

# 論文 中空のシラスバルーンを用いて吹付け後の空気量を確保した HPFRCC の引張性能

山田 裕一郎\*<sup>1</sup>・森井 直治\*<sup>2</sup>・加藤 豊\*<sup>3</sup>・六郷 恵哲\*<sup>4</sup>

**要旨:** 空気量および空隙構造が複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の引張性能に与える影響を評価する目的で, 3 種類の方法 (巻込み, AE 剤, 中空骨材 (シラスバルーン)) により空気を導入し HPFRCC の引張特性を評価した。引張強度および終局ひずみは, 中空骨材, AE 剤, 巻込みの順に大きくなった。さらに, 巻込みおよび AE 剤によって導入した空気は, 吹付け施工時の圧力によって消失したため, 吹付け施工後の引張性能が低下した。しかし中空骨材によって導入した空気は, 吹付け施工時の圧力によって消失しなかったため, 吹付け施工後においても引張性能が低下しないことが明らかとなった。

**キーワード:** HPFRCC, 空隙構造, 中空骨材, シラスバルーン, 引張性能, 吹付け施工

## 1. はじめに

HPFRCCはセメント系材料と短繊維を用いた複合材料であり, 一軸引張応力下において擬似ひずみ硬化特性を示し, 微細で高密度の複数ひび割れを形成する極めて高靱性な材料である<sup>1)</sup>。

HPFRCCは複数で微細なひび割れを形成することにより, 劣化因子の進入抑制や引張補強の効果が期待されている。そのため, 強度特性 (初期ひび割れ発生強度・引張強度) , ひび割れ特性 (ひび割れ幅・ひび割れ間隔) を評価することが極めて重要となり, 一般に一軸引張試験によってこれらの特性は評価されている。しかしながら, 供試体によってこれらの特性の試験結果にばらつきが生じることが明らかになっている<sup>2)</sup>。これらのばらつきの要因として, (1) 繊維の特性, 繊維の分散, 配向, およびマトリクスとの付着 (2) マトリクス強度と架橋強度の大小関係 (3) 空気量・空隙構造の違いなどが考えられる。(1) については従来のマイクロメカニクス理論<sup>3)</sup>により説明することができる。(2) についてはこれまでに検討をおこなってきた<sup>4)</sup>。しかし, (3) について十分な検討はなされていない。

ダンベル供試体を用いた一軸引張試験では, 巻込み空気のような大きな空隙は欠陥となる。その結果, 引張強度や終局ひずみが小さな値となると考えられる。流込み施工において, AE 剤によって導入された微小な空気は, HPFRCC の終局ひずみを増大させると考えられる。しかしながら, HPFRCC を吹付けにより実構造物へ施工する場合, AE 剤によって導入された空気は, 吹付けの圧力によって消失してしまう。その結果, 流込みで作製した HPFRCC と吹付けで作製した HPFRCC で異なった引張

性能が現れる場合がある。これらのことから HPFRCC の引張性能を評価するうえで, 空気量および空隙構造を管理することが極めて重要になる。

本研究では, 空気量および空隙構造 (径の大小・殻の有無) の違いが HPFRCC の引張性能に与える影響を評価するため, 巻込み, AE 剤, 中空骨材の 3 種類の方法によって導入した空気量が異なる HPFRCC の, 引張性能を評価した。さらに, 中空骨材によって導入した空気は殻で保護されており, 吹付けの圧力によって消失しないと考えられたため, 空気量および空隙構造の異なる HPFRCC の吹付け前後における引張性能の評価を行った。中空骨材として用いたシラスバルーンは SiO<sub>2</sub> を含む材料であるため, この材料については活性度試験を行い, ポズラン反応性の有無について検討を行った。

## 2. 流込みによって作製した HPFRCC の引張性能

### 2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。短繊維は, 高強度ポリエチレン繊維 ( $\phi 0.012 \times 12\text{mm}$ , 引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa) を用いた。中空骨材はシラスバルーン MSB-301 (密度 0.6g/cm<sup>3</sup>, 強度 8-10MPa, 主成分 SiO<sub>2</sub> 75-77%) を用いた。中空骨材の粒径は AE 剤によって導入する空気の粒径と同程度とするため, 平均粒度 40  $\mu\text{m}$  とした。

