

GFRP引抜成形材の屋外環境における劣化と表面保護塗膜による劣化抑制効果に関する研究

西崎 到¹・櫻庭 浩樹²・富山 禎仁³

¹正会員 独立行政法人土木研究所 新材料チーム 上席研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:nisizaki@pwri.go.jp

²正会員 独立行政法人土木研究所 新材料チーム 研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:hiro-sakura@pwri.go.jp

³正会員 独立行政法人土木研究所 新材料チーム 主任研究員（〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6）
E-mail:tomiya@pwri.go.jp

GFRP は長期間の屋外環境への暴露で、繊維/樹脂界面の付着の劣化が発生し、強度低下につながる場合がある。表面保護工（塗膜など）は、このような環境劣化による GFRP の力学物性低下を抑制する効果を有することは既に知られているが、そのメカニズムは十分に解明されていない。

本研究では、積層構成の異なる 3 種類の GFRP 引抜成形材の板材について、塗装の無いものと、塗装を有するものを準備し、10 年間の暴露を行った。回収供試体について、暴露上面および下面の劣化の外観調査、力学物性試験、吸水性試験、遮光性調査を実施し、塗膜による GFRP 保護効果と、環境因子（水、光）の遮蔽効果について調べた結果を報告する。

Key Words : GFRP, outdoor durability, top coat, protective effect, sield performance, water, sun shine

1. はじめに

FRP引抜成形材は、比較的安価に均一断面を有する大型部材を得やすいことから、代表的な土木構造用FRPとなっている。土木構造材料としての利用にあたっては、屋外環境において環境作用に対する、良好な抵抗性を有することが必要となるが、代表的なFRPであるG（ガラス繊維）FRPにおいては、表面保護層による保護が効果的かつ重要であるとされている^{1,2)}。表面保護層がGFRPの屋外環境作用を保護する効果を有することは既に示されている³⁾が、その機能や保護効果機構の詳細については解明されていない部分が多い。表面保護層はGFRPの表面に施される、比較的薄い耐候性に優れた樹脂層であり、引抜成形材の場合には、鋼材の防食塗装に類似した上塗り用塗膜が用いられることが多い。表面保護層の機能としては、遮蔽性能（水や水蒸気、酸素、光等の遮断）と、塗膜自体の優れた耐候性による保護などが考えられる。

筆者らは表面保護層のGFRP保護機能について調べるために、3種類の積層構成の異なるGFRP引抜成形材の無塗装と塗装したものについて、最長10年間の暴露試験を行った。回収した供試体について、外観観察および力学

性能試験を行って材料の劣化状況を調べるとともに、表面保護層の保護効果を確認した。次に回収した供試体について吸水性試験を実施して、GFRPの吸水性と表面保護層の遮水機能を調べた。また、供試体の暴露環境に即した日射量の測定を行い、表面保護層が持つ光の遮断性能や日射量とGFRPの劣化について検討した。

2. 研究方法

(1) 供試体

a) GFRP供試体

積層構成の異なる3種類のGFRP引抜成形材（表-1、幅員420mm、厚さ3.2mm、旭硝子マテックス(株)製プラアロイ）を長さ640mmに切断しGFRP供試体とした。また、それぞれの引抜成形材に表面保護層（エポキシ樹脂中塗り塗装（膜厚30μm）/ふっ素樹脂上塗り塗装（膜厚30μm））を施した供試体も製作した。各供試体は2枚ずつ製作した。

b) マトリックス樹脂板供試体

前項のGFRP引抜成形材の製作に使用されたマトリックス樹脂（ビスフェノールA型ビニルエステル樹脂）に

より、厚さ3.3mm、1辺300mmの正方形の樹脂板を製作し、これを半分に切断し一方にアクリルウレタン樹脂上塗り塗装（厚さ25μm）を施した。無塗装および塗装したものを3組製作し、マトリックス樹脂板供試体とした。

表-1 実験に用いた GFRP 引抜成形材

記号	繊維の体積含有率 V _f (%)	積層構成 (数値は該当層の体積割合を表す)
R43	43	CSM 9.5% / Cloth 19% / ROV 43% / Cloth 19% / CSM 9.5%
R26	39	CSM 16% / Cloth 21.5% / ROV 26% / Cloth 21.5% / CSM 16%
R12	36	CSM 21% / Cloth 23% / ROV 12% / Cloth 23% / CSM 21%

注：CSM：コンティニュアス・ストランド・マット
Cloth：織布，ROV：ロービング層（一方向層）

(2) 屋外暴露試験

各供試体は、茨城県つくば市西沢の土木研究所の屋外暴露施設内に、暴露架台（南向き5°傾斜）を用いて屋外暴露試験に供した。

GFRP供試体の暴露試験は2003年6月に開始し、2004年8月に各仕様について1枚ずつ回収（暴露1年供試体）し、2013年7月に残りの1枚ずつを回収した（暴露10年供試体）。

