

修士論文を構成する三つの研究に分けて述べる。

### 1. FRC の引張および曲げ試験

#### 1.1 はじめに

本実験では、FRC 部材に適した部材性能の評価と使用材料および配合の検討をするとともに、繊維長の違いが FRC の性能に与える影響を確認するため付着性状について検討した。FRC の引張および曲げ試験として、ダンベル型引張供試体と棒状曲げ供試体を作製して強度試験を行った。また、試験後に破断面の繊維観察を行い、強度試験結果との関係についても検証した。

#### 1.2 実験概要

##### (1) 使用材料

表-1 に使用材料を、図-1 に PVA 繊維の外観を示す。繊維長の違いが FRC の性能に与える影響を検討では、20mm と 30mm の繊維長の異なる PVA 繊維を用いて実験を行った。PE 繊維は直径 12 $\mu$ m、長さ 12mm を、PVA 繊維は、直径 660 $\mu$ m、長さ 30mm、引張強度 900N/mm<sup>2</sup>、切断伸度 9.0%、ヤング係数 23GPa、密度 1.3g/cm<sup>3</sup> のものを使用した。

表-1 使用材料

| 材料   | 記号  | 物性                                      |
|------|-----|---|
| セメント | C   | 早強ポルトランドセメント<br>密度3.13g/cm <sup>3</sup> |
| 細骨材  | S1  | 石灰砕砂、密度2.68g/cm <sup>3</sup>            |
|      | S2  | 珪砂7号、密度2.63g/cm <sup>3</sup>            |
| 粗骨材  | G   | 石灰砕石7号、密度2.70g/cm <sup>3</sup>          |
| 混和材  | LSP | 炭酸カルシウム<br>密度2.71g/cm <sup>3</sup>      |
| 混和剤  | AD  | NV-K5                                   |
|      | AE1 | AE剤                                     |
|      | AE2 | AE減水剤                                   |
|      | MS  | 増粘剤                                     |
| 繊維   | PVA | ポリビニルアルコール繊維<br>密度1.30g/cm <sup>3</sup> |
|      | PE  | 高強度ポリエチレン<br>密度0.97g/cm <sup>3</sup>    |



図-1 PVA 繊維

##### (2) 試験方法

###### ・フロー試験

フレッシュ性状の観察には、スランプフロー試験(JIS A 1150)、モルタルフロー試験(JIS R 520)、空気量試験(JIS A 1128)を規格に準拠して計測した。

###### ・強度試験

強度試験として、圧縮試験・一軸引張試験・曲げ試験を行い、各強度を求めた。全ての供試体に対して、応力-ひずみ曲線の応力が始めに低下した点である初期ひび割れ応力と、応力が最大となった時の最大曲げおよび引張応力を求めた。

##### (3) 供試体概要

各強度試験における供試体寸法を図-2 に示す。

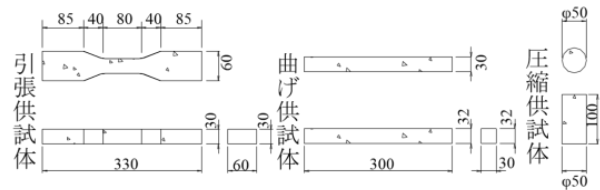


図-2 供試体寸法

### 1.3 PVA および PE 繊維を用いた配合の検討

#### (1) 検討内容

FRC 無筋版状部材に適した配合を明らかにするため 8 ケースについて検討した。PVA 繊維を混入した w/c35% の FRC 配合と、PE 繊維を混入した w/c55% の FRC 配合をベースに、繊維混入率や繊維種類を調整し、フレッシュ性状及び強度特性を確認する。それぞれの特徴を表-2 に記す。

表-2 検討ケース特徴

| ケース | W/C (%) | PVA繊維混入率 (%) | PE繊維混入率 (%) | 粗骨材 |
|-----|---------|--------------|-------------|-----|
| ①   | 30      | 2.0          | —           | ○   |
| ②   |         | 1.5          | —           | ○   |
| ③   |         | —            | 2.3         | —   |
| ④   |         | 0.7          | 0.7         | ○   |
| ⑤   | 55      | —            | 1.5         | —   |
| ⑥   |         | —            | 1.5         | ○   |
| ⑦   |         | 0.5          | 1.0         | ○   |
| ⑧   | 30      | —            | —           | —   |

