

論文

初期材齢時の凍結および施工時条件が 繊維補強ポリマーセメントモルタルの強度性状に及ぼす影響

乙茂内 郁美^{*1}, 濱 幸雄^{*2}

Influence of Early Age Freezing and Construction Conditions on Strength Properties of Fiber Reinforced Polymer Cement Mortar

Ikumi OTOMONAI^{*1}, and Yukio HAMA^{*2}

要旨：本研究では、初期材齢時の凍結や施工時の練上がり温度および母材コンクリートの表面処理条件が、補修材である繊維補強ポリマーセメントモルタル（FRPCM）の付着強度と圧縮強度に及ぼす影響の把握を目的とし、強度増進性状が異なるFRPCMを用いて実験的検討を行った。その結果、寒冷期における付着性には初期の強度増進性状と表面処理条件による影響が大きいこと、初期材齢時の凍結よりも施工時の練上がり温度の方が圧縮強度に与える影響が大きいことを確認した。また、初期材齢時の凍結により、補修材として重要な性能である付着性に重大な被害が生じたことから、FRPCMの初期凍害抵抗性は付着性でも評価すべきであることを明らかにした。

キーワード：繊維補強ポリマーセメントモルタル、付着性、初期凍害、練上がり温度、表面処理

1. はじめに

近年、環境負荷低減の観点からコンクリート構造物の長寿命化・高耐久化が求められ、補修材の研究開発が進められている。補修材の要求性能としては、付着性やひび割れ追従性、耐凍害性等が挙げられる。繊維補強ポリマーセメントモルタル（FRPCM）は、優れた付着性と劣化因子に対する高い遮断性を有しており、繊維による靱性の向上やひび割れ抑制効果も期待できる補修材として、現在、研究開発や実用化が進められている²⁾。

一方、寒冷期での施工上の問題として初期凍害がある。初期凍害とは、打込み後から硬化初期までの間に、凍結または数回の凍結融解の繰り返しを受ける事で、強度増進の停滞やひび割れが起こる被害である³⁾。一般のコンクリートでは、初期凍害の防止の目安として、圧縮強度 5.0N/mm² を得るまで凍結させないことが必要とされている。

補修材であるFRPCMは、一般のコンクリートとは要求性能が異なり、母材との付着性が求められる。しかし、FRPCMを対象とした初期凍害に関する研究は少なく、初期材齢時の凍結が付着性に及ぼす影響や、初期凍害防止策の適用性は検討されていない。

また、補修材に関する既往研究において、母材コンクリートの表面処理が補修材の付着性に及ぼす影響を検討した研究^{例えは4)}があるが、寒冷期での施工現

場を想定し、材料や補修対象のコンクリート構造物が低温になる可能性を考慮した研究は少ない。

そこで本研究では、2章で初期材齢時の凍結がFRPCMの強度増進性状と付着性に及ぼす影響を把握し、初期凍害抵抗性の評価方法について検討した。また、3章では、寒冷期の施工を想定し、施工時の練上がり温度や母材の温度、表面処理方法がFRPCMの強度増進性状と付着性に及ぼす影響を把握した。

2. 初期材齢時の凍結がFRPCMの強度性状に及ぼす影響

2.1 実験計画および方法

表-1に供試体条件を示す。強度増進性状の異なるFRPCMにおいて初期材齢時の凍結の影響を比較するため、先行研究³⁾により開発された基本調合のF、早強セメントを使用したFS、海岸施工等を目的として高炉スラグの添加率を増加したFH、Fに耐寒促進剤を標準使用量（Fの質量の3.6%）添加したFMの4種類のFRPCMを使用した。

表-1 供試体条件

| 記号 | タイプ | 表面処理 |
|----|-------------|------|
| F | 先行研究による既調合品 | 水湿し |
| FS | 早強セメントタイプ | |
| FH | 高炉スラグ増量タイプ | |
| FM | Fに耐寒促進剤を添加 | |

*1 室蘭工業大学大学院工学研究科環境創生工学系専攻 博士前期課程

*2 室蘭工業大学大学院もの創造系領域 教授

表-2 に凍結融解条件と養生条件を示す。凍結時の強度発現程度と凍結による影響の関係を確認するため、凍結開始材齢を 0, 6, 24, 72 時間の 4 水準とした。凍結融解条件は 20°C・8 時間、-20°C・4 時間の封緘凍結融解 2 サイクルとし、凍結融解前後の養生は 20°C封緘養生とした。比較用として、凍結を与えない 20°C封緘養生の条件(N)も加えた。

