

論文 空気量及び水粉体比が繊維補強モルタルの力学的特性に及ぼす影響

川又 篤¹⁾・三橋 博三²⁾・金子 佳生³⁾

要旨：本研究の目的は繊維補強セメント系複合材料(FRCC)の高靱性化である。靱性に影響を及ぼす主要因は、繊維並びにマトリクスと繊維の界面特性、そしてマトリクスの破壊特性にあると考えられる。本研究ではマトリクスの破壊特性を変化させるため空気量及び水粉体比をパラメータにとり、切り欠き梁の3点曲げ試験によりFRCCの靱性に及ぼす影響を検討した。結果として、マトリクスの破壊靱性値はFRCCの靱性を制御するためのパラメータの一つに挙げられることが確認できた。本実験で用いたポリエチレン繊維の場合は、最適なマトリクスの破壊靱性値(限界歪みエネルギー解放率) G_{fc} は7.5-8.0N/mであることがわかった。

キーワード：繊維補強, 靱性, 破壊靱性値, 空気量, 水粉体比

1. はじめに

今日、コンクリートは構造物の主要材料の一つとなり世界中で広く使用されている。しかしながら、コンクリートの引張強度は低く、歪み限度も小さいため、長期耐久性・安全性を損ねるひび割れが発生しやすい欠点がある。このような性質を改善するため、繊維補強セメント系複合材料(以下、FRCC:Fiber Reinforced Cementitious Compositesと記述する)が開発された。繊維補強は単に引張強度を高めるためではなく、ひび割れを制御し、ひび割れ発生後はひび割れ間に存在する繊維が力を伝達することによる挙動改善のために施される。つまりFRCCは安全性を確保するための材料と言える。近年、セメント系母材(以下、マトリクスと記述する)や繊維、製造工程が発達し、更に挙動を制御する基本的メカニズムが解明されつつある。その結果、使用目的に適合させ、その特性を最大限に活用するためのFRCC材料設計法の確立が望まれている。¹⁾²⁾

Li³⁾はマイクロメカニクスに基づいたECC(Engineered Cementitious Composites)を開発した。ECCはFRCCの一種であり、直接引張荷重を与えたときに疑似歪み硬化を示す特徴がある。Liは疑似歪み硬化を示すための限界繊維混入量を定

式化した。これは繊維の長さ、アスペクト比及びヤング係数、複合体の破壊靱性値、そして界面に関するパラメータにより構成されている。しかしながら、界面に関するパラメータには直接測定することが困難なものも含まれており、又、界面のメカニズムには未だ解明されていない多くの要素が残っている。

繊維とマトリクスの界面における付着強度が高すぎると、初期ひび割れが発生した後に繊維は破断する。逆に付着強度が低すぎると、繊維は容易に引き抜ける。このように付着強度はFRCCの力学的特性に大きな影響があると考えられ、適度な付着強度を得るためには繊維とマトリクスの組み合わせを適切に選択する必要がある。又、FRCCではマトリクスの破壊靱性値は低い方が好ましいと言われている。破壊靱性値は初期ひび割れに必要なエネルギーであるため小さな破壊靱性値は初期ひび割れを誘発し易いからである。初期ひび割れが早く発生すると繊維補強効果を促進することになる。又、繊維が初期ひび割れを架橋力により維持できる時、複数ひび割れが発生する。複数ひび割れとは初期ひび割れ周辺に分布的に生じる微小なひび割れのことであり、これにより引張歪みを増加させることが可能となる。

*1 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院教授 工学研究科都市・建築学専攻 工博 (正会員)

*3 東北大学大学院助教授 工学研究科都市・建築学専攻 PhD (正会員)

FRCCの靱性を制御する要素に繊維並びに繊維とマトリクスの界面特性と同様にマトリクスの破壊特性が挙げられる。本報ではマトリクスの破壊特性を変化させるための空気量及び水粉体比をパラメータにとり、切り欠き梁の3点曲げ試験を行うことによりマトリクスの破壊靱性がFRCCの靱性に及ぼす影響を実験的に検討した。マトリクスの空気量が増加すると、FRCCの破壊靱性は改善される傾向にあるが、水粉体比によってその傾向は変化する。それに対して、マトリクスの破壊靱性値とFRCCの靱性の関係は水粉体比によらずある領域にピークを持つ関数で表されることを明らかにした。

