

学 位 論 文

コンクリートの耐凍害性能の評価と
補修材としての HPFRCC の適用

Evaluation of frost resistance of concrete and
applications of HPFRCC as repair materials

平成 28 年 2 月

岐阜大学大学院

工学研究科博士後期課程

生産開発システム工学専攻

大畑 卓也

目次	頁
第1章 序論	1
1.1 背景	1
1.1.1 はじめに	1
1.1.2 凍害	1
1.1.3 HPFRCC	3
1.1.4 HPFRCC の適用例	4
1.2 本研究の目的	8
1.2.1 凍害を受けるコンクリート構造物に対する HPFRCC 補修材の適用	8
1.2.2 耐凍害性の評価	9
1.3 本論文の構成	10
1.4 凍害に関する研究例	11
1.4.1 凍害を受けるコンクリートに関する研究例	11
1.4.2 凍害を受けた HPFRCC の研究例	17
第2章 凍結融解作用が HPFRCC 積層供試体の力学性状に及ぼす影響	21
2.1 はじめに	21
2.2 試験概要	21
2.2.1 試験供試体	21
2.2.2 凍結融解試験	24
2.2.3 三等分点曲げ載荷試験	25
2.2.4 付着強度試験	26
2.3 実験結果と考察	27
2.3.1 凍結融解試験	27
2.3.2 三等分点曲げ載荷試験	29
2.3.3 付着強度試験	29
2.4 まとめ	32
第3章 表面補修後にひび割れを導入した部材のスケーリングと鉄筋腐食への乾湿および塩水の影響	34
3.1 はじめに	34
3.2 実験概要	34
3.2.1 供試体概要	34
3.2.2 ひび割れ導入試験	36
3.2.3 緩速凍結融解試験	36
3.2.4 乾湿繰返し試験	37

	頁
3.2.5 硝酸銀発色試験	37
3.2.6 腐食面積率	38
3.3 実験結果と考察	38
3.3.1 緩速凍結融解試験	38
3.3.2 硝酸銀発色試験	43
3.3.3 腐食面積率	47
3.4 まとめ	49
第4章 ダンベル型供試体を用いた凍結融解作用後の HPCRCC の引張性能の評価と中空骨材の効果	51
4.1 はじめに	51
4.2 角柱供試体を用いた凍結融解試験	52
4.2.1 実験概要	52
4.2.2 実験結果と考察	55
4.3 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	59
4.3.1 実験概要	59
4.3.2 実験結果と考察	61
4.4 まとめ	63
第5章 凍害を想定した脆弱モデル層がコンクリートの動弾性係数の計測値に及ぼす影響	65
5.1 はじめに	65
5.2 実験概要	65
5.2.1 使用材料および配合	65
5.2.2 供試体概要	66
5.2.3 試験方法	67
5.3 実験結果と考察	68
5.3.1 PM 単体供試体	68
5.3.2 PM 積層供試体	69
5.4 まとめ	75
第6章 凍害劣化したコンクリートの物質侵入抵抗性の評価	77
6.1 はじめに	77
6.2 実験概要	77
6.2.1 供試体概要	78
6.2.2 吸水試験及び透水試験	81
6.2.3 凍結融解試験	82
6.2.4 塩水浸漬試験	82

	頁
6.2.5 塩化物量の測定	80
6.3 実験結果と考察	80
6.3.1 透水試験結果	81
6.3.2 凍結融解試験結果	83
6.3.3 硝酸銀溶液噴霧試験結果	87
6.3.4 蛍光 X 線分析結果	87
6.4 まとめ	89
第 7 章 結論	91
7.1 はじめに	91
7.2 各章の結論	91
7.2.1 凍結融解作用が HPFRCC 積層供試体の力学性状に及ぼす影響	91
7.2.2 表面補修後にひび割れを導入した部材のスケーリングと鉄筋腐食への乾湿 および塩水の影響	92
7.2.3 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	92
7.2.4 凍害を想定した 脆弱モデル層がコンクリートの動弾性係数の計測値に 及ぼす影響	93
7.2.5 凍害劣化したコンクリートの物質侵入抵抗性の評価	93
7.3 今後の課題	94
7.3.1 凍害を受けるコンクリート構造物に対する HPFRCC 補修材の適用	94
7.3.2 耐凍害性の評価	94
発表論文	95
謝辞	97

第1章 序論

1.1 背景

1.1.1 はじめに

高度成長期(1960年～1970年代)に建設されたインフラの多くは建設後50年以上経過し、老朽化が懸念されている。さらに今後20年間では、建設後50年以上経過する¹⁾インフラは加速度的に増加することが知られている。表-1.1に示すインフラの多くは、コンクリート構造物である。近年では、鉄筋コンクリートの塩害(沿岸部では飛来塩、寒冷地域では凍結防止剤の使用による塩害)や、アルカリ骨材反応などの劣化機構により甚大な損傷を受ける構造物が問題となっている。これらのコンクリート構造物を長寿命化するため、現状を的確に把握し、適切に維持管理することが求められている。

表-1.1 建設後50年以上経過する社会資本の割合¹⁾

	H25年3月	H35年3月	H45年3月
道路橋 [約40万橋 ^{注1)} (橋長2m以上の橋約70万のうち)]	約18%	約43%	約67%
トンネル [約1万本 ^{注2)}]	約20%	約34%	約50%
河川管理施設(水門等) [約1万施設 ^{注3)}]	約25%	約43%	約64%
下水道管きよ [総延長:約45万km ^{注4)}]	約2%	約9%	約24%
港湾岸壁 [約5千施設 ^{注5)} (水深-4.5m以深)]	約8%	約32%	約58%

注1) 建設年度不明橋梁の約30万橋については、割合の算出にあたり除いている。
 注2) 建設年度不明トンネルの約250本については、割合の算出にあたり除いている。
 注3) 国管理の施設のみ。建設年度が不明な約1,000施設を含む。(50年以内に整備された施設については概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約50年以上経過した施設として整理している。)
 注4) 建設年度が不明な約1万5千kmを含む。(30年以内に布設された管きよについては概ね記録が存在していることから、建設年度が不明な施設は約30年以上経過した施設として整理し、記録が確認できる経過年数毎の整備延長割合により不明な施設の整備延長を按分し、計上している。)
 注5) 建設年度不明岸壁の約100施設については、割合の算出にあたり除いている。

本論文では、コンクリートの凍害劣化に着目して研究をまとめた。凍害劣化したコンクリートの補修材として、耐凍害性に優れ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)を適用することに主眼を置き、弱点になると想定される母材コンクリートと補修材との界面の影響や、凍結防止剤の散布を模擬した凍害と塩害の複合劣化、日照の影響を考慮した凍害と乾湿繰り返し作用の複合劣化、HPFRCCの吹付施工によるエントレインドエア消失の影響について、研究を実施した。また、凍結融解作用を受けたコンクリートの耐凍害性を定量的に評価することを目的として、安定して共鳴振動数を計測する研究や、塩化物イオンをトレーサーとして可視的に凍害劣化した範囲を特定する研究を行った。

1.1.2 凍害

コンクリートの凍害とは、コンクリートの細孔中に含まれる水分が凍結することで生じる膨張圧と水分の移動によってコンクリートが破壊される現象である。水は凍結するとき自由に膨張できる場合9%の体積膨張を生じる。コンクリート内部では温度低下に伴い、大きい空隙中の水が凍結し、次いで小さい空隙中の水が凍結してゆく。このため小さい空隙中の水が凍結する過程では、大きい空隙

中にできた氷晶により膨張が拘束される。この膨張を緩和するだけの自由空間が存在しない場合に大きな水圧が空隙の壁に作用し、これがコンクリートの引張強度に達したときにひび割れが生ずると考えられている。凍害の劣化には、外観上の劣化と内部劣化に分けられる。外観上の劣化は、凍結と融解の繰り返しによりコンクリート表面から徐々に劣化し、コンクリート表面にスケーリングやポップアウトなどの形で劣化が進展する。スケーリングはコンクリートが水で濡れている場合に、水の凍結膨張による劣化に先行して表面層の劣化を起こす現象である（図-1.1）。このような劣化には AE 剤の空気混入だけで対応することができないため、水セメント比の減少などによってコンクリート組織の緻密化を行う必要がある。またポップアウトは多孔質で吸水率の高い粗骨材（軟石）が骨材中の水分の凍結によって膨張を起こし、骨材表面のモルタル層を剥落させる現象である（図-1.2）。粗骨材の膨張が劣化原因であり、AE 剤等にだけで対応することが難しく、均質で良質な骨材を使用する必要がある。

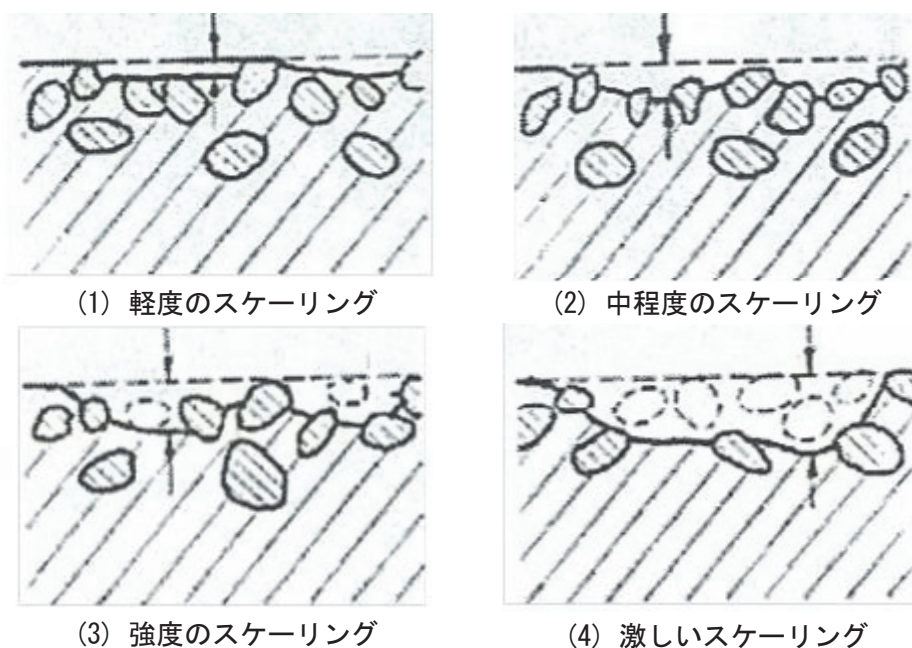


図-1.1 スケーリング劣化の進展²⁾

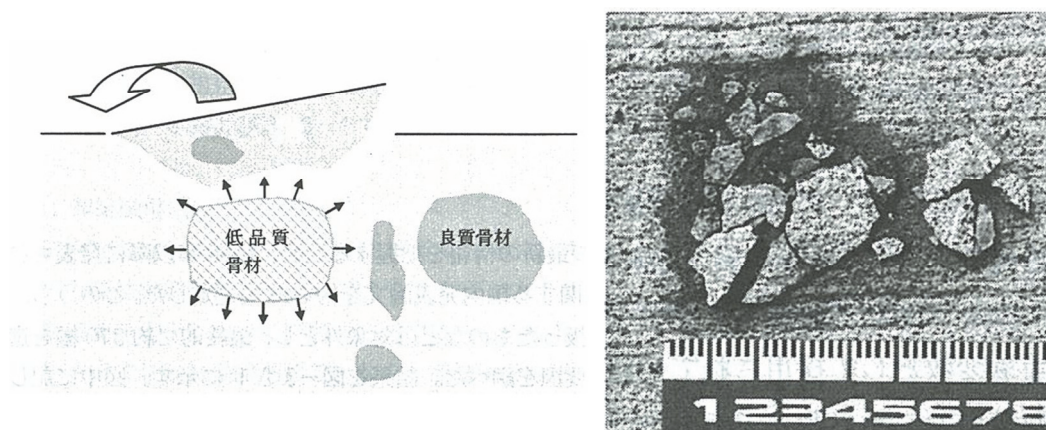


図-1.2 ポップアウト発生の模式図とポップアウトによるひび割れ²⁾

凍害の内部劣化は、凍結融解作用により微細ひび割れが生じ、コンクリートの細孔構造が変化して起こる劣化である。コンクリートの気泡間隔が $250\mu\text{m}$ 以下の場合には耐久性指数が高く耐凍害性に優れ、 $450\mu\text{m}$ より大きいと耐久性指数が低く耐凍害性が著しく低下することが報告²⁾されている。コンクリートに残存する空気量が同量であっても、大きな径の気泡がまばらに存在するよりも、細かい気泡が密に存在する方がクッション効果により、凍結による膨脹圧を緩和する効果が大きいと考えられる。内部劣化に対しては、AE 剤による独立した微細な気泡を連行させることが有効である。

1.1.3 HPFRCC

コンクリート工学の分野においてひび割れを制御あるいは抑制することは重要な課題となっている。現在、コンクリート内部に鉄筋を配筋することで、ひび割れを制御する RC (Reinforced Concrete) 構造や、あらかじめコンクリートに圧縮力を導入した PC (Prestressed Concrete) 構造とすることでひび割れを発生させない構造物を造ることが考案され、普及している。

こうした PC や RC に加え近年では、セメント系材料に短繊維を混入した繊維補強セメント系材料が注目されている。従来、短繊維の混入の目的は鋼繊維補強コンクリートなどにみられるように、脆性破壊の改善や引張強度の向上が主な目的であったが、近年、鋼繊維補強コンクリートに比べより高靱性でより微細なひび割れ特性を有した材料として、HPFRCC (High Performance Fiber Reinforced Cement Composites) が注目されている³⁾。

HPFRCC の特性は一軸引張応力下における擬似ひずみ硬化特性と複数微細ひび割れによって特徴づけられる (図-1.3)。繊維の架橋効果によって発生した複数微細ひび割れは、 0.1mm 前後、最大でも 0.2mm 以下に制御されている。また HPFRCC は、引張変形の増大に伴いひび割れ幅が増大するのではなく、ひび割れ本数が増加する点が特徴である。

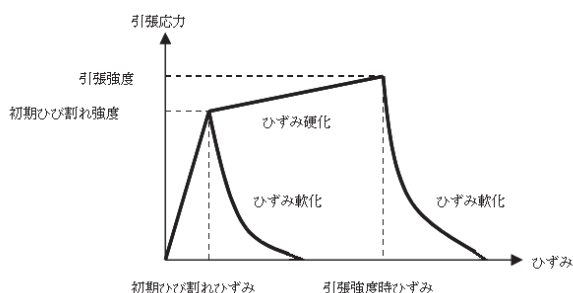


図-1.3 擬似ひずみ硬化特性³⁾

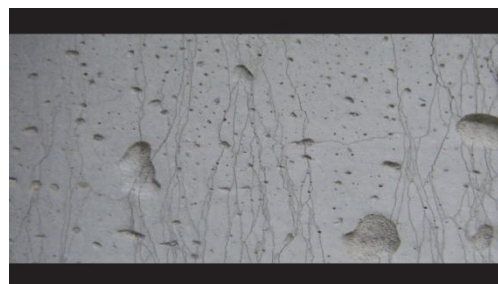


写真-1.1 複数微細ひび割れ

1.1.4 HPFRCCの適用例

(1) 美原大橋

美原大橋（橋長 972m，中央支間 340m，構造形式：3 径間連続鋼床版箱桁）は，将来における大型車交通量の需要増加を見込み，鋼床版の疲労損傷を抑制するため HPFRCC の一種である ECC を上面増厚した工法³⁾を適用した。補強工法の概要を図-1.4³⁾に示す。この文献³⁾では，鋼床版に ECC を用いることにより，鋼床版に大きな引張ひずみが作用した場合にも引張力が保持できることから上面増厚材料としての効果を期待できると報告されている。写真-1.2⁴⁾，1.3⁴⁾には，美原大橋の全景と ECC 施工状況を示す。美原大橋の施工では，施工面積が 20,000m² と大規模敷設施工が必要となり，800m³ の ECC を製造する必要があった。ECC の製造は，レーディミクストコンクリート工場を夜間占用することで製造を可能とし，大規模の敷設施工についてはコンクリート舗装用機械を改良使用し，左官仕上げの併用により施工が可能となったことが報告されている。

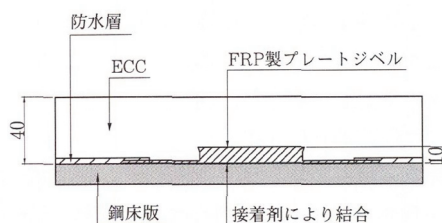


図-1.4 補強工法の概要



写真-1.2 美原大橋全景



写真-1.3 施工状況

(2) 三高ダム

三高ダム（堤高 44m，堤体積 119000m³）は 2003 年に既設堤体の下流側に新堤コンクリートを打設して嵩上げを行うリニューアル工事を行った。そのため，嵩上げされたダムの上流側では，既設堤体が露出するが，堤体の劣化調査結果から写真-1.4⁵⁾に示すように劣化が進んでいることが確認され，劣化の進行は既設堤体の約 500m² に広がっており，止水性の低下が報告されている。この文献⁵⁾では，既設堤体が，乾湿繰り返しや凍結融解を受けやすい部位であることなどから，ひび割れ抵抗性および耐久性に優れる吹付け ECC を採用し，止水性の改善が図られたと述べられている。写真-1.5⁴⁾にリニューアル工事後の三高ダムの全景を示し，吹付け ECC の施工状況を写真-1.6⁴⁾に示す。



写真-1.4 既設堤体の劣化状況



写真-1.5 三高ダムの全景

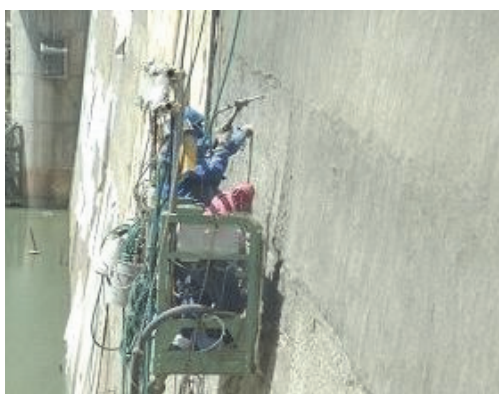


写真-1.6 吹付 ECC 施工状況

(3) 農業用水路

老朽化した農業用の水路漏水対策において、従来のセメント系材料による補修では、ひび割れや目地部の膨張・収縮に対する追従性に劣るため、補修後の早期にひび割れが発生し、漏水することが問題となっている。文献⁶⁾では、関東地方の2箇所（茨城県つくばみらい市，茨城県水戸市），東北地方（岩手県花巻市）および近畿地方（和歌山県紀の川市）の合計4箇所における経過観測結果を示し、実施工から5年間にわたって止水性を保持していることなどを報告している。

写真-1.7⁶⁾に、吹付けECCの施工状況を示す。またこの文献では、吹付けECCは、3400サイクル程度まで相対動弾性係数が85%以上と、高い凍結融解抵抗性を示すことや、耐摩耗性、疲労耐久性についても優れた性能を示すことを報告している。つくばみらい市（左：補修前，右：補修後）の補修事例を写真-1.8⁶⁾に示す。



写真-1.7 吹付け ECC 施工状況



写真-1.8 つくばみらい市での補修事例（左：補修前，右：補修後）

(4) 防音壁保護モルタル

防音壁の保護モルタル(図-1.5⁷⁾)は、補修用通路としての役割の他に、防音壁の耐力向上、雨水等の侵入による鉄筋腐食の防止を目的としている。そのため、防音壁を介して作用する列車風圧や風荷重、列車振動等の外力に対して、ひび割れの発生しない材料が要求される。文献⁷⁾では、HPFRCCの1種である高靱性繊維補強ポリマーモルタル(プレミックスタイプ)が、ひび割れの発生を抑制した防音壁保護モルタルに適していると報告されている。

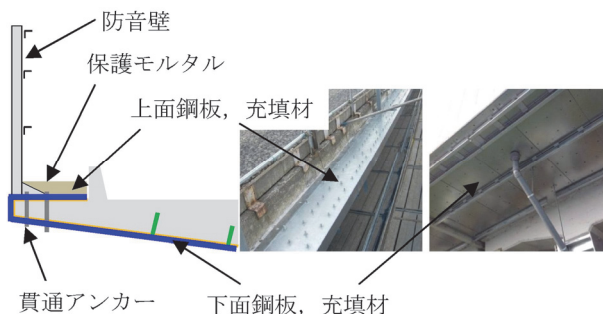


図-1.5 防音壁保護モルタルの概要

使用した、高靱性繊維補強ポリマーモルタルは、特殊ポリマーと多量の短繊維を配合し、高い靱性と短繊維の架橋効果により、乾燥収縮及び引張作用時のひび割れ抑制が期待され、ひび割れ後もひび割れ幅を微小に抑制する効果も期待されると紹介されている。表-1.2⁷⁾に防音壁保護モルタルの要求

性能を示す。写真-1.9⁷⁾に防音壁保護モルタルの全景を示し、写真-1.10⁷⁾に防音壁保護モルタル施工状況を示す。

表-1.2 防音壁保護モルタルの要求性能

項目	試験条件		要求性能
圧縮強度[N/mm ²]	JIS R 5201	3時間	8以上
		7日	24以上
		28日	40以上
曲げ強度[N/mm ²]	JIS R 5201	7日	15以上
付着強度[N/mm ²]	JIS A 1171	3時間	0.8以上
		7日	1.5以上
引張強度[N/mm ²]	一軸直接 引張試験	28日	4.5以上
引張終局ひずみ[%]		28日	2.0以上
引張平均 ひび割れ幅[mm]		28日	0.15以下
硬化収縮率[%]	JIS A 1129		0.05以下



写真-1.9 防音壁保護モルタルの全景



写真-1.10 防音壁保護モルタル施工状況

1.2 本研究の目的

1.2.1 凍害を受けるコンクリート構造物に対する HPCRCC 補修材の適用

HPCRCC 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、凍害環境下での補修材としての適用が期待されている。しかしながら、近年の環境の変化に伴い、凍害環境下に加えて、塩害や ASR など複合劣化を考慮する必要がある。また、橋台のパラペットや、地覆などの、常に雨水等が供給される箇所については、乾燥・湿潤が繰り返される環境による劣化因子に対して考慮する必要がある。そこで、凍害とその他の劣化因子による複合劣化を模擬した実験を行い HPCRCC の補修材としての適用を検討した。

(1) 凍害+打ち継目（または打ち重ね継目）の影響

HPCRCC 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 HPCRCC は 10mm 程度の厚さで施工する 경우가多く、HPCRCC を複数回打ち重ねて用いる場合もある。HPCRCC 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、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、HPCRCC 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は、詳細には検討されていない。そこで、普通コンクリート（以下 NC）と HPCRCC との積層構造物を想定し、NC 供試体上面に HPCRCC を打ち継いだ積層供試体を作製する。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。これらの供試体に対して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する。

(2) 凍害+乾湿、凍害+塩害の影響

HPCRCC は、寒冷地の橋梁などに用いられており、その高い耐凍害性が報告³⁾されている。これは、マトリクス間の繊維が架橋し、ひびわれ幅が抑制されるためと考えられている。しかし、凍結融解環境下では、融解過程で乾湿の繰返しが作用する。乾湿が繰り返す場合、普通コンクリートや普通モルタルの耐凍害性が低下することが報告⁸⁾されている。

スパイクタイヤの使用規制に伴い、寒冷地では塩化物系の凍結防止剤が多量に散布され、凍害と塩害の複合劣化が問題となっている。このため、塩水の影響を考慮した耐スケーリング性についての研究⁹⁾が行われている。しかし、普通コンクリートに乾湿の繰返し作用する場合、塩分の浸透が速くなることが報告¹⁰⁾されており、スケーリング劣化及び塩害が促進されることが考えられる。また、多くの既設構造物はひび割れを有しているが、凍結融解試験にひび割れを有したコンクリートを用いた研究は少ないのが現状である。さらに、凍害によるスケーリング劣化は、構造物の美観を大きく損なうため、美観の維持を検討する必要がある。

そこで本研究では、HPCRCC を橋梁等の補修材として適用することを考え、HPCRCC を補修材とする積層供試体を作製する。また、比較用として補修材にポリマーセメントモルタルと普通モルタルを積層した供試体と、全断面を普通コンクリートとした供試体とを作製する。その後、引張試験により供試体にひび割れを導入し、凍結融解試験 5 サイクル毎に乾湿工程をはさみながら塩水等による緩速凍結融解試験を行い、乾湿繰返しの有無、塩水の有無及びひび割れの有無が耐スケーリング性に与える

影響について検討する。

(3) 中空骨材を用いた HPFRCC の耐凍害性について

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）が低下してしまう可能性がある。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。

1.2.2 耐凍害性の評価

一般に、コンクリートの耐凍害性は JIS 1148A などの凍結融解試験方法や凍害深さを計測する試験法や目視によるレイティングによって評価を行っている。その中でも凍結融解試験方法は凍結融解抵抗性を評価するために 300 サイクル後の質量や一次共鳴振動数を計測し、質量減少率および、動弾性係数を算定する必要がある。しかし、その試験方法には多大な労力が必要とされるため、簡略的に評価する手法の開発が望まれている。そこで、凍害劣化したコンクリートに塩化物イオンを浸透させ、凍害劣化した範囲を可視化する手法の提案を行う。また、動弾性係数の計測では、共鳴振動法にてコンクリート表面の組織の緩み具合を計測し、評価を行っている。それは、凍害劣化によりコンクリート組織が粗くなるという性質があるためである。そこで、火山岩系岩石を熱発泡させた細骨材をコンクリートに混入させて凍害劣化により脆弱化したコンクリートを模擬し、動弾性係数への影響について検討を行う。

各章の概要を以下に示す。

(1) 動弾性係数から凍害劣化の把握

コンクリートの凍結融解試験における動弾性係数の計測では、供試体にたわみ振動を与えコンクリートの一次共鳴振動数を計測し、供試体が一樣に脆弱化していると仮定して動弾性係数を算出している。しかし、凍害による脆弱化は表面に近いほど進展しており、一樣ではないことが知られている。凍害劣化の指標である動弾性係数を安定的に計測するためには、こうした点に留意する必要がある。

本研究では、黒曜石を熱発泡させた細骨材（パーライト、以下、PL）を使用し、凍害を受けて脆弱化したコンクリート層を模擬したモルタルを作製する。この脆弱モルタル層と普通コンクリートとを打継ぎ、脆弱層の厚さや位置を変えた積層角柱供試体を作製し、共鳴振動法により動弾性係数を計測する。脆弱の程度（PL の混入割合）や厚さ、積層供試体中の脆弱層の位置が、計測される動弾性係数の値に及ぼす影響を明らかにし、安定した計測値を得る方法を提案する。

(2) 凍害劣化範囲の可視化について

凍害を受けた構造物の補修を行う場合、凍害深さと鉄筋腐食の進行を把握する必要がある。しかし、コンクリートの凍害についてその劣化の進行予測、構造体の余寿命の推定等は、現在のところ極めて困難である。凍害を受ける構造物の調査では、外観上のグレードに応じて劣化状態の評価²⁾を行っている。近年では、凍害を受ける構造物の詳細調査として構造物からコア供試体採取して、コンクリ

ート表面から深さ毎の超音波伝播速度の分布や細孔径分布の径別の割合から凍害深さを求める方法が検討されている。

本研究では、凍害を受けたコンクリート構造物は表層より劣化が進行し、組織を緩ませて劣化することに着目し、塩水をトレーサーとして簡便に物質侵入抵抗性を可視的に評価する方法について提案を行う。

1.3 本論文の構成

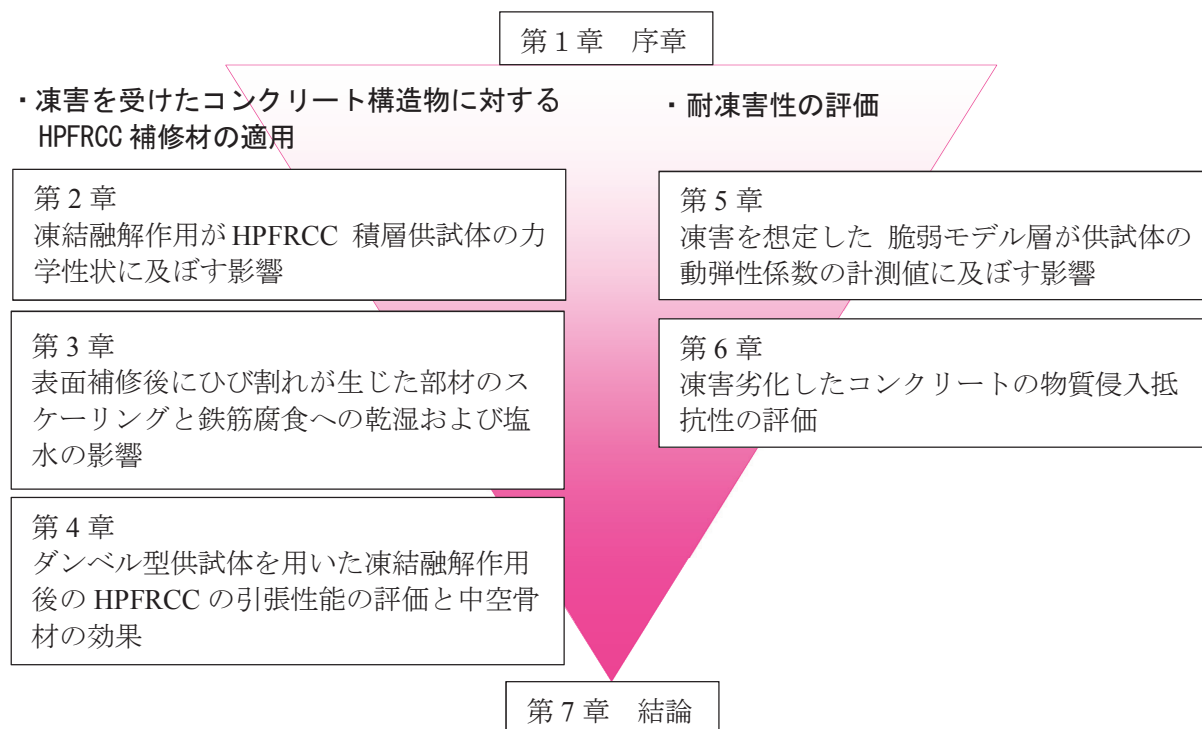


図-1.6 論文構成

第 1 章では研究の背景および研究目的、凍害に関する研究例について述べる。

第 2 章では、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した凍結融解試験を行った。凍結融解試験後、各供試体に 3 等分点曲げ載荷試験および付着強度試験を実施した。

第 3 章では、全断面 NC の単一供試体と、補修材に HPFRCC, PCM, NM を用いた積層供試体を作製し、ひび割れを導入した後に、融解過程に乾湿繰返し作用を組み込んだ緩速凍結融解試験を行った。その後、供試体を割裂させ硝酸銀発色試験より塩分浸透状況を確認し、鉄筋をはつり出し、腐食面積率を算出した。

第 4 章では、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。

第 5 章では、凍結融解試験において計測する動弾性係数を計測するための留意点を明らかにすることを目的としている。凍害を受けて脆弱化したコンクリート層を模擬したモルタルを、火山岩系岩石を熱発泡させた細骨材（パーライト）の混入割合を変えて作製した。この脆弱モルタル層に普通コンクリートを打継ぎ、脆弱層の厚さや位置を変えた角柱供試体を作製し、共鳴振動法により動弾性係数を計測した。

第 6 章では、塩化物をトレーサーとして、凍害劣化させたコンクリートの物質侵入抵抗性について検討した。凍害劣化が生じやすいように空気量を小さくしたコンクリートを用いて、水中凍結融解試験を実施した。凍害劣化後、2 週間乾燥させ、NaCl 10%溶液に 2 週間浸漬し、硝酸銀噴霧と蛍光 X 線分析により塩化物浸透状況を把握した。

