

論文 ダンベル型供試体を用いた凍結融解作用後のHPFRCCの引張性能の評価と中空骨材の効果

中島 隆^{*1}・大畑 卓也^{*2}・中澤 里^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨: 中空骨材 (MSB, SL) を用いた HPFRCC および高流動モルタルの凍結融解抵抗性能を角柱供試体 (打込み施工により作製) により評価した。凍結融解作用前後における HPFRCC の引張性能を評価するため、ダンベル型供試体を用いて凍結融解試験を行った後に、一軸引張試験を行った。高流動モルタルの凍結融解抵抗性能を、中空骨材 SL は低下させたが、中空骨材 MSB は改善した。HPFRCC は、空気量や中空骨材 MSB の混入量に関わらず、十分な凍結融解抵抗性能を有していた。HPFRCC は、凍結融解試験後においても十分な引張性能を有しており、中空骨材 MSB を HPFRCC に混入すると、終局ひずみが大きくなった。

キーワード: HPFRCC, 中空骨材, 凍結融解抵抗性能, 引張性能

1. はじめに

コンクリート構造物に用いられる補修材の一つである複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (以下 HPFRCC) は、引張応力下において擬似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れ特性を持つ材料である¹⁾。

一般に、HPFRCC を用いて劣化したコンクリート構造物の補修を行う場合、高速大量施工が可能な吹付け工法が多く用いられる。しかし HPFRCC を吹付け工法で施工した場合、AE 剤で導入したコンクリート中の空気泡の大部分が、吹付け時に消失してしまう。その結果、HPFRCC の引張性能 (引張強度、終局ひずみ) および凍結融解抵抗性が低下してしまう可能性がある。筆者らは、HPFRCC に中空骨材を用いて空気を導入し、吹付け後における HPFRCC の引張性能の確保を目的とした研究を別途行っている。本研究では、中空骨材が HPFRCC の凍結融解抵抗性能に及ぼす影響を明らかにすることを目的としている。

本研究では、中空骨材を用いた HPFRCC の凍結融解抵抗性能を評価するため、AE 剤あるいは中空骨材を用いて空気を導入した HPFRCC の凍結融解試験を行った。HPFRCC のマトリクスに相当する高流動モルタルに、中空骨材を導入して作製した供試体の凍結融解抵抗性能についても検討した。凍結融解前後における HPFRCC の引張性能を評価するため、ダンベル型供試体を用いて凍結融解試験を行った後に、一軸引張試験を行った。

2. 角柱供試体を用いた凍結融解試験

2.1 実験概要

(1) 使用材料および供試体

使用材料および中空骨材の材料特性を表-1, 表-2 に示す。

平均粒径が 50 μ m 程度のシラスバルーン骨材 (以下 MSB) および中空セラミックバルーン骨材 (以下 SL) の 2 種類の中空骨材を用いた。中空骨材の特徴として、MSB と比較し、SL は骨材の吸水性が低く、殻が硬い。HPFRCC には高強度ポリエチレン繊維 (繊維径 12 μ m, 繊維長 12mm, 引張強度 2600MPa, 弾性係数 88GPa) を体積率で 1.5% 使用した。

高流動モルタルと HPFRCC を用いて、打込み施工により凍結融解試験用の角柱供試体 (100 \times 100 \times 400mm) を作製した。消泡剤により空気量 0% 供試体の水準を作製することで、吹付け施工による気泡の消失を模擬し、実験を行った。高流動モルタルおよび HPFRCC の配合を表-3, 表-4 に示す。高流動モルタルは、HPFRCC の配合から繊維を除いた配合とした。高流動モルタルおよび HPFRCC の供試体水準を表-5 に示し、各水準 2 体ずつ作製した。

流し込みの打設方法で用いられる HPFRCC の場合、引張性能の確保に適した空気量は、10% 程度とされている。吹付け工法で HPFRCC を用いる場合にも、引張性能を確保するためには、空気量を 10% 程度とするとよいと考え、空気泡の代わりに中空骨材を 10% 程度混入した HPFRCC を作製し、凍結融解抵抗性能を検討することとした。すなわち、HPFRCC への中空骨材の混入量を、体積率で 5%, 10%, 15% とした。また、中空骨材の影響をより明確にするために、中空骨材の混入量を、体積率で 0%, 1%, 5%, 10% とした高流動モルタルを作製した。高流動モルタルには、MSB と SL を用い、HPFRCC には MSB を用いた。

