

論文 外観変化を考慮した鉄筋腐食に対する補修工法の検討および評価

望月 裕馬*1・濱崎 仁*2・澁井 雄斗*3・徳納 武使*4

要旨：RC 造の歴史的構造物の補修においては、外観変化を最小限に抑えつつ、鋼材腐食を抑える補修工法が必要とされる。本論文では、長崎県端島で行っている亜硝酸リチウムを用いた補修試験体の屋外暴露試験について、色差や光沢度、ひび割れ幅等による外観変化の評価、自然電位および質量減少率などによる鉄筋腐食の評価結果について報告する。本論文で提案した工法について、外観変化が少なく鋼材腐食の抑制効果を有することが確認された。また、3D スキャナを用いた鋼材腐食の進展の新たな評価方法について提案した。
キーワード：補修工法、鋼材腐食、亜硝酸リチウム、外観変化、電気化学的測定、三次元計測

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の歴史的構造物の補修を行う場合、補修後の外観変化を最小限に抑えつつ鋼材腐食に対して有効な補修を施す必要がある。近年、鉄筋腐食を抑制し、外観変化の少ない補修技術として亜硝酸リチウムを用いた補修工法が提案されているが、RC 構造物の劣化状況や周辺環境を踏まえた腐食抑制効果を実証した知見は少ない。現在著者らは長崎県端島（以下、軍艦島）において外観変化を考慮した亜硝酸リチウムを用いた補修工法を検討し、屋外暴露試験による評価を行っている。本論文では、これらの試験体について色差や光沢度、ひび割れ幅などの補修後の外観変化の評価、自然電位および質量減少率などの鉄筋腐食に関する評価、3D スキャナを用いた鋼材腐食の進展の三次元的な評価の結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 暴露試験の概要

暴露試験体は、軍艦島のような厳しい塩害環境下における RC 造建築物の劣化状況および劣化要因の強さ^{1),2)}などを参考に、表-1 に示すような 3 段階の劣化グレードの試験体（グレードⅠ・Ⅱ：W×D×H=150×500×100(mm)，グレードⅢ：200×400×100(mm)）を作製し、これを補修前の試験体とした。暴露試験体のコンクリートの調合を表-2 に示す。軍艦島の RC 造建築物の強度および飛来塩分を想定し、塩化物イオン量 5kg/m³ を外割で混入させた。28 日標準養生の圧縮強度は 26.4N/mm² であった。

試験体にはφ16mm の磨き棒鋼を、グレードⅠおよびⅡは 1 本、グレードⅢは 3 本をかぶり厚さ 30mm になるように埋設した。また、グレードⅡおよびグレードⅢの試験体は、7 日間 3%食塩水の浸漬を実施し、過飽和塩化

カリウム溶液による塩橋を作製し、積算電流量 (60Ahr)、電流値 (0.5-0.8A) による電気腐食を実施した。腐食の程度について、グレードⅡはひび割れ幅が 1mm 程度を目標とし、グレードⅢはかぶりコンクリートがはく落する直前の状態を目標とした。また、暴露面を 1 面とするため、暴露面以外の面にはエポキシ樹脂で被覆し、劣化因子の侵入を防止した。暴露試験体の設置場所は、試験体個々の環境条件に差が生じないように周囲を建物に遮られていない軍艦島島内 69 号棟 (端島病院) の屋上 (地上約 8m, 海拔 17m, 海岸からの距離約 50m) とした。暴露試験は 2016 年 10 月より開始し、10 年間行う予定である。

表-1 暴露試験体の劣化グレード




グレード	劣化状態	
Ⅰ	鋼材の腐食はしていないもしくは軽微な腐食が発生している状態	
Ⅱ	鋼材に腐食が起きており、鋼材腐食によるひび割れが生じている状態	
Ⅲ	鋼材の断面欠損が大きく、コンクリート剥離や鋼材露出が生じている状態	

