

論文

[1212] ポリプロピレン繊維補強セメント中の繊維・マトリックス間の
付着特性に及ぼす繊維の表面処理の影響

正会員○大野 定俊 (竹中技術研究所)

D.J. Hannant (Univ. of Surrey)

J.G. Keer (Univ. of Surrey)

1. はじめに

ポリプロピレン繊維補強セメントはヨーロッパを中心にアスベスト代替品のひとつとして開発されてきており、近年商品化され実際に用いられ始めている。市場の状況が異なるので、わが国で同じような利用が可能か否かは今後の課題であると思われるが、この複合体は高強度かつエネルギー吸収能に優れているので、さらに色々な利用方法が考え出されてゆくものと期待されている。ポリプロピレン繊維は一般的な合成繊維であり、繊維自身は表面の親水性などの点から考えて必ずしもセメントの補強材に最適とは言えない。しかし、セメント補強用に用いる目的で開発されてきた繊維は小繊維化された網状の連続繊維であり、繊維とマトリックスの付着特性の種々の改良がなされてきている。ポリプロピレン繊維に限らず、今後色々な繊維がセメント補強材の対象として考えられている状況のなか、どのような付着特性の改善が複合体の性能を高めるために有効であるかを知ることは、この種の材料の今後の発展にとって重要なポイントとなると思われる。

2. 実験概要

2.1 実験計画

本実験で比較された繊維の表面処理は2つの異なった処理の効果を含んでいる。ひとつは繊維表面の比表面積を高めるために行われる機械的なアブレーション処理の効果であり、ポリプロピレン・フィルムを小繊維化する前にフィルム表面を毛羽立たせるものである。もうひとつは、表面の化学的な処理であり、繊維表面の濡れ性を改善するものである。表-1に実験の対象とされた繊維を示す。表中で N4 と N6 の繊維は表面処理がされていないものであり、N5 と N7 は表面処理されているものである。N5 と N7、および N4 と N6 の違いは小繊維化された繊維の幅が異なるのみで表面の状態は同じである。また、本実験は繊維の表面状態が及ぼす複合体の引張挙動の影響を確認するために、表-1に示すように、N4、と N5 及び N6 と N7 の比較において 3～14% の範囲の数レベルの繊維量に関して引張試験が行われた。一方、複合体の引張試験とは別に、繊維の形態の観察、複合体の断面中における繊維の分布状況を解析することにより、複合体中の繊維とマトリックス間の付着特性を議論した。

表-1 実験計画表

複合体 名称	繊維名	公称 繊維幅 (mm)	表面状態 (アブレーション +化学処理)	目標繊維量
ON4	N4	0.18	処理なし	3～12%
ON5	N5	0.18	処理有り	3～12%
ON6	N6	0.12	処理なし	3～12%
ON7	N7	0.12	処理有り	3～12%

2.2 試験体および引張試験

試験体：引張試験体のサイズは約 5x25x300 mm であり、薄板状の試験体から所定の寸法に切られて作られた。各実験シリーズとも実験で目標とされる繊維率は、繊維網の枚数と製作されるシートを調整することにより達成された。繊維の混入率は引張試験後、各試験体毎に試験体の端部を約 50mm 切断し、そのセメント・マトリックスを塩酸で溶解して繊維量を直接求めることにより、その体積率が求められた。

引張試験：試験体は機械式引張試験機（インストロン1120）を用いて直接引張試験により载荷された。試験体のひずみは差動トランス型ひずみ計を試験体両面に検長 100mm で固定することにより測定した。引張試験はクロスヘッドの速度で 10 mm/min、複合体の平均ひずみ速度に換算して 3.5 %/min. に相当する载荷速度で行われた。载荷時の荷重-変位関係は X-Y レコーダーにより記録された。载荷試験後、試験体上の検長 100mm 間に発生したひびわれの数が数えられた。

