

論文 凍害を受けたコンクリートを対象とした再劣化しにくい補修方法の提案

田代 恭平^{*1}・佐藤 あゆみ^{*2}・新家 一秀^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：本研究では、凍害を受けたコンクリートを対象に補修方法を検討し、再劣化しにくい補修方法を提案した。実験では、一面のみ凍害劣化したコンクリート供試体を作製し、劣化面に対して深さの異なるウォータージェット処理と種類の異なる補修材を用いて補修を行った。補修後の再劣化挙動を考察した結果、ウォータージェットによって劣化部をより深く除去した場合に、補修後の再劣化進行が小さいことが明らかになった。補修材として性能が優れていた材料は、ポリマーセメントモルタルと複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材(HPFRCC)であった。

キーワード：凍害、凍結融解試験、補修材、ウォータージェット処理、HPFRCC

1. はじめに

寒冷地のコンクリート構造物が受ける劣化現象の一つに凍害がある。凍害劣化が深刻な場合、劣化部のはく離・はく落によってコンクリート断面が減少し、重大な構造性能の低下に至る場合もある。凍害劣化の進行を防ぐためには補修・補強など適切な対策をとる必要があり、一般に外部からの水分侵入の抑制、劣化した部分の除去、補修材の被覆による断面修復が、補修・補強方法として図られている。しかし、凍害を受けたコンクリートの補修に関しては未だ不明な点が多く、例えば、劣化部分の除去の程度などは、作業従事者の経験をもとに行われている場合が多く、定性的・定量的にその程度を示すことが求められている。

凍害に関する補修方法や補修材料を検討した研究は多いが、その大部分は凍害を受けていない健全なコンクリートを対象に補修材料等を被覆した結果^{1,2)}であり、劣化が生じたコンクリートを補修した場合とは得られる補修効果が異なると考えられる。一部、月永ら³⁾が凍結融解試験によって劣化したコンクリートの表面を切断し、切断面に断面補修材を被覆した後、再度の凍結融解試験によってその補修効果を考察した例はあるが、劣化部の除去量や補修材の違いなどを詳細に検討した研究は見られない。

以上より、本研究では凍害劣化が顕在化したコンクリートに対して補修を行い、その補修方法と再劣化現象との関係を検討することで、凍害を受けたコンクリートの再劣化挙動を考察する。さらにその結果から、再劣化しにくい補修方法を提案することを目的とする。

2. 実験方法

2.1 実験概要

本研究の実験フローを図-1に示す。本研究では角柱の無筋コンクリート供試体を作製し、作製した供試体を凍結融解試験によって促進劣化させた。凍害劣化が生じたコンクリートにはウォータージェット処理を施した後、補修材を被覆した。補修後、補修した供試体に対して2度目の凍結融解試験を行い、補修効果の検討を行った。

2.2 供試体

(1) 供試体作製

本研究では、図-2に示す100×100×200mm角柱供試体を作製した。供試体作製に用いたコンクリートは表-1に示す配合である。また表-2に使用した材料の名称と特徴を示す。なお、本研究では凍害が生じやすいように、通常のものより空気量の低い配合を用いた。打設は鋼製型枠に所定の材料を用いて行い、24時間後に脱型した。脱型後は、材齢14日まで水中養生を行い、その後、凍結融解試験まで気中養生を行った。

(2) 防水方法

本実験の供試体は、1面のみ凍害を受けるように、6

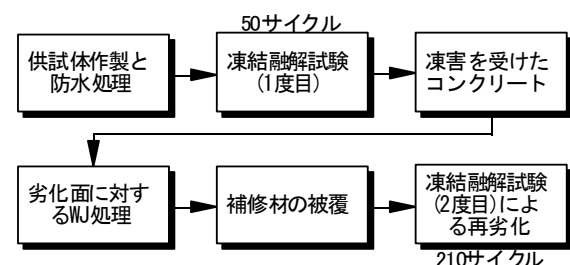


図-1 実験フロー

*1 岐阜大学工学部社会基盤工学科学生(学生会員)

*2 熊本大学自然科学研究科環境共生工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

*3 トーヨーマテラン(株) 技術部技術開発グループ 修士(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 母材コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	消泡剤
15	8	2.5	55	48	176	320	866	946	1.000	0.320

