

繊維の形状設計による高靱性繊維補強セメント系材料の開発

○ 東京大学 学生員 坂田 直史
東京大学 正 員 松本 高志

1. はじめに

社会基盤構造物における補修・補強もしくは耐震性・耐久性という問題解決に寄与し得る材料として ECC(Engineered Cementitious Composites) という材料がある。ECC とはセメントと繊維の複合材料で、その特長は引張応力下で微細な複数ひび割れを形成していきながら優れた靱性とエネルギー吸収能を見せるという点にある。ECC に関してすでに高性能ポリマー系繊維では開発が進んでおり、実現が可能であるという結果が報告されている。しかしながら繊維コストの高さが実用化への障害となっている。

そこで本論文では、比較的安価であり従来 ECC 実現の報告がされていない鋼繊維に形状設計を施すことで ECC を開発することに取り組んだ。以下に任意の形状を持つ繊維に対するモデルの詳細を述べ、鋼繊維 ECC の開発のための解析的検討の結果を報告する。

2. 曲線形状をもつ単繊維引抜の解析

まず曲線形状を持つ単繊維がセメントマトリクスから引き抜かれる際の挙動を解析する。使用する鋼繊維は長さ 30mm、直径 380 μ m の寸法を有する。単繊維の引き抜き荷重 P は、マトリクスから引き抜く際の繊維先端の変位 u に依存し、各繊維形状ごとに、特有の関数 $P(u)$ となる。本モデルでは、繊維が引き抜かれる際の、繊維-セメントマトリクス間の化学結合による付着と、曲線部分での両者の摩擦の作用を考慮する。さらに、外力による仕事に変形エネルギーに変換されるというエネルギー保存則を利用し、長さ ds の微小要素において、

$$dP = (\tau_0 \cdot p + f \cdot P \cdot C + M \cdot C') ds \dots\dots\dots (1)$$

の式を最終的に得る。ここで τ_0 は付着強度、 p は繊維の周長、 f は摩擦係数、 C は曲率、 M は曲げモーメント、 C' は曲率の変化率である。

解析したのは埋め込み長さが 15mm の直線、フック、波の 3 形状(図-1 参照)についてで、荷重と変位の関係は次の図-2 のとおりである。

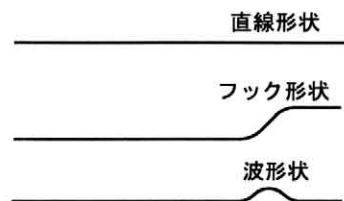


図 1 解析に用いた 3 形状

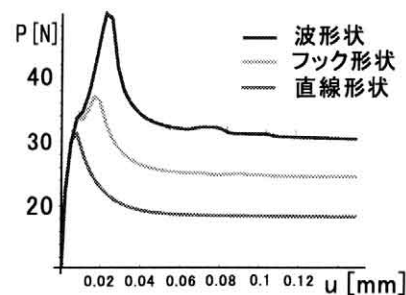


図 2 各形状ごとの引抜荷重と変位の関係

3. 繊維架橋応力の解析

次に、多数の繊維によってひび割れ面で伝達される応力 σ とひび割れ開口幅 δ の関係 $\sigma(\delta)$ を求める。先に求められた単繊維の引き抜き荷重 P と変位 u の関係を用い、埋め込み長さ、埋め込み角度を考慮した上で、各々の繊維の伝達力を総和して $\sigma(\delta)$ を求める。

得られた結果は図-3 のとおりである。ここでは、繊維の引き抜き荷重と変位の関係がそのまま反映され、大きな引抜荷重を示す波形状が架橋応力においても大きくなるという結果が得られた。

4. 繊維の形状設計による ECC の開発

本節では、ECC 挙動すなわち複数ひび割れを達成するための必要な繊維の限界体積混入量 V_f^{crit} を 3 節の架橋応力の関係を利用して算出する。ECC の成立条件としては、

$$\text{繊維最大架橋応力 } \sigma_0 > \text{初期ひび割れ強度 } \sigma_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{補エネルギー } J_b > \text{マトリクス破壊靱性 } J_{tip} \quad \dots\dots\dots (3)$$