繊維および複合体断面の観察： N4~N7 の各繊維の観察に加え、アブレーション処理されたポリプロピレン・フィルムが電子顕微鏡により観察された。また、小繊維化された繊維は複雑な形態をしているので、複合体中で繊維の状態を確認するために光学顕微鏡によって複合体の横断面を観察した。この観察において繊維とマトリックスの良好なコントラストを得るために、マトリックスには白色セメントが用いられた。白色セメントを用いた試験体も他の試験体と同様な手順で製作された。試験体は材令 2 週で切断され、光学顕微鏡下で観察可能な状態になるまで表面が研磨された。光学顕微鏡の観察によって得られた画像イメージは画像解析装置により解析され、繊維の断面積及び周長の分布状態が求められた。

3. 実験結果と議論

3.1 複合体の製作時における表面処理の影響

引張試験の結果を議論する前に、試験体の製造の段階で気づかれた点について説明しておく必要がある。本来、ポリプロピレン繊維は表面の濡れ性が悪いので、セメント・マトリックスとの付着があまり期待できないという心配から濡れ性の改善がされてきた。繊維表面の濡れ性が悪いと繊維とマトリックスが接触しない場所ができ、適切な付着が確保されないと思われる。しかし、ハンドレイアップ法で 4~8% 程度の通常の繊維量の複合体をつくる際には、化学的な表面処理をしていない N4, N6 繊維でも濡れ性の悪さに起因する不都合は認められなかった。ただし、繊維量が 10% 以上になると、セメントペーストが繊維の間に浸透して行きにくいように感じられた。この理由としては、低い繊維量の場合は用いられたセメントペーストが低水セメント比で、粘性が高く流動性の低いものが用いられたためと考えられる。すなわち、ハンドレイアップ法では流動性の少ないセメントペーストが手によって強制的に繊維間に接触させられていくので、繊維表面の濡れ性があまり問題とならなかったものと判断される。一方、繊維量が増加してくると、繊維間に浸透し易い流動性に富むセメントペーストが用いられるので、繊維表面の濡れ性能が試験体の製造し易さに影響するのもかも知れない。こうした結果から推測すると、工業的な生産ラインのように、流動性に富むセメントペーストを繊維間に浸透させてから、真空で脱水する方法では、繊維の表面の濡れ性が製品の性能に影響するかも知れないと考えられた。

3.2 繊維の形態と複合体中の繊維の分布

図-1 は N5 繊維の電子顕微鏡写真である。写真から明らかなように小繊維化された繊維は非常に複雑な形態を示している。この繊維は薄いフィルムにスリットを入れた後に広げられること

によって網状にされるが、最終的な製品は単にスリットを入れた部分で繊維が分岐しているだけでなく、より細かな毛状繊維が主たる繊維の両端部から分岐しているのが見られる。

このような特徴的な繊維の形態は複合体中においても同様に認められる。図-2のセメント複合体横断面の顕微鏡写真から明かなように、繊維端部は複雑に分岐しており、主繊維の両端部周辺には毛状繊維と見られる数 μm 程度の繊維が分散しているのが見られる。複合体中の繊維の周長や断面積については、従来直接測定されたデータはなかったので⁽¹⁾、その断面を画像解析装置によって解析することとした。その結果 N5繊維に対しては図-3に示すような繊維の断面積、および周長の分布結果が得られた。小繊維化されたポリプロピレン繊維は多くの毛状繊維や分岐した繊維を有するので、

その断面積の値は広い範囲に分布している。さらに注意深くみると、断面積の分布には2つのピーク値がある。ひとつは主繊維のピーク値で、もうひとつは細かな毛状繊維のものと考えられる。しかし、この毛状繊維は数多いけれども面積的には小さいので全体に占める面積比率は10~15%に過ぎない。このため摩擦付着応力の計算上はそれほど大きな影響を及ぼさないとと思われるが、繊維とセメントマトリックス間の応力伝達の機構を考える場合、これらの小繊維や毛状繊維は必ずしも主繊維と同様の連続繊維として機能しているわけではなく、主繊維の動きに対して、機械的なアンカーとして作用することが考えられる⁽²⁾。言い換えれば、これらの細かな繊維の存在によってこのポリプロピレン繊維は大きな付着応力を実現しているとも考えられる。