#### (2) 結果および考察

試験結果を表-3 に示す。

表-3 1.3 試験結果

| ケース | 引張試験     |                           | 曲げ試験     |                           | 圧縮試験                      |
|-----|----------|---------------------------|----------|---------------------------|---------------------------|
|     | ひび割れ発生強度 | 引張強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | ひび割れ発生強度 | 曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |
| ①   | 4.51     | 4.64                      | 8.03     | 11.10                     | 49.6                      |
| ②   | 4.53     | 4.53                      | 8.02     | 8.36                      | 50.1                      |
| ③   | 5.26     | 6.90                      | —        | —                         | —                         |
| ④   | 4.78     | 5.44                      | 7.37     | 9.42                      | 75.3                      |
| ⑤   | 4.74     | 5.46                      | 6.48     | 11.90                     | 36.3                      |
| ⑥   | 3.73     | 4.44                      | 4.80     | 9.65                      | 39.0                      |
| ⑦   | 3.50     | 4.15                      | 4.88     | 9.73                      | 37.0                      |
| ⑧   | —        | 4.21                      | 7.37     | —                         | 50.4                      |

#### ・強度試験結果

ベースの違いによる圧縮強度の差は、W/C による影響が大きく、繊維の種類や混入率による差は見られなかった。④の配合が高い値であるのは、粗骨材の混入比率が測定値に影響したと考えられる。

一軸引張試験結果では、各配合とも引張強度がひび割れ発生強度に比べて増加していることが確認できた。曲げ試験結果では一軸引張試験同様に、曲げ強度がひび割れ発生強度に比べて増加していることが確認できる。

繊維混入率と曲げ強度の関係を図-3 に示す。図より繊維添加率が増えると曲げ強度が増加することを確認

できた。PE や PVA 繊維の種類に関係なく、繊維の添加量が増えると曲げ靱性が大きくなった。

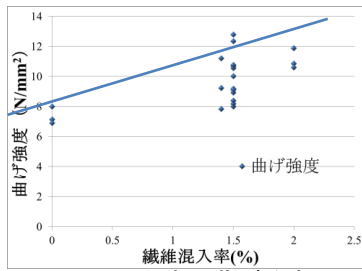


図-3 混入率と曲げ強度

#### 1.4 PVA 繊維の繊維長およびマトリックス強度の影響

##### (1) 検討内容

繊維長の違いが FRC の性能に与える影響を把握することを目的として、繊維長の異なる PVA 繊維を利用した実験を行った。また、1.3 にて PVA 繊維を混入した w/c30%ベースの供試体強度が従来の値より低かったため、ミキサ種類の違い等がマトリックス強度へのどのような影響を与えるか確認を行った。試験後に破断面の繊維観察を行い、強度試験結果との関係についても検証した。検討配合表を表-4 に示す。

表-4 検討別配合表

| 配合名        | W/C (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |     |     | 高性能AE減水剤 (粉体×) | AE剤 (粉体×) |
|------------|---------|--------------------------|-----|-----|------|-----|-----|----------------|-----------|
|            |         | W                        | C   | LSP | SI   | G   | PVA |                |           |
| ①PVA-30mm1 | 30      | 185                      | 617 | 83  | 1212 | 243 | 26  | 2.2            | 3A        |
| ②PVA-30mm2 | 30      | 185                      | 617 | 83  | 1212 | 243 | 26  | 2.2            | 3A        |
| ③PVA-30mm3 | 30      | 185                      | 617 | 83  | 1212 | 243 | 26  | 2.4            | 4A        |
| ④PVA-20mm  | 30      | 185                      | 617 | 83  | 1212 | 243 | 26  | 2.4            | 4A        |
| ⑤繊維なし      | 30      | 185                      | 617 | 83  | 1212 | 243 | 0   | 2.4            | 4A        |

