

端島（軍艦島）における補修工法共通試験

今本啓一^{*1}・野口貴文^{*2}・岩波光保^{*3}・濱崎 仁^{*4}・兼松 学^{*5}

概要 端島（軍艦島）において実施されている補修工法の共通試験について報告する。長期間厳しい自然環境に曝され、極限まで劣化してしまった鉄筋コンクリート構造物が多数まとまった状態で存在しているのは、おそらく世界全体でも軍艦島において他には類を見ない。この島における補修工法の共通試験は今後のこの分野の技術開発に大きな進展をもたらすと考えられる。本稿は共通試験に至る経緯と2年間の暴露試験の概要について述べる。

キーワード：共通試験、補修、塩害、中性化

1. はじめに

軍艦島は長崎港から南西約19 kmの海上に浮かぶ、東西160 m、南北480 m、周囲1.2 kmの人工の島である（図-1）。正式名称は「端島」であり、その形が軍艦に似ていた（写真-1）ことから「軍艦島」と呼ばれるようになった。以下本報では、端島を軍艦島と記す。

軍艦島は明治23年（1890年）から三菱の経営により海底炭坑の島として開発が進められ、炭鉱の開発に伴い、従業員のための住宅建設が盛んに行われた。大正5年（1916年）に国内最初の鉄筋コンクリート造高層集合住宅である30号棟が建設され、その後は集合住宅、公共施設を含め70棟を超えるRC構造物が建設された。最盛期には人口が5000人を超え、高密度な住環境を有する島となったが、国の石炭から石油へのエネルギー政策の転換により、昭和49年（1974年）に閉山し、現在は無人島となっている。

小さな島に人々が高密度に生活していたことや、黎明期のRC造集合住宅群が残っていることから、軍艦島は文化財・観光資源として注目されており、その保存の可能性や方法の検討が行われている。本稿では本学会危急存亡状態のコンクリート構造物対応委員会（下記、委員構成）において所管する補修工法に関する共通試験の概要について述べる。

▶ 委員構成

委員長：野口貴文（東京大学）

副委員長：岩波光保（東京工業大学）

幹事：今本啓一（東京理科大学）

楠浩一（東京大学）

委員：審良善和（鹿児島大学）・兼松学（東京理科大学）・柁山健二（芝浦工業大学）・岸本一蔵（近畿大



図-1 端島（軍艦島）の位置



写真-1 軍艦島全景（長崎市より提供）

学）・齊藤成彦（山梨大学）・佐々木謙二（長崎大学）・下澤和幸・澁井雄斗（以上、日本建築総合試験所）・高谷哲（京都大学）・花岡大伸（金沢工業大学）・濱崎仁（芝浦工業大学）・皆川浩（東北大学）・向井智久（建築研究所）・横田優（横田DPC研究所）・内堀裕之・川島学（以上、三井住友建設）・砂川倫昭（共和電業）

*1 いまもと・けいいち／東京理科大学 教授（正会員）

*2 のぐち・たかふみ／東京大学 教授（フェロー会員）

*3 いわなみ・みつやす／東京工業大学 教授（正会員）

*4 はまさき・ひとし／芝浦工業大学 教授（正会員）

*5 かねまつ・まなぶ／東京理科大学 教授（正会員）

2. 軍艦島の歴史

江戸時代後期の文化7年(1810年)頃に軍艦島で石炭が発見された。その後、明治23年に三菱合資会社が島全体と鉱区の権利を買い取り、本格的な海底炭坑として操業が開始され。島には最盛期には約5000人超の人が暮らし、その人口密度は東京の約8～9倍とされる。この島において最もクリティカルであったのが水の供給である。この島における水の歴史は大きく3つに分けられ、

- ・蒸留水の時代(明治24年から昭和6年)：海水を蒸留して飲料水を確保。塩は外販。
- ・給水船の時代(昭和7年から昭和32年)：三島丸(235 ton)による一日1往復の給水。戦後は朝顔丸(298 ton)による一日3往復の給水。海が荒れると欠航。
- ・日本初の海底水道(昭和32年10月)：長崎市三和町から高島・端島をつなぐ海底水道の敷設。一日5000 tonの送水可能。

となる。

写真-2は炭鉱夫が仕事の後に共同風呂に入っているところであるが実は、給水船欠航時は共同浴場は海水を温めたものを用いていた。この時は風呂上がりの最後に水を掛け流していたという。



写真-2 炭鉱夫の入浴状況(長崎市より提供)

