

金沢大学 正会員○五十嵐心一
 金沢大学 正会員 川村 満紀
 金沢大学 学生員 北原 章広

1. まえがき

繊維補強セメント系複合材料の靱性はマトリックス中のひびわれを架橋する繊維の挙動により支配される。一般に、この架橋効果は繊維の引き抜き試験により求められる繊維の付着強度を基本として評価する場合が多い。しかし、短繊維がランダムに配向する実際の複合材料中においては繊維の長軸方向に対してマトリックスひびわれ面が種々の角度をなすことに起因する種々の引き抜けメカニズムが作用し、これが繊維の架橋特性と複合材料の力学的特性を大きく変化させることが理論的に推定されている[1, 2]。

本研究は、くさび押し込み式コンパクトテンション試験によって発生させたセメント系材料中のひびわれと鋼繊維の相互作用を蛍光顕微鏡を用いて観察することにより、実際の繊維補強セメント系複合材料中の鋼繊維の引き抜けのメカニズムを繊維の傾き角との関連において検討し、繊維架橋による鋼繊維補強セメントの靱性増大機構について考察する。

2. 実験概要

(1) 使用材料および配合

使用したセメントは普通ポルトランドセメントであり、モルタルに用いた細骨材は標準砂である。使用した鋼繊維は異形加工のないストレート繊維でありその直径は 0.6mm、長さは 30mm である。セメントペーストおよびモルタルの配合は W/C=0.55 であり、砂/セメント=1.5 とした。

(2) 供試体作成

使用した供試体の寸法は 図-1 に示すとおりであり、厚さは 10mm である。また、供試体中央部に切欠きを導入するためにプラスチック板(厚さ 0.5mm)を配置してペーストおよびモルタルを打設した。切欠きの長さは 25mm とした。打設後、切欠き前方の所定の位置に切欠き延長線の法線と所定の角度で交わるように鋼繊維を表面から深さ 約2mm の位置に配置した。打設された供試体は恒温恒湿室(温度20℃, 湿度90%)にて24時間静置後脱型し、材令28日まで水中養生(20℃)を行った。

(3) 蛍光顕微鏡観察

切欠き上端の開口量をクリップゲージにより測定し、開口量が所定の値となるまでくさびの押し込みによって載荷をし、荷重-開口変位曲線を測定した。乾燥収縮ひびわれの発生を防止するために、載荷終了後供試体をただちにエタノールに浸漬(24時間)し、水分を除去した。エタノール浸漬終了後、供試体を真空樹脂含浸装置に入れて排気し、蛍光染料を含有したエポキシ樹脂を含浸させた。樹脂の硬化後供試体表面を耐水研磨紙を用いて繊維の長軸断面が現れるまで注意深く研磨して、落射型蛍光顕微鏡を用いて鋼繊維-ひびわれ交点付近の観察を行った。

3. 結果および考察

写真-1は鋼繊維の傾き角が 0° で開口量が 0.05mm の場合の鋼繊維付近を示したものである。セメントペースト中を進展してきたひびわれが鋼繊維を直角に横切っており、ひびわれ経路のずれ[3]は認められない。また、鋼繊維とひびわれの交点から鋼繊維に沿って鋼繊維の部分的な脱付着を示す蛍光領域が認められ、鋼繊維の脱付着は鋼繊維とひびわれの交点から進行していくことがわかる。開口量を大きくすると脱付着がさらに進行するため鋼繊維に沿った蛍光領域はさらに拡大していくことが観察された。写真-2は、同じく傾き角0° で開口量が0.1mmの鋼繊維付近を拡大して示したものである。セメントペースト中を

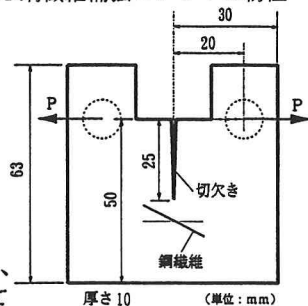


図-1 供試体寸法

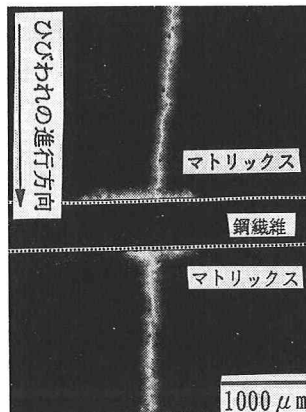
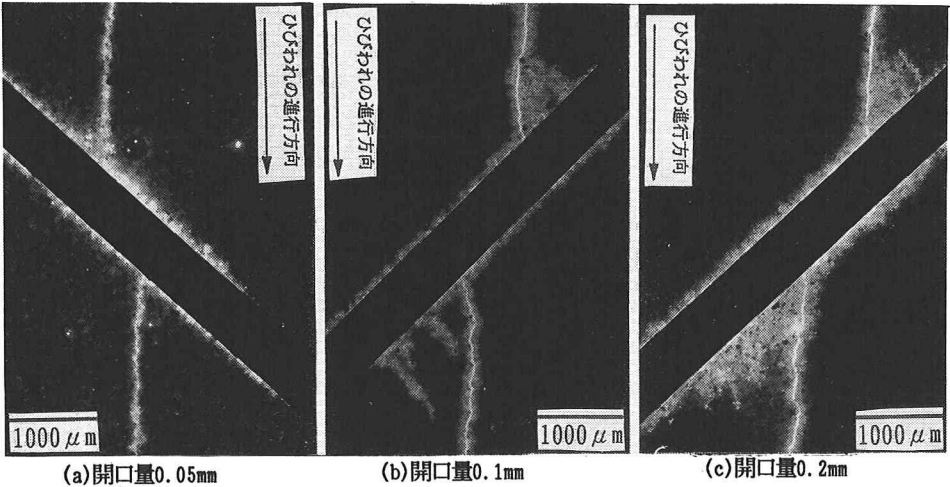