第 7 章に第 2 章から第 6 章までの研究成果をまとめ、現状の課題について述べている。

1.4 凍害に関する研究例

コンクリートおよび HPFRCC の凍害に関する、さまざまな検討が進められている。本節では HPFRCC に関する研究と凍害を受けるコンクリートに関する研究を抽出した。凍害を受けるコンクリートに関する研究例として、乾湿繰り返しを受けた供試体に凍結融解作用を与えた研究および、凍結融解作用がコンクリートの力学性状に与える影響、ASR と凍害による複合劣化に関する研究についての文献を引用して概説する。また、凍害を受ける HPFRCC に関する研究例として、ひび割れを導入した HPFRCC の耐凍害性に関する研究についての文献を引用して概説する。

1.4.1 凍害を受けるコンクリートに関する研究例

(1) 乾湿繰り返しが凍結融解作用に与える影響⁸⁾

普通コンクリートおよび高強度コンクリートに乾湿繰り返しの影響を与えた後に、凍結融解試験を行い耐凍害性について報告されている。供試体を表-1.3⁸⁾に示す。乾湿繰り返しによる凍結融解作用の影響を検討し、供試体を 1 年間屋外暴露した後に凍結融解試験を行い、試験結果の比較を行っている。

表-1.3 供試体水準

シリーズ1			シリーズ2					
凍結融解試験開始条件 [乾湿サイクル数][記号]	コンクリート種別 (W/C(%))			コンクリート種別 [記号]	W/C(%)	空気量(%)	凍結融解開始条件	
	25	35	45					
2週水中養生後	{-}	{c}	①③④	①③④	①③④	50	4.5	・2週水中養生後{c}
乾燥40°C6h水中42h	{7}	{w-7}	① ④		① ④			
乾燥20°C42h水中6h	{7}	{m-7}	① ④		① ④			
	{14}	{m-14}	① ④		① ④			
	{1}	{d-1}	① ④		① ④			
乾燥40°C42h水中6h	{7}	{d-7}	①③④	①③④	①③④	30	・乾燥40°C42h水中6h 7サイクル {d}	
	{14}	{d-14}	① ④		① ④			
	{21}	{d-21}	① ④		① ④			
屋外暴露	{-}	{x}	①③④	①③④	①③④			
								・屋外暴露(1年){x}
								・屋内放置(1年){i}

注) 試験体記号を[]書きで表す

①: 目標空気量1%、③: 3%、④: 4.5%

シリーズ1 例) 2-1-w-7

(W/C25%-目標空気量1%-乾湿繰り返し条件w-7サイクル)

シリーズ1及びシリーズ2

乾湿繰り返しの乾燥過程では、シリカゲルをいれ乾燥状態を保ったチェンバーに試験体を静置し、各種乾燥条件で乾燥した屋外暴露試験体は、北海道大学工学部建築棟屋上に設置した水切りのよい台上で1年間暴露したもの(図-1)

シリーズ2 例) Rd
(再生骨材コンクリートに乾湿繰り返し条件dをかけたもの)
なお、7サイクルのものは「d-7」を「d」と略記する場合もある。

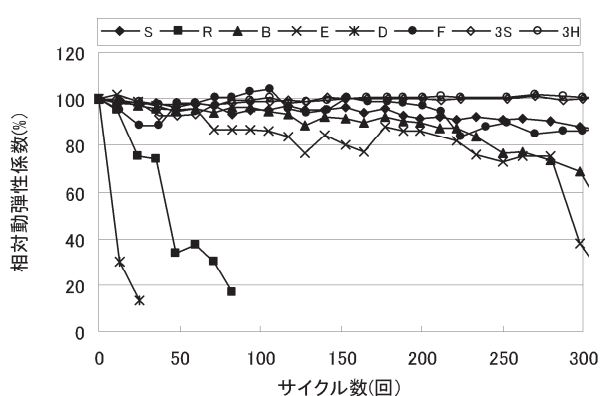


図-1.7 凍結融解試験結果（基準）

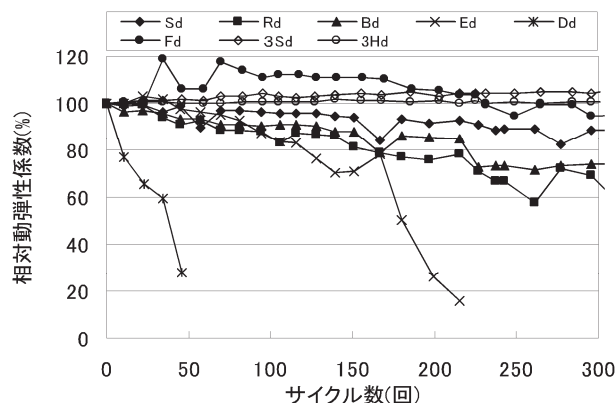


図-1.8 凍結融解試験結果（乾湿後）

凍結融解試験結果を図-1.7 および図-1.8 に示す。再生骨材コンクリートについては、乾湿繰返しを行わないものと比較して耐凍害性が向上する結果となり、反対に、エコセメントコンクリートは乾湿の影響により耐凍害性が低下することが報告されている。高強度コンクリートについては、高い耐凍害性を有しており、大きな変化がなかった。そのため、当該論文では、コンクリートの種別によっては乾湿繰返しにより耐凍害性が向上するもの、低下するもの、およびほとんど変化しないものがあることが明らかとなった。この結果は凍結融解試験期間にコンクリート内部は養生が進んだため、相対動弾性係数の結果には乾湿の影響が明確ではなかったと報告されている。

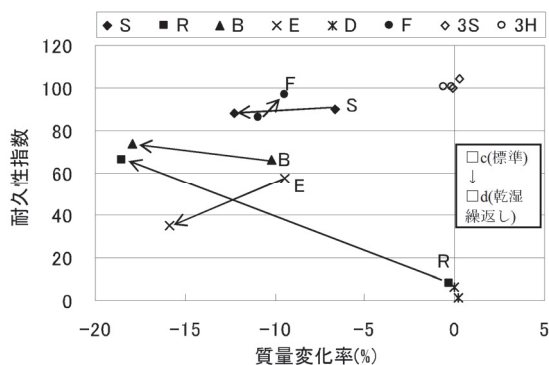


図-1.9 凍結融解試験後の質量変化率と耐久性指数

凍結融解試験後の質量変化率と耐久性指数について図-1.9 に示す。フライアッシュ供試体を除く全ての供試体において、標準供試体よりも乾湿繰返しを作用させた供試体の質量変化率が大きくなったことが報告されている。これは、供試体表面は乾湿繰返しによる劣化の影響を受けやすいためスケリングが激しくなったと報告されている。

(2) コンクリートの耐凍害性におよぼす環境要因の影響⁹⁾

文献⁹⁾では、凍害に影響を及ぼす膨大な因子の中から比較的重要と思われる外部環境因子、7つの因子を抽出している。凍害、複合劣化に関する国内発表論文を約540編選定し、実験変数として採用

されている環境要因について調べた結果を図-1.10⁹⁾に示す。採用されている環境要因の中で最も多いものは凍結融解回数で97編(全体の26%)、次いで最低温度が71編(19%)、海水作用が66編(18%)、水分・乾燥が62編(17%)、凍結防止剤が41編(11%)、日射・方位が14編(4%)で、その他として積算温度、温度保持、風速、雪、標高などが数編あったと報告されている。

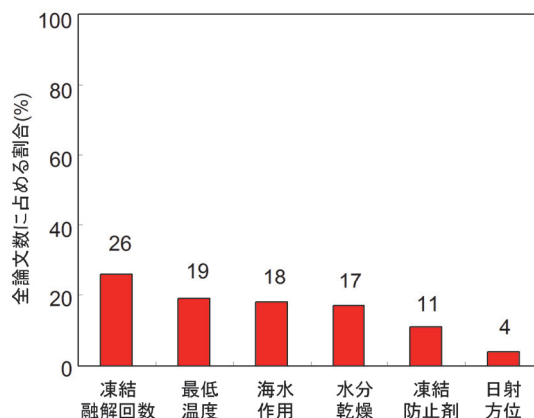


図-1.10 論文で採用されている環境要因

環境要因のことが述べられている代表的な著書を調査した結果、表-1.4⁹⁾に示す。取り上げられていた環境要因とは、①凍結融解回数②最低気温③風④凍結時間⑤凍結速度⑥水分⑦乾燥⑧日射の8つであった。

表-1.4 著書で取り上げられていた環境要因

	文献1)	文献2)	文献3)	文献4)
凍結融解回数	○	○	○	○
最低温度	○	○	○	○
日射			○	
凍結持続日数			×	
凍結速度	×		×	
乾燥		○		
水分	○	○	○	○
風			○	

×)影響が小さいと記述されているもの

以下に各環境要因について抜粋して紹介する。

①凍結融解回数

凍結融解試験では、配合によって相対動弾性係数が300サイクル終了時に80%以上でも凍結融解回数2000回では60%以下になる場合がある等が報告されており、凍結融解回数は凍害劣化に大きく影響する要因である。実環境においても、竣工後から数年は健全なものでも年月を経て凍害が発生・進行していくこと、冬季に日射の影響で融解する南面の凍害劣化が多いこと等は、凍結融解回数の影響と考えることができる。

②最低気温

最低温度が低いほど劣化の進行は顕著であった。これは、最低温度が低くなるとコンクリート中の凍結水量が多くなることが考えられる。実環境においても最低気温が低い地域の凍害劣化が著しいことは、最低温度が凍害劣化に大きく影響していることを示すものといえる。

③風

風の影響として雪を付着させて湿潤状態とすること、部材の表面を急激に冷やすこと等が考えられる。なお、気温の低下とともに、風の作用によりコンクリートの温度がさらに低下する可能性もある。

④凍結時間

凍結持続時間が凍害劣化に与える影響は小さいとされており、実構造物においても同様に影響は小さいとされていた。

⑤凍結速度

凍結速度が大きい程、劣化程度が大きいとされていた。これは、凍結時間が短く氷の形成に伴って発生する水圧が緩和されにくいこと、冷却速度が大きいものは表面付近と内部の温度差が常にあったことなどが原因と考えられている。一方、実構造物においては室内試験ほど冷却速度が大きいいため、凍結速度の影響は小さいとされていた。

⑥水分

水分の影響に関しては、コンクリートの飽水度が85~90%以上になると耐凍害性が得られなくなるが、飽水度が低い条件となる空気中においては凍結融解作用を1500サイクル与えても、劣化の進行は緩慢で、相対動弾性係数はわずかしか低下しないとされており、凍害劣化においては凍結融解回数などよりも水分の影響が大きいことを強調する論文が多かった。自然環境下での劣化についても、最低気温や凍結融解回数以上に水分の供給・保持条件の影響が大きいとされていた。

⑦乾燥

乾燥や乾湿繰返しについては、乾燥温度が高いほど限界飽水度が低くなり耐凍害性は低下するという報告や20℃程度の軽微な乾湿繰返しであっても耐凍害性は低下するなどの報告がなされており、乾燥や乾湿繰返しが耐凍害性にマイナスの作用を与えることが主に述べられていた。このメカニズムについて、コンクリートが乾燥を受けると、ペーストのシリケートアニオンの配列に異変が生じ、その結果、細孔構造が粗くなるためとする報告があった。

⑧日射

日射についてはコンクリートの温度変化に影響を及ぼし、凍結融解回数の増加につながるため、その影響は大きいとされていた。

上記のまとめより、凍害に影響を及ぼす比較的重要と思われる外部環境因子は、(1) 凍結融解回数、最低温度、水の供給、乾燥（乾湿）、日射（方位）、風であると結論付けられていた。

(3) 凍結融解作用がコンクリートの力学性状に与える影響¹⁰⁾

凍結融解作用を与えた後に圧縮強度試験および、曲げ載荷試験を行い力学性状に与える影響について検討を行っている。試験結果より、圧縮強度および曲げ強度、静弾性係数が低下することが報告されている。その試験結果（図-1.11¹⁰⁾）から相対動弾性係数が60%の時に圧縮強度は20%程度の低下すること、曲げ強度は60%程度の低下、そして静弾性係数は30%程度の低下であった。また、凍結融解作用を受けたコンクリートの曲げ強度と圧縮強度の関係（図-1.12¹⁰⁾）は、土木学会コンクリート標準示方書に示される一般的な関係にはならないことが報告されている。

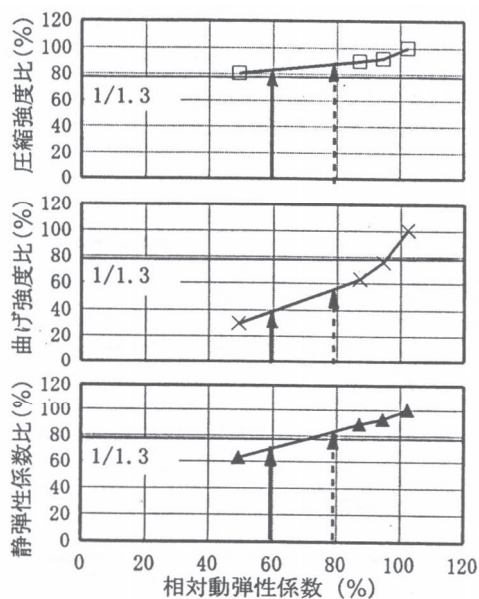


図-1.10 相対動弾性係数と各種強度比および静弾性係数

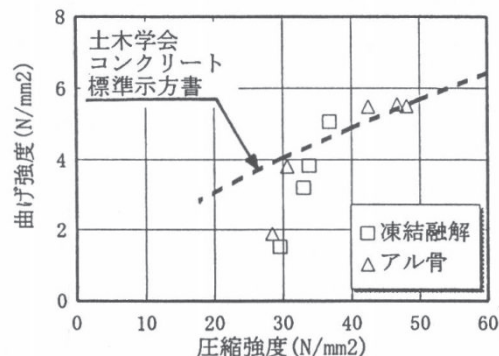


図-1.11 曲げ強度と圧縮強度の関係

(4) 凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究¹⁾

月永¹⁾らは、塩化物作用下でのスケーリング劣化に着目して研究を行い、供試体の上面・側面・底面を試験対象とし、空気量、水セメント比、養生条件および凍結防止剤の種類を変えた場合のスケーリング性状について考察している。凍結融解試験は ASTM C 672 に基づいて実施し、図-1.12¹⁾に試験結果を示す。水セメント比が小さな供試体は、水セメント比が大きい供試体よりスケーリング抵抗性が高く、表面積が多くなる打設面が底面よりもスケーリング量が大きくなることが確認できた。また、空気量とスケーリング抵抗性(図-1.13¹⁾)はほぼ対応関係がみられ、空気連行はスケーリング抵抗性の改善に有効であると報告されている。図-1.14¹⁾、15¹⁾に気中養生と封緘養生の結果を示す。気中養生は乾燥の影響によりスケーリング量が小さくなったと考えられる。凍結防止剤の種類の結果を図-1.16に示す。NaCl 3% > PPL 3% > CaCl₂ 3% > CMA 3% > IEW という序列関係を示した。日本では、主に散布している凍結防止剤は、NaCl または CaCl₂ を主成分とする二種類であるが、NaCl が廉価であるため、NaCl を主体とした散布を行っている。しかし、NaCl 3% 溶液によるスケーリングの発生が最も大きいことが確認され、NaCl の散布によるスケーリング劣化に対しては今後十分な対策を講じる必要があると述べられている。

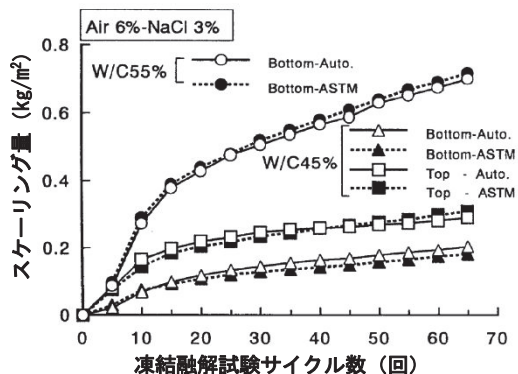


図-1.12 水セメント比とスケーリング量

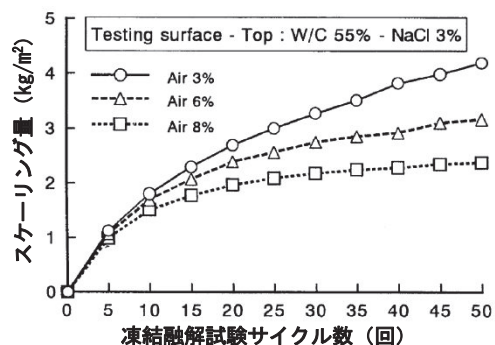


図-1.13 空気量とスケーリング量

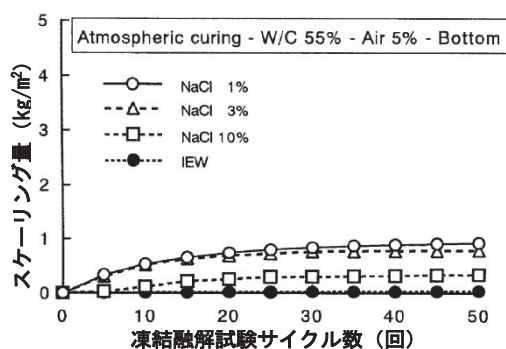


図-1.14 気中養生

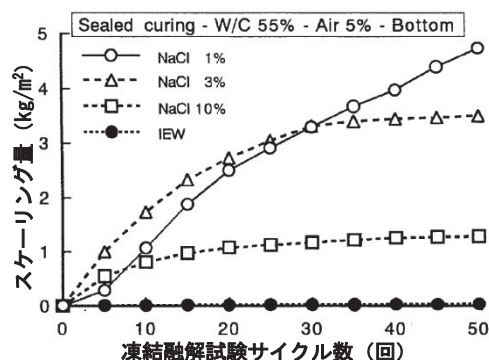


図-1.15 封緘養生

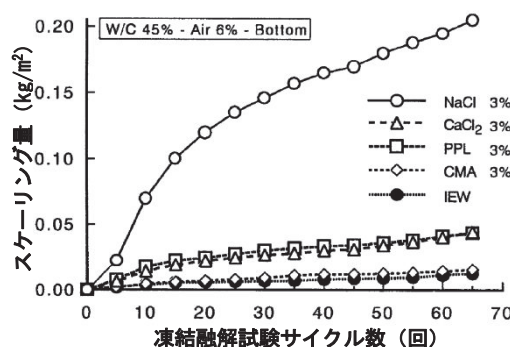


図-1.16 凍結防止剤の種類の違い

(5) ASR と凍害による複合劣化に関する研究¹²⁾

鹿野ら¹²⁾は、反応性骨材を用いた供試体を用いて ASR と凍害の複合劣化がスケーリングとコンクリートの膨張に与える影響の調査を行った。高温多湿の ASR 促進室にて劣化，膨張させた後に，急速凍結融解試験を行った結果，ASR による劣化度が著しい供試体ほど凍結融解繰返しによる劣化が大きくなることが報告されている。写真-1.10¹²⁾に凍結融解作用終了後の複合劣化供試体を示す。図-1.17¹²⁾に相対動弾性係数，図-1.18¹²⁾に質量減少率の結果を示す。



写真-1.10 凍結融解作用終了後の複合劣化供試体

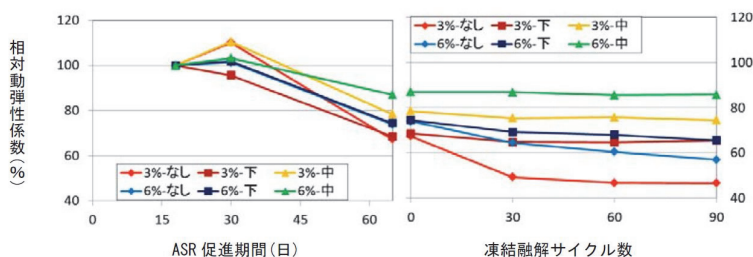


図-1.17 複合劣化（中）供試体の相対動弾性係数

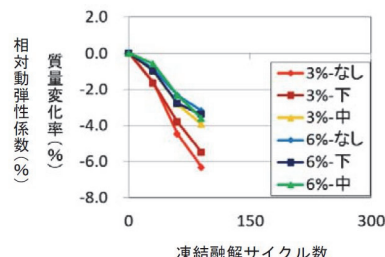


図-1.18 複合劣化（中）供試体の質量減少率

複合劣化供試体の劣化が著しい理由として下記のように考察されている。

- ①ASR によるコンクリート組織の破壊が，凍結融解試験による凍結膨張に大きく影響を及ぼしてコンクリートのスケーリングが促進される。
- ②複合劣化供試体には塩素イオン(以下，Cl⁻)が混入されているため，凍結時の膨張圧に加えて Cl⁻による浸透圧が作用してスケーリングを助長した可能性がある。

1.4.2 凍害を受けた HPCRCC の研究例

(1) ひび割れを導入した HPCRCC の耐凍害性に関する研究¹³⁾

HPCRCCによりダンベル型供試体を作製し，気中と水中の2水準で養生した後，一軸引張試験によりひずみ(0.2~1.0%)を導入した。凍結融解試験後に再び一軸引張試験を行った。凍結融解試験後に行った一軸引張試験では，導入ひずみレベルの増加にともない終局ひずみに若干の減少傾向がみられたが，ひび割れの有無に関わらず，凍結融解作用による大幅な引張性能の低下は確認されなかったことが報告されている。

実験に使用した供試体の種類を表-1.5¹³⁾に示す。加藤らはダンベル型供試体の場合，供試体の配置位置による凍結融解過程への影響が少ないよう，中心線を基準とした点対称な配置とした(図-1.19¹³⁾)。また，写真-1.11¹³⁾に示すように，検長間に発泡スチロール製の当て物をし，コンクリート製の中心柱を挿入することで，水の凍結時の体積膨張にともなう，供試体への曲げ作用防止や水量低減を行っている。ひび割れを導入したダンベル型供試体の凍結融解試験後の一軸引張試験結果を図-1.20¹³⁾に示す。

表-1.5 供試体の種類

供試体 名称	一軸引張試験	凍結融解 試験	一軸引張試験
	載荷条件		載荷条件
W4+A2	破壊		
W4+A2+A9			破壊
W4+A2+F9		有	破壊
W4+A2+F9+ε	ε=0.2, 0.5, 1.0%	有	破壊
W4+W2	破壊		
W4+W2+W9			破壊
W4+W2+F9		有	破壊
W4+W2+F9+ε	ε=0.2, 0.5, 1.0%	有	破壊

W:水中養生 A:気中養生 F:凍結融解試験
数字:期間(週) ε:導入ひずみ(%)

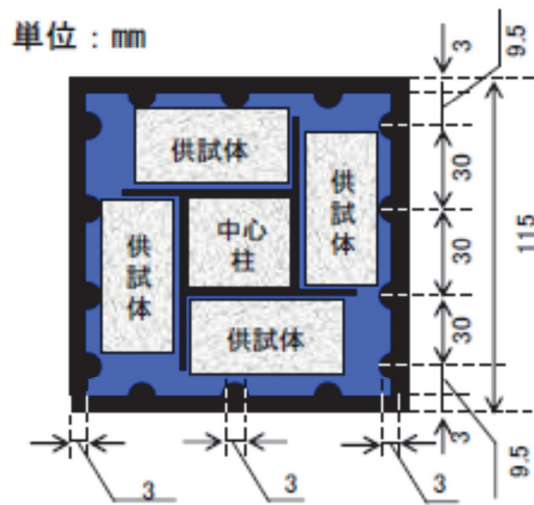


図-1.19 ゴム容器中の供試体配置

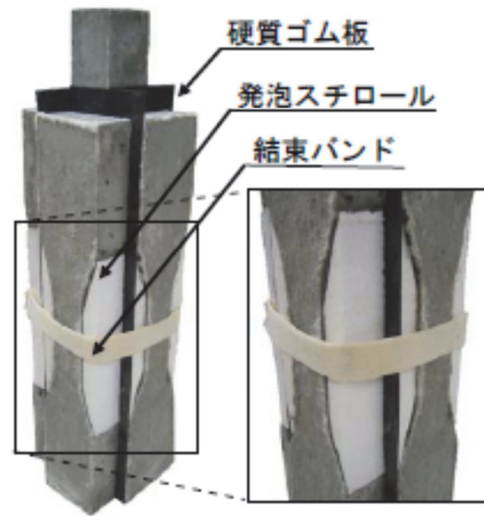
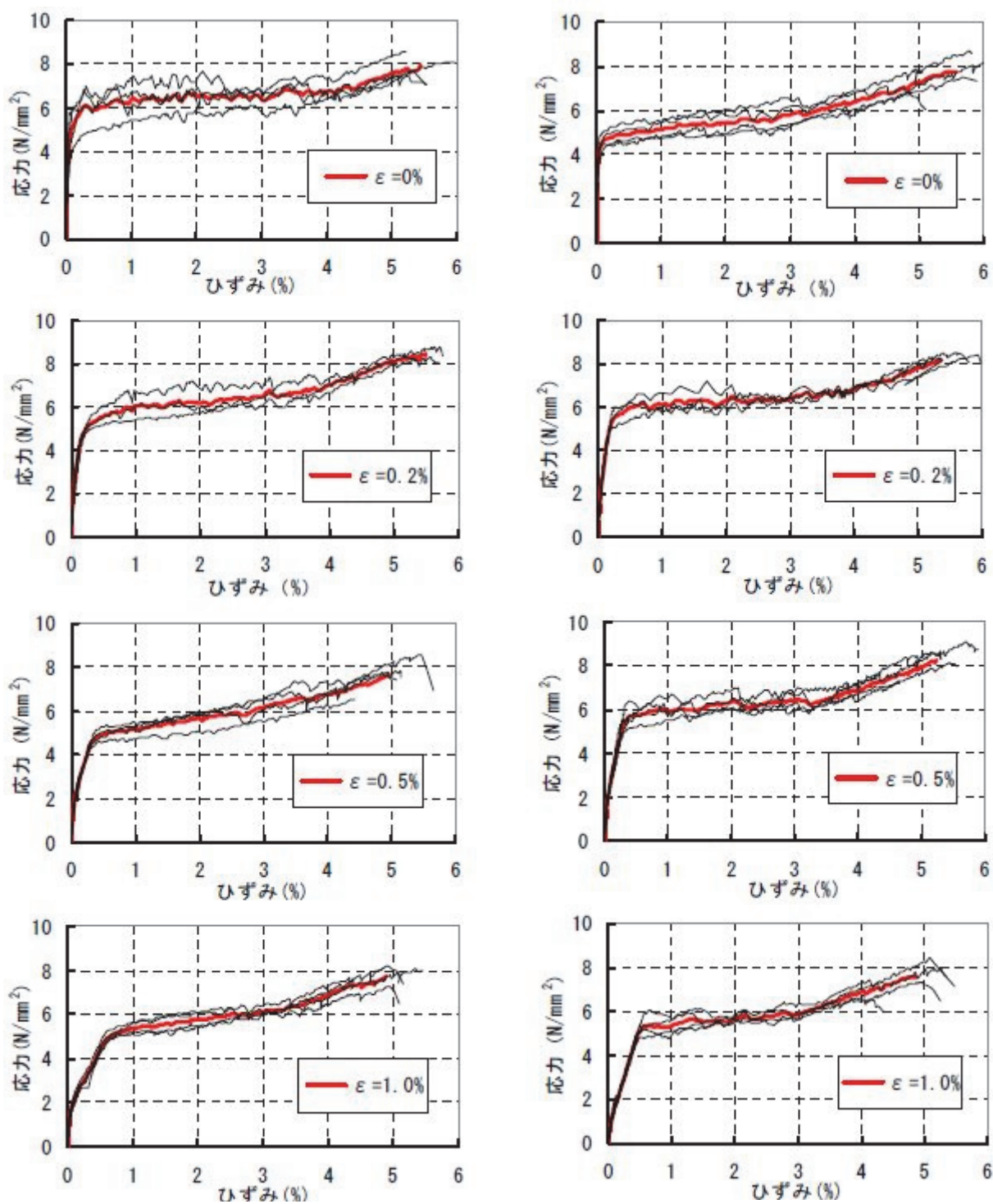


写真-1.11 ゴム容器中の供試体配置



(i) W4+A2+F9+ ϵ 供試体

(ii) W4+W2+F9+ ϵ 供試体

図-1.20 凍結融解試験後一軸引張試験結果

参考文献

- 1) 国土交通省：国土交通白書 2015，国土交通省，pp. 123, 2015.
- 2) コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，2008.
- 3) 三田村浩，坂田昇，赤代恵司，須田久美子，平石剛紀：鋼床版への鋼靱性繊維補強セメント複合材料 ECC を用いた補強工法の適用－美原大橋における施工－，橋梁と基礎，Vol.39，No.8，pp.88～91，2005.
- 4) コンクリート委員会 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料指針作成小委員会：コンクリートライブラリー127号 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），土木学会，2007.
- 5) 小島茂春，坂田昇，閑田徹志，平田剛紀：高靱性セメント複合材料を用いた吹付補修工法の適用－三高ダム上流面への適用－，コンクリート工学，Vol.42，No.5，pp.135-139，2004.5
- 6) 前山篤史，林大介，渡嘉敷勝，長束勇：吹付け ECC による水路補修に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1643-1648，2010.
- 7) 吉田幸司，関雅樹，加藤千博，六郷恵哲：東海道新幹線大規模改修工事コンクリート橋はね出し部対策の開発概要と保護モルタルの仕様，Vol.36，No.2，2014.
- 8) 米田恭子，千歩修，長谷川拓哉，相川葉月：乾湿繰返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.1131-1136，2007.
- 9) 林田宏，田口史雄，遠藤裕丈，草間祥吾：コンクリート構造物の凍害に関する環境要因と劣化予測の適用性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.909-914，2008.
- 10) 高柴保明，堺孝司，熊谷守晃：凍害およびアルカリ骨材反応を受けたコンクリートの力学特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.20，No.1，pp.221-226，1998.
- 11) 月永洋一，庄谷征美，笠井芳夫：凍結防止剤によるコンクリートのスケーリング性状とその評価に関する基礎的研究，コンクリート工学論文集，第8号，第1巻，pp.121-133，1997.
- 12) 鹿野裕，小林孝一，六郷恵哲：ASR と凍害による複合劣化に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.1000-1005，2012.
- 13) 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 HPRCC 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.