3. 島内構造物群の状況

島内において構造物の柱、梁部材を目視評価した。損傷は主として鉄筋腐食・錆汁の状況を5段階で評価した(表-1)。鉄筋にひび割れおよび錆汁が見られるものをグ

表-1 劣化グレード

一般的な腐食(損傷)グレードの例		軍艦島での腐食(損傷)グレード	
損傷度	損傷状況	損傷度	損傷状況
無	損傷が認められない	I	表面のひび割れ+錆汁
I	ごく軽微なひび割れ錆汁	II	(中間の状況)
II	ひび割れ、錆汁、剥離等が部分的	III	腐食した鉄筋が露出
III	ひび割れ、錆汁、剥離、剥落等が連続的	IV	(中間の状況)
IV	鋼材の露出や破断、コンクリートの断面欠損等	V	鉄筋の痕跡はあるが朽ちている(存在しない)

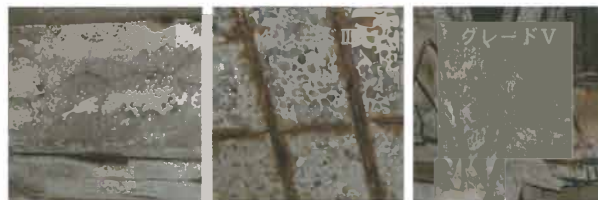


図-2 劣化グレード

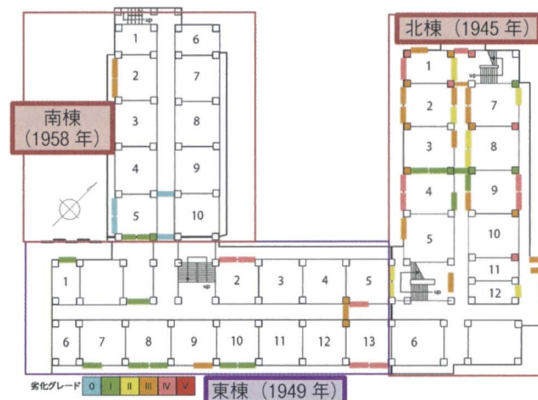


図-3 65号棟の劣化グレード



写真-3 65号棟(長崎市より提供)

Round Robin Test for Repair Methods at Hashima Island

By K. Imamoto, T. Noguchi, M. Iwanami, H. Hamasaki and M. Kanematsu

Concrete Journal, Vol.58, No.4, pp.281~288, Apr. 2020

Synopsis Round robin test for repair methods at Hashima was performed by technical committee of Japan Concrete Institute. Reinforced concrete structures in Hashima would be the most extreme deteriorated ones in the world. Hence, round robin test for repair methods would be a good opportunity to consider their conservation of the concrete structures. The round robin test will contribute improvement of repair method for reinforced concrete structures. This paper reports on results of 2-year exposure test at Hashima Island.

Keywords : Round robin test, Repair, Chloride attack, Carbonation

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とした（図-2）。また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。

65号棟3階の劣化度分布図を図-3，外観を写真-3に，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-4，外観を写真-4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築物であり，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。北棟が1945年，東棟が1949年そして南棟が1958年の順に建設されているが，特にもっとも古い北棟とその約4年後に建設された南棟については建設年代の開き以上の

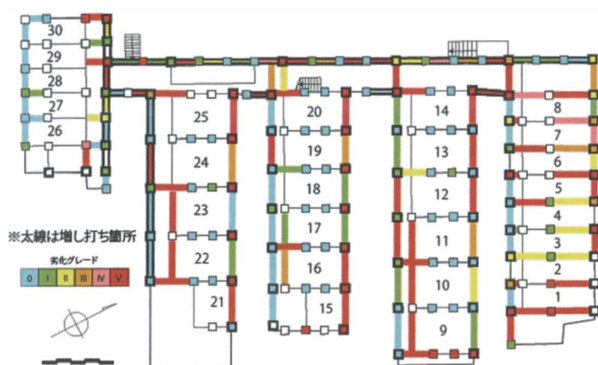


図-4 日給社宅の劣化グレード



写真-4 日給社宅（長崎市より提供）



写真-5 日給社宅における剥落部と補修部

劣化の違いが見られる。

日給社宅（写真-4）では，16号棟（右側の棟）はその他の棟と比較して構造体の劣化が進行している。特に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比較的少ない。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られる。一方，柱よりも梁において劣化の進行が著しい範囲があり，また同じ環境下でも隣り合う部材に劣化度の違いがある。これは一見健全に見えた部分でも写真-5に示すように，モルタルによる断面修復が行われた箇所である。つまり，コンクリートの剥落は人々が生活していた当時から発生していたと考えられる。

