

## 繊維の疲労を考慮した架橋応力劣化則のモデル化と FRC の疲労実験による検証

東京大学 学生会員 ○全 邦釘  
東京大学 正会員 松本 高志

### 1. 目的

繊維補強コンクリート（以下 FRC）は亀裂面において繊維による応力が働くことで高い靱性を発現する材料であり、その特性を活かして道路橋床版の増厚など、疲労荷重を受ける構造物にも広く利用されている。疲労荷重下では FRC 中の繊維が破断することで繊維の数が減り、架橋応力（ひび割れ時に繊維が亀裂面において伝達する応力）が減少する。そのような疲労劣化をモデル化して、その妥当性を実験により検証した。そして、モデルを用いることで FRC の疲労強度を高める繊維長の設計を検討した。

### 2. 架橋応力—開口変位関係

架橋応力は、亀裂面において繊維が伝達する応力の和である。

そこで図-1 のように、単繊維引抜け荷重の線形和として架橋応力を求めた。単繊維引抜け荷重は引抜け変位、埋め込み長の関数として表現される。架橋応力を求める際、以下のことを考慮する。

- ・繊維は三次元空間にランダムに分布する。
- ・亀裂面との角度によって 荷重・繊維強度が変わる。

以上より、架橋応力  $\sigma$  は次の式のように表される。

$$\sigma(\delta) = \frac{V_f}{A_f} \int_{\phi=0}^{\frac{\pi}{2}} \int_{z=0}^{l_e \cos \phi} P(l_e, \delta, \phi) \cdot p(\phi) \cdot p(z) dz d\phi$$

ここで、 $\delta$  は開口変位、 $V_f$  は繊維の体積、 $A_f$  は繊維の断面積、 $P(l_e, \delta, \phi)$  は単繊維引抜け荷重、 $l_e$  は繊維の埋め込み長さ、 $\phi$  は埋め込み角度、 $p(\phi)p(z)$  は亀裂面に繊維が存在する確率である。

### 3. 繊維の疲労

繊維は繰り返し荷重を受けることで疲労破断に至る。その際の応力比（応力／繊維強度）と寿命  $N$  との関係（S-N 関係）を次式のように定義した。

$$\begin{cases} \frac{\sigma_N}{\sigma_{\max}} = 1 - k \cdot \log(N) & (N < 10^5) \\ \frac{\sigma_N}{\sigma_{\max}} = 1 - k \cdot \log(10^5) & (N \geq 10^5) \end{cases}$$

ここで、 $\sigma_N$  は作用している応力、 $\sigma_{\max}$  は繊維強度である。応力比 0.5 の時の寿命  $N$  が  $10^5$  回となるように  $k$  を設定した。開口変位から架橋応力を求める関数に繊維の S-N 関係を導入することで、ひび割れ時に繊維が亀裂面において伝達する応力である架橋応力の劣化を表現した。

### 4. 架橋応力劣化則のモデル化

前節において、個々の繊維の応力比と寿命（載荷回数）との関係を求めた。その関係をひび割れ開口幅と架橋応力の関係の解析モデルに適用して、架橋応力と載荷回数の関係を表現出来る解析モデルを作った。つまり繊維が、載荷回数が増えて疲労することで破断すると、その繊維は応力を伝達しなくなるとして、単繊維の応力の線形和である架橋応力の和の計算には入れないことで減少を表現した。疲労モデルに適用するひび割れ開口幅は本研究においては実験値より決定した。

キーワード FRC, 架橋応力, 疲労破断

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 TEL 03-5841-7455

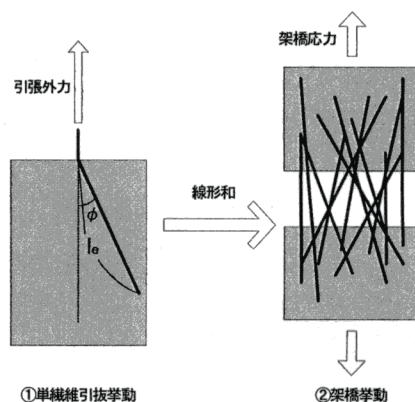


図-1. 線形和としての架橋応力

## 5. FRC の引張疲労実験

前節で構築したモデルの妥当性を検証するため、FRC の引張疲労载荷実験を行った。用いた実験器具は、図-2 の通りである。繊維は表-1 の繊維を用いた。供試体の配合については、既往の研究<sup>9)</sup>を参考にし、表-2 ようにした。変位を 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm に固定してそれぞれ 3 体ずつ引張疲労試験を行い、応力比と载荷回数の関係を調べた。その際の载荷回数は 200 万回、周波数は 4Hz とした。