第2章 凍結融解作用が HPFRCC 積層供試体の力学性状に及ぼす影響

2.1 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 경우가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。

2.2 試験概要

2.2.1 試験供試体

凍結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（写真-2.1）、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（写真-2.2）。

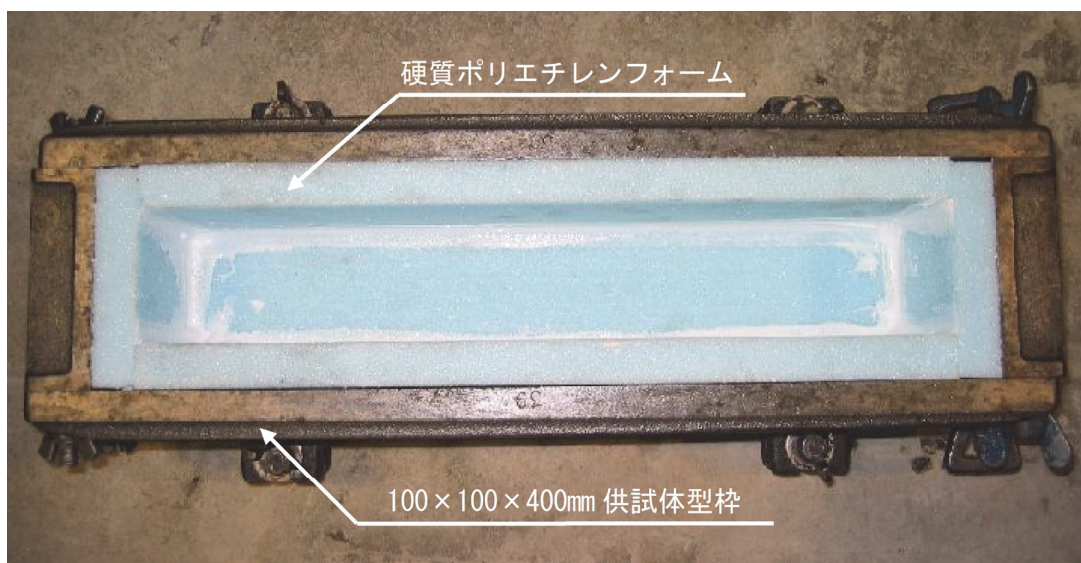


写真-2.1 硬質ポリエチレンフォーム配置状況



写真-2.2 表面処理状況

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-2.1 参照）。積層供試体は表面処理として、骨材が露出するように洗出しを行った。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 を打ち継いだ後に、上からさらに 10mm の厚さの HPFRCC を打ち重ねた（写真-2.3）。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。

各材料の物性値を表-2.1 に、配合を表-2.2 に示す。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 12 μ 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-2.3 参照）。なお、硬質ポリエチレンフォームの表面をシリコンでシーリングし、水の吸収を抑えた（写真-2.4）。

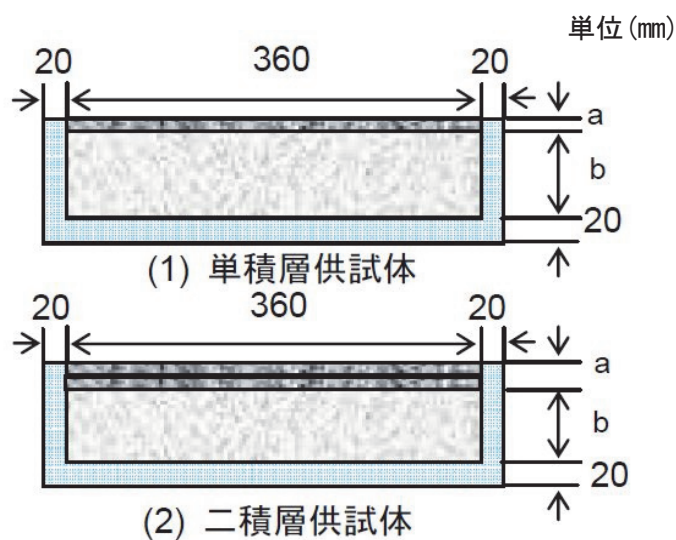


図-2.1 供試体概要



写真-2.3 打ち重ね供試体

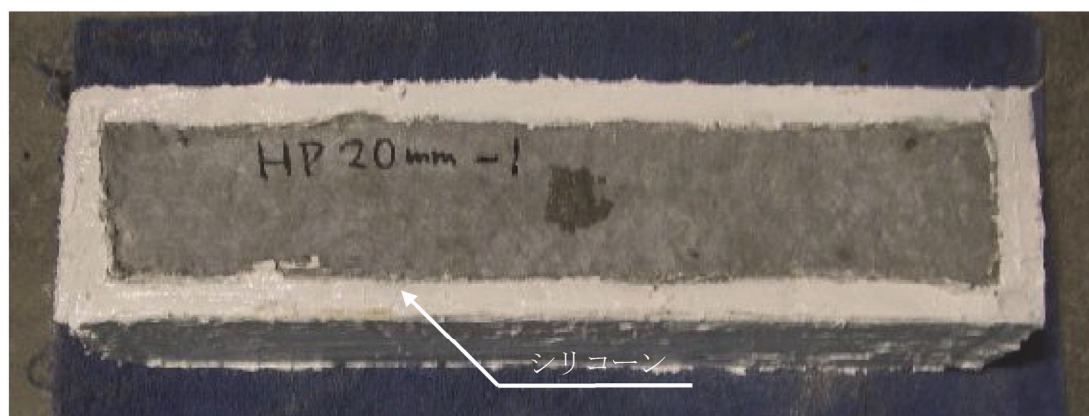


写真-2.4 供試体のシーリング状況

表-2.1 各材料の物性値

	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	フロー値		スランプ 値 (cm)
			0打(mm)	15打(mm)	
HPFRCC	52.2	10.60	125.0	150.8	-
PCM	38.8	4.49	133.9	202.5	-
NC	45.8	4.16	-	-	6.0

表-2.2 配合

材料	水セメント比 (%)	単位量(kg/m ³)							
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	高性能AE減水剤	増粘剤	繊維
HPFRCC	30	380	1264	395	-	-	3.792	0.9	14.6
NC	55	180	327	810	920	0.8175	-	-	-

表-2.3 供試体一覧

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

2.2.2 凍結融解試験

JIS A 1148 A 法²⁾に基づき、 -18°C から 5°C 、 5°C から -18°C の1サイクルを3~4時間とした。凍結融解試験機を写真-2.5に示す。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写真-2.6に示す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。切り取った硬質ポリエチレンフォームの位置からの凍害劣化を防ぐため、一次共鳴振動数計測後には、切り取った硬質ポリエチレンフォームをエポキシ樹脂にて接着し、防水処理を行った。

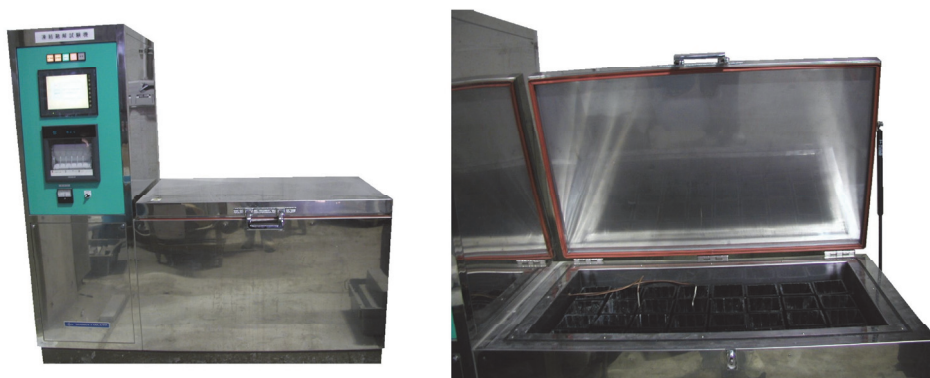


写真-2.5 凍結融解試験機



写真-2.6 共鳴振動数測定器

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 (2.1)、(2.2) より算出した。

$$P_u = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (2.1)$$

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) を示す。

$$W_n = \frac{(w_0 - w_s - w_h) - (w_n - w_w)}{w_0 - w_s - w_h} \times 100 \quad (2.2)$$

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 は硬質ポリ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 はシリコンの質量、 w_h は硬質ポリ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樣に増加した。そこで、供試体と同寸法の硬質ポリ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リ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。水和反応の促進による影響を避けるため、0 サイクル及び、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養生した。

2.2.3 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(図-2.2)。局所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。

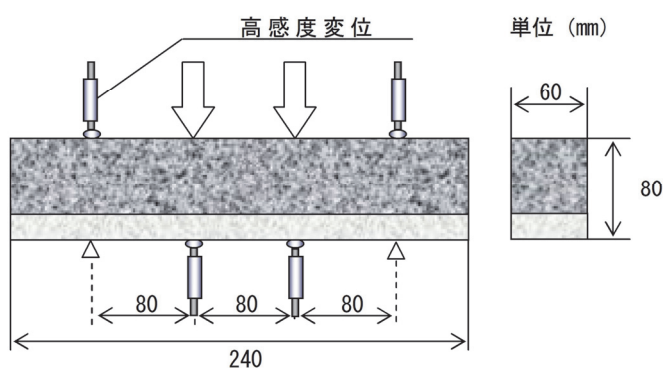


図-2.2 三等分点曲げ載荷試験

2.2.4 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。なお、**写真-2.7**に示すように、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(**写真-2.8**)、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-2.3**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。



写真-2.7 供試体の切断



写真-2.8 脆弱部の削り落とし

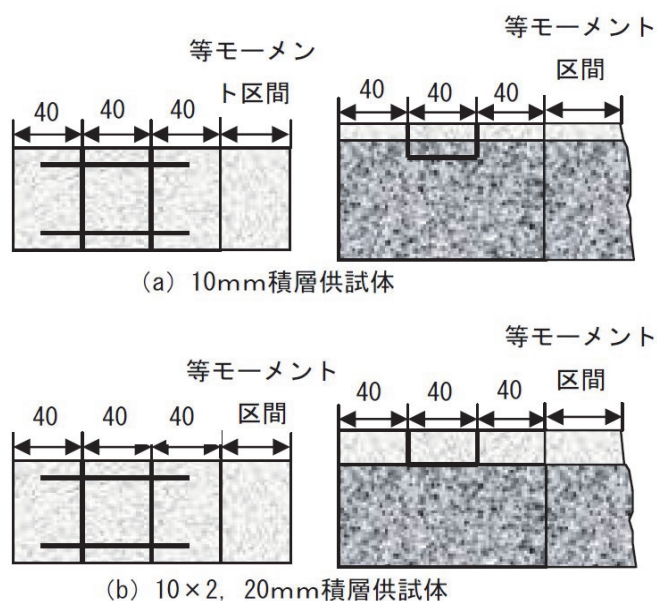


図-2.3 供試体概要

2.3 実験結果

2.3.1 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-2.4と図-2.5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。

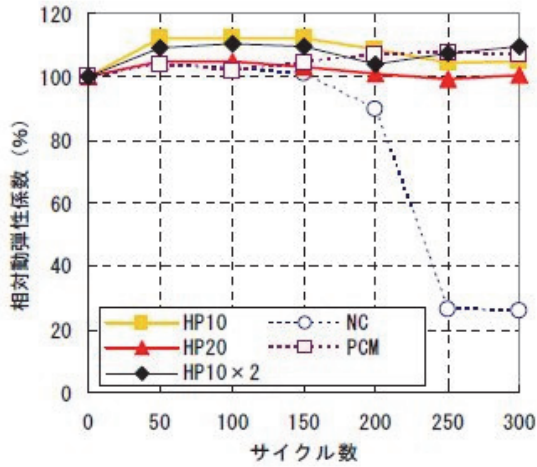


図-2.4 相対動弾性係数

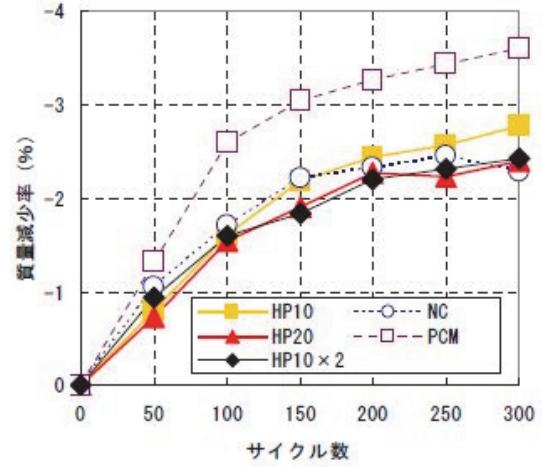


図-2.5 質量減少率

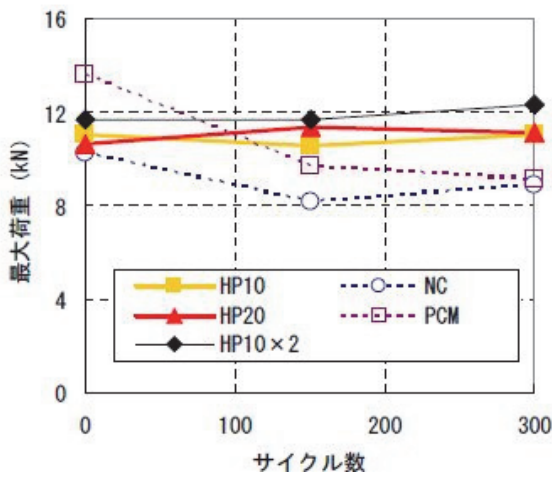


図-2.6 最大曲げ荷重の変化

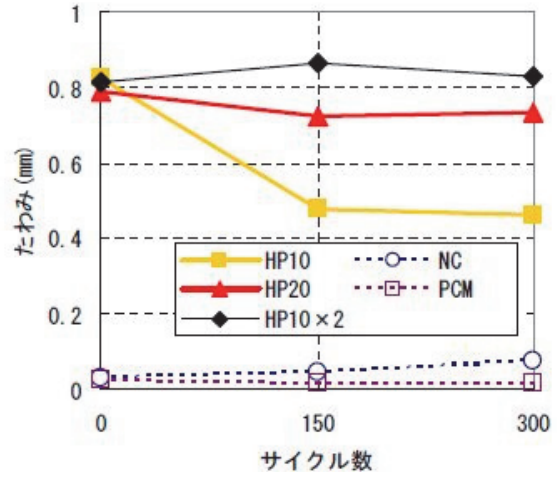


図-2.7 最大荷重時のたわみの変化

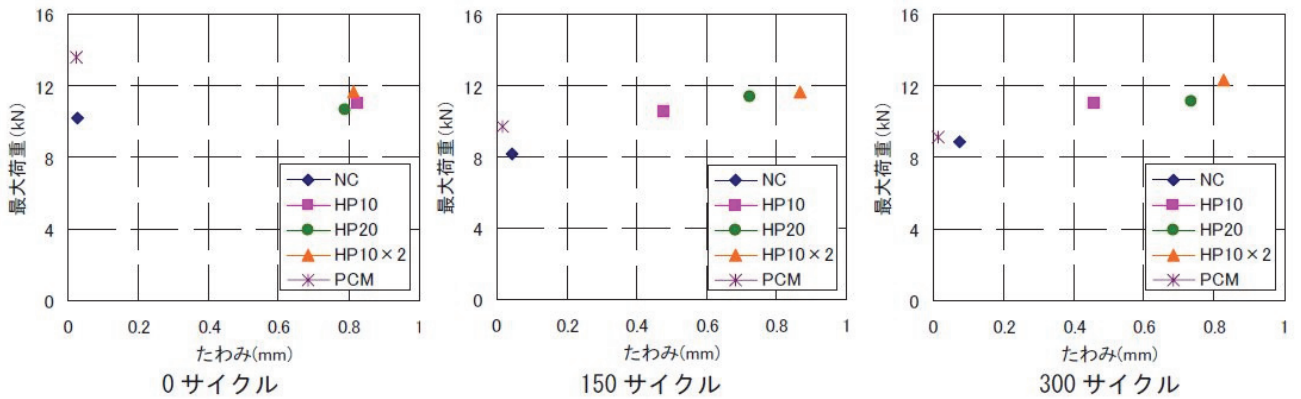


図-2.8 凍結融解試験による最大荷重と最大荷重時のたわみとの関係の推移

2.3.2 三等分点曲げ載荷試験

三等分点曲げ載荷試験結果を図-2.6 と図-2.7, 図-2.8 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。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 供試体は、薄層を 2 回に分けて仕上げを行っているため、繊維がより平面的に配向したためと考えられる。

2.3.3 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-2.9 参照)。このため、試験を行った 4 ヶ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 ヶ所の平均値とし 4 ヶ所目の試験を省略した。付着強度試験結果を図-2.10 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/mm^2 (JHS432-2006⁴⁾) 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-2.11) とし、各供試体の破壊箇所を表-2.4 に示す。

表-2.4 破壊箇所一覧

評価	HP10-0サイクル	HP10-150サイクル	HP10-300サイクル
A	1本	-	-
B	1本	1本	4本
C	-	-	-
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
A	-	-	-
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
A	-	-	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
C	-	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
A	-	-	2本
B	-	-	1本
C	-	-	-
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

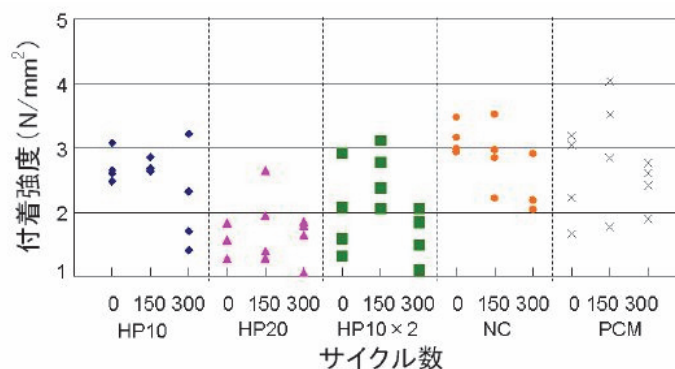


図-2.9 付着強度の分布

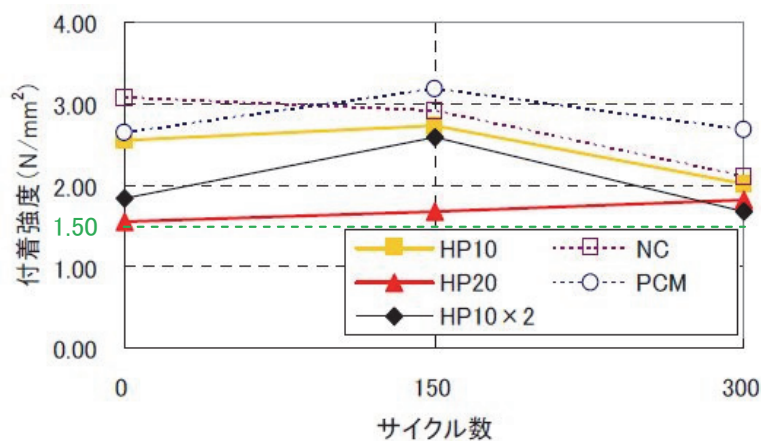


図-2.10 付着強度試験結果

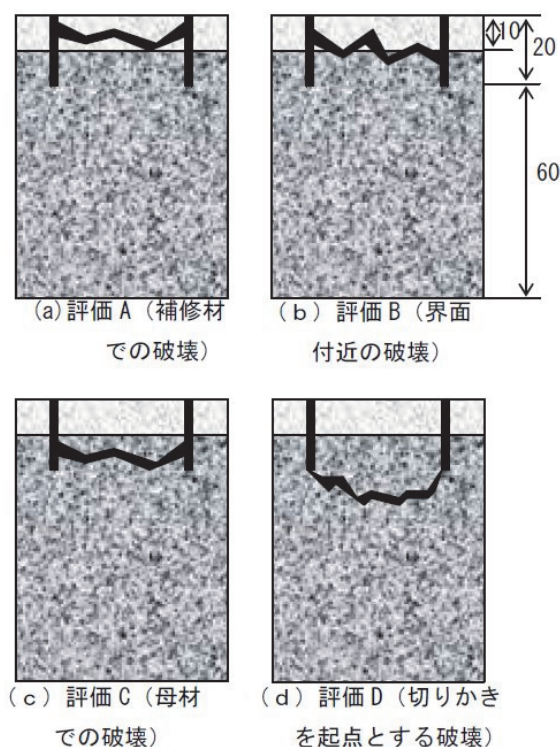


図-2.11 破壊箇所分類(単位:mm)

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。

- (1) 母材と補修材の界面
- (2) 切欠き先端の応力集中
- (3) 凍結融解作用による劣化
- (4) 大きな気泡
- (5) 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-2.10と表-2.4に示す付着強度試験結果から、次のことが分かる。

- (1) 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。凍結融解作用により、母材に組織のゆるみが生じたためと考えられる。
- (2) 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。

- (3) 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 ヶ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 ヶ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。
- (4) 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 供試体の一カ所では 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-2.6) が、図-2.10 や表-2.4 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。

2.4 まとめ

本研究では、コンクリートの補修を想定し、打ち継ぎ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把握することを目的として、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/mm^2 以上あり、HPFRCC と PCM と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。

本章では、HPFRCC を積層した供試体は、凍結融解試験後においても、曲げ強度や付着強度が低下しないことを確認した。凍害環境下の補修材として HPFRCC を積層することはとても有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 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) 土木学会: 2005 年制定コンクリート標準示方書[規格編] JIS 規格集, pp. 410-413, 2005.
- 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.
- 4) NEXCO 中央研究所発行: 試験方法 第 4 編 構造関係試験法, pp. 118-124, 2006.

第3章 表面補修後にひび割れを導入した部材のスケーリングと鉄筋腐食への乾湿および塩水の影響

3.1 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 HPRCC）は、引張応力下において複数微細ひび割れや擬似ひずみ硬化を生じる材料である。現在 HPRCC は、寒冷地の橋梁などに用いられており、その高い耐凍害性が研究報告されている¹⁾。これは、マトリクス間の繊維が架橋し、ひびわれ幅が抑制されるためと考えられている。しかし、凍結融解環境下では、融解過程で乾湿の繰返しが作用する。乾湿が繰返す場合、普通コンクリート（以下 NC）や普通モルタル（以下 NM）の耐凍害性が低下することが報告されている¹⁾。

スパイクタイヤの使用規制に伴い、寒冷地では塩化物系の凍結防止剤が多量に散布され、凍害と塩害の複合劣化が問題となっている。このため、塩水の影響を考慮した耐スケーリング性についての研究が行われている²⁾。しかし、NCに乾湿の繰返しが作用する場合、塩分の浸透が速くなることが報告されており⁴⁾、スケーリング劣化及び塩害が促進されることが考えられる。また、多くの既設構造物はひび割れを有しているが、凍結融解試験にひび割れを有したコンクリートを用いた研究は少ないのが現状である。さらに、凍害によるスケーリング劣化は、構造物の美観を大きく損なうため、美観の維持を検討する必要がある。

そこで本研究では、HPRCC を橋梁等の補修材として適用することを考え、HPRCC を補修材とする積層供試体を作製した。また、比較用として補修材にポリマーセメントモルタル（以下 PCM）と NM を積層した供試体と、全断面を NC とした供試体とを作製した。その後、引張試験により供試体にひび割れを導入し、融解過程に乾湿繰返し試験をはさみながら塩水等による緩速凍結融解試験を行い、乾湿繰返しの有無、塩水の有無及びひび割れの有無が耐スケーリング性に与える影響について検討した。また、あわせて供試体の美観も目視により確認した。続いて供試体を割裂させ、割裂面で硝酸銀発色試験を行った。これより供試体内の塩分浸透状況を確認し、各種補修材および乾湿繰返しの有無による違いを検討した。さらに、割裂させた供試体から鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率を算出し、ひび割れ幅との関係について検討を行った。

3.2 実験概要

3.2.1 供試体概要

梁供試体型枠（寸法：50×100×1800mm）に鉄筋（D10 を 2 本）を配置し、母材とする普通コンクリートを打設した。梁供試体両端部には、それぞれネジ節鉄筋 D25（長さ：約 300mm）を配置し、鉄筋 D25 の両端に 2 本の鉄筋 D10 を溶接した。また表面補修を行う供試体の界面処理として、遅延剤シートを用いて、材齢 1 日で骨材が 2mm 程度露出するまで洗い出し処理を行い、その後表面をいわゆる表乾に近い状態にして、各種補修材を積層させた。養生は湿布養生を 2 週間行った。その後、ひび割れを導入する供試体に引張荷重を行った。供試体片（寸法：50×100×100mm）を、コンクリートカッターを用いて切り出した（図—3.1）。切り出した供試体は、補修材面を除く 5 面をシリコン樹脂でシーリングし、補修材面に試験水を張れるように、シリコン樹脂で土手を作製した。

補修材は HPFRCC, PCM, NM とし、積層厚さは各種 10mm とした。また、補修材の無い NC のみの供試体（単一供試体）も作製した。HPFRCC の練り混ぜには、ホバートミキサーとオムニミキサーを用い、同配合で練り混ぜ方法を変えることにより 20%と 5%の 2種類を目標空気量とした。各種材料の配合を表-3.1 に示す。セメントには、早強ポルトランドセメントを使用した。NC には AE 減水剤（ポゾリス No.70）を使用し、エントレインドエアを混入した。HPFRCC にはφ0.012×12mm の高強度ポリエチレン繊維（PE）を使用し、混和剤として高性能 AE 減水剤（レオビルド SP8SX3）と増粘剤（ハイメトロース）を使用した。また、PCM は補修材用（低収縮タイプ）を用いた。各材料の物性値を表-3.2 に示す。

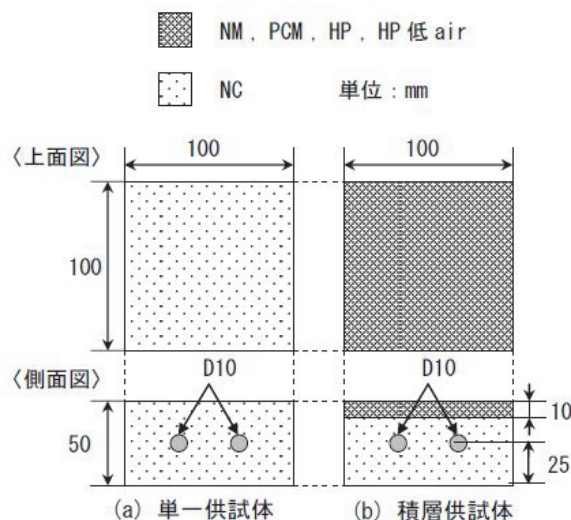


図-3.1 供試体

表-3.1 配合表

材料	繊維種類	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)										
			水	セメント	7号珪砂	細骨材	粗骨材	AE減水剤	高性能AE減水剤	増粘剤	繊維	s/a	プレミックス材
NC	-	55	180	327	-	810	920	0.8175	-	-	-	47	-
NM	-	55	273	496	-	1289	-	-	-	-	-	-	-
PCM	-	-	292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1825
HPFRCC	PE	30	342	1264	395	-	-	-	39.92	0.9	14.6	-	-

表-3.2 各種材料の物性値

供試体名	圧縮強度 (MPa)	曲げ強度 (MPa)	空気量 (%)	スランプ (cm)	フロー値 (mm)	
					0打	15打
NC	47.1	5.6	3.9	5.8	-	-
NM	62.3	5.4	-	-	-	-
PCM	35.9	1.4	-	-	-	-
HPFRCC	35.8	9.4	15.7	-	135.5	162.0
HPFRCC低air	72.0	9.1	5.0	-	131.0	162.5

3.2.2 ひび割れ導入試験

ひび割れの導入方法を図-3.2に示す。梁供試体両端のネジ節鉄筋 D25 にカプラーを用いて、ネジ節鉄筋 (D25) を継ぎ足した。床に固定した鋼製の反力板とセンターホール型油圧ジャッキを用いて、徐荷後に残留ひび割れが残る程度まで引張载荷を行った。荷重をロードセルにより計測し、供試体の全体変位を 4 個の高感度変位計により計測した。変位計はマグネットスタンドを用いて床に固定し、変位の計測値から計測区間の変形を求め、载荷時の制御に用いた。単一供試体は、鉄筋が腐食しやすいよう、ひび割れ幅が 0.4mm となるまで、積層供試体については、母材のひび割れ幅が 0.4mm となるまで引張载荷を行った。ひび割れは全断面に貫通していた。ひび割れ幅は、母材側と補修材側のそれぞれの供試体中央でマイクروسコープを用い計測した。母材と補修材のひび割れ幅（複数本のひび割れを有する場合は最大値）を表-3.3に示す。

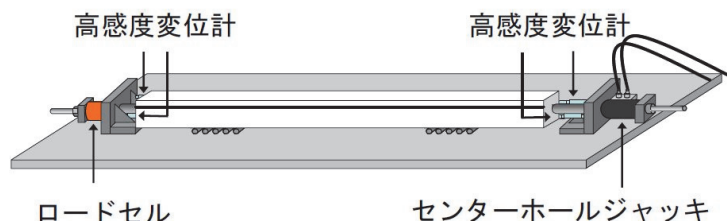


図-3.2 ひび割れ導入方法

表-3.3 導入ひび割れ幅

供試体名	ひび割れ幅(mm)							
	母材				補修材			
	湿潤		乾湿		湿潤		乾湿	
	1	2	1	2	1	2	1	2
NC	0.137	-	0.500	-	0.337	-	0.415	-
NM	0.324	0.282	0.209	0.259	0.484	0.633	0.487	0.387
PCM	0.324	0.252	0.314	0.313	0.281	0.210	0.575	0.208
HPFRCC	0.212	0.081	0.765	0.223	0.006	0.009	0.048	0.013

3.2.3 緩速凍結融解試験

凍結融解試験は ASTM C 672 に示される、緩速凍結融解試験に準じて行った。凍結過程は 20℃～-20℃で 17 時間、融解過程は-20℃～20℃で 7 時間とし、24 時間で 1 サイクルとした。1 サイクルの温度履歴を図-3.3に示す。試験は、冷凍庫から供試体を出し入れすることにより行い、50 サイクルまで実施した。供試体の補修材面に張る試験水は、ひび割れを導入したものは塩水 (NaCl 3%水溶液)、ひび割れなしのものは塩水 (NaCl 3%水溶液) および水道水とした。計測項目は、供試体のスケーリング劣化による剥離量とした。今回は、供試体の断面を一定としたため、面積あたりの剥離量ではなく、剥離の総量で評価を行った。剥離量は凍結融解 5 サイクルごとに採取し、105℃の炉乾燥を行った後、乾燥後の定質量を計測した。

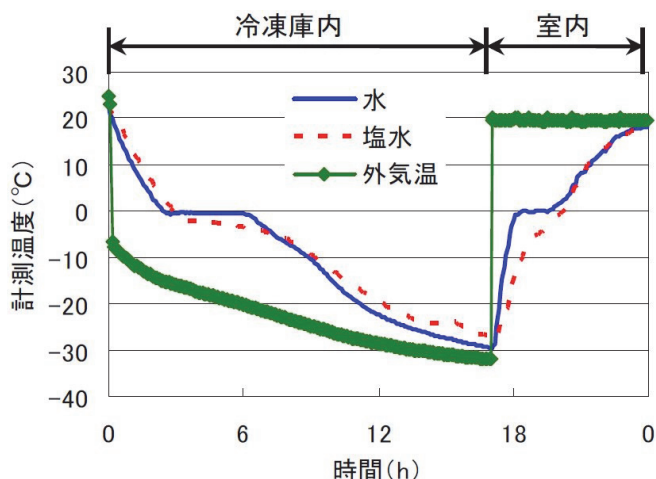


図-3.3 1サイクルの温度履歴

3.2.4 乾湿繰返し試験

本研究は、実環境下に近づけるために、乾湿繰返し試験をはさみながら、凍結融解試験を行った。乾湿繰返しは、凍結融解5サイクル毎に1度行った。乾燥過程は、供試体の補修材面の試験水を除き、40度の乾燥炉で24時間乾燥させた。また、乾燥炉(写真-3.1)に通気孔を設け、炉内に空気の流れを生じさせた。湿潤過程は、供試体の補修材面に試験水を張りなおし、6時間湿潤状態とした。



(a) 乾燥炉外観

(b) 乾燥炉内観

写真-3.1 乾燥炉

3.2.5 硝酸銀発色試験

緩速凍結融解試験終了後、供試体断面の塩分浸透状況の確認を行うため、供試体を鉄筋の配筋方向と平行に割裂させた。割裂には、供試体の上面および下面の中心線に沿って鋼棒を配置し、圧縮する方法を用いた(写真-3.2)。その後、霧吹きで硝酸銀溶液を割裂面に噴霧し、スケールを用いて供試体上面からの塩分浸透深さを計測した。表面劣化が著しいものについては、供試体下面から塩分浸透深さを測り、上方からの測定に換算した。供試体が抉れている場合は、試験前の供試体上面を基準とした。割裂面全体の発色状況を確認することで、供試体内部への塩分浸透状況の確認を行った。



写真-3.2 供試体割裂

3.2.6 腐食面積率

硝酸銀発色試験終了後、チップングハンマー（写真-3.3）を用いて供試体を破碎し鉄筋をはつり出した。鉄筋の腐食面積率算出のために、鉄筋の腐食箇所を OHP 用紙にトレースし、プランニメーター（写真-3.4）を用いて鉄筋の腐食面積を計測した。得られた鉄筋の腐食面積より、鉄筋の腐食面積率を算出した。鉄筋の腐食面積率の算出式を、式（3.1）に示す。

$$\text{腐食面積率}(\%) = \frac{\text{腐食鉄筋表面積}}{\text{鉄筋表面積}} \times 100 \quad (3.1)$$