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				Cl ⁻ (kg/m ³)
		W	C	S	G	
79.1	54	200	253	1004	877	5.0

*1 芝浦工業大学大学院理工学研究科建設工学専攻 修士課程 (学生会員)

*2 芝浦工業大学建築学部建築学科 教授 博 (工) (正会員)

*3 (一財) 日本建築総合試験所 (正会員)

*4 (一社) コンクリートメンテナンス協会

2.2 補修仕様

暴露試験体の補修仕様を表-3に示す。歴史的建造物の補修を行う場合に考慮すべき点として、本研究では「高い防錆効果」、「外観変化の抑制」、「施工の簡易性」の3つの要素を考慮した。補修工法は、著者らが実施した既往の研究³⁾において外観変化を抑制しつつ腐食抑制効果を有することが確認されている亜硝酸リチウムを用い、劣化のグレードおよび補修の方針によって、他の材料との組み合わせや仕様を変えたものとした。試験体は各補修工法で3体ずつ、無補修は2体ずつ試験体を作製した。

2.3 測定方法

(1) 外観変化の評価

暴露面の外観変化の評価を行うため、半年ごとに JIS Z 8781-4 に基づき $L^*a^*b^*$ 表色系の色差および JIS Z 8741 に基づき光沢度の測定を行った。 $L^*a^*b^*$ を補修前の数値を基準として算出した色差 (ΔE) を求めた。 ΔE の算出は(1)式を用い、補修仕様ごとの ΔE の比較・考察を行った。

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2} \quad (1)$$

ΔL^* : 明度 (L^*) の差

Δa^* : (-) 緑～ (+) 赤の色度 (a^*) の差

Δb^* : (-) 青～ (+) 黄の色度 (b^*) の差

ひび割れ幅の計測は、クラックスケールを用いた。計測箇所は予め定めた5箇所とし、その平均値を試験体のひび割れ幅として記録し、補修仕様ごとの比較・考察を行った。

(2) 表面含水率の測定

暴露面の含水率の評価を行うため、静電容量式の含水率計を用いて試験体表層部の含水率を測定した。測定箇所は予め定めた4箇所とし、その平均値を試験体の含水率として記録し、補修仕様ごとの比較・考察を行った。

(3) 自然電位の測定

試験体中の棒鋼に取り付けたリード線を用い、銅硫酸銅電極を用いて自然電位の測定を行った。自然電位法の適用範囲は、一般にかぶりコンクリート部分にひび割れが生じる以前の初期の腐食劣化の診断に有効であるとされているため、本研究では図-1のようにひび割れの発生している暴露面に対して反対側のエポキシ樹脂保護面から測定を行った。測定は半年に一度実施し、測定時以外は測定箇所をアクリル板で覆い暴露面以外からの劣化因子の侵入を防いだ。

(4) 質量減少率の算出

暴露1年後において、補修仕様ごとに1体ずつ試験体を回収し、鋼材を取り出した。その後、クエン酸水素二アンモニウム10%水溶液に2-ベンゾチアゾールチオール

1%アルコール溶液を添加し作製した溶液中に、取り出した鉄筋を4日間浸漬し除錆し、(2)式より質量減少率を算出した。

$$M = \frac{A-B}{A} \times 100 - W_i \quad (2)$$

M : 質量減少率 (%)

A : 腐食前鋼材質量

B : 除錆後鋼材質量

W_i : 暴露開始時点の質量減少率 (%) (グレード I :0.26
グレード II :6.55% グレード III :7.27%)