写真-1 傾き角0°, 開口量0.05mm



写真-2 鋼繊維付近のひびわれ

ジグザグに進行してきたひびわれが、鋼繊維の手前約 $100\mu\text{m}$ 付近において分岐して、さらに鋼繊維から $30\sim 40\mu\text{m}$ のあたりでその分岐がさらに大きく広がりひびわれが確認しにくくなっている。これは、鋼繊維-セメントペーストマトリックス



(a)開口量0.05mm

(b)開口量0.1mm

(c)開口量0.2mm

写真-3 開口量の増大にともなうマトリックスの圧壊の様子(傾き角 45°)

界面領域に存在する多孔質領域のために[3]、ひびわれの進行方向が変化したためであると考えられる。

写真-3 (a)~(c) は傾き角が 45° の場合を示す。開口量はそれぞれ 0.05mm , 0.1mm , 0.2mm である。いずれの写真からも明らかなように、ひびわれが傾いた鋼繊維によって側方へずれているのが観察される。このようなひびわれの側方へのずれはBenturら[3]もSEMにて観察している。ひびわれの側方へのずれはひびわれ面積の増大及び繊維の存在によるひびわれの進展の拘束を示しており、これが繊維架橋による高剛化に寄与するとも考えられる。さらに、ひびわれと鋼繊維のなす角が鋭角となる部分、すなわち鋼繊維のマトリックスからの引き抜けにともない圧縮力の作用すると考えられる部分においては、開口量の増大にともないひびわれの発生やくさび状の蛍光領域が認められ、マトリックスが圧壊していく様子が観察される。これは、鋼繊維の引き抜けに必要なエネルギーがこの部分のマトリックスを破壊させるのにも消費されていること[2]を示すとともに、マトリックスの圧縮強度が大きくなれば、繊維自身に大きな曲げが作用し、さらに繊維とマトリックス間に生ずる圧縮力による付加的な摩擦力の増大が作用しうること示している。したがって、マトリックスの圧縮強度の増大は必ずしも繊維の付着強度の増大に対応しないと指摘されているが[4]、繊維の引き抜けエネルギーおよびひびわれを架橋する繊維が負担する引張応力にはマトリックスの圧縮強度が大きく影響を及ぼし、これが鋼繊維補強セメントの靱性に寄与するといえる[5]。写真-4は普通モルタル中に傾き角 30° で鋼繊維を配置した開口量 0.2mm の場合を示したものである。モルタルマトリックスの場合もセメントペーストの場合と同様な圧縮領域が観察されており、そのような圧壊領域中に骨材粒子が存在することから、繊維の負担する引張応力はさらに増大しうると推察される。

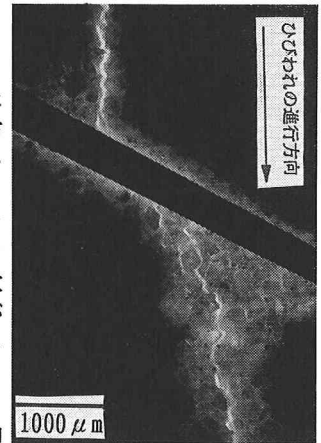


写真-4 普通モルタルの場合
(傾き角 30° , 開口量 0.2mm)

4. まとめ

蛍光顕微鏡を用いた観察により、鋼繊維補強セメント中の鋼繊維がひびわれ進展におよぼす影響が観察された。また、鋼繊維の脱付着の状況や引き抜けによりマトリックスが圧壊している様子が観察され、繊維の架橋特性とマトリックスの圧縮強度との間には密接な関係があることが示唆された。

<参考文献>

- [1]Li, V. C., J. Mat. in Civil Engrg., ASCE, Vol. 4, No. 1, pp. 41-57, 1992.
- [2]Brandt, A. M., Fiber Reinforced Concrete, ACI SP-81, pp. 267-86, 1984.
- [3]Bentur, A., Diamond, S. and Mindess, S., J. Mat. Sci. 20, pp. 3610-3620, 1985.
- [4]Bentur, A., Gray, R. J. and Mindess, S., Developments in Fiber Reinforced Cement & Concrete, Vol. 2, pp. 393-399, 1986.
- [5]五十嵐心一、川村満紀、田口雅紀、土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部, pp272-273, 1992.