短繊維補強セメント系複合材料の力学的性能に及ぼす材料因子の影響 に関する基礎的研究

INFLUENCE OF COMPONENT MATERIALS' PROPERTIES ON MECHANICAL PERFORMANCE OF SHORT FIBER REINFORCED CEMENTITIOUS COMPOSITES

中村 裕*, 三橋 博三**

Hiroshi NAKAMURA and Hirozo MIHASHI

For the sake of finding the factors which influence the mechanical performance on short fiber reinforced cementitious composites, a parametric study was experimentally carried out. Nine parameters on fiber and four parameters on mortar matrix were varied. Then the experimental results on bend and compression tests were assessed for nine parameters concerning the mechanical performance indexes such as the maximum strength, deformability and several toughness indexes. Finally these results were analyzed by a multi regression analysis to formulate design criteria for the each mechanical performance index as a function of some selected parameters on fiber and mortar matrix.

Keywords: *short fiber, mortar matrix, bending behavior, compressive behavior, a multi regression analysis, mechanical performance*

短繊維, モルタルマトリックス, 曲げ挙動, 圧縮挙動, 重回帰分析, 力学的性能

1. はじめに

セメント系複合材料の引張強度や曲げ強度を高め, かつピーク以降の不安定なひび割れ進展を抑えるという要求において, 短繊維を混入することがその解決方法の一つとして選択される場合が多い。そして, 性能の一層の向上が必要となる場合, 繊維の混入率の増大や他の素材の繊維の使用等により再び実験的に検討することが求められる。しかし, ワーカビリティやコスト等の問題から自ずと繊維混入量や使用繊維の種類が限られることが多く, 期待される性能を実現することは難しい。

一般に繊維補強複合材料の力学的挙動は, 繊維やマトリックスの特性並びに, 繊維とマトリックスの界面特性の影響を受ける¹⁾。近年では高強度, 高剛性を有する新しい繊維が数多く開発されている²⁾。また, マトリックスに関しても, 高性能減水剤によって極めて低い水セメント比のセメント系複合材料の製造が可能になり, またシリカフュームや高炉スラグ等の混和材も多く使用されるようになり, 様々な微細構造の特性を有するセメント系複合材料が出現するようになった。しかしながら試行錯誤的な方法でこのような高い要求性能に合致する繊維補強複合材料を開発することは多大な労力を要するものとなる。そのため要求された性能を実現するような繊維補強複合材料を開発するためには, 適切な繊維とマトリックスの組み合

わせを見出すことが非常に重要な課題となる。

繊維の補強効果をモデルにより予測する試みは数多く検討されている³⁾。しかし, その多くは単一繊維の引き抜き試験で得られるデータを評価式の構成要素とすることが多く, 繊維とマトリックスの組み合わせに応じて逐次実験により確かめなければならない。また, V. C. Li等⁴⁾はマイクロメカニクスモデルと破壊力学のパラメータを組み合わせて, 繊維補強セメント系複合材料の破壊挙動を予測する理論的なモデルを構築した。しかし, Liの理論では引張挙動の疑似ひずみ硬化形状の設計は可能であるが, 変形量やエネルギー吸収量の大きさそのものに関しては様々なパラメータで無次元化されているために, 定量的に予測することは困難である。このようなことを鑑みても, 単純なモデルによる材料の諸性能の評価には限界があることが理解されよう。

一方, 引張や曲げに対する繊維補強の効果が重要視され, 圧縮挙動に対する繊維の効果も議論されることはあまりない。これは一般的に繊維を混入しても圧縮強度を高める効果は低く⁵⁾, 繊維の混入量を大きくした場合には, むしろ繊維混入による巻き込み空気の影響により, 圧縮強度を低下させるものとして捉えられているためと考えられる。

本稿では, 繊維及びモルタルマトリックスの物理的特性を表すパ

* 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻
大学院生・工修
(現 ㈱前田先端技術研究所 主任研究員・博士(工学))
** 東北大学大学院工学研究科都市・建築学専攻 教授・工博

Graduate Student, Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., M. Eng.
(Senior Research Engineer, Maeta Techno-Research, Inc., Dr. Eng.)
Prof., Dept. of Architecture and Building Science, Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

ラメータを説明変数とし、それに対して切り欠き梁の曲げ試験から計測された荷重－載荷点変位曲線及び一軸圧縮載荷試験による圧縮応力－ひずみ曲線の特徴を表現するのに適当と思われるパラメータを目的変数として、重回帰分析を行う。その結果、どのような因子がそれぞれの挙動にどの程度の影響を与えているのかを偏相関係数の大きさにより把握することが出来る。また、得られた重回帰式を用いて、繊維及びモルタルの種々の特性から、繊維補強モルタルの曲げ及び圧縮挙動の特徴を予測することのできる推定式を示す。

2 実験の概要

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、シリカフューム（ノルウェー産）、7号珪砂、高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系高分子化合物）、増粘剤（水溶性セルロースエーテル）。また、繊維の物理的特性については表1に示す。