### 2.2 供試体概要

供試体水準を表-2 に, 配合を表-3 に示す。空気の導入方法は巻込み, AE 剤, 中空骨材とする。巻込みおよび AE 剤の水準の配合は配合 1 を基準とし, 空気量のみ変化させた。巻込み空気の量は消泡剤を用いて調整した。AE 剤および中空骨材によって空気を導入した供試

\*1 岐阜大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 (株) デーロス・ジャパン 代表取締役 (正会員)

\*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科

\*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

表-1 使用材料

| 材料       |   |
|----------|---|
| ポリエチレン繊維 | 繊維径 12 $\mu$ m, 繊維長 12mm,<br>引張強度 2.6GPa, 弾性係数 88GPa, |
| セメント     | JIS R 5210 早強ポルトランドセメント                               |
| 細骨材      | 7号珪砂  |
| 中空骨材     | シラスバルーン MSB-301                                       |
| 高性能AE減水剤 | カルボキシル基含有ポリエーテル系                                      |
| 消泡剤      | ポリアルキレングリコール誘導剤                                       |
| AE剤      | アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤                                    |

表-2 供試体水準（流込み）

| 空気の導入方法 | 空気量(%) |   |    |    |
|---------|--------|---|----|----|
| 巻き込み空気  | 0      | 5 | 10 | 15 |
| AE剤     |        | 5 | 10 | 15 |
| 中空骨材    |        | 5 | 10 | 15 |

表-3 配合表

|         | 水セメント比 (%) | セメント (kg/m <sup>3</sup> ) | 珪砂 (kg/m <sup>3</sup> ) | 中空骨材 (kg/m <sup>3</sup> ) | 繊維 (vol%) |
|---------|------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-----------|
| 配合1     | 35         | 1086                      | 542                     | 0                         | 1.5       |
| 中空骨材5%  |            |                           | 410                     | 30                        |           |
| 中空骨材10% |            |                           | 279                     | 60                        |           |
| 中空骨材15% |            |                           | 148                     | 90                        |           |

表-4 配合表（活性度試験）

|         | 水セメント比 (%) | セメント (kg/m <sup>3</sup> ) | 珪砂 (kg/m <sup>3</sup> ) | 中空骨材 (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------|------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 基準配合    | 35         | 1086                      | 542                     | 0                         |
| 中空骨材15% | 61         | 624                       | 542                     | 90                        |

体は始めに消泡剤によって巻き込み空気を消し、その後AE剤および中空骨材によって空気を導入した。中空骨材は珪砂と体積で置換し導入した。

### 2.3 試験方法

#### (1) 活性度試験

中空骨材はSiO<sub>2</sub>を含む材料であるため、活性度試験を行いポズラン反応について検討を行った。配合を表-4に示す。従来の活性度試験では中空骨材とセメントとの密度差が大きいので、質量置換は困難である。そこで本研究では中空骨材の混入率を体積で15%とし、セメントとの体積置換を行った。供試体はΦ50×100mmの円柱供試体とした。試験時の材齢は28日および91日とし、供試体数は各3体とした。活性度指数は式(1)によって算出した。

$$A_s = \frac{C_2}{C_1} \times 100 \quad (1)$$

ここで、A<sub>s</sub>：活性度指数、C<sub>1</sub>：各材齢における基準モルタルの圧縮強度、C<sub>2</sub>：各材齢における試験モルタルの圧縮強度、とした。

