

報告 軍艦島構造物群の劣化調査

楠 麻希*1・今本 啓一*2・野口 貴文*3・下澤 和幸*4

要旨：軍艦島構造物の劣化調査を行った。目視調査から劣化度分布図を作成し、軍艦島の構造物の劣化は、経年の他に内在塩分や飛来塩分が影響していると推測された。EPMA 調査からはコンクリート中に多量の内在塩化物が確認され、この塩化物イオンは建設年によっては内在塩分からもたらされるものと、飛来塩分によるものがあり、そこに中性化による塩分濃縮も関与していることが示唆された。温湿度調査からは軍艦島の湿度変化には海岸線からの直線距離および屋内外の条件が影響していた。飛来塩分調査からは、海拔高度が高くなるにつれて飛来塩分量が減少する傾向がみられた。

キーワード：軍艦島, 劣化度分布図, 塩化物イオン, コンクリート内部温湿度, 外気温湿度, 飛来塩分

1. はじめに

軍艦島は 1890～1974 年の間、三菱の主力炭鉱として開発され、1916 年以降 RC 構造物の建設が開始された¹⁾。この RC 構造物群は文化財・観光資源として注目されているが、無人島となってから風化・劣化が著しく進んでいる。それ故、今後の保存・補修の可能性を含めた活用方法を検討することが求められているが、建物ごとに劣化の状態は異なる上、施工・補修記録が乏しい状況にある。このため建物ごとの劣化状況の把握と劣化のメカニズムを明らかにすることが必要であり、一方このように劣化した構造物が現存することは極めて珍しく、建築材料学的にもこのような視点の研究の意義は大きい。本研究は目視調査および個別の建物から抜き取ったコアの塩化物イオン量に関する詳細分析の結果から、島内構造物(図-1)の劣化に関する全体概要の把握と劣化メカニズムを推定し、島全体の外気温湿度と個別の建物のコンクリート内部の温湿度の計測結果、および飛来塩分量の測定結果から、島にある構造物の環境劣化外力を推定することを目的とする。

2. 目視調査概要

2.1 目視調査方法

島内で調査可能な構造物の柱、梁部材を目視評価した。損傷種類は主として鉄筋腐食・さび汁の状況を 6 段階²⁾で評価した。劣化が見られないものを劣化のグレード 0 とし、ひび割れおよび鉄筋のさび汁が見られるものをグレード I (1)、腐食した鉄筋が露出しているものをグレード III (3)、鉄筋が朽ちてその痕跡しか存在しないものをグレード V (5) として評価し、括弧内の数値を用いて劣化度を定量評価した(図-1 参照)。なおその中間的な劣化状態をそれぞれグレード II および IV とした。



図-1 劣化のグレード例

2.2 目視結果と考察

(1) 65 号棟と 16-20 号棟の劣化について

65 号棟 3 階の劣化度分布図を図-2、16～20 号棟(以下日給社宅と記述する) 3 階の劣化度分布図を図-3 に示す。

65 号棟の外観を写真-1 に示す。65 号棟は終戦前後にわたって建設された島内最大の建物であり、物資の不足する混乱期の中で建設された点で特筆される建物の一つである。用途は住宅であり、北棟が 1945 年、東棟が 1949 年そして南棟が 1958 年の順に建設され、建設年代による劣化の差が顕著に見られる(図-2)。



写真-1 65 号棟北棟

*1 東京理科大学大学院 工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京理科大学 工学部第二部建築学科准教授 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授 (正会員)

*4 (財)日本建築総合試験所 (正会員)

日給社宅では、16号棟はその他の棟と比較して構造体の劣化が進行しているが、屋内においても構造体の劣化が著しい。劣化が著しいのは建物の北面側の屋外面および開口に近い屋内の部材であり、中庭に面する南面側では著しい劣化は少ない。これは取り付けられていた木製の雨戸や引き戸などが、風雨などで破損したことにより、室内へ雨水や潮風が浸入し部材の劣化を進行させたと考える。巻き立て補強が施された大廊下の柱（図中太線）や、各棟の廊下に位置する柱は劣化の進行も少なく、比較的健全なものが多いが、同様の補強が施された大廊下と各棟を繋ぐ位置にある柱のみが劣化の進行が著しい。一方17号棟では梁が柱よりも劣化の進行が著しい範囲があり、同じ環境下でも隣り合う部材に劣化度の違いがある。詳細な調査によってその原因を明らかにすることが今後の課題である。