2. 実験方法

2.1 使用材料

使用した材料は以下の通りである。早強ポルトランドセメント(C)、シリカフューム(SF)、超高強度コンクリート用減水剤(SP)(主成分：芳香族アミノスルホン酸系高分子化合物)、AE剤(主成分：多価アルコール系特殊非イオン界面活性剤)、ポリエチレン繊維(比重：0.97、繊維長：30mm、繊維径12 μ m、引張強度：2,580MPa、引張弾性率：73GPa)である。

2.2 調合

本研究では空気量及び水粉体比をパラメータとして変化させた。水粉体比(以下、W/Bと記述する)は30%、35%、40%の3パターンとした。空気量の調整にはAE剤を使用し、水粉体比30%、35%では4パターン、40%では3パターンを設定した。全シリーズ共通の調合として、C：SF=79.3：20.7vol.%、SP/(C+SF)=2.0wt.%、繊維混入率は1.5vol.%とした。各シリーズの空気量を表-1に示す。本研究ではFRCCのマトリクスの破壊靱性値を測定するため、ブレンマトリクスの試験も行った。ここで空気量の略号は小さい順からa、b、c、dとしている。又、Pはブレンマトリクス試験体を、FはFRCC試験体を表す。

2.3 試験体作製方法

練り混ぜにはオムニミキサー(容量：10 ℓ)を用いた。ブレンマトリクスシリーズではセメント及びシリカフュームを1分間空練りし、その後、

表-1 各シリーズの空気量

空気量 (vol.%)		空気量 (vol.%)	
P30a	0.5	F30a	0.7
P30b	4.0	F30b	4.5
P30c	8.0	F30c	8.8
P30d	8.2	F30d	10.0
P35a	0.3	F35a	2.1
P35b	4.6	F35b	6.6
P35c	8.0	F35c	8.4
P35d	12.5	F35d	11.0
P40a	0.4	F40a	0.7
P40b	5.2	F40b	6.6
P40c	10.5	F40c	10.5

水及び混和剤を投入し3分間練り混ぜた。FRCCシリーズでは同様の方法で練り混ぜた後、更に繊維を投入し5分間練り混ぜた。

全てのシリーズにおいて、40 \times 40 \times 160mmの角柱試験体を各シリーズ3体ずつ製作した。

試験体は打ち込み後、養生室内(20 $^{\circ}$ C、相対湿度94%以上)にて1日湿空養生を行い、その後脱型及び6日間標準養生を行い、打ち込み後7日目に各種試験を行った。

2.4 試験方法

(1)切り欠き梁の3点曲げ試験

ブレンマトリクスシリーズの曲げ試験は角柱試験体中央部に深さ20mmの切り欠きを設置したものをそれぞれ3体ずつ用いて、0.2mm/minの載荷速度で中央集中載荷を行った。得られた最大曲げ荷重より、破壊靱性値 G_{IC} を算出した。算出方法は以下に示す通りである。

$$K_{IC} = \frac{3P_{max}S}{2bW^2} \sqrt{\pi a} F(\xi) \quad (1)$$

$$F(\xi) = 1.089 - 1.71\xi + 8.23\xi^2 - 14.22\xi^3 + 14.59\xi^4 \quad (2)$$

$$G_{IC} = \frac{K_{IC}^2}{E_m} \quad (3)$$

ここで P_{max} は最大曲げ荷重であり、 S 、 b 、 W 、 a はそれぞれ試験体のスパン、幅、高さ、切り欠き深さである。 E_m はマトリクスのヤング率、 $F(\xi)$ は試験体形状の関数で、 $\xi = a/W$ である。

FRCCシリーズの曲げ試験は、繊維の補強効果

を顕著に現すために切り欠き深さを10mmとし、同様の方法で試験を行い、荷重-CMOD(Crack Mouth Opening Displacement)関係を測定した。

(2) 圧縮試験

曲げ試験後の角柱試験体の片側を使用し、JIS A 1108に準じ、荷重速度約3kgf/cm²/secで行い、最大荷重から圧縮強度を算出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 マトリクスの圧縮強度と破壊靱性値

実験により得られたブレンマトリクスの圧縮強度と空気量の関係を図-1に、ブレンマトリクスの破壊靱性値 G_{IC} と空気量の関係を図-2に示す。図-1より空気量が増加することにより圧縮強度は低下することがわかる。一方、 G_{IC} はこのような単純な傾向を示しておらず、水粉体比により異なった傾向を示している。特にW/B=40%ではW/B=30%、35%と比較して空気量の影響をほとんど受けていないことがわかる。これはW/B=40%ではW/B=30%、35%に比べ潜在的な空隙又は微小なひび割れを多く含んでいるからであると考えられる。