表-3 暴露試験体の補修仕様

グレード	記号	補修方針	補修仕様
I	1-1	高い防錆効果	LiNO ₂ 圧入+ケイ酸塩系表面含浸
	1-2	外観変化の抑制	LiNO ₂ 圧入
	1-3	施工の簡易性	LiNO ₂ 表面塗布
	N1	リファレンス	無補修
II	2-1	高い防錆効果	LiNO ₂ 圧入+ケイ酸塩系表面含浸+セメント系スラリーひび割れ注入
	2-2	外観変化の抑制	LiNO ₂ 先行注入+セメント系スラリーひび割れ注入 (表面未充填)
	2-3	施工の簡易性	LiNO ₂ 先行注入+セメント系スラリーひび割れ注入
	N2	リファレンス	無補修
III	3-1a	高い防錆効果	LiNO ₂ 圧入+ケイ酸塩系表面含浸+LiNO ₂ 入り塗料塗布
	3-1b	高い防錆効果	鋼材に直接 LiNO ₂ を表面塗布+断面修復
	3-2	外観変化の抑制 かぶり有	LiNO ₂ 圧入+ケイ酸塩系表面含浸+セメント系スラリーひび割れ注入 (表面未充填)
	3-3		施工の簡易性
	N3	リファレンス	無補修

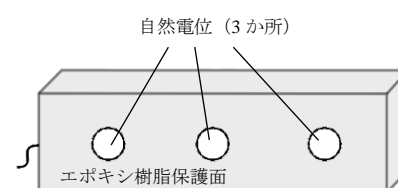



図-1 自然電位の計測箇所

表-4 3D スキャナの性能

点群データの精度	0.1mm	
測定距離	0.4-1m	
寸法	261.5x158.2x63.7mm	
質量	0.85kg	

(5) 3D データによる表面凹凸形状の経時変化の比較

暴露 1.5 年時および 2 年時に 3D スキャナを用い、試験体の暴露面の凹凸データを取得した。取得した 3D データを専用のアプリケーションを用い、経時変化による暴露面の凹凸変化の計測を行った。使用する 3D スキャナの性能および外観を表-4 に示す。

3. 結果および考察

3.1 目視による外観変化

目視による外観変化の比較結果を表-5 に示す。試験体の外観変化に「さび汁」が確認された。さび汁は主にグレード II で確認され、無補修の試験体のみ暴露 0.5 年時点で確認された。無補修および補修仕様 2-1 の試験体の外観変化を表-6 に示す。無補修の試験体は暴露 0.5 年時点でひび割れ中央部からさび汁が確認された。また、暴露 1 年時点ではさび汁がさらに濃くなり、内部鉄筋が著しく腐食が進行していることが分かった。

試験体 2-1-2 の補修後は補修前の試験体に比べ、暴露面がやや暗い色相になった。また、暴露 1 年時点でさび汁の出現が確認されるものの、無補修の試験体のさび汁に比べ少量であり、補修工法 2-1 の試験体では 3 つの試験体の内 1 つの試験体のみさび汁が確認された。相対的ではあるが、亜硝酸リチウムによる補修工法が鉄筋腐食を抑制していることが分かった。

3.2 色差・光沢度による外観変化の評価

グレード I・II の各補修工法の ΔE , L^* の経時変化をそれぞれ図-2, 図-3 に示す。亜硝酸リチウムの表面含浸や圧入を行うと、補修直後は無補修の試験体に比べ ΔE が増加する。この ΔE の変化は、 L^* が低下していることから、補修を行ったことにより、表面が濡れ色になったことで、明度の低下が起きたことが分かる。暴露 0.5 年時点の ΔE に着目すると、補修を施した試験体の ΔE は補修直後に比べ 0 に近づいていることから、補修前の試験体の色相に近づいていることが分かる。この ΔE の変動は、補修により暴露面が濡れ色に変化し、時間の経過により濡れ色が消滅したことにより起きたものと考えられる。

暴露 1 年時点および 1.5 年時点での ΔE に着目するとグレード I・II ともに、すべての試験体で ΔE の急激な増加が見られたが、1.5 年時では再び 0 に近づいている。特に亜硝酸リチウムによる補修を施した試験体の色相変

