論文 凍結融解作用が HPFRCC 積層供試体の力学性状に及ぼす影響

大畑 卓也*¹·加藤 久也*²·浅野 幸男*³·六郷 恵哲*⁴

要旨:複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(HPFRCC)とポリマーセメントモルタル(PCM)を 普通コンクリート(NC)に積層させた供試体と全断面 NC 供試体の型枠面(打設面以外)に、高密度ポリスチ レンフォームを付着させ、凍結融解作用を打設面に限定させた凍結融解試験を行った。凍結融解試験後、各 供試体に三等分点曲げ載荷試験および付着強度試験を実施した。HPFRCC は PCM と異なり、凍結融解前後に おいて曲げ強度の低下が確認されなかった。HPFRCC は、凍結融解試験後においても NC との十分な付着性 能を有しており、NC に対する凍結融解作用の影響を低減する効果が確認された。

キーワード: HPFRCC, 複数微細ひび割れ, 積層供試体, 一面凍結融解試験, 付着強度試験

1. はじめに

複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下 HPFRCC)は複数微細ひび割れ特性と引張ひずみ硬化特 性を特徴とする材料である。HPFRCCは、ひび割れの分 散や物質透過抑制を期待して水路等の表面補修材とし て用いられている。

既設コンクリート構造物の表面にHPFRCCは10mm程 度の厚さで施工する場合が多く、HPFRCCを複数回打ち 重ねて用いる場合もある。HPFRCCは、繊維の架橋効果 により優れた耐凍害性を示すことが確認されており¹⁾、 山間寒冷地等の凍害環境下での適用が期待されている。 しかし、HPFRCCを打ち継いだ場合や複数回打ち重ねた 場合に、凍結融解作用が界面の力学性状に及ぼす影響に ついて、詳細には検討されていない。

本研究では、普通コンクリート(以下NC)とHPFRCC との積層構造物を想定し、NC供試体上面にHPFRCCを 打ち継いだ積層供試体を作製した。比較用に、凍結融解 作用を受けるコンクリートの補修に広く用いられてい るポリマーセメントモルタル(以下 PCM)を打ち継いだ 単積層供試体を作製した。これらの供試体に凍結融解試 験を実施し、積層条件の違いが積層供試体の耐凍害性に 及ぼす影響について検討した。凍結融解試験後の供試体 に三等分点曲げ載荷試験を行い、最大荷重やたわみを計 測し、積層条件の違いが積層供試体の力学性状に与える 影響について検討した。曲げ載荷試験後に付着強度試験 を行い、凍結融解作用が積層界面の付着強度に及ぼす影 響と、破壊形態について検討した。

2. 試験概要

2.1 試験供試体

20 360 20 ↓ ↓ ↓ a b 20 (1) 単積層供試体 20 360 20 ↓ ↓ ↓ 20 (2) 二積層供試体 (2) 二積層供試体 (2) 二積層供試体 (2) 二積層供試体 (2) 二積層供試体

融解試験に用いた供試体の寸法は 100×100×400mm とした。100×100×400mmの角柱供試体用型枠の5つの 型枠面に厚さ20mmの硬質ポリエチレンフォームを配置 し,所定の母材高さまで普通コンクリートを打設した。 打設面に遅延剤シート(目粗し深さ2mm)を置き,打設 翌日に骨材表面が露出する程度まで洗出し処理を行っ た。本研究においては,供試体には単積層供試体と二積 層供試体を用いた(図-1参照)。表面処理後,単積層供 試体には HPFRCC(厚さ10または20mm),または PCM (厚さ10mm)を打ち継いだ。二積層供試体では10mm の厚さで HPFRCCを打ち離いだ後に,上からさらに 10mmの厚さの HPFRCCを打ち重ねた。尚,打ち継ぎ後 から,打ち重ねまでに要した時間は10分程度とした。

