

論文

[1133] 短炭素繊維で補強したモルタルの曲げ特性

正会員○奥石直幸（早稲田大学大学院）

三谷一房（早稲田大学大学院）

正会員 田村 恭（早稲田大学建築学科）

1. 緒言

炭素繊維補強モルタル（以下CFRMという）においては、短炭素繊維（以下CFという）をマトリックス中に均一分散させることや、CF-マトリックス界面の付着性を高めることが困難であるとされている。この点については、シリカフェーム等の微粒子混和材や高性能減水剤等の使用が効果的であることが報告されている[1]～[4]。しかしながら、CF-マトリックス界面の性質が、CFの補強効果やCFRMの破壊性状に及ぼす影響については必ずしも明かでない。

本研究はこの点に着目し、普通ポルトランドセメントの他にシリカフェームと低収縮セメントを用いた3種類のマトリックスに対して、汎用及び高性能タイプのCFをそれぞれ混入したCFRMを作製し、各種の実験を行った。その結果、CFの種類によってマトリックスの性質がCFの補強効果やCFRMの破壊性状に及ぼす影響に顕著な差異が認められたので報告する。

2. 研究の目的及び項目

2.1 目的

本研究は、結合材として普通ポルトランドセメントの他にCFによる補強効果の向上に有効なシリカフェームや低収縮セメントを用いてCFRMを作成し、マトリックスの性質がフレッシュな状態及び硬化したCFRMの性質に及ぼす影響を確かめるとともに、汎用及び高性能タイプのCFを用いたCFRMにおける補強効果及び破壊性状を究明することを目的とする。

2.2 項目

繊維混入率、結合材及びCFの種類が異なるCFRMについて各種の実験を試み、フレッシュな状態及び硬化後の性質に関する実験結果から、以下に示す項目について考察する。

- 1) 繊維混入率がCFRMの性質に及ぼす影響
- 2) 結合材の種類がCFRMの性質に及ぼす影響
- 3) CFの種類がCFRMの性質に及ぼす影響

3. 実験の概要

3.1 使用材料及び調合

A. 使用材料：結合材は、普通ポルトランドセメント(PC)、低収縮セメント(EC)及びPCの一部をシリカフェーム(Sf)で置換した混合セメントの3種類とした。セメント及びシリカフェームの性質を表-1及び2に示す。

表-1 セメントの性質 (T社製)

| セメントの種類 | 比重   | 比表面積 (cm <sup>2</sup> /g) | 凝 結    |           |           | 安定性 | 圧 縮 強 さ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |     |     |
|---------|------|---------------------------|--------|-----------|-----------|-----|--------------------------------|-----|-----|
|         |      |                           | 水量 (%) | 始 結 (h-m) | 終 結 (h-m) |     | 3日                             | 7日  | 28日 |
| PC      | 3.15 | 3300                      | 29.3   | 2-18      | 4-28      | 良   | 173                            | 313 | 377 |
| EC      | 2.97 | 4700                      | 27.8   | 0-49      | 2-08      | 良   | 120                            | 201 | 280 |

[注] PC：普通ポルトランドセメント、EC：低収縮セメント

細骨材は豊浦産の標準砂を使用し、このモルタルに、汎用(GP)石油ピッチ系CFと、高性能(HP)石炭ピッチ系CFをそれぞれ混入して、CFRMを作製した。CFの性質を表-3に示す。なお、混和剤として、アルキルアリルスルホン酸塩系の高性能減水剤で、空気連行性のない標準型のものを使用した。

**B. 調 合:** CFRMの調合を表-4に示す。砂結合材比は、すべて0.5とした。シリカフェームの置換率はセメントの内割重量で20%とした。水結合材比はすべて0.32とし、2%の繊維を混入したCFRMのフロー値が140程度となるように高性能減水剤の添加率で調整した。

結合材が異なる3種類のモルタルマトリックスに対して、表-4に示す所定量の繊維を混入した。同様の実験を2種類のCF(GP・HP)で行った。

### 3.2 供試体の作製方法

**A. 練りませ:** CFRMの練りませは、実験用のモルタルミキサで行った。練りませの手順は、まず、高性能減水剤を添加した水と結合材を混練してスラリー状のペーストを作った。次に、ミキサを回転させながらCFを投入し、最後に細骨材を入れて練りませた。ミキサによる練りませ時間は7分である。