##### (2) 断面の観察

引張および曲げ供試体の繊維の分布状況として、破断面の繊維本数、破断・引抜け本数、繊維長を観察した。繊維長の計測は、ノギスを用いて計測した。繊維本数の計測は、ブラックライトを用いて画像処理によって観察した。処理した画像を図-4 に示す。片方の断面は、左右反転の処理をしたものである。図-4 のように処理した2つの断面を重ね合わせ、片方の画像透過率を変化させながら観察した。画像を重ね合わせたときに、同じ箇所に繊維がある場合に破断、片側にしか繊維が確認できない場合に引抜けとした。

##### (3) 結果および考察

試験結果を表-5 に示す。

##### ・圧縮強度低下の要因

①において、空気量が多く取り込まれた結果となった。1.3 において同様に発生していた可能性が大きく、約 70N/mm<sup>2</sup>→50N/mm<sup>2</sup>の圧縮強度の明らかな低下については、空気量の増加に伴う強度低下が主な要因であったと考えられる。

表-5 1.4 試験結果

| 配合           | 曲げ試験結果 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張試験結果 (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 繊維無し<br>ブランク | ひび割れ発生強度                    | 5.99                        |
|              | 曲げ強度                        | 5.99                        |
| PVA-20mm     | ひび割れ発生強度                    | 7.41                        |
|              | 曲げ強度                        | 8.89                        |
| PVA-30mm     | ひび割れ発生強度                    | 7.69                        |
|              | 曲げ強度                        | 13.64                       |

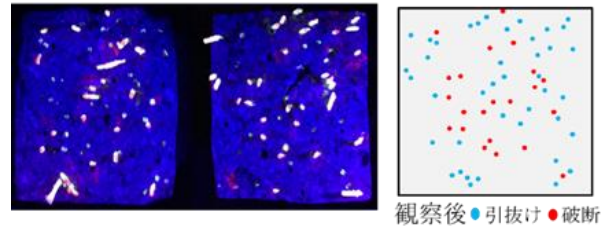


図-4 断面の観察結果

##### ・PVA 繊維 30mm から 20mm における性状の変化

③④において、同一配合における異なる繊維長の比較を行った。試験値では、繊維を 20mm にすることにより、若干のフロー値の低下と空気量の増加にとどまった。しかし、フロー試験後の目視において、繊維 20mm の方が、マトリックスとの一体性が高く、ファイバーボール状の塊について改善が見られた。

##### ・曲げ試験結果

曲げ試験における応力-たわみ曲線を図-5 に示す。表-5 の PVA20mm と PVA30mm のひび割れ発生強度を比較するとそれほど大きな差は確認できなかった。しかし、曲げ強度では PVA30mm の方が明らかに大きい結果になった。また、図-5 より PVA30mm の方が PVA20mm よりたわみ量も大きいことが確認できた。曲げ性能については、PVA20mm に比べ、PVA30mm の方が高い性能を有することが示された。

##### ・断面の観察

破断面の観察結果を表-6 に示す。破断面の観察結果と引張強度との関係について考察する。

ひび割れ発生強度は、PVA30mm

の方が一割程度高い結果になり、図-5 より、PVA30mm では繊維の破断数が多い可能性が考えられていた。しかし、断面の観察から破断率をみると有意な差は見られなかった。

繊維の分布と曲げ強度との関係について考察する。

曲げ強度は PVA30mm の方が明らかに大きく、断面の観察から PVA20mm では、PVA30mm に比べて 20%程引き抜けている本数が多いことを確認した。

断面の繊維長は、PVA30mm の方が大きくなっている。また、どちらも繊維長の大きい方が強度の値も高くなっていることから、曲げ・引張強度ともに付着している長さが影響している可能性を確認した。

表-6 断面観察の結果

| 供試体    | 本数   | 引抜け率 (%) | 破断率 (%) | 平均繊維長 (mm) |
|--------|------|----------|---------|------------|
| 引張20mm | 48.4 | 63.6     | 36.4    | 3.2        |
| 引張30mm | 49.6 | 63.1     | 36.9    | 4.9        |
| 曲げ20mm | 40.0 | 79.0     | 21.0    | 3.6        |
| 曲げ30mm | 52.3 | 66.9     | 33.1    | 4.2        |