マトリックス樹脂板供試体の暴露試験は2002年3月に開始し、2002年6月（暴露3か月供試体）、2003年4月（暴露1年供試体）、2004年4月（暴露2年供試体）にそれぞれ1組ずつ回収した。

(3) 回収供試体の試験

a) 外観観察

回収したGFRP供試体は、水により表面の汚れを洗浄した後に、暴露時の上面および下面の状況を肉眼（写真撮影）およびデジタル実体顕微鏡（八洲光学工業、YDZ-3F）による観察を行い、表面の樹脂の脱落などの劣化状況を調査した。

b) 力学物性試験

回収したGFRP供試体から、図-1に示す向きにクーポン試験片をダイヤモンドカッターを用いて切り出し、引張試験（引抜方向（0°）および引抜方向に直角の方向（90°））および面内せん断試験（引抜方向に対して45°方向での引張試験）を実施した。

引張試験方法はISO 3268に基づいて実施した。クーポン試験片は、長さ250mm、幅25mmとし、長さ50mmのアルミ板タブを用いた。試験速度は1mm/sとし、繰り返しは5個とした。引張強度の算出は式(1)によった。塗装した供試体については、厚さから塗膜厚さ（120μm）を差し引いた。

$$\sigma_t = \frac{P_t}{bh} \quad (1)$$

ここに、 σ_t ：引張強度(MPa)
 P_t ：最大荷重(N)
 b ：クーポン試験片の幅(mm)
 h ：クーポン試験片の厚さ(mm)

面内せん断試験はJIS K 7059に基づき、供試体の引抜方向の45°方向に切り出したクーポン試験片の引張試験により求めた。クーポン試験片は、長さ250mm、幅25mmとし、長さ50mmのアルミ板タブを用いた。試験速度は1mm/sとし、繰り返しは5個とした。引張強度の算出は式(2)によった。塗装した供試体については、厚さから塗膜厚さ（120μm）を差し引いた。

$$\tau = \frac{P_s}{2bh} \quad (2)$$

ここに、 τ ：面内せん断強度(MPa)
 P_s ：最大荷重(N)
 b ：クーポン試験片の幅(mm)
 h ：クーポン試験片の厚さ(mm)

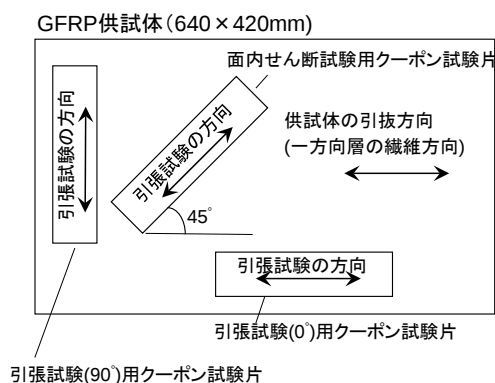


図-1 GFRP供試体からのクーポン試験片の切り出し

c) 吸水性試験

力学物性試験用のクーポン試験片を切り出した残りのGFRP供試体、および回収したマトリックス樹脂板供試体から、1辺75mmの正方形のクーポン試験片を1種類につき2枚ずつ切り出し、吸水性試験用の供試体とした。R43については、未暴露の試料についても、供試体を製作した。吸水性試験は、JIS K 7209「プラスチック吸水率の求め方」⁹⁾のA法によった。供試体は秤量後、切断端面に接着剤でアルミホイルを接着し、乾燥後に23°Cの水中に浸せきし、一定時間後に秤量を繰り返し、吸水量を測定した。吸水量は式(3)により吸水率として求めた。

$$C = \frac{m_z - m_i}{m_i} \times 100 \quad (3)$$

ここに、 c ：吸水率(%)

m_1 : 初期乾燥後、浸せき前の試験片質量(g)

m_2 : 浸せき後の試験片質量(g)

JIS K 7209に示されるフィックの拡散法則に基づく式(4)に最小二乗法で試験データを適合させることによって、拡散係数 D (mm²/s)を求めた。

$$c(t) = c_s - c_s \frac{8}{\pi^2} \sum_{k=1}^{20} \frac{1}{(2k-1)^2} \exp\left(-\frac{(2k-1)^2 D \pi^2}{d^2} t\right) \quad (4)$$

ここに、 $k: 1, 2, 3, \dots, 20$

d : 試験片厚さ(mm)

c_s : 平衡吸水率(%)

$c(t)$: 時間 t における吸水率(%)

3. 試験の結果

(1) 外観観察

図-2に無塗装GFRP供試体 (R43) から切り出した小片の写真を示す。



(a) 暴露上向面(上から10年, 1年, 未暴露(比較))



(b) 暴露下向面(上から10年, 1年, 未暴露(比較))

図-2 無塗装GFRP供試体の外観調査結果 (R43)