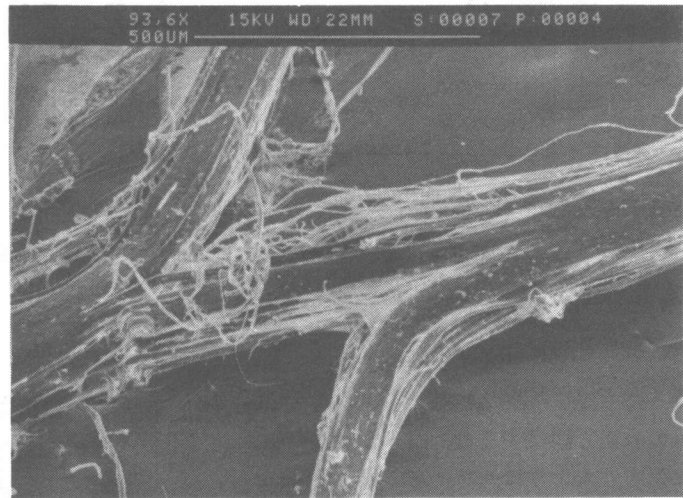
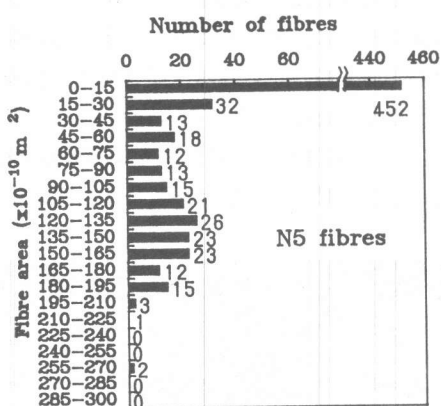


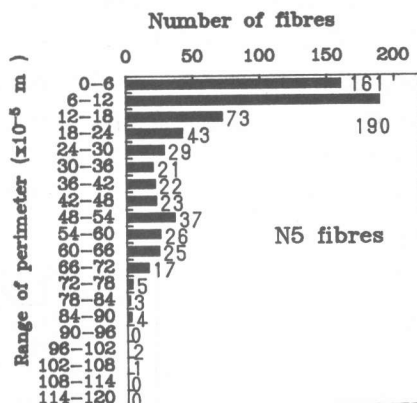
図-1 ポリプロピレン繊維の電子顕微鏡写真 (N7)



図-2 ポリプロピレン・セメント複合体の横断面 (N5)



(a) 断面積の分布



(b) 繊維周長の分布

図-3 複合体横断面におけるポリプロピレン繊維の分布 (N5 繊維)

一方、アブレーション処理を行ったポリプロピレン・フィルムの表面を観察すると、図-4に示されるように、フィルム表面に細い小繊維が分岐しているのを見ることができる。しかしこの小繊維は写真に見られるように 0.2~0.5mm の間に何本かフィルム表面から分岐してきているのみで、密度はそれほど高くない。これに対しフィルムにスリットを入れて網状にするときにできる毛状繊維は主繊維のスリット間隔が狭くなれば増加する傾向にあると共に、主繊維の両側から分岐しているのかかなりの密度で存在していると思われる。また、この処理によってフィルム表面はざらついた感じとなり比表面積が増加していることが窺われる。

