

高分子量ポリエチレン繊維を用いた繊維補強コンクリートの 靱性確保を目的とした調合とその基礎物性に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON MIX PROPORTION FOR HIGH TOUGHNESS OF FIBER-REINFORCED CONCRETE WITH HIGH MOLECULAR WEIGHT POLYETHYLENE FIBER AND ITS BASIC CHARACTERISTICS

山口 信*, 村上 聖**, 武田浩二***, 三井宜之****

Makoto YAMAGUCHI, Kiyoshi MURAKAMI, Koji TAKEDA

and Yoshiyuki MITSUI

This study aimed at developing polyethylene fiber-reinforced concrete (PEFRC) with high flexural toughness and sufficient slump for precast concrete. Experimental investigations were conducted regarding influences of mix proportion of matrix, fiber volume fraction, and shape of short fiber on slump and various mechanical characteristics of the PEFRC. As a result, PEFRC with more than 40 kN·mm in flexural toughness and 10 cm in slump could be derived, due to applying high-fluidity matrix and loosely bundled short fiber to the PEFRC. Moreover, it was shown that the PEFRC possessed generally good mechanical characteristics and durability as compared with steel fiber-reinforced concrete and plain concrete, respectively.

Keywords : Polyethylene fiber-reinforced concrete, Mix proportion, Flexural toughness, Mechanical characteristics, Slump, Basic characteristics

ポリエチレン繊維補強コンクリート, 調合, 曲げタフネス, 力学的特性, スランプ, 基礎物性

1. はじめに

紡糸技術の発展に支えられ, 従来の合成繊維が有する軽量性・耐食性といった特性に加えて, 引張強度等の力学的性能を大きく向上させた新素材合成繊維の開発が盛んに進められており, そのコンクリート補強用繊維としての有効利用と, それに伴う鉄筋コンクリート構造物の性能向上が期待されている¹⁾。

コンクリートに短繊維を混入する主な目的は, コンクリートの脆性的性質を材料レベルで改善し, 靱性(エネルギー吸収能力)を付与することにある²⁾。一般に, 繊維補強コンクリートの靱性向上のためには, 繊維のアスペクト比を大きくし, 尚且つ高い繊維体積率を確保することが要求されるが³⁾, これらの因子は繊維分散性や繊維補強コンクリートのスランプの低下を助長する。一方, 合成繊維をコンクリート補強用繊維として適用する際の問題点として, 一部の合成繊維を除きその表面が平滑であるために, 繊維-マトリックス間の付着力の確保が必ずしも容易でないことが挙げられる²⁾。即ち, 新素材繊維の力学的性能を十分に活かし, 繊維補強コンクリートに高い靱性を付与するためには, 高い繊維体積率の確保および初期ひび割れ発生後の架橋繊維の早期引き抜け抑制のためのマトリックス調合および繊維の幾何学形状の工夫が要点となるものと考えられる。

そこで, 本報では, 新素材繊維の中でも強度と伸度(破断伸び: 5%)のバランスの良さからエネルギー吸収性に優れ, 補強・プロテ

クト素材としての用途が期待されている高分子量ポリエチレン繊維(以下, PE繊維)⁴⁾を用い, 高流動コンクリートの使用材料に準じたマトリックスの調合と繊維の集束状態を工夫することにより, 高い靱性とプレキャストコンクリートへの適用を考える上で十分なスランプを有するポリエチレン繊維補強コンクリート(以下, PEFRC)の開発を行ってきた一連の実験シリーズについて報告する。また, 得られたPEFRCに関して, 鋼繊維補強コンクリート(以下, SFRC)⁵⁾との比較による各種力学的特性の評価ならびに主にプレーンコンクリートとの比較による耐久性等に関わる基礎物性の評価を行った。

なお, 本材料は爆破テロや爆発事故に起因する爆発荷重を受ける耐爆構造部材への適用を想定しているために, 爆薬の爆轟による衝撃波エネルギーの作用に対する抵抗性の確保が要求される。一方, 曲げタフネス(変位がスパン長の1/150に至るまでの曲げ荷重-載荷点変位曲線下の面積)⁶⁾は, 繊維補強コンクリートの静的エネルギー吸収能力を表示する材料パラメータであるが, 著者らは既にPEFRCの接触爆発に対する耐爆性能に関して実験的検討を行い, PEFRCの曲げタフネス増加に伴いPEFRC版の裏面剥離損傷が低減されることや, 版厚, 爆薬量および曲げタフネスをパラメータとした損傷予測式により接触爆発を受けるPEFRC版の損傷深さを予測可能であること等を明らかにしている⁶⁾。このことに準拠し, 本研究では曲げタフネスを靱性評価指標として材料開発を進めている。

* 熊本大学大学院自然科学研究科 博士後期課程・工修
** 熊本大学大学院自然科学研究科 教授・工博
*** 熊本大学大学院自然科学研究科 助教・工博
**** 熊本大学 名誉教授・工博

Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., M. Eng.
Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Assistant Prof., Graduate School of Science and Technology, Kumamoto Univ., Dr. Eng.
Prof. Emeritus, Kumamoto Univ., Dr. Eng.

2. PEFRC の靱性確保を目的とした調合の検討

本材料開発の一連の流れをまとめると、以下のようになる。

- ① 予備実験 吹付け SFRC 仕様マトリックスの適用性の検討
- ② 本実験 実験 1: マトリックスのベース調合の検討
 実験 2: 繊維体積率の検討
 実験 3: 繊維形状とマトリックス調合の組合せの検討
 実験 4: 最適調合の選定

PEFRC の靱性の評価は 3 点曲げ載荷 (但し、予備実験に限り 3 等分点曲げ載荷) による曲げタフネスによることとし、その他基礎的な力学的特性試験として圧縮試験 (全実験で実施) や割裂引張試験 (実験 2~4 で実施) を試験項目に加えている。フレッシュ繊維補強コンクリートのコンシステンシーの評価方法として、スランブ 8cm を下回るフレッシュ繊維補強コンクリートに対しては振動台式コンシステンシーメーターを用いる方法等が一般的であるが²⁾、本研究ではスランブ試験を採用し、その目標値は、プレキャストコンクリートとしての用途を想定して 10cm 以上とした。

2.1 予備実験「吹付け SFRC 仕様マトリックスの適用性の検討」

繊維補強コンクリートの靱性確保に要求される高い繊維体積率を実現するためには、繊維の表面積効果による著しいスランブ低下を補償するだけのマトリックスの高流動性付与が重要になるものと考えられる。一方、繊維補強吹付けコンクリートは、ポンプ圧送の面から繊維補強コンクリートの中でも特に高流動性が要求されるため、同マトリックスの適用により PEFRC の高い繊維体積率を確保できる可能性が考えられた。そこで、最初に予備実験として、吹付け SFRC のマトリックス調合の PEFRC への適用性について検討を試みた。

(1) 実験方法

表 1 に使用材料、表 2 に使用調合をそれぞれ示す。補強用繊維として、PE 繊維 (原系カットタイプ) および比較用として鋼繊維 (両端フック付) を用いた。マトリックスの材料および調合は、吹付け SFRC の材料および調合 (呼び強度: 36, スランブ 18cm 以上) に準拠している。但し、PEFRC の繊維体積率は、目標とする

表 1 使用材料 ー予備実験ー

| | | |
|------|---|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント | |
| 骨材 | 川砂 表乾密度: 2.59g/cm ³ 吸水率: 2.68% 最大寸法: 2.5mm 粗粒率: 2.54 | 砕石 6号 表乾密度: 2.95g/cm ³ 吸水率: 1.27% 最大寸法: 15mm 実積率: 56.3% |
| 混和剤 | 高性能減水剤 粉末消泡剤 | |
| 短繊維 | PE 繊維 (原系カットタイプ) 密度: 0.97g/cm ³ , 径×長さ: 12μm×30mm, 引張強度: 2620N/mm ² , 引張弾性率: 79kN/mm ² 鋼繊維 (両端フック付き) 密度: 7.85g/cm ³ , 径×長さ: 0.6mm×30mm, 引張強度: 1079N/mm ² 以上 | |

表 2 使用調合 ー予備実験ー

| | V _f (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | Slump (cm) |
|-------|-----------------------|------------|------------|--------------------------|-----|------|-----|-----|-----|---------------|
| | | | | C | W | S | G | Sp' | Pa | |
| Plain | 0 | 44 | 70 | 500 | 220 | 1091 | 533 | 5.0 | 0 | 24.5 |
| PEFRC | 0.25 | 44 | 70 | 500 | 220 | 1091 | 533 | 5.0 | 0.1 | 11.0 |
| SFRC | 0.75 | 44 | 70 | 500 | 220 | 1091 | 533 | 5.0 | 0 | 25.0 |