面中5面に対して防水処理を施した(図-2参照)。凍害を受ける面には、打設面を選定した。防水処理には、コンクリート用のプライマーを用いて5面すべてに3層ずつ塗り重ねた。プライマーは刷毛塗りとして、供試体表面を十分に乾燥させて一層塗った後、次のプライマー塗布まで15時間以上時間間隔をあけた。なお、劣化後の補修材被覆厚さを考慮して、プライマー塗布の前に、供試体の底面を10mm切断し、90×100×200mmの角柱とした。

2.3 凍結融解試験

(1) 凍結融解試験方法

本研究の凍結融解試験はJIS A 1148 A 法⁴⁾に準拠して行ったが、供試体の寸法(90×100×200mmの角柱供試体)は独自のものである。通常のゴム製供試体容器(100×100×400mm)に供試体を2体ずつ挿入した。5面に防水処理を施した供試体を24体、全面に防水処理を施した供試体を2体、防水処理を施さなかった供試体を2体の合計30体に対して試験を行った。

温度管理は中心温度センサーを中心温度測定用供試体に挿入することで、凍結過程5℃から-18℃、融解過程-18℃から5℃を合わせて1サイクルとし、1サイクルは3～4時間となるように設定した。

凍結融解試験では、任意のサイクルにおいて供試体の質量とたわみ振動の一次共鳴振動数を測定した。測定した質量から質量変化率を算出し、一次共鳴振動数から相対動弾性係数を算出して凍害劣化の評価指標とした。相対動弾性係数の算出式を式(1)に示す。

$$P_n = f_n^2 / f_0^2 \times 100 \quad (1)$$

ここで、 P_n は凍結融解nサイクル後の相対動弾性係数(%), 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)を表す。

(2) 凍結融解試験：1度目

1度目の凍結融解試験では、10サイクル毎に質量と一次共鳴振動数を測定した。なお、測定時は常に同一の方向の一次共鳴数を計測し、その方向の一次共鳴数の低下を供試体の劣化と考えた。また、一つの供試体で測定装置への設置、測定を何度か行い、再現性の高い値を採用

した。

本実験では、防水処理を施さなかった供試体にスケールリングが顕著に現れた、すなわち劣化が進展期から加速期に相当する状態に達した時点で1度目の凍結融解試験を終了した。この時、凍結融解試験は50サイクルであり、防水処理を施さなかった供試体の相対動弾性係数は約87%、5面防水供試体の相対動弾性係数は平均して95%に低下した。また、6面すべてを防水した供試体では相対動弾性係数は低下していなかったことから、本実験で実施した防水処理の効果が確かめられた。これらの結果は後述の表-6に併記した。

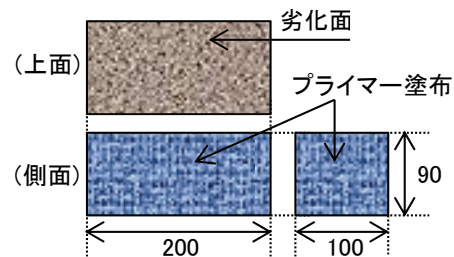


図-2 供試体概要

表-2 母材コンクリートの使用材料

材 料	物 性
セメント	JIS R 5210 早強ポルトランドセメント, 密度 3.13g/cm ³
細骨材	揖斐川産, 密度 2.59g/cm ³
粗骨材	揖斐川産, G _{max} 15mm 密度 2.61g/cm ³
AE減水剤	リグニンスルホン酸系
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体系

表-3 補修した供試体の名称

供試体名	WJ処理	補修材	凍害劣化
NS0	無し	無収縮モルタル NS	有り
NS1	浅め		
NS3	標準		
NS9	深め		
PCM0	無し	ポリマーセメント モルタル PCM	
PCM1	浅め		
PCM3	標準		
PCM9	深め		
HP0	無し	HPFRCC	
HP1	浅め		
HP3	標準		
HP9	深め		
N-NS3	標準	無収縮モルタル	無し
N-PCM3	標準	PCM	
N-HP3	標準	HPFRCC	

WJ=ウォータージェット

表-4 補修材の配合表

HPFRCC	水結合材比 W/B(%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	セメント	膨張材	7号珪砂	高性能AE 減水剤	増粘剤	PE繊維
	30	380	1188	76	395	37.9	1.01	12.1
無収縮モルタル(NS)	市販品、水粉体比:0.14							
ポリマーセメント モルタル(PCM)	市販品、断面修復用(亜硝酸塩系防錆剤入り)、混和液粉体比:0.15							