#### (2) 空気量およびフロー試験

空気量は単位容積質量試験法により測定した。AE剤

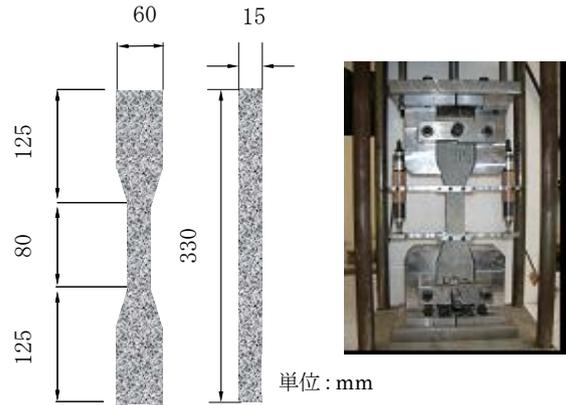


図-1 供試体寸法および荷重方法

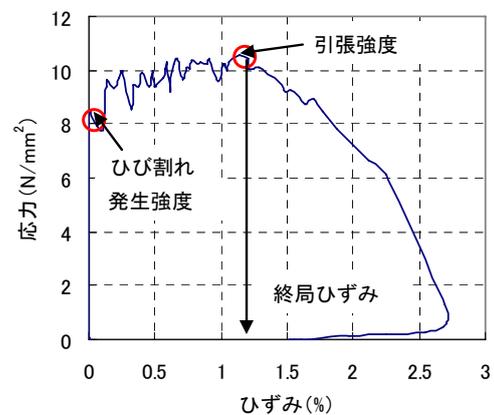


図-2 引張応力-ひずみ関係

および中空骨材によって空気を導入する場合には、始めに巻き込み空気が消泡剤によって消えたことを確認し、その後AE剤および中空骨材により空気を導入した。フロー値はフローテーブル試験機を用いて測定した。また本試験では全ての目標フロー値がほぼ一定となるよう調整した。

#### (3) 圧縮強度試験

空気量および空隙構造の違いが圧縮強度に与える影響について検討するため、Φ50×100mmの円柱供試体を用いて圧縮強度を測定した。供試体数は各水準とも3体とした。

#### (4) 一軸引張試験

ダンベル供試体の寸法および荷重方法を図-1に示す。供試体寸法は厚さ15mm、幅60mm、長さ330mmとし、中央部の検長区間は80mmとした。供試体数は各水準10体とした。供試体の端部の固定条件は下端を固定支持、上端を回転支持とし、変位は試験体両側に取り付けた高感度変位計で計測した。図-2に引張応力-ひずみ関係の例を示す。全ての試験体の引張応力-ひずみ関係において、初期ひび割れ発生強度（始めに応力が低下した点）、引張強度（軟化開始点における応力）、終局ひずみ（軟化開始点のひずみ）を求めた。

表-5 供試体水準 (吹付け)

| 空気の導入方法 | 空気量 (%) |   |    |
|---------|---------|---|----|
|         | 0       | 5 | 10 |
| 巻き込み空気  | ○       | ○ | ○  |
| AE剤     | ○       | ○ | ○  |
| 中空骨材    | ○       | ○ | ○  |

表-6 活性度指数

|         | 圧縮強度 |       | 活性度指数 |      |
|---------|------|-------|-------|------|
|         | 28日  | 91日   | 28日   | 91日  |
| 基準配合    | 92.1 | 108.1 | 46.1  | 43.8 |
| 中空骨材15% | 42.5 | 47.3  |       |      |

表-7 空気量試験結果

| 空気導入方法 | 計測空気量 (%) | 計測空気量 (%) |           |           |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|        |           | 5 (5)     | 11.2 (10) | 14.6 (15) |
| 巻き込み   | 0.9 (0)   |           |           |           |
| AE剤    |           | 5.9 (5)   | 9.8 (10)  | 15.7 (15) |
| 中空骨材   |           | 6.1 (5)   | 10.7 (10) | 13.8 (15) |

\*()内は目標空気量

### 3. 吹付けによって作製した HPFRCC の引張性能

#### 3.1 使用材料および供試体概要

使用材料および配合は 2.1 節と同様とした。供試体水準を表-5 に示す。目標空気量 0%, 全ての空気導入方法の目標空気量 10%, および中空骨材によって 5%空気を導入した水準の、吹付け前後における引張特性を比較検討した。ダンベル型供試体は型枠に材料を直接吹付けて作製した。

#### 3.2 試験方法

空気量およびフローの試験方法は 2.3.2 節と同様とし、吹付け前後において測定した。圧縮強度試験および一軸引張試験は供試体数を除き、2.3.3 節および 2.3.4 節と同様とした。供試体数は各水準とも、ダンベル供試体 5 体、円柱供試体 3 体とした。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 流込み供試体

##### (1) 活性度試験

表-6 に各材齢における圧縮強度および活性度指数を示す。活性度指数は 28 日で 46.1, 91 日において 43.8 とわずかに低下しており、活性度は認められなかった。このことから、中空骨材 (シラスバルーン) によるポズラン反応が、圧縮強度および引張性能に与える影響は無いと考えられる。

##### (2) 空気量およびフロー試験

表-7 に空気量試験の結果を示す。中空骨材によって空気を導入した供試体の空気量は、中空骨材で空気が模擬されると仮定し、計測空気量に中空骨材の混入率を足

した値とした。フロー値は中空骨材混入率 15%を除き、全ての水準で 125mm (0 打), 150mm (15 打)前後となった。中空骨材混入率 15%のフロー値は、120mm (0 打), 140mm (15 打)となり、他の水準と比べて小さな値を示した。