* V_f: 繊維体積率, W/C: 水セメント比, s/a: 細骨材率, C: セメント, W: 水, S: 細骨材, G: 粗骨材, Sp': 高性能減水剤, Pa: 粉末消泡剤

10cm 以上のスランブが得られる範囲で、試し練りにより決定した。その結果、PEFRC の繊維体積率 V_f は 0.25% となった。

供試体条件として、圧縮試験には φ100×200mm 円柱供試体、3 等分点曲げ試験には 100×100×400mm (スパン長: 300mm) 角柱供試体を各 3 体作製し、標準養生材齢 28 日後試験に供した。

(2) 実験結果および考察

表 3 に強度試験結果、図 1 に曲げ荷重-スパン中央変位曲線 (平均値) をそれぞれ示す。なお、同表および図中には、繊維無混入のプレーンコンクリートに関する実験結果も併記している。

PEFRC に関して、プレーンコンクリートと比較した場合 PE 繊維混入による曲げタフネスの増加が認められるが、その値は SFRC の 1/3 程度となった。また、鋼繊維等の高弾性繊維を用いた繊維補強コンクリートと比較した場合の合成繊維補強コンクリートの特長は、繊維体積率が十分に大きければ、初期ひび割れ発生後の架橋繊維の伸長により延性を示すことにあると考えられるが²⁾、本調合による PEFRC にはそれが認められず、擬脆性的な挙動を呈していることが判る。即ち、吹付け SFRC 仕様のマトリックスに PE 繊維を混入しても、所要のスランブを得るためには繊維体積率が過小となるために、十分な繊維架橋効果が得られないものと判断される。

以上の結果より、PEFRC の靱性確保に要求される高い繊維体積率を実現するためには、一般に高流動性が要求される吹付け SFRC のマトリックスの準用では不適切であり、更に高流動性を有するマトリックス調合を検討する必要があると考えられる。

2.2 本実験

2.2.1 実験 1「マトリックスのベース調合の検討」

予備実験の結果を踏まえ、本項ではマトリックスの更なる高流動化を目的に、粉体系高流動コンクリートの使用材料 (微粉末系混和材と高性能 AE 減水剤) を適用したマトリックス調合の PEFRC への適用性について検討するとともに、以降の一連の実験に用いるマトリックスのベース調合の選定を行った。

(1) 実験方法

表 4 に使用材料を示す。補強用繊維として、予備実験でも使用した原系カットタイプの PE 繊維を用いた。マトリックスには、高流動性付与を目的に高炉スラグ微粉末と高性能 AE 減水剤を併用し、プレキャストコンクリートとしての用途を想定してセメントには早

表 3 強度試験結果 ー予備実験ー

| | 圧縮強度 (N/mm ²) | ヤング係数 (kN/mm ²) | 曲げ強度 (N/mm ²) | 曲げタフネス (kN・mm) |
|-------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-------------------|
| Plain | 50.6 | 27.3 | 6.30 | 0.540 |
| PEFRC | 49.5 | 25.0 | 5.91 | 9.57 |
| SFRC | 33.6 | 25.1 | 5.52 | 27.1 |

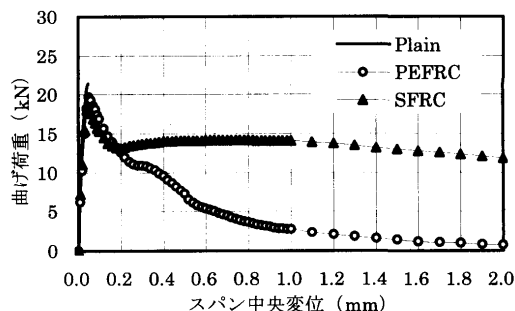


図 1 曲げ荷重-スパン中央変位曲線 (平均値) ー予備実験ー

強ポルトランドセメントを用いた。なお、粗骨材最大寸法は 15mm と通常のコンクリートに比してやや小さいが、これは、良好な繊維分散性を得るためには繊維長さの 50%程度が適切とする既往の研究知見²⁾に準拠したものである。

表 5 に使用調合を示す。マトリックスのベース調合の選定を目的に、繊維体積率 $V_f=1.0\%$ と、高流動コンクリートにおける標準値 (40~50%)⁷⁾ を参考に高炉スラグ微粉末混入率 $Sg/B=50\%$ 一定の下で、目標スランプ 10cm 以上を満足し、尚且つ曲げタフネスが最大となる細骨材率、単位結合材量および水結合材比の値をそれぞれ求めた。調合選定の手順は、以下に示す通りである。

- ① 細骨材率 s/a の選定：単位結合材量 $B=600\text{kg/m}^3$ および水結合材比 $W/B=40\%$ 一定とし、 $s/a=55, 60, 65\%$ の 3 水準で変化させた。
- ② 単位結合材量 B の選定：細骨材率 $s/a=65\%$ (①で選定した値) および水結合材比 $W/B=40\%$ 一定とし、 $B=550, 600, 650\text{kg/m}^3$ の 3 水準で変化させた。
- ③ 水結合材比 W/B の選定：細骨材率 $s/a=65\%$ (①で選定した値) および単位結合材量 $B=650\text{kg/m}^3$ (②で選定した値) 一定とし、 $W/B=33, 40, 50\%$ の 3 水準で変化させた。

高性能 AE 減水剤の添加量は混練時の状況に応じ、材料分離が生じない範囲で定めた。また、変化させた調合因子の範囲は、既報の SFRC⁴⁾ や炭素繊維補強コンクリート⁸⁾ の調合を参考に決定した。

混練は、容量 30L のオムニミキサーにより行った。混練手順としては、最初に結合材および骨材を 15 秒間空練り後、水および高性能 AE 減水剤を加えて 30 秒間混練し、最後に繊維を分割投入しながら 4 分間練り混ぜた。

供試体条件として、圧縮試験には $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体、3 点曲げ試験には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ (スパン長：300mm) 角柱供試体を各 3 体作製し、標準養生材齢 14 日後試験に供した。

(2) 実験結果および考察

図 2 に曲げ荷重-載荷点変位曲線 (平均値)、図 3 に細骨材率、単位結合材量および結合材水比がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響をそれぞれ示す。

本実験条件の中から、スランプ 10cm 以上を満足し、尚且つ曲げタフネスが最大となるマトリックスのベース調合として、細骨材率 $s/a=65\%$ 、単位結合材量 $B=650\text{kg/m}^3$ および水結合材比 $W/B=50\%$ を選定した。また、選定したベース調合において、繊維体積率 $V_f=1.0\%$ および高性能 AE 減水剤添加率 $Sp/B=1.0\%$ の条件下でスランプは 15cm 以上となり、先述の予備実験の場合と比較して顕著なスランプの向上が認められた。このことから、本ベース調合を適用することにより、より高い繊維体積率の確保による PEFR の更なる靱性向上を図れる可能性が示されたと言える。

ところで、選定したベース調合における細骨材率および単位結合材量は、標準的な高流動コンクリートの調合 (細骨材率 $s/a=50 \sim 52.5\%$ 、単位結合材量 $B=500 \sim 525\text{kg/m}^3$)⁷⁾ と比較してかなり大きくなっており、このことは、繊維の表面積効果によるスランプ低下を補償し、尚且つ適切な繊維分散性を確保するためには、通常の高流動コンクリートに比して結合材や細骨材の量を多くし、よりモルタルに近いマトリックス調合とする必要があることを示唆している。SFRC を対象とした既往の研究^{2, 9)}においても同様の見解が示されており、同報では、繊維補強コンクリートの調合設計においては繊

表 4 使用材料 - 実験 1, 2 -

| | | |
|------|--|--|
| セメント | 早強ポルトランドセメント | |
| 骨材 | 川砂 表乾密度：2.59g/cm ³ 吸水率：2.68% 最大寸法：2.5mm 粗粒率：2.54 | 砕石 6号 表乾密度：2.95g/cm ³ 吸水率：1.27% 最大寸法：15mm 実積率：56.3% |
| 混和材料 | 高炉スラグ微粉末 密度：2.89g/cm ³ 、比表面積：6140cm ² /g ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 | |
| 短繊維 | PE 繊維 (原糸カットタイプ) 密度：0.97g/cm ³ 、径×長さ：12 μm ×30mm、 引張強度：2620N/mm ² 、引張弾性率：79kN/mm ² | |