普通コンクリートには AE 減水剤を使用し,空気量は 4%±0.5,スランプ値は 6.0cm であった。HPFRCC には, 長さ 9mm, 直径 12μ m のポリエチレン繊維 (PE:引張 強度 2600MPa, 弾性係数 88GPa, 密度 0.97g/cm³)を体積 比で 1.5%使用した。HPFRCC の圧縮強度は 52.2MPa,曲 げ強度は 10.6MPa であった。PCM としては亜硝酸系防 錆材入断面修復用ポリマーセメントモルタルを使用し

*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 ジェイアール東海コンサルタンツ(株) 土木事業部(正会員)
*3 岐阜大学 社会資本アセットマネジメントセンター 博士(工学)(正会員)
*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博(正会員)

表-1 供試体寸法

供試体名称	a:積層厚さ(mm)	b∶母材厚さ(mm)
NC	0	80
HP10	10	70
HP20	20	60
HP10×2	10×2層	60
PCM	10	70

た。PCM の圧縮強度は 38.8MPa, 曲げ強度は 4.49MPa であった。

単積層供試体4種類,二積層供試体1種類をそれぞれ 6体ずつ,計30体作製した(表-1参照)。なお,硬質 ポリエチレンフォームの表面をシリコーンでシーリン グし,水の吸収を抑えた。

2.2 凍結融解試験

JISA1148A法²⁾に基づき,-18℃から5℃,5℃から-18℃ の1サイクルを3~4時間とした。凍結融解試験は300 サイクルまで行い,50サイクル毎に一次共鳴振動数と質 量を計測した。一次共鳴振動数の計測には共鳴振動数測 定器を用いたが、本研究では供試体5面を硬質ポリエチ レンフォームで覆っているため、一次共鳴振動数計測時 に供試体端部の硬質ポリエチレンフォームを切り取り、 共鳴振動数計測点とした。一次共鳴振動数計測後、切り 取った硬質ポリエチレンフォームを供試体に戻し、界面 にはエポキシ樹脂を充填させ防水対策を講じた。一次共 鳴振動数と質量から相対動弾性係数と質量減少率を算 出し、内部劣化の程度とスケーリングによる外部劣化の 程度を評価した。相対動弾性係数と質量減少率をそれぞ れ式(1),(2)より算出した。

$$P_u = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2}\right] \times 100 \tag{1}$$

ここで, P_n は凍結融解n サイクル後の相対動弾性係数, fn 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) を示す。

$$W_n = \frac{(w_0 - w_s - w_h) - (w_n - w_w)}{w_0 - w_s - w_h} \times 100$$
(2)

ここで、 W_n は凍結融解 n サイクル後の質量減少率, w_n は凍結融解 n サイクル後の供試体の質量, w_w は硬質ポ エチレンフォーム の吸水量, w_0 は凍結融解 0 サイクル における供試体の質量, w_s はシリコーンの質量, w_h は硬 質ポエチレンフォーム の質量を示す。

本研究で用いた硬質ポリエチレンフォームは若干の 吸水特性を有する材料であるため,シリコーンを用いた シーリングによっても完全に防水することは困難であ り,全ての供試体において質量が一様に増加した。そこ で,供試体と同寸法の硬質ポエチレンフォーム型枠を作 成して吸水量を測定した。式(2)に示した質量減少率 算定では硬質ポエチレンフォームの吸水量を差し引く 補正を行った。

供試体は 14 日間 20℃の恒温室内で湿布養生を行い, 養生後,供試体の含水状態を気乾状態にしてから凍結融 解試験を開始した。0 サイクルと 150 サイクルの供試体 については,300 サイクルの凍結融解試験が終了するま で気中にて保存した。

