

既設表面改修材料の紫外線劣化に関する研究



栗林 健一*¹



今井 勉*²

A Study on Investigation and Research of Deterioration State of Falling Prevention Sheet for Concrete

Kenichi KURIBAYASHI*¹, Tsutomu IMAI*²

*¹ Chief Researcher, Civil Structure Maintenance Technology Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

*² Division Senior Manager, Civil Engineering unit of Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

Fiber-reinforced plastics sheets are used on railway and road bridges to prevent concrete pieces from falling. In this study, we investigated the deterioration process of fall prevention sheets. We also measured the intensity of ultraviolet light, which affects the deterioration of the fall prevention sheet. It was confirmed that there is a correlation between the amount of ultraviolet rays being irradiated and the chalking of the fall prevention sheet. It was confirmed that the fall prevention sheet, which has been used for more than 20 years, was in a state of deterioration with organic compounds decomposing from the surface layer.

●**Keywords:** Large-scale renovation of Shinkansen infrastructure, Falling prevention sheet, Deterioration state, Ultraviolet light

*¹JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット 主幹研究員
*²JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット ユニットリーダー

1. 緒言

JR東日本では2001年頃よりコンクリート片の剥落防止を目的とした対策をコンクリート橋の防音壁側面等に施工してきた(図1)。

剥落防止材料の劣化は、紫外線による上塗り材料の白亜化(有機化合物の分解・抽出)や温度挙動(コンクリート橋躯体、改修材料層間)による塗膜の割れがあげられる。劣化箇所等からの水の侵入により付着力が低下し、浮きや剥がれなどの重大な変状につながると想定される。

本研究では、これら劣化因子のうち紫外線に着目した。新幹線コンクリート橋の施工後十数年経過した剥落防止材料の劣化状態を現地調査や室内試験等で把握するとともに、防音壁側面等のコンクリート橋の紫外線強度と劣化状態の比較を行った。

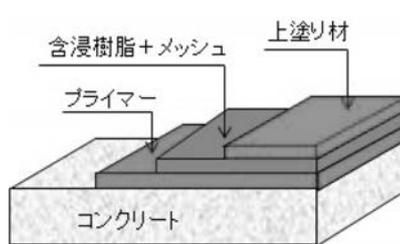


図1 剥落対策材料の基本仕様と設置状況例

2. 調査概要

東北新幹線、上越新幹線のコンクリート橋12か所の既設剥落防止材料について調査を行った。表1に調査材料と経年数、採取地域等を示す。調査面積は各コンクリート橋の1ブロック(水平方向約10m、鉛直方向約2.5m)に対して行った。なおA材料とB材料の上塗り材料は製造会社が異なるものの同じ水性アクリル樹脂に分類され、C材料の上塗り材料はアクリルウレタン樹脂である。

調査では、現地での外観観察(目視・打音)、白亜化等級測定、付着強度試験を行った。室内では採取した試料を用いて光沢度測定、塗膜表面の形状・形態観察等を行った。

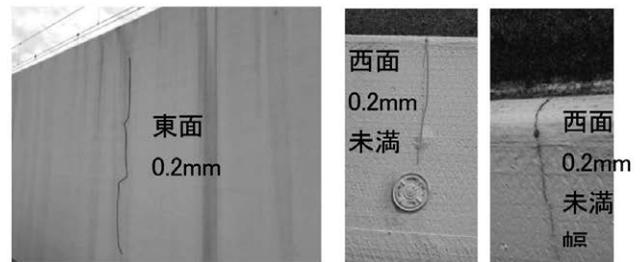
表1 調査材料と採取試料の経年

材料区分	上塗り	経年(地域) ※下線箇所ではひび割れ
A	水性アクリル樹脂	<u>9年(古河)</u> , 11年(伊那) 13年(古河), <u>18年(久喜)</u>
B	水性アクリル樹脂	<u>8年(久喜)</u> , 8年(黒磯) 11年(長岡), <u>13年(宇都宮)</u> 15年(高崎), <u>19年(小山)</u>
C	アクリルウレタン樹脂	7年(利府), 15年(古川)

3. 調査結果

3・1 外観観察(目視・打音)