**B. 成形及び養生:** 供試体の成形はJIS R 5201に準拠したが、型枠内への充填性を確保し、CFの配向をできる限り乱さないようにするため、部分的に修正して行った。

供試体は、4.0×4.0×16.0cmの柱状供試体と、1.2×4.0×16.0cmの板状供試体の2種類を作製した。いずれの供試体も成形後約20時間で脱型し、材令28日まで20℃の水中で養生した。

### 3.3 測定項目及び試験方法

**A. フレッシュな状態の性質:** 練りませ終了後、直ちに、フロー値と単位容積重量をそれぞれJIS R 5201とJIS A 1116に準じて測定し、単位容積重量から空気量を算出した。また、CFの分散性を握り試験により3段階(A:良く分散している、B:毛玉はないがシコリ感がある、C:毛玉がある)で評価した。

**B. 硬化後の性質:** 柱状供試体では、動弾性係数、及び曲げ強度・圧縮強度をそれぞれJIS A 1127、及びJIS R 5201に準じて測定した(供試体数3本)。

板状供試体では、スパン12.0cmで3等分点載荷の曲げ試験を行った。なお、載荷速度は0.15mm/minとし、変位はモルタル曲げ試験用治具の加圧盤の変位をダイヤルゲージで測定した。載荷点変位0.01mmごとに荷重を記録し、曲げ応力と載荷点変位の関係を求めた(供試体数6本)。

強度試験を行ったすべての供試体について、比重・吸水率及び気孔率を求めた。

表-2 シリカフェームの性質 (E社カタログによる)

| 比重   | 比表面積 (BET法) (cm <sup>2</sup> /g) | 化 学 成 分 (%)      |                                |                                |       |       |
|------|----------------------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|
|      |                                  | SiO <sub>2</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | C     | LOI   |
| 2.22 | 20×10 <sup>4</sup>               | 90~96            | 0.8以下                          | 3.0以下                          | 1.4以下 | 3.0以下 |

表-3 炭素繊維の性質 (K社及びM社カタログによる)

| CFの種類 | 比重   | 直径 (μm) | 長さ (mm) | 引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 伸度 (%) |
|-------|------|---------|---------|-----------------------------|-----------------------------|--------|
| GP    | 1.65 | 18.0    | 6.0     | 6.0×10 <sup>3</sup>         | 3.1×10 <sup>5</sup>         | 2.0    |
| HP    | 1.90 | 17.0    | 6.0     | 1.6×10 <sup>4</sup>         | 1.8×10 <sup>6</sup>         | —      |

[注] GP:汎用タイプのCF、HP:高性能タイプのCF

表-4 CFRMの調合

| 1) 記号 | 砂結合材比 <sup>2)</sup> | 2) 置換率 (%) | 水結合材比 <sup>2)</sup> | 減水剤添加率 <sup>2)</sup> (%) | 3) 繊維混入率 (%) | 備考 (結合材の種類)   |
|-------|---------------------|------------|---------------------|--------------------------|--------------|---------------|
| P     | 0.50                | 0          | 0.32                | 1.20                     | 0, 1, 2      | PC            |
| E     |                     |            |                     | 0.80                     | 0, 1, 2, 3   | EC            |
| S     |                     |            |                     | 20.0                     | 1.60         | 0, 1, 2, 3, 4 |

[注] 1) CFRMの調合の区分を示す記号P、E、Sは、備考欄に示す結合材の種類に対応して定めた。

2) 結合材の重量に対する割合で示す。

3) 練り上がり全体積に対する割合で示す。

#### 4. 実験結果及び考察

##### 4.1 実験結果

A. フレッシュな状態の性質：フレッシュな状態の性質及び柱状供試体の性質に関する実験結果を表-5に示す。繊維混入率の増加に伴いフロー値及びCFの分散性は低下するが、低下の度合いは、結合材の種類によって異なり、 $P > E > S$ の関係にあった。また、水結合材比が等しい場合でも、結合材の種類によって単位容積重量の値は異なり、結合材の比重による影響が認められた。繊維混入率の増加に伴う単位容積重量の変化はごくわずかであるが、空気量に換算すると3%の変化に相当することもあった。