2.2 調合

モルタルの調合は、水結合材比（以下W/Bと略記する）を50%、60%、及び70%の3水準とした。ただし、砂結合材比を1.0と一定とし、またシリカフュームをセメント重量に対して20%内割りで置換した。さらに、増粘剤を水量に対して0.6wt.%を加えた。尚、繊維の混入率は、プレーンの場合を除き全てのシリーズで3vol.%とした。また減水剤は水結合材比が50%の場合には結合材の2wt.%を、60,70%の場合には結合材の0.75wt.%をそれぞれ水と置換して混入した。尚、硬化後の力学的特性については表2に示す。

2.3 供試体の作製

容量5リットルのオムニミキサーを用いて、以下の手順で練り混ぜを行った。セメント、シリカフューム及び増粘剤をミキサーに投入し30秒間空練りを行い、その後、水と減水剤を投入し2分間練り混ぜる。そして、珪砂を投入し1分間、繊維を投入し2分間練り混ぜ、そこで一旦かきおとしを行い、更に1分間練り混ぜた後型枠に打設した。ただし、練り上がりの性状が多くの供試体について非常に粘性の高いものとなったため、試料を少量づつ投入し、丁寧に突き棒で締め固めて打設を行った。尚、練り上がり時のフローは、プレーンの場合150から170の値を示した。一方、繊維を混入したものはアスペクト比（繊維長さ/繊維径）に大きく関わっており、アスペクト比が大凡500以上の繊維では、W/Bに拘わらず、フローは110から120の値を取り、中には繊維がうまく分散されていないものが見られた。アスペクト比が大凡500以下の繊維では、120から160の値を取り、繊維の分散は比較的良好であった。養生は、打ち込んだ翌日に脱型し、材令7日まで標準養生を行った。

2.4 試験方法

供試体の寸法は、40x40x160mmの角柱とし、載荷試験前日にコンクリートカッターで供試体中央に深さ10mmの切り欠きを設けた。スパンを150mm、梁の両端の支持をローラーとする3点曲げ試験を行い、荷重と載荷点変位の関係を測定した。一方、圧縮載荷試験は、φ50x100mmの円柱供試体を用い、許容量10mmのコンプレッソメーターを取り付け変位を測定した。尚、曲げ及び圧縮試験双方においてクロスヘッドの載荷速度は0.2mm/minとした。

表1 使用繊維の物理的特性

繊維種類	記号	d_f (μm)	L_f (mm)	f_t (MPa)	E_f (GPa)
ビッチ系炭素繊維	PIT	17	18	1900	190
パン系炭素繊維	PAN	7	6	4410	235
アラミド（テクノール）繊維	ARA	12	6,12,18	3400	72.5
スチール繊維	STE	100	3,6	980	240
ポリエチレン繊維(A)*	PE・A	38	12.7	2700	120
ポリエチレン繊維(B)	PE・B	12	12	2940	98
ポリエチレン繊維(C)	PE・C	12	15	2940	98
ポリエチレン繊維(D)*	PE・D	12	15	2490	76
ポリエチレン繊維(E)	PE・E	12	18	2940	98
ポリエチレン繊維(F)*	PE・F	12	18	2490	76
ポリエチレン繊維(G)	PE・G	12	15	3560	130
ポリエチレン繊維(H)	PE・H	21	15	3230	88
ポリエチレン繊維(I)	PE・I	21	15	1080	18
ポリプロピレン繊維	PP	40	6,12,18	482	2.61
ポリアラート（ベクトラン）繊維	PA	16	6	3234	75
ポリビニルアルコール繊維(A)	PVA・A	14	6	2156	45.9
ポリビニルアルコール繊維(B)	PVA・B	37	12,15,18	1960	47

*マトリックスとの付着改善のため特殊な表面処理を施した。

表2 モルタルマトリックスの力学的特性

W/B (%)	$f_{c,m}$ (MPa)	$f_{t,m}$ (MPa)	E_m (GPa)	$K_{c,m}$ ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/3}$)
50	31.4	2.75	15.2	0.294
60	27.0	2.59	13.0	0.228
70	18.1	1.93	8.9	0.190

3. 解析方法

繊維及びモルタルマトリックスの物理的特性を説明変数とし、曲げ挙動及び圧縮挙動を表すパラメータを目的変数として重回帰分析を行った。

繊維及びモルタルマトリックスの説明変数は、物理的意味を持った以下に示す13個を選択した。繊維に関する説明変数は、繊維径： $d_f(\text{mm})$ 、繊維径の2乗（繊維の断面積に相当）： $d_f^2(\text{mm}^2)$ 、繊維径の