高所作業車による近接目視調査を行った。調査対象の12か所のうち4か所で、図2に示すようなひび割れ幅が0.2mm未満のひび割れが複数確認されたものの、打音検査では剥落防止の機能を阻害する重大な変状である浮きや剥がれは確認されなかった。



A材料 18年(久喜) A材料 9年(古河)

図2 ひび割れ(防音壁天端付近)

3・2 付着強度試験

付着強度試験装置を使用した付着強度の測定結果(JSCE-K531を参考、5か所の平均)を図3に示す。供用年数の経過による付着強度の低下は確認されなかった。B材料の一部で低下傾向が確認されたが、破断面はコンクリートの母材であり剥落防止材料の付着性は保持されていると考えられる。なお図中の0年のデータは室内で製作された試験体での付着強度試験結果である。

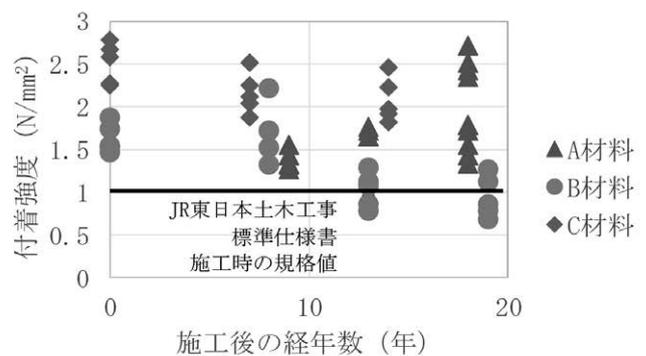


図3 経年数別の付着強度

3・3 白亜化等級測定

上塗り材料の劣化として有機化合物の分解抽出(白亜化)があげられる、そこで直射日光(紫外線)の影響を受けやすい防音壁側面と日陰となる張り出し床版下面で白亜化等級測定を行った(図4)。なお白亜化等級測定はJIS K 5600-8-6に準拠した。

図5に示す防音壁側面の結果では、施工後13年以降で白亜化等級が3または4となり、白亜化が進行していることが確認された。一方で直射日光(紫外線)の影響を受けにくい張り出し下面では、図6に示すように白亜化が進行していないことが確認された。なお、材料の違いや設置方位(西面・東面)に差は確認されなかった。



図4 白亜化等級測定部位と白亜化状況例

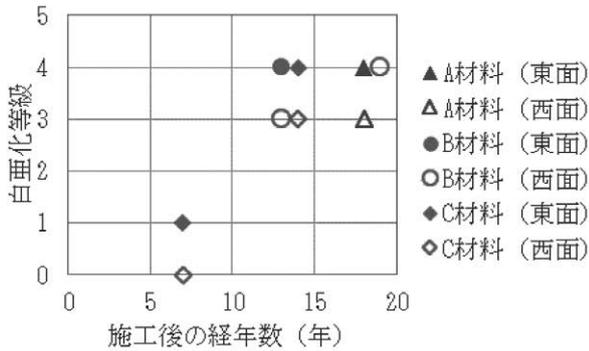


図5 白亜化等級 (防音壁側面)

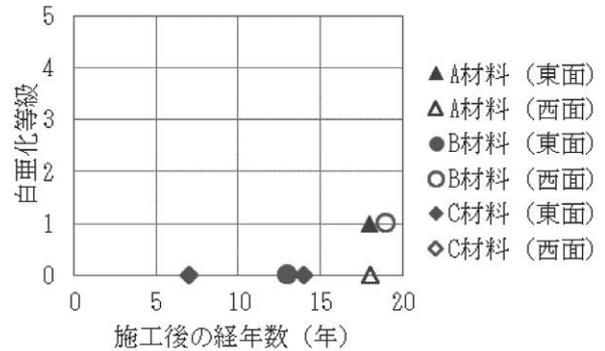


図6 白亜化等級 (張り出し下面)

3・4 現地調査のまとめ

本調査対象においては、施工時または経年劣化(紫外線や温度応力などによるものと思われるひび割れが確認されたものの浮きや剥がれはなく、十分な付着強度を保持していることから、設置目的である剥落防止の機能を保持していると考えられる。