写真-3.3 鉄筋はつり出し



写真-3.4 プラニメーター

3.3 実験結果と考察

3.3.1 緩速凍結融解試験

緩速凍結融解試験の結果を図-3.4 に示し、目視によるスケーリングの程度を表すレーティングを表-3.4 に示す。供試体別に見てみると、NC と NM については、試験後 5 サイクルでスケーリング劣化が確認された。その後もサイクル数を重ねるにつれて加速度的に劣化は進み、50 サイクル後には、供試体全面に渡って粗骨材が露出したものも確認された。それに対し、PCM は 20 サイクルで僅かにスケーリング劣化が確認され、HPFRCC は全くスケーリング劣化しなかった。PCM は、水セメント比が小さいこと、ポリマーが水和空間を網目状に充填することにより供試体内部が

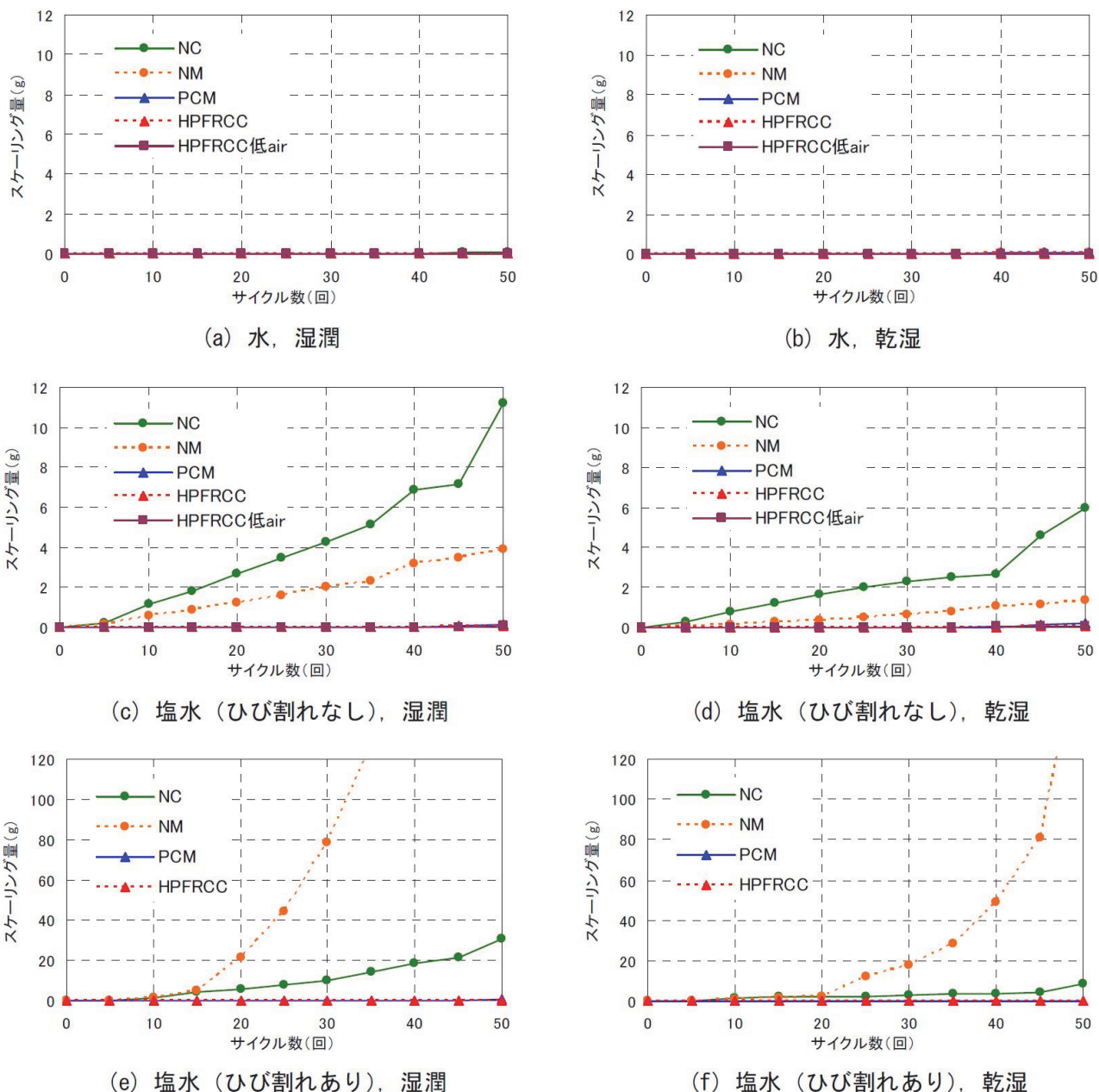


図-3.4 緩速凍結融解試験結果

緻密であると推察される。これより、供試体内の水分量が少なく氷圧が小さくなったため、PCMは耐スケーリング性に優れていたと考えられる。HPFRCCが耐スケーリング性に優れていた原因としては、水セメント比が小さく、供試体内部が緻密であることに加え、マトリクス間の繊維が架橋し、ひび割れ幅の抑制や氷圧に抵抗する力が働いたことが考えられる。また、HPFRCCはその特徴である複数微細ひび割れにより、供試体内部への塩分の浸透が抑えられ、塩分濃度差による浸透圧が小さくなったことで、スケーリング抵抗性が向上したと考えられる。この結果より、HPFRCCは乾湿繰返しおよび塩水の影響を受けても、耐スケーリング性に優れていることが確認された。しかし本研究では、HPFRCCの空気量による違いを確認することができなかったため、今後長期間の試験を行うことが必要であると考えられる。NCとNMについて試験水別に注目して見ると、水道水では50サイクル後もほとんどスケーリング劣化は確認できなかった。しかし、塩水では顕著なスケーリング劣化

表-3.4 レーティング

供試体名		レーティング													
		水-塩	湿-乾	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	
NC	水	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	塩水 ひび割れ なし	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	1	2	2	3	3	4	5	5	5	5	5
		乾湿	2	0	1	2	2	3	3	4	4	5	5	5	5
	塩水 ひび割れ なし	湿潤	1	0	1	2	2	2	3	3	4	4	4	0	0
		乾湿	2	0	1	2	2	2	3	3	4	4	4	0	0
	塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	1	2	3	3	4	5	5	5	5	5	5
		乾湿	2	0	1	2	3	3	4	5	5	5	5	5	5
NM	水	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	塩水 ひび割れ なし	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	1	2	2	3	3	3	4	4	4	4	4
		乾湿	2	0	1	2	2	3	3	4	4	5	5	5	5
	塩水 ひび割れ なし	湿潤	1	0	1	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3
		乾湿	2	0	1	1	1	2	2	3	3	3	3	3	3
	塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	1	3	3	3	5	5	5	5	5	5	5
		乾湿	2	0	1	2	3	3	4	5	5	5	5	5	5
塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	1	2	2	2	4	4	5	5	5	5	5	
	乾湿	2	0	1	2	2	3	4	5	5	5	5	5	5	

レーティング評価

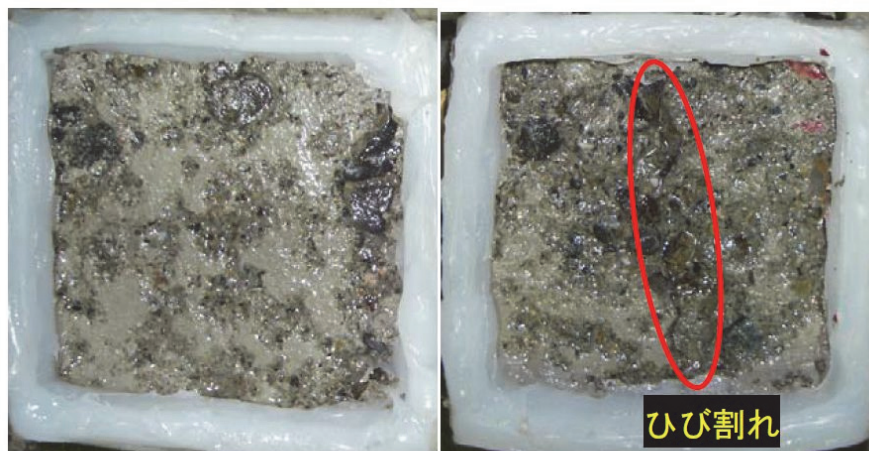
- 0 : スケーリングなし
- 1 : 表面の僅かな剥離
- 2 : 僅かなスケーリング
- 3 : 一部の大きなスケーリング
- 4 : 顕著なスケーリング
- 5 : 全面に渡って大きなスケーリング

表-3.4 レーティング

供試体名		レーティング															
		0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50					
PCM	水-塩	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	水	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	塩水 ひび割れ なし	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
		乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	HP	水-塩	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		水	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		塩水 ひび割れ なし	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
HP低		水-塩	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		水	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		塩水 ひび割れ なし	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		塩水 ひび割れ あり	湿潤	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
			乾湿	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

が確認され、さらにひび割れのあるものは、供試体上面が抉られるまでスケーリング劣化が起きた。塩水で顕著な劣化が起きる原因としては、梶田らの研究⁴⁾より、供試体内に塩水が浸透することによって浸透圧が生じることが考えられる。また、写真-3.5に示すように、ひび割れの有無で劣化の仕方が明確に異なっていた。ひび割れがないものは、供試体上面から剥がれ落ちるよう劣化していったのに対し、ひび割れがあるものは、ひび割れ部に集中した水の膨張圧により、ひび割れが拡がるよう劣化した。ひび割れにより隅角部となった場所の角がスケーリングし、丸みを帯びた劣化が顕著であった。この現象はNCよりもNMで顕著であった。NCの場合は、粗骨材が壁となり、スケーリング劣化を抑制していたものと考えられる。NCとNMについて乾湿の有無による違いに着目すると、湿潤状態のものの方が乾湿を入れたものの約2倍のスケーリング量が確認された。水道水を用いた米田らの研究²⁾で、W/C=40%以上で乾湿繰返しを行うと、凍結融解抵抗性が向上すると報告されており、塩水を用いた場合でも同様の結果となった。これより、乾湿繰返しによる表面の劣化や供試体内部の残留塩といったネガティブ要因よりも、供試体の飽和量の低下が耐スケーリング性に大きく影響し、乾湿繰返しによって耐スケーリング性が向上することが確認された。凍結融解試験終了後、供試体の表面を目視により確認した。NC、NMについては、スケーリングによりクレター状の大きな凹凸を確認した。凍結融解試験後のPCMとHPFRCC供試体を、写真-3.6に示す。PCMは、表面からのスケーリングにより供試体表面に凹凸が見られた。さらに長期間の試験を行うことで、スケーリングが顕著になると考えられる。HPFRCCはスケーリングが全く見受けられなかったため、目視からもスケーリング抵抗性が高いことが確認できた。

凍害を受ける構造物は、激しくスケーリングすることにより構造物の美観が損なわれることが問題となっている。本研究の範囲では、激しいスケーリングを伴う構造物の補修を想定した場合、PCMによる補修では母材にひび割れがあるとPCMにも大きなひび割れが入り、スケーリングが進展することから恒久的な構造物の美観の改善には至らない可能性がある。しかし、HPFRCCではひび割れが分散され微細なひび割れとなるため、HPFRCCを補修材として利用することは恒久的な構造物美観の維持に有用であると推察される。



(a) ひび割れなし

(b) ひび割れあり

写真-3.5 ひび割れの有無による劣化形態

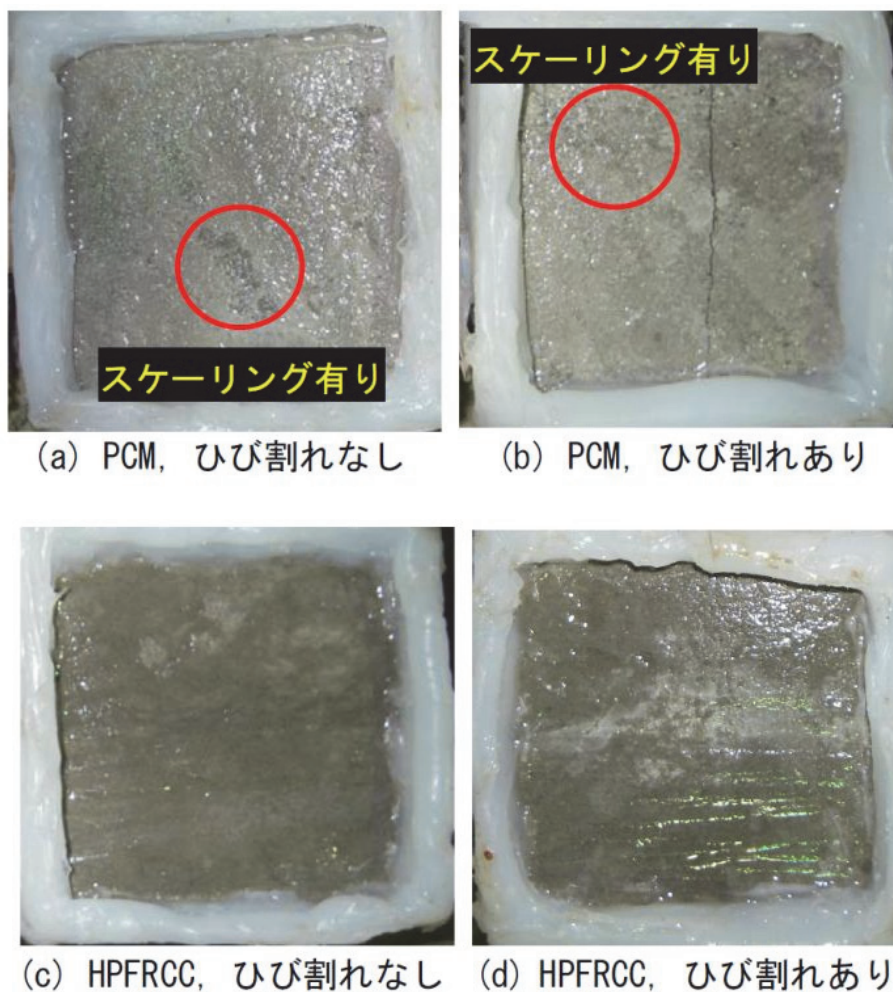


写真-3.6 凍結融解試験後の美観

3.3.2 硝酸銀発色試験

硝酸銀発色試験の結果を写真-3.7, 塩分浸透深さの結果を図-3.5 に示す。ここで, S と C はひび割れなしとあり, W と D は湿潤と乾湿をそれぞれ表している。ひび割れのあるものは, PCM の湿潤状態のもの 1 つと, HPFRCC を除き, 全てにおいて供試体下面まで塩分が浸透していた。HPFRCC の塩分浸透深さが浅くなった理由として, 繊維の架橋によりひび割れが分散し, ひび割れ幅が小さかったことや, 低水セメント比のため表面が緻密であることが考えられる。これより, HPFRCC が NC, NM および PCM に比べ, 高い塩分浸透抑制効果を有するといえる。ひび割れなしの塩分浸透深さを, 供試体ごとに乾湿の有無でまとめて図-3.6 に示す。NC に着目すると, 乾湿の塩分浸透深さが湿潤の 2 倍となっており, 既往の研究³⁾と同様に, 乾湿繰返しにより塩分の浸透が速くなっていた。これは, 湿潤の場合は供試体が絶えず水分で飽和されているため, 新たな浸透が緩やかになるのに対し, 乾湿繰返しを与えることにより, 浸透した水分が取り除かれ, 新たな浸透が促進されるためだと考えられる。また, 乾湿繰返しにより, 供試体表面に微細なひび割れが生じると考えられ, これも塩分浸透を促進させる原因として考えられる。供試体ごとに見ると, NC, NM, PCM, HPFRCC の順に塩分浸透量が小さくなった。これは, 塩分浸透深さと同様に水セメント比によるセ

メントの緻密性が影響していると考えられる。続いて、HPFRCC と HPFRCC 低 air について着目すると、HPFRCC よりも空気量が少なく、供試体の緻密性が高いと考えられる HPFRCC 低 air の塩分浸透が深くなった。空気量を 5% とした、HPFRCC 低 air は予備試験より、引張応力下において、従来用いられている HPFRCC に比べて終局ひずみが小さくなり、ひび割れ本数が減少することが確認された。これが、塩分浸透の抑制を阻害したと考えられる。

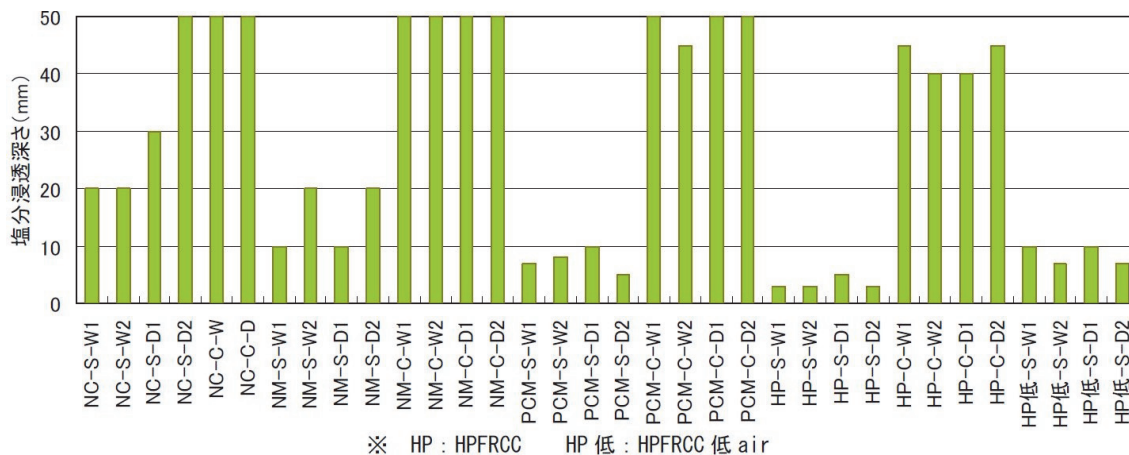


図-3.5 塩分浸透深さ

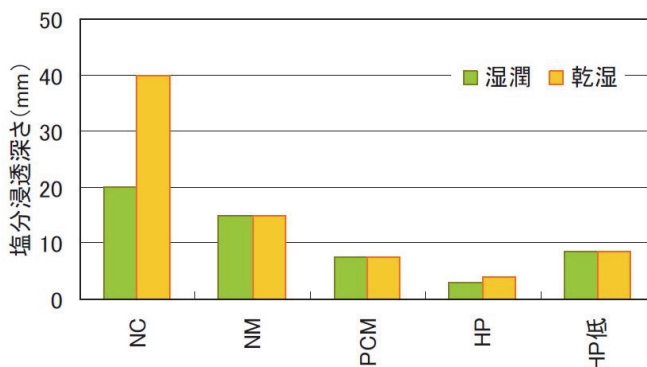
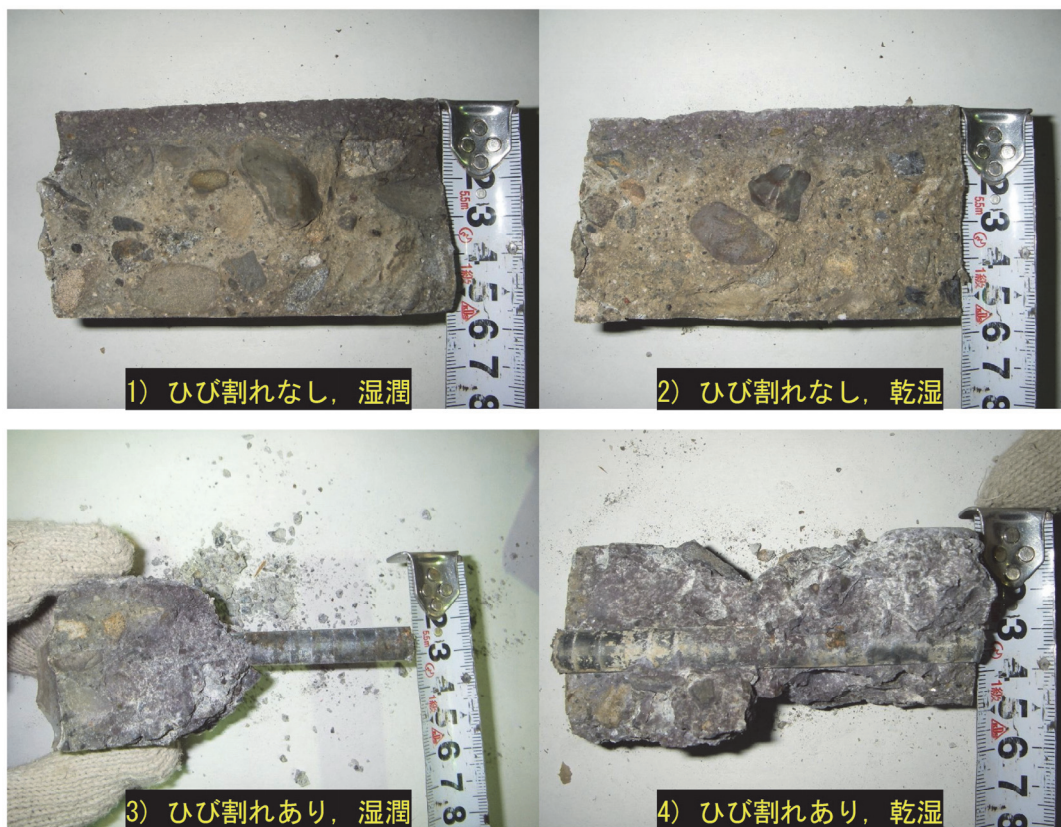


図-3.6 乾湿の有無での塩分浸透深さ



(a) NC (単一供試体)



(b) NM

写真-3.7 硝酸銀発色試験結果

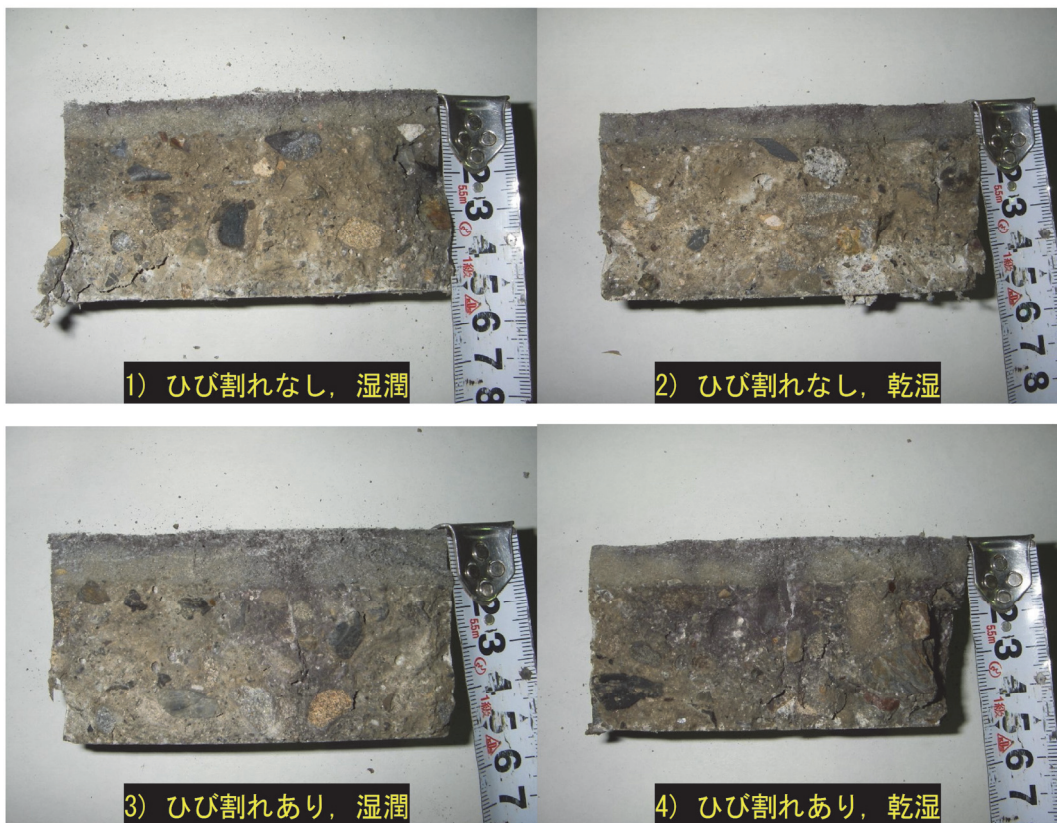
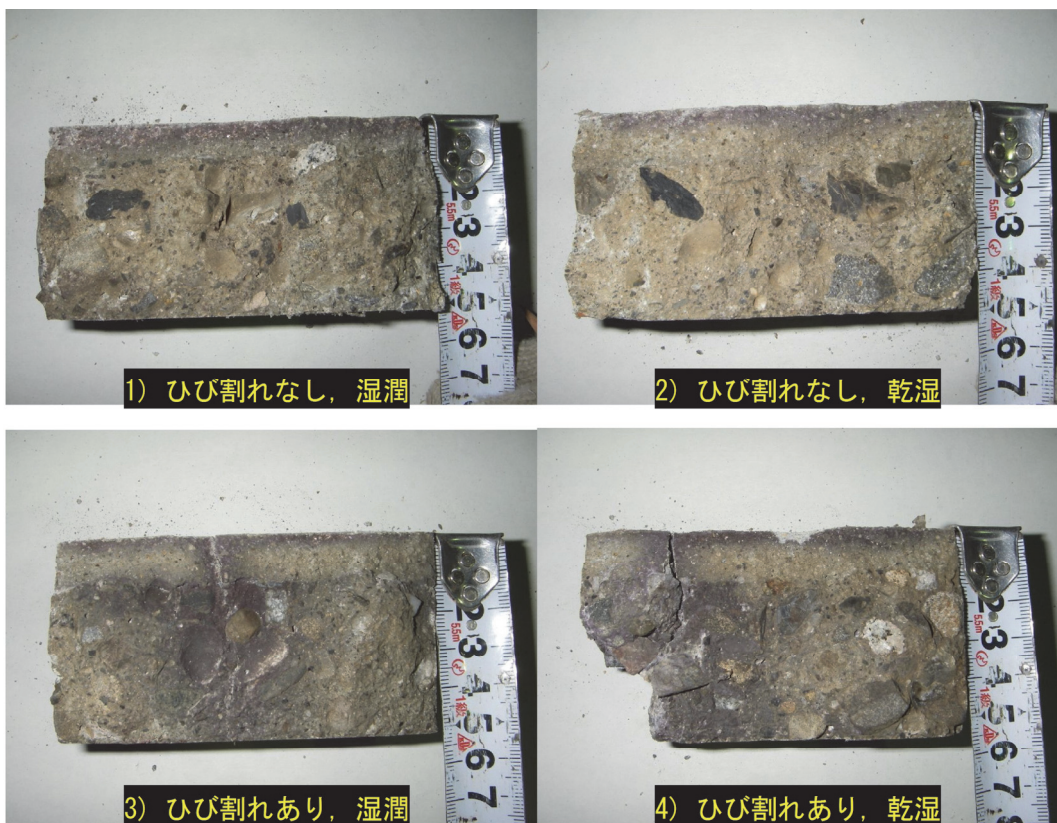


写真-3.7 硝酸銀発色試験結果

3.3.3 腐食面積率

鉄筋の腐食面積率の結果を表-3.5, 鉄筋腐食状況を写真-3.8 に示す。ひび割れなしのものは腐食が確認されなかったため、この表から除外している。供試体ごとに違いを見ると、HPFRCCの腐食面積率が全体的に抑えられていた。塩分浸透深さと同様に、微細なひび割れ幅と繊維の架橋により、塩分浸透が抑制されたためと考えられる。次に乾湿の有無ごとに見ると、値にばらつきがあり、明確な違いが見受けられなかった。そこで、腐食面積率と補修材側のひび割れ幅の関係に着目し、それをプロットした結果を、図-3.7 に示す。ひび割れ幅が0.5mm以下の場合には、ひび割れ幅が大きくなるに従って、比例的に腐食面積率が増加することが確認された。補修材側のひび割れ幅が大きくなるにつれて腐食面積率も大きくなるため、微細なひび割れ幅のHPFRCCは鉄筋の腐食面積を抑制できると考えられる。しかし、本研究ではデータ数が少ないため、今後データ数を増やし検討する必要があるといえる。

表-3.5 腐食面積率

供試体名	腐食面積 (cm ²)				腐食面積率 (%)			
	湿潤		乾湿		湿潤		乾湿	
	1	2	1	2	1	2	1	2
NC	4.0	-	6.0	-	13.3	-	20.0	-
NM	7.1	2.7	7.8	6.1	23.7	9.0	26.0	20.3
PCM	3.3	4.4	4.0	0.9	11.0	14.7	13.3	3.0
HPFRCC	2.0	2.9	2.9	3.2	6.7	9.7	9.7	10.7

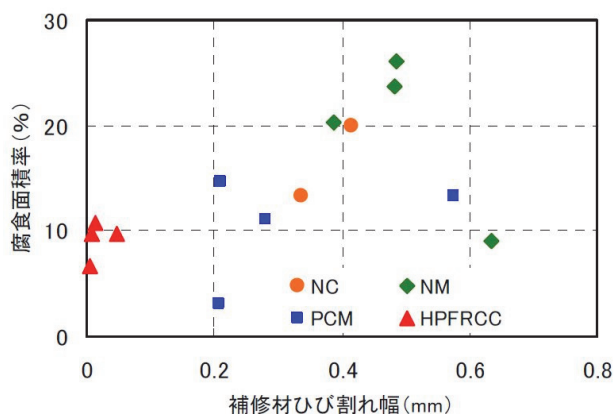
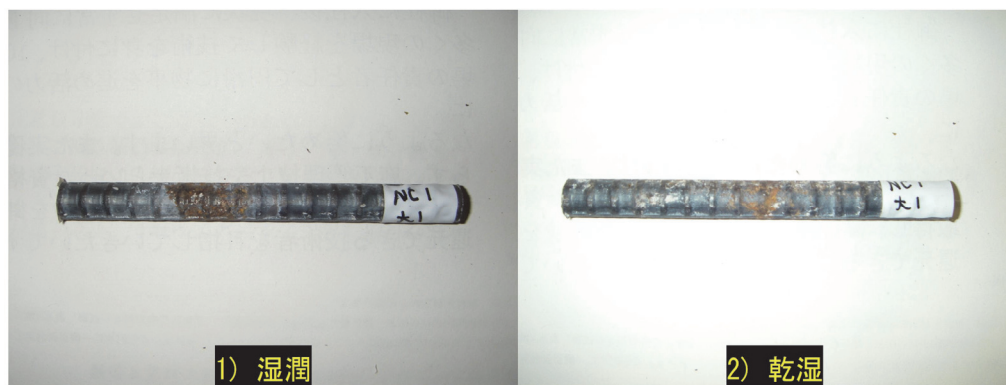
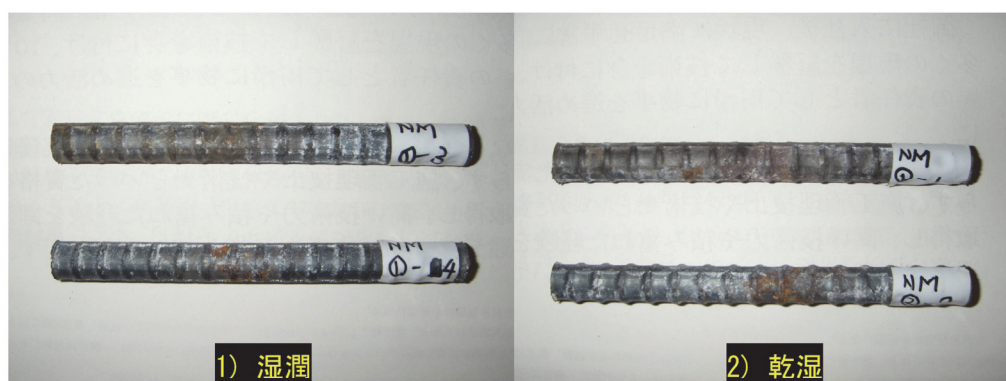


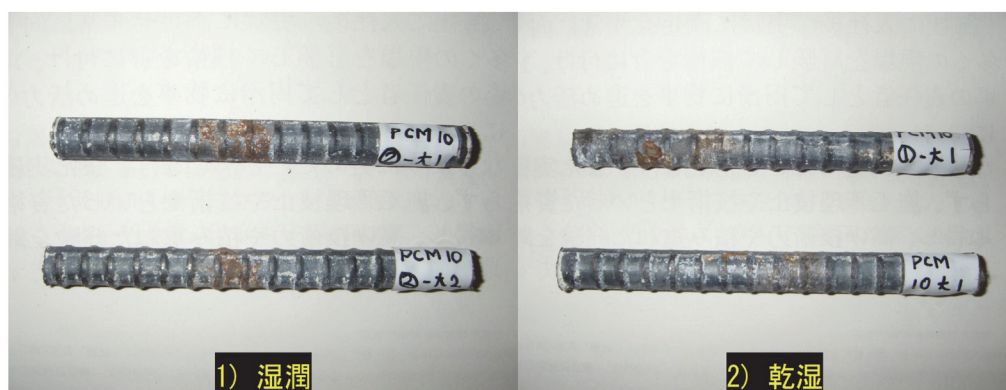
図-3.7 腐食面積率とひび割れ幅の関係



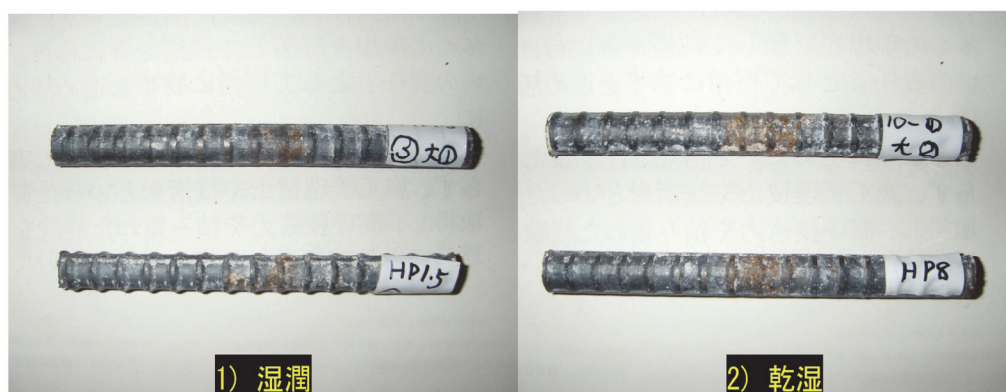
(a) NC (単一供試体)



(b) NM



(c) PCM



(d) HPFRCC

写真-3.8 鉄筋腐食状況

3.4 まとめ

本研究では、50×100×100mmの寸法で全断面をNCとした単一供試体、NM、PCM、HPFRCCを補修材として用いた積層供試体を作製し、引張試験によりひび割れを導入した。その後、乾湿繰返し試験をはさみながら緩速凍結融解試験を行い、乾湿繰返しの有無および塩水の有無がスケーリング劣化に及ぼす影響について検討した。続いて供試体を割裂させ、その断面で硝酸銀発色試験を行い、供試体内の塩分浸透状況を確認した。さらに、割裂させた供試体から鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率を算出した。本研究においては、ひび割れを有するRC部材を用いていることが特徴である。これより得られた結果を以下に示す。

- (1) HPFRCCは乾湿繰返しおよび塩水の影響を受けても、スケーリング劣化は全く確認されず、耐スケーリング性に優れていることが確認された。
- (2) 塩水を用いた場合、スケーリング劣化が顕著となった。
- (3) ひび割れを有するRC部材の場合、ひび割れの角からのスケーリング劣化が顕著であった。
- (4) 乾湿繰返しによる、供試体内の飽和量の低下がNCとNMのスケーリング劣化を改善することが確認された。
- (5) HPFRCCがNC、NMおよびPCMに比べ、高い塩分浸透抑制効果を有していることが確認された。
- (6) HPFRCCは微細なひび割れを有することから、耐スケーリング性に優れているといえる。

本研究においては、乾湿繰返しと塩水の有無に関わらずHPFRCCは高い耐スケーリング性と塩分浸透抑制効果を示すことを確認した。

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），社団法人土木学会，pp.資料 38－資料 45，2007.
- 2) 米田恭子・千歩修・長谷川拓哉：乾湿繰返しを加えた凍結融解試験による各種コンクリートの耐凍害性，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.951－956，2008.
- 3) 原忠勝・月永洋一・庄谷征美：塩水の種類がコンクリート中の温度変化とスケーリング量に及ぼす影響に関する実験的研究，日本コンクリート工学協会，融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会 報告書・論文集，pp.177-182，1999.
- 4) 梶田佳寛・友沢史紀・安田正雪・原謙治：コンクリート中への塩化物浸透速度に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.10，No.2，pp.493－498，1988.