## 1.5 まとめ

本実験では以下のような知見が得られた。

- ・強度低下の改善により、表-2の①が曲げ強度および引張強度が大きく、FRC部材に適していると判断した。
- ・繊維長を30mmから20mmに短くすることにより、分離抵抗性や作業性は向上するが、曲げ強度やひび割れ分散性の低下が考えられる。
- ・曲げ試験と断面の観察結果から、繊維の引抜けの差が曲げ強度に影響を与えていることが確認できた。
- ・各強度と断面の繊維長の比較から、付着長の大きさに伴い強度が大きくなる可能性を確認した。

## 2. PVA 繊維の付着試験

### 2.1 はじめに

FRCの埋込長の違いが付着性状に与える影響を検討した。ダンベル型引張供試体の中央にセパレータを設置し、埋込長を変えたPVA繊維をマトリックス中に配置し、繊維の付着試験を行った。試験の様子を図-6に示す。



図-6 付着試験

### 2.2 実験概要

#### (1) 使用材料

繊維の付着試験では表-4の⑤に、PVA繊維を埋め込むことで実験を行った。ダンベル型供試体の上下でコンクリートの付着を切るためのセパレータにはOHPフィルム(厚さ0.1mm, PET樹脂製)を用いた。

#### (2) 試験方法

付着試験は一軸引張試験方法にて行った。

#### (3) 供試体概要

ダンベル型供試体にて試験を行った。繊維の埋め込みを供試体断面に対して垂直に行うために、型枠中央部にスポンジを用いた。検討ケースは、繊維本数を4種類として合計10ケース設けた。図-7にそれぞれの繊維の配置を示す。

### 2.3 結果および考察

#### ・付着試験

表-7に付着試験結果を示す。図-8に荷重-引抜き曲線を、表-8に繊維の破断を示す。試験結果より埋込長が大きくなるにしたがって最大引抜け荷重も大きくなっていることが確認できた。繊維数が2本、4本の場合には繊維数1本の場合より最大引抜け荷重の差は小さかった。

図-8より、荷重が上昇した後に急激に荷重が低下

するものを破断と判断した。繊維の破断はマトリックス中で生じていた。

図-9に埋込長と荷重の関係を示す。既往研究と同様に埋込長が大きくなるにつれて、最大荷重が大きくなる傾向が確認された。しかし、5mm-25mmの供試体では繊維を長く埋め込んだ方が引き抜け、他の供試体でも同様のケースをいくつか確認した。