一方で、設置年数の増加とともに直射日光(紫外線)の影響を受ける防音壁側面の上塗り材料では白亜化(有機化合物の分解・抽出)が進行していることが確認された。そこで本研究では紫外線が剥落防止材料の劣化に与える影響について詳細な分析を行う。

4. 紫外線強度の把握

現地調査で直射日光を受ける部位で上塗り材料の白亜化の進行が確認された。そこで福島県に建設した新幹線コンクリート橋の実物大模擬設備(名称: EASTstructure)で紫外線強度の測定を行った。設備の外観と測定状況を図7に示す。

4・1 紫外線強度の測定概要

コンクリート橋の部位によって、太陽光が日陰となる時間帯があるなど、受光する紫外線強度は異なるため、部位別の紫外線強度の計測を行った。測定器の設置位置を図8に示す。常に太陽に正対した状態の光量(U1)と、各部材面に対する入射角に応じた光量の測定(U2~U7)を行った。なお、測定は2022年10月の25日(曇り)、26日(晴れ)、27日(晴れのち曇り)に加え、太陽高度が異なる12月20日(曇り)、21日(曇り)についても測定した。



図7 実物大模擬設備と測定状況

4・2 紫外線強度の把握

各測定位置の紫外線強度の2022年10月26日(晴れ)の推移を図9に示す。この図のように「晴れ」であっても、雲及び遮蔽物(電柱)により直接的な日射がさえぎられる時間は紫外線強度が減少する。

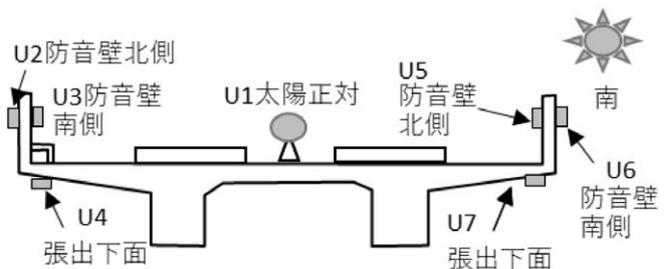


図8 コンクリート橋での紫外線測定位置

ここで、分析の基準とする紫外線強度として全雲量が0かつ遮蔽物がない状況(以下「完全な晴れ」という)を想定し、2022年10月26日に測定した紫外線強度の包絡線から完全な晴れの場合の累積紫外線強度を算定した。図10の茶線を示す。これをもとに各位置の紫外線強度を累積した1日の累積紫外線強度を図11に示す。なお、図11では、基準とする完全な晴れを想定したU1(太陽正対)に対する各累積紫外線強度比(以下、基準値に対する累積紫外線強度比という)をバーチャートで示している。

(1) 晴れの日の紫外線強度について

晴れの日(10月26日)の累積紫外線強度について、完全な晴れに対して10/26の晴れの日(10月26日)の累積量は0.94倍であった。これは、雲や遮蔽物の影響が一時的であれば、累積量には大きく影響しないことを示している。

次に、部位別の傾向について、図11より基準値に対する累積紫外線強度比を見ると、直射日光があたる防音壁南面(U6)でも0.56倍程度、日射のない防音壁北面(U5)が0.15倍程度であった。

この累積紫外線強度比については、直射日光や入射角度によるものが支配的と考えられる。また、下向きとなる張出し下面における累積紫外線強度比は0.03倍と小さな値であったことは、前述の張出し下面の上塗り材料が施工後十数年経過しても白亜化が進行していなかったことの裏付けになると考えられる。

(2) 曇りの日の紫外線強度について

曇りの日(10月25日)の累積紫外線強度について、図10より完全な晴れと比較したところ、晴れの場合には直射日光があたる太陽正対(U1)、防音壁南面(U6)では5~6割程度に減少したが、直射日光が当たらない防音壁北面(U5)では1割程度の減となった。

このことから、曇りの場合の紫外線強度は、晴れの日(10月26日)に直射日光が当たる箇所では大きく減少するが、もともと直射日光が当たらない箇所については、ほとんど変わらないことが分かった。