表-5 さび汁の出現試験体数

	暴露期間			
	0.5 年	1 年	1.5 年	2 年
1-1	0/3	0/3	0/2	0/2
1-2	0/3	0/3	0/2	0/2
1-3	0/3	0/3	0/2	0/2
N1	0/2	0/2	0/1	0/1
2-1	0/3	1/3	2/2	2/2
2-2	0/3	1/3	2/2	2/2
2-3	0/3	3/3	2/2	2/2
N2	2/2	2/2	1/1	1/1

図中の数値は (確認数) / (設置個体数) を表す

表-6 劣化グレード II の試験体の外観変化

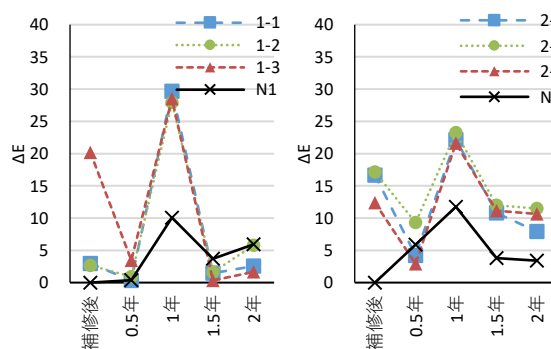
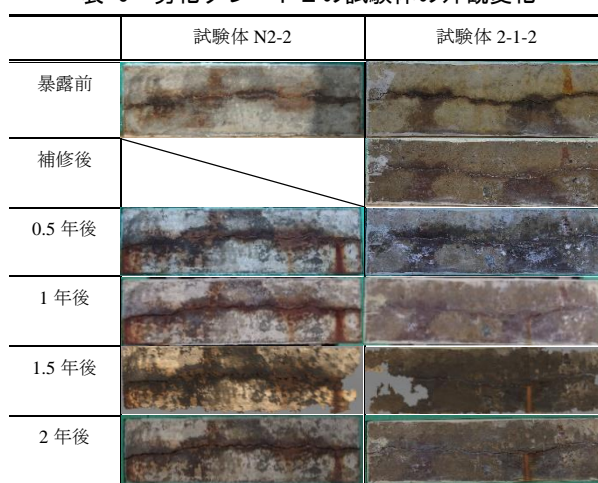


図-2 ΔE の経時変化

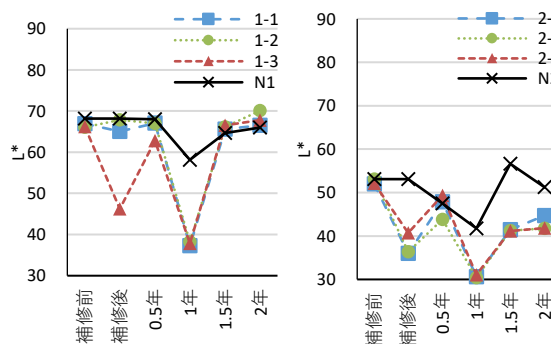


図-3 L^* の経時変化

化は無補修の試験体に比べ、大きく現れている。これは、暴露1年時点の計測日の3日前から続いていた降雨の影響により、暴露面の含水率が上昇し、特に亜硝酸リチウムでの補修を施した試験体は亜硝酸リチウムによって色相変化が大きくなったと推測される。

図-4 に試験体表面の含水率の経時変化を示す。含水率の変化は明度変化と対応しており、含水率が大きくなると明度が低下する。亜硝酸リチウムによる補修を行った場合、リチウムイオンの潮解性により水分を吸収しやすくなることが考えられるが、含水率は補修を行わない試験体と比較しても同程度となっており、亜硝酸リチウムによる含水状態の変化はごく表層部にとどまっていることが推測され、このことによる鋼材の腐食への影響はほぼないと思われる。