3.2 荷重-CMOD曲線

FRCCシリーズの切り欠き梁の3点曲げ試験により得られた荷重-CMOD曲線を図-3に示す。荷重-CMOD曲線では水粉体比の影響が明確に現れていることがわかる。W/B=30%ではCMOD=

0.5mm程度にピーク荷重があり、ピーク後の荷重は急激に降下する。ところがW/B=40%ではピーク荷重は全体的に低いものの、ピーク荷重後は比較的緩やかな挙動を示している。W/B=35%では荷重-CMOD曲線に及ぼす空気量の影響が大きいことがわかる。W/B=35%では、空気量が多い場合にはW/B=40%に近い傾向を示し、空気量が少ない場合にはW/B=30%に近い傾向を示すことがわかる。又、空気量8.4%までは空気量の増加に伴い靱性的な挙動を示すようになるが、それ以上の空気量では靱性は低下することがわかる。そのため適度な靱性特性が得られる最適な空気量があるものと考えられる。

3.3 ひび割れ形状

典型的なひび割れ形状を図-4に示す。ひび割れは切り欠きから垂直にほぼ直線的に発生する形状と、初期ひび割れから逸れて曲折する形状との大きく2通りに分けられた。垂直なひび割れでは切り欠き先端から大きな一本のひび割れが進展した形状、切り欠き先端にひび割れが集中した形状、初期ひび割れの周辺に複数ひび割れが発生した形状などのパターンが確認できた。一方、曲折したひび割れが発生したほとんどの試験体は複数ひび割れを伴っており、比較的靱性に富んだ荷重-CMOD曲線を示した。これはひび割れの曲折により破断面積が増加し、切り欠き先端での応力集中が緩和されたためと考えられる。

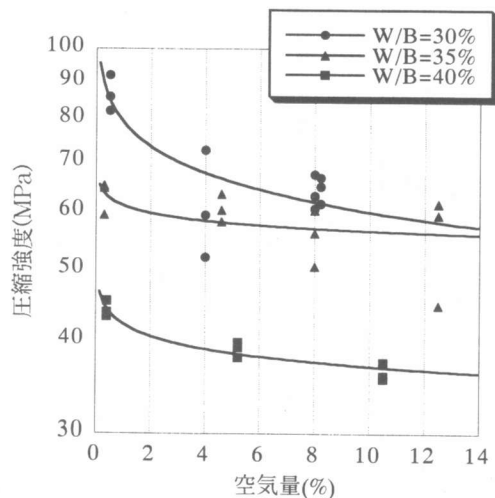


図-1 マトリクスの圧縮強度と空気量の関係

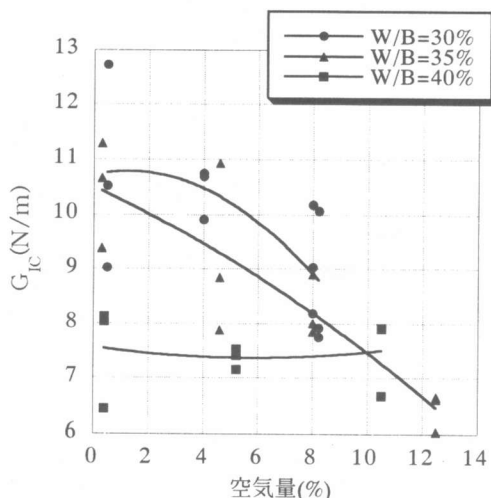


図-2 マトリクスの G_{IC} と空気量の関係

又、 $W/B=30\%$ のほとんどの試験体では一本の垂直且つ大きなひび割れが発生したが、F30c及びF30dでは試験体毎にそれぞれ異なったひび割れ形状となり、結果として荷重-CMOD曲線もバラツキの大きなものとなった。F35b、F35c及びF40では複数ひび割れを伴った曲折ひび割れが多

