

論文

[1115] ポリプロピレン繊維補強セメントの直接引張挙動における異方性

正会員○眞嶋 光保(大阪市立大学工学部)

D.J. Hannant(University of Surrey)

J.G. Keer (University of Surrey)

1. まえがき

セメント系材料は、施工性、経済性から建設材料としてきわめて重要なものと位置づけられている。しかしながら、材料の脆性的な性質や低引張強度など克服すべき短所も多い。このため、セメント系材料を繊維によって補強する試みが古くから行われている。補強用としての繊維は種々のものが考えられており、現在では、石綿、鋼繊維、ガラス繊維、炭素繊維などが使用されているほか、開発中のものも多くある。この中でも、繊維補強セメントの代表的なものは石綿であり、石綿シートおよび石綿管などに使用されている。しかしながら、石綿は発癌性に関する健康上の観点から社会的な問題となっており、全国的なリフォームが行われていることは周知のことであるが、これに替わる補強用繊維の開発が必要であることはいままでもない。

繊維補強コンクリートは短繊維によって補強されたものであるという考え方があるが、繊維の形状によってあるいは効果的な使用・施工を考えると他の形状が対象になることがある。このような繊維の例としてポリプロピレン繊維が挙げられる。ポリプロピレン繊維は、モノフィラメントあるいはフィルム形で得ることができるが、物理的な性質を考えると、一軸方向に延伸したフィルムをフィブリル化してネットワークとしたものが優れている。したがって、ポリプロピレン繊維はこれまで使用されてきた補強繊維のように短繊維ではなく、連続繊維の形態となっている。すなわち、補強されるマトリクス中においても繊維はランダムな配置とはならず、配向性を有することになる。このため、載荷重の作用下では、その方向と繊維軸方向とが一致した場合には、繊維は有効的な作用をするが、そうでない場合にはかなり異なった挙動をすることが予想される。繊維補強セメントは、その性質上応力状態の複雑な箇所に使用されることも多いと考えられるため、本研究では、ポリプロピレン繊維補強セメントが、繊維軸方向と異なる方向に荷重作用を受けた場合の挙動を直接引張試験によって調べることにした。

2. 補強用としての繊維

一般的に、高分子繊維によるセメントマトリクスの補強は困難であると考えられている。これは、高分子材料のヤング係数がセメントマトリクスのそれと比べて極めて小さいためであるとされている。しかしながら、繊維がマトリクス中に一定量以上含まれ、かつ繊維との付着が十分であれば、ひびわれの分散が十分に行われるため、脆性面での補強は期待できる。また、複

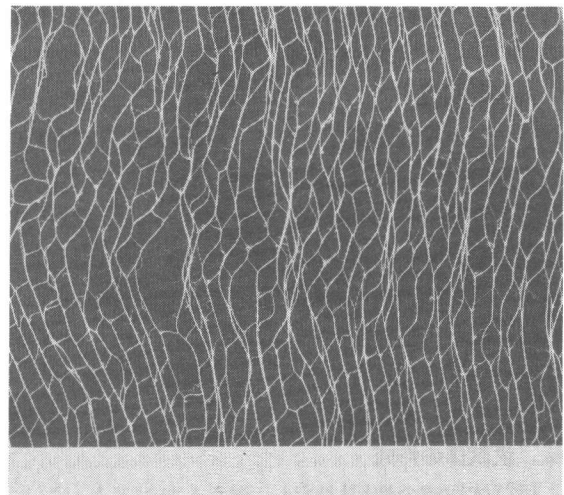


図-1 ポリプロピレン繊維概観

合材料の終局強度は混入した繊維量により支配されるため強度的な補強も可能である[1]。

ポリプロピレン繊維は、ヤング係数が5万kg/cm²程度とセメントマトリックスと比べ小さく、またボアソン比も比較的高いうえでセメントマトリックスとの付着もそれほど大きくはない。しかし、一軸方向に延伸することによってヤング係数を大きくし、フィブリル化したフィルムを積層しその間に

マトリックスを圧入することによって繊維混入量の増大を容易にすると同時に、繊維断面の形状が複雑になることからマトリックスとの機械的な付着を高めることが可能である。さらに繊維の表面処理による付着の増大も考えられる。すなわち、セメント系材料の補強用繊維として使用可能なものと考えられる。本実験の対象となるフィブリル化されたポリプロピレン繊維の概観を図-1に、物理的性質を表-1に示す。