表 5 使用調合 - 実験 1 -

| 選定項目 | W/B (%) | s/a (%) | B (kg/m ³) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | Slump (cm) |
|------|---------|---------|------------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|------|------------|
| | | | | C | Sg | W | S | G | Sp | |
| s/a | 40 | 55 | 600 | 300 | 300 | 240 | 770 | 717 | 9.0 | 9.0 |
| | 40 | 60 | 600 | 300 | 300 | 240 | 840 | 638 | 9.0 | 13.0 |
| | 40 | 65 | 600 | 300 | 300 | 240 | 910 | 558 | 9.0 | 11.5 |
| B | 40 | 65 | 550 | 275 | 275 | 220 | 971 | 596 | 8.3 | 4.5 |
| | 40 | 65 | 600 | 300 | 300 | 240 | 910 | 558 | 9.0 | 11.5 |
| | 40 | 65 | 650 | 325 | 325 | 260 | 848 | 520 | 9.8 | 13.0 |
| W/B | 33 | 65 | 650 | 325 | 325 | 217 | 920 | 564 | 13.0 | 5.0 |
| | 40 | 65 | 650 | 325 | 325 | 260 | 848 | 520 | 9.8 | 10.5 |
| | 50 | 65 | 650 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 6.5 | 16.5 |

* W/B：水結合材比，B=(C+Sg)：結合材，Sg：高炉スラグ微粉末，Sp：高性能 AE 減水剤
* 繊維体積率 $V_f=1.0\%$ および高炉スラグ微粉末混入率 $Sg/B=50\%$ 一定
* 網掛けは、変化させた調合因子を示す。

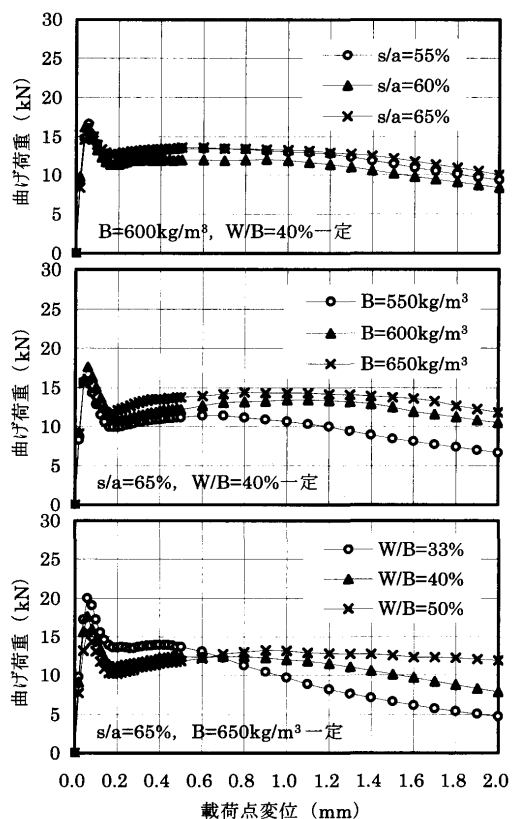


図 2 曲げ荷重-載荷点変位曲線 (平均値) - 実験 1 -

維分散性の確保が最も重要な因子であり、単位セメント量や単位水量の低減は 2 次的な因子として位置付けられている。

なお、結合材水比が PEFR の力学的特性に及ぼす影響は細骨材率や単位結合材量の場合に比して顕著であり、曲げタフネスは結合

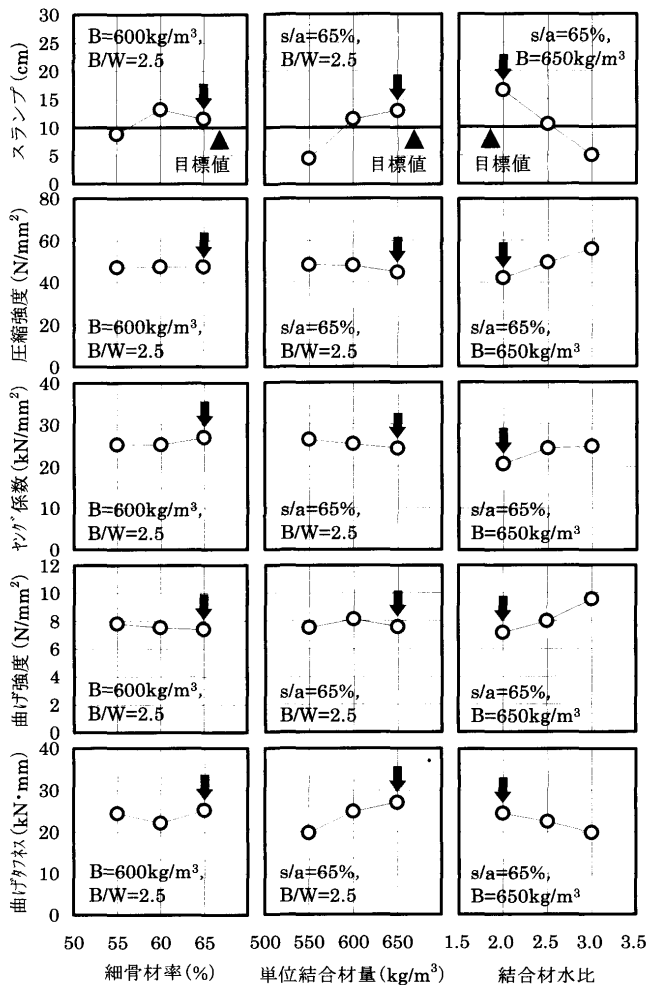


図3 細骨材率, 単位結合材量および結合材水比がスランブおよび各種力学的特性に及ぼす影響 - 実験 1 -

材水比の増加に伴い低下しているが、これは図 2 に示される通り、マトリックスの高強度化により最大荷重は増大する反面それ以降で耐力低下の程度が大きくなるためである。

2.2.2 実験 2 「繊維体積率の検討」

本項では、マトリックス調合を実験 1 で得たベース調合で一定とし、繊維体積率の増加が PEFRC のスランブおよび各種力学的特性に及ぼす影響について検討した。

(1) 実験方法

使用材料は実験 1 の場合と同様である (表 4 参照)。表 6 に使用調合を示す。マトリックス調合をベース調合で一定とし、繊維体積率 V_f は混練が可能な範囲で $V_f=0, 1.0, 2.0, 3.0\%$ の 4 水準とした。高性能 AE 減水剤は、繊維混入時のみ添加率 $Sp/B=0.50\%$ で添加した。

混練方法は、実験 1 の場合と同様である。試験方法として、実験 1 で実施した圧縮試験および 3 点曲げ試験に加えて、割裂引張試験および破壊靱性試験を実施した。割裂引張試験には $\phi 100 \times$

表 6 使用調合 - 実験 2 -

| V_f (%) | W/B (%) | Sg/B (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | Sp/B (%) | Slump (cm) |
|--------------|------------|-------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------|---------------|
| | | | | C | Sg | W | S | G | | |
| 0 | 50 | 50 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0 | 25.5 |
| 1.0 | 50 | 50 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0.50 | 15.5 |
| 2.0 | 50 | 50 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0.50 | 11.5 |
| 3.0 | 50 | 50 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0.50 | 4.0 |

200mm 円柱供試体を用い、最大荷重の測定値から割裂引張強度を求めた。破壊靱性試験には、スパン中央の引張側に深さ 30mm の切欠きを設けた 100×100×400mm 角柱供試体に関して、スパン 300mm の 3 点曲げ載荷により荷重-CMOD (Crack mouth opening displacement) 曲線を計測し、既報³⁾の結合力モデルの逆解析により引張軟化曲線 (結合応力-COD (Crack opening displacement) 曲線) および J 積分値 (COD が 0.5mm に至るまでの引張軟化曲線下の面積) を求めた。以上の供試体は各 3 体作製し、標準養生材齢 14 日後試験時まで気中養生とした。

(2) 実験結果および考察

図 4 に曲げ荷重-載荷点変位曲線および引張軟化曲線(平均値)、図 5 に繊維体積率がスランブおよび各種力学的特性に及ぼす影響をそれぞれ示す。

スランブは、繊維体積率の増加に伴い低下する傾向を示しているが、本調査の適用によって、原系カットタイプの PE 繊維を用いた場合で、 $V_f=2.0\%$ 程度までであれば目標とする 10cm 以上のスランブを確保できることが判る。圧縮強度およびヤング係数は、 $V_f=2.0\%$ まではプレーンコンクリートと同等の値を示しており、 $V_f=3.0\%$ になるとそれよりも 20%程度低下する傾向にあるが、いずれも締固め不足に起因する著しい低下は認められていない。曲げ強度、曲げタフネスおよび J 積分値は、 $V_f=1.0\%$ の場合には繊維無混入の場合と比較して明らかな増加が認められるが、 $V_f=1.0\%$ 以上において、その増加に頭打ちの傾向が見られた。

ここで、次のステップで PEFRC の曲げタフネスが $V_f=1.0\%$ 以上で頭打ちとなる傾向を改善し、更なる靱性向上を図るためには、その原因を推定する必要がある。ここでは、その一助となるデータを得るため、曲げ試験に供した PEFRC 供試体の破断面の観察を行った (写真 1)。一般に、繊維補強コンクリートの終局破壊は繊維引き抜けまたは繊維破断のいずれかに支配されると考えられるが、観察の結果、大部分の突出繊維長さは繊維長さの 1/4 を超えていたことから、秋濱らの研究¹⁰⁾に準拠し、繊維引き抜けが PEFRC の終局破