第4章 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

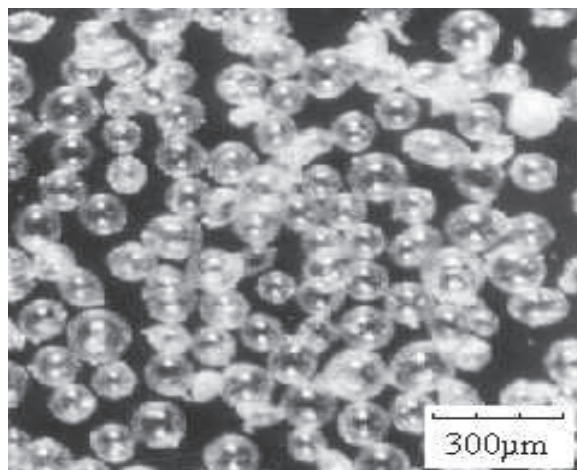
4.1 はじめに

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（写真－4.1）。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）が低下してしまう可能性がある。このため、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行っており、本研究では、中空骨材（写真－4.2）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。



写真－4.1 HPFRCC を用いた吹付け工法



写真－4.2 バルーン骨材

表-4.1 使用材料

使用材料	
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
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 中空セラミックバルーン 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-4.2 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	50 μ m	0.6	8-10
SL	45 μ m		70

4.2 角柱供試体を用いた凍結融解試験

本節では、中空骨材を使用したHPFRCCおよび高流動モルタルの凍結融解抵抗性を把握することを目的として、凍結融解試験を実施した。

4.2.1 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-4.1, 表-4.2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。凍結融解試験用の角柱供試体(100 \times 100 \times 400mm)を高流動モルタルとHPFRCCにより作製した。高流動モルタルおよびHPFRCCの配合を表-4.3, 表-4.4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-4.5に示し、各水準2体ずつ作製した。

表-4.3 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

表-4.4 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

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の目標空気量を表-4.5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%の連衡空気を導入した。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。

表-4.5 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)	△	△	△	○	△

(2) 凍結融解試験

本研究では、JISA 1148-A法²⁾に従い急速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一次共鳴振動数とした。質量変化率は式(4.1)、相対動弾性係数は式(4.2)により算出した。質量変化率を用いて、スケ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。写真-4.3に急速凍結融解試験機、写真-4.4に共鳴振動数測定機を示す。

$$W_n = \frac{(w_n - w_0)}{w_0} \times 100 \quad (4.1)$$

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。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (4.2)$$

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。

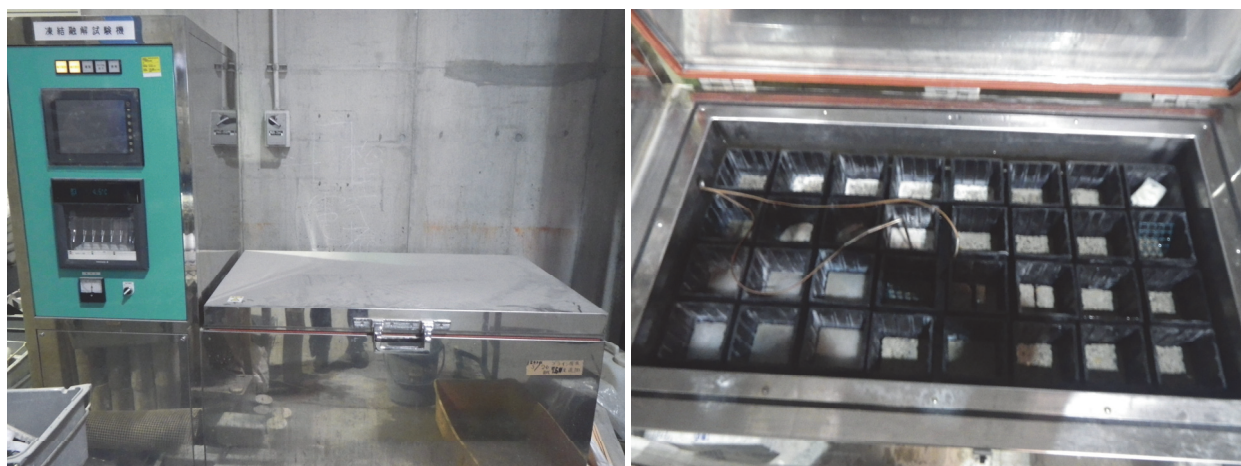


写真-4.3 急速凍結融解試験機



写真-4.4 共鳴振動数測定機

4.2.2 実験結果と考察

(1) HPFRCC

HPFRCCの相対動弾性係数および質量変化率の結果を図-4.1, 図-4.2に示す。300サイクル時の計測において、各供試体ともに質量および相対動弾性係数に著しい低下は確認されなかったため、MSBの混入量に関わらず、HPFRCCの耐凍害性が認められた。HPFRCCはマトリクス間の繊維が架橋し、凍結融解作用による組織の緩みが抑制されたと考えられる。

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。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-4.3, 図-4.4に示す。SL10%供試体は、30サイクル時の計測で破壊を確認した(写真-4.5)。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は凍結融解作用に有効な空気の役割を果たせなかったと推察できる。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。MSB0%供試体およびMSB1%供試体の相対動弾性係数が低下した要因としては、MSBの混入率が十分で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った。

凍結融解試験0, 150, 300サイクル時におけるHPFRCC供試体の写真を写真-4.6, 写真-4.7, 写真-4.8, 高流動モルタルの写真を写真-4.9, 写真-4.10, 写真-4.11に示す。写真からは、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。

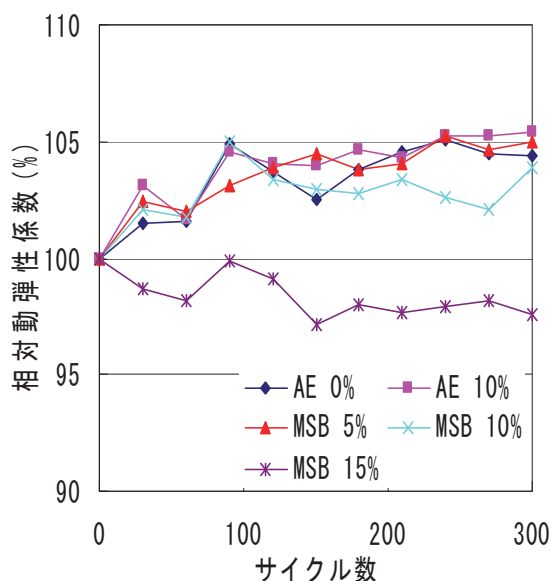


図-4.1 HPFRCCの相対動弾性係数

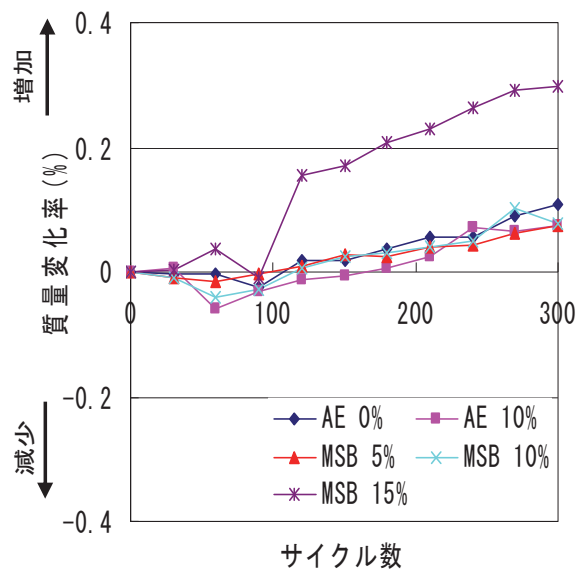


図-4.2 HPFRCCの質量変化率

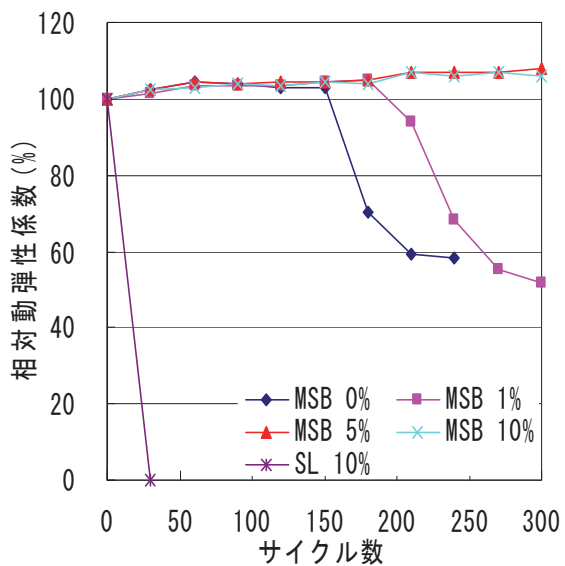


図-4.3 高流動モルタルの相対動弾性係数

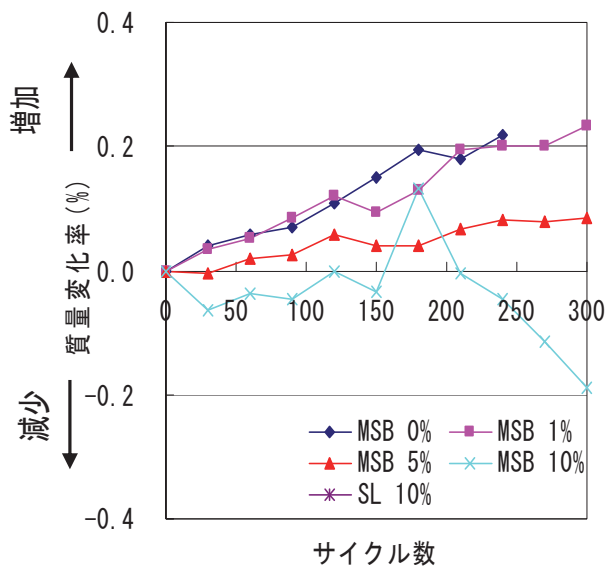


図-4.4 高流動モルタルの質量変化率



写真-4.5 凍結融解試験 30 サイクルで破壊した SL 供試体

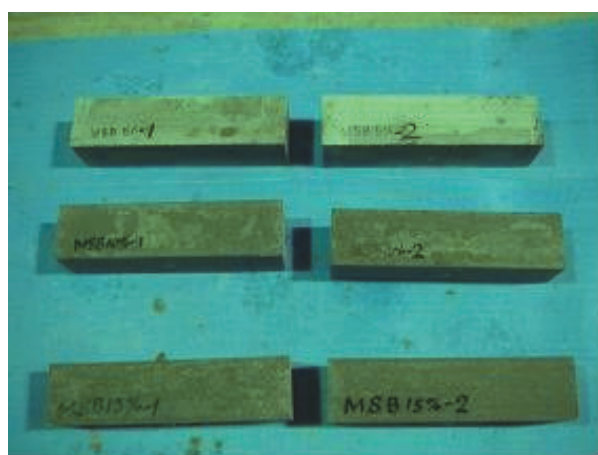


(i) MSB (5%, 10%, 15% 各2体)



(ii) AE (0%, 10% 各2体)

写真-4.6 凍結融解試験0サイクル時のHPFRCC供試体

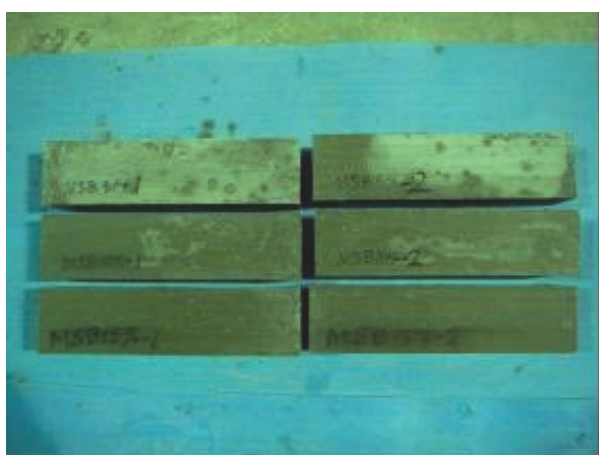


(i) MSB (5%, 10%, 15% 各2体)



(ii) AE (0%, 10% 各2体)

写真-4.7 凍結融解試験150サイクル時のHPFRCC供試体



(i) MSB (5%, 10%, 15% 各2体)



(ii) AE (0%, 10% 各2体)

写真-4.8 凍結融解試験300サイクル時のHPFRCC供試体

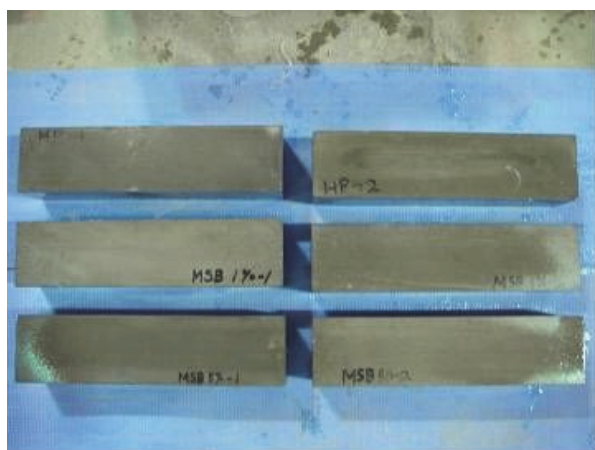


(i) MSB (0%, 1%, 5% 各2体)



(2) MSB (10%, SL10% 各2体)

写真-4.9 凍結融解試験0サイクル時の高流動モルタル供試体

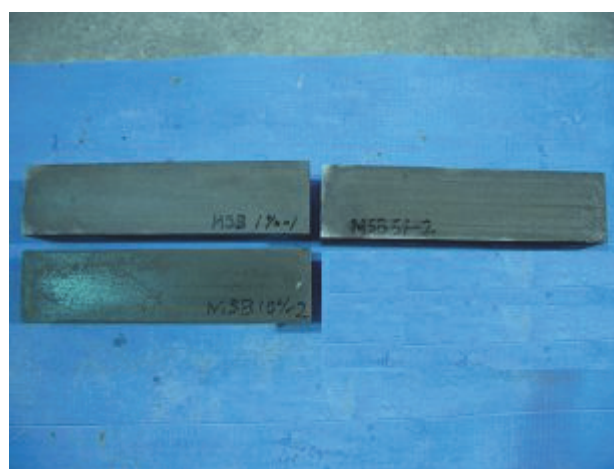


(i) MSB (0%, 1%, 5% 各2体)



(ii) MSB (10% 各2体)

写真-4.10 凍結融解試験150サイクル時の高流動モルタル供試体



MSB (1%, 5%, 10% 各1体)

写真-4.11 凍結融解試験300サイクル時の高流動モルタル供試体

4.3 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

本節では、一軸引張試験を用いて中空骨材を混入したHPFRCCの引張性能を確認することを目的としている。また、一軸引張試験を行うダンベル型供試体にも凍結融解試験を行い、凍結融解作用が中空骨材を混入したHPFRCCの引張性能に及ぼす影響についても検討した。

4.3.1 実験概要

(1) 使用材料および供試体

ダンベル型供試体の使用材料、配合、供試体種類は4.2.1(1)のHPFRCCと同様とした。ダンベル型供試体の寸法を図-4.5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体ずつ写真-4.12に示す載荷装置を用いて一軸引張試験を行った。

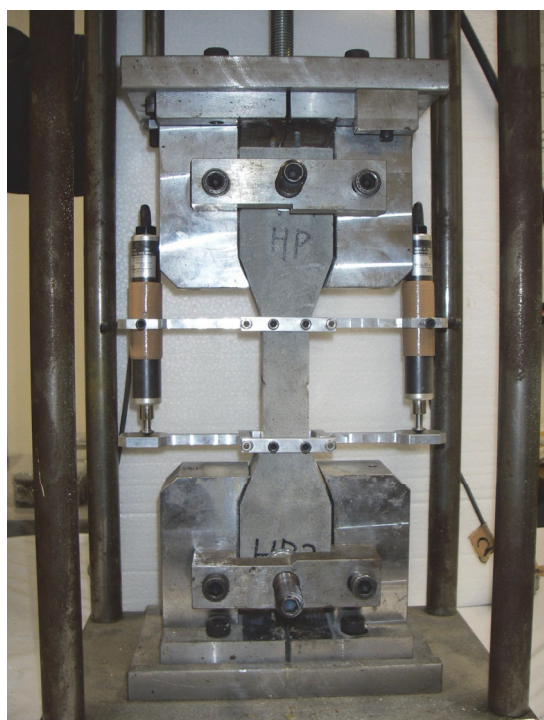


写真-4.12 載荷装置

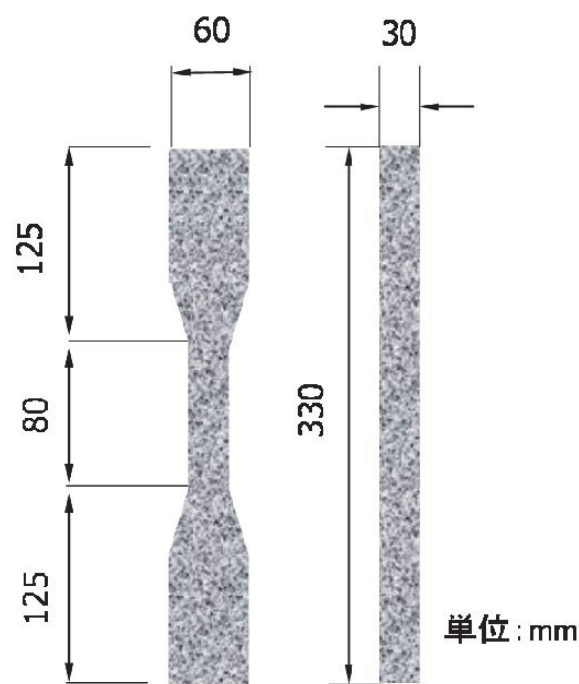


図-4.5 ダンベル供試体

(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内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-4.13)。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-4.14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HPFRCC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で保存し、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。



写真-4.13 はめ込み型枠

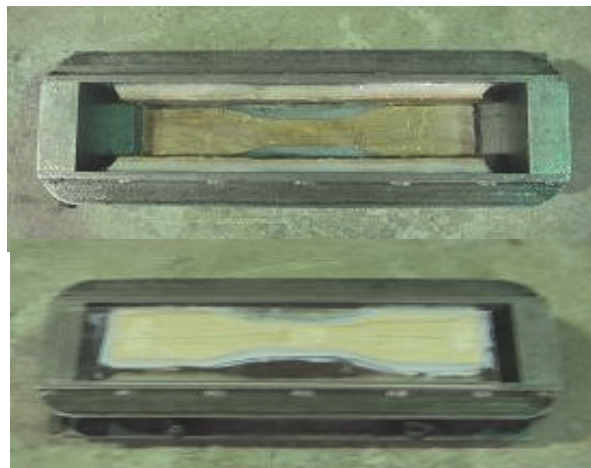


写真-4.14 はめ込み型枠の作製に用いた型枠

(3) 一軸引張試験

一軸引張試験に使用した載荷装置の加力部は、鋼製フレーム上面に設置して引張荷重の載荷を行った。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、引張載荷を行った。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、ひび割れ強度、引張強度、終局ひずみ（図-4.6 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。

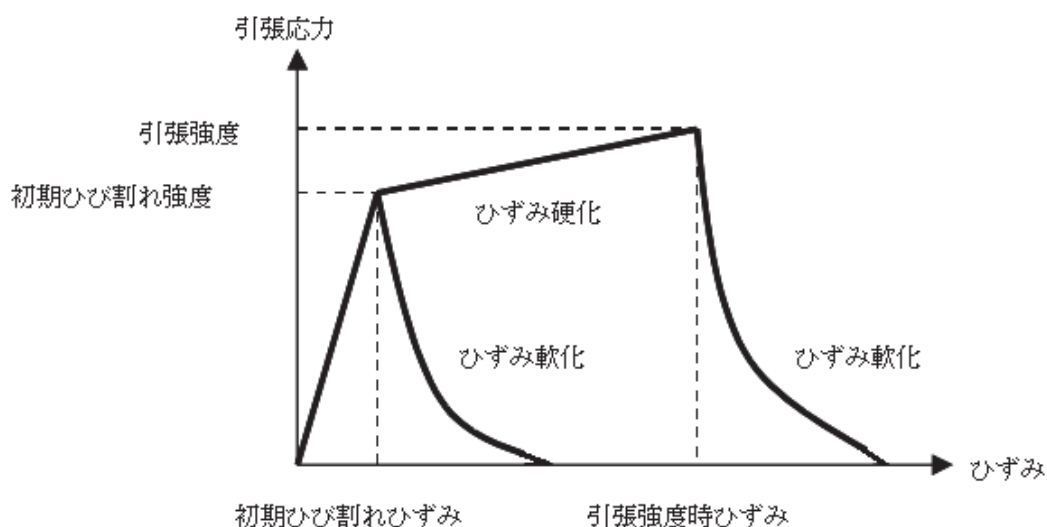


図-4.6 一軸引張応力下における HPFRCC の挙動

4.3.2 実験結果と考察

(1) ダンベル型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-4.15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ことも理由の一つと考えられる。本研究では、ゴムスリーブ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、ダンベル型供試体とはめ込み型枠との隙間をなるべく小さく設定した。しかし、ダンベル型供試体の変形を防ぐためには、はめ込み型枠の長手方向に余裕を持たせることで、ダンベル型供試体の間に十分な隙間を設ける等によりダンベル型供試体の膨張を拘束しない工夫も必要と考える。

また、ダンベル型供試体は、JIS A 1148-A 法²⁾に示される標準の供試体とは異なり、表面積が大きいため、標準の供試体よりも温度の影響を受けやすかったと考えられる。



写真-4.15 凍結融解試験後のダンベル型供試体（上：曲がった供試体、下：通常の供試体）

(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-4.7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。凍結融解作用150、300サイクル後における引張応力-ひずみ曲線は、凍結融解作用0サイクル時の引張応力-ひずみ曲線と比較して、原点からの立ち上がりの勾配が緩やかである。この理由は、載荷前に凍結融解作用によりひび割れが、発生していたためと考えられる。

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-4.8、図-4.9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%以上の終局ひずみを確認した。

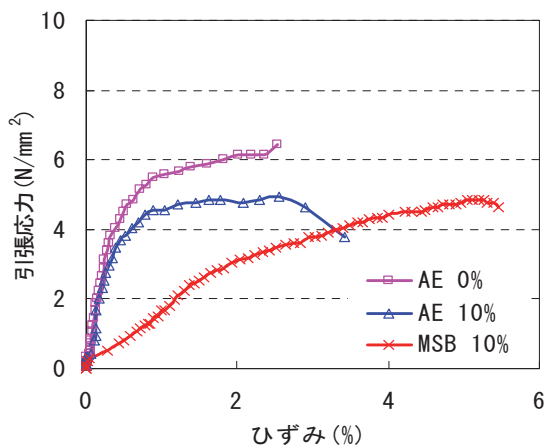
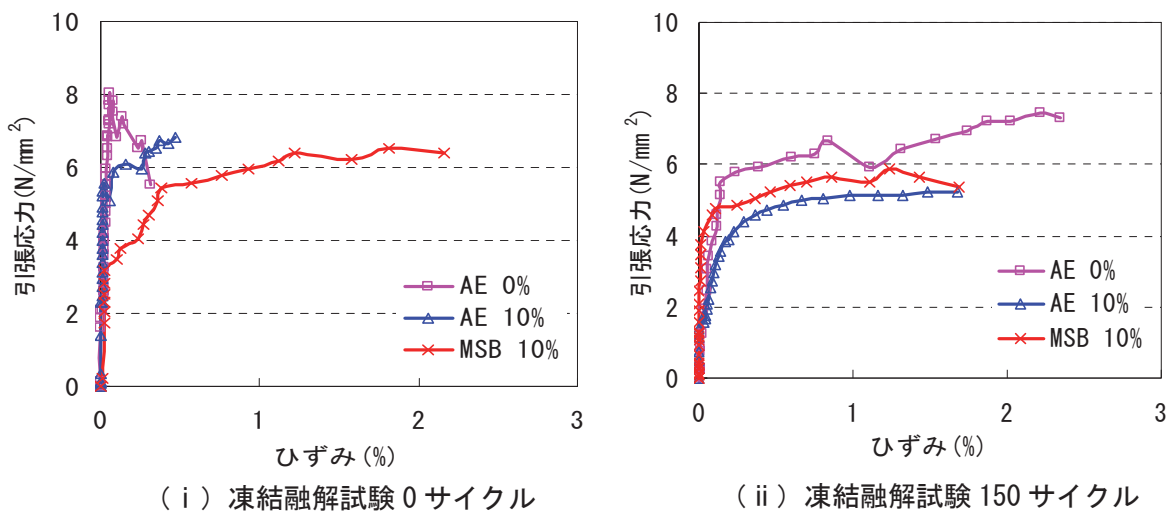
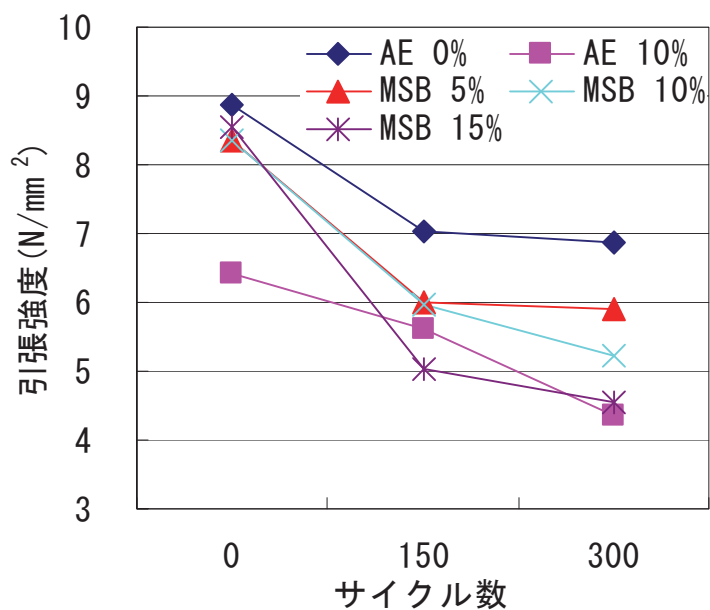


図-4.7 引張応力-ひずみ曲線



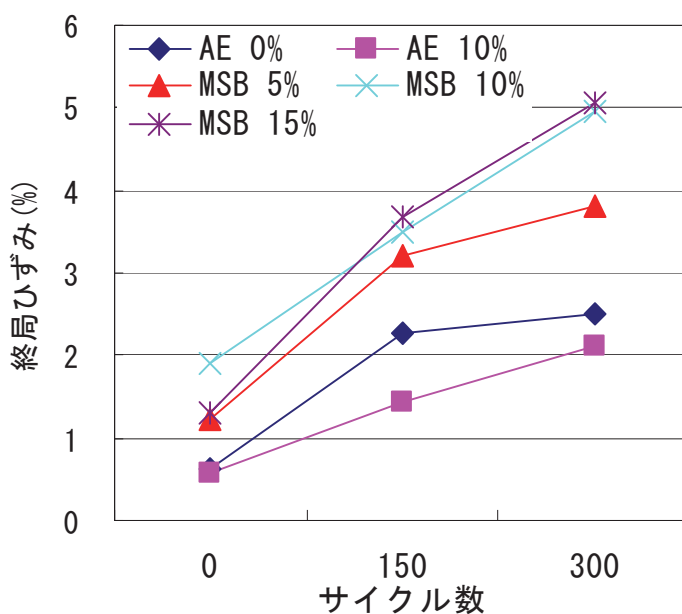


図-4.9 凍結融解サイクルと終局ひずみの関係

4.4 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。

- (1) 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。
- (2) HPFRCCにおいては、空気量やMSBの混入量に関わらず、耐凍結融解抵抗性能が高いことを確認した。
- (3) 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た。MSBをHPFRCCに5~15%混入すると、終局ひずみが大きくなった。

本論文から、SLは耐凍害性を低下させる結果となったが、MSBについて凍害抵抗性を向上させる可能性を示した。中空骨材を混入したHPFRCCは、優れた凍結融解抵抗性を示し、凍結融解試験後においても十分な引張性能を確認することが出来た。

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.