高流動モルタルおよび HPFRCC の計測空気量を表-6 に示す。混入した中空骨材が空気を模擬できると仮定し、中空骨材の混入量と単位容積質量試験方法により算出した空気量の和を計測空気量とした。HPFRCC は、巻き込み空気を消

*1 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 (正会員)

*2 岐阜大学大学院 工学研究科 社会基盤工学専攻 (正会員)

*3 岐阜工業高等専門学校 環境都市工学科

*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

| 使用材料 | |
|-------------|--|
| 高強度ポリエチレン繊維 | 繊維径12μm, 繊維長12mm, 引張強度2600MPa, 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 | シラスパルーン MSB-301 中空セラミックパルーン SL-75 |
| 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 中空骨材の材料特性

| 中空骨材 | 平均粒径 | 密度 (g/cm ³) | 殻の強度 (MPa) |
|------|------|-------------------------|------------|
| MSB | 50μm | 0.6 | 8-10 |
| SL | 45μm | | 70 |

表-3 高流動モルタルの配合

| 高流動モルタル | 水セメント比 (%) | セメント (kg/m ³) | 7号珪砂 (kg/m ³) | 中空骨材 (kg/m ³) |
|---------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| MSB0% | 30 | 1264 | 395 | 0 |
| MSB1% | | | 368 | 6 |
| MSB5% | | | 263 | 30 |
| MSB10% | | | 132 | 60 |
| SL10% | | | 132 | 60 |

泡するために、消泡剤を添加して巻き込み空気の調節を行った。AE10%供試体では、消泡剤で巻き込み空気を消した後に、AE剤を添加して10%の連行空気を導入した。供試体作製後、凍結融解試験を行うまでに2週間の水中養生を行った。

(2) 凍結融解試験

本研究では、JIS A 1148-A 法²⁾に従い凍結融解試験を行った。凍結温度を-18℃、融解温度を5℃とした。1サイクルを3時間とし、300サイクルで試験終了とした。計測項目は、30サイクルごとの質量と1次共鳴振動数とした。質量変化率は式(1)、相対動弾性係数は式(2)により算出した。質量変化率を用いて、スクーリング劣化を評価し、相対動弾性係数を用いて、内部劣化を評価した。

$$W_n = \frac{(w_n - w_0)}{w_0} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 W_n は凍結融解 n サイクル後の質量変化率(%), w_n は凍結融解 n サイクル後の供試体の質量(g), w_0 は凍結融解 0 サイクルにおける供試体の質量(g)である。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (2)$$

表-4 HPFRCC の配合*

| HPFRCC | 水セメント比 (%) | セメント (kg/m ³) | 7号珪砂 (kg/m ³) | 中空骨材 (kg/m ³) | 繊維 (vol%) |
|--------|------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------|
| AE0% | 35 | 1086 | 542 | 0 | 1.5 |
| AE10% | | | 542 | 0 | |
| MSB5% | | | 410 | 30 | |
| MSB10% | | | 279 | 60 | |
| MSB15% | | | 148 | 90 | |

* 空気量を5%と仮定した場合の値である

表-5 供試体水準

| 供試体水準 (空気導入方法) | 目標空気量 (%) | | | | |
|-------------------|-----------|---|---|----|----|
| | 0 | 1 | 5 | 10 | 15 |
| 高流動モルタル (MSB) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 高流動モルタル (SL) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| HPFRCC (MSB) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| HPFRCC (AE剤) | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |

表-6 計測空気量

| 高流動モルタル | 計測空気量 (%) | HPFRCC | 計測空気量 (%) |
|---------|-----------|--------|-----------|
| MSB0% | 0.7 (0) | AE0% | 0.8 (0) |
| MSB1% | 1.8 (1) | AE10% | 11.0 (10) |
| MSB5% | 5.1 (5) | MSB5% | 4.9 (5) |
| MSB10% | 10.0 (10) | MSB10% | 9.7 (10) |
| SL10% | 10.4 (10) | MSB15% | 13.0 (15) |

()内は目標空気量

ここで、 P_n は凍結融解 n サイクル後の供試体の相対動弾性係数(%), f_n は凍結融解 n サイクル後のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz), f_0 は凍結融解 0 サイクルにおけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)である。

