 腐食状態とグレード付けの例

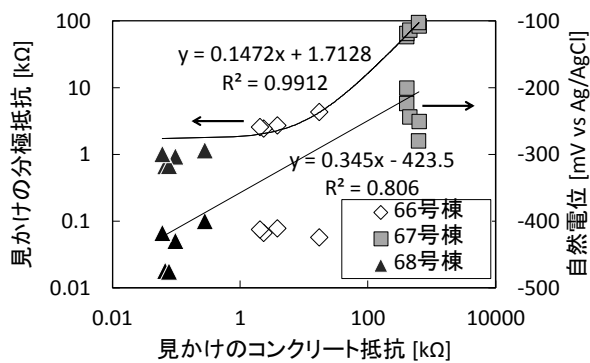


図-5 コンクリート抵抗-分極抵抗, 自然電位の関係

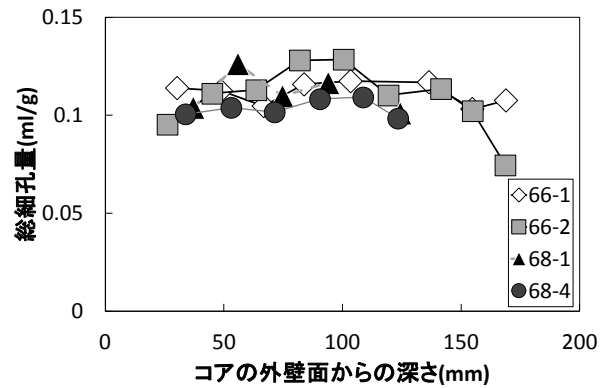


図-6 全細孔径のコア深さ方向の総細孔量分布

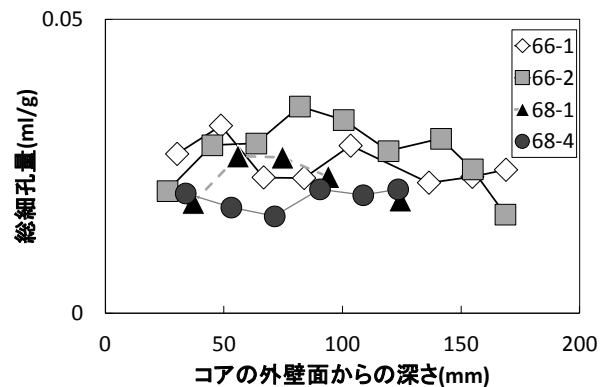


図-7 粗大空隙径のコア深さ方向の総細孔量分布

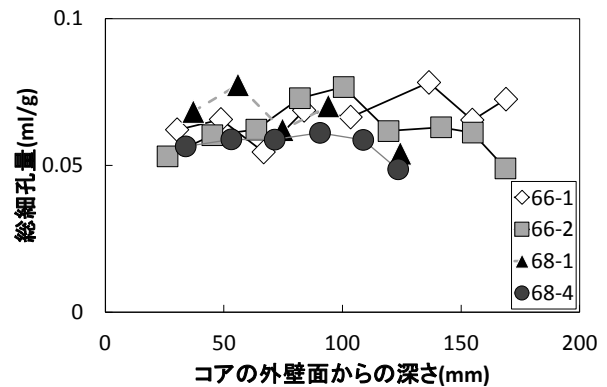


図-8 毛細管空隙径のコア深さ方向の総細孔量分布

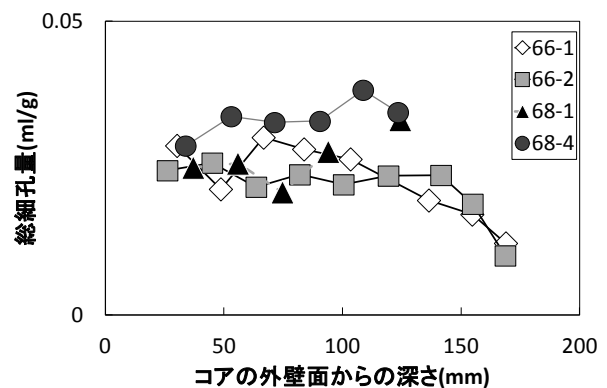


図-9 ゲル空隙径のコア深さ方向の総細孔量分布

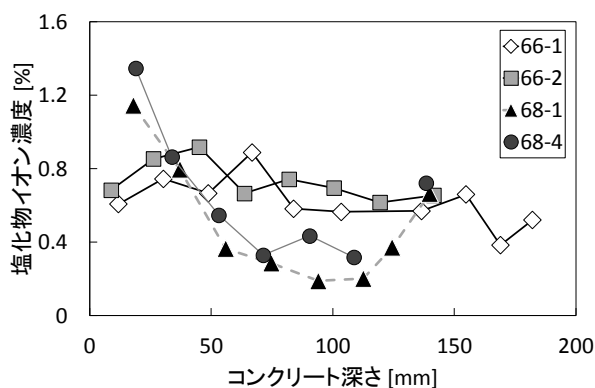


図-10 各建物の塩化物イオン濃度分布

この結果より、1. ゲル空隙の総細孔量と 2. 粗大空隙の総細孔量という 2 つの要因が 66 号棟と 68 号棟の間で有意に異なっているとの結果が得られた。

この中で、ゲル空隙については空隙中に存在する水分の移動が遅く、環境の湿度変化に大きく影響を受けないものと予想され、かぶりを持つ固有の含水特性を代表する指標である可能性がある。一方、粗大空隙径を持つ空隙は比較的大きな空隙であり、空隙中の水分の移動が迅速に起こると考えられる。この迅速な水分移動がかぶりの電気化学特性に影響を及ぼしている可能性も考えられるが、水銀圧入法を行う際の試料の前処理時に粗大空隙のばらつきが生じた可能性もあり、さらなる検討を要する。

6. まとめ及び今後の課題

以下に、得られた知見をまとめる。

1) コンクリート抵抗は分極抵抗及び自然電位との高い相関が見られたことから、腐食度の判定は自然電位のみにより行うことは困難であり、分極抵抗そしてコンクリート抵抗と併せて行う方が良い。

2) 分散分析により、粗大空隙径及びゲル空隙径に対する総細孔量の 2 群のデータについて有意差があるという結果が得られた。

このことに関して、粗大な径については水分や気体などの移動性状に大きく寄与することが考えられ鉄筋腐食現象を初め、各種劣化現象もその物質移動性状を 1 つの原因として引き起こされるということは容易に想像できる。そのため多くの研究がなされている。

しかし、ゲル空隙の特性が鉄筋の自然電位やコンクリート抵抗、分極抵抗などの電気化学特性に及ぼす影響については未知の部分が多いと考えられ、今後ゲル空隙とこれらの電気化学特性の相関についての研究を行うことで新たな知見が得られる可能性があると考えられる。

表-8 要因ごとの一元配置分散分析結果

要因	平方和	自由度	分散	F値	P-値	F境界値
Cl ⁻ 濃度 誤差 全体	0.21 1.85 2.06	3 29 32	0.07 0.06	1.11	0.36	2.93
