

論文 ダブルミキシングで製造した短繊維補強モルタルの曲げ特性

笠井 哲郎^{*1}・菊本 幸雄^{*2}・佐久間雅孝^{*3}

要旨：炭素繊維を混入した補強モルタルの練混ぜに、モルタルマトリックスのブリーディングを低減できるダブルミキシングを適用した場合について、繊維とモルタルの付着界面の微視的な観察と硬化体の曲げ強度試験を行った。その結果従来の練混ぜ方法で製造した場合に比較し、付着界面の遷移帯が減少し、曲げ強度および曲げ靱性が向上した。

キーワード：炭素繊維，短繊維，ダブルミキシング，遷移帯，曲げ強度，曲げ靱性

1. まえがき

短繊維補強セメント複合体（以下、短FRC）における繊維の補強効率は、使用材料や配合が一定の場合繊維とマトリックス（セメントペースト，モルタル，コンクリートなど）との付着強度に依存するところが大きい。この付着強度は、両者間の付着界面の微視的な組織構造に影響されると考えられており[1]、繊維の補強効率を向上させるためには、この界面の改質が肝要である。これまでの研究では、所要の付着強度を得るために、繊維のアスペクト比を大きくしたり、繊維表面に加工や処理を施すなどの方法およびマトリックスに微粒成分を混入するなどして、繊維とマトリックスの付着強度を増大させる方法が行われている。しかし、これらの方法は繊維の補強効率を向上させる一方で、短FRCの均一な練混ぜや成形などを困難なものとしており、短FRCの適用範囲を制限する一要因となっている。現行では、練混ぜおよび成形法として、オムニミキサなどの特異なミキサを用いたり、抄造法やスプレー法などの成形方法が採用されている[2]。一方、著者はコンクリートにおける、骨材とセメントペーストマトリックスまたはモルタルマトリックスとの付着界面についてマトリックスから発生するブリーディングに着目し、分割混練法（ダブルミキシング法）を用いてマトリックスのブリーディングを低減すると骨材界面に発生する欠陥部が減少し、硬化体の強度などが向上することを報告している[3][4]。

上記検討を踏まえ、本研究では、炭素繊維を混入した補強モルタルの練混ぜに、ダブルミキシングを適用した場合について、繊維とモルタルの付着界面の微視的な観察と硬化体の曲げ強度試験を行い、炭素繊維補強モルタル（以下、CFRM）における繊維の補強効果と練混ぜ条件の関係について実験的検討を行った。

2. 実験概要

表－1 炭素繊維の性質

2.1 使用材料および配合

セメントはC社製の普通ポルトランドセメント（比重：3.15，Blaine：3380cm³/g）を、細骨材は豊浦標準砂

種別	繊維の形状			比重	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (10 ³ kgf/mm ²)	伸度 (%)
	直径 (μm)	長さ (mm)	アスペクト比				
PAN系	7	6	857	1.9	407	24.4	1.67

を用いた。繊維はT社製のPAN系炭素繊維を用いた。使用した炭素繊維の性質を表－1に示す

*1 東海大学講師 工学部土木工学科、工博（正会員）

*2 東海大学教授 工学部土木工学科、（正会員）

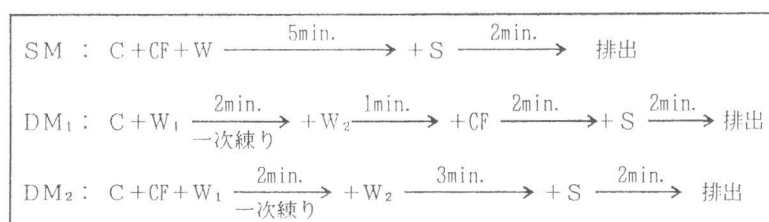
*3 東海大学助教授 工学部土木工学科、工修（正会員）

モルタルマトリックスの配合は、 $W/C=60\%$ 、 $S/C=0.25$ と一定にした。繊維混入率 (V_f) はマトリックスの体積に対する繊維の体積百分率 (vol%) で示し、0, 1, 3, 5 vol% と変化させた。