2.4 凍害劣化面の補修

(1) 供試体の種類

本研究では、劣化した24体の供試体(5面防水のみ)の劣化面に対して、ウォータージェット処理を施し劣化部を除去した後、補修材を変えて劣化面の補修を行った。ウォータージェット処理の程度と補修材の種類の組み合わせを変えることで、表-3の12種類の供試体を作製した。なお、1度目の凍結融解試験を受けていない供試体に対して、同様にウォータージェット処理を施し、補修材を被覆した供試体も作製した。すべての種類で各2体ずつ作製した。ウォータージェット処理および補修材の被覆方法を下記に説明する。

(2) ウォータージェット処理

1度目の凍結融解試験によって凍害劣化が顕在化した供試体表面を対象に、ウォータージェット処理を行い、図-3のように劣化部を除去した。処理の深さは4種類とし、処理なし(0回)、浅め(1回:細骨材が露出する程度/除去深さ0.5mm程度)、標準(3回:粗骨材の頭部が露出する程度/除去深さ2mm程度)、深め(9回:粗骨材の半分程度が露出する程度/除去深さ4mm程度)とした。なお、回数は劣化面表面に装置を接触させた回数であり定量的な意味はないが、本稿内の相対的な比較を行うため付記した。

(3) 補修材を用いた劣化面の被覆方法

劣化面の補修に用いた補修材は、プレミックス材の無収縮モルタル(NS)、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(PCM)、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材(HPFRCC)の合計3種類とした。本実験で用いた補修材の配合を表-4に示す。また、HPFRCCに使用したセメントは表-2に示す早強モルタルであり、高強度ポリエチレン(PE)繊維は繊維径12 μ m、繊維長12mm、引張強度2.6GPa、弾性係数88GPaのものを使用した。

ウォータージェット処理を施した供試体は、補修材の被覆直前まで水に浸漬して、補修面の水分状態を統一するように調整した。浸漬水から取り出した後は、作業中に補修面が過度に乾かないように、適宜刷毛で水を吸水

させた。補修材はオムニミキサーで練り混ぜ、コテを用いて劣化面に被覆した。すべての供試体で被覆厚さは10mmとなるように調整した(図-4参照)。被覆した供試体は、補修材の収縮を防ぐために封緘養生を行い、24時間後に脱型した。その後、2度目の凍結融解試験まで養生室にて14日間の封緘養生を行った。

2.5 補修後の凍結融解試験

(1) 凍結融解試験:2度目

補修した供試体に対して、2度目の凍結融解試験を行い、再劣化状況から補修効果の検討を行った。試験を行う前に、被覆した補修材の側面にも2.2節(2)と同様にプライマーで防水処理を施し、コンクリートと補修材接合面からの水の浸入を防いだ。

