

# 橋梁付属物のライフサイクルコスト低減に関する研究

研究代表者 研究員 平野 廣和 (中央大学総合政策学部)

## 1 はじめに

橋梁上に設置されている付属施設は、地上部と異なり交通荷重による振動の影響を受けるため、疲労損傷を生じる可能性が高くなっている。標識柱・照明柱の損傷事例としては、1999年に標識柱の基部補強リブ上端に疲労亀裂が発生することにより強度が低下し高架下の平面街路に落下している [1]。このような落下事故には至っていないが、疲労による亀裂が確認されている標識柱があるとの報告もなされている [2]。この原因として考えられることは、付属構造物のほとんどが標準設計として基準があり、製造段階で設置場所との照査が義務付けされていないこと、さらに交通量の増大および金属沓からゴム沓等への移行に伴い、標識柱や照明柱は以前より交通振動の影響を受け疲労が生じやすい環境下に置かれていることにある。

このため、既存の標識柱や照明柱の補強対策方法が各分野で検討されはじめており、例えばカーボン系繊維やアラミド系繊維などの繊維強化プラスチック (FRP) を巻き付けてこれを樹脂で固める方法 [3]~[5] などが最近提案されるに至っている。

これらの材料を用いた補強・補修方法は、汎用性、強度、耐食性などの長所によって土木構造材料としての用途が注目されつつある。しかし、現場施工を行う場合、現場配合時の臭気、硬化所要時間の長さ、振動下での作業性と品質確保に課題があるなど、供用下の橋梁で施工するには解決すべき問題点が多く残されている。これらの問題点を解決すべく、著者らは、紫外線で硬化する弱臭気性の樹脂シートを用いて短時間で補強・補修ができる施工方法 [6] を既に提案している。

一方、補強・補修材料として石油化学製品の一種である樹脂を使う場合、一般に耐久性、経年劣化、温度依存性、既存構造物の主材料である鋼やコンクリートとの付着性等の問題を指摘されることが多く、この点を確認することが必要不可欠となっている。

そこで、本報では、著者らが提案している補強・補修方法に用いている紫外線硬化樹脂 [6] を取り上げ、一般に指摘されている樹脂材料の問題点に関する確認試験を行う。具体的には、時間経過による硬度の変化試験、温度の変化による引張強度の依存性試験、耐久性試験を行うこととする。その結果、著者らが提案している紫外線硬化型樹脂は、

実用上許容できる範囲であることを確認することができたのでここで報告する。

## 2 補強・補修材料としての要求性能

### 2.1 施工面からの要求性能

供用開始後の道路橋上の標識柱や照明柱などの補強・補修を行う場合の使用材料ならびに工法に対する要求性能は次のようになる。

一般交通への影響

(所要時間, 作業時間帯, 規制車線幅)

環境影響 (周辺環境親和性)

品質, 機能保証 (補強効果, 施工誤差)

耐用年数, 経年変化

(温度依存性, 維持効果, 点検メンテナンス)

これらを満足すれば、補強施工中の交通負担を最小限度にすることが可能であり、作業時間の短縮化により施工にかかるトータルコストの大幅な削減が期待できる。補強・補修の材料としては、以前は一般的に鋼材が用いられてきたが、視点を転換して候補材料として繊維強化プラスチック (FRP) を検討する。

FRP は、汎用性、強度、耐食性などの長所から土木構造材料としての用途が近年注目されつつある素材であるが、前述のように小規模な構造物の補強・補修の材料としては、検討すべき多くの課題が残されている。既設構造物の補強に関しては、現場施工が前提であり現実的かつ容易な施工に判断の重点を置くことが大きな課題である。ここに著者らは紫外線硬化樹脂による補強・補修方法 [6] を提案した。

### 2.2 材料特性面からの要求性能

紫外線硬化樹脂は、硬化防止のために図 1 に示すような積層構造となっている。ここで A 層は UV カットフィルム, B, D 層は形状保持のための PET (Poly Ethylene Terephthalate) フィルムで主材料の FRP をサンドイッチ状に挟み込んでいる。C 層がガラス繊維入りの光硬化型コンパウンドであり、熱硬化型樹脂に紫外線硬化剤を溶解した樹脂とガラス繊維によって構成されている。この材料の特徴としては以下に示すことが挙げられる。