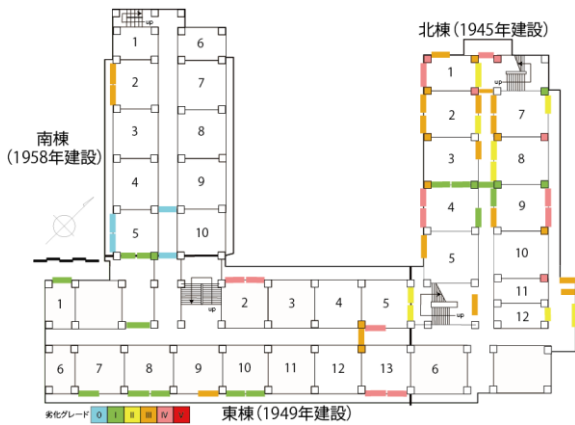


図-2 65号棟3階劣化度分布図

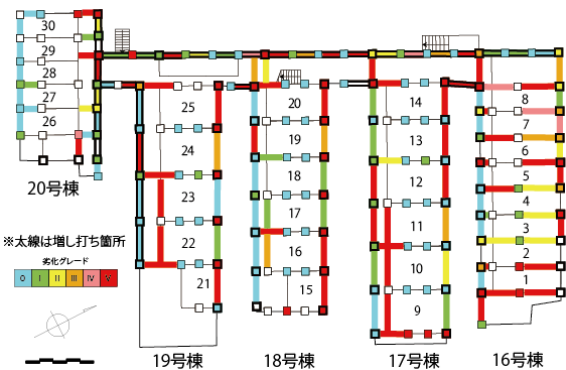


図-3 日給社宅3階劣化度分布図

(2) 軍艦島全体の劣化状況

フロア全体の劣化度の平均を海拔ごとに表した劣化度分布図を図-4に示す。平均値は算術平均から端数を四捨五入して算出した。

今回調査した構造物の内、日給社宅（1918年～）や30号棟（1916年～）の劣化度に対応する数値の平均値は3.4(n=)や3.2である。一方65号棟南棟（1958年）や31号棟（1957年）の劣化度の平均値は0.8や1.3と低い。

このことから、軍艦島の構造物の劣化には、前述の65号棟のように経年が影響していると推測される。

一方25号棟（1931年）のように築年数が長いにも関わらず、劣化度の平均値は1.3と数値が低い建物もある。これは1957年に31号棟が建設されたことで、鉄筋腐食に関わる局所環境の変化が一因と考えられるが、詳細については今後検討したい。

また海拔ごとの劣化度の平均値は海拔3～12mでは2.6、18m付近では2.3、27m付近では2.1であり、高所に位置するにつれて劣化度が低くなる傾向が見られた。これは飛来塩分の影響の差と考えられる（後述参照）。