2.2 練混ぜ方法および供試体

ミキサは、容量10ℓのホバート型モルタルミキサを使用した。練混ぜ方法は図-1に示すように、練混ぜ水を一度に加えるSM (Single Mixing) と練混ぜ水を2度に分けて加えるDM (Double Mixing) により行った。この際、各練混ぜ方法における練混ぜ時間の合計が同一となるようにした。なお、DM₂では $V_f=3\text{ vol}\%$ の場合のみとした。DM₁およびDM₂における W_1/C は、ミキサに電流計を取り付け、一次練混ぜ時にミキサに流れる電流が最大 (攪拌トルクが最大) となる W_1/C とした。DM₁における W_1/C は24%、DM₂における W_1/C は35%となった。なお、DMにおいて、一次練混ぜ時の攪拌トルクが最大となる W_1/C としたセメントペーストは、ブリーディングが最小となることが示されている[5]。

供試体は、寸法40×40×160 (mm) のものを4個同時に作製し、3個は曲げ強度試験用、1個は反射電子像の観察用とした。供試体の養生は、24時間後脱型し、20℃で27日水中養生した後、14日気中養生した。



C : セメント, CF : 炭素繊維, W : 水, W₁ : 一次水, W₂ : 二次水 ($W = W_1 + W_2$)
S : 細骨材, ————— : ミキサによる練混ぜ

図-1 練混ぜ方法

2.3 試験方法

(1) ブリーディング試験

SMおよびDMで練混ぜたモルタルマトリックスに対し、土木学会基準「プレパックドコンクリートの注入モルタルのブリーディング率および膨張率試験方法」に準拠し、ブリーディング試験を行った。

(2) 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、スパン100mmで中央集中載荷とした。また、30mmのワイヤーストレインゲージを用いて、曲げ供試体の下縁中央部のひずみを測定した。この計測区間30mmの下縁部の平均的なひずみを“下縁の平均ひずみ”と定義し、曲げたわみの指標として以下に用いることとした。

(3) 反射電子像の観察

水中養生後の供試体をダイヤモンドカッターで5mm角に切断し、D-乾燥したものを樹脂含浸して切断し表面を研磨した後、カーボン蒸着して試料とした。測定は日本電子社製JEOL8600を用いて行った。なお、反射電子像の写真の上下方向を供試体の打設方向と一致するようにした。

2.4 CFRMの繊維補強効率の算定

本研究では、CFRMの繊維の補強効果を定量的に評価するために、下記の方法により繊維補強効率を定義し検討した。なお、ここで扱う記号を以下のように定義する。

V : 体積分率, σ : 引張応力または強度

サフィックスとして、f : 繊維, m : マトリックス, c : 複合材料, u : 終局時

(1) 短FRMの引張強度の理論値[6]

モルタルマトリックスにひび割れが発生する前の短FRMの引張強度は、繊維が応力方向に一様に分布し、繊維とマトリックスの付着は完全で繊維とマトリックスのひずみは等しいと仮定す

ると、繊維およびマトリックスの体積分率 V_f , V_m ($V_f + V_m = 1$) を用いて、簡単な混合則により式(1)となる。

$$\sigma_c = \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (1)$$

式(1)は、繊維が一方向に配向した場合のものであるが、実際には繊維の配向は繊維の種類や成形方法の影響を受け、2次元あるいはランダムな3次元配向の間の状態にある。この配向の違いに関する効果係数を η_1 とする。また、繊維

表-2 繊維の配向に関する効果係数 η_1 [6]

繊維の配向	効果係数 η_1	
	Coxによる	Krenchelによる
1-D 一方向	1	1
2-D 平面でランダム	1/3	3/8
3-D ランダム	1/6	1/5

