

長期間放置された 鉄筋コンクリート造構造物の経年劣化

耐震構造技術部係長 早川 輝

Keyword：軍艦島，鉄筋コンクリート造構造物，経年劣化，劣化調査

1. はじめに

現在日本では、高度経済成長期に次々と建設され、長期間にわたって供用されているコンクリート造構造物が急激に増加している。コンクリートは、メンテナンスフリーの材料ともはやされ、社会資本整備の担い手として高度経済成長期より大量に生産されてきたが、塩害やアルカリ骨材反応、さらにはトンネルにおける脱落事故など経年劣化問題が顕在化してきたため、現在ではその維持保全の重要性が広く認識されている。しかしながら、長期的な低成長時代の真っ只中にある日本においては、このような社会資本の維持保全・更新に要する費用の増大が新規事業への投資を大きく妨げるのではないかと懸念されている。

また、コンクリート造構造物の建設においては、CO₂（コンクリートの結合材（セメント）生産時に生成）の大量排出による地球温暖化や、骨材（コンクリート容積の7割を占める）や木材（コンクリート打設のための型枠）の大量消費による自然破壊といった地球環境問題が取り沙汰されている。

このような現在の経済情勢や地球環境問題を鑑みると、膨大な量のコンクリート造構造物に対して、適正な改修や増改築を適時に施して、必要とされる機能・性能の維持・向上を図りながら、建設後50～100年と言われるほどまでの長きにわたって使い続けることが非常に重要であることは言うまでもない。

このような背景の下、NTTファシリティーズグループでは、建設後40～50年経過する既存の鉄筋コンクリート（RC）造構造物のさらなる安全性、信頼性、機能性を最適に保持するための手法の検討を続けている。特に、改修時期を適切に予測することができれば、維持保全コストの適正化につながり、ひいては長寿命利用に向けた延命化施策になるものと期待している。

そこで本稿では、建設後100年近く経ち、40年以上放置されて究極的に劣化した軍艦島構造物群の劣化調査結果をレビューし、今から50～60年後に既存RC造構造物に起きうるであろう劣化状態のうち、最悪の場合を予測するとともに、その適正な延命化に向けた今後の検討課題について考察する。

2. 軍艦島の歴史

「軍艦島」は、長崎港の南西およそ19kmの海上にある島の俗称で、正式には「端島（はしま）」と言い、現在、長崎県長崎市に属している。端島の大きさは、南北に約480m、東西に約160m（東京ドームのグラウンド約5個分）である。「軍艦島」と呼ばれ始めた由来は、端島の外観が、当時三菱重工業長崎造船所で建造中だった日本海軍の戦艦「土佐」に似ていたことからと言われている。

1810年（文化7年、江戸時代後期）に端島で石炭が発見された後、1890年（明治23年）に三菱合資会社が島全体と鉱区の権利（10万円）を買い取り、海底炭坑として本格的に操業が開始された。そして、出炭量の増加とともに人口（最盛期で人口は5,200人以上、人口密度は当時の東京の9倍と言われた）が増え、高層社宅が次々と建設された。また、6回にわたる埋立てにより、護岸堤防の拡張が繰り返され、端島は発見当時の3倍の面積に広がられている。しかし、エネルギー革命によって石炭から石油へと需要がうつり、出炭量と人口が徐々に減少し、1974年（昭和49年）1月に閉山となり、今日に至るまで無人島となっている。現在では、端島を含めた明治期の産業施設を地域の観光資源として活かすため、経済産業省が世界遺産登録を支援することを決定し、2009年1月に、「九州・山口の近代化産業遺産群」の一部として、世界遺産暫定リストに追加記載されている。

3. 軍艦島構造物群

1974年（昭和49年）の閉山時、狭い端島内に、約40の住宅、病院、学校、約30の炭鉱関連施設があり、そのうち鉱員のための住宅の多くはRC造であった。1916年（大正5年）に建設された30号棟は、日本初のRC造7階建（竣工時4階建）の高層住宅である。その後、長