第5章 凍害を想定した脆弱モデル層がコンクリートの動弾性係数の計測値に及ぼす影響

5.1 はじめに

コンクリートの凍結融解試験における動弾性係数の計測では、供試体にたわみ振動を与えコンクリートの一次共鳴振動数を計測し、供試体が一様に脆弱化していると仮定して動弾性係数を算出している¹⁾。しかし、凍害による脆弱化は表面に近いほど進展しており、一様ではないことが知られており、凍害劣化が進行した供試体の一次共鳴振動数の計測時には計測位置が少しずれるだけで計測値が変化する。凍害劣化の指標である一次共鳴振動数を安定的に計測するためには、こうした点に留意する必要がある。

本研究では、黒曜石を熱発泡させた細骨材（パーライト、以下、PL）を使用し、凍害を受けて脆弱化したコンクリート層を模擬したモルタルを作製した。この脆弱モルタル層と普通コンクリートとを打継ぎ、脆弱層の厚さや位置を変えた積層角柱供試体を作製し、共鳴振動法により動弾性係数を計測した。脆弱の程度（PLの混入割合）や厚さ、積層供試体中の脆弱層の位置が、計測される動弾性係数の値に及ぼす影響を明らかにし、安定した計測値を得る方法を提案した。

5.2 実験概要

5.2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料

本実験に用いた使用材料を表-5.1に示す。セメントに早強ポルトランドセメントを使用した。図-5.1に示すような粒形のPLを用いて、脆弱コンクリート層を模擬したモルタル（パーライトモルタル、以下PM）を作製した。PLは指で押さえるとつぶれる程度の強度である。積層供試体の母材となるコンクリート（Con）には、粗骨材に川砂利と砂、混和剤にリグニンスルホン酸系のAE減水剤を使用した。

表-5.1 使用材料

材料	物 性
セメント	早強ポルトランドセメント，密度 $3.13\text{g}/\text{cm}^3$
PL	黒曜石PL，嵩密度 $0.2\sim 0.26\text{g}/\text{cm}^3$ ， 粒径 5.0mm 以下
細骨材	川砂，密度 $2.59\text{g}/\text{cm}^3$
粗骨材	川砂利， $G_{\text{max}}15\text{mm}$ ，密度 $2.61\text{g}/\text{cm}^3$
混和剤	AE減水剤：リグニンスルホン酸系



図-5.1 PLの外観

(2) 配合

PMの基準配合を表-5.2, PM積層供試体の母材となるコンクリートの配合を表-5.3に示す。PMでは, 砂をPLで容積置換し, PL置換率を0% (川砂100%) から, 20%刻みで100%まで6水準とした (それぞれPL0, PL20, PL40, PL60, PL80, PL100)。

表-5.2 PM基準配合 (PLの置換率0%)

W/C	単位量 (kg/m ³)			
	W	C	S	PL
0.6	270	450	1336	0

表-5.3 母材コンクリート配合

Gmax (mm)	W/C	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
			W	C	S	G	AE
15	0.55	48.0	175	318	843	921	0.994

5.2.2 供試体概要

本実験で作製した供試体の種類を表-5.4に示す。供試体の寸法はPM単体供試体, PM積層供試体のいずれも100×100×200mmとした。PM単体供試体は打設後翌日に脱型, 6日間の水中養生後, 一次共鳴振動数を計測した。その後, 厚さ15mm, 30mm, 45mmでカッターにより切り出し, 母材コンクリートを打ち継ぎ, PM積層供試体を作製した (それぞれPM15mm, PM30mm, PM45mm)。打設後翌々日に脱型, 5日間の水中養生後に一次共鳴振動数を計測した。

表-5.4 供試体の水準

種別	因子	水準	数量
PM単体供試体	PLの置換率 (%)	0, 20, 40, 60, 80, 100	6
PM積層供試体	PM	厚さ (mm)	18
		PL置換率 (%)	

5.2.3 試験方法

一次共鳴振動数の測定方向を図-5.2に示す。JISA1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」²⁾に規定されているたわみ振動により、一次共鳴振動数を計測した。この試験で計測した一次共鳴振動数から、JIS A1127で規定される式(5.1)より動弾性係数を求めた。

$$E_D = 9.47 \times 10^{-4} \frac{L^3 T}{bt^3} m f_l^2 \quad (5.1)$$

ただし、ED:動弾性係数(N/mm²)

L:供試体の長さ(mm)

b及びt:角柱供試体の断面の各辺の長さ(mm)でtは振動方向の辺の長さ

m:供試体の質量(kg)

f_l:たわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

T:修正係数

上記の試験で計測した一次共鳴振動数から、JIS A1148「コンクリートの凍結融解試験」に規定される相対動弾性係数を式(5.2)より求めた。

$$P_n = \left[\frac{f_n^2}{f_0^2} \right] \times 100 \quad (5.2)$$

ただし、P_n:PL置換率n%の相対動弾性係数(%)

f_n:PL置換率n%のたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)

f₀:PL置換率0%におけるたわみ振動の一次共鳴振動数(Hz)。

また、供試体の質量を測り、各PL置換率の供試体質量をPL0の供試体質量で除した値を質量変化率とした。

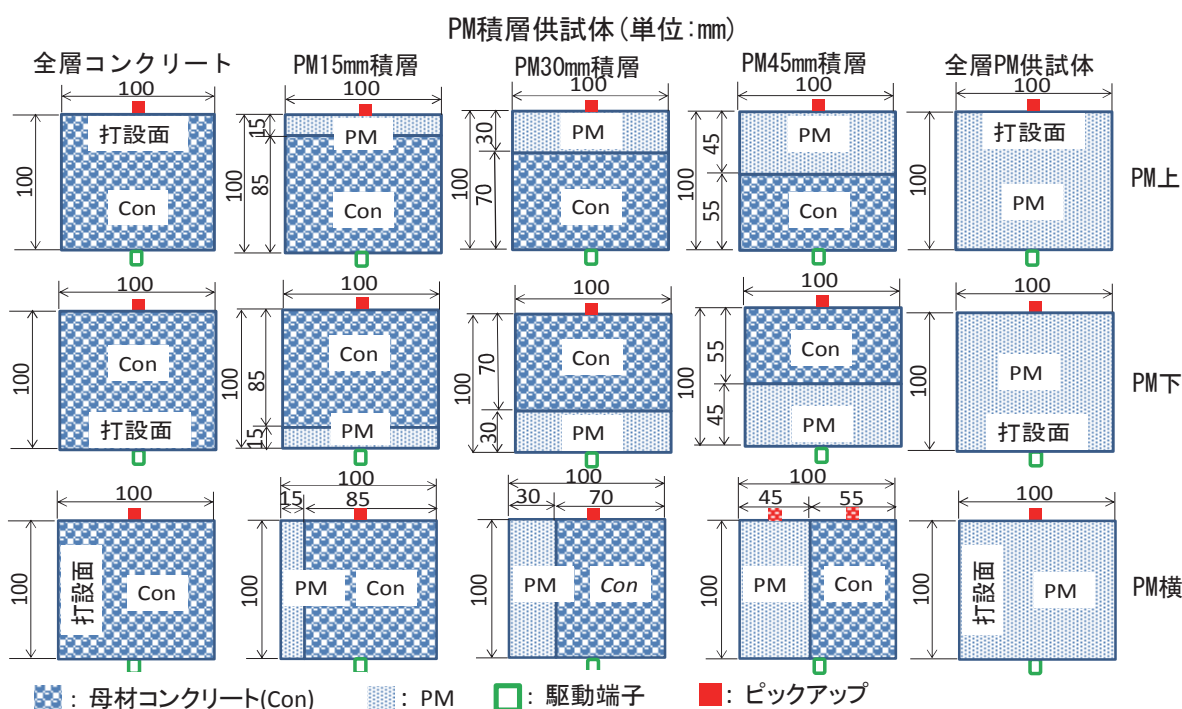


図-5.2 供試体の測定方向

5.3 実験結果と考察

5.3.1 PM 単体供試体

(1) PL 置換率と圧縮強度

図-5.3 に、PM 単体供試体の PL 置換率と質量、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$ の供試体の圧縮強度の結果を示す。図-5.3 から分かるように、PL 置換率が増加すると、直線的に質量が小さくなり、PL0 に対して PL100 の質量は 1/2 程度となった。PL100 の圧縮強度は約 6N/mm^2 で、PL0 の約 36N/mm^2 の 1/6 程度となった。

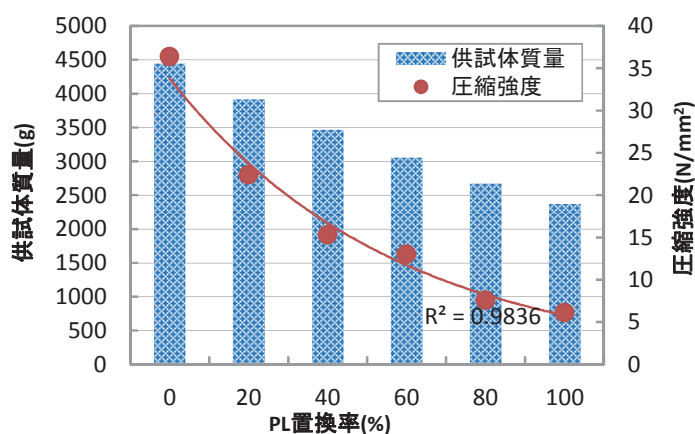


図-5.3 質量と圧縮強度

(2) PL 置換率と一次共鳴振動数, 動弾性係数

PM 単体供試体を用いて計測した PL 置換率と、一次共鳴振動数, 動弾性係数の結果を図-5.4 に示す。PL 置換率が大きくなると動弾性係数, 一次共鳴振動数共に小さくなった。一次共鳴振動数は、PL0 で約 6000Hz であるが、PL100 で約 4000Hz であり、67%となった。動弾性係数は、PL0 で約 30000N/mm^2 , PL100 で約 7000N/mm^2 (23%) となった。動弾性係数の減少の割合が一次共鳴振動数の減少割合よりも大きくなるのは、動弾性係数が一次共鳴振動数の二乗に依存するためである(式(5.1))。

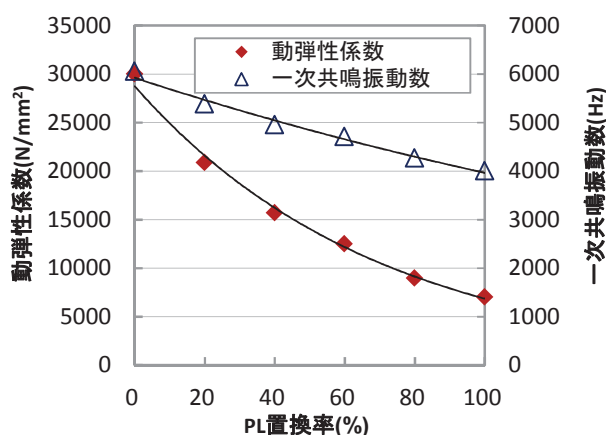


図-5.4 動弾性係数と一次共鳴振動数

(3) 測定方向

PM 単体供試体を用いて、測定方向をかえて測定した動弾性係数の結果を図-5.5 に示す。測定方向(ピックアップの位置)が打設面、底面、側面のいずれであっても3者間の動弾性係数の差はわずかである。PM 単体供試体のように、供試体の断面形状・寸法が同一で等質の場合には、測定方向の違いが動弾性係数の計測値に及ぼす影響は認められなかった。

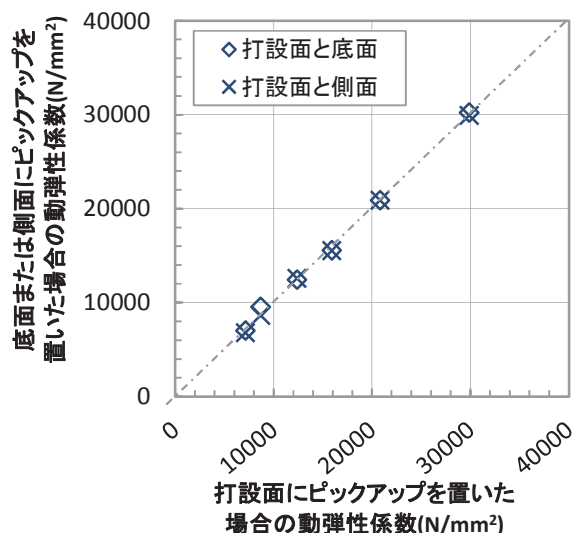


図-5.5 各測定方向の動弾性係数

5.3.2 PM 積層供試体

母材として用いたコンクリートの圧縮強度は材齢7日で32.6N/mm²、一次共鳴振動数は6,312Hz、動弾性係数は34,656N/mm²であった。

(1) PM45mm 積層供試体

PM45mm 積層供試体では横向きにして測定を実施する場合に境界面が中心に来るため、ピックアップをPM側、Con側それぞれに設置(図-5.2 下段右から2つ目)して計測した。結果を図-5.6により比較する。設置位置の違いによる一次共鳴振動数の違いは見られなかったため、母材と積層部材は一体として計測されていると考える。以降、横方向の測定結果はPM側、Con側の平均値により評価する。

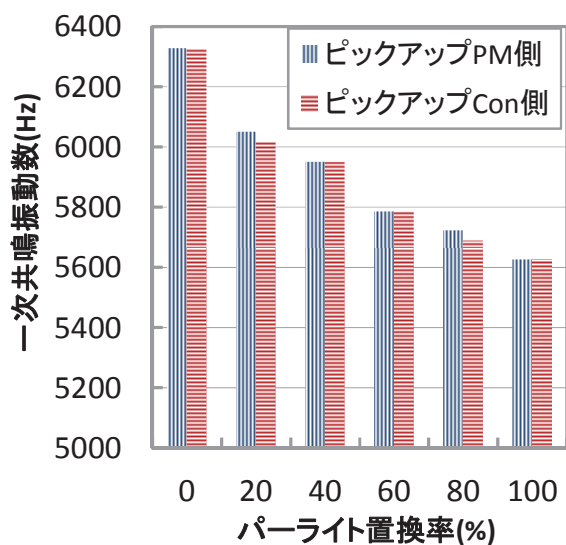


図-5.6 PM 積層供試体のピックアップ設置位置での比較

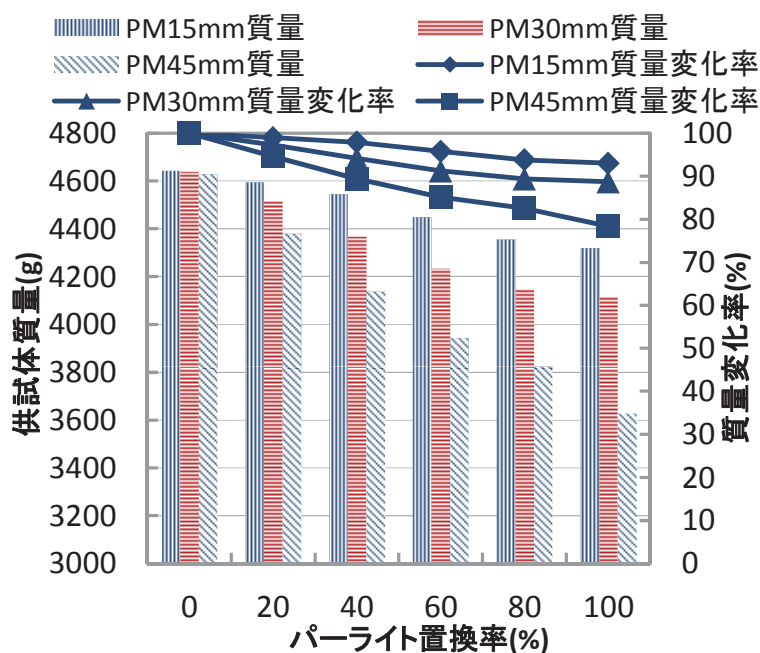
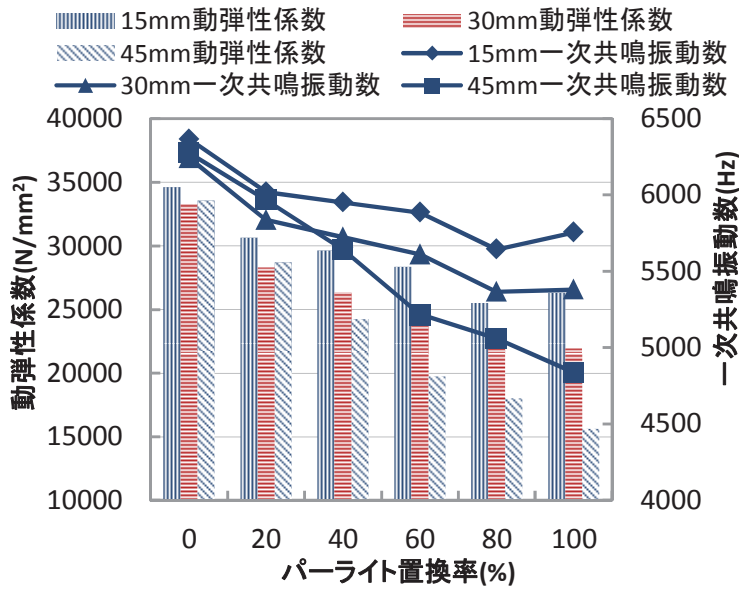


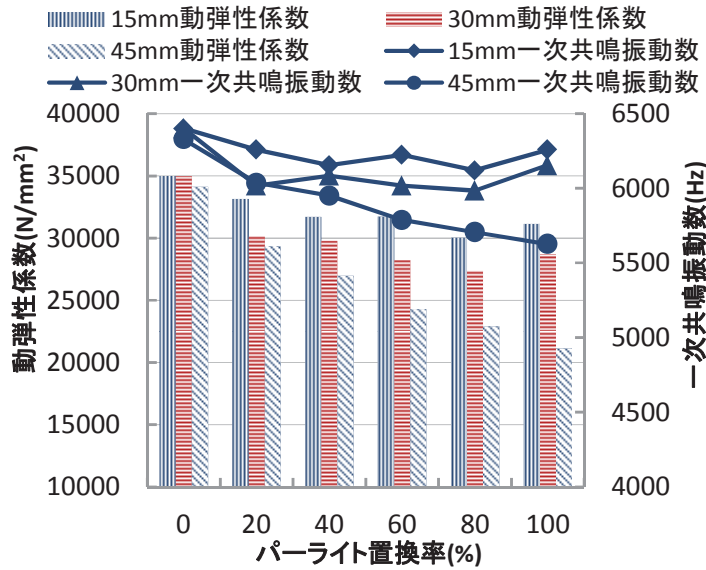
図-5.7 PM 積層供試体の質量変化減少率

(2) 積層厚さと供試体質量

図-5.7にPM積層厚さと質量、質量変化減少率を示す。PL置換率が大きくなり、PM層が厚くなるにつれて供試体質量、質量減少率が減少している。質量変化率では、PL0に比べPL100は、供試体PM15mmで93%、PM30mmで89%、PM45mmで78%まで減少した。



(a) 上下方向の計測結果



(b) 横方向の計測結果

図-5.8 PL 置換率, PM 層の厚さと動弾性係数, 一次共鳴振動数

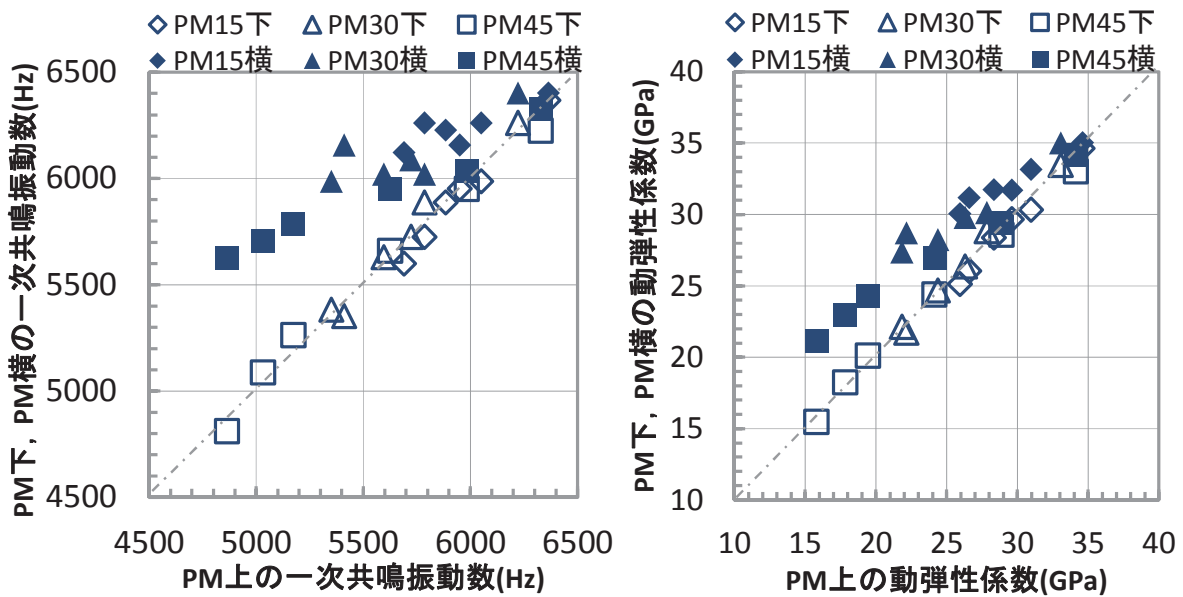
(3) 積層厚さと一次共鳴振動数, 動弾性係数

図-5.8に PL 置換率, PM 層の厚さと動弾性係数, 一次共鳴振動数の関係を示す。動弾性係数には質量が考慮されるために一次共鳴振動数とは傾向が若干異なる。(a)には供試体を上下方向で計測した動弾性係数と一次共鳴振動数の結果を, (b)には供試体を 90° 回転させて横方向で計測した結果を示す。上側と下側による測定値の差は僅かであったので, 上下の平均値を用いた。(a)をみると, PL 置換率が増加するにつれて, 一次共鳴振動数, 動弾性係数が小さくなっている。特に PM45mm では動弾性係数が PL0 に対して, PL100 は約半分程度となった。図-5.8(b)をみると, PM45mm は置換率が大きくなるにしたがって, 動弾性係数が小さくなっている。しかし, 上下方向

に設置した値と比較すると横方向に設置した値の変化は小さく、PM15mm、PM30mm に関しては置換率と動弾性係数に明確な対応関係がみられない。この結果から、脆弱層が厚い場合に動弾性係数は低下しやすくなると考えられる。

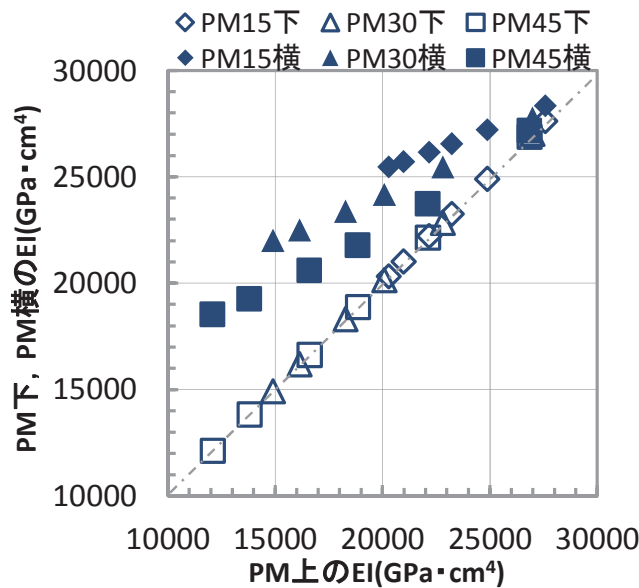
(4) 測定方向

図-5.9にPM上に対する、PM下、PM横の測定値および各計算値を示す。(a)に一次共鳴振動数、(b)に動弾性係数、(c)に曲げ剛性(EI)の関係を示す。曲げ剛性は、PMとコンクリートの動弾性係数比、等価換算断面積から中立軸を求め、中立軸に対するPM、コンクリートの各部の動弾性係数と断面二次モーメントの積の総和とした。脆弱部を上(PM上)にした場合と下(PM下)にした場合では、一次共鳴振動数、動弾性係数、曲げ剛性ともに測定方向による差はほとんどない。PM上(或い



(a) 一次共鳴振動数

(b) 動弾性係数



(c) 曲げ剛性 EI

図-5.9 測定方向での各計測結果の比較

は PM 下)と脆弱部を横(PM 横)にした場合の比較では、一次共鳴振動数、動弾性係数、曲げ剛性ともに PM 横の方が大きくなった。一次共鳴振動数、動弾性係数、曲げ剛性の値が小さくなるほどその傾向は大きくなり、動弾性係数の差の最大は約 5.5GPa(約 35%)となった。PM 上, PM 下, PM 横による曲げ剛性と動弾性係数の関係を図-5.10 に示す。曲げ剛性と動弾性係数は高い相関を示していることから、脆弱層の位置によるそれぞれの差は曲げ剛性の違いにより生じたものと思われる。また、たわみ振動による一次共鳴振動数、動弾性係数は、梁(供試体)のたわみ特性との関係が強いことを再確認した。本実験では強度の違う材料を積層しているため、設置方向が変わることで脆弱部の位置が変わり、曲げ剛性の値に変化を与えたと考えられる。凍害のように表面から劣化していくとされる現象では、同じような傾向がみられる可能性が高い。JIS A1127 で規定されている一次共鳴振動数の測定方法では供試体の設置方向に関しては特筆されていないが、凍結融解作用を 1 面から作用させた凍結融解試験を行った場合や、著しく凍害劣化が進行した供試体を計測する場合など、計測箇所での性状が異なる供試体の一次共鳴振動数を計測する場合は留意する必要がある。

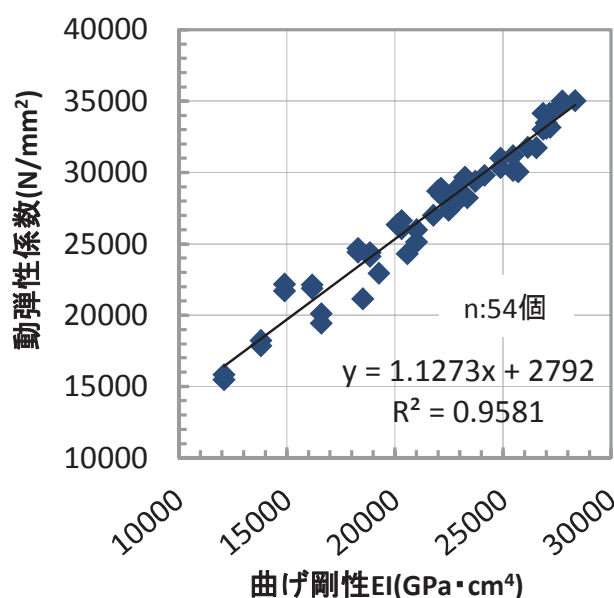
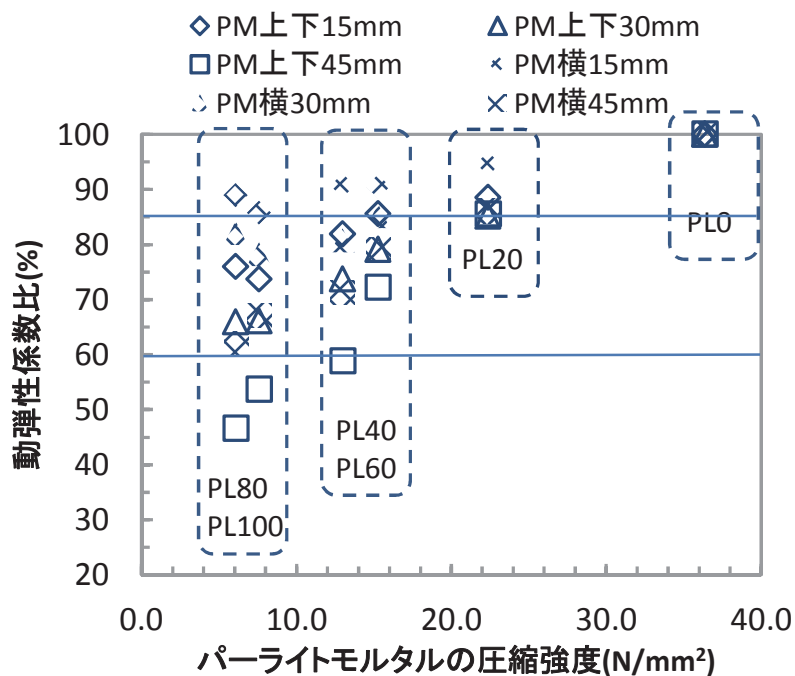


図-5.10 動弾性係数と曲げ剛性の相関

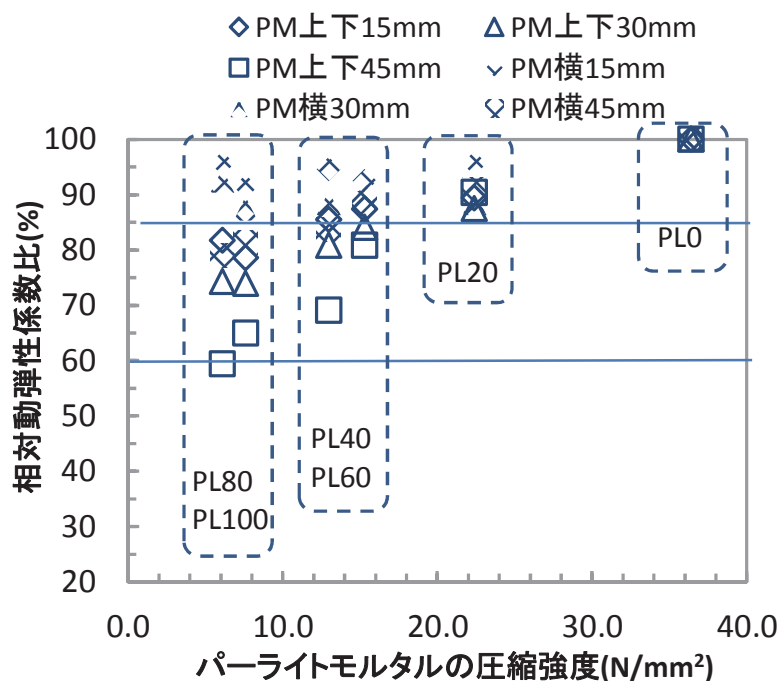
(5) 動弾性係数と相対弾性係数の比較

図-5.11 (a) に圧縮強度に対する動弾性係数比, (b) に相対動弾性係数の関係を示す。置換率が大きく (PM の圧縮強度が小さく), PM 層が厚くなるほど, 動弾性係数比はより小さい値を示す。PL100 の供試体には動弾性係数比で 50%を下回るものもあった。次に相対弾性係数と比較したグラフを図-5.11 (b) に示す。相対弾性係数よりも動弾性係数比の方が同じ供試体で値が小さくなっている。この原因として、供試体の質量変化が挙げられる。動弾性係数を求める式 (5.1) には質量がパラメータに含まれているのに対して、相対弾性係数を求める式 (5.2) は一次共鳴振動数の二乗同士を除する形となっており、供試体の質量が考慮されていない。PM15mm, PM30mm, PM45mm による質量減少率の最大は 7%, 11%, 22%である。耐凍害性の劣化指標である相対動弾性係数 60%で判定が異なるのは、この実験では、質量減少率 22%(PM45mm)の場合のみである。しかし、実際の凍結融

解試験で質量減少率が5%を超えることは稀なため、凍結融解によるコンクリートの内部損傷を、一次共鳴振動数のみから評価しても判定上の過誤は殆どない。



(a) 動弾性係数比



(b) 相対動弾性係数

図-5.11 各弾性係数と圧縮強度の比較

5.4 まとめ

本研究では、以下の知見が得られた。

- (1) PM 単体供試体では、PL 無混入の供試体と、全量 PL の供試体で比較すると、圧縮強度が 1/6 程度まで低下した。
- (2) 積層供試体において、測定時の設置方向によって、結果に大きな差がみられた。供試体の打設面を横にして計測すると、曲げ剛性が大きくなり、たわみにくくなった。そのため、凍結融解作用を 1 面から作用させた凍結融解試験を行った場合や、著しく凍害劣化が進行した供試体を計測する場合など、計測箇所で性状が異なる供試体の一次共鳴振動数を計測する場合は留意する必要がある。
- (3) 動弾性係数比と相対弾性係数では、質量変化を原因として劣化度の評価に差が生じる。質量減少が大きい供試体の劣化評価は、相対弾性係数を評価指標とした場合において、動弾性係数比を評価指標にした場合よりも、過小評価してしまう可能性がある。

本論文では、結融解作用を 1 面から作用させた凍結融解試験を行った場合や、著しく凍害劣化が進行した供試体を計測する場合など、計測箇所で性状が異なる供試体の一次共鳴振動数を計測する場合には供試体を 90° 回転させて計測した一次共鳴振動数の値の平均を用いると安定した結果が得られた。

参考文献

- 1) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書〔規準編〕JIS規格集，pp.597-601(JIS A1148-2010)，2013.
- 2) 土木学会：2013年制定 コンクリート標準示方書〔規準編〕JIS規格集，pp.576-581(JIS A1127-2010)，2013.