図1 曲げ挙動を表現する目的変数の略図

表3 曲げ挙動及び圧縮挙動に関する目的変数

供試体の記号	曲げ挙動に関する目的変数					圧縮挙動に関する目的変数			
	P_{max} (kgf)	d_{max} (mm)	W_{pe} (kJ/m ²)	θ (kgf/mm)	$W_{0.9^2}/W_{pe}$ (kJ/m ²)	σ_{max} (MPa)	ε_{max} (μ)	E_c (GPa)	$E_{n_{pe}}$ (MPa)
PL-50	48.53	0.011	0.003	538.89	0.012	31.4	2957	15.2	0.056
PL-60	38.18	0.013	0.003	477.50	0.008	27.0	3042	13.0	0.049
PL-70	30.93	0.015	0.003	386.25	0.008	18.1	3252	8.90	0.037
PIT-18-50	151.03	0.111	0.109	196.14	0.37	23.5	3110	11.6	0.047
PIT-18-60	164.55	0.150	0.159	208.29	0.43	17.7	3647	9.92	0.045
PIT-18-70	129.07	0.200	0.166	89.01	0.58	11.0	3780	6.47	0.028
PAN-6-50	165.17	0.186	0.214	150.15	0.60	30.6	4720	14.6	0.105
PAN-6-60	188.00	0.234	0.234	134.29	1.12	20.6	6302	8.82	0.105
PAN-6-70	148.42	0.256	0.256	75.72	0.89	14.4	4507	8.64	0.048
ARA-6-50	145.10	0.237	0.238	37.69	1.90	39.7	5577	13.9	0.150
ARA-6-60	133.97	0.278	0.266	51.93	1.10	27.3	7007	12.6	0.150
ARA-6-70	132.13	0.362	0.345	32.87	1.68	19.3	4823	9.33	0.070
ARA-12-50	196.03	0.493	0.690	42.34	2.91	38.2	5680	14.4	0.156
ARA-12-60	195.12	0.699	1.032	30.06	4.03	27.6	4873	12.1	0.097
ARA-12-70	151.88	0.606	0.712	24.15	2.14	19.2	4068	9.88	0.055
ARA-18-60	224.15	0.735	1.233	30.87	5.43	25.3	4990	11.0	0.090
STE-6-50	112.05	0.070	0.049	100.95	0.45	33.9	3402	15.7	0.074
STE-6-60	85.42	0.060	0.035	94.91	0.27	25.1	3315	13.1	0.056
STE-6-70	72.80	0.068	0.030	62.76	0.29	16.3	2818	10.5	0.031
STE-3-50	126.13	0.101	0.063	159.66	0.32	32.7	3121	15.7	0.063
STE-3-60	93.75	0.065	0.038	142.05	0.19	24.1	3143	12.5	0.049
STE-3-70	76.27	0.063	0.029	146.67	0.12	16.8	2683	10.2	0.029
PE・A-13-50	110.47	1.038	0.856	4.74	9.60	24.7	3133	12.3	0.049
PE・A-13-60	86.57	0.765	0.490	8.67	2.81	17.7	2697	9.85	0.030
PE・A-13-70	65.60	0.681	0.330	5.56	2.53	11.2	2623	6.43	0.018
PE・B-12-60	88.93	0.598	0.423	8.50	3.20	18.0	3197	9.62	0.037
PE・C-15-60	108.87	0.545	0.433	9.47	4.53	19.1	2808	10.2	0.033
PE・D-15-60	123.30	0.631	0.583	7.65	7.88	18.3	2727	10.0	0.031
PE・E-18-60	81.33	0.333	0.197	11.55	2.08	15.9	2703	9.66	0.027
PE・F-18-60	119.98	0.686	0.585	8.95	6.29	19.4	3502	9.85	0.049
PE・G-15-60	78.21	0.355	0.192	9.22	2.75	18.0	3078	10.3	0.037
PE・H-15-60	106.09	0.635	0.491	11.20	5.10	23.3	3148	11.3	0.047
PE・I-15-60	75.17	0.653	0.349	9.18	2.01	17.4	2745	10.0	0.030
PP-6-60	56.67	0.479	0.201	7.05	1.55	17.8	3347	8.33	0.038
PP-12-60	63.39	0.851	0.384	7.48	1.67	21.3	2913	10.8	0.039
PP-18-60	68.74	1.070	0.518	5.36	2.81	20.4	2803	9.94	0.034
PA-6-60	135.03	0.394	0.389	33.34	1.77	22.2	4315	9.42	0.066
PVA・A-5-60	104.22	0.435	0.339	13.82	2.67	15.3	3503	7.56	0.035
PVA・B-12-60	121.83	0.568	0.514	14.77	3.34	22.3	4013	10.5	0.061
PVA・B-15-60	111.49	0.800	0.631	7.59	5.82	16.1	2497	9.28	0.026
PVA・B-18-60	99.68	1.036	0.826	14.36	2.49	17.2	2652	9.32	0.029

4乗（繊維の曲げ剛性に相当）： d_f^4 (mm⁴)及び $b_f d_f^4 E_f$ (mm⁴Pa)，繊維の長さ： L_f (mm)，アスペクト比： L_f/d_f ，繊維径 $\times$ 繊維長さ（繊維の表面積に相当）： $L_f d_f$ (mm²)，繊維の引張強度： f_t (MPa)，繊維の剛性： E_f (GPa)とした。一方，モルタルマトリックスに関する説明関数は，圧縮強度： $f_{c,m}$ (MPa)，割裂引張強度： $f_{t,m}$ (MPa)，静弾性係数： E_m (GPa)，及び脆性材料のひび割れ抵抗性能を表す破壊靱性値： K_{Ic} ^m(MPa $\cdot$ m^{0.5})とした。ただし，繊維とマトリックスとの付着特性は繊維とマトリックスの相互の特性によって決定される因子であり，独立した変数として扱うことが出来ない。従って，ここでは繊維