く見られたため、荷重-CMOD曲線は靱性に富んだ挙動を示したものと考えられる。

3.4 破断面の状況

破断面における切り欠き先端の典型的な繊維状況を図-5に示す。 $W/B=30\%$ のほとんどの試験体ではマトリクス微細片が付着することなく繊維

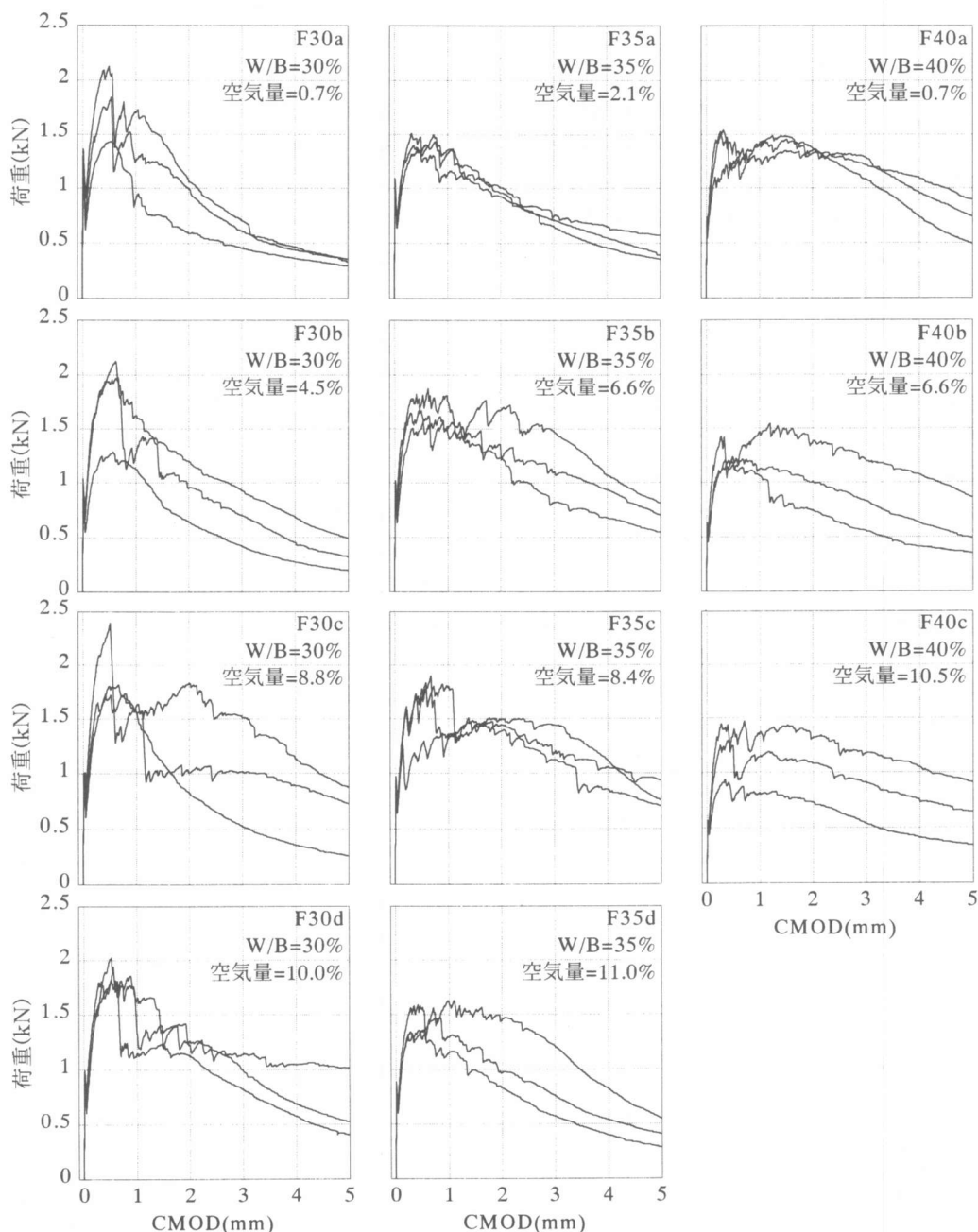
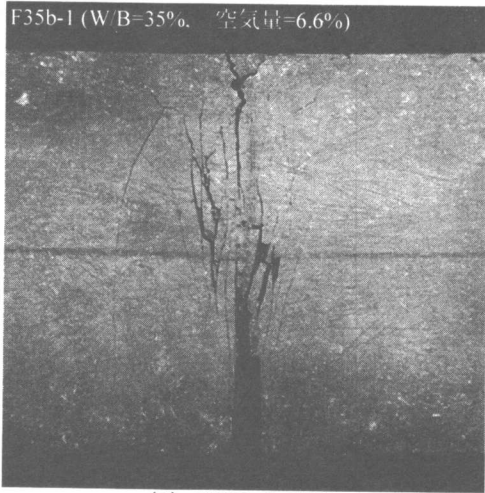
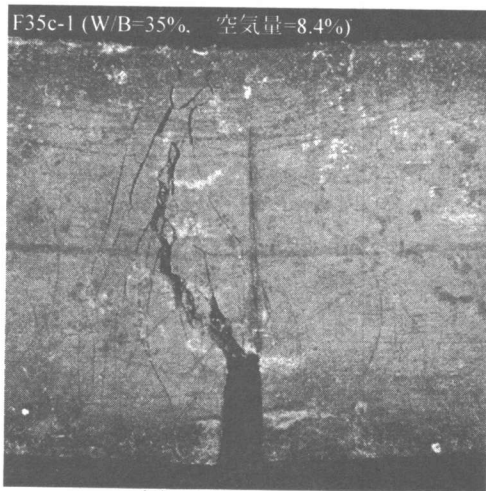