写真1 軍艦島

屋を高層化したような16~20号棟（1918年（大正7年）竣工）など、次々に高層住宅が建設された。1945年（昭和20年）に北棟が竣工した65号棟は、終戦前後にわたって建設された端島で最大の集合住宅である。第二次世界大戦前後、日本国内で物資が不足しその統制が行われていたが、端島では例外的に建設が続けられていた。また、1967年（昭和42年）に建設された13号棟は、端島で最後に建てられたRC造の住宅である。このように約50年余の間、端島でRC造の住宅が建設されてきたことになる。

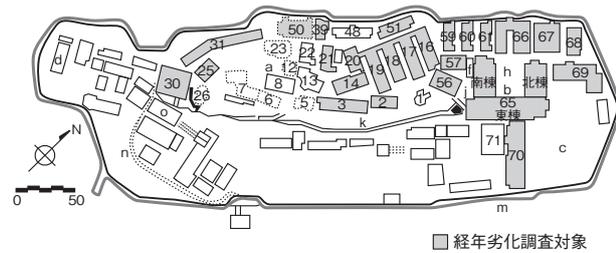


図1 軍艦島の構造物群²⁾

4. 経年劣化調査

長崎市は、世界遺産登録に向けて2011年に一般社団法人日本建築学会に「軍艦島構造物群の劣化調査」を依頼し、保存・補修の可能性を含めた活用方法を検討している。ここでは、同学会「軍艦島コンクリート構造物劣化調査ワーキンググループ（主査：野口貴文東京大学准教授）（以下、WG）」により行われた軍艦島構造物群の劣化調査結果をレビューする。

1) 構造部材の劣化度^{2,6,12)}

端島のRC造構造物は、建設後かなりの年月が経っており、さまざまな劣化現象が生じている。そこでWGでは、柱・梁部材を目視調査し、鉄筋腐食・錆汁の状況に基づき劣化度を評価している。劣化度は6段階（0～V）に分かれており、鉄筋にひび割れおよび錆汁が見られるものをグレードI、腐食した鉄筋が露出しているものをグレードIII、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とし、その中間的な劣化状態をそれぞれグレードIIおよびIVとしている（図2）。

部材ごとでは、16~20号棟（1918年（大正7年）竣工）の場合、屋外はもとより屋内においても劣化が著しい。17号棟は、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。18号棟は南側より北側の劣化が進行しているが、19号棟は北側より南側の劣化が進行している。海拔高度ごとでは、16~20号棟の劣化は海拔が高いほど進んでいるが、その北東側の構造物の劣化は、海拔が低いほど進んでいる。構造物ごとでは、16号棟の劣化は非常に進んでいるが海岸により近い51号棟（1961年（昭和36年）竣工）の劣化はほとんどない。