ブレミックス (現場配合不要)

早期硬化 (自然光硬化)

現場裁断 (シート状製品)

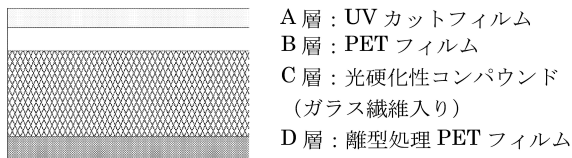


図1 紫外線硬化型樹脂構成図

表1 紫外線硬化樹脂の硬化特性

光源	照射条件	硬化時間 (参考)	紫外線強度 (380~400nm)
太陽光	晴天時 4~9月	10~40分	3.0~10.0mW/cm <sup>2</sup>
	AM9~PM4 10~3月	20~50分	1.0~5.0mW/cm <sup>2</sup>
	屋外日陰	60~80分	0.5~1.5mW/cm <sup>2</sup>
	曇天時	90~120分	0.4~1.0mW/cm <sup>2</sup>

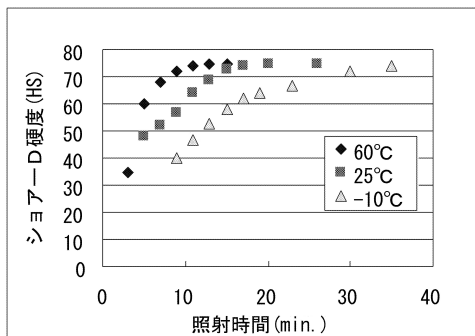


図2 硬化時間温度依存 (紫外線強度 1.0mW/cm<sup>2</sup>)

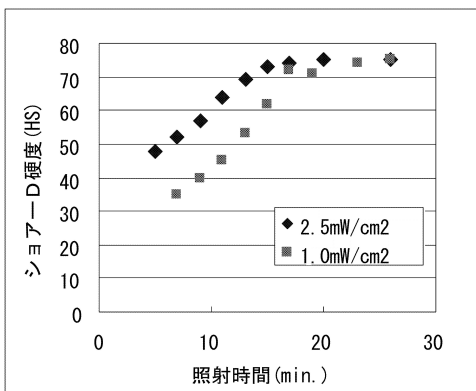


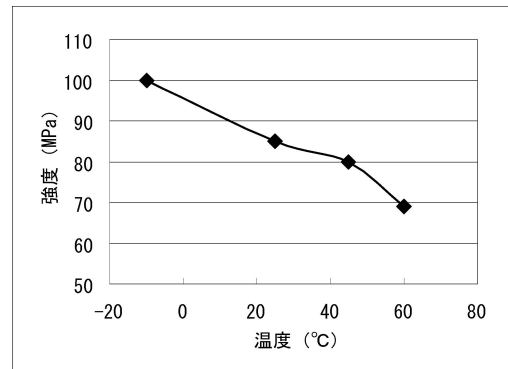
図3 表面硬度

#### 密閉型 (弱臭気)

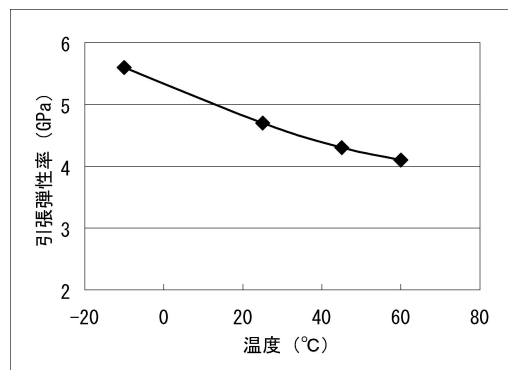
使用法は、D層(保護層)を剥ぎ取り、目的の構造物に貼り付け、A層(UVカットフィルム)を取って、紫外線を直接的に照射することによって硬化させる。硬化後、B層を取り除く。

