

# プレストレストコンクリート用 FRP 緊張材の特性 (16)

## FRP ロッドの複合材料としての紫外線劣化モデル

Properties of Fiber Reinforced Plastic Rods for Prestressing Tendons of Concrete (16)  
—Deterioration Model of FRP Rods as Composite Material under Ultraviolet Rays—

山 口 明 伸\*・西 村 次 男\*\*・魚 本 健 人\*\*

Toshinobu YAMAGUCHI, Tsugio NISHIMURA and Taketo UOMOTO

### 1. はじめに

著者らはこれまでに、各種 FRP ロッド・繊維・マトリックス樹脂の耐紫外線性についての実験的検討を行い、その結果を報告している [1]。また特に劣化の著しいアラミド繊維については、繊維単独の場合における劣化現象の定量化を試み、その妥当性を示している [2]。しかし、FRP のような複数の構成材料から成る複合材料の劣化を考える場合、構成材料ごとの単独劣化とそれに伴う相互劣化を考慮する必要があると考えられる。

そこで本研究では、FRP ロッドの紫外線による強度低下を、マトリックス樹脂および繊維のそれぞれの劣化特性を考慮した複合劣化モデルとして表現することを試みた。

### 2. 構成材料の劣化特性

#### 2.1 繊維の劣化

これまでの促進試験の結果から、炭素繊維・ガラス繊維の場合には紫外線が引張強度に与える影響は殆どみられないが、高分子材料であるアラミド繊維の場合には紫外線照射 10 時間後で約 16% (550 MPa)、1000 時間照射後には約 55% (1980 MPa) の著しい強度低下を生じることが分かった [1]。そこで著者らは、ワイプルの Weakest link 理論に基づき、紫外線の照射によりアラミド繊維内部に存在する欠陥数が増加すると仮定することにより、促進試験におけるアラミド繊維の紫外線劣化の進行を定量的に評価することを試みた (図 1 参照) [2]。

図 1 中に示した最小二乗法による近似式を用いて紫外線照射によるアラミド繊維の強度低下を推定した結果が図 2 である。図のように強度低下の推定曲線は実験による実測値と非常に良く一致している。また、本実験の一時間当たりの紫外線照射量は 0.2 MJ/m<sup>2</sup> であり、東京における紫

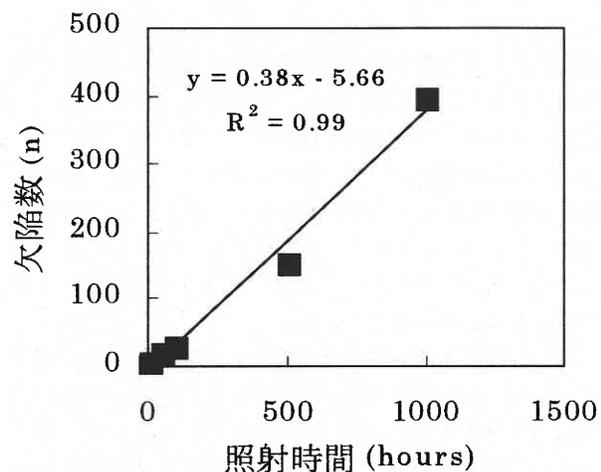


図 1 アラミド繊維の欠陥数の変化

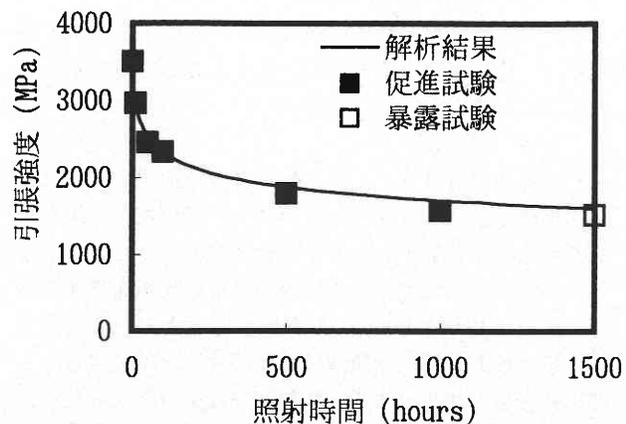


図 3 マトリックス樹脂の紫外線透過率

外線の平均年間照射量が約 264.3 (MJ/m<sup>2</sup>) であることから、本実験の約 1650 時間に相当することになる屋外暴露 15 ヶ月後のアラミド繊維の引張強度も、図 1 に併せて示したように促進試験の結果を用いて行った強度推定結果と