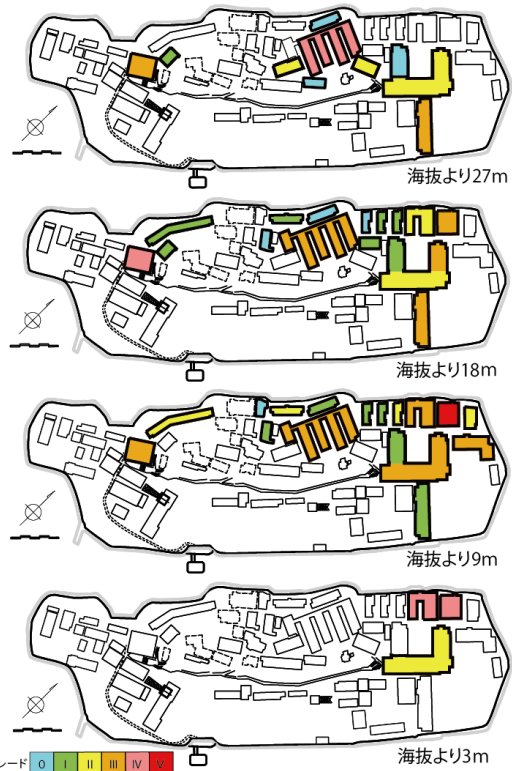


図-4 軍艦島全体の劣化度分布図

3. 材料詳細調査概要

3.1 調査対象と調査箇所

図-5と表-1に調査対象と調査箇所を示す。島内で最も古い30号棟から、比較的新しい3号棟までの計6棟を選定した。ただし測定箇所16外1F_Nおよび16内3F_Mは1951年に増し打ち工事が実施された箇所である。また16内3F_Nは増設箇所であり、工事年は不明である。

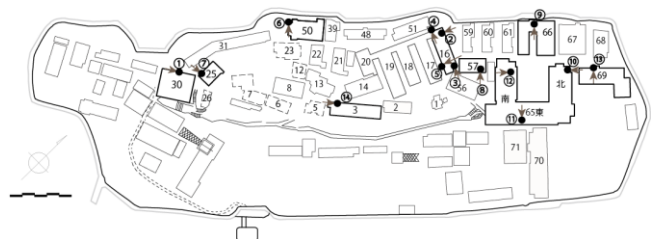


図-5 調査対象と調査箇所

表-1 調査対象と調査箇所

棟番号	建設年	仕上げ	かぶり厚	調査箇所名称 (棟番号・内 外・階_仕上げ)	図-6に おける調 査位置
30	1916	無(N)	140mm	30外1F_N1	①
16	1918	無	60mm	16外1F_N1	②
	1951補修				
	(1918)	無	30mm	16内3F_N1	③
	1918	モルタル(M) 約10mm	70mm	16内3F_M1	④
	1951補修				
	1918	無	40mm	16内5F_N1	⑤
1951補修					
50	1927	タイル(T)	70mm	50外1F_T	⑥
25	1931	モルタル約 10mm	70mm	25外1F_M	⑦
57	1939	モルタル約 20mm	50mm	57外1F_M	⑧
66	1940	モルタル約 55mm	70mm	66内1F_M1	⑨
65北	1945	モルタル約 10mm	なし	65N外1F_M1	⑩
65東	1949	モルタル約 10mm	110mm	65E内1F_M1	⑪
65南	1958	モルタル約 20mm	100mm	65S内1F_M	⑫
69	1958	テラゾー約 10mm	90mm	69内1F_T	⑬
3	1959	モルタル約 30mm	120mm	3内1F_M	⑭

3.2 調査方法

表-1 および図-5 に示した箇所においてφ80mmのコアを採取し、以下の測定を行った。

a) EPMAによる塩化物イオン量測定

EPMAによりコア断面で深さ1mm毎の区間にあるピクセルのCl⁻量平均値を計算し、分布を作成する(図-6参照)

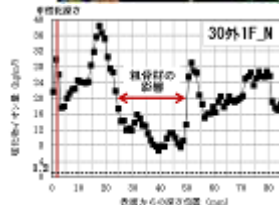
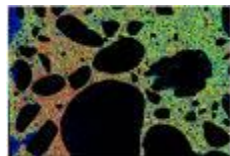


図-6 コア断面とCl⁻量分布

b) 中性化深さ測定

JIS A 1152に準じて中性化深さを測定した。

3.3 調査結果と考察

(1) 塩化物イオン量分布

塩化物イオン量分布の測定結果を図-7に、構造物の建設年とJASS5における塩分規制との関係を図-8に、建設年と内在塩化物イオン量との関係を図-9に示す。

鉄筋の腐食発生限界濃度は1.2 kg/m³³⁾とされており、65号棟、69号棟、3号棟、16号棟5階以外はいずれの深さでもこの値を超えている。塩分濃縮や骨材量の影響により分布はばらついているものの、特に表面から内部へ向かうほど塩分量が低下していく傾向があり、飛来塩分の浸透・拡散によるものと思われる。