外観観察の結果、R43とR26、R12の間に明確な相違は認められなかった。暴露中に上向きとなっていた面（以下、上向面）と、下向きの面（以下、下向面）には、外観に顕著な相違が認められた。上向面は暴露10年供試体では繊維が露出し、黒色の斑点状の部分が多く認められ

た。樹脂の黄変化も顕著に認められる。暴露1年供試体の上向面でも既に明確な黄変化が認められるとともに、黒色の斑点状変状もわずかながら認められた。一方下向面では、暴露1年供試体では黄変化を始めとする劣化は認められず、暴露10年供試体においても、上向面の暴露1年供試体と比べて、黄変化の程度、黒色斑点状変状の程度ともに劣化程度はやや少なかった。

一方、塗装供試体については、暴露10年供試体の上向面では、光沢が殆ど認められない状態となっていたが、それ以外に特に目立った劣化は認められない状態であった。

図-3に無塗装のGFRP供試体 (R43) の下向面の実体顕微鏡写真を示す。暴露1年供試体においては未暴露の場合と殆ど差は認められないのに対し、暴露10年供試体においては、肉眼では明確には認められない茶褐色の変色部分が認められることが分かった（図-3(b)枠内）。この部分をさらに拡大してみると、樹脂が脱落して、繊維が露出するとともに汚れあるいは樹脂劣化が茶褐色に見えることが分かる（図-4）。

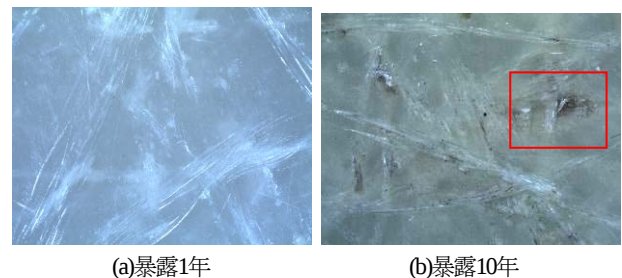


図-3 無塗装GFRP供試体暴露下向面の実体顕微鏡写真 (R43)



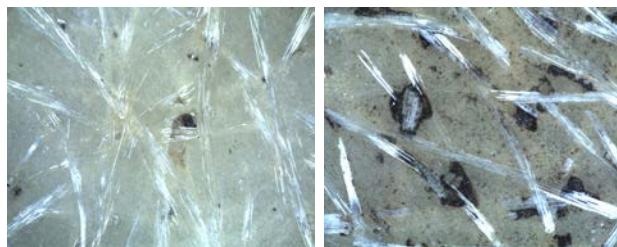
図-4 図-3(b) (枠内) の部分拡大写真

図-5に無塗装GFRP供試体 (R43) の上向面の実体顕微鏡写真を示す。暴露1年供試体において、下向面暴露10年供試体で認められたものと同様の樹脂脱落が認められるとともに、暴露10年供試体の上向面においては、これが顕著になっている。

なお、塗装供試体については、このような外観上の劣化は認められなかった。

この様に、外観観察からは、無塗装の場合には上向面で既に暴露1年目において、樹脂脱落が始まっており、

暴露10年目にはこれが顕著となる。一方、下向面では暴露1年目においては樹脂の黄変化も認められず、暴露10年目における状況も、上向き面の暴露1年目よりもやや劣化程度が少ない状態であった。このように、同じ供試体でも、暴露される面の向きによって、劣化状況が大きく異なることが確認できた。



(a)暴露1年

(b)暴露10年

図-5 無塗装GFRP供試体暴露上向面の実体顕微鏡写真 (R43)

(2) 力学物性試験

図-6から8に、GFRP供試体の引張強度（引抜方向に対して 0° ）、引張強度（引抜方向に対して 90° ）、面内せん断強度の結果を示す。各図は初期値に対する保持率で示している。

引抜方向に対して 0° 方向の引張強度（図-6）は、1年目では強度低下は認められなかった。10年目においては、無塗装のR26とR12が初期値の0.83となった他、塗装したR26も0.86とわずかな低下を示した。一方、無塗装でもR43については強度低下は認められなかった。R43は 0° 方向の繊維が多く、引張強度（ 0° ）にはこの繊維の影響が強く出やすいことが、低下が認められない要因の一つと考えられる。塗装のR26が低下している理由は不明である。塗装供試体の引張試験においては、塗膜部分ですべりが生じる場合があり、この影響が表れた可能性がある。

引抜方向に対して 90° 方向の引張強度（図-7）は、無塗装の暴露10年供試体が、初期値の0.70～0.77であるのに対し、塗装したものでは0.97～1.04と殆ど変化がなく、表面塗装による保護効果が明確に認められる結果となった。また面内せん断強度（図-8）についても、暴露10年の無塗装GFRP供試体が、初期値の0.67～0.77であるのに対し、塗装GFRP供試体では0.93～1.24と、表面塗装の保護効果が確認された。