図-5 に試験体表面の光沢度の経時変化を示す。グレードIでは、試験体1-1のみ補修直後で光沢度の上昇が見られたが、そのほかの補修工法では大きな変化は見られなかった。暴露2年時点では試験体1-3のみほかの補修工法比、光沢度の変化が抑えられているという結果が得られた。グレードIIでは無補修の試験体が暴露0.5年時点で光沢度の低下が起こったのに対し、補修を施した試験体暴露2年時点でも大きな変化は見られず、亜硝酸リチウムによる補修によって光沢度に変化を及ぼさないことが確認された。

3.3 ひび割れ幅の評価

グレードI・IIの各補修工法のひび割れ幅の経時変化を図-6に、ひび割れの出現個体数を表-7に示す。暴露2年までの期間で補修を施した試験体は無補修の試験体に比べ、ひび割れ幅の増加を抑制していることが分かる。これは、さび汁の発生状況からも分かる通り、亜硝酸リチウムによる補修が内部鉄筋の腐食を抑制していると思われる。

3.4 自然電位の経時変化

劣化グレードごとの自然電位の経時変化を図-7~図-9に示す。グレードIの自然電位は、暴露開始後1年までは卑変する傾向を示すが、1.5年においては貴変する傾向を示している。また、亜硝酸リチウムによる補修工法を施した試験体は、無補修の試験体に比べ自然電位が同程度あるいは貴な傾向にある。グレードIIの自然電位は、グレードIと同様に1.5年において貴な方向に変化している。補修の有無による比較では、補修を施した試験体の方が卑な方向に変化しているが、前述の外観変化からは鋼材の腐食が抑制されていることが推測されるため、現段階では自然電位法によって鉄筋腐食の傾向を評価できていないことも考えられる。

グレードIIIの自然電位はグレードI・IIの経時変化に比べ、各補修および無補修の自然電位の変動が大きく、

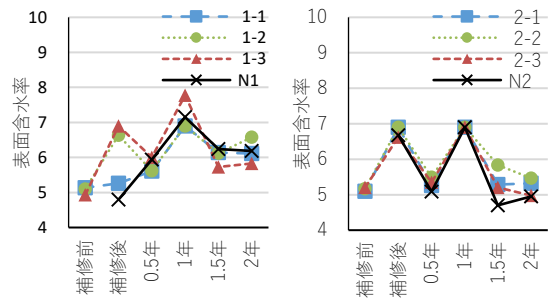


図-4 表面含水率の経時変化

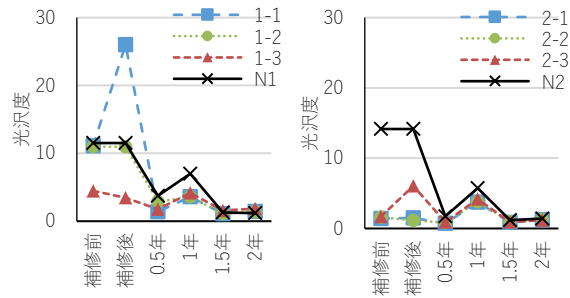


図-5 光沢度の経時変化

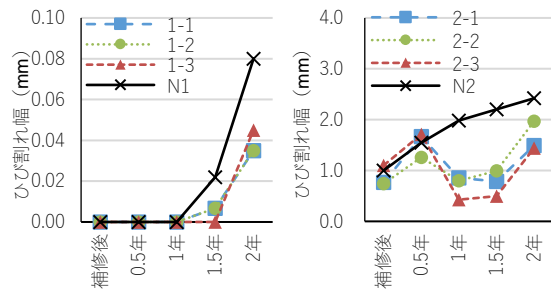


図-6 ひび割れ幅の経時変化

表-7 ひび割れ幅の出現試験体数

	暴露前	0.5年	1年	1.5年	2年
1-1	0/3	0/3	0/3	1/2	2/2
1-2	0/3	0/3	0/3	1/2	1/2
1-3	0/3	0/3	0/3	0/2	2/2
N1	0/2	0/2	0/2	1/1	1/1