第6章 凍害劣化したコンクリートの物質侵入抵抗性の評価

6.1 はじめに

凍害を受ける構造物の補修を行う場合、凍害深さや鉄筋腐食の進行を把握する必要がある。しかし、凍害を受けるコンクリートの劣化進行予測、構造物の余寿命の推定等は、現在のところ極めて困難である。そのため、凍害を受ける構造物の調査では、外観上のグレードに応じて劣化状態の評価¹⁾を行っている。近年では、凍害を受ける構造物の詳細調査として構造物からコア供試体を採取して、コンクリート表面から深さ毎の超音波伝播速度の分布²⁾や細孔径分布の径別の割合³⁾⁴⁾から凍害深さを求める方法が検討されている。しかし、補修を行う現場にて、凍害による劣化範囲を簡便に把握することは困難であるという課題がある。

本研究では、凍害を受けたコンクリート構造物は表層より劣化が進行し、組織を緩ませて劣化することに着目し、塩水をトレーサーとして物質侵入抵抗性を可視的に評価し、凍害にて劣化した範囲を簡便に把握する方法(図-6.1)について提案を行った。

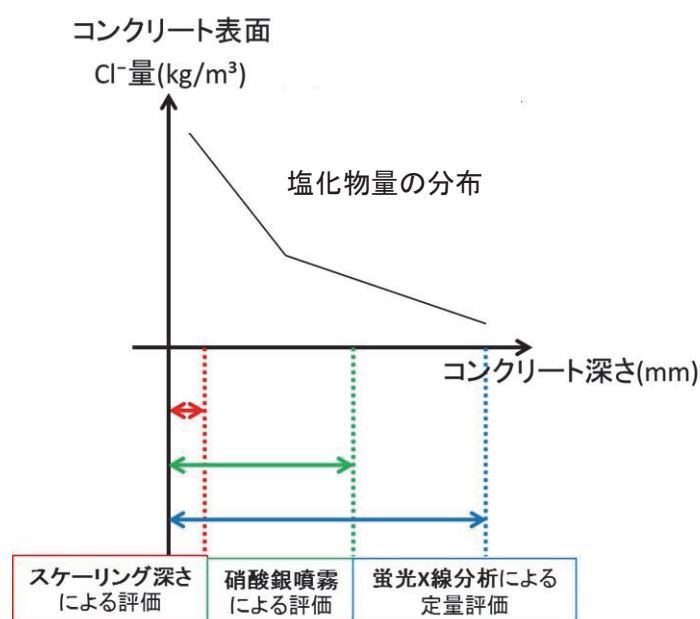


図-6.1 本研究での凍害深さの概念図

6.2 実験概要

本研究の実験フローを図-6.2に示す。本研究では、材齢11~13か月の普通コンクリートを対象として、様々な条件のもとで、凍結融解試験を実施した。その後、供試体を乾燥し、2週間塩水に浸漬し、硝酸銀溶液噴霧試験と蛍光X線分析により塩化物量の測定を行った。加えて予備試験として、内部含水の期間を確認するための吸水試験と、防水塗膜の性状把握のため透水試験を実施した。

6.2.1 供試体概要

(1) 供試体作製

本研究で使用したコンクリートの配合と使用材料を表-6.1, 表-6.2 に示す。供試体は 100×90×200mm の角柱供試体とした。本研究では、凍害劣化を生じやすくするため、混和剤に消泡剤を用いて空気量を小さくしたコンクリートを用いた。脱型後 14 日まで水中養生し、その後は気中養生とした。使用したコンクリートの圧縮強度は 53.7N/mm²(圧縮供試体 3 体平均), 空気量は 2.5%, スランプは 8cm であった。供試体は、各条件につき 2 体とし、24 シリーズ計 48 体を用いた。

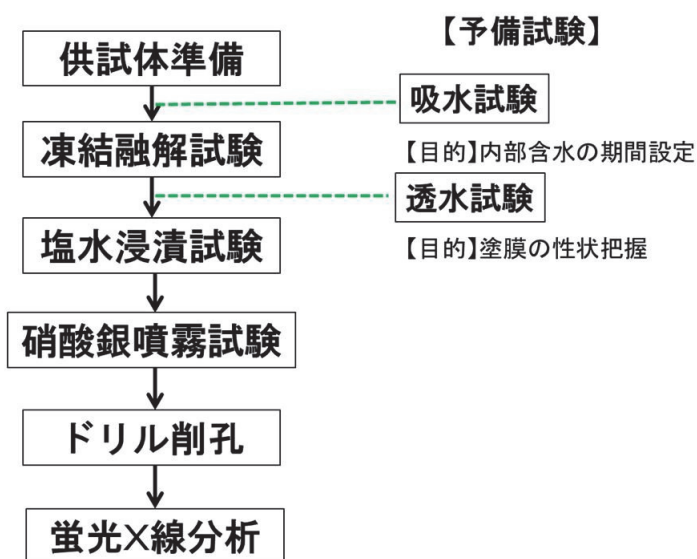


図-6.2 実験フロー

表-6.1 示方配合

スランプ (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
8	2.5	55	48	176	320	866	946	1.000	0.320

表-6.2 使用材料

材料	特性	
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, Gmax15mm 密度 2.61g/cm ³	
AE減水剤	リゲニンスルホン酸	
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体系	
塗布剤	プライマー	アルプロンW-305 (湿潤面用プライマー)
	パテ	タフガードEパテN-2 (エポキシ樹脂)
	中塗	タフガードED中塗N (柔軟系エポキシ樹脂)

(2) 試験条件

試験条件を表-6.3に示す。供試体は、5面防水、全面防水、防水工無の3種類とした。5面防水供試体は、1面からの凍害劣化を模擬している。全面防水供試体は、凍害劣化面に防水処理を行い、凍害を受けるコンクリート構造物に対する防水処理の効果を検討した。また、コーベル等の常に水が滞水する構造物では、多面的に凍害劣化が進展することから、全面を劣化面とした防水工無供試体についても検討を行った。防水加工は、エポキシ系塗布材（プライマー、パテ、中塗）を用いて5面（12シリーズ）、全面（5シリーズ）、防水工無（6シリーズ）、劣化無の4種類で行った（図-6.3参照）。5面防水供試体は、1day、吸水無の2期間で吸水させ、残り1面(劣化面)は打設面または型枠底面とした。防水工無供試体は、1日間吸水させたものと、吸水無しのものを用意した。全面防水供試体では、5面を防水加工した後、1week, 1day, 3hour, 1hourの4期間で吸水させた後、残り1面を同じ材料で防水加工した。なお、比較供試体として吸水をさせない0hour供試体も作製した。さらに、劣化程度を相対動弾性係数により、劣化小（80~90%）、劣化中（60~70%）、劣化大（60%以下、または目視により劣化が顕著にみられる）の3種類とした。

表-6.3 試験条件

	吸水条件	劣化面	劣化程度
全面	大(1week)	/	大
	中(3hour)		
	小(1hour)		
	1day		
	吸水無(0hour)		
5面	1day	打設面または型枠側面	大
	吸水無		小
防水無	1day	/	中
	吸水無(0hour)		小
劣化無	吸水無(0hour)	/	-

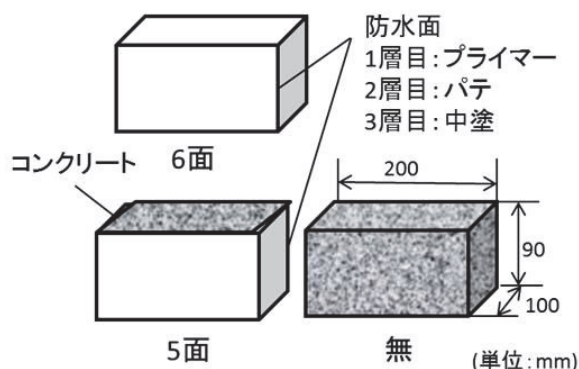


図-6.3 供試体概要

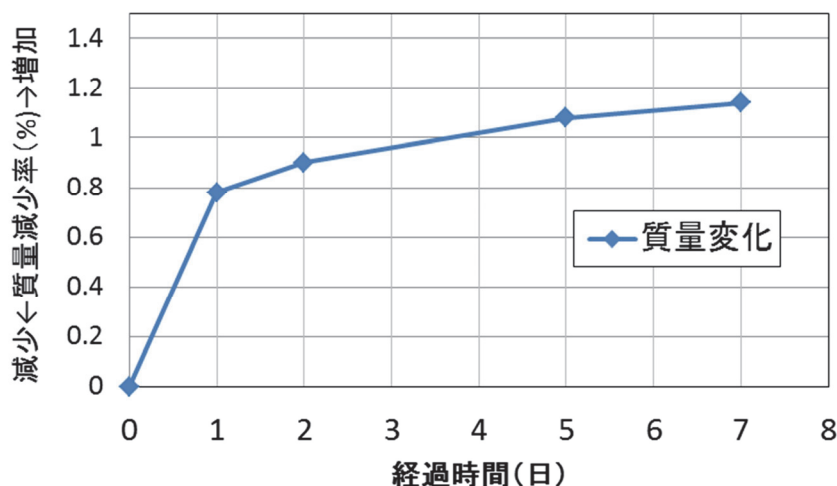


図-6.4 吸水による質量変化

6.2.2 吸水試験及び透水試験

吸水試験の予備試験結果を図-6.4, 図-6.5に示し, 計測に用いた水分計を写真-6.1に示す。吸水試験は表面から10mmの位置に水分計を当てて, 吸水率を算出した。透水試験は, JIS A 6909「建築用仕上塗材」透水試験法Bを採用した。試験風景を写真-6.2に示す。試験は, 透水面を打設面と型枠底面の2面とし, 塗膜の有無による透水量(ml)の違いを調べた。試験体は, 1体ずつとし計4体とした。

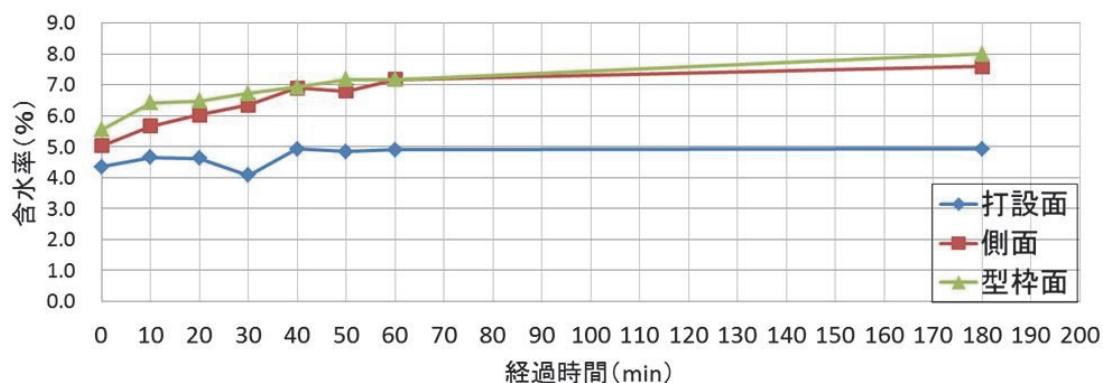


図-6.5 供試体各面の含水率の変化 (表面から10mm)



写真-6.1 コンクリート・モルタル水分計



写真-6.2 透水試験の試験風景

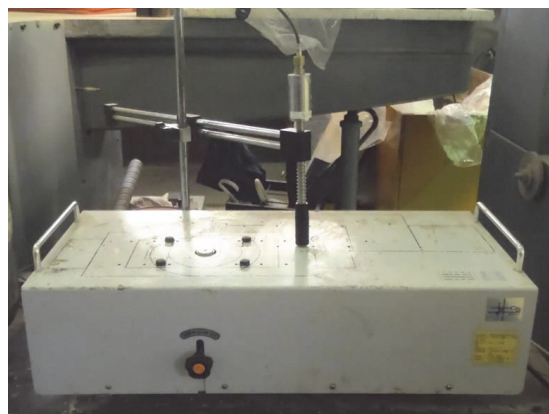
6.2.3 凍結融解試験

本研究で使用した凍結融解試験機を写真-6.3に示す。凍結融解試験はJIS A 1148 A 法⁵⁾に準拠し, 供試体には, 90×100×200mmの角柱供試体を用いた。100×100×400mmのゴム製容器に供試体を2体ずつ挿入した。温度センサーを中心温度測定用供試体に挿入し温度管理に用いた。凍結過程: 5°C~-18°C, 融解過程: -18°C~5°Cを合わせて1サイクルとし, 1サイクルが約4時間となるように設定した。

本研究では、所定のサイクルにおいて供試体の質量 (g) とたわみ振動 (計測スパン 200mm) による一次共鳴振動数 (Hz) を測定した(写真-6.4 参照)。測定した値から、質量減少率 (%) と相対動弾性係数 (%) を算出し、凍害劣化の評価指標とし、これらの値により劣化程度をコントロールした。なお、本論文の結果で示されている数値は平均値ある (供試体 2 体のうち 1 体が剥落により測定不能の場合は残った 1 体のみの結果を記載している)。また、2 体の供試体全てが測定不能となった時点で凍結融解試験を終了した。



写真-6.3 凍結融解試験機

写真-6.4 たわみ振動による
一次共鳴振動数の計測機器

6.2.4 塩水浸漬試験

塩水浸漬試験は、塩水浸漬試験は、JSCE-G 572-2007 に示されている「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法 (案)」に準拠した。凍結融解試験を終えた後、温度 20°C、湿度 60~80%の養生室にて 2 週間乾燥させた。その後、温度 20°C、NaCl 10%の塩水に 2 週間浸漬した。

6.2.5 塩化物量の測定

塩水浸漬後、圧縮試験機を用いて供試体を割裂した (図-6.6)。割裂面に硝酸銀溶液(0.1mol/L)を噴霧し、発色状況から塩分浸透状況を簡易的に確認した⁶⁾。さらに、塩分浸透状況を定量的に確認するため、蛍光 X 線分析により塩化物量 Cl⁻を計測した⁷⁾。供試体表面から深さ方向にドリル削孔を行い、削孔粉を採取し、これを分析に使用した。分析位置は供試体表面から 5, 15, 45mm とした。供試体中心部は表面からのドリル削孔が困難であったため、供試体割裂面をドリルに対し垂直となるように据え、中心部を削孔し試料を採取した。塩化物量の分析装置は蛍光 X 線分析装置 (OURSTEX 101FA 型) を使用した。なお、蛍光 X 線分析には試料 (粉末) に X 線を照射して、発生した蛍光 X 線から直接的に半導体検出器を用いてエネルギー分析を行う手法を用いた。

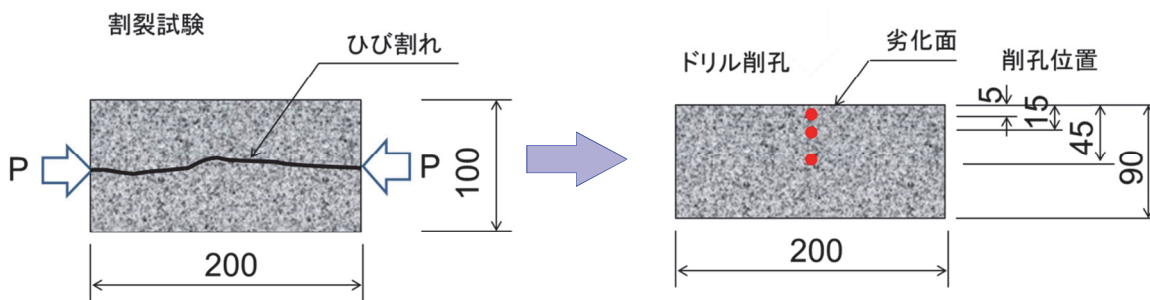


図-6.6 塩化物量の測定

6.3 実験結果と考察

6.3.1 透水試験結果

図-6.7に透水量と試験日数（単位：min）の関係図を、図-6.8に透水量と試験日数（単位：day）の関係図を、図-6.9に図-6.8の透水量のスケールを狭めた関係図を示す。図-6.10より試験開始から60分で、塗膜無の供試体で透水面が打設面の方が型枠面の供試体と比較して、約10倍の透水量の違いが生じた。一方で、塗膜有の供試体では透水量に違いは生じなかった。図-6.8、図-6.9より試験開始7日後の塗膜無供試体において、透水面を打設面とした供試体の透水量は29.77mlで、型枠面では0.91mlとなり、約30倍の透水量の確認ができた。これは打設面と型枠面でのコンクリートの緻密さの違いによる影響であると考えられる。一方で、塗膜有供試体において、打設面を透水面とした供試体の透水量は0.22ml、型枠面では0.11mlで、約2倍の透水量の違いが生じた。これは、透水面と塗膜の付着の違いが影響していると考えられる。

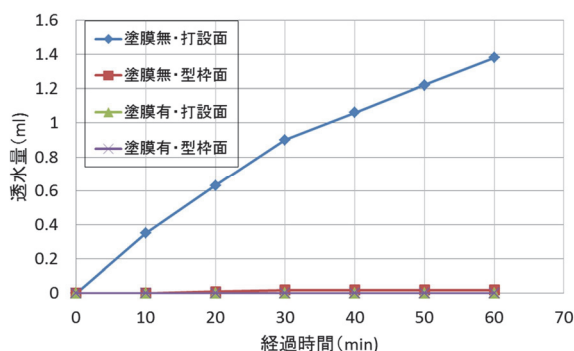


図-6.7 透水量と試験日数（単位：min）

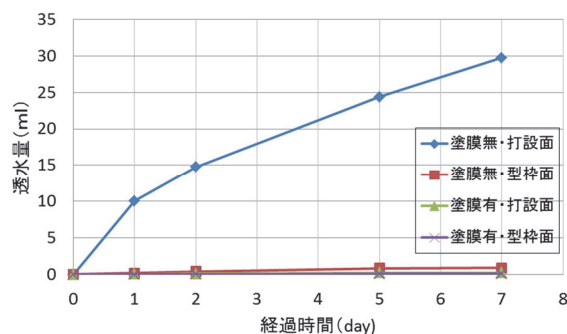


図-6.8 透水量と試験日数（単位：day）

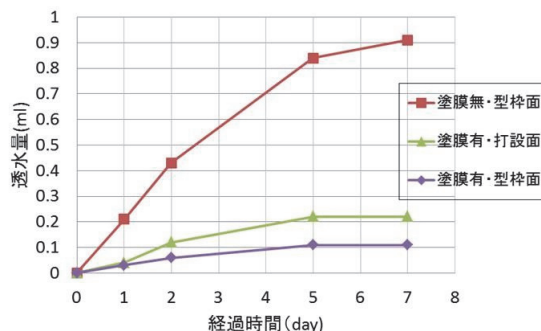


図-6.9 透水量と試験日数（単位：day）

6.3.2 凍結融解試験結果

(1) 凍害劣化状況

写真-6.5～写真-6.9に各供試体の凍害劣化状況を示す。写真-6.5, 写真-6.6に6面防水供試体の劣化状況を示す。6面防水供試体では1体のみ塗膜の破れが生じた。これは凍害によりコンクリートが膨張したことが原因と考えられるが、1体のみだったので、防水加工の施工の不具合である可能性が考えられる。写真-6.6は吸水無の6面防水供試体の150サイクル終了時点の劣化状況を示す。塗膜の破れは打設面で生じた。写真-6.7, 写真-6.8は5面供試体の90サイクル時点の劣化状況を示す。劣化面による劣化状況の違いは顕著であり、スケーリングは打設面の方が型枠面よりも多く、モルタルが剥離し、骨材が一部露出していることがわかる。型枠面を劣化させた供試体でも、スケーリングは微量生じたが、骨材の露出は確認できなかった。さらに、塗膜の剥がれや付着切れを多くの供試体で確認できた。こちらも打設面側の塗膜剥がれが顕著にみられた(写真-6.8参照)。写真-6.9に防水無供試体の90サイクル時点での劣化状況を示す。スケーリングは全面から生じており、特に打設面のスケーリングが顕著にみられた。写真-6.7から、打設面は骨材が露出し、断面欠損がみられた。

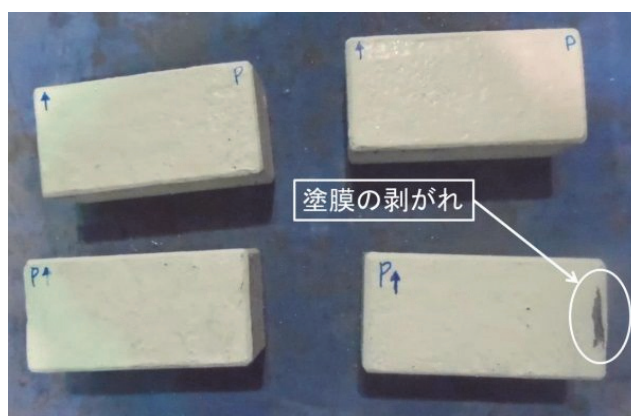


写真-6.5 6面防水供試体
(90サイクル時点 打設面)

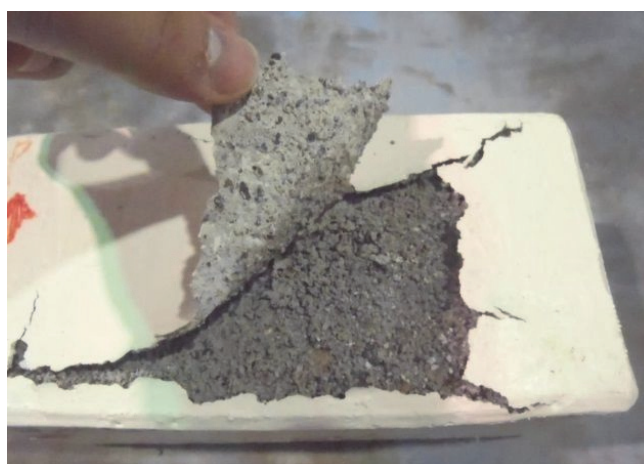


写真-6.6 6面防水供試体
(150サイクル時点 吸水無)

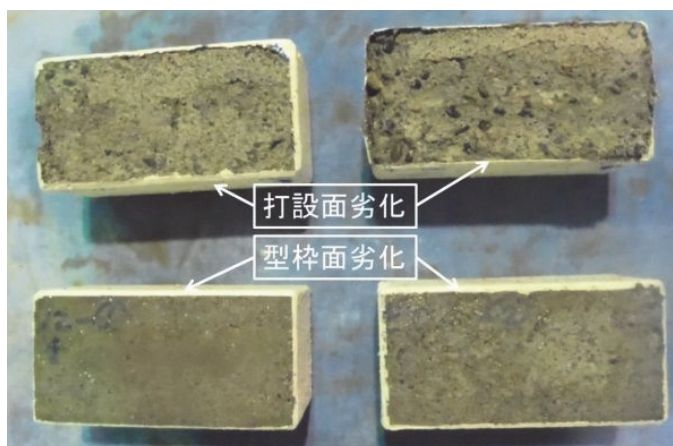


写真-6.7 5面防水供試体
(90 サイクル時点 劣化面による違い)



写真-6.8 5面防水供試体
(90 サイクル時点 打設面の塗膜剥がれ)



写真-6.9 防水無供試体
(90 サイクル時点 打設面のスケーリング状況)

(2) 質量減少率

各供試体の質量減少率を図-6.10～図-6.13に示す。図-6.10より、全面防水供試体は全供試体において、約1~2%程度の質量増加の傾向がみられた。これは試験中に試験槽の水が防水塗膜を通過したか、コンクリートが凍害劣化により膨張し、防水塗膜に微細なひび割れが生じ、吸水した可能性が考えられる。図-6.11, 6.12より、5面防水供試体は、50サイクルまでは全供試体とも約0.3~1.5%の質量増加がみられたが、50サイクル以降は、打設面を劣化させた供試体で質量減少がみられた。これは凍害劣化が進行し、スケーリングが生じたためと考えられる。図-6.13より、防水工無供試体では、試験前の吸水が無い場合には、有る場合よりも質量増加が大きく、いずれも10サイクル以降から、質量変化が横ばいから減少側に移行している。これは、スケーリングが生じたためであると考えられる。

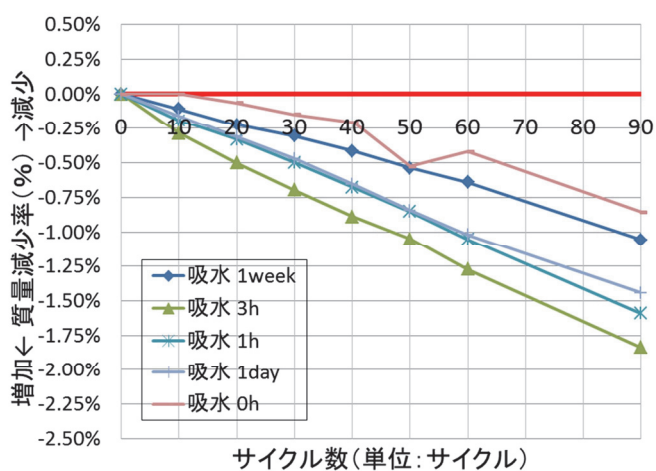


図-6.10 質量減少率 (全面)

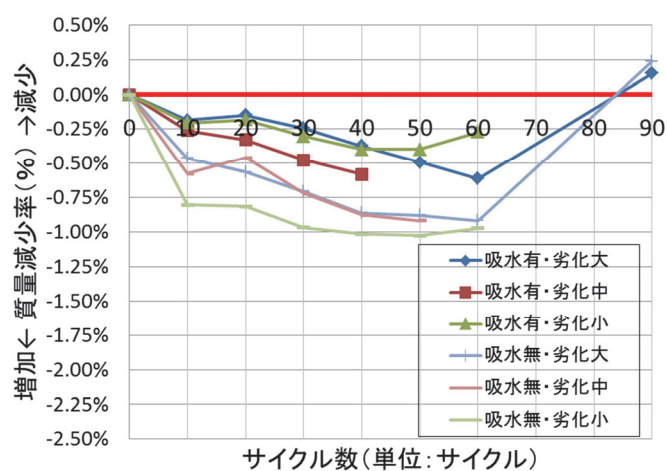


図-6.11 質量減少率 (打設面劣化)

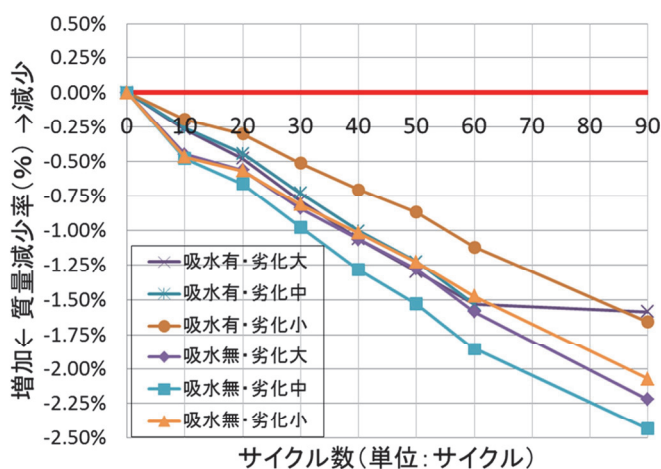


図-6.12 質量減少率 (型枠面劣化)

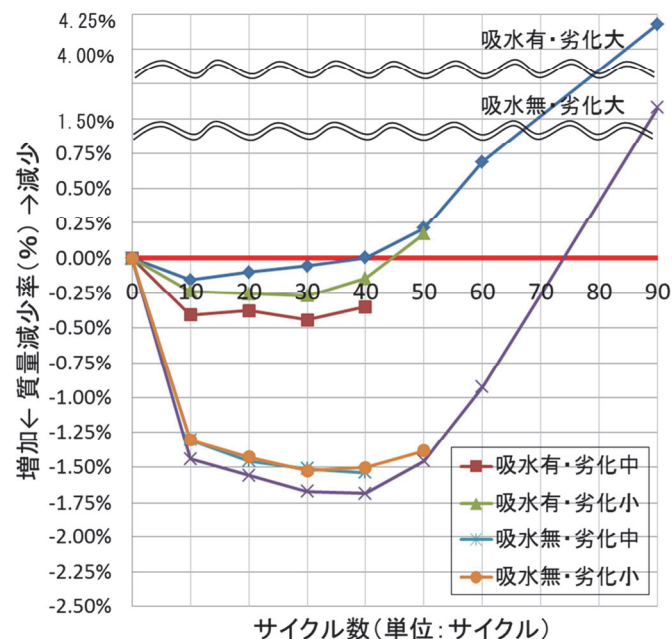


図-6.13 質量減少率 (防水工無)

(3) 相対動弾性係数

図-6.14～図-6.17に各供試体の相対動弾性係数の推移を示す。図-6.14より、全面防水供試体では、50サイクルまでいずれの供試体とも相対動弾性係数の減少がほとんど認められなかった。50サイクル以降は、減少傾向がみられ、90サイクルまでに約60～80%まで値が低下し、劣化が進行した。ただし、吸水無の供試体は90サイクル時点で健全であった。吸水無を除いた全面防水供試体については、吸水時間の違いによる明確な違いは確認できなかった。飽水度と耐久性指数の関係を示した研究によれば、飽水度がある限度以下であれば、コンクリートの劣化が認められないことが分かっている⁸⁾。そのため、全面防水供試体については外部からの水の供給がないため、吸水の有無により相対動弾性係数に差が生じたと考えられる。しかし、5面防水供試体、防水工無供試体については、1面または全面から水の供給が行われるため相対動弾性係数に明確な差が生じなかったと考えられる。図-6.15より、防水工無供試体では、初期から相対動弾性係数の低下がみられ、50サイクル以降に測定が困難となる供試体もあった。これは消泡剤を添加したことによりエントレインドエアが消失し、耐凍害性に著しく劣るコンクリートであるためと考えられる。そのため、全面防水処理を行うことにより耐凍害性が向上することを確認することができた。図-6.16, 17より、5面防水供試体では、20サイクル以降で相対動弾性係数の低下、型枠面よりも打設面の劣化が顕著であった。これは打設面の方が型枠面に比べ、ブリーディング等の影響からコンクリートの緻密さが劣っているためと考えられる。