2.2 結果と考察

(1) HPFRCC

HPFRCC の相対動弾性係数および質量変化率の結果を図-1, 図-2に示す。300サイクル時の計測において、AE0%, 10%, MSB5%ならびに10%供試体は、質量および相対動弾性係数に若干の増加が確認された。この理由として、水の供給により質量が増加し、HPFRCC中の未水和セメントの水和が進んだことで相対動弾性係数が増加したと考えられる。また繊維の架橋効果により劣化の進行が抑制されたことも考えられる。

MSB15%供試体は、他の供試体と比較し、質量の増加が大きく、相対動弾性係数が僅かながら低下した。この理由として、中空骨材の混入量が多すぎたことが考えられる。しかし質量や相対動弾性係数の変化は小さく、十分な凍結融解抵抗性能を有していると考えられる。

(2) 高流動モルタル

高流動モルタルの相対動弾性係数および質量変化率の結果を図-3, 図-4に示す。SL10%供試体は、300サイクル時の計測で破壊を確認した。SL10%供試体は、中空骨材を用いない供試体(MSB0%供試体)と比較しても、凍結融解抵抗

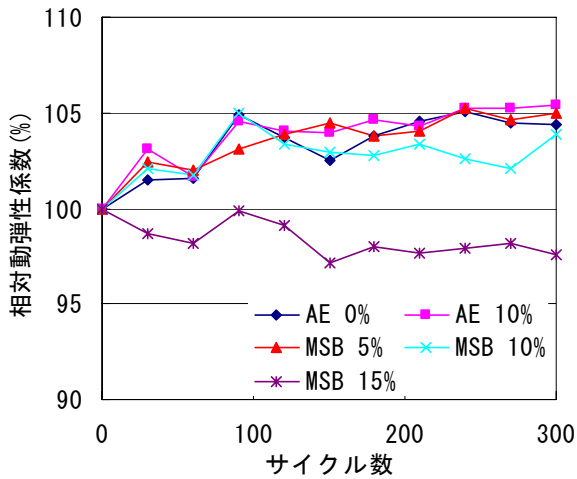


図-1 HPRCの相対動弾性係数

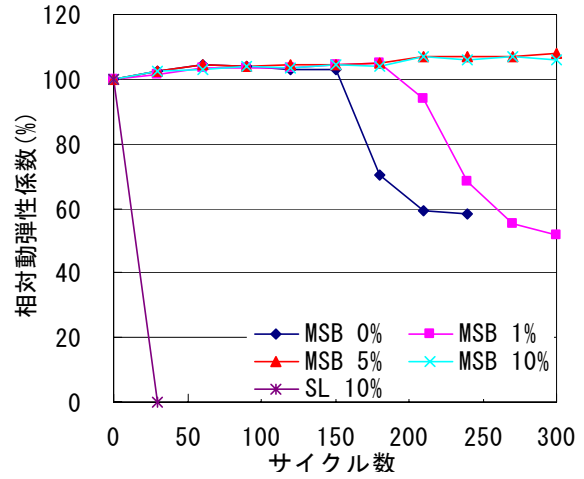


図-3 高流動モルタルの相対動弾性係数

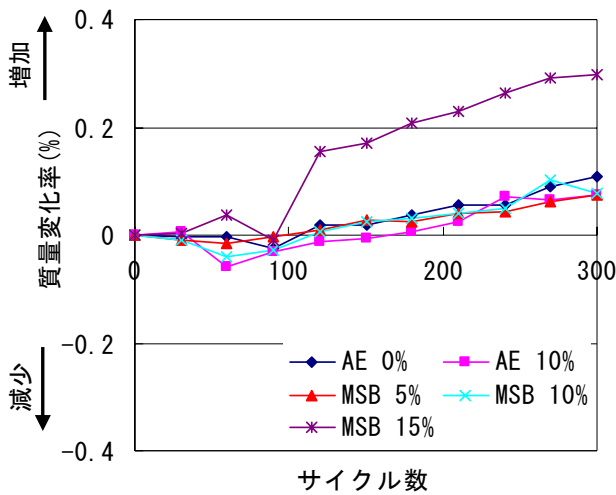


図-2 HPRCの質量変化率

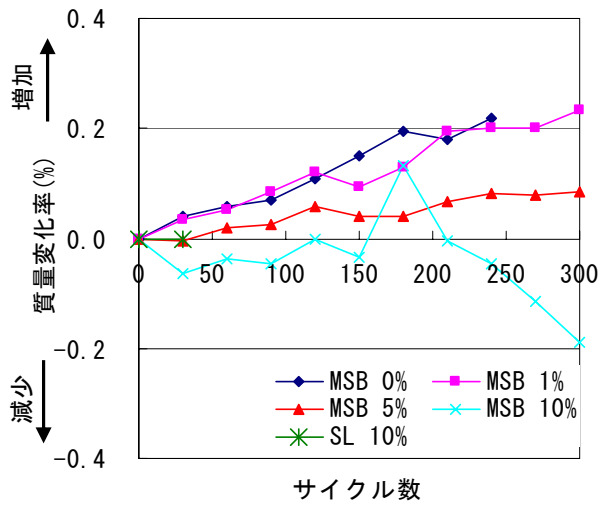


図-4 高流動モルタルの質量変化率

性能が劣る結果となった。SL は凍結融解抵抗性能に悪影響を及ぼしたが、その理由として、SL は殻が硬く、気泡の役割を果たせなかったことがあげられる。