B. 物理的性質：比重に及ぼす影響は、フレッシュな状態における単位容積重量の場合と同様であった。吸水率及び気孔率についても同様であるが、結合材としてECを用いた場合には、エトリンガイト（あるいはモノサルフェート）の脱水による影響が認められた。

C. 力学的性質：繊維混入率の増加に伴い曲げ強度は増加した。このときの増加傾向は、結合材としてSf混合セメントを用いた場合に顕著であった。

圧縮強度と動弾性係数は概ね一致する傾向を示した。GPCFを用いた場合には、繊維混入率の増加に伴い圧縮強度は若干減少する傾向にあったが、HPCFを用いた場合には、逆にわずかながら圧縮強度に対するCFの補強効果が認められた。

表-5 フレッシュな状態の性質及び柱状供試体の性質に関する実験結果

| 記号   | フレッシュな状態の性質 |       |                             |         | 物理的性質 |         |         | 力学的性質                                     |   |                                     |
|------|-------------|-------|-----------------------------|---------|-------|---------|---------|---|---|-------------------------------------|
|      | フロー値        | CF分散性 | 単位容積重量 (g/cm <sup>3</sup> ) | 空気量 (%) | 比重    | 吸水率 (%) | 気孔率 (%) | 曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )<br>平均値 (変動係数) | 圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )<br>平均値 (変動係数) | 動弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )<br>平均値 |
| P-0  | 291         | —     | 2.20                        | 2.27    | 2.05  | 11.0    | 22.5    | 84.8 (0.00)                               | 807 (0.07)                                | 7.05×10 <sup>4</sup>                |
| E-0  | 269         | —     | 2.12                        | 3.23    | 1.85  | 18.0    | 33.4    | 65.5 (0.17)                               | 622 (0.07)                                | 5.52×10 <sup>4</sup>                |
| S-0  | 173         | —     | 2.14                        | 2.20    | 1.96  | 12.1    | 23.7    | 103.4 (0.06)                              | 953 (0.04)                                | 6.76×10 <sup>4</sup>                |
| P-G1 | 197         | B     | 2.16                        | 3.76    | 1.98  | 11.0    | 21.7    | 105.4 (0.02)                              | 790 (0.04)                                | 5.53×10 <sup>4</sup>                |
| P-G2 | 137         | C     | 2.17                        | 2.80    | 1.96  | 10.8    | 21.2    | 128.6 (0.02)                              | 752 (0.02)                                | 5.45×10 <sup>4</sup>                |
| E-G1 | 189         | B     | 2.10                        | 3.78    | 1.82  | 18.1    | 33.0    | 91.6 (0.02)                               | 643 (0.02)                                | 5.17×10 <sup>4</sup>                |
| E-G2 | 145         | C     | 2.10                        | 3.73    | 1.80  | 18.6    | 33.3    | 130.6 (0.05)                              | 624 (0.03)                                | 6.63×10 <sup>4</sup>                |
| E-G3 | 122         | C     | 2.06                        | 5.20    | 1.78  | 18.3    | 32.7    | 111.5 (0.07)                              | 653 (0.02)                                | 6.50×10 <sup>4</sup>                |
| S-G1 | 154         | A     | 2.09                        | 4.13    | 1.90  | 12.0    | 22.8    | 126.1 (0.02)                              | 994 (0.05)                                | 6.34×10 <sup>4</sup>                |
| S-G2 | 142         | A     | 2.06                        | 5.23    | 1.86  | 11.8    | 22.0    | 188.0 (0.04)                              | 900 (0.03)                                | 6.01×10 <sup>4</sup>                |
| S-G3 | 128         | B     | 2.05                        | 5.34    | 1.84  | 11.8    | 21.8    | 232.9 (0.04)                              | 857 (0.03)                                | 6.04×10 <sup>4</sup>                |
| S-G4 | 117         | B     | 2.04                        | 5.55    | 1.85  | 11.5    | 21.2    | 223.9 (0.03)                              | 909 (0.03)                                | 6.16×10 <sup>4</sup>                |
| P-H1 | 209         | B     | 2.17                        | 3.26    | 2.03  | 10.8    | 22.0    | 141.9 (0.04)                              | 888 (0.00)                                | 6.91×10 <sup>4</sup>                |
| P-H2 | 155         | C     | 2.19                        | 2.34    | 2.02  | 10.8    | 21.9    | 138.2 (0.03)                              | 917 (0.00)                                | 6.89×10 <sup>4</sup>                |
| E-H1 | 205         | A     | 2.09                        | 4.32    | 1.84  | 17.7    | 32.6    | 108.6 (0.03)                              | 749 (0.03)                                | 5.82×10 <sup>4</sup>                |
| E-H2 | 159         | B     | 2.10                        | 4.02    | 1.85  | 17.6    | 32.5    | 123.5 (0.06)                              | 759 (0.03)                                | 5.57×10 <sup>4</sup>                |
| E-H3 | 139         | C     | 2.11                        | 3.07    | 1.85  | 17.2    | 31.8    | 131.3 (0.03)                              | 872 (0.01)                                | 6.11×10 <sup>4</sup>                |
| S-H1 | 157         | A     | 2.09                        | 4.19    | 1.93  | 11.9    | 23.0    | 147.2 (0.05)                              | 1039 (0.07)                               | 6.48×10 <sup>4</sup>                |
| S-H2 | 147         | A     | 2.08                        | 4.39    | 1.94  | 11.0    | 21.3    | 186.4 (0.07)                              | 979 (0.06)                                | 6.53×10 <sup>4</sup>                |
| S-H3 | 134         | A     | 2.10                        | 3.65    | 1.94  | 10.9    | 21.1    | 228.5 (0.04)                              | 1052 (0.01)                               | 6.46×10 <sup>4</sup>                |
| S-H4 | 124         | B     | 2.09                        | 3.66    | 1.94  | 10.9    | 21.1    | 228.6 (0.13)                              | 1059 (0.02)                               | 6.51×10 <sup>4</sup>                |