とマトリックスの付着（繊維長さも影響）に関する効果係数を η_2 とする。なお、 η_1 については解析により求められ、表-2に示す値が提案されている。 η_1 , η_2 は繊維の体積分率に関する係数であるから、 η_1 , η_2 を考慮した混合則は式(1)より、一般に式(2)となる。

$$\sigma_c = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \sigma_f \cdot V_f + \sigma_m \cdot (1 - V_f) \quad (2)$$

更に、ひび割れ発生後から終局強度にいたる挙動は、繊維の強度とマトリックス-繊維間の付着強度に依存する。複合材料の破壊形態は、繊維の付着が健全のまま繊維が破断する場合と、繊維の付着強度が低く繊維が破断する前に繊維が引き抜ける場合とがある。ここでは、付着は完全であると仮定して、前者についてのみ検討した。

完全付着繊維の破断による複合材料の終局強度 (σ_{cu}) は、ひび割れ位置における繊維の体積分率と繊維の引張強度に依存するから、 η_1 と η_2 を用いて、式(2)より式(3)となる。

$$\sigma_{cu} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \sigma_{fu} \cdot V_f \quad (3)$$

(2) CFRMの繊維補強効率

上記の混合則を用いて算出したCFRMの引張強度と、実験から得られた曲げ強度の値を用いて式(4)に示すように繊維補強効率を定義した。なお、式(4)における終局引張強度の理論値の計算では、繊維はランダムに分散し、繊維の付着は完全であるとした。すなわち、式(3)において、効果係数 $\eta_1 = 1/6$ (Coxの値を使用)、 $\eta_2 = 1$ として計算した。また、式(4)の係数 a は引張強度に対する曲げ強度の比率を示すものである。ここでは、秋浜ら[7][8]が行った同一配合のCFRM (W/C=42.0%, $V_f=3.98\text{vol}\%$) の引張試験および曲げ試験結果から、著者が算出した値 ($a=2.89$) を用いることとした。

$$\text{繊維補強効率} = (\text{実験から得られた最大曲げ強度}) / (a \times \sigma_{cu}) \quad (4)$$

3. 実験結果および考察

3.1 曲げ強度に及ぼす練混ぜ方法の影響

図-2, 図-3は、SMおよびDM₁で製造したCFRMの曲げ試験結果を示したのである。両

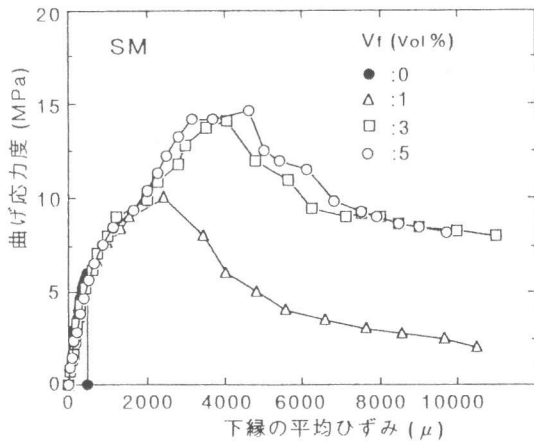


図-2 曲げ試験結果 (SM)

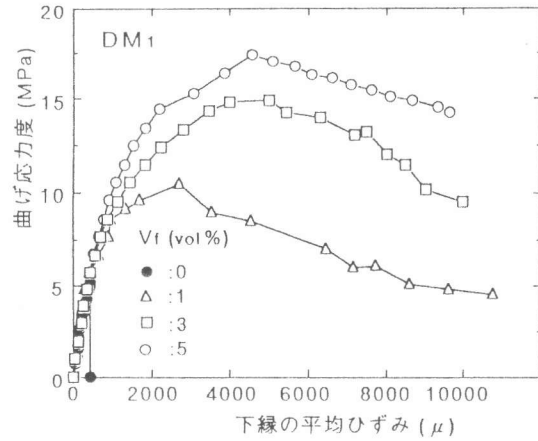


図-3 曲げ試験結果 (DM₁)