(3) 太陽高度および太陽方位角による角度低減

紫外線強度は一般に照射角度により変化すると考えられる。そこで、U1(太陽正対)の紫外線強度を防音壁南面に対する太陽高度および太陽方位角により角度補正した理論値(式(1))とU1(太陽正対)に対するU6(南側防音壁：南面)の実測による累積紫外線強度比を算出し比較した。

$$\text{理論値} = U_1 \cos \theta_1 \times \sin(\theta_2' + \alpha) \quad (1)$$

ただし、 θ_1 ：太陽高度

θ_2 ：太陽方位(北を 0°)

$\theta_2' = \theta_2 - 90^\circ$ (東を 0°)

α ：本橋の東西面からの傾き(約 8°)

なお、各測定機器には一時的に太陽に向けて筒をセットし反射光をカットして計測した。理論値と実測値の比較を図12示す。式(1)により算出した理論値はU1(太陽正対)のおおよそ0.7倍であるのに対し、U6(南側防音壁：南面)実測はおおよそ0.6倍となった。理論値よりは概ね同等となった。実際は散乱光や反射光等の影響が考えられるが、紫外線の量は角度により低減されることを実測により確認できた。

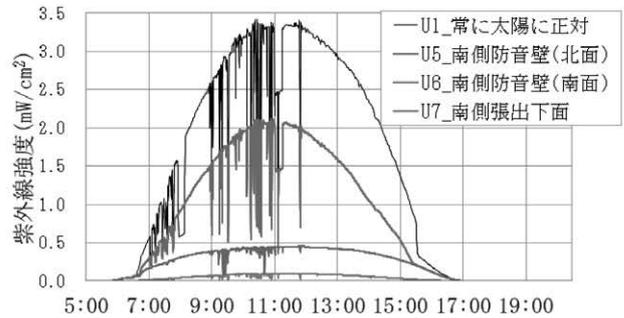


図9 紫外線計測結果(10月26日晴れ)

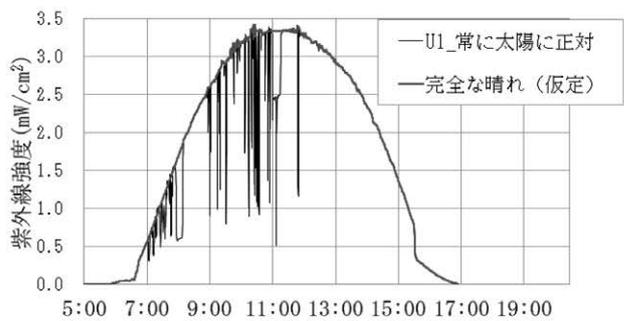


図10 遮蔽物のない完全な晴れ(仮定)

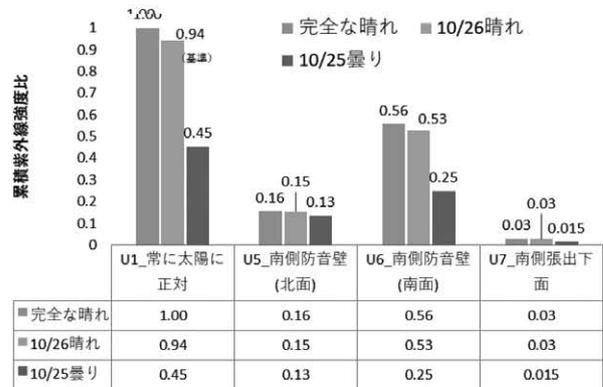


図11 各部位における累積紫外線強度比

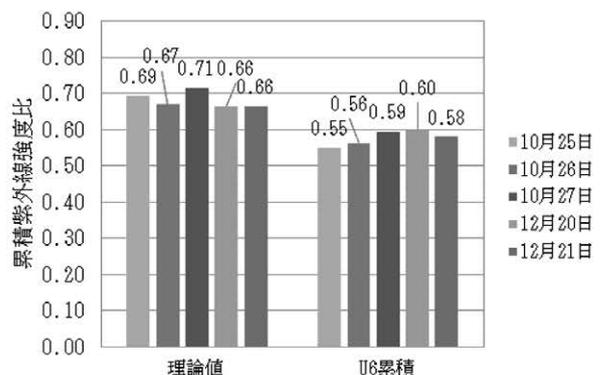


図12 入射角度を低減した理論値と実測値

5. 紫外線による上塗り材料の劣化

室製作試験体(キセノン照射有無)と採取試験体の試験体の比較により、上塗り材料の劣化過程について把握を行った。把握方法は、エネルギー分散型 X線分析法による表面の元素組成分析、走査型電子顕微鏡による塗膜表面の観察(以下、SEM画像と示す)、塗膜表面の光沢度測定により行った。