4. 軍艦島構造物群のコンクリートの特徴

4.1 調査

16号棟5Fの建設時のコンクリートと，後年増し打ちされたと思われる3Fコンクリートについて，そのセメントペーストの比較を写真-6に示す。写真中のCは未水和のセメント粒子，Bは炭素を表す。5Fコアのセメントペースト中には未水和セメントの粒子が見られた。水和した部分を含めると，セメント粒子の大きさは50～100 μm 程度と思われ，増し打ちされた3Fと比較すると，大きい粒子であった。また，水和したセメントペーストの組織は，緻密な3Fコアと比較すると粗になっている傾向が認められた。以上より，5Fと3Fのコンクリートで使用されたセメントは同一のものではなく，3Fの方が後に製造されたものと予想され，増築で増し打ちされたコンクリートであることを裏付けるものである。

顕微鏡観察（写真-6）より，両方のコアのセメントペーストには，フライアッシュや高炉スラグ微粉末などは認められず，使用セメントはポルトランドセメントであった。

16号棟からコア試料を採取し，日本非破壊検査協会規格NDIS 3422：2002（グルコン酸ナトリウムによる硬化コンクリートの単位セメント量試験方法）に従ってセメント量を推定した。その結果，単位セメント量の推定値は253 kg/m^3 であり，最近の一般的なコンクリートの配（調）合と比較すると単位セメント量は小さいものであった。また，コア断面から確認できる粗骨材の最大寸法は

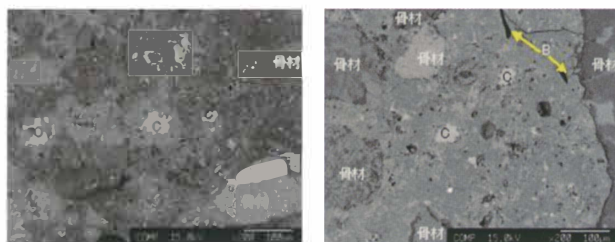


写真-6 16号棟5F（左）と3F（右）のセメントペーストの反射電子像

30 mm 程度であり、単位粗骨材量は大きめであることが推察される。既往の強度試験では、16号棟のコア強度が200 kgf/cm²であったことが報告されており、水セメント比は70～80%程度であると推測されることから、単位水量は180～200 kg/m³となる。

4.2 塩化物量

図-5に示した箇所においてφ80 mmのコアを採取し、EPMAによる塩化物イオン量測定を行った。EPMA画像により、コア断面で深さ1 mm毎の区間にあるピクセルの塩化物イオン量の平均値を計算し、そのプロファイ