2.3 三等分点曲げ載荷試験

凍結融解試験終了後,供試体側面と底面の硬質ポリエ チレンフォームを外し,気中にて乾燥を行った。平らに なるよう,研磨機を用いて支点と載荷点となる部分を研 磨した。凍結融解作用面を引張縁として,スパン240mm の三等分点曲げ載荷試験を行った。載荷に手動メカニカ ルジャッキを用い,荷重はロードセルにて計測し,変位 は支点上部および載荷点下部に設置した高感度変位計 により計測した。局部的な損傷をさけるため支点では, 供試体とローラーとの間にゴム板を挟んだ。

2.4 付着強度試験

曲げ試験後に,建研式引張試験機を使用して,それぞれ の種類で原則として4ヶ所ずつ付着強度試験³⁾を行った。 曲げ試験の影響が少ない部分(等モーメント区間外)に 電動カッターを用いて母材に至るまで切欠きを入れた。 本試験で用いた電動カッターは最大カッティング深度 が20mm 程度であったため,切欠き深さは20mm 程度と なった。試験体表面の脆弱部を削り落とし,エポキシ樹 脂により供試体に鋼製のアタッチメントを接着した。供 試体概要を図-2 に示す。手動油圧ジャッキにより載荷 し,デジタルメータから引張荷重を読み取った。エポキ



シ樹脂は、20℃以上の室温で2時間以上硬化させ、付着 試験時には2N/mm²以上の強度を有していた。

3. 実験結果

3.1 凍結融解試験

供試体の5面に付着させた硬質ポリエチレンフォーム と供試体の界面には凍結融解作用による破壊や剥離は 確認されなかった。硬質ポリエチレンフォームに多少の 吸水が確認されたが、各供試体と硬質ポリエチレンフォ ームはしっかり付着されており、硬質ポリエチレンフォ ームの付いた供試体面では凍結融解作用の影響は少な かったと考えられる。凍結融解試験結果を図-3と図-4 に示す。全断面 NC 供試体では AE 剤の混入により、4% 程度のエントレンドエアが混入しているにも関わらず、 凍結融解試験 250 サイクル後に相対動弾性係数が 25%程 度に低下した。HPFRCC 積層供試体、PCM 積層供試体で



は凍結融解試験 300 サイクル終了時に相対動弾性係数は 95%以上を維持していた。相対動弾性係数の最小限界値 は一般の条件では 60%とされており,本実験の結果から, NC の上面を HPFRCC や PCM 等の耐凍害性に優れた材 料で積層することにより供試体全体として耐凍害性が 高まることがわかる。気乾状態にあった供試体を用いて 凍結融解試験を始めたことも影響し,全ての供試体で試 験開始直後に相対動弾性係数と質量の増加が確認され た。

凍結融解試験 150 サイクルおよび 300 サイクル終了時 に行った外観観察では,NC 供試体では顕著なスケーリ ングが確認された。HPFRCC 積層供試体,PCM 積層供試 体ではスケーリングは確認されなかった,HPFRCCでは マトリクス間を繊維が架橋しているため表層部のスケ ーリングが抑制されたと考えられる。PCM 内ではポリマ ーフィルムの形成により緻密化され,スケーリングが抑 制されたと考えられる。

3.2 三等分点曲げ載荷試験

三等分点曲げ載荷試験結果を図-5 と図-6, 図-7 に示 す。凍結融解試験開始前(0 サイクル)の HPFRCC 積層 供試体では,積層厚さや積層条件の違いに関わらず最大 曲げ荷重と最大荷重時のたわみは概ね同程度であった。



表-2	破壊箇所一	·眥
- <u>-</u>		ᆓ

評価	HP10-0サイクル	HP10-150サイクル	HP10-300サイクル
Α	1本	-	-
В	1本	1本	4本
С	_	-	_
D	2本	2本	-
評価	HP20-0サイクル	HP20-150サイクル	HP20-300サイクル
Α	_	-	-
B∼D	3本	4本	4本
評価	HP10×2-0サイクル	HP10×2-150サイクル	HP10×2-300サイクル
Α	-	-	1本
B∼D	4本	4本	3本
評価	NC-0サイクル	NC-150サイクル	NC-300サイクル
С	_	3本	4本
D	4本	1本	_
評価	PCM-0サイクル	PCM-150サイクル	PCM-300サイクル
Α	-	-	2本
В	1	-	1本
С	-	-	-
D	4本	4本	1本