図-3 FRCCの切り欠き梁の3点曲げ試験により得られた荷重-CMOD曲線



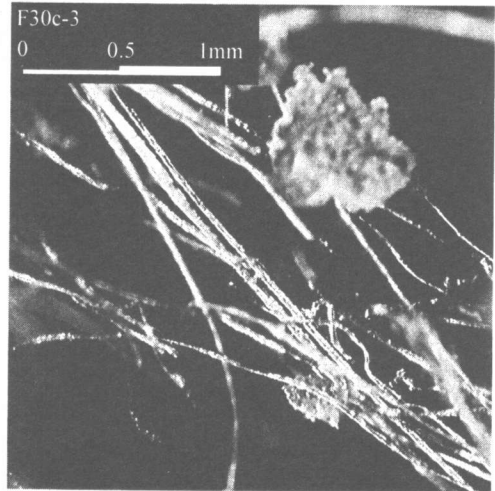
(1) 垂直なひび割れ



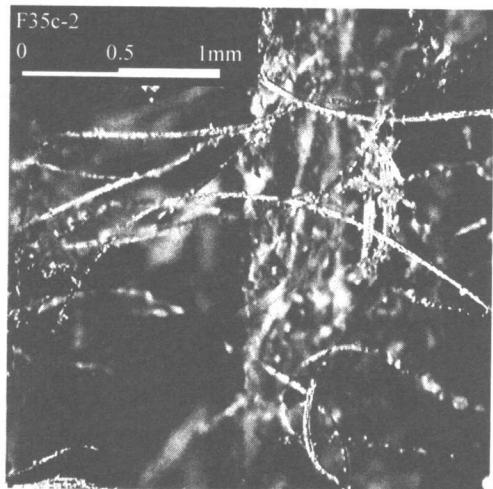
(2) 曲折したひび割れ

図-4 典型的なひび割れ形状

が引き抜けたのに対し、W/B=35%及び40%のほとんどの試験体ではマトリクスの微細片が付着した状態で繊維が引き抜けた。特にF35c及びF35dの試験体では多くのマトリクスの微細片が付着していた。付着したマトリクスを定量的に評価することは困難であるが、F35及びF40の中でもマトリクスが多く付着したシリーズは比較的靱性に富んだ挙動を示していることが確認できた。これは空気量が増加することによりマトリクスは脆性的になり⁴⁾、繊維はマトリクスとの剥離により引き抜けるのではなく、界面のマトリクスが破損することにより引き抜けたと考えられる。又、界面マトリクスの破損には単純に繊維が剥離し引き



(1) マトリクスが付着していない繊維



(2) マトリクスが付着した繊維

図-5 切り欠き先端の繊維状況

抜ける場合よりも大きなエネルギーが必要であると考えられる。

3.5 靱性評価

本研究では荷重-CMOD曲線のCMOD=5.0mmまでの曲線下の面積を $A_{s,0mm}$ とした。本実験に於ける切り欠き梁の載荷点変位はCMODの約86%であったため、 $A_{s,0mm}$ は梁が部材角約1/17~1/18に変形するまでの吸収エネルギーと評価される。本研究では $A_{s,0mm}$ をピーク荷重 P_{max} で除した値 $A_{s,0mm}/P_{max}$ を靱性評価指標にとることとした。 $A_{s,0mm}/P_{max}$ はピーク荷重後の変形によるエネルギー吸収特性を相対的に評価できるものと考えられる。