とマトリックスとの付着特性を表すパラメータは上述の諸変数（例えば，水セメント比や混和材の添加によって変化するマトリックスの圧縮強度や破壊靱性値等⁶⁾）の関数として表されるものと捉え，説明変数の中には含めなかった。

目的変数としては，切り欠き梁の曲げ試験より得られた荷重－載荷点変位曲線並びに圧縮応力－ひずみ曲線の特徴を表すと思われるパラメータを次のように選択した。

〔曲げ挙動に関して〕（図1参照）

1. 荷重－載荷点変位曲線のピーク時の荷重： P_{max} (kgf)

- ピーク時の載荷点変位: $d_{\max}$ (mm)
- ピーク時までの吸収エネルギー (曲線下面積OADOをリガメント面積で除した値): W_{pe} (kJ/m²)
- ピーク (A点) とピーク時の荷重の90%に相当するピーク以降の点 (B点) とを結ぶ軟化勾配: θ (kgf/mm)
- ピークを越え、ピーク荷重の90%に到達するまでに吸収する破壊エネルギー, $W_{0.9}$ (曲線下面積OABCOをリガメント面積で除した値) を W_{pe} との相対値として定量化する靱性パラメータ: $W_{0.9}^2/W_{pe}$ (kJ/m²)

[圧縮挙動に関して]

- 圧縮応力-ひずみ曲線の最大応力: $\sigma_{\max}$ (MPa)
- 最大応力時のひずみ: $\varepsilon_{\max}$ (μ)
- 静弾性係数: E_c (GPa)
- 最大応力までの圧縮応力-ひずみ曲線下の面積: En_{pe} (MPa)

このように設定した各供試体における曲げ及び圧縮の目的関数の値を表3に示す (プレーンのシリーズは参考までに記した)。尚、これらの値は各シリーズの供試体3個の平均値とした。表中の各供試体の記号は、繊維種類-繊維長さ-W/Bの順で表現している。また、ここで取り上げた供試体種類のほとんどの曲げ挙動及び圧縮挙動を示す曲線については、著者等⁷⁾の報告に掲載している。

次に、以上のように選択された説明変数及び目的変数を用いて、以下の手順に従って重回帰分析⁸⁾を行った。

まず p 個の説明変数 ($x_1, x_2, \dots, x_p$) とある目的変数 (y) の N 組の標本の間に次のような線形関係が成立すると仮定する。

$$y_{\lambda} = \beta_0 + \beta_1 x_{1\lambda} + \beta_2 x_{2\lambda} + \dots + \beta_p x_{p\lambda} + e_{\lambda} \quad (1)$$

$$(\lambda=1, 2, \dots, N)$$

ここで、 $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ を偏回帰係数、 $e_{\lambda} (\lambda=1, 2, \dots, N)$ を残差と言う。そして $x_1, x_2, \dots, x_p$ に対応する y の推定値 Y を表す重回帰式は次式ようになる。

$$Y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_p x_p \quad (2)$$

ここで、 $b_0, b_1, \dots, b_p$ を $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_p$ の推定値と言う。そこで、(2)式が求まったとして、各標本値 $\{x_{1\lambda}, x_{2\lambda}, \dots, x_{p\lambda} (\lambda=1, 2, \dots, N)\}$ を(2)式に代入して得られる値 Y_{λ}

$$Y_{\lambda} = b_0 + b_1 x_{1\lambda} + b_2 x_{2\lambda} + \dots + b_p x_{p\lambda} \quad (3)$$

$$(\lambda=1, 2, \dots, N)$$

と y の標本値 y_{λ} との差の平方和

$$S = \sum_{\lambda=1}^N (y_{\lambda} - Y_{\lambda})^2 \quad (4)$$

が最小となるように回帰係数を求め、(2)式を推定する。ただし、本解析で取り上げた説明変数が13個と多いため、変数増減法による変数の選択を行い、着目すべき説明変数の明確化と重回帰式の単純化を図った。変数増減法における説明変数の選択は、得られる各々の説明変数の寄与率が2.0以上になるように、説明変数の追加及び除去

を逐次行って求めた。また、こうして得られた各説明変数の目的変数に対する影響の度合いは、各々の説明変数の偏相関係数の大きさによって評価された。さらに、得られた重回帰式の有意性の検定は、重相関係数と分散分析により行った。

4. 解析結果及び考察

重回帰式から得られる値 (推定値) と実測値との関係を図2～図10に示す。図中では、繊維種類による区別を記号により図示した。

4.1 曲げ挙動に関して

(1) 曲げ挙動におけるピーク時の荷重 ($P_{\max}$) に関して

重回帰分析の結果、 f_t (0.64) と K_{IC}^m (0.34) が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 $P_{\max}$ を表現する重回帰式は(5)式のように示された。重相関係数は0.67となり、また分散分析の結果、危険率1%で(5)式の重回帰式が有意であることが示された。

$$P_{\max} = 2.18 \times 10^{-2} f_t + 331 K_{IC}^m - 11.0 \quad (5)$$

図2 曲げ挙動におけるピーク時の荷重($P_{\max}$)の推定値と実測値との関係

図3 曲げ挙動におけるピーク時の載荷点変位($d_{\max}$)の推定値と実測値との関係

(重相関係数: 0.67, 分散分析: $F=14.4^{**}$)