3. 実験計画

このようなフィブリル化したポリプロピレン繊維を混入したセメント系複合材料は、これまでの研究から引張挙動には効果的な改善が認められている[2]。しかし、これらは荷重作用方向に繊維が配向されている場合である。ところが、繊維補強セメントおよび繊維補強コンクリートは、応力状態が比較的複雑な箇所に適用されることが考えられ、繊維軸方向と荷重作用軸方向とは必ずしも一致するとは限らない。したがって、この両者間に角度を有する場合の挙動を調べておくことは、いわばポリプロピレン繊維補強セメントの異方性を検討することであり、重要なことであると考えられる。この性質を調べるため、図-2に示す2種の供試体を作成し直接引張試験によりその補強効果を検討した。供試体Aは直交二方向補強供試体であり、繊維は互いに直交する二方向に配置されており、かつそれぞれの方向の繊維混入量は等しい。すなわち、この二方向の補強は同程度であることになる。一方、供試体Bは、定角度補強供試体であり、繊維軸方向は荷重作用方向と一定の角度（繊維角度）を有している。ただし、載荷試験における偏心と曲げおよびねじりの作用を避けるため繊維の配置はバイアス方式とし、荷重作用方向に対し対称になるように配置した。

繊維軸と荷重作用方向の角度については、両タイプとも0、30、45、60および90度について実験することとした。

4. 供試体の作成

供試体作成の使用材料は、ボルトランドセメント・蒸留水・フライアッシュ・シリカサンド・高性能

表-1 ポリプロピレン繊維の物理的性質

密度(g/cm ³)	0.93
引張強度(MPa)	550
引張弾性係数(GPa)	14-16
Film厚(μm)	60-80

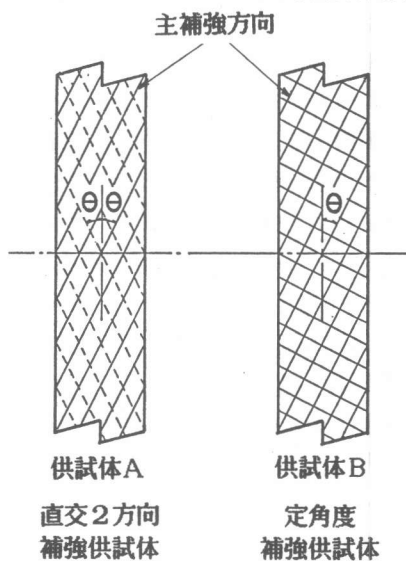


図-2 供試体種別

表-2 セメントマトリックスの配合

材 料	重量比
セメント	1.0
水	0.34
フライアッシュ	0.25
シリカサンド(<300μm)	0.19
高性能減水剤	0.018
計	1.798

減水剤である。また、マトリックスの配合は表-2のとおりである。

供試体はフィルムネットワーク間に十分セメントマトリックスが行きわたるように、ハンドレイアップ法によりシート状に作成した。作成後は、供試体表面からの水分の散逸を避けるため、ビニールシートで覆い保護した。シート中には60層のポリプロピレンフィルムが含まれている。この結果、繊維の体積混入率は約9%程度である。ただし、実際の繊維混入率は、載荷試験終了後個々の供試体を塩酸に浸漬しセメント分を溶出することによって測定し、ばらつきはあるもののほぼ設計どおりの値であることを確認した。

引張試験供試体は、作成したシート状供試体から、長さ300mm、幅25mmの大きさに切り出して作成した。厚さは、供試体の作成状況により決まるが、公称値は6mmである。供試体は、作成24時間後に20℃の水槽に移し試験開始まで養生した。養生期間は、気中養生を含め28日間である。

5. 試験方法

引張試験は、インストロン試験機1122によった。載荷速度は、クロスヘッドの速度を10mm/分とした。ひずみの測定は供試体に取り付けた変位計により行い、インストロンに取り付けたロードセルからの荷重とともにXYレコーダーに記録した。

6. 実験結果

図-3は、直交二方向補強供試体の繊維角度0度の引張試験において得られた荷重-変位曲線の1例である。この図は、これまでのポリプロピレン繊維補強セメントの引張応力-ひずみ関係として得られた代表的なものとはほぼ同じであり、図-4に示す関係として理想化することが可能