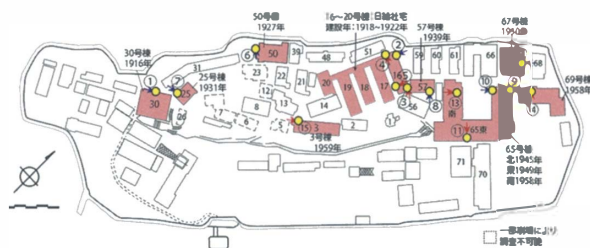


図-5 コア採取位置

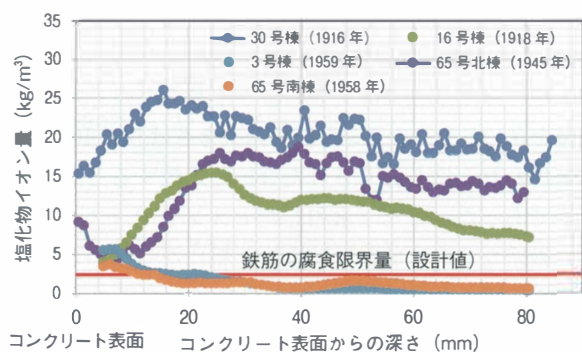


図-6 コンクリート中の塩化物イオン量の分布

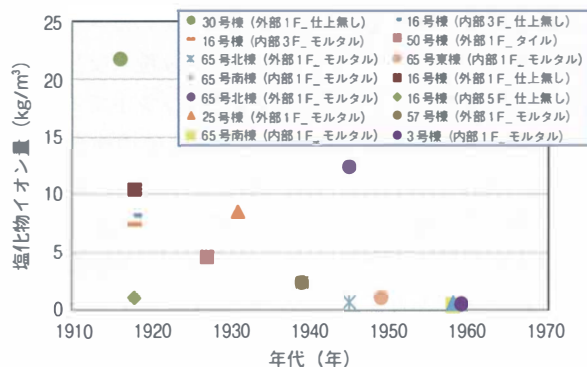


図-7 表層 60～85 mm の塩化物イオン量と建設年代との関係

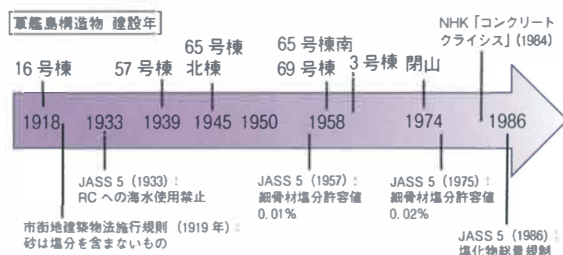


図-8 軍艦島構造物の建設年代と塩分規制の変遷

ルを得た。

塩化物イオン量分布の測定結果を図-6に、建設年と内在塩化物イオン量との関係を図-7に、構造物の建設年と塩分規制の変遷を図-8に示す。図-6にみられるように65号棟、69号棟、3号棟、16号棟5階以外は多量の塩化物イオンの存在が確認された。図-3の65号棟において、北棟と南棟に建設年代以上の劣化の差がみられるのは、この図に示されるように、北棟における多量の塩化物イオン量のためであろう。中性化による塩分濃縮や骨材量の影響による分布のばらつきがあるが、ここでは表面から60～85 mmにおける塩化物イオン量の平均値をコンクリートの内在塩分と仮定した。図-7にみられるように内在塩化物イオン量は初期の構造物において高く、時代とともに減少していることがわかる。塩化物イオン量は大きく3つに分けられる。すなわち、

- ・10 kg/m³以上のもの (30号棟、16号棟、65号北棟)
- ・5～10 kg/m³ (16、25、50、57号棟)
- ・0.5～1.0 kg/m³ (65号南棟、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: 700 kg/m³+1 000 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) が使用されていた場合、約3～7 kg/m³の塩化物イオン量となる。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)、約8 kg/m³の塩化物イオン量に加わり10 kg/m³以上となることが推測される。

コンクリートに対する塩分規制については古くは1919年より存在していたが (図-8)、まだこの塩害問題に対する意識が希薄な時代でもあり、先に述べたように人間が入る風呂ですら海水を使っていた時代において、コンクリートに一時的に海水や海砂が使用されていた可能性もあったと思われる。

5. 共通試験

5.1 共通試験の概要

本共通試験では各種の劣化グレード (写真-7) に応じた腐食グレードを設定し (表-2)、これに対する補修工法を適用することとした。配 (調) 合は、前述の分析結果を踏まえ、水セメント比79.1%、単位水量200 kg/m³およ



写真-7 軍艦島における劣化グレード

表-2 共通試験で設定した腐食グレード

劣化グレード	劣化状況		対象となる補修工法
Ⅰ	コンクリート	ひび割れはない、もしくは鋼材腐食によらない軽微なひび割れが発生している状態	劣化（鉄筋の腐食）の進行を抑制（緩やかに）できる工法
	鋼材	鋼材の腐食は開始していない、もしくは軽微な腐食（質量減少率3%程度以下）が発生している状態	
Ⅱ	コンクリート	鋼材腐食によるひび割れが発生し、錆汁等が見られる状態	劣化（鉄筋の腐食）の進行を抑制（緩やかに）できる工法 又は劣化（鉄筋の腐食）の進行を停止できる工法
	鋼材	鋼材は明らかに腐食している状態（質量減少率3～10%程度）	
Ⅲ	コンクリート	鋼材の腐食に伴うかぶりコンクリートの剥落や鋼材の露出が生じている状態	劣化（鉄筋の腐食）の進行を停止できる工法
	鋼材	鋼材（補強筋）の断面欠損が大きい状態（質量減少率10%程度以上）	