[注] 記号のハイフン以下は、CFの種類と繊維混入率を示す。(G:汎用タイプ、H:高性能タイプ)

##### 4.2 板状供試体の曲げ特性に関する実験結果

###### A. 曲げ-たわみ曲線の性状

1) GPCFを用いた場合：板状供試体の曲げ特性に関する実験結果を表-6に示す。2%のGPCFを混入したCFRMの代表的な曲げ応力と載荷点変位の関係を図-1に示す。1%のCFを混入したCFRMの曲げ応力-載荷点変位曲線は、結合材の種類によらず、弾性域を示す第1直線と、亀裂が発生して剛性が低下した第2直線で近似することができる。さらに、繊維混入率が増加すると第2直線部分の傾きと長さが増加する傾向にあった。結合材の種類による影響に

については、 $P < E < S$ の順に第2直線部分が長くなる傾向にあった。

2) **HPCF**を用いた場合：2%のHPCFを混入したCFRMの代表的な曲げ応力と荷重点変位の関係を図-2に示す。1%のHPCFを混入したCFRMの曲げ応力-荷重点変位曲線は、結

表-6 板状供試体の曲げ特性に関する実験結果

| 記号   | 静弾性係数<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 初亀裂強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 曲げ強度<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | タフネス<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ×cm) | タフネス値                 |
|------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-----------------------|
|      | 平均値(変動係数)                       | 平均値(変動係数)                       | 平均値(変動係数)                      | 平均値(変動係数)                         | 平均値                   |
| P-0  | 8.89×10 <sup>4</sup> (0.20)     | 54.5 (0.12)                     | 54.5 (0.12)                    | 4.80×10 <sup>-1</sup> (0.10)      | 1.00×10 <sup>0</sup>  |
| E-0  | 1.05×10 <sup>5</sup> (0.10)     | 68.3 (0.01)                     | 68.2 (0.01)                    | 3.95×10 <sup>-1</sup> (0.09)      | 8.23×10 <sup>-1</sup> |
| S-0  | 9.15×10 <sup>4</sup> (0.04)     | 48.0 (0.14)                     | 48.0 (0.14)                    | 3.21×10 <sup>-1</sup> (0.27)      | 6.69×10 <sup>-1</sup> |
| P-G1 | 1.12×10 <sup>5</sup> (0.07)     | 84.4 (0.02)                     | 104.3 (0.03)                   | 2.44×10 <sup>0</sup> (0.26)       | 5.08×10 <sup>0</sup>  |
| P-G2 | 1.07×10 <sup>5</sup> (0.01)     | 91.9 (0.06)                     | 124.2 (0.06)                   | 3.04×10 <sup>0</sup> (0.05)       | 6.33×10 <sup>0</sup>  |
| E-G1 | 1.24×10 <sup>5</sup> (0.08)     | 91.2 (0.11)                     | 108.8 (0.04)                   | 2.34×10 <sup>0</sup> (0.35)       | 4.88×10 <sup>0</sup>  |
| E-G2 | 1.17×10 <sup>5</sup> (0.07)     | 85.8 (0.10)                     | 149.2 (0.12)                   | 6.26×10 <sup>0</sup> (0.25)       | 1.30×10 <sup>1</sup>  |
| E-G3 | 1.18×10 <sup>5</sup> (0.14)     | 82.4 (0.04)                     | 134.4 (0.06)                   | 4.74×10 <sup>0</sup> (0.09)       | 9.88×10 <sup>0</sup>  |