図-6に示される $A_{s,0mm}/P_{max}$ と空気量の関係を見る

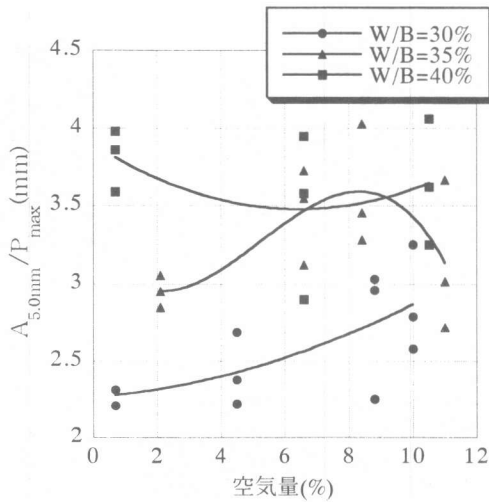


図-6 $A_{5.0mm}/P_{max}$ と空気量の関係

と、水粉体比の影響が大きいことがわかる。W/B=30%では空気量が増加するにつれ靱性的になり、W/B=40%では空気量6.6%をピークとした下に凸の傾向が得られた。一方、W/B=35%ではW/B=30%及び40%に挟まれた分布であるが、曲線形状はW/B=30%及び40%の何れとも異なる形状である。結論として、 $A_{5.0mm}/P_{max}$ と空気量との間に明確な関係を見出すことはできない。

一方、図-7に示した $A_{5.0mm}/P_{max}$ とプレーンマトリクスの破壊靱性値 G_{IC} の関係には明確な相関が見られる。バラツキは大きいものの $G_{IC}=7.5\sim 8.0$ N/mを最大値とした関係にある。これは最大値近辺に最適な G_{IC} が存在することを意味している。又、最大値付近には、マトリクス微細片の付着が確認できたF40及びF35cが分布していることから、このような破壊特性を発現させるためには、この程度の G_{IC} が適していると言える。つまり高靱性FRCCは G_{IC} が高過ぎても低過ぎても得られず、最適な G_{IC} において得られると考えられる。

4. 結論

本実験では、空気量及び水粉体比をパラメータにとることによって、FRCCの靱性に及ぼすマトリクスの破壊靱性値の影響を確認できた。以下に結論をまとめる。

(1)マトリクスの空気量が荷重-CMOD曲線に影響を及ぼすものの、その影響は、水粉体比によつ

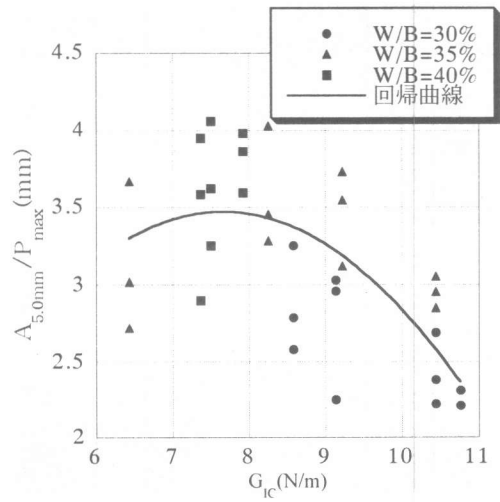


図-7 $A_{5.0mm}/P_{max}$ と G_{IC} の関係

て大きく異なることが明確に確認できた。

(2)複数ひび割れを伴った曲折ひび割れが進展した試験体では靱性的な挙動が得られた。このような試験体では、引き抜けた繊維に多くのマトリクスの微細片が付着していることが確認できた。

(3)マトリクスの破壊靱性値が $G_{IC}=7.5\sim 8.0$ N/mの時、 $A_{5.0mm}/P_{max}$ は最大値をとることが確認できた。このことからマトリクスの破壊靱性値はFRCCの靱性を制御するのに有効なパラメータの一つであり、本研究で使用したポリエチレン繊維では $G_{IC}=7.5\sim 8.0$ N/mが最適値であることがわかった。

謝辞：末筆ながら、実験材料を御提供頂いた宇部三菱マテリアル(株)、エフ・ビー・ケー(株)及び東洋紡(株)に記して謝意を表します。

参考文献

- 1)Bentur, A. and Mindess, S.: Fiber Reinforced Cementitious Composites, Elsevier Applied Science, 449p, 1990
- 2)Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W. (eds.): High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC 2), E & FN Spon, 502p, 1996
- 3)Li, V. C. and Leung, C. K. Y.: Steady-state and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 118, No.11, pp.2246-2264, 1992
- 4)大岸佐吉, 小野博宣: コンクリートおよび繊維補強モルタルの破壊力学特性(G_{IC} , G_p)に及ぼす試験要因の影響, コンクリート工学, Vol. 26, No. 2, pp.103-118, 1998.2