

[85] 繊維補強セメント複合板の引張特性

正会員 小林 一 輔 (東京大学生産技術研究所)
 正会員 ○ 松崎 薫 (東京大学大学院)

1. ま え が き

本研究は、引張靱性のすぐれた繊維補強セメント系複合板の開発を目的として実施したものである。一般に脆性材料マトリックスを用いた繊維強化複合材の引張靱性を向上させるためには、マトリックスにひびわれが生じた後の荷重伝達能力が優れている連続繊維の方が有効である。また、大きい延性を付与するためには、引張荷重が作用した場合にひびわれを多数発生させて、その間隔と幅を極力小さくする必要がある。連続繊維を用いた脆性材料の強化理論によれば、限界繊維量以上の連続繊維を用いることにより、いわゆる multiple-cracking の状態をつくり出すことができるので、上記のような性状を有する複合材を得ることができる。このような観点から本研究では、マトリックスの性質・繊維の種類および繊維量が複合材の引張特性に及ぼす影響を検討した。

2. 実験の概要

本研究で使用した連続繊維は、メッシュの開きが5mmの網目状のもので、それぞれ異なった弾性率を有するポリエチレン繊維・ガラス繊維および炭素繊維の3種である。

表-1 に使用した繊維の諸元を示す

表-1 各種網目状連続繊維の物性値

複合板は、まづ繊維を積層状態として成形機に配置したのちマトリックス材料を流し込んで成形した。積層数は引張応力方向の繊維量が所定の体積混入率となるようにこれを定めた。複合板の厚さは1.2mmとした。

繊維名	素線径	比重	引張強度	弾性率
ガラス繊維	13μ @ 204	2.78	255	7140
ポリエチレン繊維 (ブランク)	244μ @ 5	0.95	48	550
ポリエチレン繊維 (セメント入)	244μ @ 5	0.94	40	540
炭素繊維	7μ@ 1000	1.76	320	24000

(単位は、素線径：ミクロン、引張強度・弾性率：Kg/cm²)

本実験では表-2 に示したように、補強材である繊維との接着性および伸び能力にすぐれたポリマーセメントモルタルを主とする5種のマトリックスを使用した

表-2 本実験に用いたマトリックス

これらの水セメント比はいずれも4.0%とした。なお、ポリマーセメントモルタルはすべて砂セメント比0.5のものを用いた。引張特性は幅5cm、高さ1.2cm、長さ46cmの供試体を用い、直接引張試験を行なって調べた。試験は、図-1 に示すような装置に、供試体をグリップ間隔30cmとして装着し、クロスヘッドの変位速度を1.0%として実施した。

種別	s/c	混和剤
セメントペースト	0	高性能減水剤
モルタル	0.5	高性能減水剤
ポリマーセメント	0.3	高性能減水剤
モルタル	0.5	& アクリル系
(P/P+C=0.2)	1.0	エマルジョン

なお、標点区間は20cmとし、標点区間の伸びは、差動トランス型変位計により測定した。

3. 繊維補強セメント複合板の力学性状

(1) 引張応力-ひずみ関係

図-2 は、直接引張試験結果の一例としてポリエチレン繊維を積層数で10層(V_f=4.3%)混入した場合の引張応力とみかけの引張ひずみ(以下、引張ひずみと称す。)との関係を示したものである。この図から multiple-cracking を生ずる領域は約7%と極めて大きく、これにより高い靱性が得られていることがわかる。また、

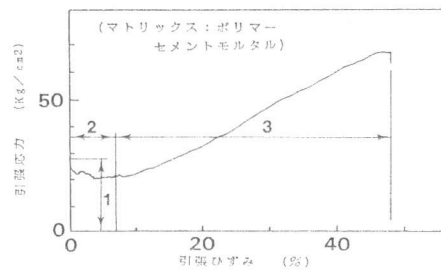


図-2 引張応力とひずみの関係

(補強材：ポリエチレン繊維)

(マトリックス：ポリマー

セメントモルタル)