最も高い偏相関係数を示したのは繊維の引張強度 (f_t) であり, f_t が高ければ高いほど P_{max} を増加させる傾向にあることが分かった。つまり, 供試体にひび割れが進展し, ピークに達する時点で多くの繊維が破断している現象を捉えたものと推察される。一方, モルタルの破壊靱性値 (K_{IC}^m) の偏相関係数は, f_t のそれと比べて小さいものの正の相関を示していることから, K_{IC}^m が増加することによって P_{max} が増大する傾向にあることが分かった。 K_{IC}^m が増加することはマトリックスの微細構造の緻密化を意味しており, 初期の亀裂発生を抑える効果や繊維からマトリックスへの力の伝達が改善されたという付加的な働きがあったため, このような結果を得られたものと推察される。

図2に示される推定値と実測値との関係を見ると, ピッチ系炭素繊維やアラミド繊維では実測値が推定値よりも高い傾向を示し, ポリエチレン繊維では実測値が推定値よりも低い傾向を示している。これは, 本重回帰分析で用いた諸説明変数にはない因子が関与しているためと推察される。

(2) 曲げ挙動におけるピーク時の載荷点変位 (d_{max}) に関して

d_{max} については, その値が大きければ大きいほど, ピークに至るまでの変形性能に優れているという評価ができる。

重回帰分析の結果, $E_f(-0.78)$, $L_f d_f(0.74)$, $f_t(0.48)$, $d_f^2(-0.45)$, $d_f^3(0.41)$ 及び $d_f^4(-0.37)$ が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 d_{max} を表現する重回帰式は(6)式のように示された。重相関係数は0.93となり, また分散分析の結果, 危険率1%で重回帰式が有意であることが示された。

$$d_{max} = -45.0 \cdot d_f + 950 \cdot d_f^2 - 5.8 \times 10^4 \cdot d_f^4 + 1.25 L_f d_f + 9.61 \times 10^{-5} f_t - 2.53 \times 10^3 E_f + 0.624 \quad (6)$$

(重相関係数: 0.93, 分散分析: $F=32.3^{**}$)

比較的高い偏相関係数を示したのは繊維の剛性 (E_f) と繊維の表面積 ($L_f d_f$) であり, E_f が小さければ小さいほど, そして $L_f d_f$ が大きければ大きいほど, d_{max} が増大することが分かった。また, 繊維の引張強度 (f_t) が高い方が, より変形性能の増大に寄与することが分かった。 E_f が小さいということは, 単位応力当たりの繊維の伸びが大きいことを意味し, 繊維強度及び付着強度が十分な場合には, 繊維の弾性変形が供試体の変形量を大きくしたものと推察される。一方, 繊維混入量が一定の場合, 繊維1本の表面積 $L_f d_f$ が大きいということは繊維の総表面積が小さいことを意味する。つまり, 繊維の総表面積が小さくなることで繊維とマトリックスとの付着が不十分となり, 繊維の引き抜きが, d_{max} を大きくしたものと推察される。

図3では, 重相関係数やF値が高いこともあり, どの種類の繊維に対しても推定値と良く一致していることが認められる。

(3) 曲げ挙動におけるピーク時までの吸収エネルギー (W_{pe}) に関して

重回帰分析の結果, $E_f(-0.64)$, $f_t(0.54)$ 及び $L_f d_f(0.38)$ が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 W_{pe} を表現する重回帰式は(7)式のように示された。重相関係数は0.74となり, また分散分析の結果, 危険率1%で重回帰式が有意であることが示され

図4 曲げ挙動におけるピーク時までの吸収エネルギー (W_{pe}) の推定値と実測値との関係

図5 曲げ挙動におけるピーク以降の軟化勾配 (θ) の推定値と実測値との関係

図6 曲げ挙動における靱性指標 ($W_{0.9}^2/W_{pe}$) の推定値と実測値との関係

た。

$$W_{pe} = -2.04 \times 10^{-3} \cdot E_f + 1.37 \times 10^{-4} \cdot f_f + 5.07 \times 10^{-1} L_f d_f + 0.158 \quad (7)$$

(重相関係数: 0.74, 分散分析: F=13.3**)

この結果から、繊維の剛性 (E_f) が小さければ小さいほど、そして繊維の引張強度 (f_f) や繊維の表面積 ($L_f d_f$) が大きければ大きいほど W_{pe} は大きな値を示すことが分かった。大岸等⁹⁾の報告でも、繊維の引張強度が高い方が、繊維補強複合材料の破壊靱性が高くなる傾向にあることが示されており、本実験の結果と一致する。 W_{pe} はピーク時までの荷重-載荷点変位曲線下の面積を表しているため、曲げ挙動におけるピーク時の荷重や変位量の大きさの影響を受けることが考えられ、それらに影響を及ぼした説明変数の影響を受けることが、選択された説明変数から分かった。従って、ピークまでの吸収エネルギーを増大させるためには、引張強度の高い繊維を用いてピーク時の荷重を高くする方法と剛性の低い繊維を用いてピーク時の変位量を大きくする方法とを選択することができると考えられる。また、 E_f を低めると同時に f_f を高めることは物理的に難しいことから $L_f d_f$ を変えることによって W_{pe} の大きさを設計することも可能であると考えられる。