全細孔 誤差 全体	2.53×10^{-4} 29.3×10^{-4} 31.9×10^{-4}	3 24 27	8.44×10^{-5} 1.22×10^{-4}	0.69	0.57	3.01
粗大空隙 誤差 全体	2.33×10^{-4} 4.22×10^{-4} 6.55×10^{-4}	3 24 27	7.78×10^{-5} 1.76×10^{-5}	4.43	0.01	3.01
毛細管空隙 誤差 全体	3.79×10^{-4} 13.4×10^{-4} 17.1×10^{-4}	3 24 27	1.26×10^{-4} 5.56×10^{-5}	2.27	0.11	3.01
ゲル空隙 誤差 全体	5.76×10^{-4} 6.00×10^{-4} 11.8×10^{-4}	3 24 27	1.92×10^{-4} 2.50×10^{-5}	7.68	9.11×10^{-4}	3.01

今後は本研究の結果を考慮した上で、かぶりコンクリート中の気体、液体の移動性状に影響する細孔特性に焦点を当て、実験室において行う供試体作製などの実験により細孔容積や細孔径、表面積などの細孔特性値が電気化学特性値にどのように影響を及ぼすのかをより詳細に検討していく。

謝辞

本研究が実施できましたことは、JSPS 科研費 若手研究 (B) 24760446 の助成を受けたこと、長崎市の特別許可により調査を実施できたこと、また東京理科大学兼松研究室の兼松学氏、白石聖氏、伊藤清和氏、内田貢氏、上銘隆祐氏、東京大学野口研究室の田村政道氏、深尾宙彦氏、西尾悠平氏のご協力のご助力があつてこそのもです。ここに記して皆様方への謝意を表します。

参考文献

- 1) 横田優：鉄筋腐食診断器 (SRI-CM-V 型) _本体ユニット取扱説明書, 株式会社 四国総合研究所 土木技術部, p.8, 2007.7.6
- 2) 株式会社ユニバーサルワーカーズ 軍艦島コンシェルジュ：軍艦島コンシェルジュ, 軍艦島について, <http://www.gunkanjima-concierge.com/about/index.html>, 訪問日 2013.10.22
- 3) ASTM C 876 : Standard Test Method for Half-cell Potentials of Uncoated Reinforcing in Concrete
- 4) 国土開発技術センター建築物耐久性向上委員会編：建築物の耐久性向上シリーズ-建築物構造編 I -鉄筋コンクリート造建築物の耐久性向上技術, 技報堂出版, 1986.6
- 5) 斯波明宏他：かぶりコンクリートの性状が電気化学的鉄筋腐食測定法に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.745-750, 2007