| S-G1 | 1.10×10 <sup>5</sup> (0.11)     | 72.8 (0.12)                     | 111.6 (0.05)                   | 4.20×10 <sup>0</sup> (0.12)       | 8.75×10 <sup>0</sup>  |
| S-G2 | 1.09×10 <sup>5</sup> (0.06)     | 80.1 (0.06)                     | 193.7 (0.04)                   | 1.89×10 <sup>1</sup> (0.17)       | 3.94×10 <sup>1</sup>  |
| S-G3 | 1.20×10 <sup>5</sup> (0.10)     | 93.6 (0.08)                     | 220.8 (0.10)                   | 2.48×10 <sup>1</sup> (0.34)       | 5.17×10 <sup>1</sup>  |
| S-G4 | 1.17×10 <sup>5</sup> (0.05)     | 107.1 (0.08)                    | 233.2 (0.07)                   | 1.99×10 <sup>1</sup> (0.24)       | 4.15×10 <sup>1</sup>  |
| P-H1 | 1.18×10 <sup>5</sup> (0.10)     | 103.7 (0.07)                    | 133.3 (0.08)                   | 2.58×10 <sup>0</sup> (0.26)       | 5.38×10 <sup>0</sup>  |
| P-H2 | 9.74×10 <sup>4</sup> (0.06)     | 84.9 (0.20)                     | 109.4 (0.13)                   | 1.70×10 <sup>0</sup> (0.22)       | 3.54×10 <sup>0</sup>  |
| E-H1 | 1.39×10 <sup>5</sup> (0.04)     | 129.6 (0.11)                    | 158.2 (0.10)                   | 2.09×10 <sup>0</sup> (0.10)       | 4.35×10 <sup>0</sup>  |
| E-H2 | 1.35×10 <sup>5</sup> (0.08)     | 121.5 (0.10)                    | 157.2 (0.16)                   | 2.71×10 <sup>0</sup> (0.38)       | 5.65×10 <sup>0</sup>  |
| E-H3 | 1.30×10 <sup>5</sup> (0.03)     | 117.6 (0.04)                    | 148.3 (0.11)                   | 1.91×10 <sup>0</sup> (0.25)       | 3.98×10 <sup>0</sup>  |
| S-H1 | 1.14×10 <sup>5</sup> (0.04)     | 92.0 (0.11)                     | 111.2 (0.04)                   | 1.61×10 <sup>0</sup> (0.08)       | 3.35×10 <sup>0</sup>  |
| S-H2 | 1.29×10 <sup>5</sup> (0.05)     | 118.8 (0.06)                    | 147.6 (0.06)                   | 2.40×10 <sup>0</sup> (0.11)       | 5.00×10 <sup>0</sup>  |
| S-H3 | 1.19×10 <sup>5</sup> (0.02)     | 155.1 (0.02)                    | 210.0 (0.02)                   | 4.95×10 <sup>0</sup> (0.34)       | 1.03×10 <sup>1</sup>  |
| S-H4 | 1.22×10 <sup>5</sup> (0.04)     | 125.7 (0.12)                    | 183.7 (0.12)                   | 3.22×10 <sup>0</sup> (0.21)       | 6.70×10 <sup>0</sup>  |