試験項目は、材料の基礎物性である圧縮強度と、補修材において重要な性能である付着強度とした。圧縮強度試験は、φ50×100mm の円柱型枠を用い、JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」の 5. 試験方法に準じて行った。試験材齢は N で 0.25, 1, 3, 7, 28, 91 日の 6 材齢、凍結融解有りの条件で凍結融解直後、28, 91 日の 3 材齢とした。付着強度試験は、JSCE K 561 に準じて行った。図-1 に付着強度試験の概要を示す。母材コンクリートには予めディスクグラインダーで目荒らしを施し、FRPCM を施工した。母材コンクリートの使用材料を表-3 に、調合および材齢 28 日の割裂引張強度を表-4 に示す。また、凍結融解中は、実施工で起こりうる一面冷却を再現するために、打設面以外の側面と底面を断熱材で囲い、打設面からの一面冷却とした。試験材齢はすべての条件において 28,91 日とし、測定箇所は 1 条件につき 3 箇所とした。試験の手順は、試験材齢の前日にコアドリルを用いて湿式で切れ込みを入れ、1 日乾燥後、治具をエポキシ樹脂系接着剤で取付け、硬化するまで一時間程待機し、一軸引張試験を行った。

2.2 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験

一般のコンクリートでは、圧縮強度 5.0N/mm² 未満の段階で凍結すると初期凍害を受けると言われている。また、初期凍害に関する既往研究⁴⁾において、凍結作用を受けないコンクリートの材齢 28 日強度に対する凍結作用を受けたコンクリートの圧縮強度比を用いて初期凍害による劣化の評価をしており、強度比 90%を評価基準値として採用している。本研究でも同様の方法を適用し、FRPCM を評価した。

図-2 に凍結無し条件の材齢 28 日強度に対する圧縮強度比の結果を示す。凍結開始材齢 0 時間において FH の強度比は 90%を上回っており、圧縮強度が発現していない凍結開始材齢 0 時間で凍結しても初期凍害を受けていないと評価できる。また、凍結開始材齢 6 時間以降は FH 以外も 90%以上を示し、材齢 91 日の強度比では、凍結開始材齢 0 時間の条件も含め、全条件で 90%以上であった。

(2) 付着強度試験

図-3 に材齢 28 日の付着強度と凍結開始材齢の関係を示す。付着強度が 0.0N/mm² となっているもの

表-2 凍結融解および養生条件

| 凍結融解前養生 | 凍結融解条件 | | 凍結融解後養生 | 試験 | |
|---------|----------|--------------|---------|---------|----------------------|
| | 温度 [°C] | 時間 [h] | 温度 [°C] | 温度 [°C] | 時間 [h] |
| 20 封緘 | 凍結無し | | 20 封緘 | 20 | 圧縮強度 |
| | 0 | -20°C ← 20°C | | | *0.25,*1,*3,*7,28,91 |
| | 6 | 8h → 4h | | | |
| | 24 | | | | |
| 72 | 計 2cycle | *凍結融解後 | | | |
| 付着強度 | | | | | |
| 28 | | | | | |
| 91 | | | | | |

*: 圧縮強度試験のみでの試験材齢

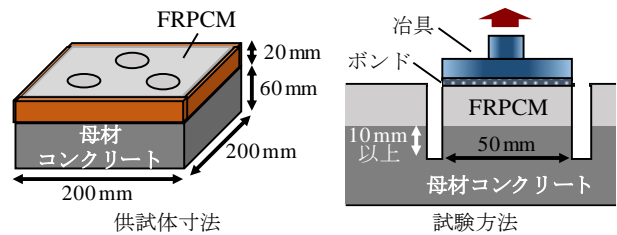


図-1 付着強度試験の概要

表-3 母材コンクリートの使用材料

| 材料 | 記号 | 種類および物性 |
|------|-----|--|
| セメント | HPC | 早強ポルトランドセメント 密度: 3.14 [g/cm ³] |
| 細骨材 | S | 浦河町杵臼産 粗粒率: 2.80 [%], 密度: 2.64 [g/cm ³] |
| 粗骨材 | G | 浦河町杵臼産 粗粒率: 6.83 [%], 密度: 2.70 [g/cm ³] |
| 混和剤 | AE | AE 減水剤 1 種 密度: 1.08 [g/cm ³] |