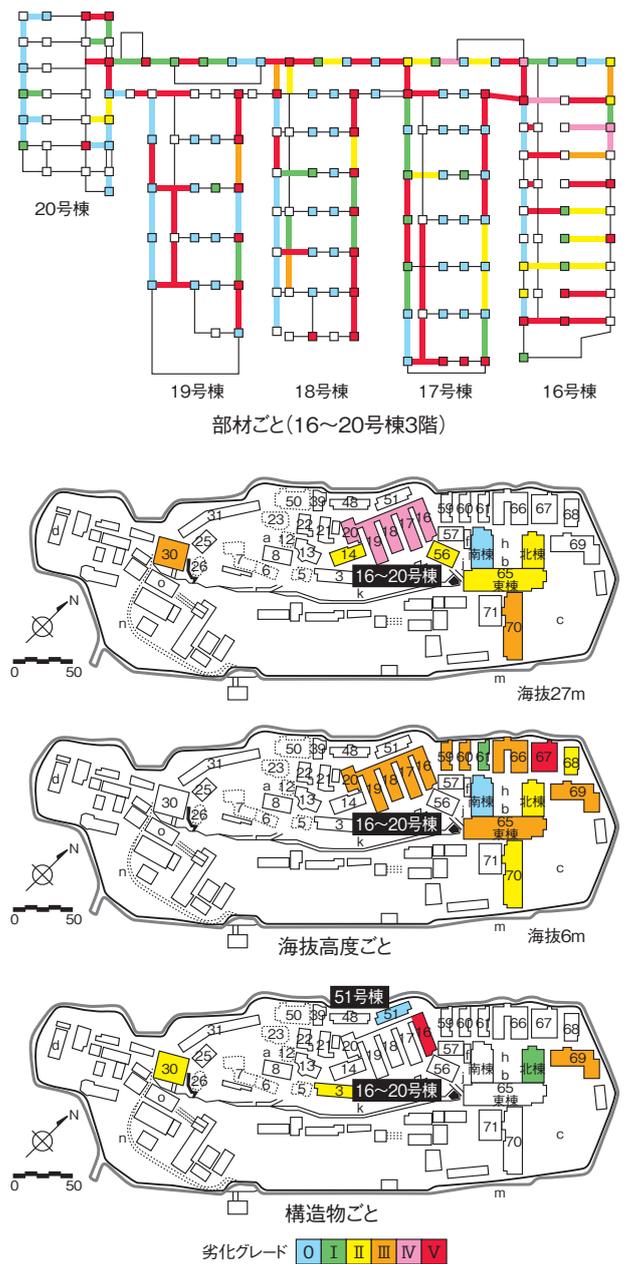


図2 劣化度調査結果^{2,6)}

このように軍艦島構造物群の経年劣化の進行は、部材ごと、海拔高度ごと、構造物ごとに大きく異なっている。

2) 外壁仕上材の健全度¹⁰⁾

外壁仕上材についても、構造部材と同様に、多くの箇所劣化現象が生じている。そこでWGでは、目視による剥落部の調査と、打診棒および赤外線サーモグラフィを併用した剥離部の調査により、剥落・剥離を含めた外壁仕上材の健全性を調査している。

外壁仕上材の劣化度に、年代別、方位などによる高低の傾向は認められず、全体的に極めて高い割合（最大剥落率57%（50号棟）、最大剥落率24%（31号棟））で剥離や剥落が生じており、現状のまま放置すると外壁仕上材が落下する可能性が高い状況にある。

3) コンクリートの塩分量^{3,4,6,11)}

鉄筋腐食の要因を考察するため、WGでは構造部材か

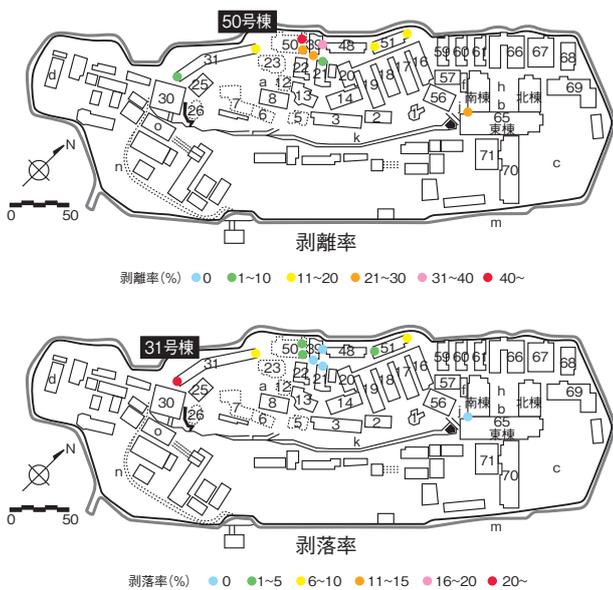


図3 外壁仕上材の健全度調査結果¹⁰⁾

ら抜き取ったコアの塩化物イオン量の測定を行っている。公益社団法人日本土木学会「コンクリート標準示方書(2007)」では、鉄筋の腐食発生限界の塩化物イオン量を 1.2kg/m^3 としているが、3号棟(1959年(昭和34年)竣工)を除いて、いずれの深さでもその値を大きく超えている(図4)。

(1) 内在塩分量

内在塩化物イオン量は建設年代と相関性が認められ、一般社団法人日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説(JASS 5)鉄筋コンクリート工事」の塩分規制が関係している(図5)。同書に従えば、骨材に海砂もしくは