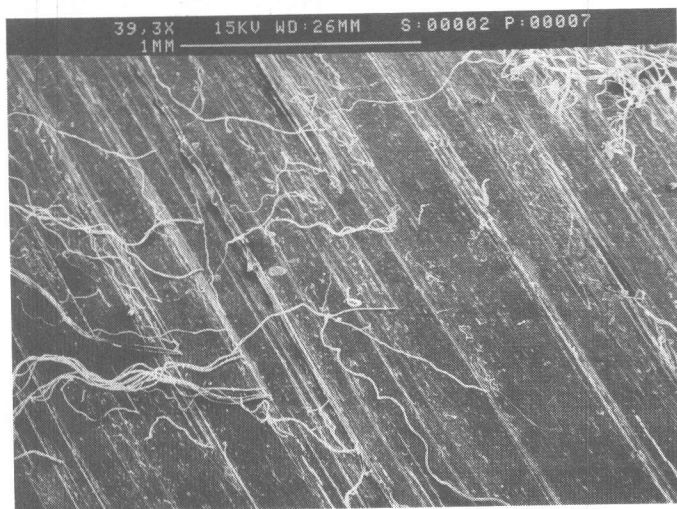


図-4 アブレーション処理されたフィルムの状態 (電子顕微鏡写真)

3.3 摩擦付着応力

繊維に作用する摩擦付着応力は、引張試験によって生じる平均ひびわれ間隔が繊維とマトリックス間の応力伝達長の 1.364 倍に相当すると仮定すると、ACK理論に基づいて次式から求めるこ

とができる⁽³⁾。

$$\tau = 1.364 \frac{\sigma_{mu}}{x} \cdot \frac{V_m}{V_f} \cdot \frac{A_f}{P_f} \quad (1)$$

ここで、 τ ：摩擦付着応力、 x ：応力伝達長、 σ_{mu} ：ひびわれ発生強度、
 V_m ：マトリックスの体積率、 V_f ：繊維の体積率、
 A_f ：繊維一本当たりの平均断面積、 P_f ：繊維一本当たりの平均周長

図-5、図-6にはそれぞれ N4, N5 繊維と N6, N7 繊維について繊維の作用応力と (1)式から求められる摩擦付着応力との関係を示している。図-5に示されるように、計算された摩擦付着応力は繊維の作用応力が高くなると減少する傾向にある。この原因には繊維の形態、特性、および繊維とマトリックスとのポアソン比の差などが関与している。N4と N5 繊維の比較では、繊維の作用応力が高い領域でN4 繊維の方がN5 繊維より若干低い摩擦応力を示す傾向にあったが、その差は期待されたものよりかなり小さかった。一方、N6 試験体のデータ数は少ないけれども、図-6に示されるように N6 と N7 の比較では、両者の摩擦付着応力の差はほとんど認められない。

繊維の表面処理には濡れ性の改善を目的とした化学的な処理と、機械的な付着向上を目的としたアブレーション処理の両者が含まれているが、本実験で両者を区

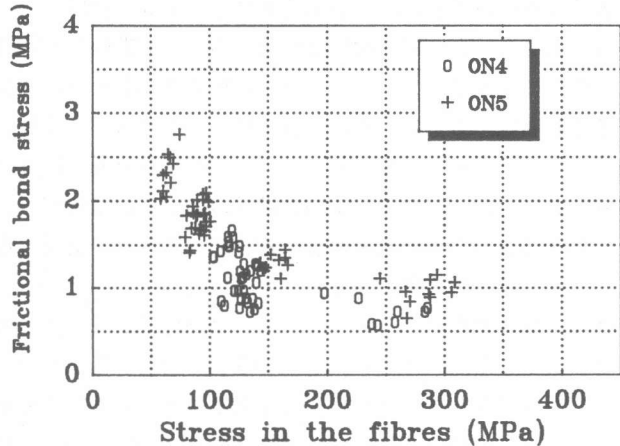


図-5 摩擦付着応力と繊維の作用応力との関係 (N4 と N5 繊維の比較)

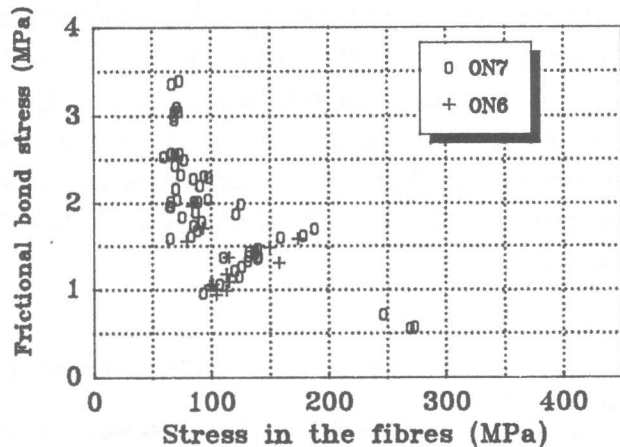


図-6 摩擦付着応力と繊維の作用応力との関係 (N6 と N7 繊維の比較)