表-3 コンクリートの調合

W/C	s/a	単位使用量 (kg/m³)				Cl ⁻ (kg/m³)
		W	C	S	G	
79.1	54.0	200	253	1 004	877	5.0

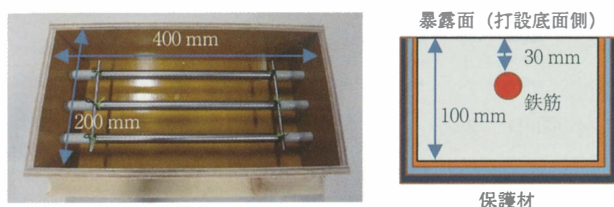


図-9 試験体（左：グレードⅢ、右：グレードⅠ・Ⅱ）



写真-8 共通試験における劣化グレードⅡ



写真-9 共通試験における劣化グレードⅢ

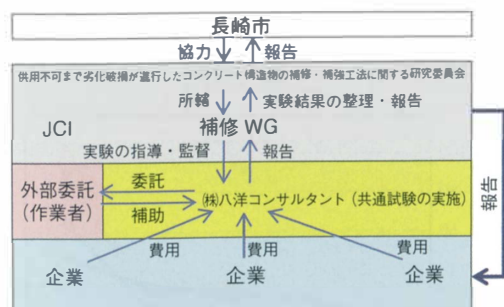


図-10 共通試験のスキーム

表-4 劣化グレードⅠの補修工法

記号	補修種別	工法名称
I-1	シート貼付	表面被覆工法 A（透明シート貼付け）
I-2	塗布	塗布含浸工法 A（ケイ酸塩系）
I-3	塗布	表面含浸工法 B（シラン系）
I-4	塗布	表面含浸工法 C（ケイ酸塩系・シラン系）
I-5	塗布	表面含浸工法 D（ケイ酸塩系）
I-6	塗布	表面含浸工法 E（亜硝酸リチウム・ケイ酸塩系）
I-7	塗布	表面含浸工法 F（シラン系）
I-8	塗布	表面含浸工法 G（シラン系）
I-9	電気防食（外部電源方式）	電気防食工法 A（外部電源・チタンリボンメッシュ陽極方式）
I-10	塗布	表面含浸工法 H（シラン系）
I-11	電気防食	電気防食工法 B（外部電源・面状2次陽極簡易方式）
I-12	塗布	表面含浸工法 I（ケイ酸塩系・シラン系）
I-13	塗布	表面含浸工法 J（亜硝酸カルシウム・シラン系）
I-14	塗布	表面含浸工法 K（ケイ酸塩系）
I-15	塗布	表面含浸工法 L（シラン・シロキサン系）
I-16	塗布	表面含浸工法 M（シラン・シロキサン系）
I-17	塗布	表面含浸工法 M'（シラン・シロキサン系）
I-18	塗布	表面含浸工法 N（シラン・シロキサン系）
I-19	塗布	表面被覆工法 B（透明ウレタン樹脂）
I-20		リファレンス
I-21		リファレンス

表-5 劣化グレードⅡの補修工法

Ⅱ-1	注入	注入工法 A（エポキシ樹脂・内圧充填接合補強型）+ 表面被覆工法 C（無機系撥水材）
Ⅱ-2	ひび割れ注入	注入工法 B（塩分吸着型エポキシ樹脂）
Ⅱ-3	電着工法	電着工法 A
Ⅱ-4	注入 + 塗布	圧入工法 A（亜硝酸リチウム）+ 表面含浸工法 O（ケイ酸塩系）
Ⅱ-5	電気防食（外部電源方式）	電気防食工法 A（外部電源・チタンリボンメッシュ陽極方式）
Ⅱ-6	塗布	表面含浸工法 H（シラン系）
Ⅱ-7	電気防食	電気防食工法 B（外部電源・面状2次陽極簡易方式）
Ⅱ-8	注入 + 塗布	注入工法 C（シラン系）+ 表面含浸工法 I（ケイ酸塩系・シラン系）
Ⅱ-9	注入 + 塗布	注入工法 D（セメントスラリー）+ 表面含浸工法 J（亜硝酸カルシウム・シラン系）
Ⅱ-10	塗布	塗布含浸工法 P（ケイ酸塩系）
Ⅱ-11	断面修復	断面修復工法 A（犠牲陽極材埋設）
Ⅱ-12		リファレンス
Ⅱ-13		リファレンス

表-6 劣化グレードⅢの補修工法

Ⅲ-1	注入	圧入工法 A（亜硝酸リチウム）+ 鉄筋塗装工法 B（亜硝酸リチウム混入型）
Ⅲ-2	電気防食（外部電源方式）	電気防食工法 A（外部電源・チタンリボンメッシュ陽極方式）
Ⅲ-3	電気防食	電気防食工法 B（外部電源・面状2次陽極簡易方式）
Ⅲ-4	断面修復	電気防食工法 C（埋設型流電陽極方式）
Ⅲ-5	塗布	鉄筋塗装工法 A（素地調整軽減型塗料）
Ⅲ-6		リファレンス
Ⅲ-7		リファレンス

いては、1 mm 以上のひび割れが発生後にかぶりコンクリートを除去し、塩水を噴霧して鉄筋の腐食を促進させた。

作製した試験体を写真-8（グレードⅡ）および写真-9（グレードⅢ）に示す。共通試験は図-10に示すスキームで実施することとし、各グレードに対して表-4～表-6に示す補修工法を適用した。暴露場所は70号棟グラウンド前にある69号棟の屋上（図-5参照。現在は70号棟グラウンド前に移設）とし、2016年12月に暴露を開始した（写真-10）。

び塩化物イオン混入量 5 kg/m^3 とした（表-3）。

試験体については図-9に示すものを用い、定電流（750 mA 程度）による電食を行い、グレードⅢの試験体につ



写真-10 試験体設置状況（当時）



グレード I



グレード II



グレード III

写真-11 補修試験体の一例



I-20: リファレンス（屋外）



I-21: リファレンス（屋内）

写真-12 リファレンス（グレード I）の状況

補修工法の一例として、グレード I は表面含浸材工法、グレード II はひび割れ注入工法、グレード III に対しては断面修復 + 電気防食工法が見られた（写真-11）。