キセノン照射は、JIS K 5600-7-7促進耐候性及び促進耐光性を参考にして行った。また暴露サイクルは照射102分後18分照射および水噴霧とし3600時間を照射した。なお、A材料とB材料は同じ水性アクリル樹脂であるため、本稿ではB材料とC材料について述べる。

5・1 A/B材料(上塗り材料：水性アクリル樹脂)

(1) 塗膜表面の組成分析

エネルギー分散型 X線分析法によって上塗り材の樹脂等の変化について解析を行った。紫外線により上塗り材料表面の劣化によって顔料として配合されているTi(チタン)の表出割合が増加1)することからTiに着目した。

図13に室内試験体と室内試験体にキセノンを3600時間照射した試験体、採取試験体のEDXマッピングの構成元素(Ti)の割合を示す。ごく表面の分析結果であるが、キセノン照射後の試験体と採取試料ともに室内試験体に比べTiの検出量が増加していた。他の採取試料でもTiの検出量の増加の傾向が確認されたことから、紫外線によって上塗り材料に劣化が生じていると示唆された。

(2) 塗膜表面の観察

B材料のSEM画像(100倍、10000倍)を図14に示す。室内試験体(①)のうち、酸化チタン²⁾が薄い白い点として10000倍画像で確認される。この室内試験体に3600時間のキセノン照射を行った試験体(②)では、10000倍画像で白い点が顕著に確認され、酸化チタンが多く露出している部分(グレー囲み)も確認される。これは100倍画像で確認される亀甲状の割れ部分と推定される。キセノン照射の紫外線により上塗り材料が劣化したと考えられる。

現地で白亜化の進行が確認された採取試料③④の10000倍画像では、試験体②と同様に白い点が顕著に確認され、より凹凸状の表層であるように見える。100倍画像ではキセノン照射後の試験体②のような割れはなく、孔や不陸が確認された。採取試験体で確認された孔は、粉塵、また塗料内に巻き込まれたエア跡の可能性があげられる。

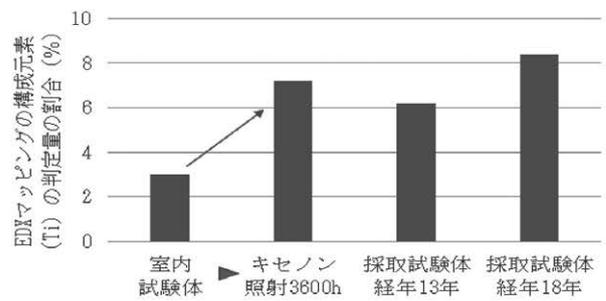
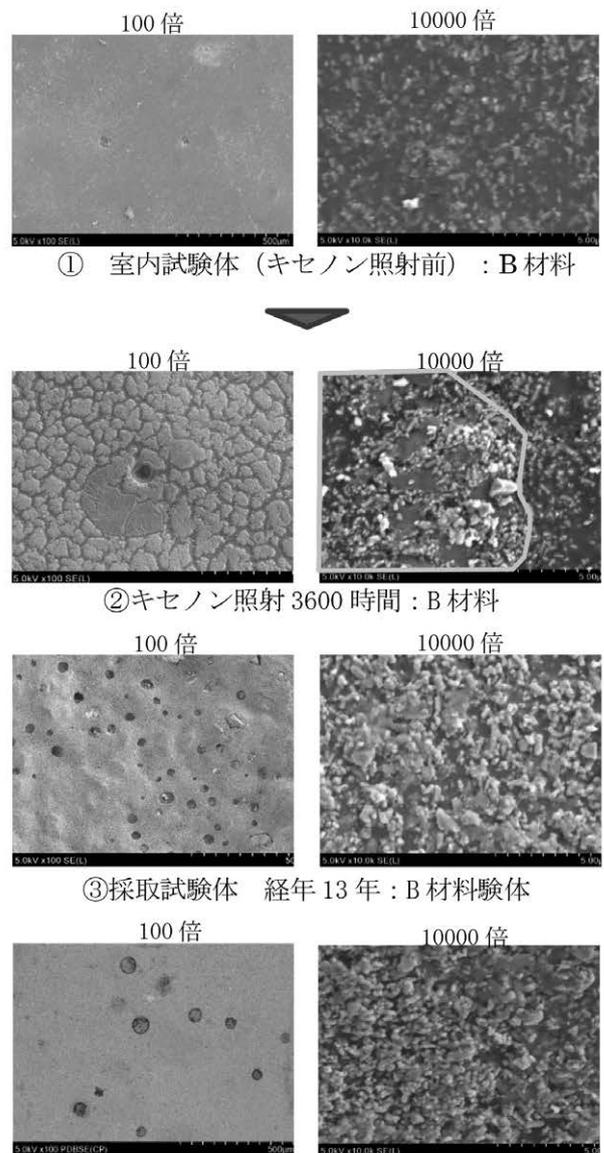