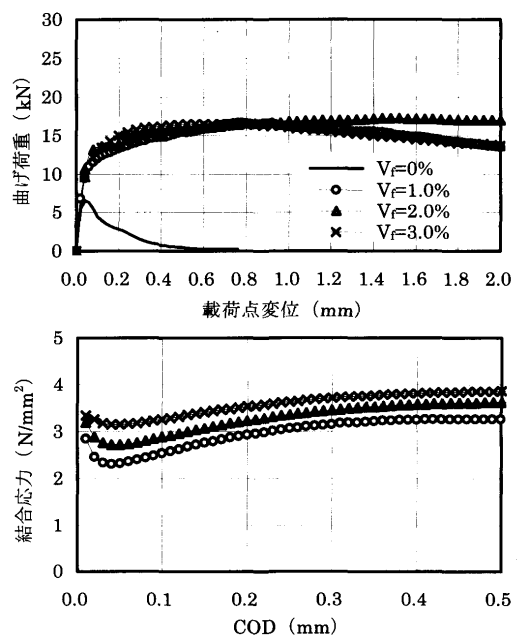


図 4 曲げ荷重-載荷点変位曲線および引張軟化曲線 (平均値) - 実験 2 -

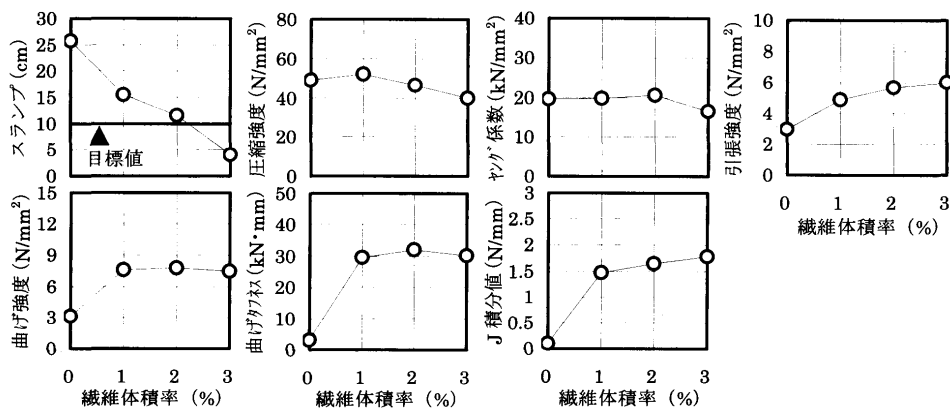


図5 繊維体積率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響 -実験2-

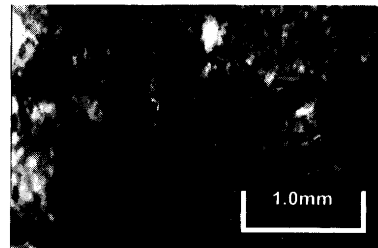


写真1 供試体破断面の様相の一例 (V_f=2.0%) -実験2-

壤を支配しているものと判断した。即ち、繊維体積率が必要以上に大きくなると、既往の研究^{11,12)}において明らかにされているように、繊維間隔の過小に伴う繊維-マトリックス間の剥離を生じ、繊維引き抜けが生じ易くなる傾向にあるものと推察される。

以上の考察に基づき、次のステップでは、繊維集束により繊維間隔を保持することで、繊維体積率の増加によるPEFRCの更なる靱性向上の可能性について検討を試みる。

2.2.3 実験3「繊維形状とマトリックス調合の組合せの検討」

実験2における考察の結果を踏まえ、本項では新たに集束タイプのPE繊維を使用し、曲げタフネスをより向上させる上で適切な繊維形状とマトリックス調合の組合せに関して検討を行った。

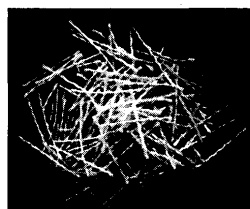
(1) 実験方法

表7に使用材料を示す。補強用繊維として、原糸カットタイプのPE繊維に加え、集束タイプのPE繊維を用いた。ここで、PE原糸束をロッド状に強固に集束した場合、アスペクト比低下に起因して靱性低下を生じる可能性が危惧される^{3,4)}。そこで、芯部がポリプロピレン、鞘部が低融点ポリエチレンから成る熱融着糸により、原糸束をその表面が露出する程度に5回巻付け集束した集束タイプのPE繊維を用いた(写真2)。この形状は、せん断攪拌時における繊維の解繊をその局所にとどめ、解繊箇所にセメントペーストが充填されることにより繊維-マトリックス間の付着力が確保されることを意図したものである。なお、マトリックスの使用材料は前段まで

と同様とした。

表8に使用調合を示す。ここでは、マトリックス側のパラメータとして水結合材比のみをW/B=50, 33%の2水準で変化させた。なお、単位水量一定の法則に準じ、水結合材比の変化に関わらず単位水量W=325kg/m³一定とした。繊維体積率は、V_f=0, 1.0, 2.0, 3.0%の4水準とした。また、高性能AE減水剤添加率は、混練時の状況に応じて適宜決定した。

混練には、本項から容量55Lの強制2軸攪拌型ミキサーを使用した。これは、実施工を考慮し汎用型ミキサーによる練混ぜの可能性と、集束タイプの強制せん断による局所的解繊を狙ったものであり、原糸カットタイプに対しても、試し練りの結果繊維分散性等の面で異常が無いことを確認した上で本機に切り替えた。混練手順として、最初に結合材および骨材を15秒間空練り後、水および高性能AE減水剤を加えて90秒間混練し、最後に繊維を投入して3分間練り混ぜた。



PE原糸束 (せん断攪拌により局所的に解繊)
熱融着糸 (ストランド自体の解繊を抑制)

写真2 集束タイプのPE繊維の外観と模式図 -実験3-

表7 使用材料 -実験3, 4-

| セメント | 早強ポルトランドセメント | |
|------|--|---|
| 細骨材 | 川砂(実験3で使用) 表乾密度: 2.59g/cm ³ 吸水率: 3.18% 最大寸法: 2.5mm 粗粒率: 2.39 | 川砂(実験4で使用) 表乾密度: 2.56g/cm ³ 吸水率: 3.77% 最大寸法: 2.5mm 粗粒率: 2.75 |
| 粗骨材 | 砕石6号 表乾密度: 2.95g/cm ³ , 吸水率: 1.27%, 最大寸法: 15mm, 実積率: 56.3% | |
| 混和材料 | 高炉スラグ微粉末 密度: 2.89g/cm ³ , 比表面積: 6140cm ² /g ポリカルボン酸系高性能AE減水剤 | |
| 短繊維 | PE繊維(原糸カットタイプ, 実験3のみ) 密度: 0.97g/cm ³ , 径×長さ: 12μm×30mm, 引張強度: 2620N/mm ² , 引張弾性率: 79kN/mm ² PE繊維(集束タイプ) 密度: 0.97g/cm ³ , 径×長さ: 68μm×30mm, 引張強度: 1870N/mm ² , 引張弾性率: 43kN/mm ² | |

表8 使用調合 -実験3-

| 繊維 | V _f (%) | W/B (%) | Sg/B (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | Sp/B (%) | Slump (cm) | |
|-----|--------------------|---------|----------|---------|--------------------------|-----|-----|-----|----------|------------|------|
| | | | | | C | Sg | W | S | | | G |
| 原糸 | 0 | 50 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0 | 25.5 | |
| | | | | | | | | | | | 50 |
| | 1.0 | 50 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0.50 | 11.5 | |
| | | | | | | | | | | | 50 |
| | 2.0 | 50 | 65 | 492 | 492 | 325 | 551 | 338 | 0.25 | 22.0 | |
| | | | | | | | | | | | 50 |
| | 3.0 | 50 | 65 | 492 | 492 | 325 | 551 | 338 | 0.50 | 8.0 | |
| | | | | | | | | | | | 50 |
| | 0 | 50 | 33 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0 | 22.0 |
| | | | | | | | | | | | |
| | 1.0 | 50 | 33 | 65 | 325 | 325 | 325 | 739 | 453 | 0 | 12.0 |
| | | | | | | | | | | | |
| 2.0 | 50 | 33 | 65 | 492 | 492 | 325 | 551 | 338 | 0.50 | - | |
| | | | | | | | | | | | 50 |
| 3.0 | 50 | 33 | 65 | 492 | 492 | 325 | 551 | 338 | 0.50 | 21.5 | |