評価A: 補修材での破壊

評価 B: 界面付近の破壊

評価C:母材での破壊(NCは表層付近の破壊)

評価D:切りかきを起点とする破壊

全断面 NC 供試体と PCM 積層供試体では 0, 150, 300 とサイクル数が増えると最大曲げ荷重が減少する傾向 となった。全断面 NC 供試体では,凍結融解作用により 内部劣化していることが曲げ試験結果からもわかる。同 様に PCM 積層供試体でも,凍結融解作用により PCM 層 に劣化が生じた可能性が考えられる。PCM 積層供試体で は,凍結融解試験において,相対動弾性係数は 95%以上 あったにもかかわらず最大曲げ荷重は凍結融解サイク ル数が増えると減少した。これは相対動弾性係数が,供 試体全体の健全度(剛性)を表すのに対し,最大曲げ荷 重は引張側表層部分の健全度(引張抵抗力)に依存する ためと考えられる。各種 HPFRCC 積層供試体では凍結融 解試験後も最大曲げ荷重は減少しなかった。全ての HPFRCC 積層供試体において,母材 NC からのひび割れ に対し HPFRCC 層では良好にひび割れが分散していた。



このため全断面 NC 供試体や PCM 積層供試体に比べ, HPFRCC積層供試体では最大荷重量に対応するたわみが 大きくなったと考えられる。 HP10 供試体のたわみは凍 結融解試験後には試験前の約 1/2 に減少したが, HP20, HP10×2 供試体では凍結融解試験後にたわみの減少は確 認されなかった。 HP20 供試体に比べ, HP10×2 供試体 のたわみが大きくなった。理由として, HPFRCC 層を 20mm 同時に積層した HP20 供試体に比べ, HPFRCC 層 を 10mm 毎に 2 層に分けて積層した HP10×2 供試体の繊 維がより平面的に配向したためと考えられる。

3.3 付着強度試験

数種類の供試体の付着強度試験結果には, 比較的大きな ばらつきが確認された(図-8参照)。このため、試験を 行った4ヵ所の付着強度試験結果の最大値と最小値を除 いた残り2つの平均値を供試体の付着強度とした。なお, HP10の150サイクルおよびHP20の0サイクルの供試体 は付着強度試験結果に差がなかったため3ヵ所の平均値 とし4ヵ所目の試験を省略した。付着強度試験結果を図 -9 に示す。全ての供試体の付着強度試験において、母 材と補修材間の界面における明確な層間破壊は確認さ れなかった。全ての供試体の強度は1.5N/mm²以上とな り, HPFRCC および PCM は母材コンクリートと十分な 付着を有していた。PCM 供試体の付着強度は、HPFRCC を積層した供試体の付着強度より大きく、一体打ちの NC 供試体の付着強度と同程となった. 破壊箇所の分類 を 4 種類 (図-10) とし, 各供試体の破壊箇所を表-2 に示す。

本研究で用いた付着試験では,曲げ載荷試験後の供試 体にカッターを用いて4面の切欠き(深さ約 20mm)を 加工し,母材から突き出た状態の角柱の先端に表面を研 磨後にアタッチメントをエポキシ樹脂で接着し,アタッ チメントを通じて引張力を与えている。角柱状の試験部 分の引張強度を低下させる要因としては,次のようなも のが挙げられる。