[注] 記号のハイフン以下は、CFの種類と繊維混入率を示す。(G:汎用タイプ、H:高性能タイプ)

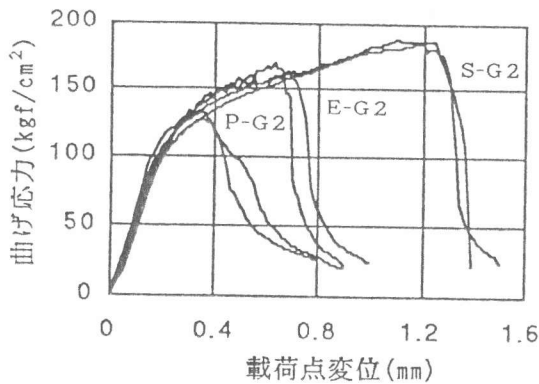


図-1 曲げ応力-荷重点変位の関係 (GPCFを用いた場合)

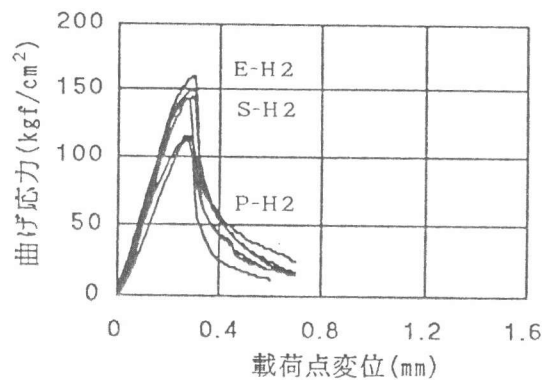


図-2 曲げ応力-荷重点変位の関係 (HPCFを用いた場合)

合材の種類によらず山形の安定破壊を示し、繊維混入率が増加してもGPCFの場合のような第2直線は現れなかった。

B. 静弾性係数：板状供試体について、3等分点荷重の曲げ試験を行い、荷重と荷重点変位の関係から静弾性係数を求めた[5]。繊維混入率と静弾性係数の関係を図-3に示す。繊維混入率の増加に伴いCFRMの静弾性係数は増加するが、繊維量が過剰になると逆に減少する傾向にあった。繊維混入率の増加に伴う静弾性係数の増加量は、GPCFよりHPCFの場合に大きかった。

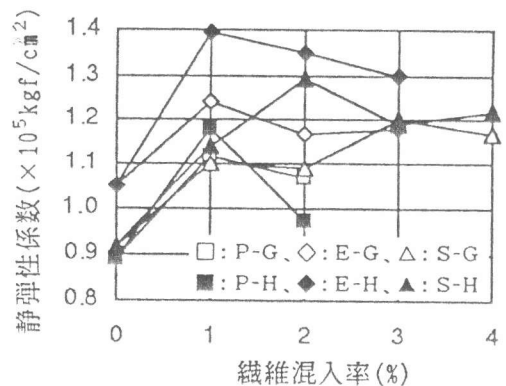


図-3 繊維混入率と静弾性係数の関係

C. 初亀裂強度：繊維混入率と初亀裂強度の関係を図-4に示す。初亀裂強度は、荷重と変位の関係が最初に直線から逸脱したときの曲げ応力として求めた。繊維混入率の増加に伴い初亀裂強度は直線的に増加するが、繊維量が過剰になると逆に減少する傾向にあった。結合材としてS

f 混合セメントを用いた場合は、初亀裂強度が減少しはじめるときの繊維混入率が最も大きくなっていることがわかる。

**D. 曲げ強度：**繊維混入率と曲げ強度の関係を図-5に示す。HPCFを用いたCFRMの曲げ強度は、初亀裂強度の場合と良く一致する傾向を示した。一方、GPCFを用いた場合には、初亀裂強度よりも曲げ強度に対する補強効果が顕著であり、繊維混入率の増加に伴い曲げ強度は著しく増加した。曲げ強度に対するCFの補強効果は、結合材の種類により $P < E < S$ の関係にあった。