凍結融解試験 300 サイクル時の計測において、MSB5% 供試体および MSB10% 供試体の相対動弾性係数に低下は確認されなかった。凍結融解試験 180 サイクル時と 210 サイクル時において、MSB0% 供試体および MSB1% 供試体の相対動弾性係数に明確な低下が確認された。その理由として、MSB の混入率が少なかったことが考えられる。質量変化率については、MSB0%、1%、5%の順に供試体の質量が増加する傾向を確認した。MSB10% 供試体においては、質量の減少が確認された。しかし、各供試体において、質量の変化は微量であり、表面のモルタルが剥離する等の凍結融解作用による著しいスケーリング劣化は、確認されなかった。これらの結果から、MSB は高流動モルタルの凍結融解抵抗性能を向上させることが認められた。

3. ダンベル型供試体を用いた凍結融解試験と一軸引張試験

3.1 実験概要

(1) 使用材料および供試体

ダンベル型供試体における使用材料、配合、供試体水準は 2.1 (1) の HPRC と同様とした。ダンベル型供試体の寸法を図-5 に示す。ダンベル型供試体の断面寸法は 15×30mm、検長区間は 80mm とした。材齢および養生条件は角柱供試体と同様とした。各水準でダンベル型供試体を 20 体作製して、凍結融解サイクル 0、150、300 サイクル後に 4、8、8 体ずつ一軸引張試験を行った。

(2) ダンベル型供試体の凍結融解試験

本研究で用いた凍結融解試験機は、供試体を収納するゴムスリーブの水量が増加すると、凍結速度が遅くなり JIS に記される温度勾配が維持できないことが確認された³⁾。そのため、ゴムスリーブ内の水量低減のために、ダンベル型供試体 4 体をはめ込み可能なコンクリート性のはめ込み型枠を作製した(写真-1)。はめ込み型枠の寸法は、角柱供試体の寸法 100×100×400mm とした。はめ込み型枠の作製に用いた型枠を写真-2 に示す。角柱供試体型枠の長手方向 3 面に、ダンベル型供試体と同寸法の木版を取り付けた。角柱供試体型枠に HPRC を流し込み、木版を取り付けたアクリル板を角柱供試体の長手方向上面に押し込むことで、ダンベル型供試体 4 体が収納可能なはめ込み型枠を作製した。ダンベル

