



環境負荷低減型繊維補強ポリマーセメントモルタル の開発と評価

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2018-06-06 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 長谷川, 諒 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00009636

環境負荷低減型繊維補強ポリマーセメントモルタル の開発と評価

Development and Evaluation of a Fiber-reinforced Polymer Cement Mortar with
Reduced Environmental Load

2018年3月

長谷川 諒

目次

目次.....	i
第1章 序論.....	1
1-1. 研究背景.....	1
1-2. 既往研究.....	3
1-2-1. 繊維補強セメント複合材料の分類.....	4
1-2-2. FRPCM のフレッシュ性状および硬化性状.....	6
1-3. 本論文の構成.....	11
【参考文献】.....	13
第2章 環境負荷低減型繊維補強ポリマーセメントモルタル (ECO-FRPCM) の開発.....	12
2-1. はじめに.....	12
2-2. ECO-FRPCM の開発コンセプト.....	13
2-3. ECO-FRPCM の構成材料の影響.....	14
2-3-1. 実験計画.....	14
2-3-2. 使用材料.....	16
2-3-3. 実験方法.....	17
2-3-4. 試験結果および考察.....	18
2-4. ECO-FRPCM の基礎性状および靱性の検討.....	24
2-4-1. 実験計画.....	24
2-4-2. 使用材料および調合.....	27
2-4-3. 実験方法.....	29
2-4-4. 試験結果および考察.....	30
2-5. ECO-FRPCM の調合決定および CO ₂ 排出量低減効果.....	38
2-6. まとめ.....	41
【参考文献】.....	42
第3章 ECO-FRPCM の化学抵抗性.....	43
3-1. はじめに.....	43
3-2. 実験計画および方法.....	44
3-2-1. 実験計画および使用材料.....	44
3-2-2. 実験方法.....	45
3-3. 試験結果および考察.....	46
3-3-1. ECO-FRPCM の中性化抵抗性.....	46
3-3-2. ECO-FRPCM の耐硫酸性.....	50
3-3-3. ECO-FRPCM の耐塩害性.....	51
3-4. まとめ.....	53
【参考文献】.....	54

第4章 ECO-FRPCMの硬化収縮に及ぼす混和剤および養生温湿度条件の影響	56
4-1. はじめに	56
4-2. 膨張材と収縮低減剤が硬化収縮に及ぼす影響	59
4-2-1. 実験概要	59
4-2-2. 実験結果と考察	61
4-3. 養生温度条件の影響	63
4-3-1. 実験概要	63
4-3-2. 試験結果および考察	66
4-4. ECO-FRPCMの硬化収縮性状の評価方法の最適化	71
4-5. まとめ	72
【参考文献】	73
第5章 ECO-FRPCMの耐凍害性および凍害劣化が引張性状に及ぼす影響	74
5-1. はじめに	74
5-2. 耐凍害性に及ぼす繊維種類の影響	75
5-2-1. 実験概要	75
5-2-2. 実験方法	77
5-2-3. 結果および考察	78
5-3. ECO-FRPCMの耐凍害性および凍害劣化が引張性状と強度に及ぼす影響	88
5-3-1. 実験概要	88
5-3-2. 結果および考察	91
5-4. まとめ	98
【参考文献】	99
第6章 総括	101

第1章 序論

1-1. 研究背景

コンクリート構造物は社会のインフラや人々の安全を支える重要な役割を担っている。コンクリート構造物を長期間使い続けるには、ライフサイクルコストの低減や環境に配慮した補修・補強を行うことが重要となる。そのため、環境負荷を抑えた補修材の利用が求められている。

近年、高度経済成長期に建設されたビル、マンション、トンネル、橋梁、用排水路、ダムなどのコンクリート構造物において老朽化が深刻化しており、特に用排水路では平成20年の時点で農業用排水路の延長約4万9000kmのうち25%【1】以上が、また橋梁では2016年の時点で判明しているだけでも橋梁約73万橋のうち20%が耐用年数を経過しており2026年には約45%もの橋梁が老朽化することが明らかとなっている(図1-1-1)【2】。そのため補修対象や規模により適切な補修方法を採用して(図1-1-2)安全に使い続けることが重要である。