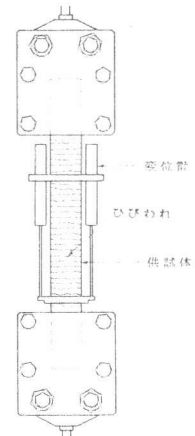


図-1 直接引張試験概略図

この図から明らかなように繊維補強セメント複合板の引張応力-引張ひずみ関係は3つの領域に分けられる。すなわち、第1の領域は荷重開始からひびわれ発生までの補強材とマトリックスが一体となって挙動する部分であり、第2の領域は応力がほぼ一定のまま引張ひずみだけが增加する部分である。第2の領域はマトリックスと補強材が一体となって挙動する状態から繊維のみで荷重を伝達する状態への遷移領域であって、この間に複合材には多数のひびわれが発生する、いわゆる multiple-cracking の領域である。第3の領域は、それ以降の破断にいたるまでの部分であり、この領域はひびわれ発生完了後の繊維だけで荷重を受け持つ領域にあたり、最終的には繊維の破断により複合板は破壊する。

(2) 初期弾性係数

図-3, 4は、補強材として弾性率の低いポリエチレン繊維および弾性率の高い炭素繊維を用い、体積混入率を変化させた場合の引張応力-引張ひずみ関係を示したものである。これらの図から、繊維補強セメント複合板の初期弾性係数は混合則 $E_c = E_f \cdot V_f + E_m (1 - V_f)$ により求めた初期弾性係数とほぼ一致していることがわかる。

図-5は、ポリエチレン繊維を補強材とし、マトリックスの配合を変えた場合の引張応力-引張ひずみ関係を示したものである。この図からマトリックスの砂セメント比が初期弾性係数に及ぼす影響は小さいことがわかる。これは本研究で用いたマトリックス（ポリマーセメント比：20%）の引張弾性係数がプレーンモルタルに比べて十分小さいためであると考えられる。

(3) 初期ひびわれ強度および限界ひずみ

種々の要因が繊維補強セメント複合板の力学性状に及ぼす影響を明らかにするためには、初期ひびわれ強度だけではなくそれに対応するひずみ（以下、限界ひずみと称する。）についても検討を行なう必要がある。そこで本文では、図-6~8に種々の要因と初期ひびわれ強度および限界ひずみとの関係を示した。図-6は体積混入率を変化させた場合であり、この図から初期ひびわれ強度および限界ひずみはともに体積混入率が大きくなるにつれて増大する傾向にある。特に限界ひずみについては一般のコンクリートでは $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ といわれているので、本研究において製造した複合板は限界ひずみを大幅に改善する。図-7はマトリックスの配合を変えた場合であり、この図から初期ひびわれ強度および限界ひずみのいずれもマトリックスの砂セメント比によって大きく影響されることがわかる。図-8は繊維の種類を変えた場合であって、この図から初期ひびわれ強度のみならず限界ひずみも、繊維の種類により大きく異なることがわかる。これは繊維とマトリックスの付着特性が、繊維補強セメント複合板の力学性状に影響を及ぼすことを示唆している。

(4) 複合板の破壊過程

図-9は各種の繊維を用いた複合板の破壊までの引張応力-引張ひず

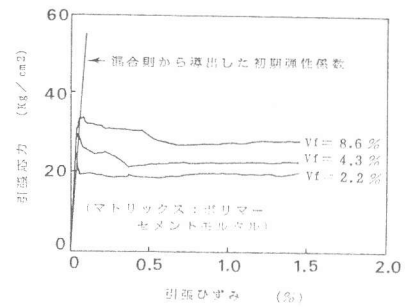


図-3 引張応力とひずみの関係
(補強材：ポリエチレン繊維)