表面から60~85mmの内部における塩化物イオン量をコンクリートの内在塩分とすると、3つの傾向、すなわち、平均20 kg/m³と極めて高いもの(30号棟)、3~10 kg/m³程度のもの(16, 25, 50, 57号棟)、そして約0.5~1.0

kg/m³程度の少ないもの(65, 69, 3号棟)に分類できる。骨材に海砂もしくは海砂利(骨材量:700kg/m³+1000 kg/m³, 含水率10%(吸水率3%+表面水率7%),海水の塩分濃度4%と仮定³⁾)が使用されていた場合、約3~7 kg/m³の塩分量となる。さらに海水が使用されていた場合(単位水量を200 kg/m³と仮定³⁾),8 kg/m³の塩分量が加わり、15 kg/m³以上となることも推測される。構造物の建設年における塩分規制状況の違いにより、内在塩化物イオン量は大きく異なっていることがわかる(図-9,10)。ただし30号棟についてはそれを超える塩分量を含んでおり、詳細な原因については今後検討が必要である。

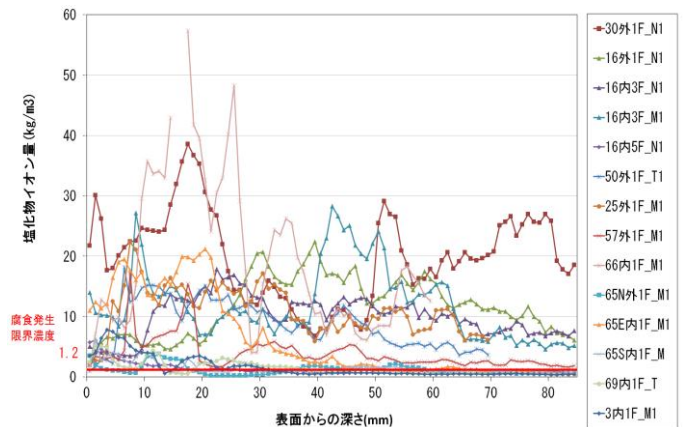


図-7 塩化物イオン量分布

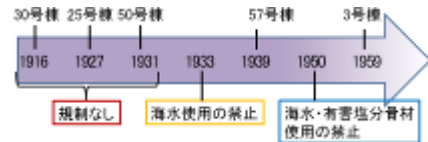


図-8 構造物の建設年とJASS5における塩分規制

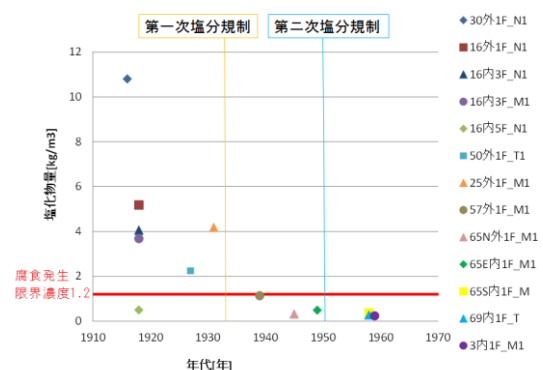


図-9 建設年と深さ60~85mm地点における塩化物イオン量

(2) 塩化物イオン量分布と中性化深さの関係

図-10に各測定箇所の塩化物イオン量分布と中性化深さの一例(16号棟,50号棟,3号棟)を示す。

塩化物イオン量が中性化領域においては少なく、その内部において突出して高くなるのは、中性化によるフリーデル氏塩の解離・濃縮現象と思われる。中性化は多くのケースでかぶり厚さに達していないことから、構造物