作業性の条件によっては、A層と同時にB層も剥ぎ取り、オープン状態で紫外線を照射し硬化させることも可能である。

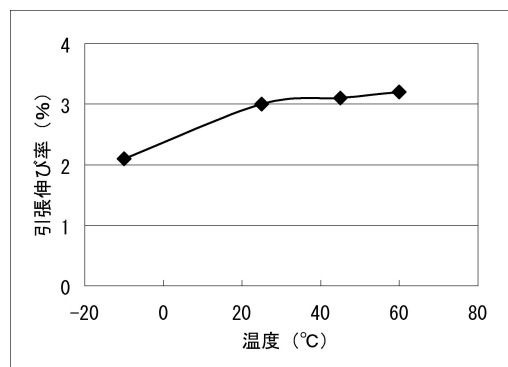
一般的に補強工事等に用いられるエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂などを現場でローラやスプレーなどで積層する場合には、保存性の悪い過酸化物質や臭気、かぶれなど人体に悪影響のあるエポキシ系硬化剤を現場配合しなくては



(a) 引張強度の温度依存性



(b) 引張弾性率の温度依存性



(c) 伸び率の温度依存性

図4 硬化後の物性値

ならない等、作業環境や第三者への養生など種々の問題がある。また、作業の煩雑化や配合ミス、あるいは硬化が遅く温度依存性が大きいなどの原因によって、現場施工上の品質安定が難しいなどの問題点がある。これに対し本材料は、表1に示すように自然光によって容易に安定硬化する特性を有しており、樹脂の現場施工性を大きく好転させている。

### 3 紫外線硬化樹脂の材料特性

#### 3.1 硬化性

図2に、紫外線硬化樹脂の表面が-10°C、25°C、60°C

の時に  $1.0\text{mW}/\text{cm}^2$  の紫外線を照射した時の樹脂の硬化の時間変化を示す。ここで縦軸のショア D 硬度は、JIS Z 2246 ショア硬さ試験に規定されているゴム、プラスチックや石材などの硬さの測定に用いられものである。D 型は、硬質用として使用され、押針をスプリングの力で試料の表面に押しつけ変形を与え、その時試料が示す抵抗力とスプリングの力がバランスした状態での押針の押し込み深さを、0 から 100(HS) までの相対値により硬度として表現したものである。

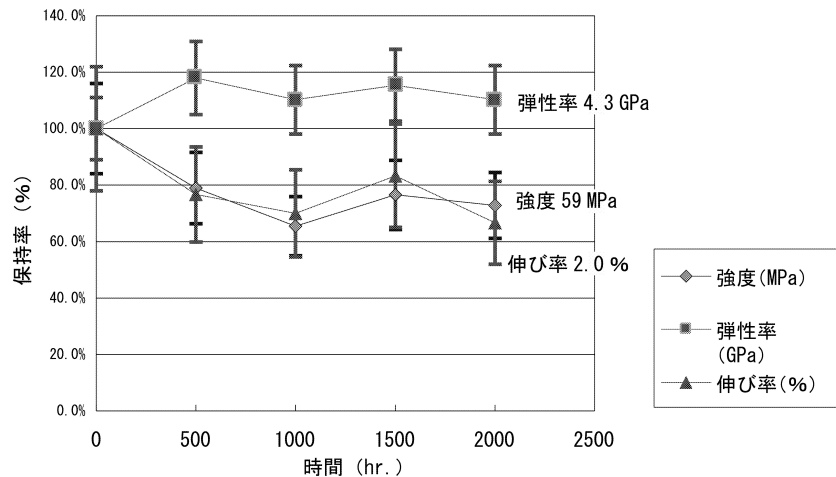


図 5 耐久性（耐候性）試験（JIS K7054B-I 準拠）

図 2 より、 $-10^\circ\text{C}$  においても 35 分程度で硬化させることができるので、温度による硬化時間の変動が小さく、冬季でも短い施行時間で実施できるということになる。北海道のような特別な寒冷地を除けば、現場施工時には標識柱などの鋼材表面温度は夏期で  $60^\circ\text{C}$ 、冬季で  $-10^\circ\text{C}$  程度となる。紫外線硬化樹脂は基本的には紫外線の照射のみにより硬化するため、温度条件による硬化時間への影響は少ないと考えられる。また、季節の違いによる硬化時間の差は、紫外線強度に比例しており温度依存性を考慮しても夏期・冬季いずれの場合でも直射日光が当たれば約 50 分で硬化することがわかる。