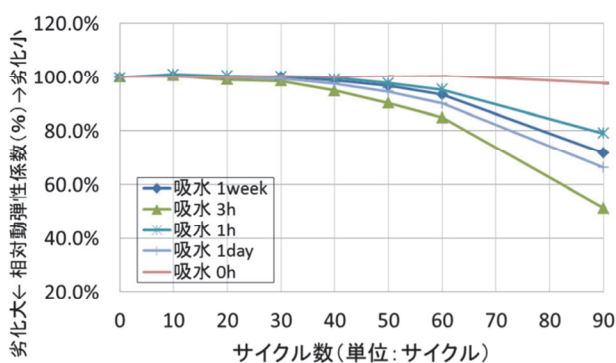


図-6.14 相対動弾性係数 (全面防水)

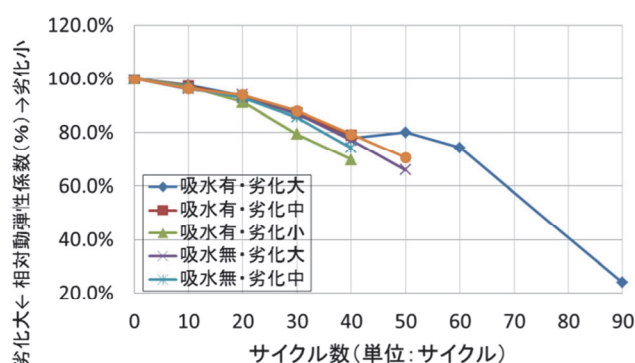


図-6.15 相対動弾性係数 (防水工無)

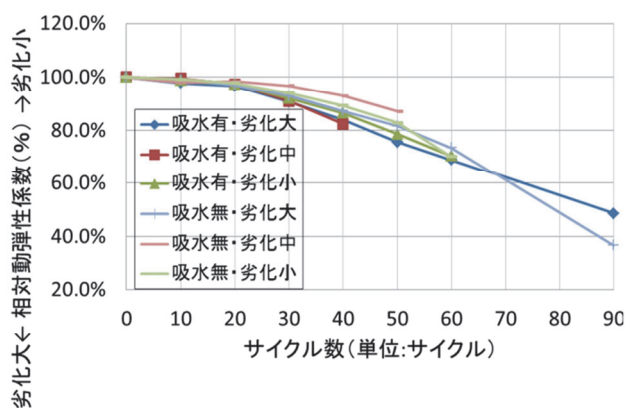


図-6.16 相対動弾性係数 (打設面劣化)

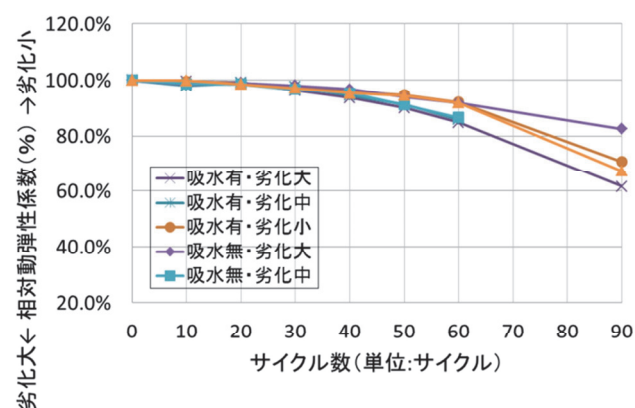


図-6.17 相対動弾性係数 (型枠面劣化)

6.3.3 硝酸銀溶液噴霧試験結果

図-6.18 に硝酸銀噴霧により塩分浸透深さを確認した結果を示す。各供試体の塩化物浸透深さの平均値(20mm)を破線, 最大値(30mm)を一点鎖線にて示す。図内の白色化したところが塩分浸透していることを示している。凍害を受けた供試体との比較供試体(写真 l)については18mm, 劣化小供試体(写真 k)は21mm, 劣化大供試体(写真 j)は25mm の凍結融解作用の有無により塩分がより深く浸透することが確認できた。5面防水供試体については, 劣化大供試体は33mm, 劣化中供試体は20mm, 劣化小供試体は18mm の塩化物浸透深さを確認した。そのため, 劣化の程度が大きいものほど, 塩分浸透深さが大きいことを確認した。加えて, 劣化面を型枠面にするよりも打設面とした方がより塩分浸透深さが大きくなった。これは型枠面に比べて, 打設面は表面積が大きいため, 凍害劣化が促進されてコンクリート組織が弛緩し, 相対動弾性係数の低下傾向にあると考えられる。右下部分については, 前節の考察と同様, 打設面については凍害により組織が弛緩し, 塩分の浸透深さが増加する傾向にあると考えられる。なお, 硝酸銀溶液噴霧試験では, 断面のみを比較すると, 吸水期間が長い供試体の方が, 吸水時間が短い供試体よりも塩分が浸透している面積が広い傾向にあった。しかし, 結果に明確な違いがないため, 吸水時間の違いによる差は大きく影響しないと考えられる。

防水供試体では吸水時間に多少の差が出たものの約20mm程度の白色化が確認できた。全断面防水を行った写真 a の供試体は, 塩化物浸透深さが10mmであった。5面防水を行った写真 d の供試体は, 35mmの塩化物浸透深さであった。5面防水供試体は1面から塩化物の浸透するため, 両者の差から, エポキシ樹脂による防水処理を行うことにより耐塩化物浸透抑制効果を確認した。そしてその効果は本研究においては, 25mmであった。そのため, 本研究においては, コンクリートの表面に防水処理を行うことは, 耐凍害性の向上に有効であった。

6.3.4 蛍光 X 線分析結果

防水工無, 劣化無供試体と5面防水供試体(打設面)について図-6.19, 図-6.20 に塩化物量と供試体表面からの深さとの関係に及ぼす劣化面の違いの影響を示す。硝酸銀噴霧試験では, 防水工無, 劣化無供試体と5面防水供試体では, 劣化小および劣化中供試体では, 塩分浸透深さに大きな差異は確認できなかった。しかし, 蛍光 X 線による塩化物量測定試験では, 表層から15mmの位置で凍害を受けた供試体の方がより多く塩化物が浸透していることが確認できた。つまり凍害により, 物質侵入抵抗性が低下し, より多くの塩化物が浸透したと考えられる。特に相対動弾性係数が60%以下である劣化大供試体では, 表層付近(5mm位置)で最大 5.5kg/m^3 , 20mm付近では 7.7kg/m^3 塩化物量に差が生じた。硝酸銀噴霧試験の目視観察(写真 l)では, 塩分浸透深さが20mmに到達している範囲が小さいが, 5面防水供試体(劣化大)では供試体全面が塩分浸透深さ20mmを越えているため, 塩化物浸透抵抗性に顕著な差が生じたと考えられる。

凍害に関するコンクリート構造物の性能を満足するための凍結融解試験における相対動弾性係数の最小値は一般の場合60%である(凍結融解作用がしばしば繰り返される場合, かつ連続してあるいはしばしば水で飽和される場合については70%)⁹⁾。なお, 平成3年以降のスパイクタイヤの禁止に伴い, 凍結防止剤としてNaClが散布され, 凍害を受けるコンクリート構造物には, 潜在的に塩化物が浸透しているものも少なくない。すでに浸透した塩化物にトレーサーとして凍害劣化部位を推定し, 除去範囲を決定することが出来れば本研究は有意である。

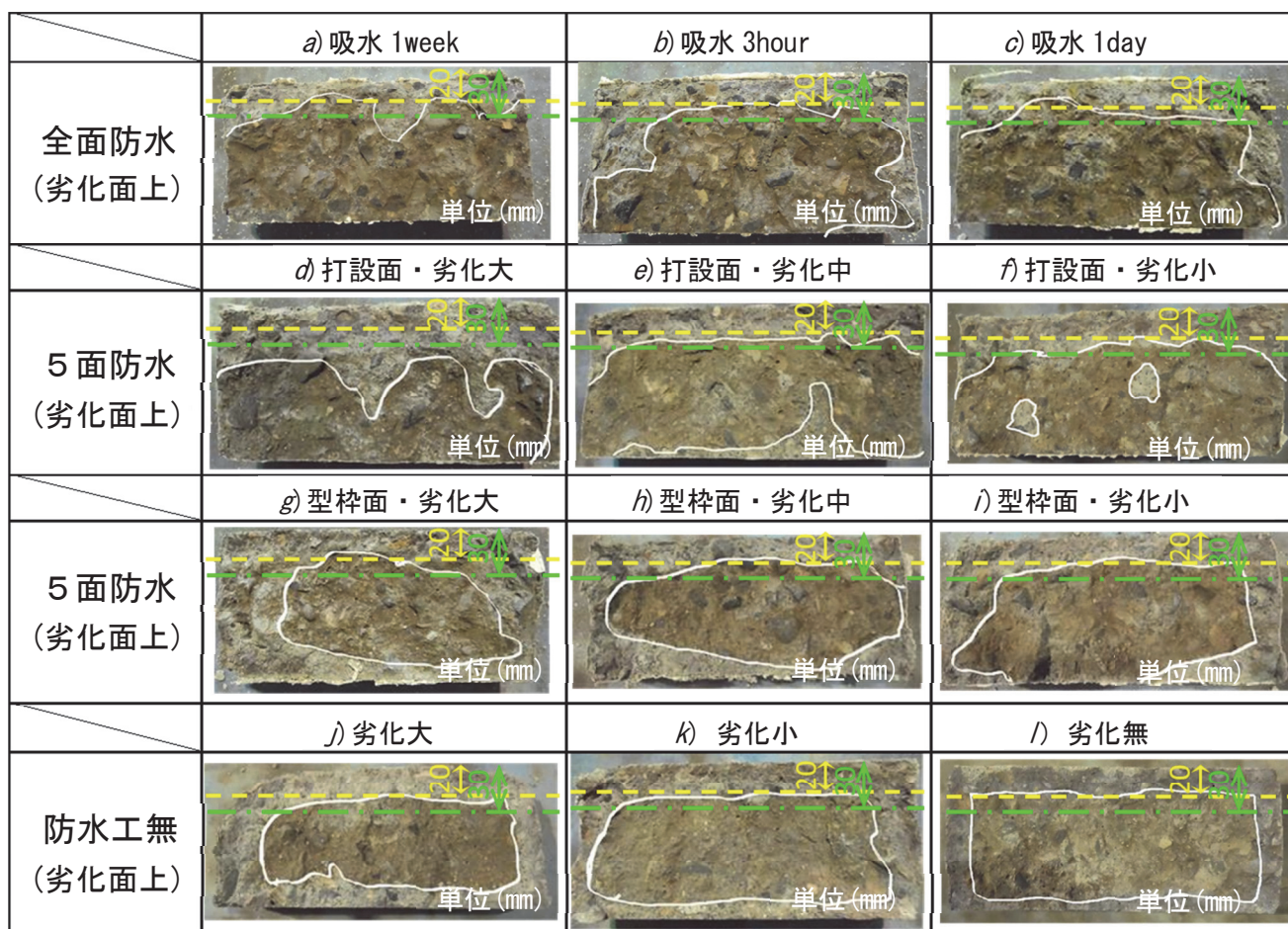


図-6.18 硝酸銀溶液噴霧による塩化物浸透深さ

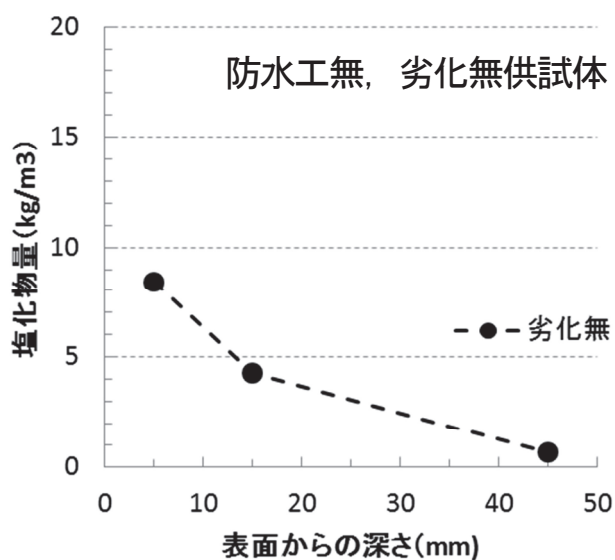


図-6.19 劣化無供試体の塩化物物量

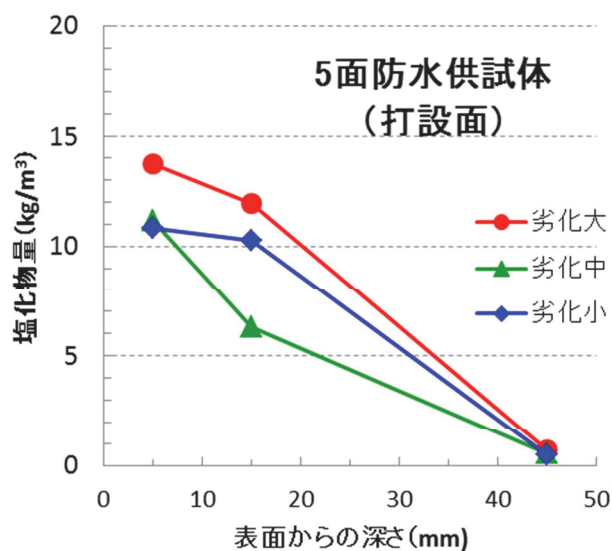


図-6.20 5面防水供試体の塩化物物量

6.4 まとめ

凍害劣化させたコンクリート供試体に対して塩化物をトレーサーとしての物質侵入抵抗性を可視的に評価する方法を提案した。

以下に本研究にて得られた知見を記載する。

- (1) 条件を変えて供試体で凍結融解試験を行った結果、吸水条件が劣化程度に与える影響は小さかった。一方で、型枠面に比べ打設面の方が凍害による劣化が大きくなることが分かった。
- (2) 透水試験により本研究で使用した防水塗膜の性状を確認した。その結果、試験開始7日後で防水塗膜した供試体は、約0.1~0.2gの質量増加がみられた。凍結融解試験で質量減少率を算出したところ、6面防水供試体にて約1~2%(=40~80g)の質量増加が確認できた。これより凍結融解の繰り返しにより、コンクリートが膨張し、防水塗膜に微細なひび割れが生じたため質量増加したと考えられる。
- (3) 凍結融解により劣化した供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀噴霧を行った結果、劣化程度が大きいほど塩化物浸透深さが大きくなる傾向がみられた。これより塩水浸漬法により凍害深さを可視的に評価できる可能性を示した。
- (4) 蛍光X線分析による塩化物量の測定の結果、塩化物量に及ぼす吸水条件の違いの影響は小さかった。劣化面による違いでは、打設面を劣化させた方が型枠面を劣化させた場合よりも塩化物量が高い値を示した。

凍害劣化が生じやすいように空気量を小さくしたコンクリートを用いて、水中凍結融解試験を実施した。凍結融解試験後、NaCl溶液に浸漬させ、硝酸銀噴霧および蛍光X線分析により塩化物侵入状況を可視化することにより塩化物をトレーサーとして、物質侵入抵抗性を可視的に評価する可能性を示すことができた。凍害劣化したコンクリート構造物に対して可視的なアプローチを行うことにより、簡便に除去範囲を決定できるなど利点がある。しかし、現段階では、凍害による組織の緩みを塩化物の浸透により把握することに留まっているため、更なるデータの蓄積や、凍害深さの解析モデルを開発が求められる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術’13 [基礎編]， p.204， 2013.
- 2) 土木学会：2001年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]， p.120， 2001.
- 3) 日本コンクリート工学協会，コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル， p125， 2000.
- 4) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの長期耐久性に関する研究委員会：コンクリートの試験・分析マニュアル， p129， 2000.
- 5) JIS A 1148：コンクリートの凍結融解試験法， 2010.
- 6) Otsuki et al：“Evaluation of AgNO₃ Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials”， ACI Material Journal， No.84， pp.587-592， Nov.1992.
- 7) 金田尚志，魚本健人：塩化物測定用ポータブル型蛍光 X 線分析装置の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.29， No.1， pp.1005-1100， 2007.
- 8) 長谷川寿夫，藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ凍害， pp.34-37， 第1版第1刷， 1988
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書設計編， pp123， 2007.

第7章 結論

7.1 はじめに

本論文では、凍害環境下での HPFRCC 補修材の適用を想定した研究および、凍結融解作用を受けたコンクリートの耐凍害性を評価する研究について取りまとめを行った。本論文で得られた結論を述べる。

凍害劣化したコンクリートの補修を行う場合に課題となる、既設コンクリートと補修材との界面の弱点化や、凍害以外の劣化因子の複合劣化（凍結防止剤や飛来塩分などの塩害や、乾湿の影響など）に対して、HPFRCC 補修材は優れた性能を示すことを確認した。そのため、凍結融解環境下の補修において、既設コンクリートとの付着性能や、塩害や乾燥収縮との複合劣化に対する抵抗性が要求される場合に、有効な材料と言える。

本論文で提案した一面凍結融解試験のように劣化面を限定して凍害劣化させた場合などの、供試体内で固有振動数が異なる場合、一次共鳴振動数を過小評価する可能性があることを提言した。さらに、凍害劣化した構造物の補修を想定した場合、劣化した深さを定量的かつ簡易に把握し、補修範囲を決定することが重要と考えられるが、現段階ではとても困難な課題である。そこで、塩化物イオンをトレーサーとして可視的に凍害劣化した範囲を特定する方法の提案を行った。

本論文における各章の結論および、今後の課題について述べる。

7.2 各章の結論

7.2.1 凍結融解作用が HPFRCC 積層供試体の力学性状に及ぼす影響

第2章では、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。

検討の結果、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。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。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、既設コンクリートに HPFRCC を補修した場合においても、複数微細ひび割れ特性を有する可能性があることを確認することが出来た。また、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。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/mm^2 以上あり、HPFRCC と PCM とともに良好な付着性能が確認された。

本検討においては 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。

7.2.2 表面補修後にひび割れを導入した部材のスケーリングと鉄筋腐食への乾湿および塩水の影響

本研究では、HPFRCCを橋梁等の補修材として適用することを考え、HPFRCCを補修材とする積層供試体を作製した。また、比較用として補修材にポリマーセメントモルタル（以下PCM）とNMを積層した供試体と、全断面をNCとした供試体とを作製した。その後、引張試験により供試体にひび割れを導入し、融解過程に乾湿繰返し試験をはさみながら塩水等による緩速凍結融解試験を行い、乾湿繰返しの有無、塩水の有無及びひび割れの有無が耐スケーリング性に与える影響について検討した。また、あわせて供試体の美観も目視により確認した。続いて供試体を割裂させ、割裂面で硝酸銀発色試験を行った。これより供試体内の塩分浸透状況を確認し、各種補修材および乾湿繰返しの有無による違いを検討した。さらに、割裂させた供試体から鉄筋をはつり出し、鉄筋の腐食面積率を算出し、ひび割れ幅との関係について検討を行った。

検討の結果、HPFRCCは乾湿繰返しおよび塩水の影響を受けても、スケーリング劣化は全く確認されず、耐スケーリング性に優れていることが確認された。塩水を用いた場合、スケーリング劣化が顕著となった。この理由としては、氷圧に加え塩水の浸透によって浸透圧が生じるためと考えられる。ひび割れを有するRC部材の場合、ひび割れの角からのスケーリング劣化が顕著であった。乾湿繰返しによる、供試体内の飽和量の低下がNCとNMのスケーリング劣化を改善することが確認された。HPFRCCがNC、NMおよびPCMに比べ、高い塩分浸透抑制効果を有していることが確認された。HPFRCCは高い耐スケーリング性及び微細なひび割れを有することから、美観の維持に優れていると言える。

7.2.3 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

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）が低下してしまう可能性がある。このため、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行っており、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。

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。また、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必要がある。

7.2.4 凍害を想定した脆弱モデル層がコンクリートの動弾性係数の計測値に及ぼす影響

凍害による脆弱化は表面に近いほど進展しており、一様ではないことが知られている。凍害劣化の指標である動弾性係数を安定的に計測するため、本研究では、黒曜石を熱発泡させた細骨材（パーライト、以下、PL）を使用し、凍害を受けて脆弱化したコンクリート層を模擬したモルタルを作製した。この脆弱モルタル層と普通コンクリートとを打継ぎ、脆弱層の厚さや位置を変えた積層角柱供試体を作製し、共鳴振動法により動弾性係数を計測した。脆弱の程度（PLの混入割合）や厚さ、積層供試体中の脆弱層の位置が、計測される動弾性係数の値に及ぼす影響を明らかにし、安定した計測値を得る方法を提案した。

PM単体供試体では、PL無混入の供試体と、全量PLの供試体で比較すると、圧縮強度が1/6程度まで低下した。積層供試体において、測定時の設置方向によって、結果に大きな差がみられた。供試体の打設面を横にして計測すると、曲げ剛性が大きくなり、たわみにくくなる。JIS A1127に規定されている一次共鳴振動数の計測方法には供試体の向きに関する記述は記されていないが、計測方法を検討することが望ましいと考える。動弾性係数比と相対弾性係数では、質量変化を原因として劣化度の評価に差が生じる。JIS A1148で規定されている相対弾性係数での評価では質量減少が大きい場合に劣化度を過小評価してしまうことを留意する必要がある。

7.2.5 凍害劣化したコンクリートの物質侵入抵抗性の評価

凍害による構造物の性能評価は凍害深さと鉄筋腐食の進行を考慮する必要がある。現状では、凍害を受ける構造物の調査では、外観上のグレードに応じて劣化状態の評価を行っている。本研究では、凍害を受けたコンクリート構造物は表層より劣化が進行し、組織を緩ませて劣化することに着目し、塩水をトレーサーとして簡便に物質侵入抵抗性を可視的に評価する方法について提案を行った。

条件を変えて供試体で凍結融解試験を行った結果、吸水条件が劣化程度に与える影響は小さかった。一方、型枠面に比べ打設面の方が凍害による劣化が大きくなることが分かった。透水試験により本研究で使用した防水塗膜の性状を確認した。その結果、試験開始7日後で防水塗膜した供試体は、約0.1~0.2gの質量増加がみられた。また、凍結融解試験で質量減少率を算出したところ、6面防水供試体にて約1~2%(=40~80g)の質量増加が確認できた。これより凍結融解の繰り返しにより、コンクリートが膨張し、防水塗膜に微細なひび割れが生じたため質量増加したと考えられる。

凍結融解作用により劣化した供試体を割裂し、割裂面に硝酸銀噴霧を行った結果、劣化程度が大きいほど塩化物浸透深さが大きくなる傾向がみられた。これより塩水浸漬法により凍害深さを可視的に評価できる可能性を示した。蛍光X線分析による塩化物量の測定の結果、塩化物量に及ぼす吸水条件の違いの影響は小さかった。劣化面による違いでは、打設面を劣化させた方が型枠面を劣化させた場合よりも塩化物量が高い値を示した。

凍結融解試験後、NaCl溶液に浸漬させ、硝酸銀噴霧および蛍光X線分析により塩化物侵入状況を可視化することにより塩化物をトレーサーとして、物質侵入抵抗性を可視的に評価する可能性を示すことができた。凍害劣化したコンクリート構造物に対して可視的なアプローチを行うことにより、簡便に除去範囲を決定できるなど利点がある。しかし、現段階では、凍害による組織の緩みを塩化物の浸透により把握することに留まっているため、更なるデータの蓄積や、凍害深さの解析モデルを開発が求められる。

7.3 今後の課題

7.3.1 凍害を受けるコンクリート構造物に対する HPFRCC 補修材の適用

HPFRCC を補修材として適用し、HPFRCC の複数微細ひび割れ特性や疑似ひずみ硬化特性を期待する場合には、界面の影響を考慮した付着機構を理解して適用する必要がある。また、乾湿繰返しや ASR、塩害など複合劣化因子が考えられる環境に適用する場合については、各因子について詳細な検討を行い、HPFRCC 補修材の厚みを大きく設定するなどの安全側の配慮が必要となる。

凍害環境下の HPFRCC に中空骨材を混入させた場合、中空骨材種類により耐凍害性が向上または、低下することが確認された。本研究で使用した中空骨材は 2 種類のみでの検討に留まったため、シリカやアルミナを主成分とするフライアッシュバルーンや、ガラスを主成分とするリサイクルガラスバルーンなどの材料や骨材の生成過程の異なる中空骨材についても研究を行う必要がある。また、シラスバルーン骨材をコンクリートに混入することにより、耐凍害性に劣るモルタルを改善する結果が得られた。しかし、シラスバルーン骨材の混入量を多くすることでコンクリートの強度が低下するため、構造部材への適用は困難である。そのため、地覆や歩車道境界などの、水が滞水しやすいため凍害が生じやすい非構造部材への適用が望ましいと考える。今後は、シラスバルーン骨材をコンクリートに混入させることで耐凍害性が向上することを利用して、凍結融解試験が不要となるシラスバルーン骨材混入量を検討したい。

7.3.2 耐凍害性の評価

塩水をトレーサーとして簡便に物質侵入抵抗性を可視的に評価する方法については、相対動弾性係数が 60%程度以下のコンクリートについて有効であった。しかし、凍害劣化の補修を考えた場合、塩水が浸透した範囲に隣接するコンクリートにも、ある程度劣化していることが想定されるため、劣化範囲の除去を行う場合には詳細な検討が必要となる。また、塩水がコンクリートの劣化因子となりえるため、その適用については慎重に検討する必要がある。

凍害を受けて脆弱化したコンクリート層を模擬したモルタルを作製し、一時共鳴振動数にて凍害劣化の推定を行うには、さらなる検討の蓄積が必要である。

発表論文

(1) 博士論文に含まれる発表論文

1. 太畑卓也, 加藤久也, 浅野幸男, 六郷恵哲: 凍結融解作用が HPFRCC 積層供試体の力学性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1117-1122, 2009.
2. 澤田賢吾, 太畑卓也, 小林孝一, 六郷恵哲: 表面補修後にひび割れを導入した部材のスクーリングと鉄筋腐食への乾湿および塩水の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1123-1128, 2009.
3. 中島隆, 太畑卓也, 中澤里, 六郷恵哲: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 227-232, 2010.
4. 田代恭平, 太畑卓也, 浅野幸男, 小林孝一, 六郷恵哲: 凍害を想定した脆弱モデル層がコンクリートの動弾性係数の計測値に及ぼす影響, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 第 14 巻, pp. 121-126, 2014.
5. 太畑卓也, 向井佑真, 小澤満津雄, 小林孝一, 六郷恵哲: 凍害劣化したコンクリートの物質侵入抵抗性の評価, コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集, 第 14 巻, pp. 133-140, 2014.
6. Takuya OHATA, Hisaya KATO, Yuichiro YAMADA, Koichi KOBAYASHI and Keitetsu ROKUGO: Improvement of performance of concrete against freezing and thawing actions by HPFRCC overlay, Proc. of 4th International Conference on Construction Materials, Vol.1, S5-3-4, pp. 369-373, 2009.

(2) 研究活動によるその他の発表論文

1. 大畑卓也, 中澤里, 前田徳一, 六郷恵哲: ひび割れを有する HPFRCC 積層供試体の耐凍害性能, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 233-237, 2010.
2. 大畑卓也, 六郷恵哲, 羽田野英明: 鉄筋の後施工による RC 面部材のせん断補強, 土木学会全国大会第 68 回年次学術講演会, V-014, 2013. 優秀講演者賞受賞.
3. 六郷恵哲, 大畑卓也, 羽田野英明: 高強度 PE ロープと HPFRCC を組み合わせた RC 棒部材のせん断補強, 土木学会全国大会第 68 回年次学術講演会, V-015, 2013.
4. 大畑卓也, 福嶋孝啓, 高木雄介, 小林孝一, 六郷恵哲: ASR の亜硝酸リチウム圧入による補修がはり部材の耐荷性能に与える影響に関する実験的検討, 土木学会全国大会第 69 回年次学術講演会, V-477, 2014. 優秀講演者賞受賞
5. Takashi Nakashima, Sato Nakazawa, Takuya Ohata, Koichi Kobayashi, Keitetsu Rokugo: Frost resistance of precracked concrete specimens with HPFRCC overlay, Proc. of the 9th Symposium on High Performance Concrete (hpc-2011), ID A5-2, Rotorua, 2011.
6. Hideaki Hatano, Hyun-Do Yun, Takuya Ohata, Takashi Nakashima, Yuichi Uchida and Keitetsu Rokugo: Shear reinforcement of RC beams with continuous fiber rope, Proceedings of the 8th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (FraMCoS-8), 2013.
7. Yuichiro YAMADA, Tomohiro HATA, Takuya OHATA, Keitetsu ROKUGO, Tadashi INAGUMA and Seung-Chan LIM: Flexural creep behavior of SHCC beams with or without cracks, Advances in Cement-Based Materials, Proc. of International Conference on Advanced Concrete Materials (ACM2009), Stellenbosch, South Africa, pp. 43- 49, 2009.

謝辞

本論文は「コンクリートの耐凍害性能の評価と補修材としての HPFRCC の適用」と題して、岐阜大学大学院工学研究科 博士前期課程 社会基盤工学専攻 並びに 生産開発システム工学専攻 博士後期課程在学中に行った研究の成果をまとめたものです。

岐阜大学 工学部 社会基盤工学科教授 六郷恵哲先生には指導教員として、本研究の遂行にあたり、実験や論文の作成から、国内外での発表など、多大なるご指導・ご助言を賜りました。特に、私が社会人であるため、土・日・祝日に実験や打合せをして頂きました。厚く御礼申し上げます。岐阜大学 工学部 社会基盤工学科教授 小林孝一先生には、本論文を査読して頂くとともに、研究を進めていくにあたり終始丁寧なご指導を頂きました。国際発表の際には、英語が苦手な私に対して、懇切丁寧にご教示頂いたこと、深く感謝いたします。本論文を査読して頂き、貴重なご意見を頂いた岐阜大学 総合情報メディアセンター教授 内田裕市先生に深く感謝の意を表します。岐阜大学 社会資本アセットマネジメント技術研究センター特任教授 浅野幸男先生には、本研究の遂行に当たり、様々な材料の知見についてご教示を賜り深く御礼申し上げます。群馬大学 理工学部准教授 小澤満津雄先生には、論文作成において貴重なご意見を頂き、深く御礼申し上げます。

本研究の第2章における「凍結融解作用が HPFRCC 積層供試体の力学性状に及ぼす影響」の研究、第3章における「表面補修後にひび割れを導入した部材のスケーリングと鉄筋腐食への乾湿および塩水の影響」の研究、第4章における「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」の研究、第5章における「凍害を想定した脆弱モデル層がコンクリートの動弾性係数の計測値に及ぼす影響」の研究、および第6章「凍害劣化したコンクリートの物質侵入抵抗性の評価」の研究では、中澤里様（岐阜大学大学院）、加藤久也様（現ジェイアール東海コンサルタンツ）、澤田賢吾様（現 JR 東海）、中島隆様（現 JR 東海）、向井佑真様（現 JR 東海）、田代恭平様（現 JR 東海）には、実験用の供試体作成から、載荷試験、実験結果の整理など多岐にわたり、ご協力を頂きましたことに深く感謝申し上げます。

本研究の各段階において、岐阜大学コンクリート研究会メンバーである、林承燦様（デーロス・ジャパン）、新家一秀様（トーヨーマテラン）及び 岐阜高専 環境都市工学科 教授 岩瀬裕之先生には、私が学部生の時から貴重なご意見を頂き、深く御礼申し上げます。

ジェイアール東海コンサルタンツ 土木事業部 事業部長 大内慎一様 及び 技師長 嶋崎繁一様 並びに、土木設計第二部 部長 澤田一三様 及び 土木設計第二部 次長 今枝潤志様には、博士課程への進路の相談や本研究のご指導を頂いたことに、深く感謝申し上げます。また、土木設計第一課 担当課長 石橋孝通様には、日常業務に向かう姿勢や、研究と仕事に悩んでいるときには親身に相談に乗って頂き、あたたかいご指導と激励を賜りましたことを深く感謝申し上げます。

最後に、常に私を明るく励まし続けてくれた妻に心から感謝申し上げます。また、これまで私をあたたかく応援してくれた両親に心から感謝します。