の劣化の主要因ではなく、塩分濃縮を引き起こしている点で付加的要因として位置付けられると推定される。

中性化深さに関しては、乾燥環境にある16内3F_Mを除くすべての測定箇所において小さく、特にタイル仕上げ(50号棟:50外1F_T)の中性化抑制効果が顕著で、全く中性化していない。更にタイル仕上げを施した50号棟は海沿いに位置しているにも関わらず、同様の立地条件の30号棟や66号棟と比較して、塩化物イオンの浸透量が少ない。このことから、タイルもコンクリートの劣化の低減に効果のあることが示唆された。

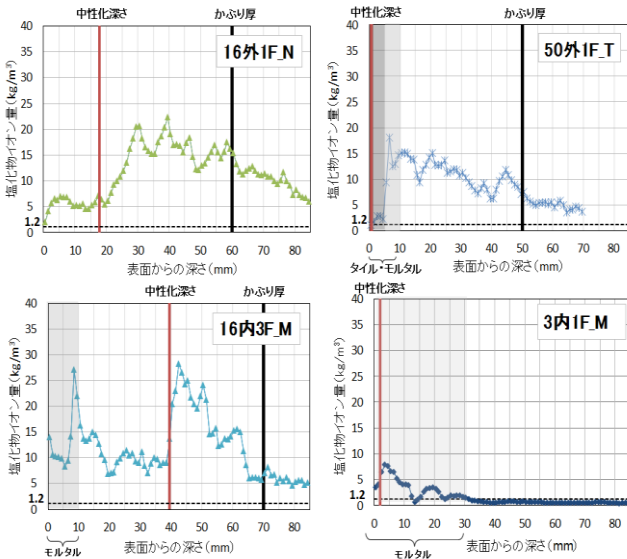


図-10 塩化物イオン量分布と中性化深さ

4. 温湿度調査概要

4.1 調査対象と調査箇所

図-11と表-2とに調査対象と調査箇所を示す。建設年の新旧や海拔高度の違い、方位を考慮するために、計5棟を選定した。

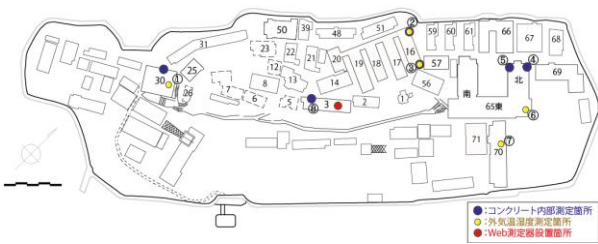


図-11 調査対象と調査箇所

表-2 調査対象と調査箇所

棟番号	建設年	調査箇所名称(棟番号・内外・階・分類番号)	外気温湿度	コンクリート内部温湿度	図-12における調査位置
30	1916	30内2F_1	あり	なし	①
16	1918 (1918)	16外1F_1	あり	あり	②
		16内3F_1	あり	あり	③
65	1945	65N外1F_1	なし	あり	④
	1945	65N外1F_2	なし	あり	⑤
	1949	65E内2F_1	あり	なし	⑥
70	1958	70内1F_1	あり	なし	⑦
3	1959	3内1F_1	なし	あり	⑧

4.2 調査方法

外気の温湿度の測定には小型温湿度データロガー(温度:精度±0.3℃,湿度:±5%RH)を使用した。コンクリート内部の温湿度の測定には、ボタン電池型の超小型温湿度データロガーを使用した。図-12に示した器具を作製し、コンクリート表面から5~6cm深さに設置し、温湿度を測定した。

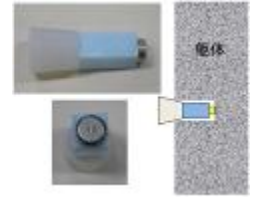


図-12 測定器具概要

2011年10月31日から2012年4月16日までの168日間、1時間毎の温湿度を測定した。

また、軍艦島全体の温湿度の測定には、3号棟屋上に設置したWeb気象観測システムのデータを使用した。

4.3 調査結果と考察

(1) 軍艦島建造物の温度変化

外気温度およびコンクリート内部温度のデータを図-13に示す。

測定期間内での軍艦島全体の最高気温は23.8℃,最低気温は2.10℃,平均気温は12.4℃であった。各測定点での外気温度およびコンクリート内部の温度は、軍艦島全体の気温とほとんど同様に変動した。軍艦島での温度変化は、建物の室内外やコンクリート内外の条件の影響を受けず、外気と同様に変動するという結果が得られた。