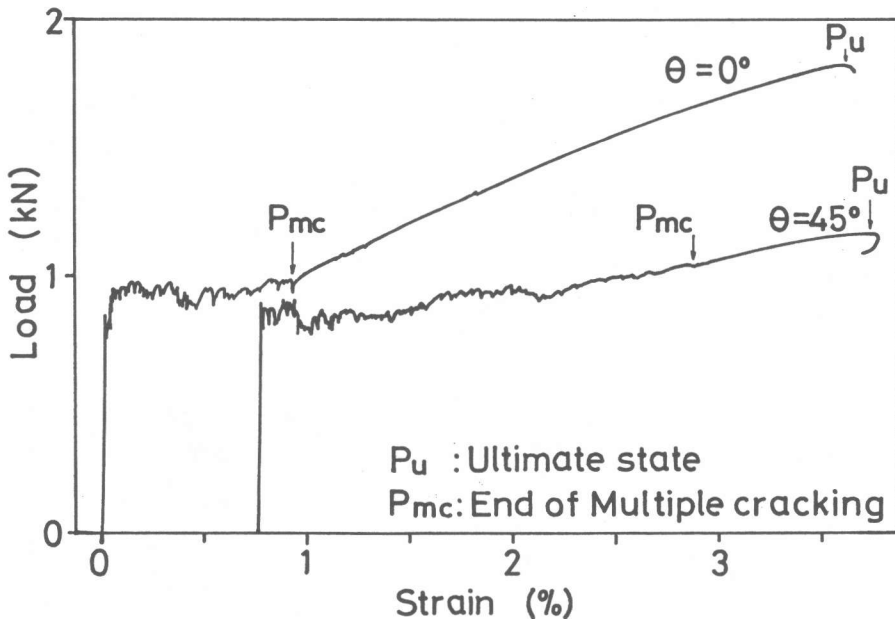


図-3 直交2方向補強供試体(0°, 45°)荷重-変位曲線

である。すなわち、当初の荷重の増加とひずみの増加関係は線形的であり、マトリックスの限界ひずみ (ϵ_{mu}) に達するとひびわれが発生する。このときの強度が初期ひびわれ強度 (σ_{o}) であり、マトリックスの強度にほぼ等しく、ここまでのヤング係数もマトリックスのそれと考えてよい。ところが、供試体にひびわれが生じて、マトリックスと繊維の付着は保たれているので、ひびわれ幅が大きく広がることはなく、ひびわれが分散して行くことになる。この部分が図中に示したほぼ水平な部分 A B である。この間に、荷重はマトリックスから徐々に繊維へ移行していくことになる。全ての荷重が繊維へ移行する点 (ϵ_{mc}) はひびわれ進展の終端でもある。その後の挙