\*鹿児島大学工学部

\*\*東京大学生産技術研究所 第 5 部

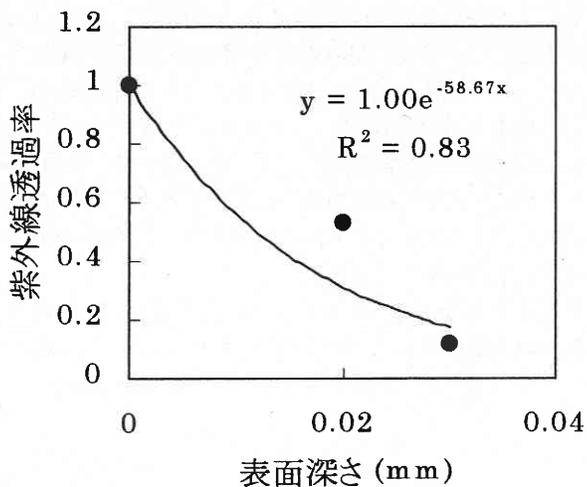


図3 マトリックス樹脂の紫外線透過率

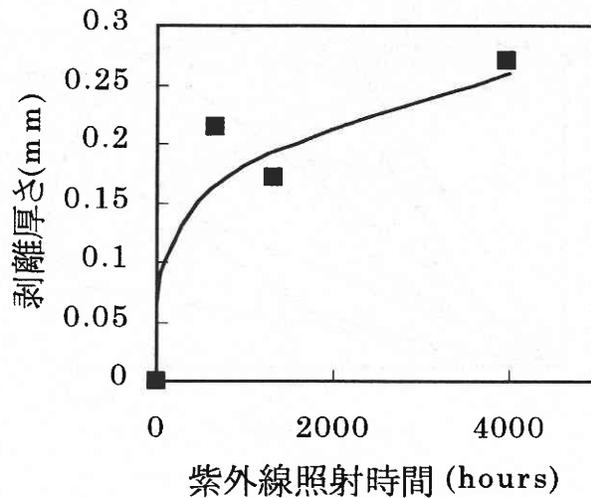


図4 マトリックス樹脂の換算剥離厚さ

極めてよく対応していることがわかる。

したがってアラミド繊維に関しては、ワイブルの *weakest link* 理論を用いることにより紫外線照射後の強度推定が可能であることが明らかとなった。

## 2.2 マトリックス樹脂の劣化

前報までで示したように、マトリックス樹脂の紫外線による強度低下はわずかである [1]。しかも、マトリックス樹脂の引張強度は、連続繊維補強材の引張強度にほとんど寄与していないため、紫外線劣化に対しても強度の低下という面では特に問題にはならない。しかしマトリックス樹脂は、強化材である繊維の結合材あるいは繊維の保護材としての役割が大きいため、その物理化学的特性や保護皮膜としての性能変化に関しては考慮する必要があると考えられる。特に、アラミド繊維のように著しく紫外線劣化するような強化材に使用している場合は、マトリックス樹脂のもつ紫外線に対する保護皮膜としての性能が問題となり得る。したがってマトリックス樹脂の場合、紫外線による樹脂自身の劣化以上に、紫外線透過率あるいは紫外線吸収率を明らかにすることが重要となる。

そこで、促進試験により紫外線照射を行ったマトリックス樹脂の分子構造の変化を赤外顕微分光法により観察し、その結果から樹脂の紫外線透過率を算出した (図3参照)。ここで、マトリックス樹脂内部での紫外線の反射がなく、樹脂内部での吸収率が一定であると考え、図3の結果から厚さ  $x$  のマトリックス樹脂の透過率  $T(x)$  は、下式のように表せる。

$$T(x) = I_m / I_{m0} = \exp(-58.67x)$$

ここで、 $I_{m0}$  はマトリックス樹脂表面の紫外線強度、 $I_m$  はマトリックス樹脂の表面深さ  $x$  における透過紫外線強度である。

さらにこれまでの実験から、マトリックス樹脂は屋外曝露における紫外線や風雨等の影響により、僅かではあるが樹脂表面から剥離劣化を生じることが報告されている [1]。FRP の場合、結合材であるマトリックス樹脂が剥離すると、その部分の繊維も剥離してしまうため FRP 全体の強度に与える影響は小さくない。そこで本研究では、CFRP ロッドの屋外曝露試験における強度低下率から炭素繊維の剥離厚さを推定し、それを基にマトリックス樹脂の剥離進行の予測式を近似的に求めた。(図4参照)。

## 3. FRP の強度低下の推定

FRP ロッドの引張強度はそのほとんどを繊維強度に依存しているため、紫外線によりロッド内部に存在する繊維の強度が低下する場合、当然 FRP ロッド全体も相応の強度低下を生じることになる。しかし、AFRP ロッドの場合の紫外線照射による引張強度低下率 (2500 時間で 13% 低下) と、アラミド繊維の場合のそれ (1000 時間で 53% 低下) を比較しても明らかのように、両者の引張強度低下率は大きく異なる。これは FRP ロッドの場合、繊維単体の場合と違って、内部繊維の周囲に存在するマトリックス樹脂が紫外線に対する保護皮膜としての役割をし、ロッドの内部方向へ透過する紫外線の強度を弱める働きをするためである。したがって、FRP ロッドのような複合材料の劣化を考える場合、構成材料の単独劣化とそれに伴う相互劣化を考慮しなければならない。本研究で対象とした紫外線劣化の場合、CFRP、GFRP に関しては、使用繊維である炭素繊維