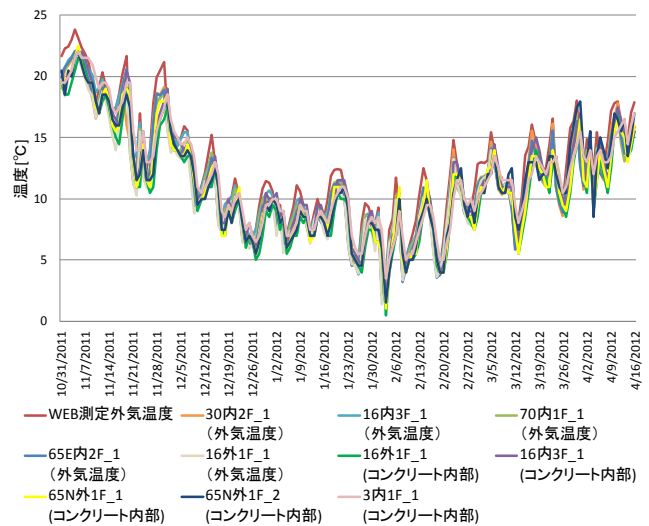


図-13 軍艦島温度変化

(2) 軍艦島建造物の相対湿度変化

外気湿度およびコンクリート内部湿度のデータを図-14,海岸線からの直線距離と湿度変化の比較を図-15に示す。直線距離とは、海岸線からの平面距離と海拔高度からの立面距離の両方を考慮した斜距離である。

測定期間内での軍艦島全体の最高湿度は82.6%,最低湿度は38.0%,平均湿度は55.7%であった。各測定点での外気湿度は総じて軍艦島全体の湿度よりやや高い値を示

した。測定点が海岸線に近いほど海風の影響を大きく受けることが考えられ、建物外部の湿度を測定した 16 外 1F_1 と軍艦島全体外気の間には、直線距離が長くなるにつれて湿度が低くなる傾向が見られた。16 内 3F_1 についてはこの限りではないが、軍艦島の湿度変化には海岸線からの直線距離が若干影響していると考えられる。

一方コンクリート内部の湿度は外部の影響をあまり受けず、測定期間中ほぼ一定であった。建物の外部側を計測した 65N 外 1F_1 と 65N 外 1F_2 は平均湿度 95~99% と値が高く、建物の内部側を計測した 16 外 1F_1 と 3 内 1F_1 は平均湿度 80~90% と相対的に低い値であった。建物の外部側を計測した 16 外 1F_1 の平均湿度は 81.9% であり、建物内部と同等の値を示したが、概ね屋内においては、屋外よりもコンクリート中の相対湿度は低いと考えられる。