図より、SMおよびDM₁ともV_fの増加に伴い、曲げ強度だけでなく、曲げ応力-下縁の平均ひずみ曲線で囲まれた面積から評価される曲げ靱性も増加していることがわかる。また、SMではV_f=3 vol%から5 vol%にV_fを増加させても強度および靱性の増加は少ないが、DM₁ではV_f=3 vol%に比べ5 vol%で強度および靱性が更に増加している。図-4はV_f=3 vol%の場合について、SM、DM₁、DM₂で製造したCFRMの曲げ強度試験結果を示したものである。SMに比べ、DM₁、DM₂では強度および靱性とも大きく、特に靱性の増加が大きく現れている。また、DM₁およびDM₂では、強度および靱性ともほぼ同様な結果となった。

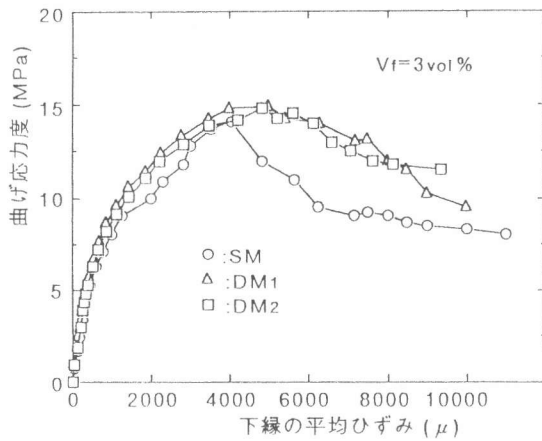


図-4 曲げ試験結果 (練混ぜ方法の影響)

図-5はSMおよびDM₁において、V_fと最大曲げ強度の関係を示したものである。V_f=0 vol%では、DMよりSMの方が最大曲げ強度が大きくなっている。これは、図-6に示すSMおよびDMで製造したモルタルマトリックスのブリーディング試験結果から、DMよりSMの方が最大ブリーディング率が4倍程度大きく、硬化体としての実質のW/CがSMの方が小さくなっているためであると考えられる。一方、繊維を混入した場合にはどのV_fにおいても、SMよりDMの方が曲げ強度は大きくなっている。また、SMではV_f=3 vol%以上では曲げ強度の増加は少ないが、DMではV_f=5 vol%まではV_fに比例して曲げ強度が増加している。

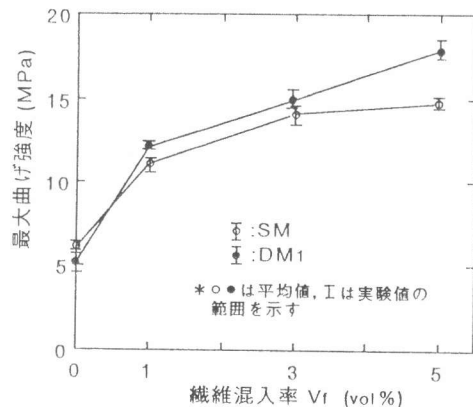


図-5 曲げ強度とV_fの関係

以上のことより、CFRMの練混ぜをDMで行うことにより、SMに比べ、モルタルマトリックスの強度が小さくなるにもかかわらず、V_fが同一ならば曲げ強度および曲げ靱性が増加し、C

FRMの力学的性能が向上した。

3.2 繊維の補強効果に関する検討

ここでは、3.4で述べた繊維補強効率を用いて、練混ぜ方法の相違による繊維の補強効果について検討した。式(3)において、 $\eta_1=1/6$ 、 $\eta_2=1$ とすると、 $V_f=1, 3, 5 \text{ vol\%}$ における σ_{cu} はそれぞれ、6.6, 19.9, 33.2 MPaとなる。この値と図-5に示した曲げ強度の平均値から、式(4)を用い算出した各練混ぜ方法における繊維補強効率と V_f の関係を、図-7に示す。図より、SMおよびDM₁とも V_f が増加するほど、繊維補強効率は小さくなるが、SMに比べDM₁の方が V_f の増加による繊維補強効率の減少は小さくなっていることがわかる。