凍結融解試験方法は2.3節と同じであり、30サイクル毎に質量と一次共鳴振動数の測定を行った。本稿では210サイクルまで測定が終了している。

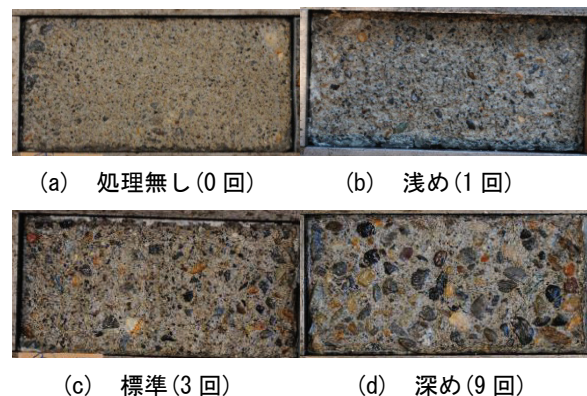


図-3 ウォータージェット処理後の供試体劣化面

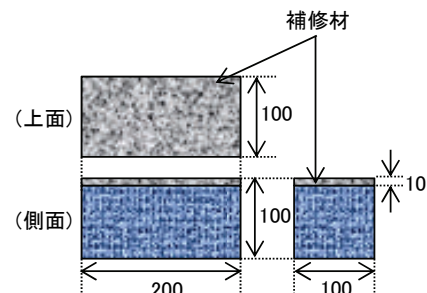


図-4 供試体の補修方法

表-5 相対動弾性係数

供試体名	凍結融解サイクル数(回)													
	補修前						補修後							
	0	10	20	30	40	50	0	30	60	90	120	150	180	210
NS0-1	100.0	98.9	98.3	96.1	96.0	92.5	(100.0)	100.3	91.3	89.9	—	75.3	57.4	29.1
NS0-2	100.0	99.5	99.1	98.1	97.9	97.0	(100.0)	—	—	—	34.0	27.0	72.4	63.4
NS1-1	100.0	99.8	99.4	97.9	97.2	95.8	(100.0)	—	—	—	90.5	87.1	75.5	64.4
NS1-2	100.0	99.0	99.5	97.1	97.7	95.7	(100.0)	107.5	93.1	88.9	75.6	65.2	69.9	48.0
NS3-1	100.0	99.0	99.0	97.0	97.6	96.0	100.0	—	—	—	91.3	80.5	64.7	30.6
NS3-2	100.0	99.0	99.9	97.5	97.5	96.1	100.0	—	—	89.1	73.0	71.7	58.1	48.3
NS9-1	100.0	100.4	100.1	97.7	98.4	96.2	100.0	—	—	93.2	88.4	79.8	71.2	50.2
NS9-2	100.0	99.8	99.7	97.5	97.7	95.4	100.0	—	—	—	86.5	68.8	77.6	65.6
PCMO-1	100.0	99.3	99.5	97.6	98.1	96.8	100.0	—	—	—	98.2	95.6	88.4	81.0
PCMO-2	100.0	99.1	99.2	97.3	98.2	95.2	(100.0)	—	—	94.4	88.6	45.3	88.1	74.6
PCM1-1	100.0	99.0	99.0	96.4	96.1	92.6	100.0	—	—	—	94.7	91.9	83.8	75.4
PCM1-2	100.0	99.0	99.8	97.4	97.7	95.0	(100.0)	—	—	—	92.6	84.9	89.9	85.1
PCM3-1	100.0	100.1	99.8	97.7	98.0	97.1	(100.0)	—	—	—	96.1	100.4	98.1	96.7
PCM3-2	100.0	99.6	99.1	97.3	96.8	95.0	(100.0)	—	—	98.8	97.7	97.6	96.1	94.2
PCM9-1	100.0	99.9	99.9	98.3	97.6	95.9	100.0	—	—	—	98.3	97.5	92.7	91.6
PCM9-2	100.0	99.7	99.8	97.9	98.0	97.7	100.0	—	—	—	100.1	101.9	102.0	100.1
HPO-1	100.0	99.3	98.8	98.1	97.9	94.8	100.0	—	—	—	100.2	99.8	97.7	96.8
HPO-2	100.0	99.4	99.4	97.3	97.9	95.3	100.0	97.7	96.6	99.0	96.1	91.9	88.9	83.0
HP1-1	100.0	100.4	100.2	98.8	98.6	96.8	(100.0)	—	107.2	97.0	92.7	91.3	88.7	84.9
HP1-2	100.0	100.0	99.3	97.6	98.1	95.8	100.0	—	—	—	97.7	98.1	97.2	97.8
HP3-1	100.0	99.8	99.8	97.8	99.3	96.8	100.0	—	—	—	92.5	92.4	87.5	86.2
HP3-2	100.0	100.3	100.2	98.2	99.2	97.3	100.0	—	—	—	98.5	97.8	95.1	89.4
HP9-1	100.0	99.6	99.6	97.9	98.3	96.4	100.0	98.7	98.3	—	100.2	99.2	98.3	96.1
HP9-2	100.0	98.6	98.4	96.6	96.3	96.4	(100.0)	—	—	—	98.0	100.4	97.6	99.6
N-NS3-1	100.0						(100.0)	—	—	—	95.2	94.2	85.5	68.4
N-NS3-2	100.0						(100.0)	—	—	—	92.2	88.7	79.4	60.1
N-PCM3-1	100.0						100.0	—	—	—	97.7	98.8	98.3	95.9
N-PCM3-2	100.0	(劣化させないため該当データ無し)					100.0	—	—	—	101.2	99.4	99.8	100.2
N-HP3-1	100.0						(100.0)	—	—	—	92.4	89.7	86.3	81.1
N-HP3-2	100.0						(100.0)	—	—	—	95.3	95.5	94.6	89.3
6面防水	100.0	100.0	99.7	99.3	100.4	100.8	—	—	—	—	—	—	—	—
防水なし	100.0	97.9	95.8	91.9	89.9	86.8	—	—	—	—	—	—	—	—