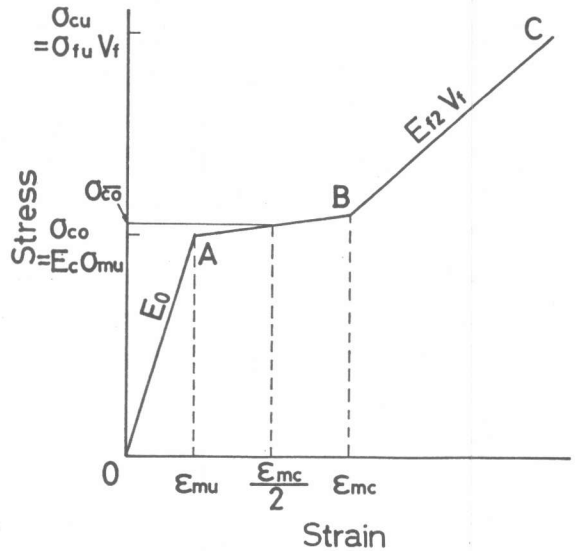


図-4 模式化した応力ひずみ関係

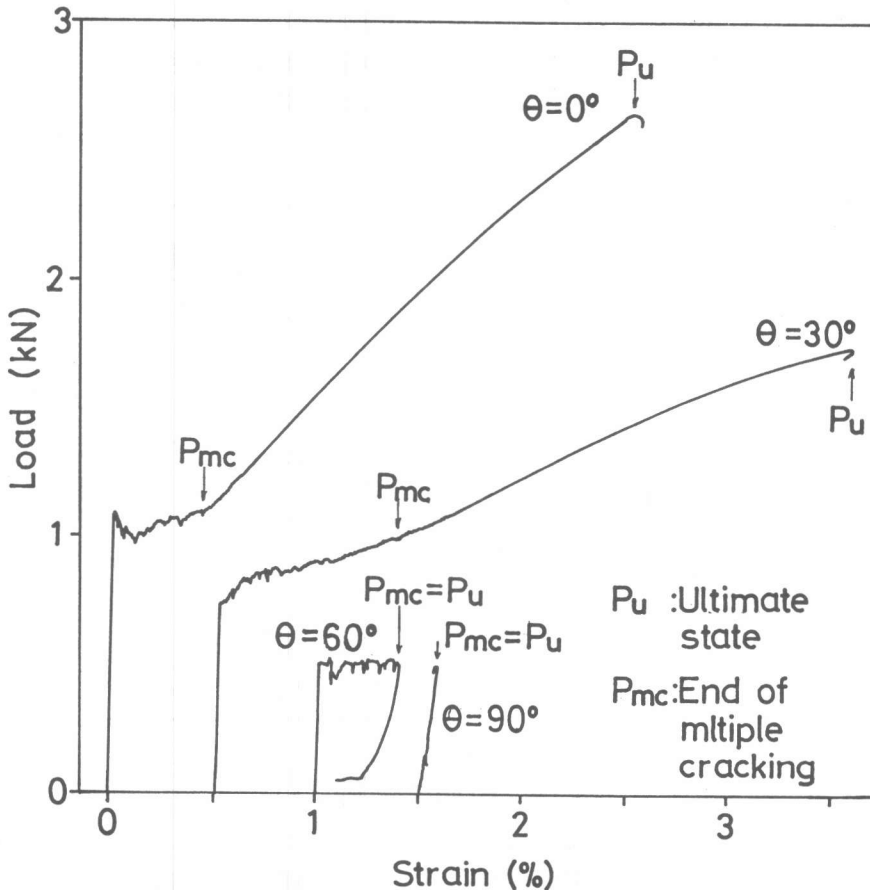


図-5 定角度補強供試体 ($0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$) 荷重-変位曲線

動は繊維のみにより支配される。すなわち、強度およびヤング係数は、繊維自身ののそれによって表される。ただし、複合材料として考えると図に示したようにそれぞれに繊維混入量に乗じたものとなる。また図から理解できるように、繊維補強セメントの靱性は、ひびわれの進展と繊維自身の抵抗の両者によって得られることになる。

通常のポリプロピレン繊維補強セメントは、図-3から分かるように十分な靱性と補強効果が得られていることが明かである。ところが繊維角度が45度になると、ひびわれ進展区間は増加するが繊維自身の抵抗は小さくなっていくことが分かる。また、繊維の抵抗部分の傾きも水平近くになっており、前述の繊維のヤング係数と繊維量の上算では計算できなくなっている。これは、繊維角度があるため、見かけ上のヤング係数が小さくなっていることも一因であると考えられる。さらに、終局強度も低下することが分かる。なお、幾何学的な条件から繊維角度45度が対称軸になっており、繊維角度90度は0度と同等であることは明白であろう。

一方、図-5は定角度補強供試体の荷重-変位関係であり、それぞれ繊維角度は、0、30、60および90度である。繊維角度0度では、配置された繊維量が2倍となるため繊維による補強効果が卓越している。ところが、定角度補強供試体では繊維角度が大きくなるにつれ、終局強度だけではなく初期ひびわれ強度も低下していることが認められる。繊維角度が60度になると、ひびわれ進展区間も小さくなると同時に、繊維の補強効果も認められずひびわれ発生が終局状態となっている。繊維角度90度では、靱性も補強効果も全く認められず、セメントモルタルの直接引張試験と変わらないものと思われる。

上述の初期ひびわれ強度および終局強度と繊維角度との関係を図-6、7に示す。直交二方向補強供試体では、繊維角度に関わらず初期ひびわれ強度はほぼ一定である。これは、初期ひびわれ強度はマトリックスの強度と考えられるところから当然とも考えられる。しかしながら、定角度補強