3.3 反射電子像の観察

内川[9]によると、モルタルやコンクリートの骨材周辺部には、CaOに富み他の部分と不連続でポーラスな領域が存在し、骨材とペースト部分との結合力を低下させる。この部分は、遷移帯 (transition zone) と呼ばれ、骨材界面に形成された水膜に Ca^{2+} イオンなどが他の部分より多く移動し、水酸化カルシウム結晶とアルミン酸硫酸カルシウム水和物からなるポーラスな構造として形成されることが示されている。また、この遷移帯は、反射電子像において、白色の部分として観察することができる。このような遷移帯の形成は、CFRMにおける繊維とマトリックスとの付着にも影響を及ぼすものと考えられる。

そこで以下では、本実験で作製したCFRMの反射電子像の観察を行った。

写真-1, 2は、それぞれSMおよびDM₁で製造したCFRMの研磨面の反射電子像を示したものである。なお、両写真とも $V_f=3 \text{ vol\%}$ の配合条件のものである。写真-1より、SMでは骨材界面に10~40 μm 厚さ程度の遷移帯が形成され、特に、打設方向に対し骨材下部に多く形成されている。これに対し、写真-2のDM₁では、骨材界面に遷移帯がほとんど形成されておらず、S

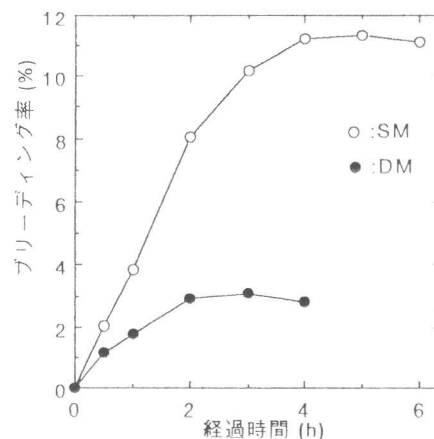


図-6 ブリーディング試験結果

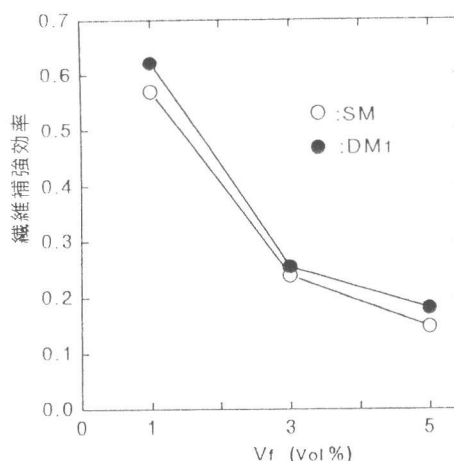


図-7 繊維補強効率と V_f の関係

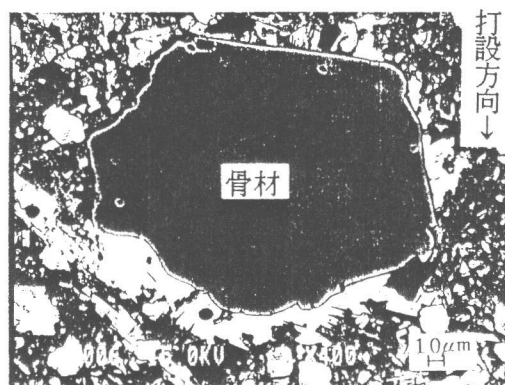


写真-1 CF RMの反射電子像 (SM)