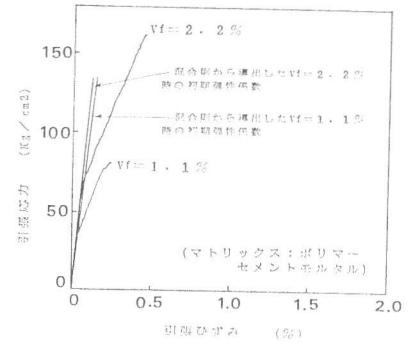


図-4 引張応力とひずみの関係
(補強材：炭素繊維)

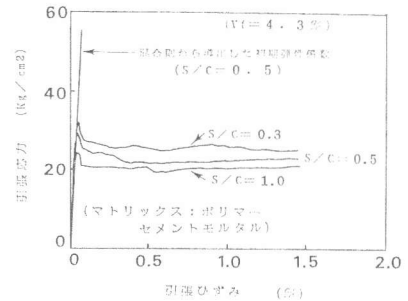


図-5 引張応力とひずみの関係
(補強材：ポリエチレン繊維)

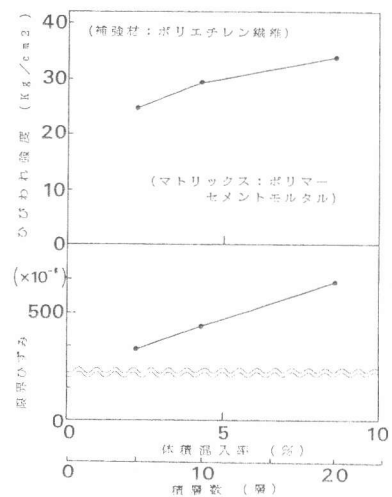


図-6 ひびわれ強度・限界ひずみ
と体積混入率の関係

み関係を示したものであって、繊維の種類により、multiple-crackingを生ずる領域の大きさは異なっており、弾性率の高い繊維を用いるほど、この領域が小さくなっている。また、複合板の破壊時における引張ひずみも、繊維の種類により大きく異なっており、特にポリエチレン繊維ではこの傾向が顕著である。

4. 繊維補強セメント複合板のひびわれ性状

(1) マトリックスの配合の影響

本研究ではまず、ポリエチレン繊維 ($V_f=4.3\%$) を補強材とし、マトリックスとしてセメントペースト、プレーンモルタル ($S/C=0.5$) およびポリマーセメントモルタルの3種を用いた場合について、ひびわれ発生本数を調べた。その結果、ポリマーセメントモルタルのひびわれ分散性が最も高く、以下セメントペースト、プレーンモルタルの順になり、引張ひずみ2.0%時におけるひびわれ発生本数の比は、約4対2対1となった。そこでひびわれ分散性の最も優れたポリマーセメントモルタルについて、砂セメント比を変化させた場合のひびわれ分散性のちがいを示したものが、図-10である。この図から、砂セメント比が小さいほど、各ひずみ時点におけるひびわれ発生本数が多く、平均ひびわれ幅も小さくなっており、ひびわれ分散性が高いことがわかる。

(2) 体積混入率の影響

図-11はポリエチレン繊維を用いた場合について、体積混入率がひびわれ性状に及ぼす影響を示したものである。この図から、いずれの体積混入率においても引張ひずみが増大した場合、可視ひびわれの幅が殆ど変化することなくひびわれの発生本数だけが増加することがわかる。また、どの引張ひずみ時においても体積混入率が大きいほど、ひびわれの発生本数は多く、かつ平均ひびわれ幅の値は小さくなり、ひびわれの分散性は向上する。

(3) 繊維の種類の影響

図-12は、繊維の種類とひびわれ分散性との関係を示したものである。

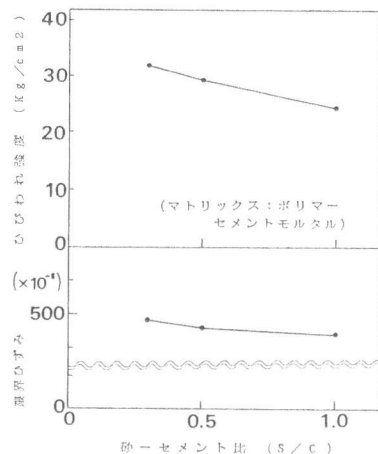


図-7 ひびわれ強度・限界ひずみと砂セメント比との関係

(補強材：ポリエチレン繊維)