#### (3) 圧縮強度試験

図-3 に空気量と平均圧縮強度の関係を示す。全ての供試体において、空気量の増加に伴い平均圧縮強度が低下した。その低下程度は、空気量 10%まではほぼ同程度あるが、中空骨材による空気量 15%では、平均圧縮強度の低下がほとんどなく、平均圧縮強度は他の供試体に比べて高くなった。

#### (4) 一軸引張試験

図-4 に空気量と平均初期ひび割れ発生強度との関係を示す。空気量の増加とともにわずかであるが、平均初期ひび割れ発生強度が若干低下する傾向があった。しかし、中空骨材によって空気を導入した場合、平均初期ひび割れ発生強度が 1N/mm<sup>2</sup>程度高くなった。

図-5 に空気量と平均引張強度の関係を示す。巻き込みおよび AE 剤によって空気を導入した水準の平均引張強

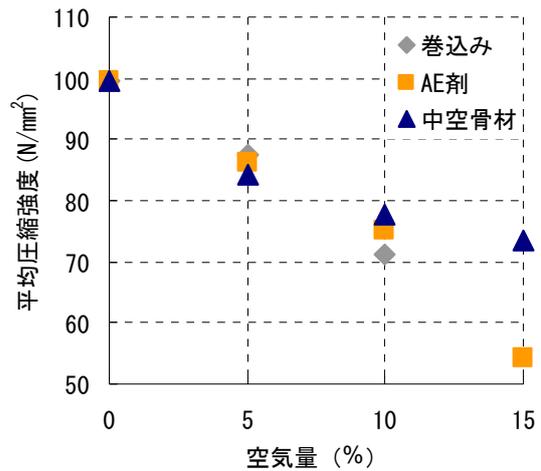


図-3 空気量と平均圧縮強度の関係

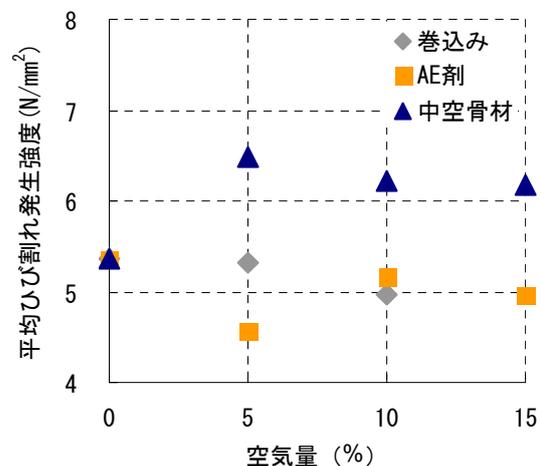


図-4 空気量と平均ひび割れ発生強度の関係

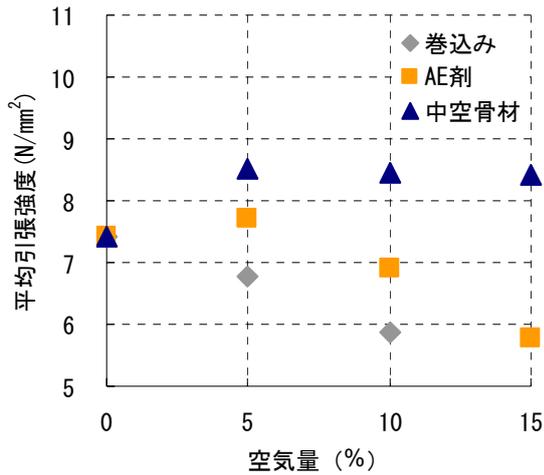


図-5 空気量と平均引張強度の関係

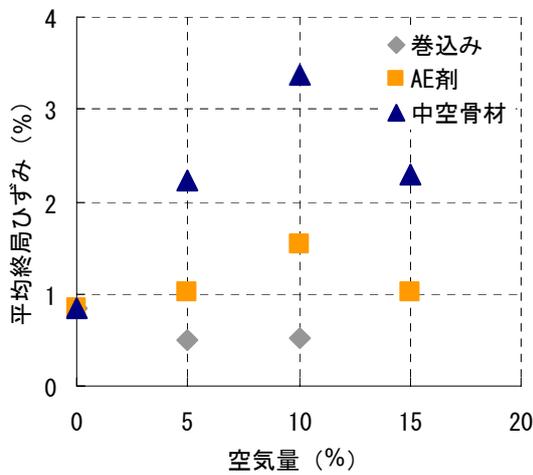


図-6 空気量と平均終局ひずみの関係

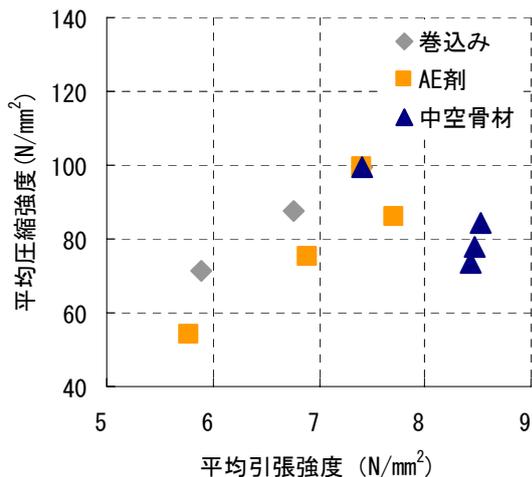


図-7 平均圧縮強度と平均引張強度の関係

度は、空気量の増加に伴い減少した。これは供試体の断面積が気泡により減少したことが要因と考えられる。中空骨材によって空気を導入した水準の平均引張強度は、空気量が増加しても低下しなかった。また空気の導入方法

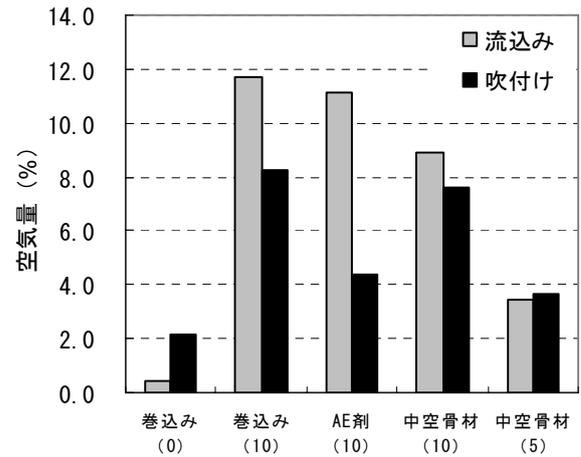