表-4 母材コンクリートの調合および割裂引張強度

| W/C [%] | S/A [%] | 単位量 [kg/m ³] | | | | | 割裂引張強度[N/mm ²] (材齢 28 日) |
|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|-------|---|
| | | W | HPC | S | G | AE | |
| 44.9 | 43.6 | 154 | 343 | 792 | 1045 | 3.430 | 2.13 |

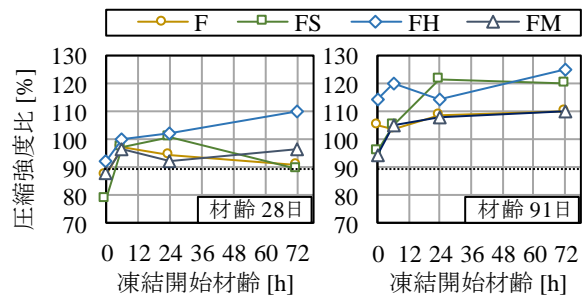


図-2 凍結無し条件の材齢 28 日強度に対する圧縮強度比と凍結開始材齢の関係

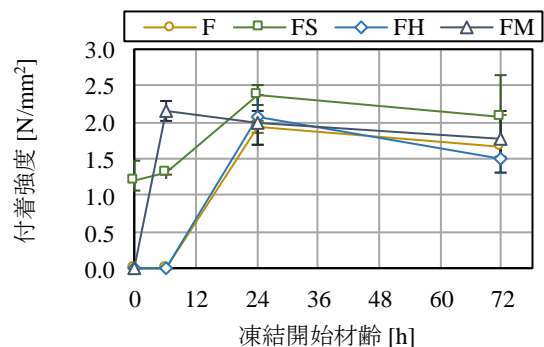


図-3 材齢 28 日の付着強度と凍結開始材齢の関係

は、試験用治具の取付け作業時、既に FRPCM が母材コンクリートと剥離していたため付着強度を測定できなかった水準である。コアドリルでの作業による FRPCM の剥離等の供試体への影響は無かった。また、材齢 91 日まで養生した供試体においても同様に剥離しており、付着強度は回復しなかった。早強セメントを使用した FS は凍結開始材齢 0 時間でも 1.0N/mm²以上の付着強度を確保していた。

ここで、凍結開始材齢 0 時間の FS と FH の供試体の FRPCM と母材コンクリート界面の付着状況を図-4 に示す。FS-0 は界面が連続しているのに対し、強度測定不能の FH-0 は目視でも確認できる剥離が生じていた。この剥離は強度測定不能の全水準で見られた。凍結がセメントペーストと骨材の付着に及ぼす影響に関する既往研究⁹⁾において、石材とペーストの界面で生じる水膜の凍結により付着強度が低下すると示されている。本研究では、FRPCM が持つ水分が界面で水膜を形成し、凍結したことで、体積膨張を起こし剥離が生じたと考えられる。

補修材は、部材としての一体性が基本性能として求められ、圧縮強度以上に、母材との付着強度の確保が極めて重要な指標となる。本研究において、圧縮強度比のみで評価すると初期凍害を受けていないと評価される水準が、付着強度試験では界面剥離が生じ、重大な被害を受けていた。このことから、補修材としての FRPCM の初期凍害抵抗性は、圧縮強度だけでなく付着強度でも評価すべきである。

3. 初期材齢時の凍結と施工時の諸条件が FRPCM の強度性状に及ぼす影響

3.1 実験計画および方法

FRPCM は 2.1 で示した F を使用した。FRPCM の練上がり温度および FRPCM 打込み時の母材コンクリートの温度は、標準養生温度の 20℃と寒冷期の施工を想定した 5℃とした。5℃の練り混ぜには、冷凍庫で冷やした FRPCM の材料と、5℃の水を用いた。

母材コンクリートは 2.1 で示した調合と同様のものを、ディスクグラインダーで目荒らしした後、表面処理を行った。表面処理条件は、20℃または 5℃において乾燥条件（60%RH の恒温恒湿室で保管）、湿潤条件（1 日浸水後、打込み直前に取り出し、水が浮かないようウエスで拭く）、プライマー条件（乾燥条件の母材にエチレン-酢酸ビニル共重合体系エマルジョンのプライマーを塗布）の 3 条件とした。

表-5 に供試体条件を示す。凍結開始材齢を 6, 12, 24 時間の 3 条件とし、凍結条件は-18℃, 24 時間とした。前養生は、20℃または 5℃で封緘養生を行い、後養生は全供試体において 20℃封緘養生とした。初