**E. 靱性：**繊維混入率とタフネス値の関係を図-6に示す。本報では、最大荷重までの曲げ応力-載荷点変位曲線下の面積をタフネス、結合材としてPCを用いた繊維無混入モルタルのタフネスで各CFRMのタフネスを割った値をタフネス値とそれぞれ定義した。繊維混入率の増加に伴いCFRMのタフネス値は著しく増加した。このときの増加量はHPCFよりGPCFを用いたCFRMのほうが大きかった。HPCFを用いたCFRMでは結合材の種類がタフネス値に及ぼす影響はほとんど認められなかったのに対して、GPCFを用いたCFRMでは、繊維混入率の増加に伴うタフネス値の増加量は $P < E < S$ の関係にあり、低収縮セメントやシリカフェームの使用がCFRMの靱性の向上に有効であることがわかる。

#### 4.3 繊維混入率の影響

**A. 弾性域における性質：**弾性域におけるCFの補強効果については複合則を適用するのが一般的であり、本実験でも繊維混入率と静弾性係数及

び初亀裂強度の関係において、複合則と概ね一致する結果が得られた。しかし、繊維混入率が大きくなると複合則から求められる値を下回る傾向が顕著になった。これは、CF分散性の低下、及び連行空気量の増加によるマトリックス強度の低下が影響したものと考えられる(表-5参照)。

**B. 亀裂発生後の性質：**HPCFを用いたCFRMでは、亀裂発生後の性質に及ぼす繊維混入率の影響は、弾性域における性質の場合と同様であった。一方、GPCFを用いたCFRMでは、繊維混入率の増加に伴う補強効果の低下は、弾性域における性質の場合ほど顕著でなく、CFの引抜け挙動によって、CF分散性の低下や空気量の増加の影響が緩和されたものと考えられる。