図-8 吹付け前後の空気量

で比較した場合、平均引張強度は中空骨材が最も高く、巻込み、AE 剤の順に小さくなる傾向がみられた。さらに、空気量 15%で比較した場合、中空骨材と AE 剤との平均引張強度の差は  $3\text{N/mm}^2$  程度であった。図-6 に空気量と平均終局ひずみの関係を示す。平均終局ひずみは中空骨材が最も大きく、巻込み、AE 剤の順に小さくなる傾向がみられた。中空骨材および AE 剤によって空気を導入した供試体の平均終局ひずみは、空気量 10%で最大の平均終局ひずみとなった。また、巻込みによって空気を導入した供試体において、空気量が増加しても平均終局ひずみは、増加しなかった。中空骨材で空気を導入した水準と他の水準との平均終局ひずみの差は、最大で 3%程度となった。

これらの結果から、巻込み空気のような径の大きな空隙は、終局ひずみを低下させてしまうため、径の小さな空隙を導入することが有効であると考えられる。また中空骨材は、AE 剤、巻込みによる気泡とは異なり殻（強度）を有しているため、繊維とマトリクスとの付着状況が良好になり、中空骨材で空気を導入した水準で終局ひずみや引張強度が、他の水準と比べ極めて大きな値を示す結果となったと考えられる。

図-7 に平均圧縮強度と平均引張強度の関係を示す。巻込みおよび AE 剤によって空気を導入した供試体は、平均圧縮強度の低下に伴い平均引張強度も低下した。しかし、中空骨材によって空気を導入した供試体においては、平均圧縮強度が低下しても平均引張強度は、低下しなかった。

#### 4.2 吹付け供試体

##### (1) 空気量およびフロー試験

図-8 に各水準における吹付け前後の空気量を示す。吹付けの圧力によって、巻込み 10%の水準においては 4%、AE 剤 10%の水準においては 8%の空気量が、減少した。また、中空骨材 5%、中空骨材 10%の水準において空気