5.2 暴露 2 年目での状況（グレード I）

リファレンス試験体の外観を写真-12 に示す。

上記リファレンス試験体に示されるように暴露に伴うひび割れの発生は屋外において先行する結果となった。一方、図-11 に示すように、予防保全的補修（主として

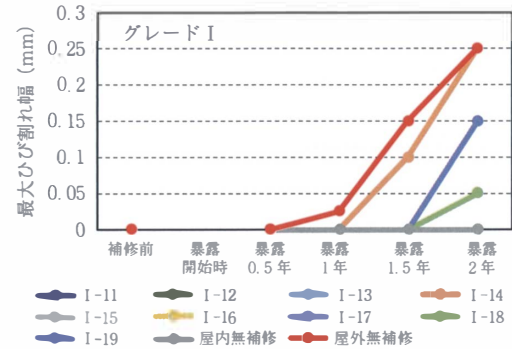
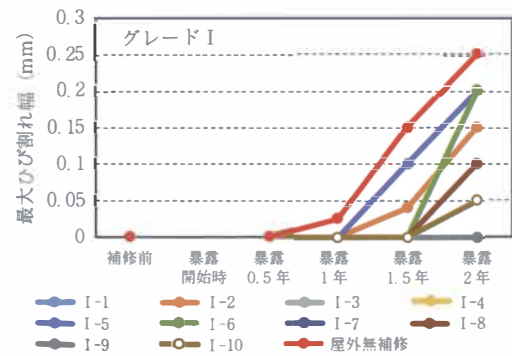


図-11 グレード I におけるひび割れ発生・進展状況

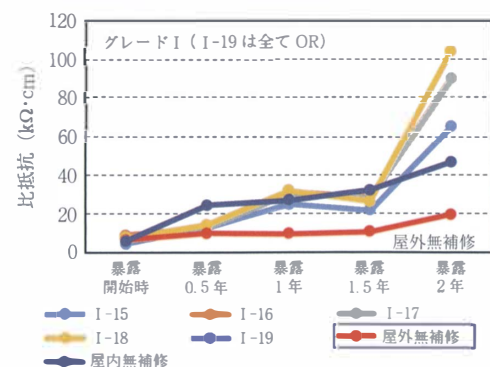
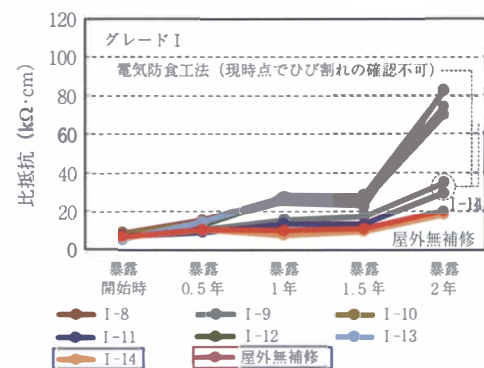
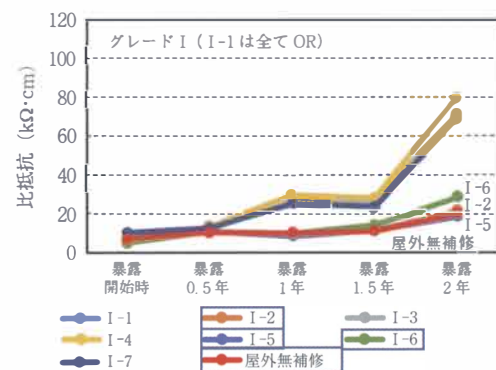


図-12 グレード I における比抵抗の変化

表-7 劣化グレードⅠの補修工法（表-4の再掲）

記号	補修種別	工法名称
I-1	シート貼付	表面被覆工法 A (透明シート貼付け)
I-2	塗布	表面含浸工法 A (ケイ酸塩系)
I-3	塗布	表面含浸工法 B (シラン系)
I-4	塗布	表面含浸工法 C (ケイ酸塩系・シラン系)
I-5	塗布	表面含浸工法 D (ケイ酸塩系)
I-6	塗布	表面含浸工法 E (亜硝酸リチウム・ケイ酸塩系)
I-7	塗布	表面含浸工法 F (シラン系)
I-8	塗布	表面含浸工法 G (シラン系)
I-9	電気防食 (外部電源方式)	電気防食工法 A (外部電源・チタンリボンメッシュ 陽極方式)
I-10	塗布	表面含浸工法 H (シラン系)
I-11	電気防食	電気防食工法 B (外部電源・面状2次陽極簡易方式)
I-12	塗布	表面含浸工法 I (ケイ酸塩系・シラン系)
I-13	塗布	表面含浸工法 J (亜硝酸カルシウム・シラン系)
I-14	塗布	表面含浸工法 K (ケイ酸塩系)
I-15	塗布	表面含浸工法 L (シラン・シロキサン系)
I-16	塗布	表面含浸工法 M (シラン・シロキサン系)
I-17	塗布	表面含浸工法 M' (シラン・シロキサン系)
I-18	塗布	表面含浸工法 N (シラン・シロキサン系)
I-19	塗布	表面被覆工法 B (透明ウレタン樹脂)
I-20		リファレンス
I-21		リファレンス