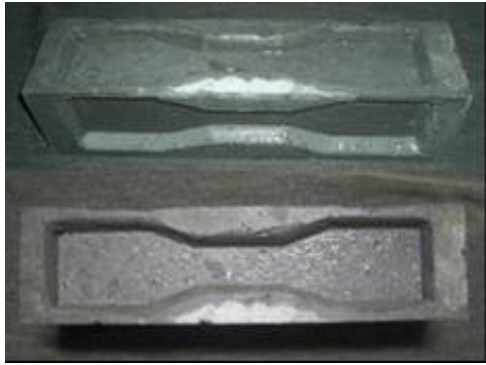


写真-1 はめ込み型枠

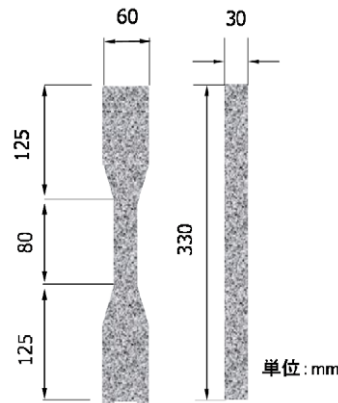


図-5 供試体の寸法



写真-3 一軸引張試験機

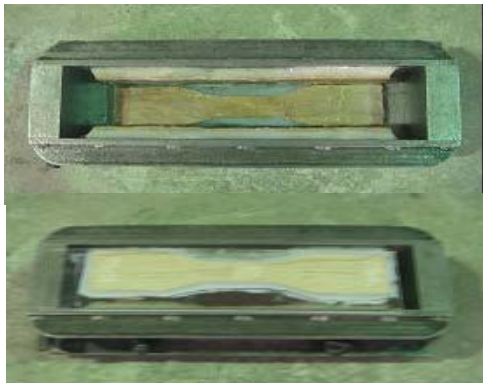


写真-2 はめ込み型枠の作製に用いた型枠

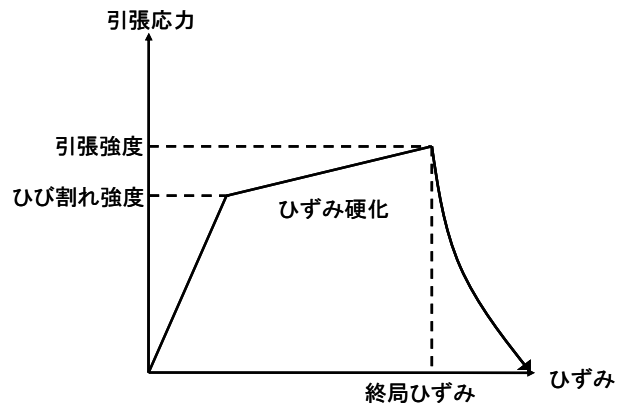


図-6 引張応力-ひずみ曲線のモデル



写真-4 凍結融解試験後のダンベル型供試体

型供試体をはめ込んだ場合、ダンベル型供試体の背面ならびに側面（表面と背面以外の周面）の全てに水が供給されていた。はめ込み型枠と側面との間には 2mm 程度の隙間があり、背面との隙間は僅かであった。

ダンベル型供試体の材齢を合わせるため、凍結融解試験 300 サイクルが終了した後、全てのダンベル型供試体の一軸引張試験を行った。凍結融解作用 0、150 サイクルにおけるダンベル型供試体は、凍結融解試験 300 サイクル終了まで実験室の気中（温度 0～10℃程度、湿度 40～70%程度）で保存した。目視による乾燥ひび割れは、確認できなかった。一軸引張試験を行う 1 週間前から吸水させ、飽和状態として試験を行った。

(3) 一軸引張試験

一軸引張試験に使用した荷重装置を写真-3 に示す。加力部を鋼製フレーム上面に設置し、引張荷重の荷重を行った。ダンベル型供試体は上下面にある鋼製フレームにより固定した。フレーム上面を可動支持、フレーム下面を固定支持として、引張荷重を行った。計測項目は引張荷重と変位とした。引張荷重は、加力部に設置されているロードセルにより計測した。変位は、ダンベル型供試体の左右に設置した 2 つの高感度変位計により計測した。一軸引張試験により、引張応力-ひずみ曲線、引張強度、終局ひずみ（図-6 参照）を算出した。終局ひずみは引張強度時のひずみとした。

4. 結果と考察

(1) ダンベル供試体の凍結融解試験

凍結融解作用を受けた 3～5 割程度のダンベル型供試体に、曲げ変形が認められ、ダンベル型供試体にひび割れが生じていることを目視により確認した。凍結融解試験後（150 サイクル）の曲がったダンベル型供試体の例を写真-4 に示す。この理由は、はめ込み型枠にダンベル型供試体を入れた際に、長軸方向に隙間が少なかったため、ダンベル型供試体の膨張が拘束されて、変形したと考えられる。また、ダンベル型供試体の断面が薄く、変形しやすい形状をしていた