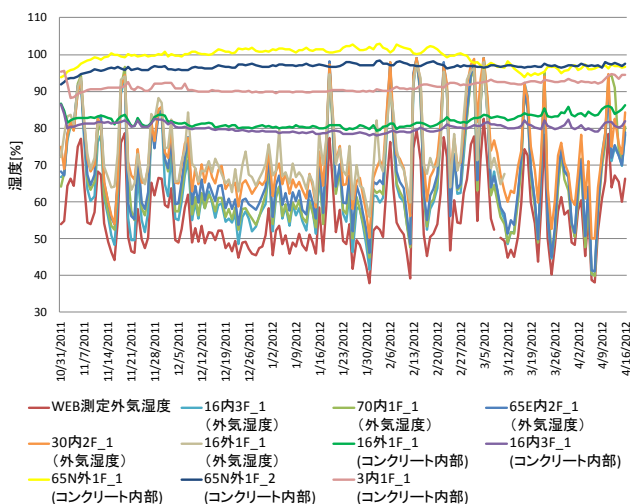


図-14 軍艦島湿度変化

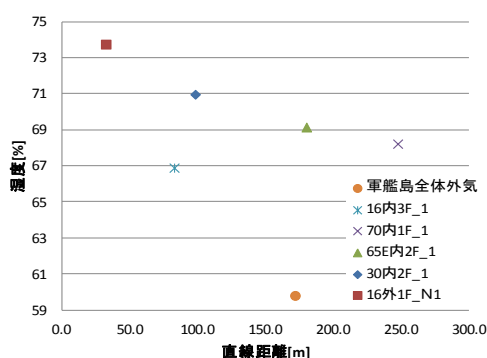


図-15 海岸線からの距離と湿度変化

(3) コンクリート内部温湿度と EPMA および鉄筋腐食

コンクリート内部の平均温湿度、測定箇所の内塩化物イオン量、鉄筋腐食状況を表-3 に示す。鉄筋位置の塩化物イオン量は EPMA により算出したものである。また鉄筋腐食状況はコア位置での観察のみであり、コアはひび割れや浮きの兆候が見られない部材から採取した。

全ての調査箇所において、中性化深さは鉄筋に達して

いなかった。したがって中性化による鉄筋腐食は発生していないと考えられる。他に鉄筋腐食の原因と考えられるのは内在塩化物量であり、16 外 1F_1、16 内 3F_1、65N 外 1F_2 では発生限界濃度 1.2 kg/m^3 の値を大幅に超えているが、鉄筋腐食はほとんど進行していなかった(写真-2)。腐食発生限界濃度を超えていない 3 内 1F_1 も同様に鉄筋腐食は軽微であった。コンクリート内部の湿度には 80~97% の幅があるが、これらが鉄筋腐食に及ぼす影響については、今後も検討を進めたい。

表-3 コンクリート内部温湿度と塩分量・鉄筋腐食

調査箇所名称	コンクリート温度 Ave[°C]	コンクリート湿度 Ave[%]	かぶり厚さ [mm]	中性化深さ [mm]	Cl ⁻ Ave [kg/m ³]	鉄筋腐食
16外1F_1	10.8	81.9	60	20.4	15.3	軽微
16内3F_1	11.5	80.1	30	9.1	10.8	軽微
65N外	11.5	96.7	85	4.1	2.67	軽微
3内1F_1	11.7	91.2	120	2.0	0.54	軽微



写真-2 コア鉄筋写真

5. 飛来塩分調査概要

5.1 飛来塩分測定試験体概要

島内構造物に飛来塩分捕集用のモルタル試験体を設置し、一年間暴露した。試験体の概要を以下に示す。



図-16 モルタル試験体設置箇所

表-5 試験体調査条件と使用材料

W/C(%)	単位重量[kg/m ³]		
	W	C	S
65	168	258	892
種類および主な物性	上水道	普通ポルトランドセメント、密度3.16g/cm ³	陸砂、表乾密度2.59g/cm ³ 、吸水率2.04%、実積率58.3%

5.2 試験方法

図-16 に示した箇所からモルタル試験体を回収し、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」に従って、塩分滴定試験を行った。

5.3 調査結果と考察

各試験体の表面塩化物イオン濃度を図-17に示す。

16号棟の4階、6階、8階のサッシに取り付けた試験体から高さ方向による塩化物イオン量の差を比較すると、4階で暴露した試験体の値が最も大きく、階高が上がるにつれて値が減少していることが確認できる。また、上向きに設置した試験体よりも、横向きに設置した試験体の方が飛来塩分をより多く捕集している結果が得られた。上向き設置と横向き設置とは差があるが、どちらも試験体設置位置が高くなるにつれて飛来塩分量が減少する傾向が見られる。