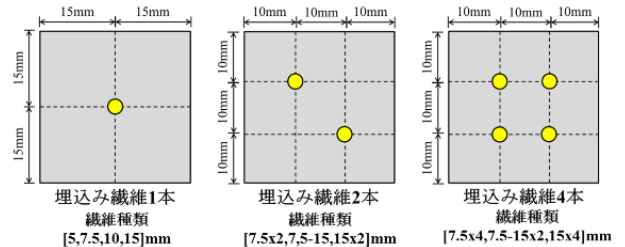


図-7 繊維の配置

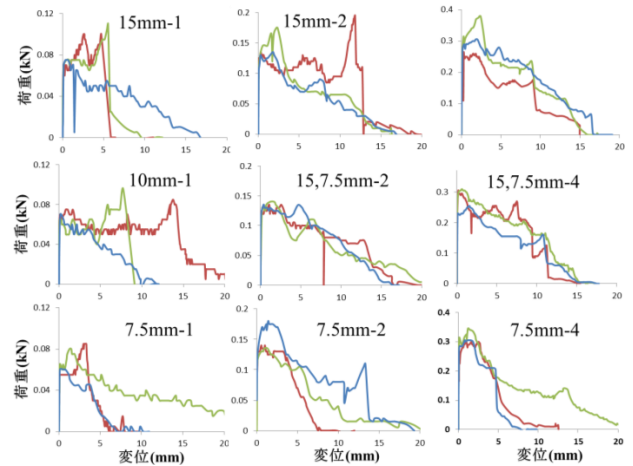


図-8 荷重-引抜き曲線

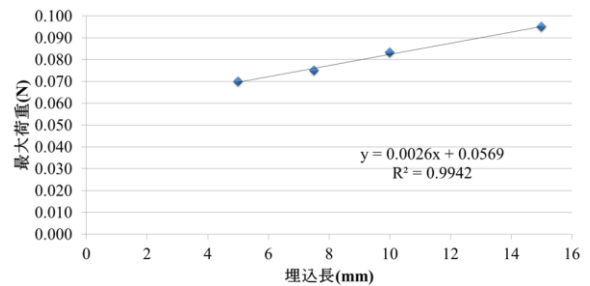


図-9 埋込長と荷重の関係

表-7 付着試験結果

| 供試体        |    | 最大荷重(N) | 最大荷重時の平均変位(mm) |
|------------|----|---------|----------------|
| 繊維長        | 本数 |         |                |
| 5mm        | 1  | 70.0    | 0.991          |
| 7.5mm      |    | 75.0    | 1.585          |
| 10mm       |    | 83.3    | 0.336          |
| 15mm       |    | 95.0    | 1.249          |
| 7.5mm      | 2  | 151.7   | 2.072          |
| 15mm       |    | 168.3   | 1.535          |
| 7.5mm,15mm |    | 136.7   | 1.450          |
| 7.5mm      | 4  | 318.3   | 1.865          |
| 15mm       |    | 316.7   | 7.230          |
| 7.5mm,15mm |    | 290.0   | 3.561          |

表-8 繊維の破断状況

| 供試体名        | 破断本数 | 供試体名        | 破断本数 | 供試体名     | 破断本数 |
|-------------|------|-------------|------|----------|------|
| 15mm-4A     | 2/4  | 15mm-2A     | 1/2  | 15mm-1A  | 1/1  |
| 15mm-4B     | 2/4  | 15mm-2B     | 0/2  | 15mm-1B  | 1/1  |
| 15mm-4C     | 1/4  | 15mm-2C     | 0/2  | 15mm-1C  | 0/1  |
| 7.5,15mm-4A | 3/4  | 7.5,15mm-2A | 0/2  | 10mm-1A  | 0/1  |
| 7.5,15mm-4B | 1/4  | 7.5,15mm-2B | 0/2  | 10mm-1B  | 1/1  |
| 7.5,15mm-4C | 2/4  | 7.5,15mm-2C | 0/2  | 10mm-1C  | 0/1  |
| 7.5mm-4A    | 0/4  | 7.5mm-2A    | 0/2  | 7.5mm-1A | 0/1  |
| 7.5mm-4B    | 0/4  | 7.5mm-2B    | 0/2  | 7.5mm-1B | 0/1  |
| 7.5mm-4C    | 1/4  | 7.5mm-2C    | 1/2  | 7.5mm-1C | 0/1  |
|             |      |             |      | 5mm-1A   | 0/1  |
|             |      |             |      | 5mm-1B   | 0/1  |
|             |      |             |      | 5mm-1C   | 0/1  |

・一軸引張試験結果との比較

1.4 の一軸引張結果と比較する。今回得られた引張抵抗力の値は 1.4 の引張供試体の断面で観察される繊維の 1 本当りの引張抵抗力の値と同レベルであった。繊維の破断・引抜け状況では、1.4 に比べると破断の割合が少ない結果となった。

2.4 まとめ

- 本実験では以下のような知見が得られた。
- 繊維の破断はいずれもマトリックス中で生じていた。
- 本論の試験条件では、繊維 1 本の破断荷重は約 100N であり、カタログ値のおよそ 1/3 であった。
- 繊維 1 本の埋込長と荷重の関係から既往研究と同様に、埋込長による引抜け荷重への影響を確認できた。
- 埋込長が大きい側が引き抜けた現象は、使用した FRC が高強度であり、繊維の伸びをマトリックスに拘束されてしまい、引き抜く力が繊維の奥の方まで、伝わらないためだと考察される。
- 繊維の埋込角度が繊維の破断・引抜けに影響を与えている可能性を確認した。