一方、既存橋梁上での施工の場合、自然光強度が貼付面全体に均等に当たるとは限らなく、不均一硬化の可能性も考えられる。そこで、実施工においては、人工光源であるケミカルランプを照射する。ケミカルランプの照射距離を 10cm とすると  $1.0\text{mW}/\text{cm}^2$ 、5cm とすると  $2.5\text{mW}/\text{cm}^2$  程度の紫外線量が確保される。図 3 に  $25^\circ\text{C}$  の時の紫外線照射量の違いによる表面硬度の比較を示す。これより、紫外線量の違いがあっても人為的に約 25 分程度の照射環境を確保できれば、安定的な硬化が得られることがわかる。

よって、本材料は紫外線照射のみによって硬化することから、温度による硬化時間の変動が小さく冬季でも短い時間で施工実施できるという特徴を有している。

### 3.2 硬化後の物性値

硬化後の材料の引張試験結果を図 4 に示す。図 4(a) には引張強度の温度依存性を、(b) には引張弾性率の温度依存性を、(c) には伸び率の温度依存性を  $25^\circ\text{C}$  を基準として変動の割合でそれぞれ示す。強度および弾性率について

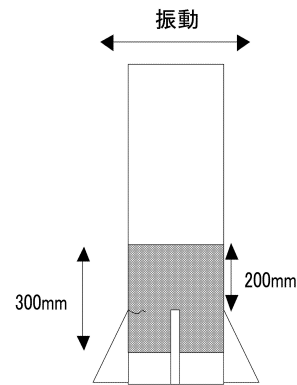


図 6 長柱基部モデル [6]

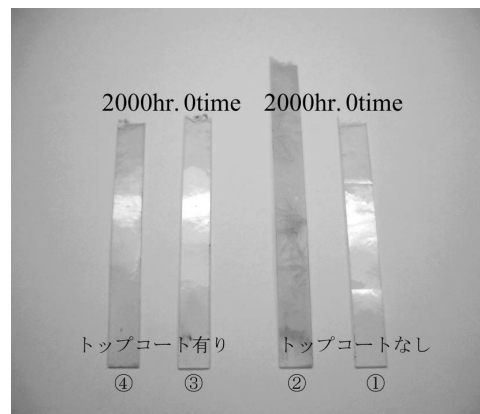


写真 1 表面の光沢保持の状況

は、 $-10^\circ\text{C}$  から  $60^\circ\text{C}$  の温度範囲で、 $25^\circ\text{C}$  の数値に比べ上下 20%以内の変動となっている。また、伸び率については、低温領域で大きな低下が見られるが、 $20^\circ\text{C}$  以上であればほぼ安定した数値になっている。これらの挙動特性は、金属やコンクリートに比べ変動幅が大きく、補強材料としての密着性の視点から採用を見送られていた。これらに対

して視点を変え、異なる特性を持っていることを利用すれば、複合材としての効果に着目することができ、例えば機能の分担（応力分散など）等に効果が期待できる。ここで考え方は、断面性能を上げるのではなく、素材そのものの特性を生かして異種材料間の機能を付加し、耐力を向上させることにある。具体的にはき裂の進展を押さえ、き裂発生後の点検を容易にすることなどである。

### 3.3 耐久性（耐候性）

本材料のような有機材料を使用する場合、材料の耐久性を指摘されることが最も多い。この耐久性を確認する試験として、サンシャインウェザーメーターによる耐候性確認試験が行われる。ここでは、本材料の促進耐候試験後の物性値変動について考察する。

図5に示す耐久性（耐候性）試験は、サンプル数5個の引張試験で行いその平均値をもとに各数値の保持率で示す。ここで、弾性率が100%以上となっているのは、耐久試験中に硬化が進行したためと考えられる。2000時間は実暴露の7～10年に相当するものであり、この耐候試験後の数値は、弾性率で4.3GPa、強度59MPa、伸び率2%となっている。