(4) 曲げ挙動におけるピーク以降の軟化勾配(θ)に関して

θ は荷重-載荷点変位曲線のピーク荷重からその荷重の90%まで低下するまでの耐力減少速度であり、この値が小さければ小さいほど塑性的な変形に優れていると言うことができる。

重回帰分析の結果、 E_f (0.89)、 d_f (-0.64)、 f_f (-0.63) そして K_{ic}^m (0.40) が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 θ を表現する重回帰式は(8)式のように示された。重相関係数は0.90となり、また分散分析の結果、危険率1%で重回帰式が有意であることが示された。

$$\theta = -1.45 \times 10^3 d_f - 2.85 \times 10^{-2} f_f + 7.54 \times 10^{-1} E_f + 3.49 \times 10^2 K_{ic}^m - 8.37 \quad (8)$$

(重相関係数: 0.90, 分散分析: F=34.5**)

最も高い正の偏相関係数を示したのは繊維の剛性 (E_f) となった。続いて繊維径 (d_f) 及び繊維の引張強度 (f_f) が高い負の偏相関係数を示した。このことより、 E_f が低いほど、そして d_f が大きいほど、さらに f_f が高いほどピーク以降の耐力減少速度が小さくなることが分かった。これは、繊維がそのような特性を有する場合、繊維が破断することなく繊維が引き抜ける現象が起きやすくなるためと考えられる。また、繊維の引張強度が高い方が大きな変形量までひび割れに対する抵抗力が保持される。一方、マトリックスの破壊靱性値 (K_{ic}^m) と正の相関を示したことは、マトリックスの微細構造が緻密になることで繊維とマトリックスの付着を高め、その結果繊維の破断を引き起こし、耐力減少速度が大きくなったためと考えられる。

図5中の特にポリエチレン繊維では剛性が比較的高く直径も小さいにも拘わらず推定値に対して低い実測値を示していることが認められる。これはポリエチレン繊維のスナッピング効果¹⁰⁾により、ピ

ーク以降のひび割れ抵抗力が長く維持されたためと推察される。

(5) 靱性指標 $W_{0.9}^2/W_{pe}$ に関して

$W_{0.9}^2/W_{pe}$ は、ピークまでに吸収するエネルギーとピークを越えてピーク時荷重の90%に低下するまでの吸収エネルギーとの比を示し、この値が大きいほど靱性に優れていると判断することができる。しかし、荷重-変形曲線の形状が相似である場合には、この比では実際のエネルギーの吸収量の差を示すことができない。従って、この比に対して $W_{0.9}$ をかけた $W_{0.9}^2/W_{pe}$ が、ピーク以降の変形挙動と吸収エネルギー量を考慮した靱性指標として適当であると考えられる。

重回帰分析の結果、 E_f (-0.78)、 f_f (0.74)、 d_f^4 (0.48)、 L_f/d_f (-0.45) 及び d_f (0.41) が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 $W_{0.9}^2/W_{pe}$ を表現する重回帰式は、(9)式のように示された。重相関係数は0.72となり、また分散分析の結果、危険率1%で重回帰式が有意であることが示された。

$$W_{0.9}^2/W_{pe} = 1.69 \times 10^2 d_f - 8.82 \times 10^4 d_f^4 + 1.38 \times 10^2 f_f + 3.62 \times 10^{-2} L_f/d_f - 1.68 \times 10^{-2} E_f - 5.26 \quad (9)$$

(重相関係数: 0.72, 分散分析: F=6.8**)

比較的高い偏相関係数を示したのは、繊維の剛性 (E_f) と繊維の引張強度 (f_f) であり、 E_f が低ければ低いほど、そして f_f が高ければ高いほど、高い $W_{0.9}^2/W_{pe}$ を示す傾向にあることが分かった。また繊維の剛性、引張強度及び直径が比較的高い偏相関係数を示す傾向にあったことは、 θ において得られた結果と類似している。従って、ピーク以降の耐力減少速度を小さくすることは、 $W_{0.9}^2/W_{pe}$ を高めることへ導くものであることは明白である。

図6において、ポリエチレン繊維が他と際だって異なる傾向を示した理由は、 θ の場合と同様、スナッピング効果によるものと考えられる。

4.2 圧縮挙動に関して

(1) 圧縮挙動における最大応力 (σ_{max}) に関して

重回帰分析の結果、 K_{ic}^m (0.82) 及び L_f (-0.44) が選択された。

図7 圧縮挙動における最大応力 (σ_{max}) における推定値と実測値との関係

ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 $\sigma_{\max}$ を表現する重回帰式は、(10)式のように示された。重相関係数は0.84となり、また分散分析の結果、危険率1%で重回帰式が有意であることが示された。

$$\sigma_{\max} = -3.42 \times 10^{-1} L_f + 1.58 \times 10^2 K_{IC}^m - 11.5 \quad (10)$$

(重相関係数: 0.84, 分散分析: $F=41.0^{**}$)