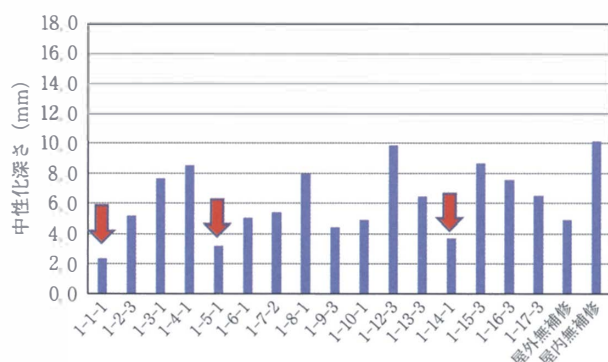


図-13 グレードⅠにおける各種工法の中性化深さ

表面含浸材)を行ったケースにおいても鉄筋に沿うひび割れが発生するものも見られ、暴露2年目においては0.2mm前後のひび割れ幅となった。

一方、比抵抗の変化を図-12に示す。比抵抗は供試体打設面底面において Wenner 法により測定したものであるが、比抵抗が経過年数とともに大きくなるものとそれほど変化しないものの2タイプが見られた。電気防食工法である I-9 および I-11 以外について、ひび割れが見られたものの凡例を枠囲いで示しているが、ひび割れが発生しているものは比抵抗が小さい(含水量が多い)傾向にあり、塩分が内在しかつ屋外に暴露されるケースにおいては水分の浸透を抑制することが重要であることが伺える。

一方、本グレードⅠにおける中性化の進行状況を図-13に示す。図に示されるように、主にケイ酸塩系の含浸材において中性化が抑制されていることが見られ、このように試験体の劣化因子の内在状況と外的な劣化要因に応じた補修工法の使い分けが有効であることが推察される。



II-12:リファレンス(屋外)



II-13:リファレンス(屋内)

写真-13 リファレンス(グレードⅡ)の状況

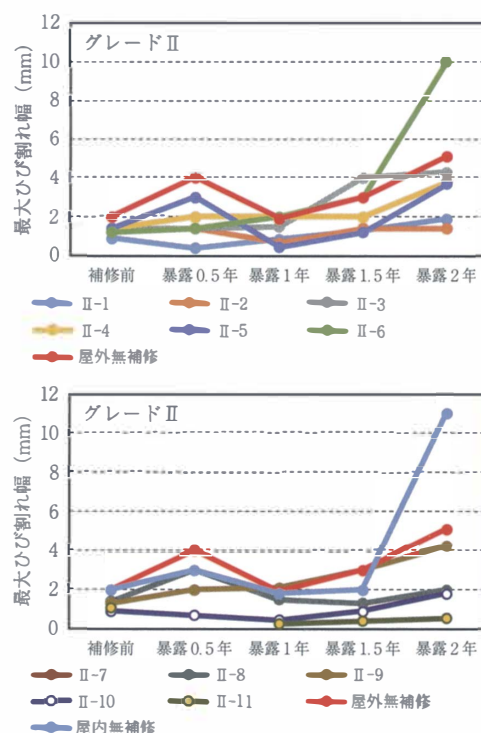


図-14 グレードⅡにおけるひび割れ進展状況

5.3 暴露2年目での状況(グレードⅡ)

リファレンス試験体の外観を写真-13に示す。

上記リファレンス試験体に示されるように、暴露に伴う鉄筋の腐食性状は屋外において顕著となる結果となった。

図-14にみられるように、グレードⅡにおいては多くの供試体においてひび割れ幅が徐々に進展する傾向が認められた。特に「屋内無補修(写真-12)」においては錆汁の発生は認められなかったがひび割れ幅の進展は顕著であった。

一方比抵抗の変化を図-15に示す。

上の図に見られるように、屋内の試験体およびシラン系含浸材を表面に塗布した試験体の比抵抗は比較的高い結果となったが、概して、グレードⅠと異なり、比抵抗と腐食の相関は必ずしも高くなかったが、今後さらに暴露データを集積して検討を進める必要がある。