3. 実験結果および考察

3.1 凍結融解試験結果

角柱供試体の凍結融解試験による質量変化を図-5に示す。図中では、同じ水準の2体の供試体を区別するために「-1、-2」の数字を付けた。分かり易いように、図-5では、2体のうち最終的な質量変化率(減少率)が大きい1体のみを示す。この図の0サイクルは補修後に行った2度目の凍結融解試験における0サイクルを表す。この図より、全ての供試体において150サイクルまで僅かな質量増加が認められる。質量が若干増加した原因として、補修材の吸水や水和進行が考えられる。しかし、150サイクルを過ぎた時点で、無収縮モルタルを用いた供試体の質量減少が確認できる。このことから補修材である無収縮モルタルのスケーリング、さらにその被覆下にあるコンクリートの再劣化が生じたと考えられるが、210サイクル時点で、ウォータージェット処理の程度によってNS供試体の質量減少率に差があることから、特にコンクリートの再劣化が質量減少の要因だと推察される。

表-5に各供試体の補修前と補修後の相対動弾性係数の推移を示す。補修後の相対動弾性係数として、補修後0サイクルの一次共鳴数をとった。なお、本実験の補修

後の供試体の一次共鳴振動数測定において、測定者が実験に不慣れであったために、正確なデータを探し出すことが出来ていないと考えられるデータが幾つかあった。そのため、データの考察にあたり下記の補正を行った。

(1) 表-5において、補修後の0サイクル目で測定が失敗したと思われる場合の一次共鳴数は、補修前の50サイクル目の一次共鳴数の1.027倍であると仮定して補正した。この補正值は測定が成功した供試体から算出したが、補修材料による差がほとんどなかったため、補修材料の種類に関係なく一律で採用した。補正を行った値は表-5で、()付で示した。

(2) 補修後30サイクル以降の相対動弾性係数のうち110%を超えたデータは、測定ミスと判定し、表-5中の欄を—と表記した。図-6以降では、測定値がない部分は直線補間して表記するが、マーカーは表記していない。特に補修後の90サイクル目まで測定ミスが多いが、後述するように補修後の再劣化は120サイクル以降に生じているため実験結果に大きな影響はないと判断した。

3.2 補修前のコンクリート劣化の影響

図-6に、補修材の被覆前に凍害を受けた供試体と受けていない供試体の相対動弾性係数を示す。この図より、

無収縮モルタルを用いた NS 供試体のうち、劣化を受けていた供試体の方が、2 度目の凍結融解試験によって劣化しやすいことが分かる。また僅かな差ではあるが、HPFRCC を用いた HP 供試体も 150 サイクル以降に差が生じ、補修前に劣化していた供試体では、その補修効果が軽減される傾向にあった。一方、ポリマーセメントモルタルを用いた PCM 供試体に関しては、補修前の劣化の有無による大きな差は見られず、いずれの場合も高い補修効果を発揮した。

これらの結果より、凍害を受けていない健全な部材を対象にして、補修方法や補修材の性能を評価する場合、その性能を過大評価する可能性があることが分かった。

3.3 ウォータージェット処理深さの影響

図-7(a)に無収縮モルタルを補修材として用いた NS 供試体の相対動弾性係数の変化を示す。この図より、NS 供試体の場合、ウォータージェット処理の深さを増しても再劣化の程度は大きく、210 サイクルでは全ての供試体で 60%以下となっていた。しかしその低下の度合いはウォータージェット処理で異なり、劣化面を深めに除去した NS-9 は比較的緩やかに劣化した。

図-7(b)にポリマーセメントモルタルを補修材として用いた PCM 供試体の相対動弾性係数の変化を示す。上述の NS 供試体と比べて、相対動弾性係数の低下は格段に緩やかであった。210 サイクルに達した時点で、ウォータージェット処理を施さなかった PCM-0 や浅めに除去した PCM-1 は 80%前後まで低下した。一方で標準もしくは深めに劣化面を除去した PCM-3 と PCM-9 は 210 サイクルにおいても 95%以上を維持しており、ポリマーセメントモルタルを補修材として用いた場合、ウォータージェット処理が深い方がより効果的な補修であると言える。

ウォータージェット処理の深さに最も影響を受けにくかったのが、補修材に HPFRCC を用いた HP 供試体であり、図-7(c)のように、すべての供試体で 80%以上の