3. FRC 製版状部材の曲げ試験

3.1 はじめに

FRC 製版状部材の曲げ試験として、部材形状の違いが FRC 版状部材の性能に与える影響を検討した。PE 繊維を用いてリブの有無による部材形状の異なる 6 種類の供試体を作製し、曲げ試験を行った。

3.2 実験概要

(1) 使用材料

表-2 の⑤を使用した。

(2) 試験方法

・曲げ試験

リブ付きとリブ無しの 2 種類の供試体を用いて曲げ試験を行った。リブ付きの供試体は、リブ部分が圧縮側になるように供試体を試験機にセットし載荷した。

(3) 供試体概要

PE 繊維を用いてリブの有無により異なる 6 種類の無

筋版状部材を作製した。それぞれの形状・寸法を図-10 に示す。

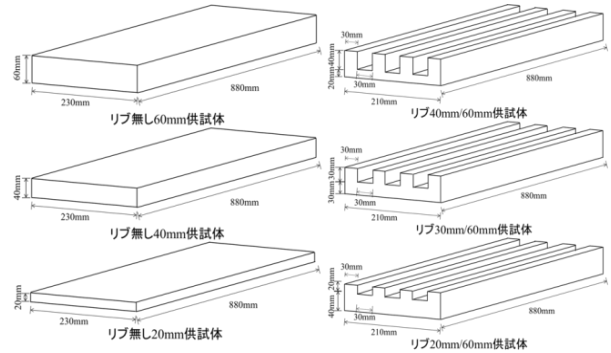


図-10 供試体寸法

3.3 結果および考察

試験結果を表-9 に示す。

表-9 3 試験結果

| 供試体種類  | 重量(kg) | 最大荷重(kN) | 終局たわみ(mm) | 断面係数 (mm <sup>3</sup> ) |
|--------|--------|----------|-----------|-------------------------|
| リブ40mm | 15.3   | 6.92     | 26.224    | 107538                  |
| リブ30mm | 16.76  | 8.49     | 24.278    | 108237                  |
| リブ20mm | 19.12  | 6.69     | 13.869    | 108000                  |
| 60mm   | 23.26  | 8.65     | 15.610    | 129000                  |
| 40mm   | 15.52  | 5.16     | 28.213    | 57333                   |
| 20mm   | 8.32   | 1.89     | 72.362    | 14333                   |

・曲げ試験結果

圧縮および一軸引張試験の結果から、使用した FRC のばらつきが少なかったため、各供試体の供試体質量と最大荷重を比較した。図-11 に供試体質量と最大荷重の関係を示す。部材形状による差がないリブ無しの供試体にて、供試体質量と最大荷重の相関をとると寄与率は 94% と高く、強い相関関係であることを示した。30mm/60mm の供試体では、荷重の値が最も高く、近似線から求めた最大荷重よりも 38% 高くなった。

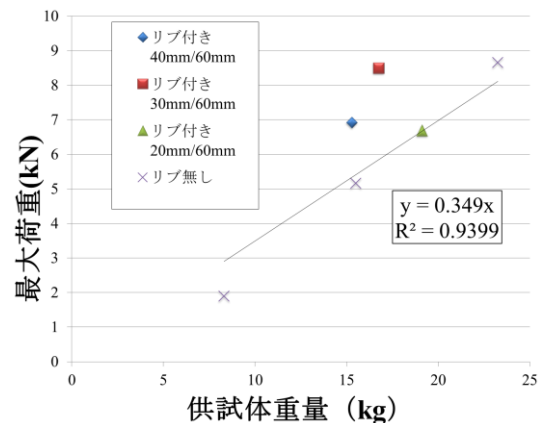


図-11 質量と荷重の関係

3.4 まとめ

本実験では以下のような知見が得られた。

- リブ無し供試体の質量と最大荷重に強い相関を確認した。この相関から得られた供試体質量に相当する荷重よりも大きく、リブを付けたことによる形状効果が確認された。