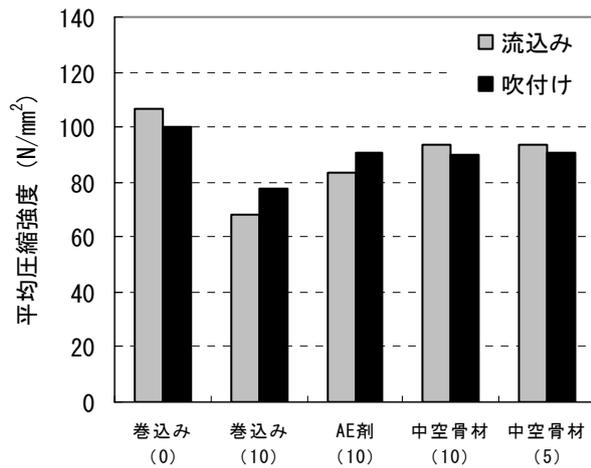


図-9 吹付け前後の平均圧縮強度

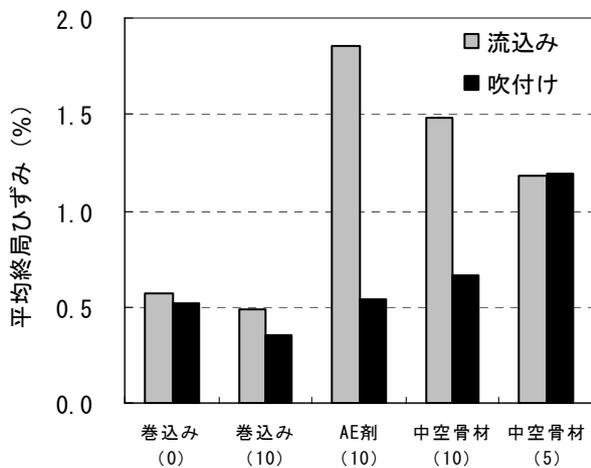


図-10 吹付け前後の平均終局ひずみ

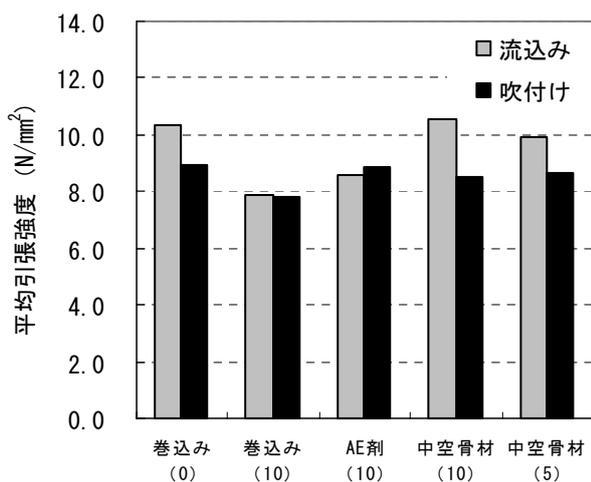


図-11 吹付け前後の平均引張強度

量の減少は、ほとんど確認されなかった。このことから、中空骨材で導入した空気は、吹付けの圧力によって消失しにくいことが明らかとなった。

フロー値は、巻込み 0%および中空骨材混入率 10%を除き、全ての水準で 125mm (0 打), 150mm (15 打)前後と

なった。巻込み 0%および中空骨材混入率 10%のフロー値は、120mm (0 打), 140mm (15 打), となり、他の水準と比べて小さな値を示した。

### (2) 圧縮強度試験

図-9 に各水準における、吹付け前後の平均圧縮強度を示す。巻込みおよび AE 剤により導入した空気が、吹付けの圧力によって消失したことによって、巻込み 10%および AE 剤 10%の水準において、吹付け後の供試体の平均圧縮強度が 10N/mm<sup>2</sup>程度高くなった。しかし、中空骨材によって導入された空気は、吹付けの圧力によって消失しなかったため、中空骨材によって空気を導入した水準の平均圧縮強度は、吹付け後も変化しなかった。

### (3) 一軸引張試験

図-10 に各水準における吹付け前後の平均終局ひずみを示す。AE 剤および中空骨材によって空気を導入した水準の平均終局ひずみは、巻込みによって空気を導入した水準の平均終局ひずみより 1%程度大きくなった。AE10%の水準において、吹付け後の平均終局ひずみが著しく減少した。これは図-8 に示したとおり、吹付けの圧力によって、AE 剤で導入した空隙が大幅に減少したことが原因として考えられる。