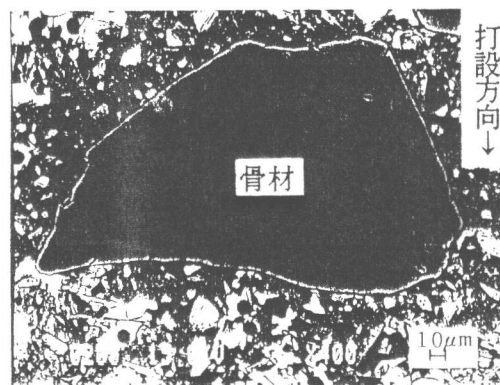


写真-2 CF RMの反射電子像 (DM)

Mの場合と顕著な差が現れている。SMとDMのこの差は、図-6で示したブリーディングの差により説明できるものと考えられる。すなわち、遷移帯が形成されるためには骨材界面に水膜が形成される必要があるため、ブリーディングの少ないDMでは水膜が形成され難く、遷移帯の形成が少なくなったものと考えられる。一方、繊維界面については、写真の倍率が低く十分な観察を行うことができないが、ブリーディング量の差が界面での遷移帯の形成に影響するならば、繊維界面においても骨材界面と同様なことが予想される。また、SMの場合の様に比較的厚い幅の遷移帯が形成されると、その遷移帯内に繊維が存在する確率が高くなるため、繊維界面がポーラスである確率はDMの場合より高くなるものと思われる。

以上のことより、SMに比べDMで繊維補強効率が向上したことについて、DMによりブリーディングが減少したために、骨材界面および繊維界面の遷移帯の形成が少なくなり、繊維とマトリックスとの付着が改善されたためであると考えられる。

4. まとめ

本研究の範囲で、以下の結論が得られた。

- (1) CFRMの練混ぜをDMで行うことにより、SMに比べ、曲げ強度および曲げ靱性が増加する。また、この傾向は繊維混入率が大きくなるほど顕著となる。
- (2) 理論強度との比較から、CFRMの繊維補強効率は、繊維混入率が大きくなるほど低下するが、DMの場合の方が繊維補強効率の低下は小さいことが明らかとなった。
- (3) 反射電子像の観察から、DMによりブリーディングを減少させると、骨材界面に形成される遷移帯が大幅に減少することが明らかとなった。

[謝辞]

本研究は平成7年度文部省科学研究費(奨励研究A)の交付を受けて行ったものである。また、反射電子像の撮影にあたっては、秩父小野田(株)中央研究所・内川特別研究室チーフ羽原俊祐氏および平尾 宙氏からの御協力を得ました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 真嶋光保・幸左賢二・大野定俊：繊維補強セメント/コンクリート複合材料，技報堂出版，1994.
- 2) 友沢史紀ほか：短繊維補強コンクリート研究委員会報告書，(社)建築研究振興協会，1993.
- 3) 田澤栄一・笠井哲郎ほか：ダブルミキシングで製造したコンクリートの圧縮強度，土木学会論文集，No.408/V-11，pp.139~146，1989.
- 4) 笠井哲郎・田澤栄一：三成分系のダブルミキシング効果，土木学会論文集，No.402/V-10，pp.43~51，1989.
- 5) 田澤栄一・笠井哲郎：フレッシュセメントペーストのダブルミキシング効果，土木学会論文集，No.396/V-9，pp.135~142，1988.
- 6) 槇谷栄次訳(D. J. Hannant著)：繊維補強コンクリート，森北出版，1980.
- 7) 秋浜繁幸ほか：炭素繊維を用いたセメント系複合体(CFRC)の力学的性質に関する実験的研究，コンクリート工学，vol.20，No.8，論文No.82.8-1，pp.75~84，1982.
- 8) 秋浜繁幸：特殊な材料を用いたコンクリート・カーボン繊維，コンクリート工学，vol.25，No.9，pp.80~85，1987.
- 9) 内川 浩：組成と構造の観点から見た硬化セメントペースト、モルタルおよびコンクリートの類似点と相違点，セメント・コンクリート，No.507，pp.33~46，1989.