- ・母材と補修材の界面
- ・切欠き先端の応力集中
- ・凍結融解作用による劣化
- ・大きな気泡
- ・引張力に直角な粗骨材界面

凍結融解作用は、補修材や基盤となる母材の組織だけ でなく、補修材と母材の界面の強度を低下させる可能性 がある。引張強度が同程度のセメント系材料を接合した 場合、一般に界面部分の付着強度は両材料の引張強度よ りも小さくなる。しかし、エポキシ樹脂はセメント系材 料に対して優れた接着特性を有しており、一般に界面部 分の付着強度はセメント系材料の引張強度と同等以上 となる。 以上のことをふまえ,図-9 と表-2 に示す付着強度 試験結果から,次のことが分かる。

- ・NC供試体では、0サイクルの場合、切欠き先端での 破壊(Dタイプ)であったが、凍結融解試験後には、 破壊位置は母材部分(Cタイプ)に移った。凍結融 解作用におり、母材に組織のゆるみが生じたためと 考えられる。
- ・PCM 供試体では、凍結融解作用が 0 あるいは 150 サイクルの場合には、破壊箇所は切欠き先端であっ たが、300 サイクルの後には破壊箇所は PCM 内ある いは PCM と母材界面付近が増えた。これは、凍結 融解作用による劣化の影響と考えられる。
- ・HP10 供試体では凍結融解作用が 0 または 150 サイ クルの場合には, それぞれ 2 ヵ所は切欠き先端部分 で破壊したが, 300 サイクルの後には 4 ヵ所すべて が界面付近で破壊した。これは凍結融解作用により 界面付近の強度が低下したためと考えられる。
- ・1層あるいは2層でHPFRCCを20mm積層した供試体では、母材との界面と切欠き先端位置とがほぼ同じ位置となったため、凍結融解作用の有無に関わらず、大部分の供試体の破壊は切欠き先端部分で生じた。なお、300サイクルの凍結融解作用を受けた後のHP10×2供試体の一ヵ所ではHPFRCC内で破壊が生じた。凍結融解作用がHPFRCCとNCとの界面部分の付着強度に及ぼす影響を確認するためには、切欠き深さを30mm程度にするとよかったと思われる。

NC 供試体ならびに PCM 供試体では,凍結融解作用を 150 あるいは 300 サイクル受けると曲げ最大荷重は低下 した(図-5)が,図-9や表-2に示す付着強度試験結 果では,凍結融解作用の影響は 150 サイクルでは現れず 300 サイクルで現れた。これは,付着強度試験では,表 面の脆弱部分を研磨したためと考えられる。

4. まとめ

本研究では,積層材料や積層厚さが異なる5種類の積 層供試体に硬質ポリエチレンフォームを5面付着させ, 凍結融解作用を残りの一面に限定させて凍結融解試験 を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1) 相対動弾性係数が 25%に減少する NC に, HPFRCCまたはPCMを積層させると相対動弾性 係数は 95%以上を維持し,耐凍害性が改善された。
- (2) NC 供試体にはスケーリングが確認されたが、
 HPFRCC および PCM 積層供試体においては、スケーリングは確認されなかった。
- (3) 三等分点曲げ載荷試験において、HPFRCC 積層

供試体には HPFRCC 部分に複数微細ひび割れが 確認された。

- (4) 凍結融解試験後,NC 供試体,PCM 積層供試体 では曲げ強度が低下した。しかし,HPFRCC 積 層供試体では曲げ強度は低下しなかった。
- (5) 凍結融解前後の付着試験において、全ての供試体の強度は 1.5N/mm²以上あり,HPFRCC と PCM ともに良好な付着性能が確認された。
- (6) 300 サイクルの凍結融解作用が,NC や PCM の 引張強度を低下させるだけでなく,HPFRCC あ るいは PCM と NC との界面付近の強度も低下さ

せることが、付着強度試験から明らかとなった。

参考文献

- 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, No.1, pp.333-338, 2007
- 2) JIS A 1148: コンクリートの凍結融解試験法
- 3) 局部破壊試験による強度推定(プルオフ法), コン クリート診断技術'06, 基礎編, 日本コンクリート 工学協会, pp.103, 2006