図中の数値は（確認数）/（設置個体数）を表す

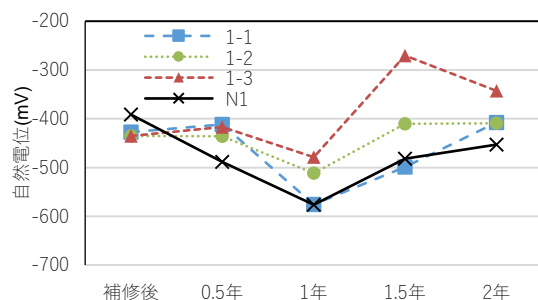


図-7 自然電位の経時変化（劣化グレードI）

全体的な傾向は貴な方向に推移している。グレードIIIの亜硝酸リチウムによる補修を施した試験体は無補修の試

験体よりも卑な方向に変位しており、暴露2年時点では、各補修工法による腐食抑制効果は確認されないという結果となった。暴露2年までの自然電位の測定値は不安定であるが、既往の文献³⁾では、測定日前後の環境条件が自然電位の測定結果に影響を及ぼすことが報告されており、本試験の結果も環境条件の影響を受けていることが推測される。したがって今後も継続的な測定により長期的な評価を行う必要がある。

3.5 質量減少率の比較

暴露開始時を基準とした劣化グレード別の質量減少率をそれぞれ図-10、図-11に示す。

グレードIの質量減少率は、補修を施した試験体および無補修の試験体ともに1%以下であった。

グレードIIの質量減少率は、全般的に6~9%程度と非常に大きく、外観による補修を施した試験体の腐食抑制効果とは必ずしも一致していない。この理由としては、試験開始時の電食による腐食量のばらつきの影響なども考えられる。

グレードIIIの質量減少率は、無補修の試験体および補修工法3-1a(防錆塗料)・3-1b(断面修復)・3-3の試験体は3%程度となったが、補修工法3-2の試験体のみ4%程度となった。これは3-2の試験体のみかぶりコンクリートを残したまま補修を行っており、鉄筋付近の含水状態が他の試験体に比べ湿潤な状態にあり、腐食の進行が大きくなったことも考えられる。ただし、前述の通り、腐食量の評価には当初のばらつきの影響も含まれるため、結論を得るためにはより長期的な評価が必要であると考えられる。

3.6 三次元計測による表面凹凸の経時変化の比較

鉄筋腐食による暴露面の表面凹凸の経時変化の比較を行うに当たり、「ひび割れ発生直前の暴露面の隆起」や「ひび割れ発生後の腐食進行による暴露面の隆起」の観測を行うことを目的とした。以上の観測を行うために試験体の選定は表-7より同じ補修を施した試験体1-2より1-2-2(ひび割れ無しの試験体)、1-2-3(ひび割れ発生有りの試験体)とした。

試験体1-2-2の暴露1.5年と暴露2年時に取得した3Dデータの表面の凹凸の比較を図-12に示す。図は、暴露1.5年と2年の差分で表しており、彩色は形状の変化が起きていない場合は緑色に、沈降が起きた場合は青色に、隆起が起きた場合は赤色に着色されるように設定した。試験体1-2-2の3Dデータでは暴露面全体が緑色であり、暴露1.5~2年の間には暴露面の凹凸の変化が起きていないということが分かる。

試験体1-2-3の暴露1.5年と暴露2年時に取得した3Dデータの表面凹凸形状のそれぞれ図-13、図-14に示す。これらの図より、ひび割れが発生している箇所が赤く着

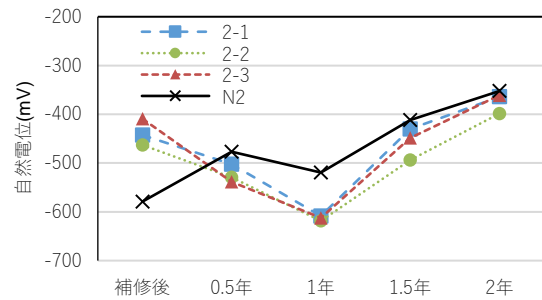


図-8 自然電位の経時変化(劣化グレードII)