* ーは、材料分離により測定不能となったことを示す。

強度試験は、圧縮、割裂引張および3点曲げの3項目とした。また、供試体は標準養生材齢14日後試験時まで気中養生とした。

(2) 実験結果および考察

図6に曲げ荷重-載荷点変位曲線(平均値)、図7に繊維体積率がスランブおよび各種力学的特性に及ぼす影響をそれぞれ示す。

a) 原系カットタイプを用いた場合

W/B=33%になると、 $V_f=1.0\%$ 以上においても曲げ強度および曲げタフネスに若干の増加が認められる。しかし、その程度は $V_f=1.0\%$ 未満の場合と比較して明らかに小さく、マトリックス強度を高くしても曲げタフネスで示される繊維補強効果を大きく改善することはできないことが判る。また、このことは、マトリックスの高強度化により繊維間隔の過小に起因する繊維-マトリックス間の剥離を抑制することは困難であることを示唆しているものと思われる。

これらのことから、 $V_f=1.0\%$ において目標値を上回る15cm程度のスランブが得られていることも考慮すると、原系カットタイプのPEFRCへの適用にあたっては、W/B=50%かつ $V_f=1.0\%$ 程度が妥当であると考えられる。

b) 集束タイプを用いた場合

W/B=50, 33%ともに良好なスランブが得られ、W/B=33%の場合、 $V_f=3.0\%$ においても高性能AE減水剤添加率 $Sp/B=0.5\%$ で20cm以上の高スランブが得られた。また、W/B=50%の場合には、高性能AE減水剤無添加でも $V_f=3.0\%$ で10cm以上のスランブが得られており、先述の原系カットタイプの場合と比較すると、繊維集束によりコンシステンシーが顕著に改善されていることが判る。

曲げ強度および曲げタフネスは、W/B=33%の場合、 $V_f=3.0\%$ まで繊維体積率の増加に伴い増大する傾向を示しており、原系カットタイプを使用した場合に $V_f=1.0\%$ 以上において曲げ強度および曲げタフネスの増加が頭打ちとなる傾向が改善されたことが判る。ここで、写真3には曲げタフネスが最大となったW/B=33%かつ $V_f=3.0\%$ のPEFRCに関する供試体破断面の一例を示しているが、集束繊維内部にセメントペーストが充填されて固化している様相が観察され、このことから、集束タイプの使用による繊維-マトリックス間の付着の強化がPEFRCの靱性向上に寄与しているものと推察される。一方、W/B=50%の場合、曲げ強度および曲げタフネスは、 $V_f=2.0\%$ までは繊維体積率の増加に伴い概ね増大する傾向にあるが、それ以上の繊維体積率において、原系カットタイプを使用した場合の上限値とほぼ同等の値で頭打ちを示した。

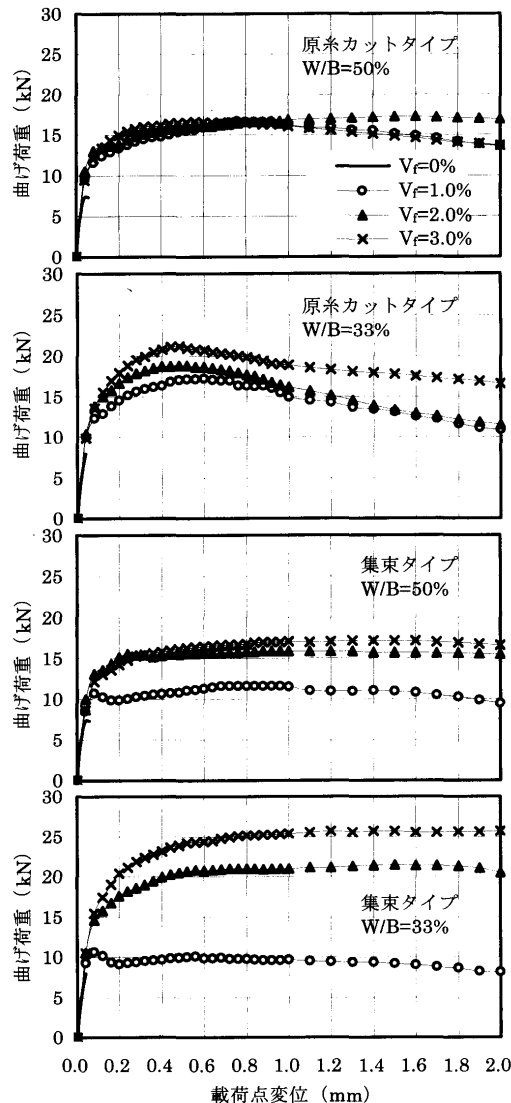


図6 曲げ荷重-載荷点変位曲線(平均値) - 実験3-

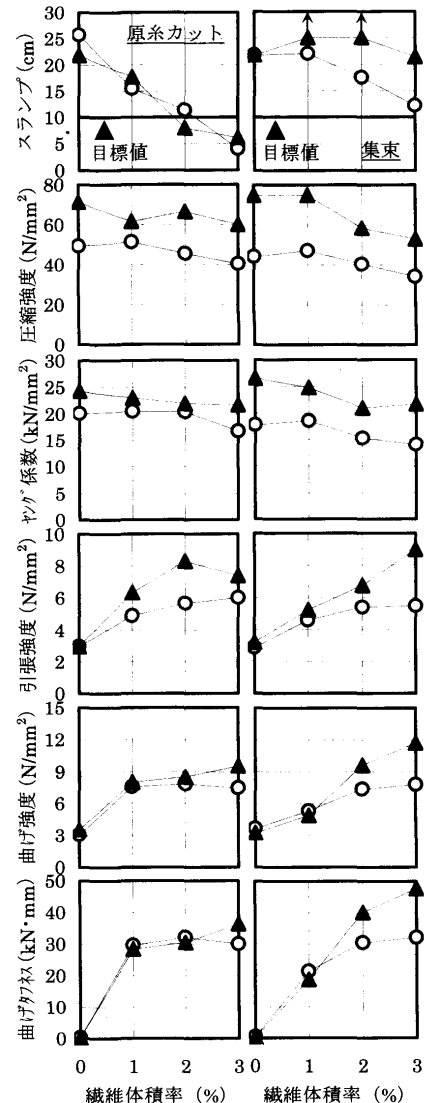


図7 繊維体積率がスランブおよび各種力学的特性に及ぼす影響 - 実験3-
* ○ : W/B=50%, ▲ : W/B=33%
* 矢印は、材料分離による測定不能を意味する。



写真3 供試体破断面の様相の一例 (集束タイプ, W/B=33%, $V_f=3.0\%$) - 実験3-

以上の結果をまとめると、本集束タイプのPEFRCへの適用は、原系カットタイプと比較した場合、コンシステンシーの改善と、高い繊維体積率の確保および繊維-マトリックス間の付着強化によるPEFRCの靱性向上の面で有効であり、水結合材比を小さくしマトリックスを高強度化することが高繊維体積率における靱性改善に必要であると考えられる。

2.2.4 実験4「最適調合の選定」

本項では、前段において適切と判断された繊維形状とマトリックス調合の組合せ（集束タイプのPE繊維とW/B=33%のマトリックス調合）に関して、より広範の繊維体積率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響について検討し、目標スランプを満足し、尚且つ曲げタフネスが最大となる調合を本研究における最適調合として選定した。

(1) 実験方法

使用材料は前掲の表7に併記している。表9に使用調合を示す。繊維体積率は混練が可能な範囲で、 $V_f=0, 1.0, 3.0, 4.0, 5.0\%$ の5水準とした。マトリックス調合は、前段で集束タイプとの組合せにおいて適切と判断されたW/B=33%の調合で一定とし、高性能AE減水剤添加率は、過度な材料分離が生じない範囲として、 $Sp/B=0.5\%$ 以下となるように調整した。

混練は、前段同様、強制2軸攪拌型ミキサーを使用する方法により行った。強度試験項目は、圧縮、割裂引張および3点曲げの3項目である。供試体および養生条件は、前段までの方法に準じた。

(2) 実験結果および考察

a) 繊維体積率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響

写真4にスランプ試験の状況、図8に曲げ荷重-載荷点変位曲線（平均値）、図9に繊維体積率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響をそれぞれ示す。なお、曲げ荷重-載荷点変位曲線は、変位4.0mmに至るまでの測定結果を示している。

繊維体積率が $V_f=4.0, 5.0\%$ といった範囲になると、繊維体積率の増加に伴いスランプが低下する傾向が見られるが、いずれも材料分離を生じることなく、 $V_f=4.0\%$ 程度までであれば目標とする10cm以上のスランプを確保できることが判る。

曲げタフネスは、 $V_f=4.0\%$ までは繊維体積率の増加に伴い増加しており、 $V_f=4.0\%$ 以上においてその増加に頭打ちが見られた。以上の結果より、検討対象とした繊維タイプとマトリックス調合の組合せについて、曲げタフネスが最大となる繊維体積率は $V_f=4.0\%$ であることが判った。

b) 最適調合の選定

以上の一連の実験結果に基づき、本研究では、目標スランプ10cm以上を満足し、尚且つ曲げタフネスが最大となるPEFRCの最適調合として、表10に示す調合を選定した。