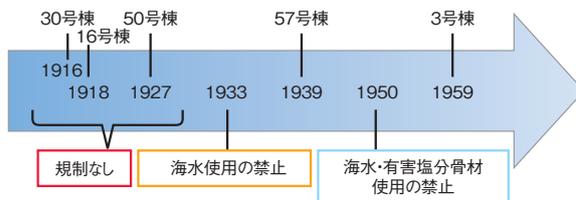


図5 建設年代とJASS 5の塩分規制の関係²⁾

海砂利(骨材量 $1,700\text{kg/m}^3$ (砂 700kg/m^3 + 砂利 $1,000\text{kg/m}^3$), 含水率10%(吸水率3% + 表面水率7%), 海水の塩分濃度4%と仮定)が使用されていた場合、約 $3\sim 7\text{kg/m}^3$ の塩分量となる。さらに海水(単位水量を 200kg/m^3 と仮定)が使用されていた場合、 8kg/m^3 の塩分量が加わり、 15kg/m^3 以上となることも考えられる。コンクリート表面から $60\sim 85\text{mm}$ の内部における塩化物イオン量を内在塩分量とすれば、30号棟(1916年(大正5年)竣工)では 15kg/m^3 を大きく上回るが、他棟では概ね 15kg/m^3 を下回っている(図4)。

(2) 中性化による塩分濃縮

塩化物イオン量は、中性化深さまでの領域で少なく、その内部で突出して高くなっている(図4)。これは、コンクリート中に固定化されていた塩分(フリーデル氏塩)がコンクリートの中性化により解離・濃縮されたものと考えられる。

なお、中性化深さはかぶり厚さに達していない場合が多い(図4)。特に50号棟(1927年(昭和2年)竣工)のようなタイル仕上げの場合、全く中性化していない上に、海沿いに位置しているにもかかわらず、塩化物イオン量の浸透も少ない。

(3) 飛来塩分量

コンクリート表面から中性化深さまでの塩化物イオン量が内在塩分量より高い棟も見られる(図4)。これは、飛来塩分により塩分が絶えずコンクリート内部に供給されていたと考えられる。

なおWGでは、モルタル試験体を1年間暴露し、飛来塩分量を調査し、構造物への影響を調査している。その結果、海拔高度が高くなるにつれて飛来塩分量は減少するが、劣化度に変化は見られないこと、飛来塩分量がほぼ同値の構造物でも劣化進行の度合いが異なっており、飛来塩分量と劣化度は必ずしも一致していないことが示されている。

以上の通り、軍艦島構造物群の塩分は、建設年代によって、①内在塩分、②中性化による塩分濃縮、そして③飛来塩分が複合的に関与して生じたものと考えられる。

4) 鉄筋の腐食度^{5,7,8,11)}

端島には長期間使用された構造物の中に、崩壊に至ったものとある程度健全性が保たれているものが混在している。そこでWGでは、劣化状況・原因の把握を目的として、比較的健全な柱・壁部材の鉄筋腐食状態を自然

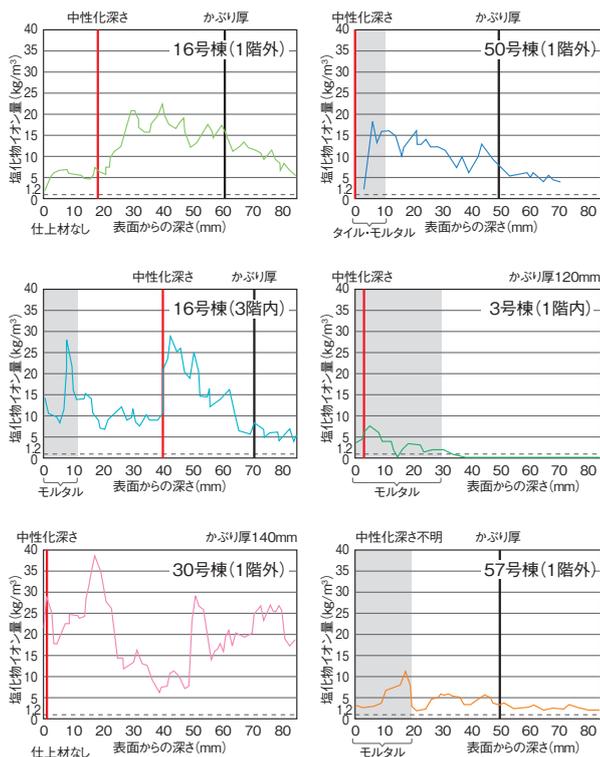


図4 塩化物イオン量分布と中性化深さ⁴⁾

電位法により調査している。その際、鉄筋の腐食判定は米国試験材料協会（ASTM）の判定値（ASTMC876-91）に従った。

たとえば65号棟（1945年（昭和20年）竣工）では、北棟および南棟の外柱は「腐食あり」、北棟の内柱は「不確定」、東棟の内柱は「腐食なし」、東棟の外柱は「不確定～腐食なし」の判定である。このことから、建物外周部の側柱の劣化は著しく、内柱では開口部からの距離あるいは開口部からの風が当たる位置によって鉄筋腐食に差が生じている。