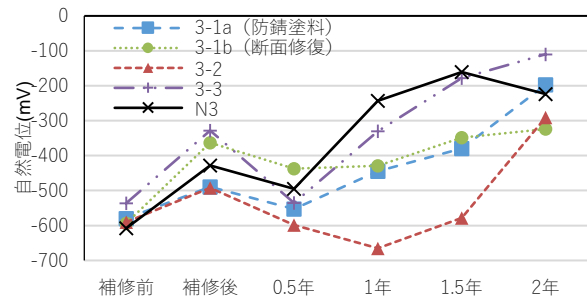


図-9 自然電位の経時変化(劣化グレードIII)

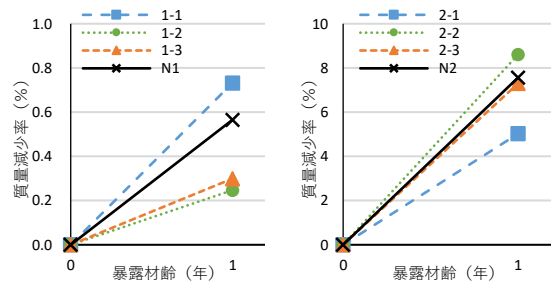


図-10 質量減少率の経時変化(劣化グレードI・II)

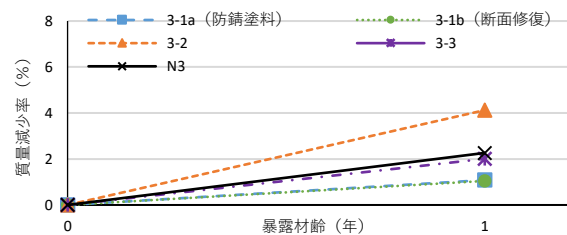


図-11 質量減少率の経時変化(劣化グレードIII)

色されており、試験体表面のひび割れの中央部に相当する位置の隆起が起きていることがわかる。

試験体1-2-3の暴露1.5年と暴露2年時の3Dデータの差分で表したものを図-15に示す。試験体1-2-3は暴露1.5年時点でひび割れが観測され、暴露2年時のひび割れ幅を測定したところ、ひび割れ幅の増加傾向がみられた。図-15より暴露面中央に発生したひび割れ部分が赤く着色していることから、暴露1.5~2年の期間で該当部分の表面の隆起が起きていることがわかる。また、今回

の 3D データ上の計測結果では暴露 1.5~2 年の期間で約 0.3mm の隆起が観測された。他の試験体についても図-16 ように、ひび割れの進展による表面の隆起が確認され、鉄筋腐食の新たな評価方法として活用できる可能性が示された。今後、内部の鋼材の腐食状況との関係等についても確認を行う。

4. まとめ

以下、本研究により得られた知見をまとめる。

- ・ 目視による外観変化について、グレードⅡにおいてさび汁の有無によりでは亜硝酸リチウムの腐食抑制効果を確認することができた。
- ・ 色差および光沢度の変化は、亜硝酸リチウムによる補修を施した場合にリチウムイオンの潮解性によって暴露面の明度の変動が大きくなるという結果が得られた。ただし、試験体表面が乾燥した状態では、無補修と比較してほとんど差は無かった。光沢度に関しては、補修により大きな変化は及ぼさないという結果が得られた。
- ・ ひび割れは、グレードⅠに関しては暴露 1.5 年時点でひび割れが発生する試験体を確認された。グレードⅡに関しては無補修の試験体のひび割れ幅は経時的に増加しているのに対し、亜硝酸リチウムによる補修を施した試験体はひび割れ幅の増加が少なく、内部の鋼材の腐食が抑制されていると推測できる。
- ・ 自然電位の計測値は、暴露開始後 1.5 年の時点では全体として貴な方向へ推移している傾向は確認されるが、測定条件や試験体の初期の状態のばらつきなどから、個々の試験体の補修効果を評価するには至っていない。
- ・ 3D データを用いた暴露面の表面凹凸の経時変化について、鉄筋腐食の進行による表面凹凸の隆起を観測することができた。