引抜成形材においては、引抜方向に対して 90° 方向には一方向繊維層がなく、織布層の繊維も波状に屈曲している。また、面内せん断試験においては 45° 方向での試験となっているが、今回の供試体には 45° 方向の繊維層はない。このため、いずれも繊維と樹脂の付着特性が力学物性に現れやすいが、これまでの研究⁴⁾により、屋外暴露中の環境作用により繊維/樹脂間の付着が劣化して、強度低下として表れることが分かっている。このため、

表面塗装にはこの繊維/樹脂間の付着の劣化を抑制する効果を有するものと考えられる。

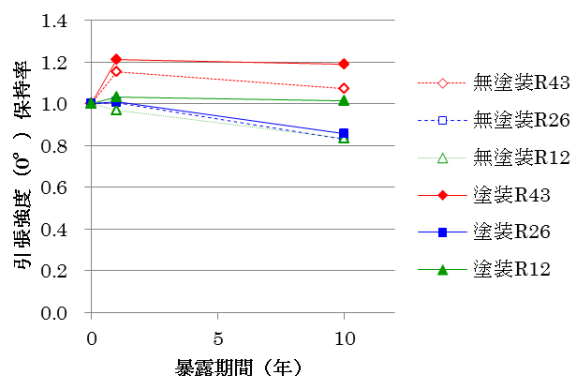


図-6 GFRP供試体の引張強度（ 0° ）保持率の結果

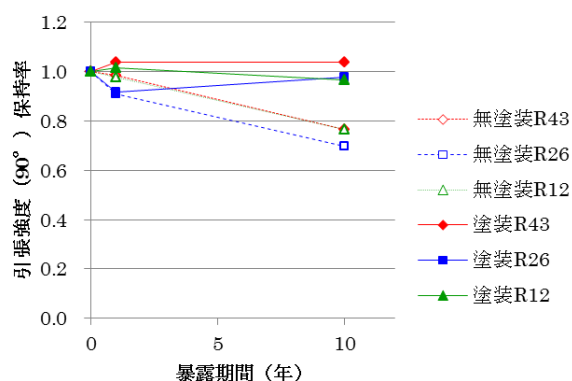


図-7 GFRP供試体の引張強度（ 90° ）保持率の結果

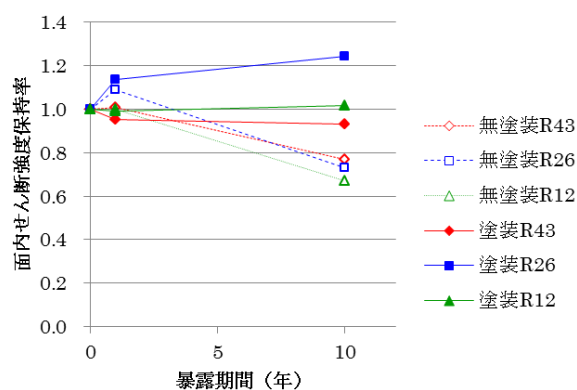


図-8 GFRP供試体の面内せん断強度保持率の結果

(3) 吸水性試験

図-9に、無塗装のGFRP供試体（R43）の未暴露、暴露1年、暴露10年の吸水率の結果を示す。同じ条件の2回の繰り返し両方のデータを示している。未暴露供試体に比べて、暴露1年の供試体はわずかに吸水率が高い程度で

あるのに比べて、暴露10年の供試体は3倍程度の吸水率となった。外観観察の結果から、無塗装では暴露1年供試体でも上向面で多少の樹脂脱落が、暴露10年供試体では顕著な樹脂脱落が認められていることから、この影響が出ているものと考えられる。

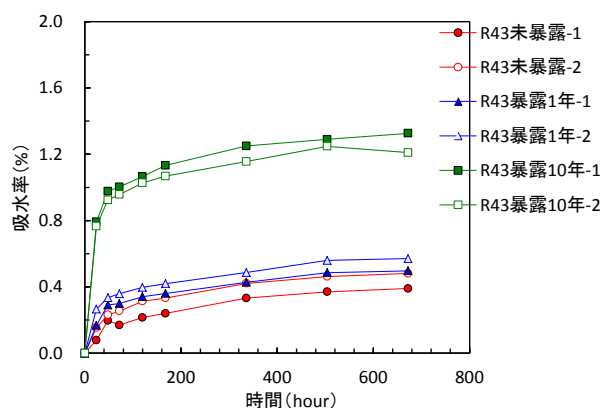


図-9 無塗装GFRP供試体 (R43) の吸水率

図-10に、暴露10年のGFRP供試体の吸水率の比較を示す。R26およびR12についても吸水率の増加傾向はR43と同様であるが、R26、R12の順で吸水率は高くなった。一方向繊維層が多い方が吸水性が少ないが、一方向層は繊維が比較的密に配置されやすく、一方向層が多い方が繊維含有率も高くなっていることなどが関係していると考えられる。