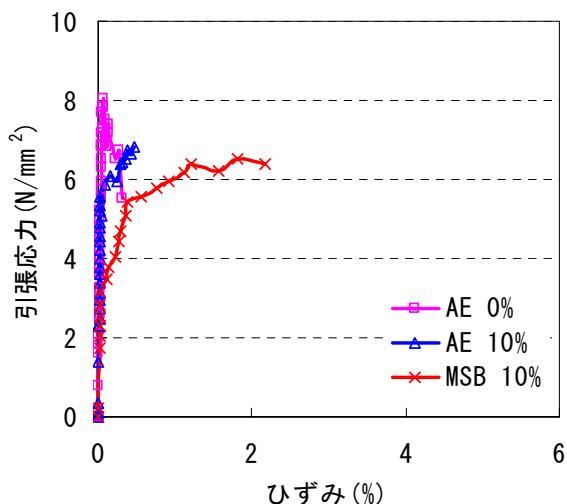


図-7 引張応力-ひずみ曲線 (0 サイクル)

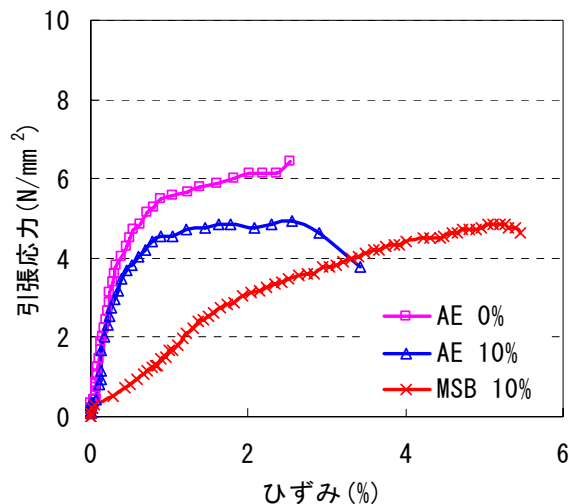


図-9 引張応力-ひずみ曲線 (300 サイクル)

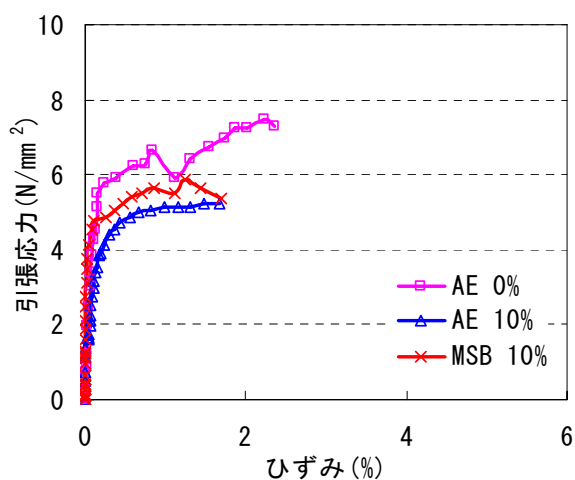


図-8 引張応力-ひずみ曲線 (150 サイクル)

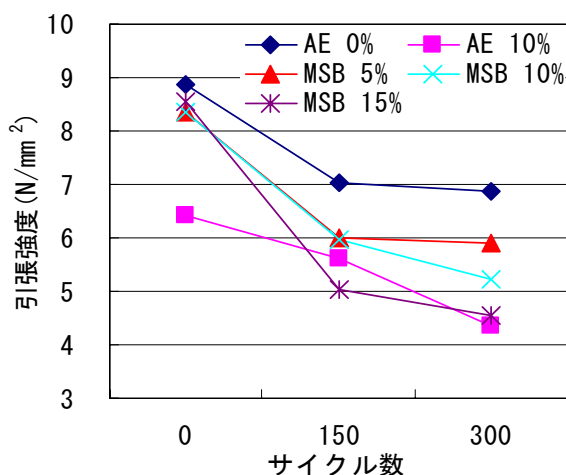


図-10 凍結融解サイクルと引張強度の関係

ことも理由の一つと考えられる。本研究では、ゴムスリープ内の水量を低減させ、JIS に記されている凍結速度を維持することを目的として、はめ込み型枠を作製した。今後、はめ込み型枠とダンベル型供試体の間に十分な隙間を設ける等の改善が必要であると考えている。