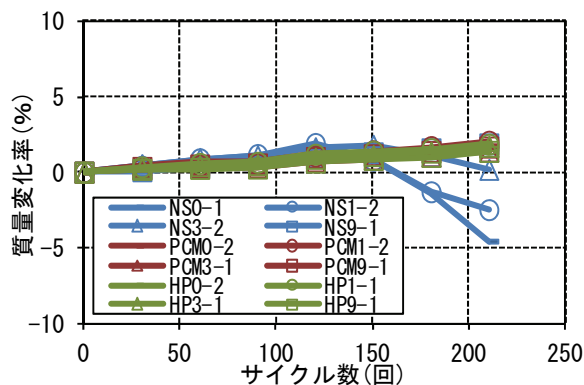


図-5 質量変化率

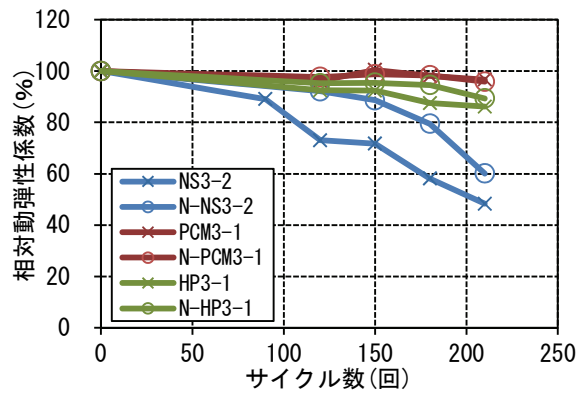
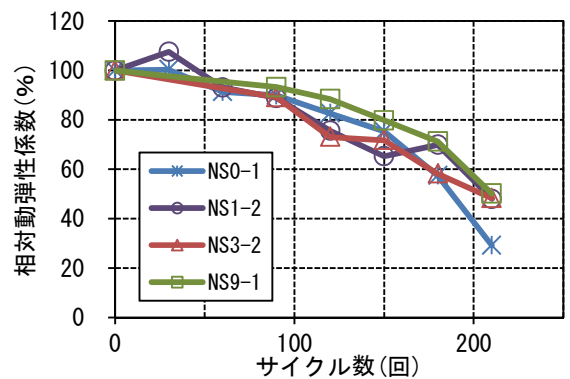
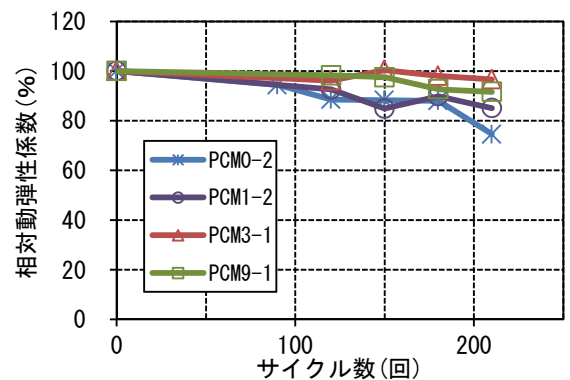


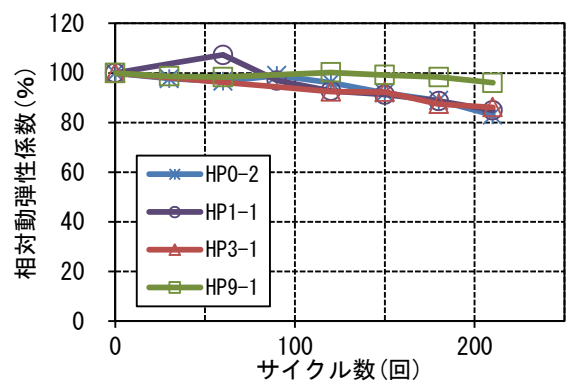
図-6 母材の凍害劣化有無の影響 (相対動弾性係数)