図13 B材料のEDX分析結果



① 室内試験体(キセノン照射前) : B材料

②キセノン照射3600時間 : B材料

③採取試験体 経年13年 : B材料試験体

④採取試験体 経年19年 : B材料試験体

図14 B材料のSEM画像

(3) 光沢保持率

JIS法に従い、光沢度を測定した。各採取試料につき5点測定して平均値を算出し、3体の平均値で光沢度をまとめ、室内で製作された同じ材料と対比することで採取試料の光沢保持率を求めた。図15に結果を示す。3600時間のキセノン照射では光沢保持率は低下しなかったが、採取試料の光沢保持率は大きく低下していることが確認された。この違いは、前述の採取試験体で確認された孔などの不陸が光沢の低下に影響を与えたと推定される。

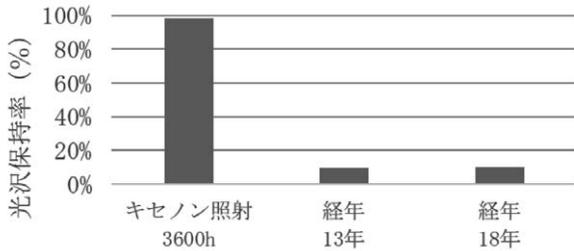


図15 光沢保持率 (B材料)

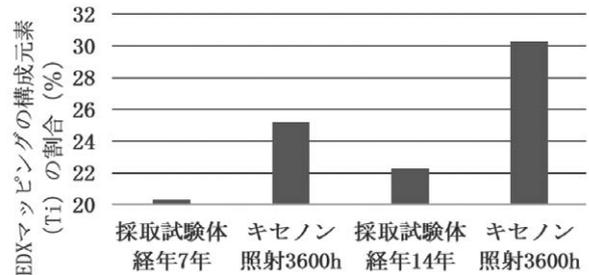


図16 C材料のEDX分析結果

5・2 C材料 (上塗り材料: アクリルウレタン樹脂)

(1) 塗膜表面の組成分析

採取試験体とそれらに3600時間のキセノン照射を加えた試験体のEDXマッピングの構成元素 (Ti) の割合は増加していた (図16)。B材料と同様に紫外線によって上塗り材料に劣化が生じていると示唆された。

(2) 塗膜表面の観察

C材料のSEM画像を図17に示す。10000倍のSEM画像において、室内試験体、採取試料 (経年7年)、採取試料 (経年14年) の順番で白い点が増加しているようにみえるが、100倍画像ではB材料のような差は確認されない。