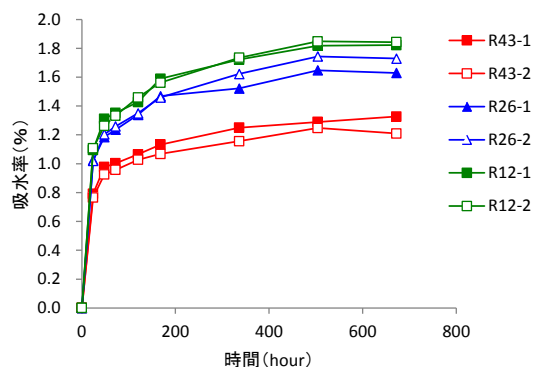


図-10 無塗装GFRP供試体 (暴露10年) の吸水率

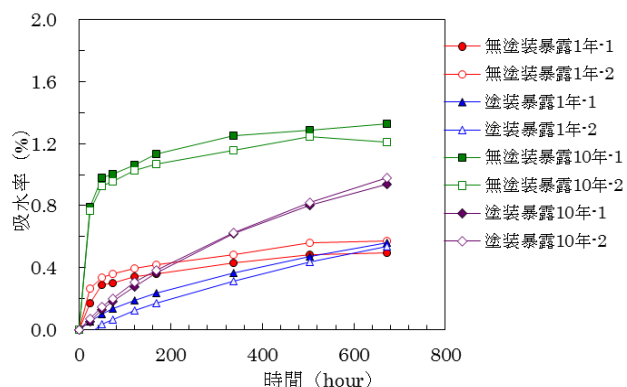


図-11 塗装および無塗装GFRP供試体 (R43) の吸水率

図-11に、塗装したGFRP供試体 (R43) の吸水率を、無塗装供試体と比較して示す。塗装供試体は、無塗装供試体と比べて異なる吸水特性を示した。塗装供試体ではある程度の時間が経過すると、無塗装の供試体と同程度まで吸水が進むが、浸せき試験直後の初期段階の吸水はかなり少ないことが分かる。なお、塗装供試体では、浸せきから14日目 (336時間) ごろから塗膜にふくれが発生したものが多く認められた。

図-12に、マトリックス樹脂板供試体の吸水率を示す。マトリックス樹脂板では、塗装供試体はそれぞれの無塗装供試体に比べてわずかに吸水率が低くなる傾向を示したが、吸水曲線は無塗装供試体と同様の傾向を示した。

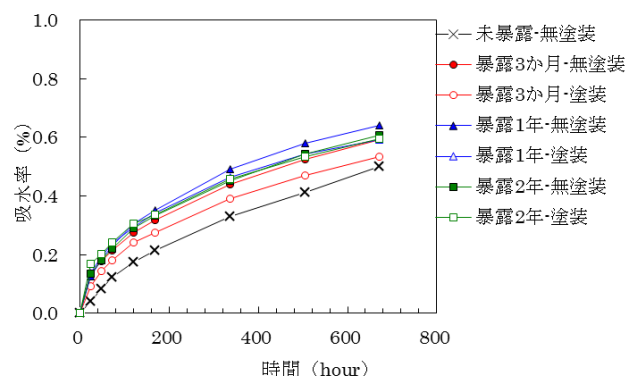


図-12 マトリックス樹脂板供試体の吸水率

(3) 拡散係数

図-13に、マトリックス樹脂板供試体の無塗装暴露2年供試体の実験値と、式(4)に基づく算定値を示す。マトリックス樹脂板においては、概ね実験値と算定値は良い一致を示した。

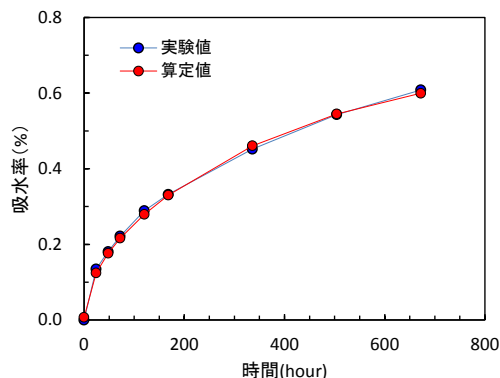


図-13 マトリックス樹脂板供試体 (暴露2年、無塗装) の吸水率の結果

図-14に、無塗装GFRP供試体 (R43) の未暴露および暴露10年供試体の実験値と、式(4)に基づく算定値の関係を示す。未暴露GFRPにおいては実験値と算定値は概ね一致するが、暴露10年のGFRP供試体については式(4)との適合は十分とはいえず、屋外暴露により劣化したGFRPの吸水特性が、フィックの拡散法則にやや適合し

なくなる傾向があると考えられた。未暴露についても適合程度を詳細に見る場合には、必ずしも十分に適合しているとは言いがたく、特に浸せき試験の初期においては、ずれが比較的大きく認められる状態であった（図-15で後述）。なお、暴露1年のGFRPについては、吸水率は未暴露よりわずかに多い程度（図-9）であるが、実験値と算定値のずれの程度は、未暴露より大きくなっていた。