図-10 から分かるように、中空骨材 5%の水準の平均終局ひずみは、吹付け後においても減少しなかった。これは中空骨材によって導入した空気が、吹付けの圧力によって消失しなかったため、大きな終局ひずみが確保できたと考えられる。しかしながら、中空骨材 10%の水準において吹付け後の平均終局ひずみが減少した。これはフロー値が他の水準より小さくなったため、吹付け施工に不向きな材料となってしまったことが原因と考えられる。中空骨材 10%においてもフロー値をうまくコントロールすれば、吹付け後の終局ひずみの減少を抑制することができると考えている。これらの結果から、中空骨材によって空気を導入することによって、吹付け後の引張性能の低下を抑制できる可能性があることが明らかとなった。しかし、本研究においては AE 剤 5%の水準との比較を行っていないため、今後検討していく必要があると考えている。さらに、AE 剤と中空骨材を併用して空気を導入した HPCRCC の引張性能についても、検討していく予定である。

図-11 に各水準における吹付け前後の平均引張強度を示す。巻込み 10%および AE 剤 10%の水準においては、吹付け前後の平均引張強度に変化は見られなかった。中空骨材 10%の平均引張強度は吹付け後において 2N/mm<sup>2</sup>低下した。この引張強度の低下により、中空骨材 10%の水準において、引張強度と初期ひび割れ発生強度の差が減少し、終局ひずみが低下する結果となったと考えられる。

## 5. まとめ

空気量および空隙構造が HPFRCC の引張性能に与える影響を評価する目的で、3 種類の方法(巻込み, AE 剤, 中空骨材 (シラスバルーン))により空気を導入した HPFRCC の引張特性を評価し、以下の結果を得た。

- (1) 巻込み空気のような径の大きな空気は欠陥となり、終局ひずみを低下させた。AE 剤により径の小さな空気を導入することで、終局ひずみが増大した。さらに、中空骨材のような殻を持つ空気を導入することで大幅な終局ひずみの増加が確認された。また、AE 剤および中空骨材の水準において、空気量 10%で終局ひずみが最大となり、15%導入すると減少する傾向がみられた。
- (2) 巻込みおよび AE 剤によって空気を導入した水準において、引張強度が空気量の増加に伴い減少した。しかし、中空骨材によって空気を導入した水準の引張強度は、空気量が増加しても低下しなかった。
- (3) 巻込みおよび AE 剤によって空気を導入した供試体では、圧縮強度の低下に伴い引張強度も低下した。しかし中空骨材によって空気を導入した供試体においては、圧縮強度が低下しても引張強度は低下しなかった。
- (4) 巻込みおよび AE 剤によって導入された空気は、吹付けの圧力によって消失した。しかし、中空骨材で導入した空気は吹付けの圧力によって消失しなかった。
- (5) AE 剤により空気を導入した水準において、吹付け後の終局ひずみが著しく減少した。しかし、中空骨材によって空気を 5%導入した水準において、吹付け後

の終局ひずみは減少しなかった。このことから、吹付け施工において、中空骨材のような殻(強度)を持つ空気を導入することで HPFRCC の引張性能が向上することが明らかとなった。

以上の結果、HPFRCC に中空骨材(シラスバルーン)を用いることで、吹付け施工後の空気量が確保でき、終局ひずみの低減を抑制できることが明らかとなった。

本研究では中空骨材で空気を模擬し、実験および検討を行った。しかし、中空骨材ではなく微小で強度の低い骨材を導入することで、中空骨材と同程度の効果を得ることができる可能性もある。この点については今後の検討課題としたい。

## 参考文献

- 1) 土木学会；複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針(案)コンクリートライブラリー, No.127, pp.1-4, 2007
- 2) 稲熊唯史 他；HPFRCC の曲げ挙動の寸法効果ならびに引張特性との関係, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.369-374, 2007
- 3) 閑田徹志 他；ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC の材料設計と開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.2, pp.229-234, 1998
- 4) Yuichiro Yamada etc ; Discussions of Conditions for Multiple Cracking of HPFRCC Based on Variability of Strength Properties, 8<sup>th</sup> International Symposium on Utilization of High-Strength and High - Performance Concrete, Vol.2, pp.1113-1118, 2008