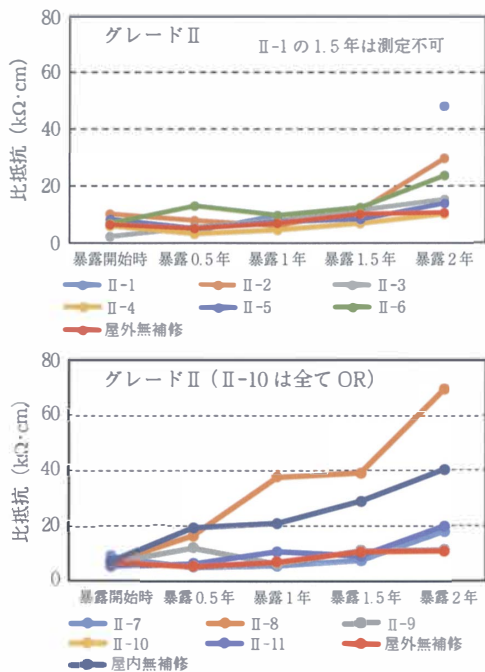


図-15 グレードⅡにおける比抵抗の変化

6. 端島における共通試験の今後の展開

委員会では、補修・補強方法選定の考え方として、「a 建築物としての保存優先度」、「b 部材の視認性」を柱とする考え方を提案した。優先度と視認性について、

a 建築物としての保存優先度：

- ①保存対象である（将来、保存対象になり得るものを含む）
- ②保存対象として優先度が低い
 - ②-1 建築物としての高い価値が認められるが、技術的・経済的に保存が極めて困難
 - ②-2 建築物としての価値が相対的に低い

b 部材の視認性：

- ①部材を視認できる
 - ①-1 部材全体を視認できる
 - ①-2 部材の一部を視認できる
- ②部材を視認できない、の組合わせとして、
 - a①b①（保存対象，視認可）：オーセンティシティを必ず確保，可逆性を必ず確保
 - a①b②（保存対象，視認不可）：オーセンティシティの確保は不要，可逆性を可能な限り確保
 - a②b①（保存非対象，視認可）：オーセンティシティ

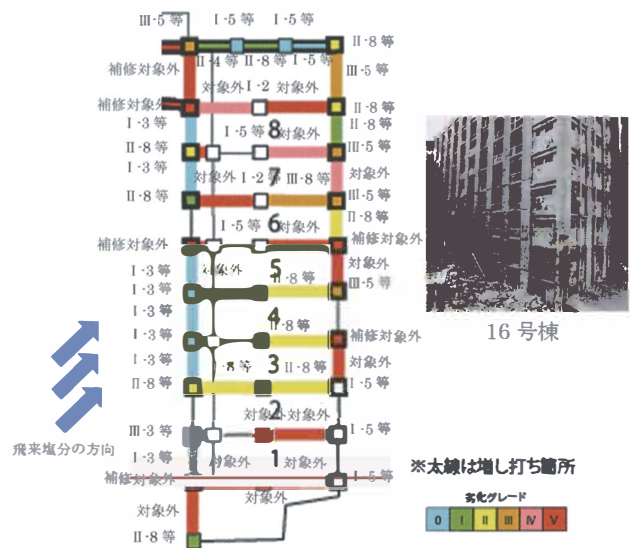


図-16 16号棟（上写真）の補修工法の案の一例

を可能な限り確保，可逆性の確保は不要

a②b②（保存非対象，視認不可）：オーセンティシティの確保は不要，可逆性の確保は不要

とするものである。この考え方に基づくと例えば屋外面では水分の浸透を抑制する工法，屋内や視認できない部分では中性化を抑制する工法や断面修復工法などの使い分けなどが考えられる（図-16）。

7. おわりに

長期間厳しい自然環境に曝され、極限まで劣化してしまった鉄筋コンクリート構造物が多数まとまった状態で存在しているのは、おそらく世界全体でも軍艦島において他には類を見ない。時々「軍艦島は保存できるのか？」、「この共通試験はその役に立つのか？」と聞かれるが、「今は分からない」と答えている。ただし、究極の構造物を前にした共通試験から新たな知見が生まれることは間違いなく、この島がコンクリートの耐久性・維持管理分野の研究のメッカになることを期待して止まない。

謝 辞 本稿の写真は全て長崎市の特別な許可を得て掲載している。目視調査の取りまとめは楠麻希さん（当時大学院生）、4.1節のSEM分析は太平洋セメント早野博幸氏、共通試験の実施にあたっては多くの学生諸氏のご協力を得た。ここに深謝の意を表する。