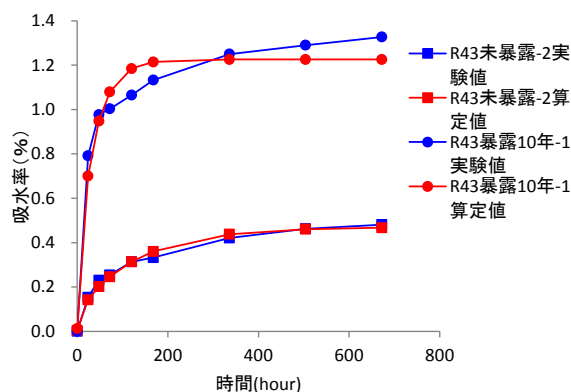


図-14 無塗装GFRP引抜成形材（R43）の実験値と式(4)による算定値

図-15に、塗装GFRP供試体（R43）の暴露1年および10年供試体の実験値と、式(4)に基づく算定値の関係を示す。図中には未暴露無塗装のGFRP供試体の結果も比較として示している。塗装供試体では試験途中で塗膜にふくれが発生したため、拡散係数の検討においては、ふくれが発生する以前の7日目（168時間）までのデータによった。実験値と算定値のずれは、塗装供試体においてはさらに明確となっており、吸水特性が単純なフィックの拡散法則によっていないものと考えられる。

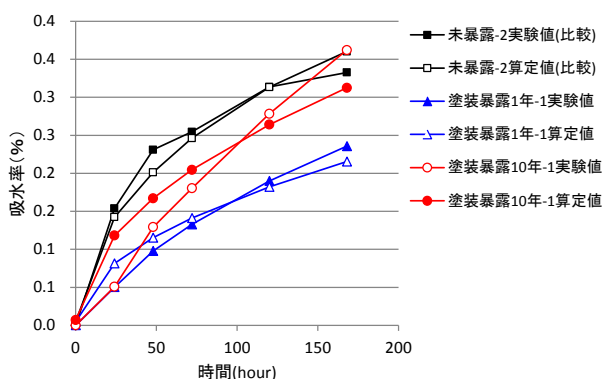


図-15 塗装GFRP引抜成形材（R43）の実験値と式(4)による算定値

図-16に、実験値への式(4)の適合による拡散係数の算出結果を示す。2つの同条件の試験片の値の平均値を示している。未塗装GFRP供試体の暴露10年供試体および、塗装供試体では必ずしも十分に式(4)に適合していないことから、拡散係数にも相応の誤差を含むと考えられる

点に留意が必要である。

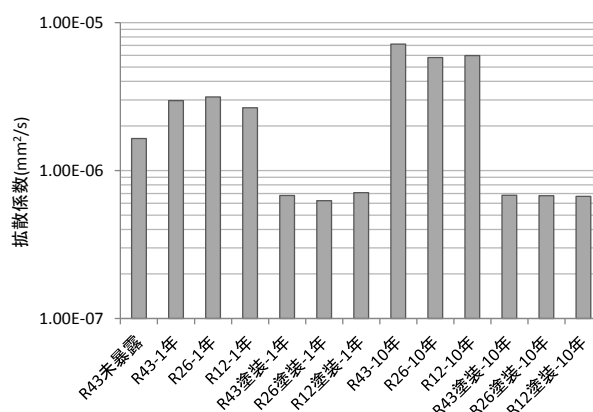


図-16 GFRP供試体の拡散係数

（注：明記の無いものは無塗装供試体）

無塗装のGFRP供試体の拡散係数は、未暴露のものであるが、暴露期間が長くなるに従って大きくなり、暴露10年供試体では $5.25 \sim 7.74 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ 程度となった。拡散係数に積層構成による差はあまり見られなかった。塗装GFRP供試体の拡散係数は、暴露したもののでも無塗装供試体よりもかなり小さく、暴露10年供試体においても $6.50 \sim 7.02 \times 10^{-7} \text{ mm}^2/\text{s}$ であり、無塗装のGFRPに比べて40%程度になっていることが分かる。

図-17はマトリックス樹脂板供試体の拡散係数である。未劣化樹脂板では $1.92 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ と低い値を示したが、暴露3か月供試体では、 $7.32 \times 10^{-6} \text{ mm}^2/\text{s}$ と拡散係数がやや増大した。その後、暴露期間が2年目まで拡散係数に大きな変化は認められなかった。また、無塗装と塗装に明確な差は認められなかった。