の 2 条件が挙げられる。(図-4 参照)

これらを踏まえて、フックと波の 2 つの繊維形状について、曲線部の位置の ECC として必要な限界体積混入量への影響についての解析を行なった結果が図-5 である。ここで繊維の埋め込み末端からの曲線部分までの長さを l_{cur} とする。通常の直線のときに必要な V_f^{crit} が 1.14% であるのに対し、曲線部の位置を変化させると $l_{cur} = 8\text{mm}$ の時、フック・波はそれぞれ 0.47%, 0.23% にまで低減することができた。これによりここで提案する波形状は直線に比べ最大で 1/9 にまで V_f^{crit} を低減できる。このとき曲線部が図-6 ように配置されるとき経済性に優れた繊維の形状設計となる。

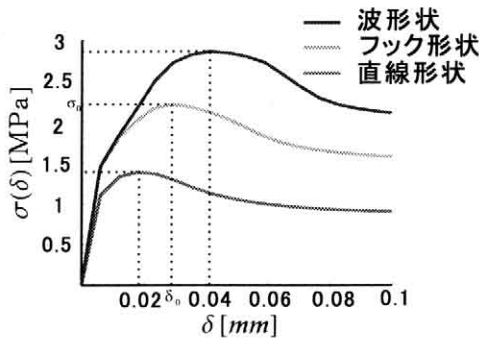


図 3 架橋応力とひび割れ開口幅の関係

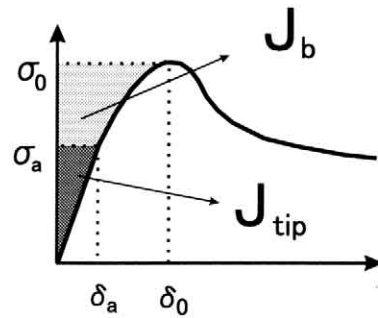


図 4 ECC としての必要条件

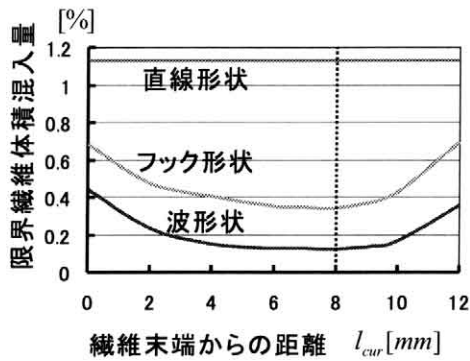


図 5 曲線部分の位置による限界混入量の変化

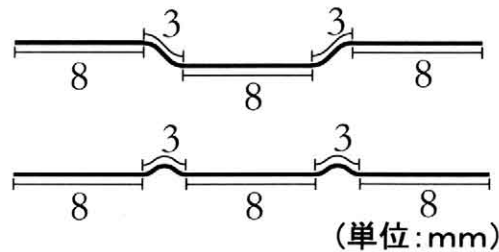


図 6 最適化された繊維形状

5. まとめ

本研究は、鋼繊維を用いた ECC (Engineered Cementitious Composites) の実現の可能性を解析的に示した。

フックと波の 2 形状において曲線部の位置は最大繊維架橋応力と限界体積混入量に影響が大きく、特に提案した波形状は通常の直線形状に比べ、限界体積混入量が最大で 1/9 以下になるという成果を示すことができた。ECC において繊維の混入量がコストに反映されるという性質上、より少ない混入量で ECC を実現することが実用化への手立てとなる。

本研究で提案した手法は、鋼繊維だけでなく任意の繊維材料において解析が可能であり、任意の形状について ECC を開発するための限界体積混入量を求めることができる。今後この手法により、いくつかの形状に関して解析を行ないかつ実験により妥当性を検証し、ECC においてさらなる最適な繊維形状の開発を行っていくことが必要である。

参考文献

- 1) 遠藤蔵人. マイクロメカニクスに基づく短繊維補強セメント系複合材料におけるひび割れ発生後の挙動のモデル化, 東京大学卒業論文, 1998
- 2) Gilles Chanvillard. Modeling the pullout of wire-drawn steel fibers, Cement and Concrete Research 29, 1999