別して評価することは難しい。しかし、全く表面処理のない繊維でも比較的大きな応力伝達能力を示すことから判断すると、この種の繊維の応力伝達は繊維自身の網状の形態や小繊維化に伴う細かな2次繊維や毛状繊維などによる機械的な効果が支配的であるためと考えられる。この意味では本実験の範囲では、化学的な表面処理は応力伝達にあまり影響しないと考えられた。しかし、複合体の製造方法として工業的な手法が採用された場合には影響があるかも知れない。

本実験結果が繊維の形態に依存する機械的な応力伝達の差によってもたらされたものとする、次のような説明がN4, N5繊維とN6, N7繊維に関する結果に対して考えられる。

繊維自身の観察で明らかにされたように、繊維の表面処理、すなわちアブレーション処理はフィルム表面に細かな毛状繊維や小繊維を作り出すことが出来る。しかし、フィルムにスリットをいれて開いた場合にも、結果的に繊維間に細かな小繊維や毛状繊維が多く作り出されている。フィルムの観察によれば、アブレーション処理による小繊維の密度よりもフィルムを開く事によって生ずる毛状繊維の方がはるかに密度が高い。そのうえ、今回の繊維のアブレーション処理はフィルムの片側表面のみに施されたもので、繊維の形態の観点からもその効果はあまり期待できないかもしれない。それでも、N4, N5繊維のような繊維幅が広いタイプでは(0.18mm)、アブレーション処理によって多少機械的な付着を高めることが出来るものと判断される。しかし、N6, N7繊維のように繊維幅が狭くなると(0.12mm)、スリットが多く入れられるので、その効果によってできる小繊維が卓越し、アブレーション処理によって作り出される小繊維の効果は相対的に小さくなる。そのため、アブレーション処理の効果が目立たなくなるものと思われる。いずれにしても、繊維に対して付着を高める表面処理はされた方が色々な観点から望ましいことは確かであるが、今回の程度の表面処理では繊維とmatrix間の応力伝達を基本的に変化させるほどの影響を持つものではないと判断された。

4. まとめ

本研究では小繊維化したポリプロピレン繊維の表面処理が複合体中の付着特性に及ぼす影響について実験的に検討した繊維の観察と、複合体の横断面の画像解析結果から、このポリプロピレン繊維は主繊維とその両端部から分岐する細かな2次繊維や毛状繊維から成っていることが明らかになった。また、繊維の表面処理は濡れ性を改善する化学的な処理と機械的な付着を増すアブレーション処理の両者を含んでいるが、表面処理による付着特性の改善効果は期待されたほど大きくはなかった。この理由としては、この繊維の応力伝達が繊維自身の網状の構造とネット化される場合にできる小繊維あるいは毛状繊維の機械的な効果によって大きく支配されているためと考えられる。

参考文献

- (1) Hughes, D.C., 'Fibrillated polyalkene film in cement', Ph.D. Thesis, University of Surrey, 1983.
- (2) Ohno, S., Keer, J.G. and Hannant, D.J., 'Micromechanism of stress transfer between fibre and matrix in polypropylene fibre cement composite', Takenaka Technical Research Report, No.41, 1989.
- (3) Aveston, J., Mercer, R. A. and Sillwood, J.M., 'The mechanism of fibre reinforcement of cement and concrete', National Physical Laboratory, SI No. 90/11/98, 1975.
- (4) Keer, J.G., 'Polyolefin reinforced cement in tension and flexure', Ph.D. Thesis, University of Surrey, 1983.