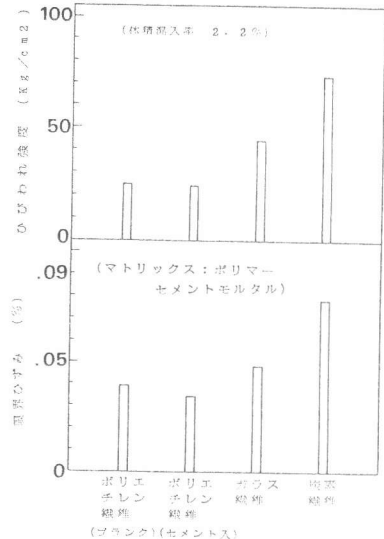


図-8 ひびわれ強度・限界ひずみと繊維の種類との関係

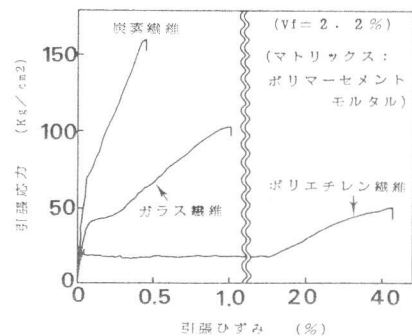


図-9 引張応力とひずみの関係

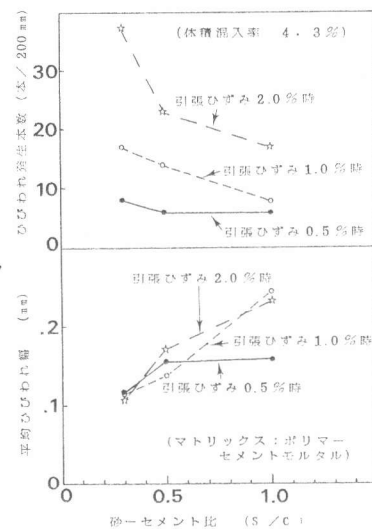


図-10 ひびわれ発生本数・平均ひびわれ幅と砂セメント比との関係

(補強材：ポリエチレン繊維)

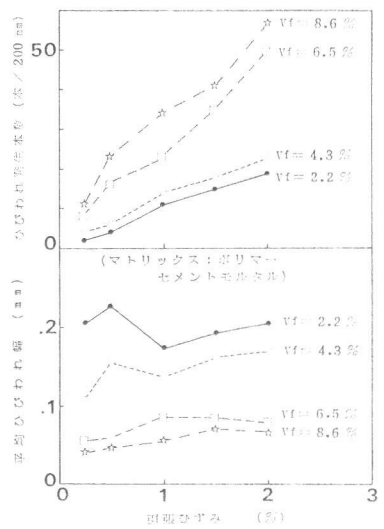


図-11 ひびわれ発生本数・平均ひびわれ幅と引張ひずみとの関係

(補強材：ポリエチレン繊維)

この図から、ひびわれ分散性は繊維の種類により大きく異なっており、引張ひずみが小さい領域では炭素繊維が最もひびわれ分散性に優れ、以下、ガラス繊維、ポリエチレン繊維の順になる。これは後に考察したように繊維とマトリックスの付着特性、繊維の形状・寸法等の影響と考えられる。

5. ひびわれ性状に関する理論的考察

連続繊維によって補強された脆性材料が一軸引張荷重を受けた場合の強化理論によれば、最小ひびわれ間隔 α' は、次式により与えられ、その時のひびわれ幅もこれに比例した形で与えられる。

$$\alpha' = V_m / V_f \cdot \sigma_{mu} / 2\tau$$

〔ここで、 V_m ：マトリックスの体積、 V_f ：繊維の体積、 σ_{mu} ：マトリックスの破断強度、 τ ： α' 間における繊維とマトリックス間の付着強度〕