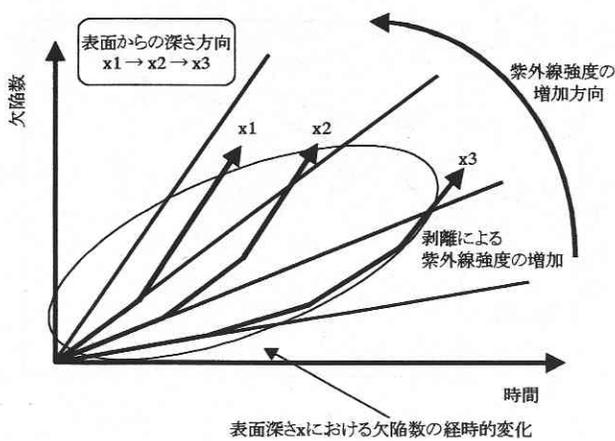


図5 剥離による欠陥数の増加の影響

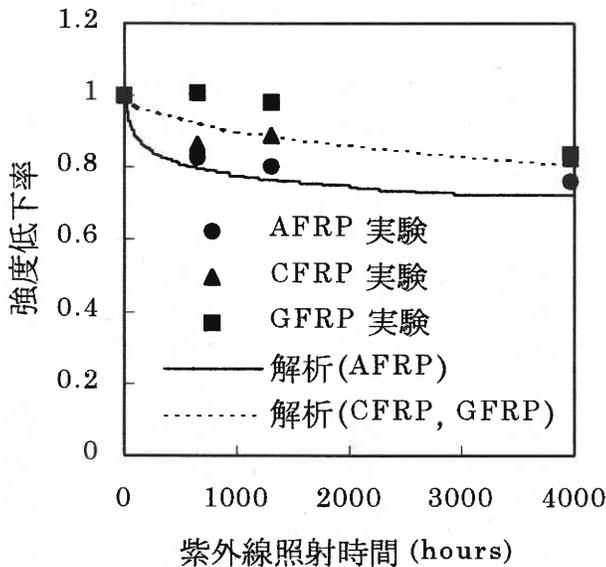


図6 各種 FRP ロッドの強度低下率

維・ガラス繊維が紫外線による影響をほとんど受けないため、マトリックス樹脂の剥離とそれに伴う繊維の損失分のみの影響を考えればよいが、AFRP に使用されるアラミド繊維のように、繊維自体も紫外線劣化を生じる場合、剥離だけでなく、マトリックス樹脂を透過した紫外線の影響による内部繊維の強度低下も同時に進行することになる。この場合は時間とともに紫外線透過深さが進むことになり図1で示した繊維の欠陥数の増加率も変化するため紫外線による強度低下が早まることになる (図5参照)。

そこで FRP ロッドの紫外線による強度低下を以下のように算出した。まず、繊維が紫外線劣化を生じる場合は、マトリックス樹脂の紫外線透過率からロッド断面内に分布する各繊維の強度を決定し、それを基に FRP ロッド全体としての強度低下を推定した。ここで、マトリックスの剥離とそれにとまなう繊維の損失の影響を考え、マトリックスの消失によって生じる断面の減少とロッド内部への紫外線到達距離の経時変化を考慮した。

以上の紫外線劣化モデルによる解析結果が図6であり、実際の曝露試験結果とを比較した結果、いずれの FRP についても本モデルの推定精度が高いことが確認出来た。

#### 4. ま と め

以上の結果から以下のことが明かとなった。

- (1) 耐紫外線性に優れた繊維を使用した FRP の場合、マトリックス樹脂の剥離劣化が主な紫外線劣化要因となる。
- (2) 繊維および樹脂の紫外線劣化が顕著な場合、マトリックス樹脂の剥離劣化および紫外線透過率と、繊維の強度低下等の経時変化を含んだ複合劣化を考慮する必要がある。
- (3) これらを考慮した紫外線劣化モデルによる解析結果と、実際の曝露試験結果とを比較した結果、いずれの FRP についても本モデルの推定精度が高いことが確認出来た。

#### 謝 辞

本実験を遂行するに当たり加藤佳孝氏 (東京大学生産技術研究所 助手) の多大なる御協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

(1998年3月30日受理)

#### 参 考 文 献

- 1) 西村, 魚本, 加藤, 勝木: 「異なった環境条件で曝露した各種 FRP ロッドの引張強度特性」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, 1996. 6.
- 2) 山口, 西村, 魚本: 「紫外線による各種繊維の劣化現象の評価方法に関する基礎研究 FRP ロッドのクリープ破壊に関する基礎研究」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No. 1, 1996. 6.