(2) ダンベル型供試体の一軸引張試験

AE0%, AE10%, MSB10%供試体における凍結融解作用 0, 150, 300 サイクル時の代表的な引張応力-ひずみ曲線を図-7, 図-8, 図-9 に示す。凍結融解作用 0 サイクルにおける MSB10%供試体は AE0%, AE10%供試体と比較して、終局ひずみが大きくなった。この理由は、中空骨材のような脆弱な骨材を HPCRCC に使用することで、ひび割れ強度と引張強度の差が大きくなったことが考えられる。

図-7, 図-8 および図-9 に示すように、AE0%供試体および AE10%供試体の引張応力-ひずみ曲線では、凍結融解作用 0 サイクル時と比較して、150 サイクル, 300 サイクルと凍結融解サイクルが増加するに伴い、原点からの立ち上がりの勾配が緩やかになった。この理由は、

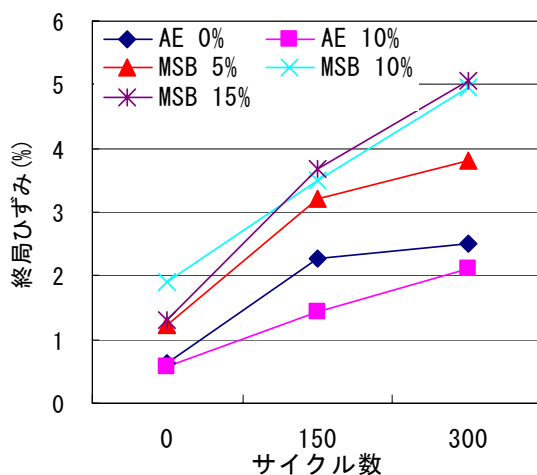


図-11 凍結融解サイクルと終局ひずみの関係

載荷前に凍結融解作用により発生したひび割れが、載荷時に開口し、それがひずみとなって現れたため、勾配が緩やかになったと考えられる。

一方、AE0%供試体および AE10%供試体と比較し、MSB10%供試体の引張応力-ひずみ曲線の立ち上がりの勾配は、凍結融解作用 150 サイクル時には、急なままで

あるが、300 サイクル時には、顕著に緩やかになった。これは、MSB の性状に依存するためと考えられるが、MSB の殻の破壊状況などと関連させて、今後の検討課題としたい。

引張強度および終局ひずみと凍結融解サイクル数の関係を図-10、図-11 に示す。引張強度は、中空骨材の有無に関係なく凍結融解サイクル数の増加に伴い、低下が確認された。終局ひずみは、凍結融解サイクル数の増加に伴い、増加する傾向が確認された。これは、凍結融解作用により、ひび割れ強度の低下の度合いが引張強度の低下よりも大きく、両者の差が大きくなるため、終局ひずみが大きくなったと考えられる。薄いダンベル型供試体が、周囲から凍結融解作用を受ける厳しい条件ではあったが、300 サイクルの凍結融解試験後においても、 4N/mm^2 以上の引張強度と 2%以上の終局ひずみがあり、十分な引張性能を有していることを確認した。

5. まとめ

本研究では、AE 剤あるいは中空骨材を用いて空気を導入した HPFRCC の凍結融解抵抗性能について検討した。さらに、はめ込み型枠を用いて、ダンベル型供試体の凍結融解試験前後における一軸引張試験を行った。その結果、以下の結果が得られた。

角柱供試体を用いて凍結融解試験を行った結果、高流動モルタルの凍結融解抵抗性能を、SL は低下させるが、

MSB は改善することが明らかとなった。また HPFRCC においては、空気量や MSB の混入量に関わらず、十分な凍結融解抵抗性能を有していることを確認した。

角柱供試体のくぼみに、HPFRCC ダンベル型供試体をはめ込んで凍結融解試験を行う方法を提案した。その結果、HPFRCC は 300 サイクル後においても、 4N/mm^2 以上の引張強度と 2%以上の終局ひずみが確認され、十分な引張性能を有していることが明らかとなった。MSB を HPFRCC に 5~15%混入すると、終局ひずみが大きくなった。

凍結融解作用が HPFRCC の引張性能に及ぼす影響を評価するための試験方法を今後、さらに改善していく予定である。

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) コンクリートの凍結融解試験（JIS A 1148），コンクリート示方書（基準編）JIS 規格集，2007
- 3) 加藤久也，森山守，林承燦，六郷恵哲：複数微細ひび割れを導入した HPFRCC の耐凍害性ならびに引張性能，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No1，pp.333-338，2007