本研究では、この理論上の最小ひびわれ間隔と実験結果を比較検討するため、ブリケット供試体を用い、繊維とマトリックス間の付着強度(τ)を求め、この値を上式に代入して導出した理論上の最小ひびわれ間隔 α' 、最大ひびわれ間隔 $2\alpha'$ 及び実験から得た平均ひびわれ間隔を図-13に示した。この図から、各繊維ともひびわれ発生完了時の平均ひびわれ間隔は α' と $2\alpha'$ との間にあり、上式は実験結果とよく一致している。

6. 結論

本研究の範囲内で以下のことがいえる。

(1) 網目状連続繊維によって補強されたセメント系複合板は極めてすぐれた引張延性を有し、また著しく大きい引張変形を与えた場合にもひびわれを分散させる能力が大きいので、ひびわれ幅を小さい値にとどめ得ることが明らかとなった。引張耐力や弾性係数も含めたこれらの引張特性は、繊維の種類並びに体積混入率を変えることにより、所要の性能のものを得ることが可能となる。

(2) 網目状連続繊維によって補強された複合板では、マトリックスにひびわれを生じても繊維によって引張力が伝達されるので耐力は低下せず、最終的には、繊維の破断によって複合体は破壊する。この間、マトリックスには最小ひびわれ間隔が、繊維のマトリックスに対する応力伝達長さ(α')に等しく、最大ひびわれ間隔が $2\alpha'$ となるようなひびわれを発生し、多数の微細なひびわれが分散して生ずることになる。また α' を与える理論式から明らかなように、多数のひびわれを発生させるためには、繊維量を増すとともに、マトリックスとの付着特性のすぐれた補強材を用いる必要がある。網目状の繊維を用いた場合、横方向の繊維は、繊維量には寄与しないが、 τ を増大させる効果があると考えられる。

なお、本研究の実施に当り、マトリックスとしてのポリマーセメントモルタルの研究に関して御協力を頂いた恒和化学㈱ならびに試料を提供して頂いた三菱化成工業㈱、旭ガラス㈱ならびに東レ㈱に謝意を表する次第である。

(参考文献)

- 1) J. Aveston, et al: The Mechanism of Fiber Reinforcement of Cement and Concrete, NPL Report, 1974年
- 2) 小林・松崎, 複合材料研究発表会講演論文集, 1983年
- 3) 松崎, 土木学会年次講演会, 1983年
- 4) 小林・松崎, 生産研究 第35巻, 第1号, PP. 32~35, 1983年1月

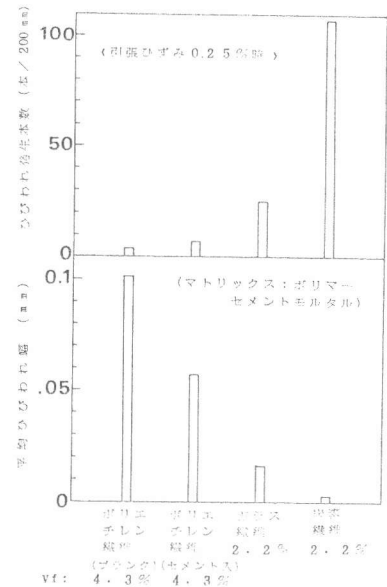


図-12 ひびわれ発生本数・平均ひびわれ幅と繊維の種類との関係

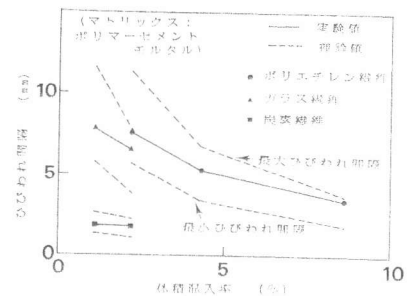


図-13 ひびわれ間隔と体積混入率との関係