現地の白亜化等級測定では経年7年と経年14のC材料で差が生じたがSEM画像では明確な差を確認することはできなかった。

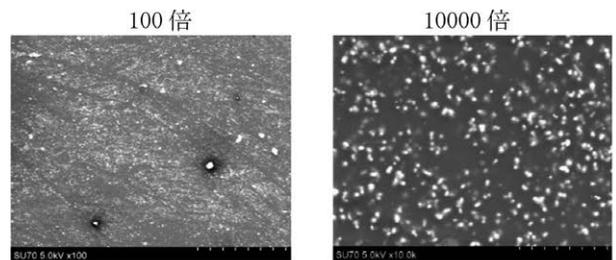
(3) 光沢保持率

B材料と同様に3600時間のキセノン照射では光沢保持率の低下は小さいが、採取試料の光沢保持率は経年7年の採取試料で23%、経年14年の採取試料で17%に低下していることが確認された。

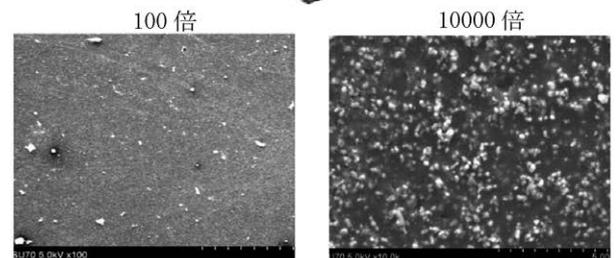
5・3 B材料 (フッ素樹脂の塗り重ね)

劣化が確認されたB材料の採取試験体③ (経年13年) にフッ素樹脂を塗り重ねた試験体を製作し、3600時間のキセノン照射を行った。SEM画像を図18に示す。フッ素樹脂を塗り重ねた試験体⑧は、図14の試験体② (水性アクリル樹脂) のような割れなどは確認されなかった。なお、いずれのフッ素樹脂を塗り重ねた試験体でもキセノン照射後のEDXマッピングの構成元素 (Ti) の割合 (%) は僅かに増加が確認された。一般的なアクリル樹脂に比べフッ素樹脂の結合エネルギーが高いため、フッ素樹脂はキセノン照射による劣化が小さいと考えられる。

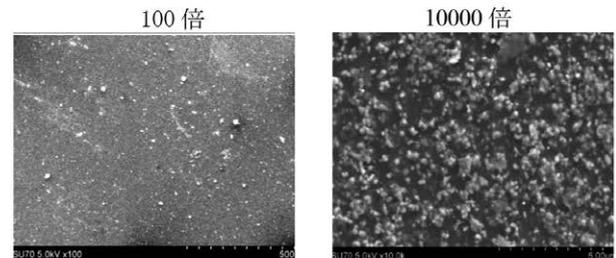
表面改修材料の塗り重ね材料にフッ素樹脂を選定することで、既設表面改修材料の耐久性を向上させることができると考えられる。



⑤室内試験体 (キセノン照射前) : C材料

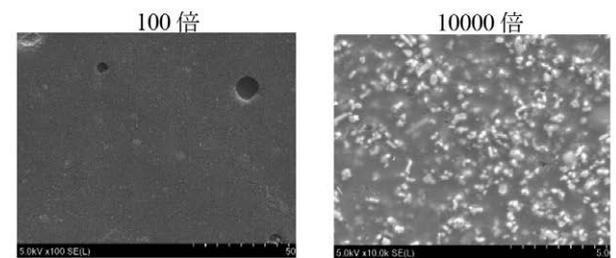


⑥キセノン照射 3600 時間 : C材料



⑦経年 14 年 : C材料

図17 C材料のSEM画像



⑧採取試験体③→上塗り (フッ素樹脂)
→キセノン照射 3600 時間

図18 上塗り追加のSEM画像

6. 実劣化現象とキセノン照射後の劣化現象の比較

6・1 剥落対策材料が受ける紫外線強度の推定

東北新幹線は南北方向に建設されており、防音壁が直射日光を受けるのは日照時間の半分(0.5倍)となる。また残り半分の時間は日陰となるため太陽に常に正対する場合に対し0.15倍となる(図10)。これらを加味した場合、東北新幹線の防音壁側面が受ける紫外線強度は、太陽に常に正対する場合に比べると0.36倍(=0.56×0.5+0.15×0.5)と推定される。