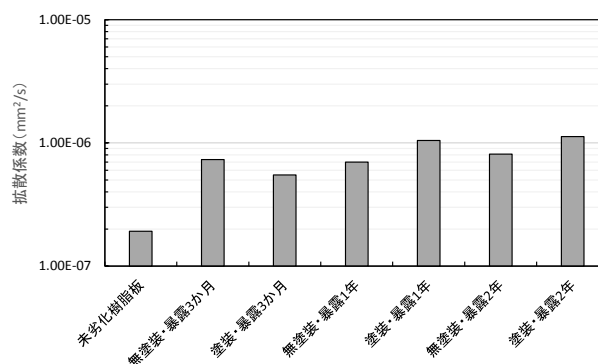


図-17 マトリックス樹脂板供試体の拡散係数

これらの結果から、表面塗膜の吸水性能抑制効果は、マトリックス樹脂板では認められないが、GFRP供試体においては明確に認められることが明らかとなった。GFRP供試体、特に暴露後の供試体において、吸水特性がフィック拡散法則に十分に適合しなかった要因として

は、暴露後供試体では、外観観察結果で認められた様な表面樹脂の脱落や、繊維と樹脂の界面のはく離が起きていることなどが考えられる。今後、劣化したGFRPにより適合するモデルの検討が必要と考えられる。

拡散係数として表した場合の、表面塗膜の遮水効果は今回の条件では未暴露無塗装の40%程度であったが、図-11に示したように、無塗装供試体と同程度の含水率となるまでには、暴露1年供試体においても500時間後である、実際の屋外環境ではこのように長時間の浸せき状態となることは考えにくいことから、GFRP上の表面塗膜は、水の内部への浸透抑制に対して、実用上の保護の観点から大きな効果を有するものと考えられる。さらには、これが暴露10年供試体でも認められた点は、塗膜寿命を考慮する上でも参考になるものと考えられる。

4. 表面塗膜の遮光効果

FRPに施される表面保護層の環境因子遮断効果の代表的な因子としては、前章で検討した水の他に、光があげられる。本章では、表面塗膜による遮光効果について検討を行った。3.(1)では下向きに暴露した無塗装GFRP供試体の表面は、上向面に比べ劣化が抑制されていることが分かった。この要因の主たるものとしては、下向面では直射日光が当たらないことがあげられる。そこで、日射計を用いて、下向面での日射量および表面被覆を通した場合の日射量を、通常の上向面と比較検討することとした。

(1) 日射量測定方法

日射計はKipp& Zonen社製CM3 (ISO9060,第2級)を2台使用した。波長350nm～1500nmの範囲で±5%の精度を有している。この日射計を、Campbell社製データロガーCR10Xに接続し、毎分1回の測定間隔で測定した。データは、60分ごとに60個分のデータの平均値を記録した。

実験Aにおいては、一つの日射計を上向きに設置し、もう一つをその裏面に下向きに設置し、上向き/下向きの日射量の比を調べた。

実験Bにおいては、2つの日射計を並べて上向きに設置し、一方には、ホウケイ酸ガラス製ビーカーに表面被覆塗料を塗装したものを被せ、もう一方には無塗装の同種のビーカーを被せ、無塗装ビーカー下の日射量/表面被覆塗膜下の日射量の比を調べた。表面被覆塗料は、ふっ素樹脂系上塗り塗料(色:N9.5)とし、塗料製造者規定の膜厚(25 μ m)とした。

実験AおよびBともに、計測は前章の暴露試験が行われた茨城県つくば市で実施し、一つの条件につき3~6日間ずつ行った。また、2つの日射計を入れ替えて2度計測

を行い、2回の計測の平均値を調べることにした。

(2) 上向き面と下向き面の日射量の相違(実験A)

日射量の計測は、一方の日射計を上向きにして6日間、もう一方を上にして6日間行った(図-18)。それぞれの上向きの日射計は、暴露試験施設で別途実施している、日射量観測と良い一致を示した。日射量が得られる昼間のデータのみにより、上向き/下向き比を求めた。その結果は、6.775と7.034であり、平均値として6.91が得られた。

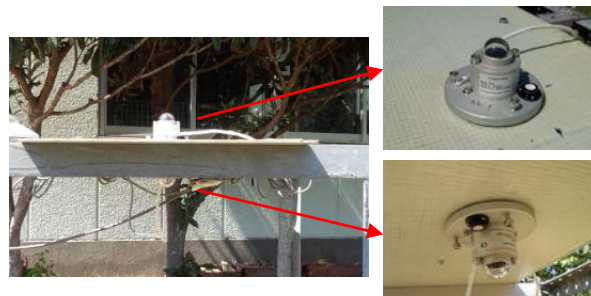


図-18 実験Aの測定状況

3.(1)の暴露1年の上向面と暴露10年の下向面の比較では、暴露1年の上向面の方がやや劣化程度が進んでいるとの結果となった。下向面の受ける日射量は上向面の1/6.91程度であるが、暴露期間が10倍であるため、暴露10年の下向面は、暴露1年上向面に比べ1.45倍の積算日射量を受けたと推定される。上向面は下向面に比べ、降雨に曝される、直射日光により下向面よりも高温となる、などの作用が考えられ、これらがある程度劣化に影響していると考えられるため、GFRPの劣化速度が積算日射量のみの単純な指標では表せないことを示すものと考えられる。