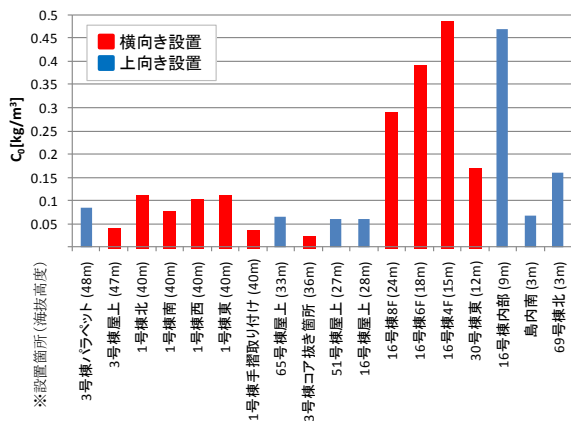


図-17 各試験体の表面塩化物イオン量



写真-3 上向き設置



写真-4 横向き設置

5.4. 飛来塩分量と構造物の影響

図-18にコンクリート内部の塩分量と飛来塩分量を示す。コンクリート内部の塩分量は5.1章のEPMA測定結果から算出した。このデータは内在塩分、中性化による濃縮、飛来塩分などが複合的に作用しているため、測定範囲内でのピーク値と深さ65~85mmにおける内在塩化物イオン量の差が、飛来塩分に影響を受ける範囲と定め、コンクリート内部の塩分量とした。飛来塩化物イオンの浸透量は、モルタル試験体を各棟の経年数と同年数暴露されたものと仮定し、浸透量を予測⁵⁾して比較を行った。また飛来塩化物イオンの浸透量には3倍程度の幅がある⁵⁾ため、最大予測浸透量として合わせて示す。

16外1F_N1は最大予測浸透量に比べ、コンクリート内部の塩分量が他の棟と比較して少ない。これは飛来してきた塩化物イオンがコンクリート内に浸透していないことを意味するが、その理由として、3.2で取り上げたコンクリート内部の湿度が考えられる。16外1F_N1のコンクリート内部の平均湿度は81.9%であり、他の測定箇所

と比べて低い値を示している。塩化物イオンは水分に溶けることで浸透するため、16外1F_N1におけるコンクリート中の水分量が少なかったことが、飛来塩分がコンクリート内に浸透しなかった理由と考えられる。

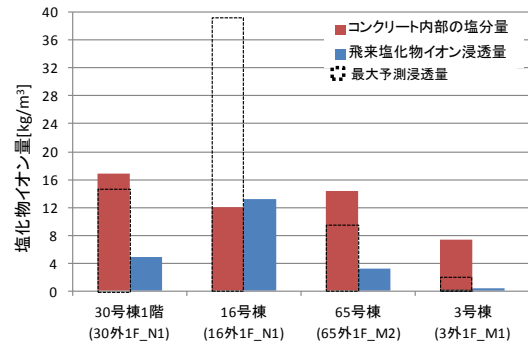


図-18 コンクリート内部の塩分量と飛来塩分量

6. まとめ

- (1) コンクリート内部の塩化物イオン量には、建設年とJASS5における塩分量規制の影響が示唆された。
- (2) 中性化は劣化の主要因ではないが、塩分濃縮を引き起こしている点において、劣化の付加的要因として位置付けられると推定される。
- (3) 軍艦島での温度変化は、建物の室内外やコンクリート内外の影響を受けず、外気と同様に変動する。
- (4) コンクリート内部の湿度変化は測定期間中はほぼ一定であり、測定点ごとの平均湿度の違いは建物の内外が影響していると考えられる。
- (5) 飛来塩分量は北および東方向からが多く、海拔高度が高くなるにつれて減少する傾向がみられた。

今後、腐食発生濃度を超えているにも関わらず腐食が進行していなかった箇所(写真-2)について、コンクリートの品質等を考慮した検討を進める必要がある。

謝辞 本調査は長崎市の委託を受けた(一財)日本建築学会軍艦島コンクリート構造物劣化調査WGによって実施されたものであり、ご協力をいただいた関係各位に新車の意を表す。

参考文献

- 1) 阿久井嘉孝, 滋賀秀實: 東京電機大学出版局, 軍艦島実測調査資料集, 1984
- 2) 日本コンクリート工学協会, コンクリート診断技術, 2009
- 3) 土木学会, コンクリート標準示方書, 2007
- 4) 日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, 1923-2009
- 5) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート造構造物の耐久設計施工指針(案)・同解説, 2004