3. PEFRCの各種力学的特性および基礎物性の評価

本章では、前章に示す一連の実験より得られたPEFRCに関して、既報のSFRC⁴⁾との比較による各種力学的特性の評価を行った。また、PEFRCの実用化のためには、力学的性能だけでなく、耐久性等に関わる基礎物性の把握も重要な課題となる。そこで、ここではPEFRCの基礎物性として、乾燥収縮特性、耐火性、凍結融解抵抗性および中性化抵抗性に関して実験的検討を行った。

3.1 PEFRCの各種力学的特性

図10にPEFRCの各種力学的特性の関係を示す。なお、図中に示すデータは、前章において選定された、繊維形状とマトリックス調合の最適な組合せによるPEFRCに関するものである。また、同図中には比較のため、既報⁴⁾のSFRCに関する実験データ（繊維長さ： $l=20\sim 50\text{mm}$ 、繊維体積率： $V_f=0.3\sim 2.9\%$ ）も併記している。

表9 使用調合 - 実験4 -

| V_f (%) | W/B (%) | Sg/B (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | Sp/B (%) | Slump (cm) |
|--------------|------------|-------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------|---------------|
| | | | | C | Sg | W | S | G | | |
| 0 | 33 | 50 | 65 | 488 | 488 | 325 | 550 | 339 | 0 | 18.0 |
| 1.0 | 33 | 50 | 65 | 488 | 488 | 325 | 550 | 339 | 0.25 | 23.5 |
| 3.0 | 33 | 50 | 65 | 488 | 488 | 325 | 550 | 339 | 0.50 | 21.0 |
| 4.0 | 33 | 50 | 65 | 488 | 488 | 325 | 550 | 339 | 0.50 | 13.0 |
| 5.0 | 33 | 50 | 65 | 488 | 488 | 325 | 550 | 339 | 0.50 | 6.0 |

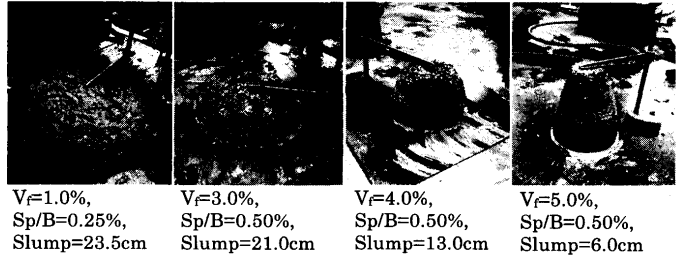


写真4 スランプ試験の状況 - 実験4 -

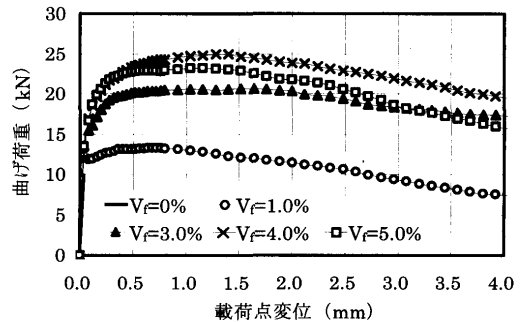


図8 曲げ荷重-載荷点変位曲線 (平均値) - 実験4 -

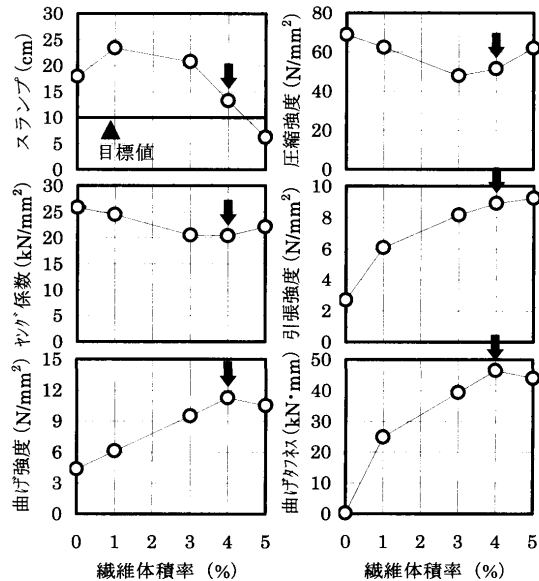


図9 繊維体積率がスランプおよび各種力学的特性に及ぼす影響 - 実験4 -

表10 選定した最適調合

| V_f (%) | W/B (%) | Sg/B (%) | s/a (%) | W (kg/m ³) | Sp/B (%) |
|--------------|------------|-------------|------------|---------------------------|-------------|
| 4.0 | 33 | 50 | 65 | 325 | 0.5 |

* 集束タイプのPE繊維を使用

圧縮強度とヤング係数の関係に関して、図中には参考のため鉄筋コンクリート構造計算規準式¹³⁾による計算結果も併記しているが、本調合によるPEFRCのヤング係数は、同一圧縮強度を有する

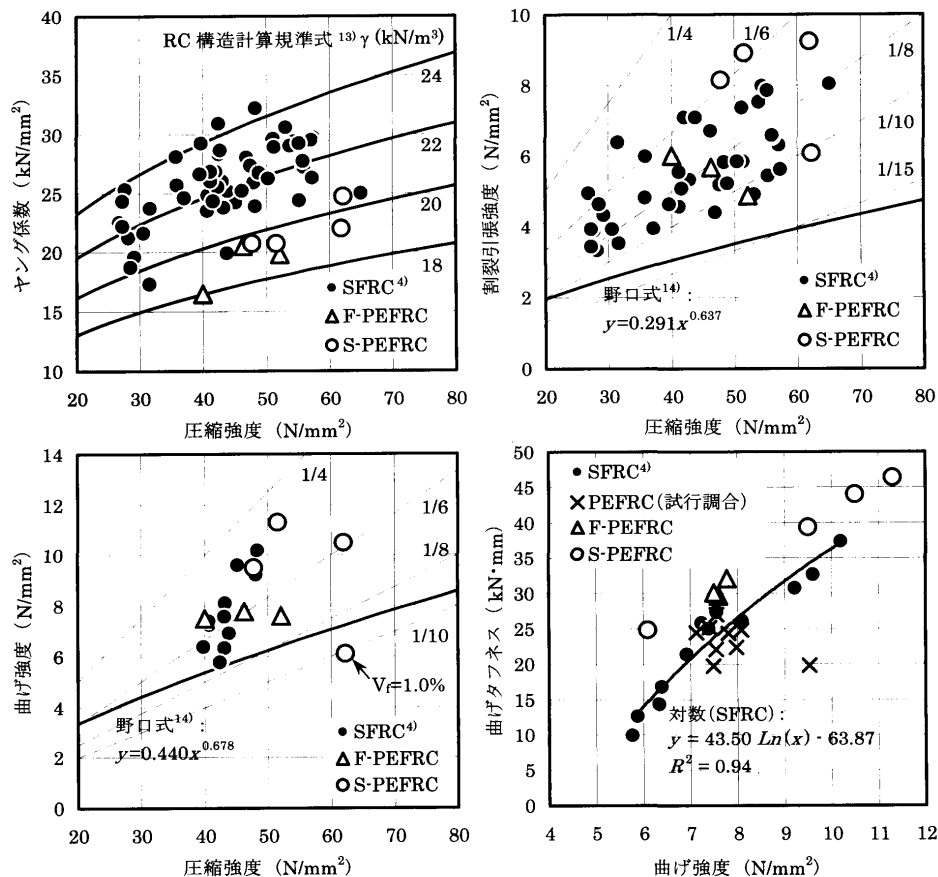
SFRC や普通コンクリートのそれよりも小さくなる傾向にある。これは、PE 繊維混入による直接的な影響というよりも、結合材や細骨材の量が SFRC に比して更に多く、モルタルに近いマトリックスに主に起因するものであると考えられる。

圧縮強度に対する割裂引張強度比は、SFRC の場合とほぼ同程度であり、1/10 ~ 1/6 程度の範囲にある。圧縮強度に対する曲げ強度比に関しても同様に、SFRC と同等の、1/8 ~ 1/4 の範囲に概ね収まっている。但し、曲げ強度に関して、 $V_f=1.0\%$ の場合に普通コンクリートに関する予測線¹⁴⁾を下回っており、これは前章でも見られたように、特に繊維体積率が小さい場合には合成繊維の低弾性率に起因して、マトリックスのひび割れ発生強度によって曲げ強度が決定される場合があるためである²⁾。

曲げタフネスは、前章でも示したように、繊維補強により最も顕著な改善が見られる力学的特性であり、図中に示す SFRC に関する回帰曲線からも判るように、曲げ強度と曲げタフネスの間には高い相関がある。これを比較対象として PEFRC について見ると、PEFRC に関する実験データはその回帰曲線を上回っており、同程度の曲げ強度を有する SFRC に比して曲げ靱性に優れていることが判