このように岸壁が近く海風や飛沫が当たる外周面において、崩壊に至っていない部材であっても内部鉄筋の腐食が進行している。また、構造物の大部分は、開口部が開放されており、室内環境は外部に近いものと推定されるが、室内の部材に鉄筋が腐食していないものが残されており、開口部からの距離、位置により劣化状態が異なっている（図6）。



図6 鉄筋腐食調査結果^{5,8)}

通常、鉄筋腐食の主要因として、酸素（かぶり厚さ、透気係数、総細孔量）、水分（含水率）、塩化物イオン（鉄筋位置の塩化物イオン量）の3つが考えられる。そこでWGでは、塩化物イオン量やかぶり厚さの調査とともに、鉄筋腐食に影響する要因の一つであるコンクリートの内部湿度および質量含水率を調査している。そしてWGでは、端島で鉄筋腐食が進行しやすい環境をかぶり厚さ40mm以下、コンクリート内部湿度86%以上（含水率4～5%以上に相当）、内在塩化物イオン量1.2kg/m³以上とした。

また、鉄筋腐食に影響する要因のうち、内在塩化物イオン量とコンクリート内部湿度については、破壊検査を行わなければ正確な数値を得ることができない。そこでWGでは、非破壊検査的な手段で鉄筋腐食の可能性を予測する方法を検討している。その結果、コンクリート内部湿度と質量含水率に相関性が認められるため、その関係から鉄筋腐食の進行度合いを把握することができるとしている。

5) コンクリートの粗骨材⁹⁾

16～20号棟（1918年（大正7年）竣工）において、骨材起因と思われる表面劣化が見られた。そこでWGでは、使用骨材に関する概況調査を行っている。その結果、16

～20号棟のコンクリートには少なくとも4種類の粗骨材が使用され、その一部でアルカリシリカ反応による劣化や硫酸塩劣化が生じていることが明らかとなっている。6) 構造特性¹²⁾

これまで日本の構造物において、材料劣化と構造性能は往々にして切り分けて取り扱われてきた。しかし、竣工後数十年を経過するRC造構造物の延命化において、鉄筋腐食やかぶりコンクリート剥落などの材料劣化を構造特性と関連付けて検討することは、非常に重要であり、構造ヘルスマonitoringによる劣化評価・予測につながる可能性がある。

端島の南東部に採掘した石炭を運搬するためのベルトコンベアが存在し、現在、そのフレーム（鉄骨鉄筋コンクリート（SRC）造）が残っている。そのフレームは8つあるが、同じ外力環境にもかかわらず、劣化度の低い（ひび割れおよび錆汁が見られる）ものから高い（鉄筋が朽ちてその痕跡しか残らない）ものまであり、劣化状態が各々異なっている。そこで、段階的に材料劣化したベルトコンベアフレームの常時微動計測を行って、剛性低下率を評価するとともに、目視による劣化度と常時微動から得られる剛性低下の関連付けを試みている。

5. おわりに

本稿では、建設後100年近く経ち、40年以上放置されて究極的に劣化した軍艦島構造物群の劣化調査結果をレビューした。軍艦島構造物群は、炭坑閉鎖後40年間にわたり完全に放置された状態にあったため、劣化進行が著しく、寿命の終焉を迎えて自然崩壊に近い状態にあるものもある。このような状態で存在するRC造構造物は他にはなく、中性化・塩害の他、アルカリ骨材反応を生じている複合劣化現象も見られる。また、NTTグループが所有・専有する構造物で、現在建設後100年近く経つものではなく、今後長期間放置されるようなこともまずありえないため、最悪の場合の劣化状態を知るという意味で、非常に貴重なレビューとなった。