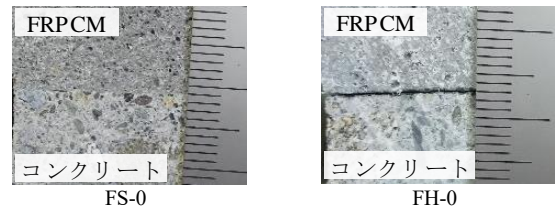


図-4 FRPCM - 母材コンクリート界面の観察面

表-5 供試体条件

| 記号 | 前養生 | | 凍結条件 | | 後養生 | | 試験 | |
|---------|---------|--------|---------|--------|---------|----|--------|---------------------|
| | 温度 [°C] | 時間 [h] | 温度 [°C] | 時間 [h] | 温度 [°C] | 項目 | 材齢 [日] | |
| F20-n | 20 | — | 凍結無し | | 20 | 封緘 | 圧縮強度 | *0.25, *0.5, *1, 28 |
| F20-f6 | | 6 | -18 | 24 | | | | |
| F20-f12 | | 12 | | | | | | |
| F20-f24 | | 24 | | | | | | |
| F5-n6 | 5 | 6 | 凍結無し | | 20 | 封緘 | 付着強度 | *0.25, *0.5, *1, 28 |
| F5-n12 | | 12 | | | | | | |
| F5-n24 | | 24 | | | | | | |
| F5-f6 | | 6 | -18 | 24 | | | | |
| F5-f12 | | 12 | | | | | | |
| F5-f24 | 24 | | | | | | | |

*：圧縮強度試験のみでの試験材齢

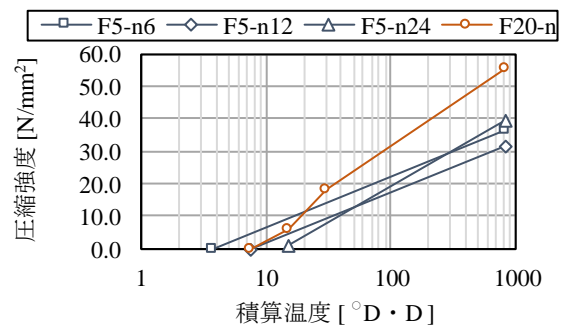


図-5 凍結無し条件の材齢 28 日圧縮強度と積算温度の関係

期材齢時の凍結の有無による影響を把握するために凍結を与えない条件(n)を設けた。F5 の n は、前養生から後養生に移す時間を凍結開始材齢と揃えた。

試験項目は、圧縮強度と付着強度とし、2 章と同様の試験方法で行った。試験材齢は、圧縮強度試験は条件 n で 0.25, 0.5, 1, 28 日の 4 材齢、凍結有りの条件で凍結直後、29 日の 2 材齢とし、付着強度試験は条件 n で 28 日、凍結有りの条件で 29 日とした。

3.2 実験結果および考察

(1) 圧縮強度試験

図-5 に凍結無しの条件の材齢 28 日強度と積算温度の関係を示す。積算温度の算出は式(1)を用いた。

$$M = \sum(\theta + 10)\Delta t \quad (1)$$

ここに、M：積算温度 (°D·D)、 θ ： Δt のコンクリート温度 (°C)、 Δt ：温度測定間隔 (日) を表す。一般的なモルタル・コンクリートでは、養生温度によらず同一の積算温度での強度はほぼ同じ値を示すが、本研究での結果では、同一の積算温度において F5-n6, n12, n24 が F20-n を大きく下回っており、積

算温度の考え方が当てはまらなかった。なお、この理由については本研究の範囲では明らかでない。

図-6 に F20 の凍結有りの水準と F5 の凍結無し水準の F20-n の材齢 28 日強度に対する圧縮強度比を示す。F20-f6, f12, f24 の強度比は、全て 90%以上を示した。一方、F5-n6, n12, n24 は凍結を受けていないにもかかわらず強度比は全て 80%を下回り、n12 は 60%未満であった。このことから、施工温度や初期養生温度は、初期材齢時の凍結よりも、FRPCM の強度増進性状に与える影響が大きいと考えられる。

(2) 付着強度試験

図-7 に材齢 28 日の付着強度と凍結開始材齢の関係を示す。強度が 0.0N/mm² の水準は、2.2(2)と同様に界面で剥離し、付着強度が測定できなかった水準であり、この界面剥離を確認した水準は、F5 の凍結開始材齢 6、12 時間の湿潤条件であった。