る。ここで、図 11 に PEFRC および SFRC の曲げ荷重-載荷点変位曲線の比較（繊維長さおよび繊維体積率一定）を示す。SFRC の場合、最大荷重以降で比較的速やかに耐力が低下する傾向にあるのに対して、PEFRC の場合には載荷点変位 2.0mm に至るまでの耐力低下の程度が小さく、このことが先述の曲げ強度-曲げタフネス関係における差異の要因となっていることは明らかである。なお、 $V_f=1.0\%$ 一定で比較した場合、集束タイプを適用した PEFRC (S-PEFRC) の曲げタフネスは原糸カットタイプを適用した PEFRC (F-PEFRC) のそれに比して小さくなっており、これは、繊維集束により複合体中の繊維本数が減少しているためであると推察される。一方、 $V_f=2.0\%$ では逆に S-PEFRC が 3 種類の中で最大の曲げタフネスを示しており、このことから、集束タイプの適用により PEFRC の靱性向上を図るためには、ある程度高い繊維体積率を確保する必要があると考えられる。

ところで、図 10 の曲げ強度-曲げタフネス関係図中には試行調査段階の PEFRC に関する実験データも併記しているが、試行調査を適用した PEFRC の曲げタフネスは、同程度の曲げ強度で比較した場合、本調査による PEFRC よりもかなり低くなる傾向にあり、その中には同程度の曲げ強度を有する SFRC よりも曲げタフネスが低下しているものも見られる。このことは、マトリックス調合の適切な選定により繊維分散性が向上する傾向にあることを示唆するもの



| 記号 | 繊維 | V_f (%) | W/B (%) | Sg/B (%) | s/a (%) | W (kg/m³) | Sp/B (%) |
|---------|----|-----------|---------|----------|---------|-----------|-----------|
| F-PEFRC | 原糸 | 1.0~3.0 | 50 | 50 | 65 | 325 | 0.25~0.50 |
| S-PEFRC | 集束 | 1.0~5.0 | 33 | 50 | 65 | 325 | 0.25~0.50 |

図 10 PEFRC の各種力学的特性の関係

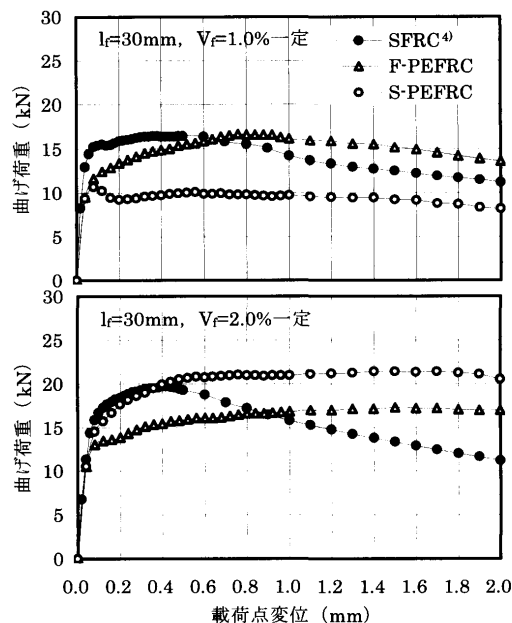


図 11 曲げ荷重-載荷点変位曲線の比較（繊維長さおよび繊維体積率一定）

であると考えられ、また、合成繊維補強コンクリートに期待される高い曲げ靱性²⁾を得るためには、マトリックス調合の良否が大きく影響してくることを示しているものと思われる。

3.2 PEFRCの基礎物性

3.2.1 乾燥収縮特性

乾燥収縮試験は、表 10 に示す最適調合による PEFRC および繊維無混入のプレーンコンクリートの 2 種類に関して実施した。供試体として、100×100×400mm 角柱供試体を各 3 体作製し、標準養生材齢 14 日後試験に供した。試験方法として、20℃、60%R.H.の恒温恒湿室にて、JIS A 1129 (モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法) に準じて行った。

図 12 に乾燥収縮率および質量変化率の測定結果を示す。ここで、通常のコンクリートを対象に、乾燥収縮ひび割れ抑制のための乾燥期間 6 か月における乾燥収縮率の限界値として 8×10^{-4} が規定されているが¹⁵⁾、PEFRC に関する 3 データ全てがその限界値以内に収まる形となった。また、PEFRC の質量減少の程度はプレーンコンクリートのそれに比して若干小さい程度で大差無く、このことから、PE 繊維混入がコンクリート内部の水分の散逸に殆ど影響を及ぼさないことが明らかである。

3.2.2 耐火性

耐火試験は、表 10 に示す最適調合による PEFRC および普通コンクリート (普通-30-18-20-N, 実測スランプ: 17.9cm, 実測空気量: 3.7%) の 2 種類に関して実施した。加熱用、非加熱用および含水率測定用の $\phi 100 \times 200$ mm 円柱供試体を各 3 体ずつ作製し、標準養生材齢 14 日 (普通コンクリートは 28 日) 後、試験時まで 7 日間気中養生とした。その後、加熱用供試体は加熱炉 (最高 900℃) で 1 時間加熱し、24 時間炉内に放置・除熱の上圧縮試験に供した。非加熱用供試体は、気中養生後すぐに圧縮試験に供した。含水率測定用供試体は気中養生後すぐに乾燥炉 (110℃) に入れ、乾燥法により含水率を求めた。

表 11 に強度試験結果、図 13 に加熱前後の圧縮応力-ひずみ曲線 (平均値) をそれぞれ示す。普通コンクリートは加熱中に爆裂により大破したため、加熱後の強度は測定不可能となった。一方、PEFRC は、非加熱での圧縮強度および含水率が共に普通コンクリートよりも高く、爆裂が発生し易い条件下にあると考えられるにも関わらずそれが生じていないことから、PE 繊維 (融点: 145℃) の消失に伴う空隙の形成 (図 13 中写真) が水蒸気圧に起因する内部応力の緩和に寄与しているものと推察される¹⁶⁾。但し、加熱後の PEFRC の圧縮強度およびヤング係数の残存率はそれぞれ 16.2 および 3.92% と、PE 繊維の消失に起因してかなり低くなっている。

3.2.3 凍結融解抵抗性

凍結融解試験は、表 10 に示す最適調合による PEFRC および繊維無混入のプレーンコンクリートの 2 種類に関して実施した。供試体として、100×100×400mm 角柱供試体を各 3 体作製し、標準養生材齢 14 日後試験に供した。試験は JIS A 1148 (コンクリートの凍結融解試験方法) に準拠して行い、凍結融解サイクル 300 まで 30 サイクル毎に相対動弾性係数および質量減少率を測定した。

図 14 に相対動弾性係数および質量減少率の測定結果を示す。プレーンコンクリート自体に相対動弾性係数の大きな低下は認められないが、PEFRC の凍結融解抵抗性はそれと同等以上であることが判る。また、本実験結果によれば、プレーンコンクリートおよび PEFRC のいずれも JASS 5・26 節 (凍結融解作用を受けるコンクリート) における性能区分 A (300 サイクルにおける相対動弾性係

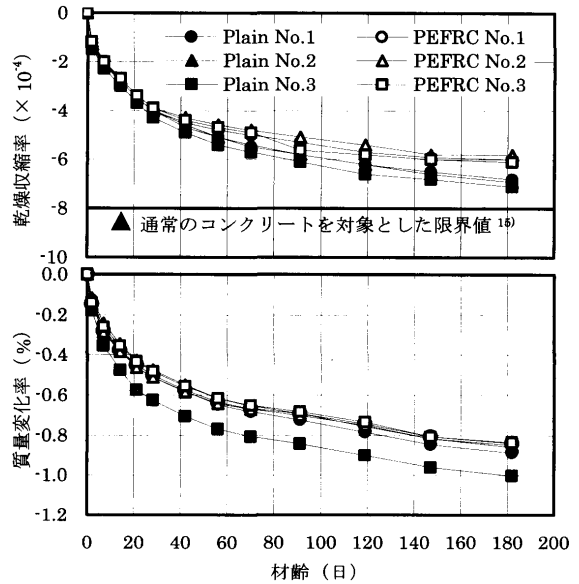


図 12 乾燥収縮率および質量変化率

表 11 加熱前後の圧縮特性

| | | 普通コンクリート | PEFRC |
|----------|---------------------------|-----------|-------|
| 含水率 (%) | | 5.75 | 9.91 |
| 加熱減量 (%) | | 爆裂により測定不能 | 20.7 |
| 圧縮強度 | 非加熱 (N/mm ²) | 33.8 | 62.1 |
| | 加熱後 (N/mm ²) | 爆裂により測定不能 | 10.0 |
| | 残存率 (%) | 爆裂により測定不能 | 16.2 |
| ヤング係数 | 非加熱 (kN/mm ²) | 26.8 | 23.3 |
| | 加熱後 (kN/mm ²) | 爆裂により測定不能 | 0.916 |
| | 残存率 (%) | 爆裂により測定不能 | 3.92 |