軍艦島構造物群の劣化は、建設年代、塩化物イオン量、飛来塩分量、温湿度環境、かぶり厚さ、補修履歴などが複合的に影響した結果として生じている。特に外壁仕上材の劣化は著しく、現状のまま放置すると外壁仕上材が落下する可能性が高い。一般に建設後40～50年経つRC造構造物では、外壁仕上材に剥離（浮き）は生じるが、その範囲はあまり広くなく、剥落箇所も限られている。しかし、軍艦島構造物群と同様、現状のまま放置されれば、鉄筋腐食によるひび割れ発生により外気と接する箇所の劣化進行が加速されるため、建設後50年以降の外壁仕上材の劣化は著しいと予測される。一方室内においては、塩分量が閾値を超えているにもかかわらず、鉄筋腐食が進行していない箇所が存在しており、建設年数

が経過するにつれ室内外で劣化進行に大きな差が生じるものと予測される。

軍艦島構造物群の劣化調査結果から判断すると、長期間放置された場合でも、構造体の経年劣化を直接原因に構造物が崩壊する可能性はそこまで高くない。通常、RC造構造物の寿命を中性化深さがかぶり厚さに達した時と定義して維持保全計画を検討するが、今後RC造構造物の長寿命利用に向けて、その考え方を現実に即して見直す必要があると考えられる。

また、軍艦島構造物群においてコンクリート内部湿度と質量含水率に相関性が認められ、コンクリート内部湿度から鉄筋腐食の危険度の将来的な変化を把握できることが示されている。さらに、目視調査による鉄筋腐食やかぶりコンクリート剥落などの材料劣化と常時微動計測から得られる剛性低下の関連付けを試みている。これらの知見や試みは、RC造構造物の適正な維持保全という観点で非常に重要であり、今後構造ヘルスマニタリングによる経年劣化の評価・予測につながる可能性が大いに期待される。

〔参考文献〕

- 1) 阿久井喜孝, 滋賀秀実: 軍艦島実測調査資料集 (大正・昭和初期の近代建築群の実証的研究), 東京電機大学出版局, 1984.3
- 2) 今本啓一, 野口貴文, 下澤和幸, 福山智子, 楠麻希: 軍艦島構造物群の劣化調査, その1 島内構造物群の概要と目視調査結果, 日本建築学会学術講演梗概集2012 (材料施工), pp.1205~1206, 2012.9
- 3) 当真嗣竜, 山田義智, 濱崎仁: 軍艦島構造物群の劣化調査, その2 軍艦島における飛来塩分量調査, 日本建築学会学術講演梗概集2012 (材料施工), pp.1207~1208, 2012.9
- 4) 楠麻希, 野口貴文, 下澤和幸, 今本啓一: 軍艦島構造物群の劣化調査, その3 EPMAによる塩化物イオン量分析, 日本建築学会学術講演梗概集2012 (材料施工), pp.1209~1210, 2012.9
- 5) 梅津裕二, 今本啓一, 野口貴文, 福山智子: 軍艦島構造物

群の劣化調査, その4 自然電位法による鉄筋腐食調査, 日本建築学会学術講演梗概集2012 (材料施工), pp.1211~1212, 2012.9

- 6) 楠麻希, 野口貴文, 山田義智, 今本啓一: 軍艦島構造物群の劣化調査, その5 暴露モルタルへの塩化物イオンの浸透と鉄筋腐食特性, 日本建築学会学術講演梗概集2013 (材料施工), pp.1203~1204, 2013.8
- 7) 今本啓一, 野口貴文, 山田義智, 楠麻希: 軍艦島構造物群の劣化調査, その6 環境劣化外力としての温湿度の評価, 日本建築学会学術講演梗概集2013 (材料施工), pp.1205~1206, 2013.8
- 8) 梅津裕二, 今本啓一, 野口貴文, 福山智子: 軍艦島構造物群の劣化調査, その7 自然電位法による鉄筋腐食分布および腐食進行調査, 日本建築学会学術講演梗概集2013 (材料施工), pp.1207~1208, 2013.8
- 9) 中村雄一, 寺西浩司, 野口貴文, 今本啓一, 平岩陸: 軍艦島構造物群の劣化調査, その8 骨材の概況調査, 日本建築学会学術講演梗概集2013 (材料施工), pp.1209~1210, 2013.8
- 10) 早野博幸, 山本一雄, 今本啓一, 野口貴文: 軍艦島構造物群の劣化調査, その9 外壁仕上げの健全性評価, 日本建築学会学術講演梗概集2013 (材料施工), pp.1211~1212, 2013.8
- 11) 楠麻希, 今本啓一, 野口貴文, 下澤和幸, 清原千鶴: 軍艦島構造物における鉄筋腐食評価の為の一検討, 日本建築学会関東支部研究報告集I, pp.65~68, 2014.2
- 12) 関新之介, 今本啓一, 楠浩一, 清原千鶴, 野口貴文: 軍艦島におけるベルトコンベアフレームの段階的劣化と構造物特性, 日本建築学会関東支部研究報告集I, pp.69~72, 2014.2