(3) 塗膜下と塗膜なしの日射量の相違(実験B)

塗膜下における日射量の計測は、一方の日射計において6日間、もう一方の日射計により3日間計測を行った(図-19)。それぞれのケースについて、日射量が得られる昼間のデータのみにより、塗膜なし/塗膜あり比を求めた。その結果は、2.977と3.090であり、平均値として3.03が得られた。この結果から本研究で使用した上塗り塗膜では、GFRPが受ける日射エネルギーは、およそ1/3に抑制されることとなる。なお、本実験で用いた上塗り塗膜は、3.の実験で用いた上塗り塗膜は、樹脂の種類や膜厚(中塗りの有無など)が異なることや、色彩の種類によって遮光性能も変化するため、本結果は上塗り塗膜による遮光性の測定事例を示すものにとどまる。今後、塗膜の遮光性能に関する基礎データとして利用できればと考える。



図-19 実験Bの測定状況

5. まとめ

本研究では、3種類の積層構成の異なるGFRP引抜成形材の無塗装と塗装したものについて、最長10年間の暴露試験を行った。

回収した供試体について、外観観察の結果、無塗装の場合には上向面で既に暴露1年目において、樹脂脱落が始まっており、暴露10年目にはこれが顕著となることが分かった。一方、下向面では暴露1年目においては樹脂の黄変化も認められず、暴露10年目における状況も、上向き面の暴露1年目よりもやや劣化程度が少ない状態であった。このように、暴露される面の向きによって、劣化状況が大きく異なることが確認できた。なお、塗装供試体については、このような外観上の劣化は認められなかった。

また、回収供試体からクーポン試験片を切り出し、引抜方向に対して 0° 方向と 90° 方向の引張試験、および 45° 方向の引張試験による面内せん断試験を実施した。その結果、引抜方向に対して 90° 方向の引張強度で、無塗装の暴露10年供試体が、初期値の0.70~0.77であるのに対し、塗装したものでは殆ど変化がなく、表面塗装による保護効果が明確に認められる結果となった。また面内せん断強度についても、同様に表面塗装の保護効果が確認された。

回収供試体を用いた吸水性試験の結果、無塗装供試

体では、未暴露供試体に比べて、暴露1年供試体はわずかに吸水率が高い程度であるのに比べて、暴露10年供試体は3倍程度の吸水率となることが分かった。劣化したFRPにおいては、実験値とフィックの拡散法則による算定値のずれが大きくなる結果となり、外観観察結果で認められた表面樹脂の脱落や、繊維と樹脂の界面のはく離の影響が示唆された。表面塗膜の吸水性能抑制効果は、マトリックス樹脂板では認められなかったが、GFRP供試体においては明確に認められることが明らかとなった。特に実用上の保護の観点から、GFRP上の表面塗膜は水の内部への浸透抑制に対して、大きな効果を有するものと考えられた。

塗膜の遮光による保護効果の検討として、外観観察で劣化があまり進展しなかった下向き面での日射量と、塗膜下での日射量について測定を行い、通常の塗膜なしの上向きでの日射量との比較を行った。その結果、下向きにおいて受ける日射量は、上向面の1/6.91程度、塗膜下で受ける日射量は無塗装の1/3.03程度との結果を得た。

参考文献

- 1) FRP 歩道橋設計・施工指針（案），土木学会，複合構造シリーズ 04，2011.
- 2) FRP 水門設計・施工指針（案），土木学会，複合構造シリーズ 06，2014.
- 3) I. Nishizaki, T. Kishima and I. Sasaki, "Deterioration of mechanical properties of pultruded FRP through exposure tests", Proceedings of the Third International Conference on Durability and Field Applications of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction (CDCC2007), pp.159-166, 2007.5.
- 4) Nishizaki I. & Meiarashi S., "Long-Term Deterioration of GFRP in Water and Moist Environment", Journal of Composites for Construction, Vol. 6, No. 1, pp. 21-27, 2002.2.
- 5) JIS K 7209-2000 「プラスチックー吸水率の求め方」.

STUDY ON THE DETERIORATION OF PULTRUDED GFRP IN OUTDOOR ENVIRONMENT AND THE PROTECTIVE EFFECT OF SURFACE COATING

Itaru NISHIZAKI, Hiroki SAKURABA and Tomonori TOMIYAMA

Top coating on GFRP has protective effect in outdoor environment, however its protective mechanism is not well known in the detail yet. The authors carried out an outdoor exposure test using three types of pultruded GFRP having varied layer systems with or without top coating for 10 years. Retrieved specimens were evaluated their deterioration state with visual observations with naked and microscope. Mechanical properties such as tensile test and in-plane shear test and immersion test for retrieved specimens were carried out in order to evaluate the protective effect of top coating, especially its shield performance against water and light of top coating.