(a) 補修材に無収縮モルタルを用いた供試体

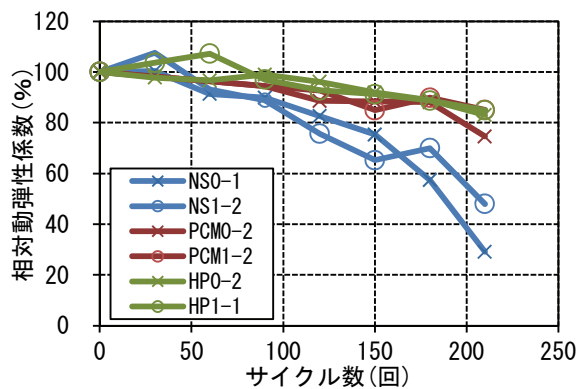


(b) 補修材にポリマーセメントモルタルを用いた供試体

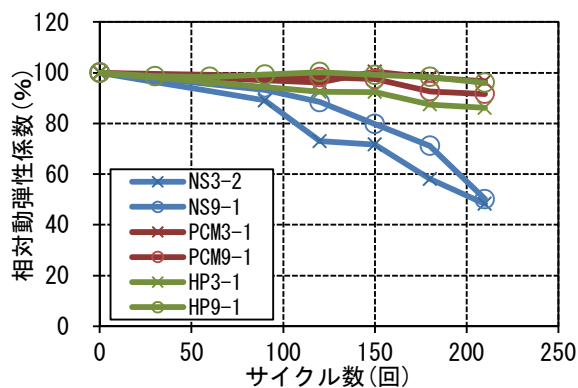


(c) 補修材に HPFRCC を用いた供試体

図-7 ウォータージェット処理深さの影響 (相対動弾性係数)



(a) ウォータージェット処理無しと浅め



(b) ウォータージェット処理標準と深め

図-8 補修材種類の影響(相対動弾性係数)

相対動弾性係数を保持した。しかし、90 サイクル以上に注目すれば、NS 供試体や PCM 供試体と同様に、劣化面の除去が深い程得られる補修効果、すなわち再劣化の抑止力は大きいと言える。

3.4 補修材種類の影響

図-8(a)はウォータージェット処理を行わなかった場合もしくは浅めの場合における、補修材毎の相対動弾性係数を比較したものである。この図より、サイクルが進んだ段階では、無収縮モルタルを用いた場合に比べ、ポリマーセメントモルタルと HPFRCC を用いた場合は、相対動弾性係数ははるかに高いことが見て取れる。この傾向は、図-8(b)の劣化面を標準もしくは深めに除去した場合でも同様であり、210 サイクルにおいて、無収縮モルタルを用いた場合は 60%以下に低下したのに対し、ポリマーセメントモルタルと HPFRCC を用いた供試体では大きな再劣化は見られなかった。特に HP-9 は 180 サイクルまで、ほぼ 100%の相対動弾性係数を維持しており、高い補修効果があった。

このように、HPFRCC は補修用に開発されたポリマーセメントモルタルと同等の補修効果を発揮できることが分かった。これは、HPFRCC のひび割れの分散や物質透過抑制効果が発揮されたためだと考えられる^{2,5)}。

4. まとめ

本研究では、凍害を受けたコンクリートの補修後の再劣化しにくい補修方法を提案するために、凍害劣化した母材コンクリートを作製した。その後、ウォータージェットによって処理した劣化面に補修材の被覆を行い、再度凍結融解試験を実施した。以下に本研究で得られた結果を示す。

- (1) 母材コンクリートが凍害を受けていない供試体は凍害を受けた供試体に比べ、補修処理後の再劣化の程度が小さい。
- (2) ウォータージェット処理により、劣化面を深く除去した供試体は、処理を行っていないもしくは除去深さの浅い供試体に比べ、再劣化しにくい。
- (3) 補修材として無収縮モルタル、ポリマーセメントモルタル、HPFRCC の 3 種類を使用し供試体を補修した。補修後の再劣化挙動を比較すると、ポリマーセメントモルタルおよび HPFRCC を補修材として使用した供試体の再劣化が小さい事が分かった。

今後は、ウォータージェット処理の深さが深い場合に、補修効果が高くなる要因を解明すると同時に、補修効果と強度など力学特性との関係を検討する予定である。

謝辞

本実験のウォータージェット処理に際し、(株)デーロス・ジャパン林承燦氏から多大な協力を賜った。ここに付記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 上原子晶久，菅原隆：凍結融解環境下における連続繊維シートの付着性状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1715-1720，2006
- 2) 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
- 3) 月永洋一，庄谷征美，菅原隆，土門勝司：凍結融解作用を受けるコンクリートの劣化判定とその補修技術に関する基礎的研究，材料，Vol.43，No.491，pp.983-989，1994
- 4) JIS A 1148：コンクリートの凍結融解試験法
- 5) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルの評価と利用，コンクリート技術シリーズ，No.64，pp.1-32，2005