具体的な値として、著者らの既往の研究である図6に示す長柱構造物補強[6]に用いた事例を引用する。例えば、300mmの補強を施した場合、3mm伸びたとすれば、この場合の伸び率は1%、歪みは0.01mm/mmとなる。これに対してFRPの弾性率を大きめにとって5GPaとした場合の発生応力は50MPaとなり、図5の通り、2000時間耐候試験後の物性値は強度でも上回っている。実際の伸び率は2倍の2%であることから、7～10年の屋外暴露後でも長柱が破壊する前にFRPが経年変化により機能を損なわれることはないと考えられ、耐久性（耐候性）試験結果の数値はこれらを満足するものである。

### 3.4 表面耐候性向上

FRPの基本的な欠点として、表層の劣化によって表面にガラス繊維が現れ、表面の劣化が光沢の低下となって、外観上、顕著に現れることがある。また、この表層の劣化に伴って透明性も低下することが予想される。これを補うため本工法においては、表層にクリアな耐候性のトップコートを使用する。写真-1にサンシャインウェザー試験における2000時間後の表面光沢差を示す。トップコート無しのは光沢の劣化ならびにガラスの毛羽立ちを見ることができ、これに対してトップコートありのは表面変化が極めて少なくなるなど大きく改善されており透明性も向上している。補強部材の表面の状態を直接視認することが2000時間後も可能であることがわかった。

## 4 おわりに

本研究で提案した紫外線硬化樹脂は、時間経過による硬度の変化試験、温度の変化による引張強度の変化試験、耐久性試験結果などから補強・補修材料として使用する限り、実用上許容できる範囲であることを確認することができた。また、一般に樹脂材料が有していると言われている各種の問題点を本材料が解決していることが判った。加えて材料の密閉性から現場での臭気をほとんど出すことなく施工可能となった。

今後、この新材料である紫外線硬化樹脂を利用した各種構造物への補強・補修への適用を検討していくつもりである。ところで、ここで研究は、進化と分化を繰り返してきた異分野や異種の業界を水平に交流させることによって、それぞれの保有する経営資源と技術の交流と共同開発により最適な手法が最短かつ安価に解決が可能となることを示した。これは、樹脂材料の世界も鋼やコンクリート等の既存の材料と同じように耐久性や均一性を追求して進化しているからである。本工法の技術が、樹脂に対する土木業界認識の転換と樹脂業界の用途技術の拡大に貢献できれば幸いである。

本研究は中央大学理工学研究所、三井造船鉄構工事(株)、十川ゴム、中井商工(株)、大日本インキ化学工業(株)の異業種間産学共同研究の一環で行われたことを付記する。

## 参 考 文 献

- [1] 小塩達也, 李相勲, 山田健太郎, 森成顕, 森下宣明: 交通荷重による標識柱の振動と疲労耐久性, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.1009-1017, 2001.3
- [2] 山田健太郎, 近藤明雅, 小林且典, 宮本伸治, 荒木準一: 鋼管柱基部の疲労強度, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1045-1054, 1992.3
- [3] 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三, 祝賢治: 炭素繊維シートの鋼板疲労亀裂補修への適用, 鋼構造年次論文報告集, 第8巻, pp.689-696, 2000.11
- [4] 鈴木博之, 茶野木晶, 宮崎栄市: ガラス繊維強化プラスチックの鋼構造物への適用に関する基礎的研究, 土木学会関東支部第28回技術研究発表会, I-55, 2001.3
- [5] 大倉一郎, 福井唯夫, 中村圭吾, 松上泰三: 炭素繊維シートによる鋼板応力の低下と剥離せん断応力, 土木学会論文集 No.689/I-57, pp.239-249, 2001.10
- [6] 連重俊, 平野廣和, 青木徹彦, 井田剛史, 野中眞一, 丸田光政: 紫外線硬化樹脂を用いた長柱構造応力低減と実大モデル疲労試験, 土木学会論文集 No.735/VI-59, pp.185-195, 2003.6