最も高い偏相関係数を示したのはマトリックスの破壊靱性値 (K_{IC}^m) であった。つまり、マトリックスの微細構造の緻密化が供試体の圧縮強度増大に最も大きく影響を及ぼすことが分かった。繊維の特性に関しては、繊維長さ (L_f) が負の偏相関係数を示していることから、 L_f が短い方が複合体の圧縮強度を高める傾向にあることが分かった。これは、繊維が長い場合には、潜在欠陥を増大させる要因となることを捉えているものと考えられる。

図7においてアラミド繊維は、全体的に実験値の方が、推定値より高い値を示す傾向にあることから、この繊維は圧縮における抵抗力が他の繊維よりも優れているものと推察される。

(2) 圧縮挙動におけるピーク時のひずみ ($\epsilon_{\max}$) に関して

重回帰分析の結果、 f_t (0.65) 及び L_f (-0.43) が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 $\epsilon_{\max}$ を表現する重回帰式は(11)式のように示された。重相関係数は0.69となり、また分散分析の結果、危険率1%で重回帰式が有意であることが示された。

$$\epsilon_{\max} = -7.25 \times 10 L_f + 5.96 \times 10^{-1} f_t + 3.07 \times 10^3 \quad (11)$$

(重相関係数: 0.69, 分散分析: $F=16.2^{**}$)

比較的高い偏相関係数を示したのは繊維の引張強度 (f_t) と繊維長さ (L_f) であり、 f_t が高ければ高いほど、そして L_f が短ければ短いほど、圧縮挙動のピーク時の歪みが大きくなることが分かった。

切り欠き梁の曲げ試験では、ピーク時の変形量の大きさは繊維の変形能が大きく関与していたのに対して、圧縮では繊維の引張強度と高い相関が認められた。つまり、曲げでは繊維が繊維方向に引き抜かれるというメカニズムをとるのに対して、圧縮ではせん断ひび割れに対して、繊維が局部的に抵抗するメカニズムであると考えられる。その結果、圧縮応力下のピーク時の変形量は、繊維の伸びよりも繊維がせん断に対して如何に破断しないで抵抗できるかということの方が優先的に影響を与えたものと推察される。

図8を見ると、アラミド繊維が推定値に対して高めに評価されている。これは、圧縮強度において高めに評価されているように、それに乗じて歪みも大きく評価されたものと考えられる。一方、ポリエチレン繊維は推定値に対して低めに評価される傾向を示している。これは繊維のせん断に対する抵抗が小さかったことが影響を及ぼしたものと推察される。

(3) 圧縮挙動における静弾性係数 (E_c) に関して

重回帰分析の結果、 K_{IC}^m (0.83), d_f^2 (0.61) 及び $L_f d_f$ (-0.43) が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 E_c を表現する重回帰式は、(12)式のように示された。重相関係数は0.86となり、また分散分析の結果、危険率1%で重回帰式が有意であることが示された。

図8 圧縮挙動におけるピーク時のひずみ ($\epsilon_{\max}$) の推定値と実測値との関係

図9 圧縮挙動における静弾性係数 (E_c) の推定値と実測値との関係

図10 圧縮挙動におけるピークまでのひずみエネルギー ($E_{n_{pc}}$) の推定値と実測値との関係

$$E_c = 4.04 \times 10^2 d_f^2 - 3.33 L_f d_f + 5.02 \times 10 K_{ic}^m - 0.682 \quad (12)$$

(重相関係数: 0.86, 分散分析: F=32.6**)

最も高い偏相関係数を示したのは、マトリックスの破壊靱性値 (K_{ic}^m) であり、マトリックスの微細構造が緻密になればなるほど、複合体の剛性が高くなることが分かった。続いて高い偏相関係数を示したのは、繊維の断面積に相当する d_f^2 であった。つまり、繊維の断面積が大きいほど繊維の軸方向の剛性が高くなったためと考えられる。また同時に $L_f d_f$ との間に負の偏相関係数を示したのは、繊維混入量が一定の場合、繊維1本当たりの表面積が小さいほど、繊維の総表面積が大きくなり、その結果、マトリックスに対する拘束効果が大きく働いたため、複合体の剛性が高くなったものと考えられる。

(4) 圧縮挙動におけるピークまでのひずみエネルギー (En_{pc}) に関して

重回帰分析の結果、 K_{ic}^m (0.56), f_t (0.59), L_f (-0.49) 及び E_c (-0.27) が選択された。ただし括弧内の数値は偏相関係数を示す。 En_{pc} を表現する重回帰式は(13)式のように示された。重相関係数は0.76となり、また分散分析の結果、危険率1%で重回帰式が有意であることが示された。

$$En_{pc} = -2.76 \times 10^{-3} L_f + 1.48 \times 10^{-5} f_t - 8.89 \times 10^{-5} E_c + 5.06 \times 10^{-1} K_{ic}^m - 5.53 \times 10^{-2} \quad (13)$$

(重相関係数: 0.76, 分散分析: F=11.2**)