表-1. 繊維の材料特性

|                     |      |
|---------------------|------|
| 長さ(mm)              | 12   |
| 直径( $\mu\text{m}$ ) | 37.7 |
| 体積混入率(%)            | 2.1  |
| 繊維強度(MPa)           | 1610 |
| 付着強度(MPa)           | 2.01 |

表-2. 配合の割合（重量比）

|          |         |
|----------|---------|
| 水        | 1       |
| セメント     | 0.32    |
| 細骨材      | 0.42    |
| SP 混和剤   | 0.03    |
| メチルセルロース | 0.00071 |

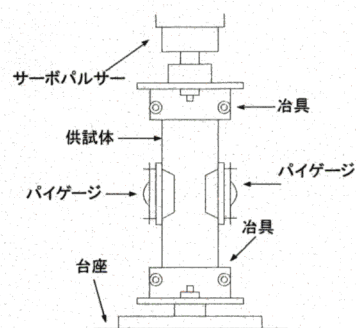


図-2. 実験器具

## 6. 実験結果と解析モデルによる計算結果との比較

第4節によって計算された結果と、第5節の実験によって求めた結果を比較すると図-3 のようになる。実験結果に見られるような、寿命  $N$  が  $10^5$  回を越えると応力比の減少が非常に緩やかになること、変位が大きいと応力比の減少が大きくなるのがモデルでも概ね反映出来ていると言える。

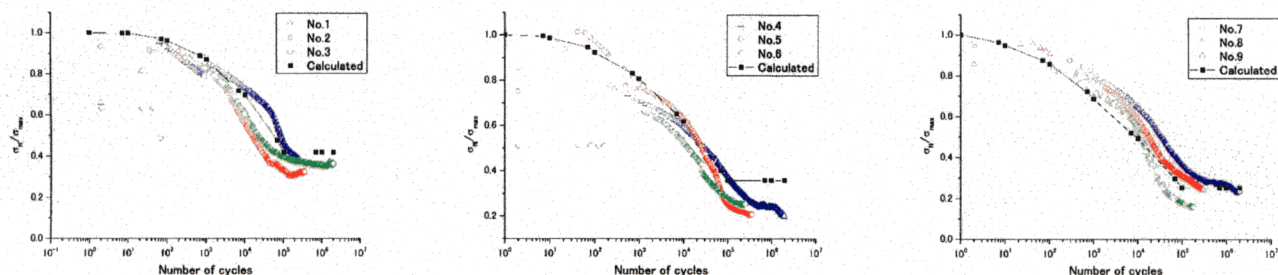


図-3. 変位固定による疲労試験の結果と計算結果（左図より順に変位 0.1mm, 0.15mm, 0.2mm に固定）

## 7. 材料設計の検討

モデルを利用し、材料定数を変えた時にどのように架橋応力が劣化するか調べた。一例として繊維長を変えて  $N=10^3$  回、 $2 \times 10^6$  回の時の疲労強度を求め、図-4 の結果を得た。 $N=10^3$  回の時点では繊維長が 8mm の時に、 $N=2 \times 10^6$  回の時点では繊維長が 6mm の時に、それぞれ強度が最大になることがわかる。つまり、 $10^3$  回の疲労荷重がかかるような構造物の場合は繊維長が 8mm の FRC を用いれば良い。これは、ある载荷回数を設定した時に、モデルを利用する事で最適な材料を設計出来ることを示している。

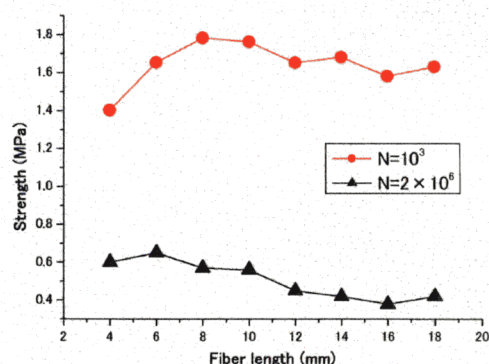


図-4. 繊維長と応力との関係

## 8. 本研究の成果と今後の課題

本研究では、個々の繊維の疲労破断を考慮することで架橋応力劣化則をモデル化し、実験により検証し、妥当性を示した。また、ある载荷回数での最適な材料を、構築したモデルを用いて設計出来るということを示すことが出来た。このモデルの妥当性を実験によって確かめるということが、今後の課題として挙げられる。

## 参考文献

- 1) Kanda, T. and Li, V.C., "Practical Design Guidelines for Pseudo Strain Hardening Cementitious Composites Reinforced with Short Random Fibers -Part I Micromechanics Theory for Predicting First Cracking Strength", J. Struct. Constr. Eng., AIJ, No.539, 2001, pp.13-21(in Japanese)