6・2 キセノン照射と実紫外線強度の関係

一般的な暴露試験(1年:298.4MJ/m²)とキセノン照射(60W/m² 1時間:0.216MJ/m²)の紫外線エネルギーの比較より、暴露試験に対するキセノン照射の促進倍率は6.3倍になるとの報告³⁾がある。

この促進倍率に準拠した場合、本研究で実施したキセノン照射3600時間(図19)は2年7ヵ月相当の暴露試験となる。ここで前述の東北新幹線の防音壁側面が受ける紫外線強度を考慮すると、キセノン照射3600時間は東北新幹線のコンクリート橋防音壁側面で暴露した場合、7年相当と考えられる。

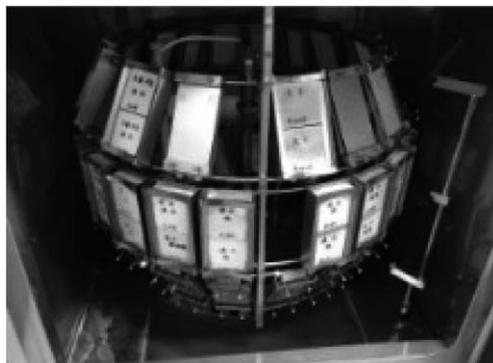


図19 キセノン照射状況の例

6・3 キセノン照射試験体と採取試験体の比較

上塗り材料の有機化合物の分解抽出(白亜化)が顕著に確認されているB材料に着目する。キセノン照射(3600時間)した試験体と採取試験体(経年13年)の比較を行った。

- ・キセノン照射試験体と採取試験体ともに構成元素(Ti)の割合は増加(図13)
- ・SEM画像ではキセノン照射試験体と採取試験体では異なる変状形態であったが、いずれも酸化チタンが確認された(図14)
- ・採取試験体の光沢保持率は大きく低下したが、キセノン照射試験体ではほとんど低下しなかった(図15)

両試験体に現れる変状形態は完全に一致するものではないものの、いずれも上塗り材料の有機化合物の分解抽出(白亜化)段階の劣化過程と考えられる。

本研究では秋の紫外線測定データを用いて劣化過程の評価を行った。今後は、夏の紫外線データや防音壁天端部の測定データの収集を行う。これらのデータをもとに、JR東日本管内の防音壁が受ける紫外線量の推定を行い、各箇所劣化状況と照らし合わせ、より正確に表面改修材料の劣化過程の把握を行う。

7. 結言

本調査・分析で得られた結果を以下に述べる。

- 1) 調査を行った箇所の剥落防止材料は、浮きや剥がれはなく付着強度は保持されていることから、剥落防止の機能は有していると考えられる。
- 2) 剥落対策材料の上塗り材料の白亜化等級とコンクリート橋の部位別の紫外線強度は白亜化等級に影響を与える。
- 3) 紫外線強度は照射角度により低減されることを確認できた。実物大模擬設備の防音壁側面が受ける紫外線強度は太陽に常に正対する場合に比べると0.56倍となる。
- 4) 白亜化等級調査や採取試料のSEM画像やEDX分析により、施工後十数年経過した上塗り材料の表面は劣化が進行していることが確認された。
- 5) 上塗り材の違いにより紫外線劣化の度合いは異なる。フッ素樹脂の塗り重ねにより上塗り材料の劣化の進行が抑制される。
- 6) キセノン照射 (3600時間) 後の試験体と採取試験体 (経年13年) を比較したところ、いずれも上塗り材料の有機化合物の分解抽出 (白亜化) 段階の劣化過程であると考えられる。

参考文献

- 1) 奥田章子、ふっ素樹脂系粉体塗装の実用化に関する研究 (その1)、日本建築学会技術報告集 第27巻第65号、pp. 42-47, 2021.2
- 2) 河島順子: 塗料・塗膜の分析技術(2)、155、関西ペイント技術報告、pp. 25-26、2013.10
- 3) 山田卓司: コンクリート構造物に用いられる表面被覆工法の耐久性評価手法に関する研究、京都大学、pp. 45-46、2014. 3
- 4) 栗林健一、久田真他: 剥落防止材料の劣化過程に関する調査・分析、第23回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレードシンポジウム、1105