#### 4.4 結合材の種類による影響

**A. 弾性域における性質：**Sfを混合したCFRMでは、繊維混入率の増加に伴う補強効果の低下が緩やかであり、SfがCF分散性の向上に有効であるといえる。ECを用いたCFRMで

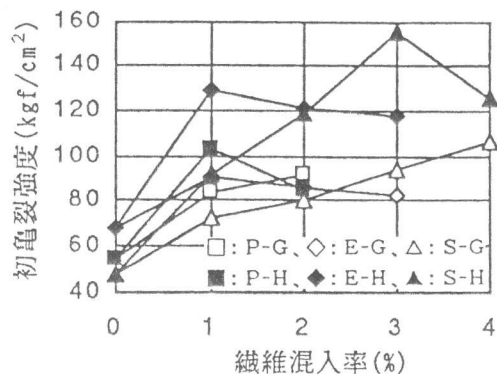


図-4 繊維混入率と初亀裂強度の関係

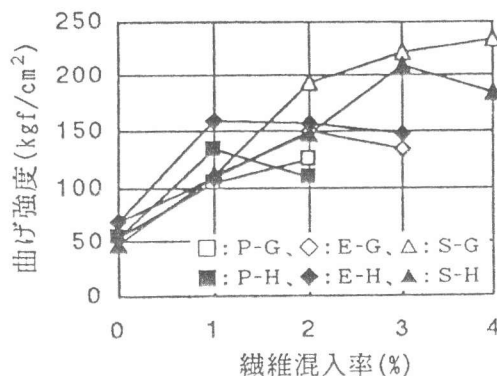


図-5 繊維混入率と曲げ強度の関係

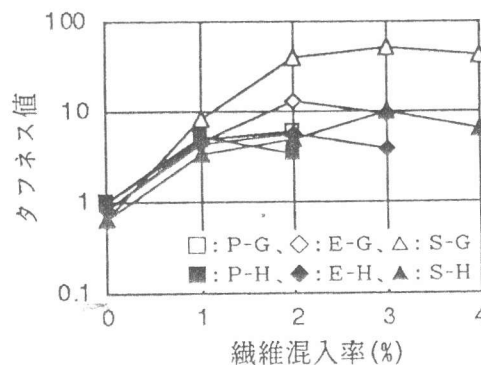


図-6 繊維混入率とタフネス値の関係

は、他の結合材の場合に比べて静弾性係数及び初亀裂強度が大きかった。これは収縮低減効果のある膨張性水和物の生成によるものと考えられる。

**B. 亀裂発生後の性質：**G P C Fを用いたC F R Mでは、結合材の種類が亀裂発生後の性質に及ぼす影響が顕著であった。亀裂発生後の塑性的挙動はC Fの引き抜けによるものであり、E CやS f混合セメントの使用がC Fの引き抜け抵抗力の向上に有効であるといえる。

#### 4.5 C Fの種類による影響

**A. 弾性域における性質：**繊維混入率の増加に伴う静弾性係数及び初亀裂強度の増加量はG PよりもH PのC Fを用いた場合に大きかった。これはH P C Fの弾性係数及び引張強度がG P C Fより大きいためといえる。

**B. 亀裂発生後の性質：**G P C Fを用いた場合について結合材の種類が異なるC F R Mを比較すると、初亀裂強度が小さいほど曲げ強度は大きくなる傾向にあった。弾性域においてはC Fとマトリックスは完全に付着して挙動するが、亀裂発生後は付着破壊が生じてC Fが徐々に引き抜けるというように、弾性域におけるC Fの補強機構と塑性的挙動の原因となるC Fの引き抜け機構では、これに影響を及ぼす因子が異なっているためにこのような傾向が現れたと考えることができる。一方、H P C Fを用いたC F R MではC Fの引き抜けによる塑性的挙動があまり明確でなかった。これはC Fとマトリックスの弾性係数の差が大きいためC F-マトリックス界面に生ずるせん断応力が大きく付着破壊が生じやすくなること、さらに高強度・高弾性C Fは横方向のせん断力に対して脆弱であるため亀裂面に対して角度を持ったC Fは破断しやすいこと、が影響したものと考えられる。

## 5. 結 言

本実験の結果を要約すると以下の如くである。

- (1) S f混合セメント及びE Cを使用したC F R Mでは、繊維混入率の増加に伴うC F分散性の低下が緩やかであるため、その結果としてC F R Mの曲げ特性は著しく増加した。
- (2) G P C Fを用いたC F R Mでは、S f混合セメント及びE Cの使用がC F-マトリックス界面の付着性の向上に有効であり、特に亀裂発生後の性質（曲げ強度・靱性）が著しく向上した。
- (3) H P C Fは用いたC F R Mでは、C Fの弾性係数及び引張強度が大きいため、弾性域における性質（静弾性係数・初亀裂強度）に対するC Fの補強効果が顕著であった。一方、G P C Fを用いたC F R Mでは、弾性域における性質よりも亀裂発生後の性質に対する補強効果が高かった。

## 参考文献

- [1] 大浜嘉彦・遠藤光弘：炭素繊維補強セメントの力学的性質、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 31~32、1985. 10
- [2] 瀬口健夫・上床 実ほか：炭素繊維補強シリカフェーム混合モルタルの基礎的研究（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 43~44、45~46、1987. 10
- [3] 辻 幸和・大谷杉郎・古川 茂：各種混和材料を用いた炭素繊維補強セメントの製造、セメント技術年報、Vol. 40、pp. 475~478、1986
- [4] 小泉 徹・榎場重正・高桑信一：シリカフェームを用いた炭素繊維補強モルタルの特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 11、No. 1、PP. 795~800、1989
- [5] 西田俊彦・安田榮一：セラミックスの力学的特性評価、日刊工業新聞、pp. 8、1986