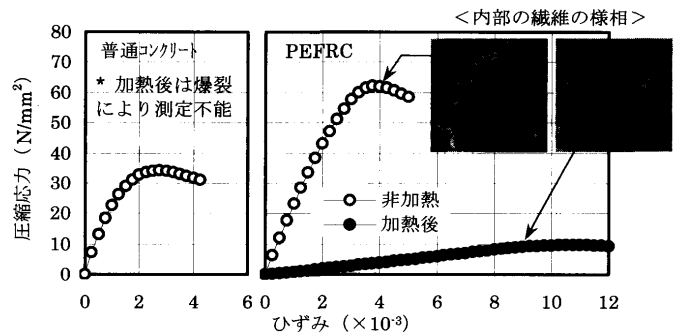


図 13 加熱前後の圧縮応力-ひずみ曲線 (平均値)

数 60%以上) ¹⁷⁾ を満足することが明らかである。一方、質量減少率に関しては逆にプレーンコンクリートの方が PEFRC よりも減少の程度が小さくなっており、繊維混入がスケール低減に有効であるとする既往の研究知見^{例え 2, 18)}と異なっているが、プレーンコンクリートの場合には表面に生じたひび割れからの吸水が見かけ上質量減少を低減させているものと推察される。しかし、いずれにしても 300 サイクルにおける PEFRC の質量減少率は 0.2% 以下と十分に小さく、スケール等の顕著な表面劣化は認められていない。

3.2.4 中性化抵抗性

促進中性化試験は、表 10 に示す最適調合による PEFRC および繊維無混入のプレーンコンクリートの 2 種類に関して、JIS A 1153 (コンクリートの促進中性化試験方法) に準拠して実施した。なお、試験は標準養生材齢 14 日後実施し、中性化深さの測定は、促進材齢 2, 4, 8 週の 3 回とした。

表 12 に中性化深さの測定結果を示す。促進材齢 8 週の時点でプ

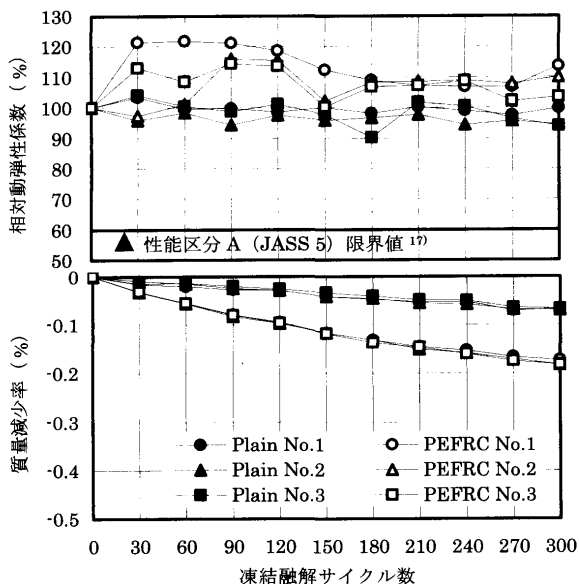


図 14 相対動弾性係数および質量減少率

表 12 中性化深さの測定結果

| | 中性化深さ (mm) | | |
|-------|------------|----|-----|
| | 2週 | 4週 | 8週 |
| Plain | 0 | 0 | 1.5 |
| PEFRC | 0 | 0 | 0 |

レーンコンクリートにはごく表層の中性化が認められたのに対して、PEFRCにはそれが認められておらず、PEFRCの中性化抵抗性は概ね良好であると判断される。

4. まとめ

本報では、高い靱性とプレキャストコンクリートへの適用を想定した上で十分なスランプを有する PEFRC の調査を得るための一連の実験シリーズについて報告した。また、得られた PEFRC に関して、SFRC との比較による各種力学的特性の評価ならびに主にプレーンコンクリートとの比較による耐久性等に関わる基礎物性の評価を実施した。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると、以下のようになる。

- 1) 高流動コンクリートの使用材料（高炉スラグ微粉末と高性能 AE 減水剤）に準じたマトリックス調合と、せん断攪拌時に局所的に解繊する集束タイプの PE 繊維を適用することにより、10cm 以上の目標値を満足するスランプと、40kN・mm 以上の曲げタフネスを有する PEFRC が得られることを示した。また、上記性能を確保するための PEFRC の最適調合として、下記を提案した。

| V _f (%) | W/B (%) | Sg/B (%) | s/a (%) | W (kg/m ³) | Sp/B (%) |
|-----------------------|------------|-------------|------------|---------------------------|-------------|
| 4.0 | 33 | 50 | 65 | 325 | 0.5 |

* V_f: 繊維体積率, W/B: 水結合材比, Sg/B: 高炉スラグ微粉末混入率, s/a: 細骨材率, W: 単位水量, Sp/B: 高性能 AE 減水剤添加率

なお、曲げタフネス 40kN・mm とは、想定している耐爆構造材としての用途を考慮した場合、爆薬（ペンシリット：パラフィン系 =

- 65:35) 100g による接触爆発を受ける PEFRC 版 (厚さ 100mm) のほぼ裏面剥離発生限界となる曲げタフネスの値に相当する⁶⁾。
- 2) 既報の SFRC と比較した場合、提案した PEFRC は、マトリックスがよりモルタルに近いためにヤング係数は小さいが、割裂引張強度、曲げ強度および曲げタフネスに関しては SFRC と同等以上の力学的性能を有することが確認された。
- 3) 提案した PEFRC の基礎物性に関して、PE 繊維の消失に起因して高温加熱後の残存強度およびヤング係数の低下は大きいものの、乾燥収縮特性、耐爆裂性、凍結融解抵抗性、耐スケール性および中性化抵抗性は概ね良好であると判断された。但し、PEFRC の各種力学的特性および基礎物性に関しては、より定量的な評価が今後の課題である。

謝辞

実験にあたり、熊本大学工学部 甲斐定夫技術専門職員ならびに同大学 建築材料・施工研究室の皆様より多大なご協力をいただきました。また、東洋紡績 (株) および (株) 浅沼組からは、資材提供ならびに技術開発支援を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 本宮達也著：ハイテク繊維の世界，日刊工業新聞社，1999
- 2) 小林一輔著：繊維補強コンクリート特性と応用一，オーム社，1981
- 3) 村上聖ほか 3 名：繊維補強コンクリートの破壊力学特性に関する研究，コンクリート工学論文集，第 5 巻，第 2 号，pp.1-10，1994.7
- 4) 村上聖ほか 2 名：鋼繊維補強コンクリートの力学パラメータに及ぼす調合因子の相互作用の定量分析，コンクリート工学論文集，第 7 巻，第 1 号，pp.23-30，1996.1
- 5) 日本コンクリート工学協会：繊維補強コンクリートの試験方法に関する規準 (JCI-SF)，1984
- 6) 山口信ほか 3 名：ポリエチレン繊維補強コンクリートの接触爆発に対する耐爆性能，日本建築学会構造系論文集，第 619 号，pp.187-194，2007.9
- 7) 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針 (案)・同解説，丸善，1997
- 8) 村上聖ほか 4 名：粗骨材混入炭素繊維補強コンクリートの調合と力学的特性に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 514 号，pp.35-41，1998.12
- 9) 小林一輔ほか 1 名：所要のコンシステンシーを得るための鋼繊維補強コンクリートの配合設計方法，土木学会論文報告集，第 293 号，pp.111-119，1980.4
- 10) 秋濱繁幸著：繊維補強コンクリート—新素材繊維を中心に—，鹿島出版会，1992
- 11) Hannant, D. J.: Fibre Cements and Fibre Concretes, John Wiley & Sons, 1978
- 12) RILEM: High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC2), Proceedings of the Second International RILEM Workshop, Edited by Naaman, A. E. et al., 1996
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説，丸善，1999
- 14) 野口貴文ほか 1 名：高強度コンクリートの圧縮強度と各種力学特性との関係，日本建築学会構造系論文集，第 472 号，pp.11-16，1995.6
- 15) 日本建築学会：コンクリートの調合設計指針・同解説，丸善，1999
- 16) 森田武：コンクリートの爆裂とその防止対策，コンクリート工学，Vol.45, No.9, pp.87-91，2007.9
- 17) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事，丸善，2003
- 18) 岩本勲ほか 2 名：凍結融解作用を受けた繊維補強コンクリートの力学特性と微視的構造の変化，土木学会論文集，No.538/V-31, pp.27-35，1996.5

(2008年6月9日原稿受理，2008年9月5日採用決定)