ここで、図-8 に F5 の凍結開始材齢 6 時間の各表面処理条件での FRPCM と母材コンクリート界面をマイクロスコプで観察した写真を示す。倍率 100 倍で観察すると、湿潤条件において 2.2(2)と同様の界面剥離を確認した。さらに、乾燥条件とプライマー条件を倍率 1000 倍で観察すると、乾燥条件の一部で微細な剥離を確認し、プライマー条件では剥離は全く見られなかった。湿潤条件では母材コンクリートが飽水状態のため界面に水膜が形成され凍結したのに対し、乾燥条件では母材コンクリートの吸水により水膜が形成されなかったため、剥離の程度に違いが生まれたと考えられる。また、母材の吸水抑制効果をもつプライマーにおいて剥離が生じなかった理由として、本研究では明らかでないが、吸水調整プライマーによる付着安定性の向上は吸水調整効果のみに帰することはできず、界面活性剤が寄与している可能性を示した既往研究⁷⁾があり、同様の現象が起こったことが考えられる。

4. 結論

- (1) 補修材としての FRPCM における初期凍害抵抗性は、圧縮強度だけでなく、補修材の基本性能である付着強度でも評価すべきである。
- (2) 練上がり温度および初期養生温度が FRPCM の強度増進性状に及ぼす影響は、初期材齢時の凍結による影響よりも大きい。
- (3) 寒冷期での施工においてもプライマーを塗布する表面処理方法は有効であり、飽水状態の躯体への FRPCM の施工は避けるべきである。

参考文献

- 1) 農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業

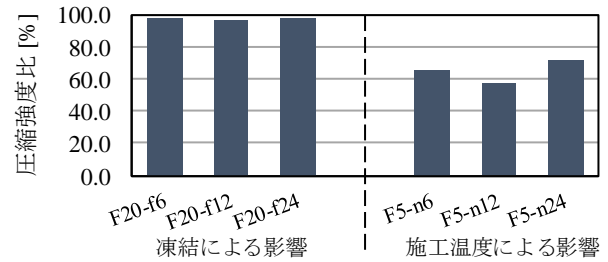


図-6 F20-n の材齢 28 日強度に対する圧縮強度比

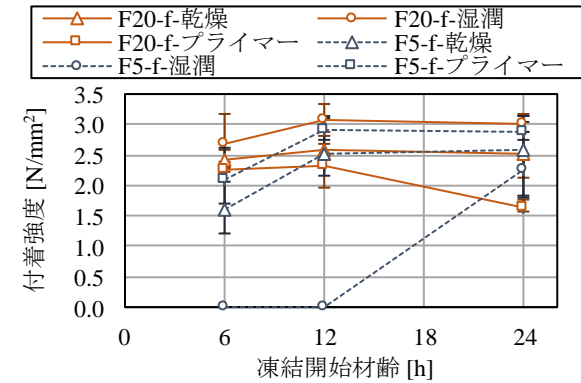


図-7 材齢 28 日の付着強度と凍結開始材齢の関係

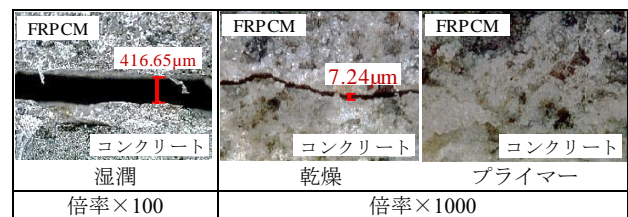


図-8 FRPCM - 母材コンクリート界面の観察面

水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル (開水路補修編), 第 3 章 補修の要求性能及び材料・工法の品質規格と採用, pp49-127(pp50-53, pp99-103), 2013

- 2) 長谷川諒, 濱幸雄, 崔亨吉, 坂口朗央: 繊維補強ポリマーセメントモルタルの高靱性化に及ぼす繊維種類および砂結合材比の影響, アップグレード論文報告集, 15, pp441-446, 2015
- 3) 日本建築学会: 寒中コンクリート施工指針・同解説, 2010
- 4) 片平博ら: 各種断面補修工法の施工性・付着性および耐久性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp1505-1510, 2003
- 5) 浜幸雄ら: 無塩化・無アルカリ型防凍性混和剤による初期凍害の防止効果, コンクリート工学論文集, 第 7 巻第 1 号, pp113-122, 1996
- 6) 堀内照夫: 石材とコンクリートの付着強度について (モルタルによる実験), 新砂防, 52, pp22-27, 1964
- 7) 丸田浩ら: 作用機構に着目した打継プライマーの検討, プレストレストコンクリート工学会第 24 回シンポジウム論文集, pp635-638, 2015