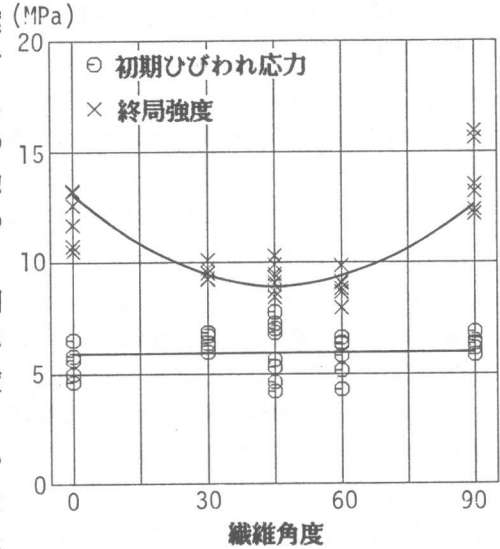


図-6 直交2方向補強供試体の初期ひびわれ応力と終局強度

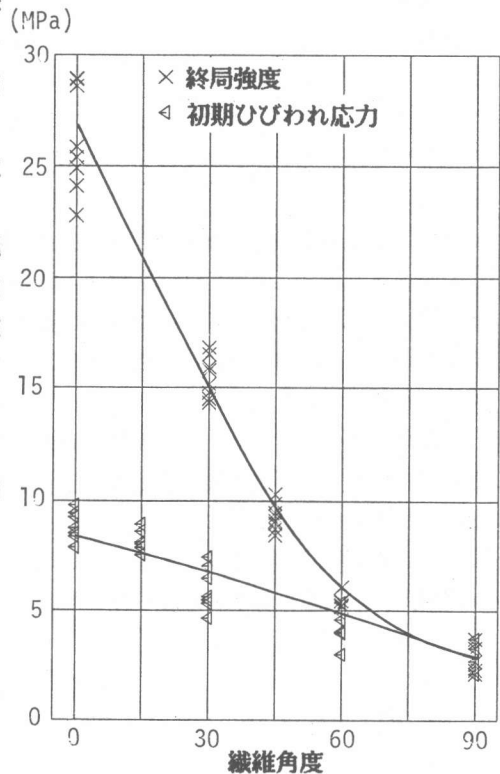


図-7 定角度補強供試体の初期ひびわれ応力と終局強度

供試体では、初期ひびわれ強度は繊維角度と共に低下する傾向にある。断面に含まれる繊維量は、繊維の角度に関係なく一定であることから、初期ひびわれ強度は明かに繊維の配置方向に影響を受けていることが分かる。したがって、直交二方向補強供試体では、それぞれの繊維が影響を及ぼしあい、結果的に初期ひびわれ強度に差が現れなかったものと考えられる。

繊維角度が大きくなると、両供試体ともに終局強度の低下も大きくなっている。これは、マトリックスがひびわれ部分を橋渡ししている繊維から支圧荷重をうけ、応力集中を引き起こしているためと考えられる。これは、角度が大きいほど支圧荷重が大きくなることから推測できよう。

次にひびわれ状況について述べる。引張試験終了後のひびわれ状況は図-8のように類型化が可能である。具体的には、(A)に分類されるものは直交二方向補強供試体の繊維角度0(90)、30(60)度および定角度補強供試体90度、(B)に分類されるもの直交二方向補強供試体繊維角度45度および定角度補強供試体60度、(C)に分類されるもの定角度補強供試体の繊維角度90度である。(A)は、ひびわれが等間隔に整然と現れており、ひびわれ進展が理想的に行われたことを示している。(B)はひびわれ進展はやや不十分であり、(C)ではひびわれの分散が全く認められない。このひびわれ状況図からも十分なひびわれ進展が可能になったものとそうでないものが明確に区分できる。

7. まとめ

本実験では連続繊維補強セメントにおける繊維の配置方向によって補強効果がどの様に表れるかを調べるために、直接引張試験による評価を試みたものである。補強繊維の配置方向は終局状態には大きな影響を及ぼすことは容易に推測し得るが、初期ひびわれ状態においても影響を及ぼすことが明らかになった。補強繊維のヤング係数がマトリックスのそれより小さい場合には、初期ひびわれ状態は、ほとんどマトリックスのみにより影響されると考えられていたが、この考え方は改めなければならない。今後は、連続繊維補強セメントの繊維の配置に異方性を予測するために、配置した繊維の幾何学的な形態と工学的な特性の関連性を定量的に評価することが必要であると考えられる。

なお、本研究は英国サリー大学でおこなわれたものであり、サリー大学留学中の竹中工務店大野定俊氏には有益な議論と助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- [1] Aveston, J., Cooper, G.A. and Kelly, A.: Single and Multiple Fracture, Conf. Proc of the NPL, The properties of Fibre Composites, IPC Science and Technology Press 1971, pp.15-24.
- [2] Hannant, D.J., Zonsveld, J.J. and Hughes, D.C.: Polypropylene Film in Cement Based Materials, Composites, April 1978, pp.83-88

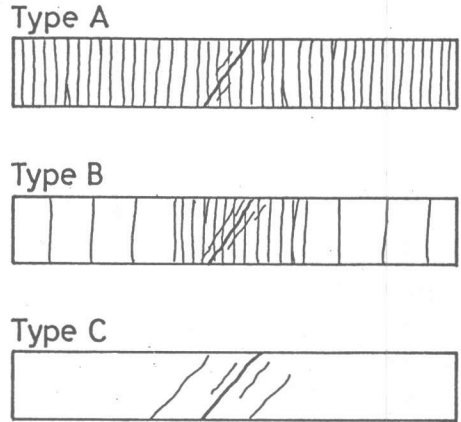


図-8 ひびわれ状況図