En_{pc} はピークまでの曲線下の面積であることから、圧縮強度及びピーク時の歪み量に影響を与えたマトリックスの破壊靱性値 (K_{ic}^m)、繊維の引張強度 (f_t) 及び繊維長さ (L_f) が、 En_{pc} を表現するパラメータとして選択されたものと考えられる。また、 E_c に対して低い負の偏相関係数を示したのは、繊維の伸びが少なからずエネルギー吸収に影響を及ぼしていることを捉えたものと考えられる。

5. 結び

重回帰分析により繊維やモルタルマトリックスの各種パラメータが繊維補強複合体の曲げや圧縮の挙動に与える影響を分析した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 曲げ挙動におけるピーク荷重を増加させるには、繊維の引張強度が高く、かつマトリックスの破壊靱性値が大きいものを用いることが有効である。
- (2) 曲げ挙動におけるピーク時の変位を増加させるためには、繊維の剛性が低く、かつ繊維の1本当たりの表面積の大きいものを用いることが有効である。
- (3) 曲げ挙動におけるピークまでの吸収エネルギーを増大させるためには、繊維の剛性が低く、かつ繊維の引張強度が高く、そして繊維1本当たりの表面積が大きいものを用いることが有効である。
- (4) 曲げ挙動においてピーク以降の耐力減少速度を低下させるためには、繊維の剛性が低く、繊維の引張強度が高く、そして繊維径の大きいものを用いることが有効である。
- (5) 曲げ挙動におけるピーク以降のエネルギー吸収量を評価した靱性指標、 $W_{0.9}/W_{pc}$ を増大させるためには、繊維の剛性が低く、引張強度

が高く、そして繊維径の大きいものを用いることが有効である。

- (6) 圧縮強度を高めるためには、マトリックスの破壊靱性値が大きく、かつ繊維長さが短いものを用いることが有効である。
- (7) 圧縮ピーク時の歪みを増大させるためには、繊維の引張強度が大きく、かつ繊維長さが短いものを用いることが有効である。
- (8) 圧縮挙動における静弾性係数を高めるためには、マトリックスの破壊靱性値及び繊維の断面積が大きく、かつ繊維1本当たりの表面積が小さいものを用いることが有効である。
- (9) 圧縮挙動におけるピークまでのひずみエネルギーを高めるためには、マトリックスの破壊靱性値及び繊維の引張強度が大きく、かつ繊維長さが短いものを用いることが有効である。

このようにして得られた推定式は、ここに示した限られた実験条件に対して得られた結果であり、どのような条件に対しても一般的に利用できるというものではない。しかし、これらの推定式から複合材料の変形挙動を推定し、さらには靱性を付与するような材料設計をすることが可能となることを示した。そして、本研究の実験で得られたものよりも更に大きな塑性域を有するようなセメント系複合材料を開発するという要求に応えるためには、マイクロメカニクスの検討を加えていくが必要になる。そのためには、実験により得られた力学的性能が、どのような材料因子の影響を受けているかを明確にしなければいけない。その意味で、本研究で重回帰分析により得られた結果は、マイクロメカニクスのメカニズムを検討する上でも様々な示唆を与えるものであり、今後の研究発展に有効であると考えられる。

謝辞

本研究は建築振興協会、高引張強度・高靱性コンクリートのハイブリッド構造への利用研究委員会(委員長: 松崎育弘東京理科大学教授)の活動の一部として行ったものである。また、平成9~平成10年度文部省科学研究費補助金(研究代表者: 東北大学工学研究科教授 三橋博三, No. 09650616)に依るものである。記して謝意を表する。

参考文献

- 1) A. Bentur and S. Mindess: Fiber Reinforced Cementitious Composites, ELSEVIER APPLIED SCIENCE, LONDON and NEW YORK, pp.15-30, 1990.
- 2) 日本材料学会編: 繊維と材料, 先端材料シリーズ, 裳華房, 1991.
- 3) 例えば, D. J. ハナント著, 榎谷栄次訳: 繊維コンクリート, 森北出版, pp.9-36, 1980.
- 4) V.C. Li and C.K. Leung, Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites, J. Engineering Mechanics, ASCE, Vol.118, No.11, pp.2246-2264, 1992.
- 5) 福島敏夫, 白山和久: 短繊維補強コンクリートの力学的特性の評価, セメント・コンクリート論文集, No.44, pp.570-575, 1990.
- 6) RILEM: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HFPRCC2), Proceedings of Second International RILEM Workshop, edited by A. E. Naaman and H. W. Reinhardt, pp.181-182, 1996.
- 7) 中村裕, 三橋博三: 繊維補強モルタルの曲げ挙動と圧縮挙動に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.1, No.21, pp.253-258, 1999.
- 8) 河口至商: 多変量解析入門II, 数学ライブラリー32, 森北出版, pp.3-33, 1973.
- 9) 大岸佐吉, 小野博宣, 伊藤定文: 新素材繊維補強モルタルの弾塑性破壊靱性 (J_{IC} , G_f) の研究, コンクリート工学論文集, Vol.26, No.9, pp.11-25, 1988.
- 10) V. C. Li, Y. Wang and S. Backer: A Micromechanical Model of Tension-Softening and Bridging Toughening of Short Random Fiber Reinforced Brittle Matrix Composites, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 39, No.5, pp.607-625, 1991.

(2000年5月8日原稿受理, 2000年10月31日採用決定)