謝辞

本論文に関する調査は、長崎市により特別な許可を得て軍艦島において実施しました。試験体の補修施工は、(一社)コンクリートメンテナンス協会 峯松昇司氏らの協力を賜りました。本研究にあたっては、東京理科大学 今本啓一教授および今本研究室の皆様の協力を得ました。また、試験実施は、日本学術振興会科学研究費補助金(基盤研究 S) 課題 16H0636 の一環として実施しました。記してここに謝意を表します。

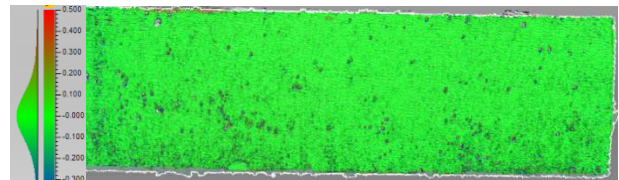


図-12 試験体 1-2-2 の表面凹凸形状の変化

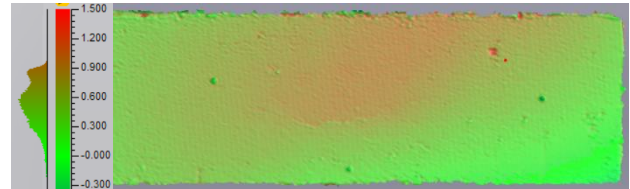


図-13 暴露 1.5 年時点の試験体 1-2-3 の表面凹凸形状の測定

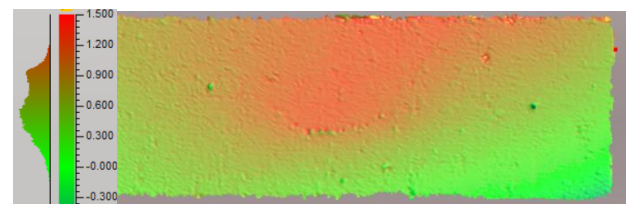


図-14 暴露 2 年時点の試験体 1-2-3 の表面凹凸形状の測定

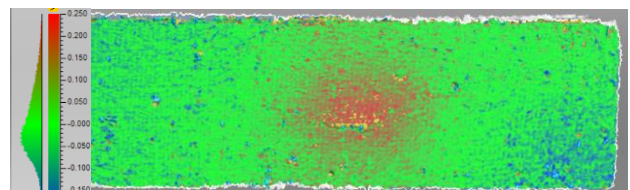


図-15 1-2-3 試験体の表面凹凸形状の変化

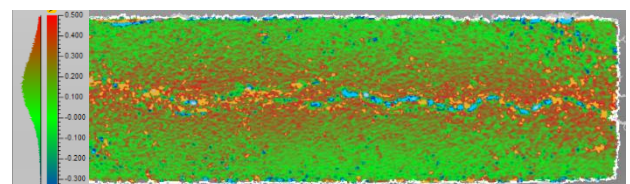


図-16 2-2-3 試験体の表面凹凸形状の変化

参考文献

- 1) 岸本一蔵ほか：端島の建物の劣化による構造性能低減に関する研究 その 1～その 9，日本建築学会大会 学術講演梗概集，構造Ⅳ，pp.515-532，2016.9
- 2) 澁井雄斗ほか：端島のコンクリート構造物中の塩化物イオン量に関する調査結果，日本建築学会大会 学術講演梗概集，A-1 材料施工，pp.601-602，2017.9
- 3) 澁井雄斗ほか：A-1 材料施工，pp.601-602，2017.9
- 4) 下澤和幸，田村博，永山勝：埋設ミニセンサーによる鉄筋腐食モニタリング，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，pp.813-818，1996.7