はやかわ あきら
早川 輝

耐震構造技術部係長
建築構造物の耐風・耐震に係るコンサルティング・調査業務に従事。中南米・カリブ、中東・アフリカにおける地震・洪水等の防災事業(ODA)に従事経験あり
プロフェッショナルエンジニア(PE) (Civil)

Synopsis

Review on Investigation of Deteriorations of Reinforced Concrete Structures Abandoned over Long Periods

Akira HAYAKAWA

This paper reviews the results of investigation of the deterioration of a collection of seriously degraded structures on Gunkan Island that are almost 100 years old and that have been left abandoned for more than forty years. Because these structures on Gunkan Island have been left completely abandoned since the closure of the coal mine there forty years ago, degradation has advanced conspicuously and they are now in a state close to natural collapse as they approach the end of their lives. There are no other RC structures in this state in existence, and, as well as carbonation and salt damage, a combination of degradation phenomena occurring due to alkali-aggregate reaction can also be observed. In addition, since, at the present time, none of the structures owned or under the exclusive ownership of the NTT Group are approaching 100 years since their construction and it is highly unlikely that such structures will be left unattended over prolonged periods of time in the future, this is an extremely valuable review from the standpoint of learning about the status of deterioration in a worst-case scenario.

The deterioration of the structures on Gunkan Island is occurring as the result of the combined effects of elements including the time they were built, the amount of chlorine ion, the amount of airborne salt content, the temperature-humidity environment, covering thickness and the history of repairs. Deterioration is especially marked on the finishing material on the outer walls and, if left in its current state, there is a strong possibility that the outer wall finishing material will fall off. Normally, in RC structures between 40 and 50 years old, outer wall finishing material may peel (separate), but this does not take place over a particularly wide area and places where peeling occurs are limited. However, it is predicted that if the structures were to be left in its current state as well as those on Gunkan island, deterioration of parts exposed to outside atmosphere would accelerate by cracking due to corrosion of concrete reinforcing bars, and that the rate of progress of deterioration of outside wall finishing material would become marked in the period since 50 years after construction. On the other hand, since, indoors, despite the fact that the amount of salt is beyond the threshold value, there are places where corrosion of concrete reinforcing bars has not progressed, it is predicted that the gap between the rates of advance of deterioration indoors and outdoors becomes significant with the passage of time.

Judging from the results of investigation of the deterioration of the structures on Gunkan Island, even if left abandoned for a prolonged period of time, the likelihood of structures collapsing as the direct result of structural degradation occurring with the passage of time is not very high. Ordinarily, in considering maintenance and preservation planning, the life of an RC structure is defined as the point at which the carbonation depth reaches the covering thickness, but looking at the long-term use of RC structures in the future, this way of thinking may need to be reviewed to reflect the reality.

Moreover, a correlation between the internal humidity of concrete and the mass water content has been recognized in the structures on Gunkan Island and this suggests that it may be possible to gain a picture of future changes in the risk of corrosion of concrete reinforcing bars from the internal humidity of concrete. Furthermore, attempts are being made to associate deterioration of materials through factors such as corrosion of concrete reinforcing bars and concrete covering peeling revealed by visual inspection and degraded rigidity obtained from micro-tremor measurements. Such knowledge and trials are extremely important for the standpoint of the proper maintenance and preservation of RC structures and high hopes are held that they can be linked in the future to assessment and prediction of deterioration with the passage of time through structural health monitoring.