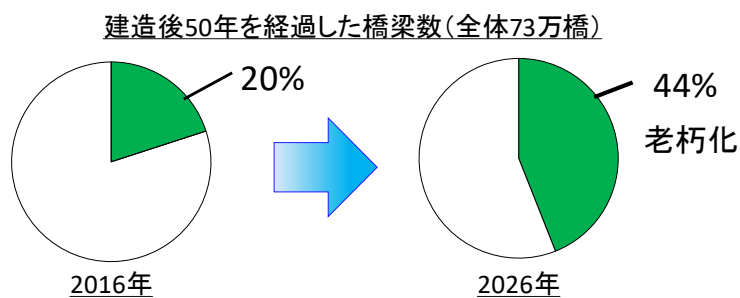


図1-1-1 耐用年数を迎える橋梁

補修規模・塗厚



図1-1-2 補修方法および補修規模

補修材料には、劣化因子の侵入を抑制するポリマーセメントモルタル（以下、PCM）を用いた断面修復が行われている【3】。また、近年では合成短繊維（ポリプロピレン、ポリビニルアルコール、ポリエチレン）を混入することで、引張性状を改善した繊維補強ポリマーセメントモルタルが広く使用されている。

寒冷地における主な劣化因子である凍害劣化はコンクリート中の水分が凍結融解作用により膨張収縮を繰り返すことによってコンクリート表面のひび割れや剥離が発生し、二酸化炭素や塩化物イオンなどの侵入により鉄筋腐食を引き起こす（写真 1-1-1）。そのため、寒冷地で使用する補修材には耐凍害性に優れている必要がある。また、2001年に『グリーン購入法』が施行され、生産者側には環境への負荷の低減に配慮した製品やサービスを優先的に使用することを推奨する『グリーン調達』が求められている。国や地方自治体には『特定調達品目（環境負荷低減に資する製品等）』として公共工事において高炉スラグ骨材、再生骨材、エコセメント、高炉セメント、フライアッシュセメントなどのCO₂排出量の削減に貢献する製品の積極的な調達・活用が求められている。

これらの背景をふまえ、本研究では新たに寒冷地での使用に対応し、細骨材に高炉スラグ骨材を全量使用し、混和材には高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いた『環境負荷低減型繊維補強ポリマーセメントモルタル（ECO-FRPCM）』の開発、性能評価を行った。



写真 1-1-1 コンクリートの劣化事例

1-2. 既往研究

近年、持続可能な社会の実現のために、「フロー型社会」から長く大切に使う「ストック型社会」への転換が求められている。中でもコンクリートは社会インフラを構成している橋や道路、住宅などに用いられる材料であり、経年により老朽化したコンクリートを適切に補修・補強し、使い続けることがストック型社会の実現に必要不可欠である。

コンクリート構造物の「補修」とは、劣化進行の抑制、耐久性の回復・向上、劣化要因の除去または低減を主に目的とした行為である。また、「補強」とはコンクリート構造物の低下した力学的性能の回復または向上を目的に行う方法であり、劣化程度や要求性能に見合った方法を選択する必要がある。図 1-2-1 に目標とする補修・補強の水準を示す【4】。コンクリート構造物は建設時の性能を永久的に維持し続けることが理想であるが、様々な要因でひび割れや損傷が発生するため図に示すような曲線のように時間経過とともに性能の低下が著しくなる。そこで、補修・補強によりコンクリートの性能を回復することで長く使い続けることが可能となる。そこで、劣化したコンクリートの回復程度が重要となるが、回復の程度によりコストが異なり、回復時期と程度の判断が重要となる。加えて、補修材料が建設時のコンクリートより性能が低いと再劣化までの期間が早まり、補修・補強を行う回数が増すため、既設コンクリートより耐久性の高い材料を用いることが一般的である。そこでポリマーセメントモルタル（Polymer Cement Mortar：PCM）や繊維補強ポリマーセメントモルタル（Fiber Reinforced Polymer Cement Mortar：FRPCM）などのセメント複合材料が用いられている。

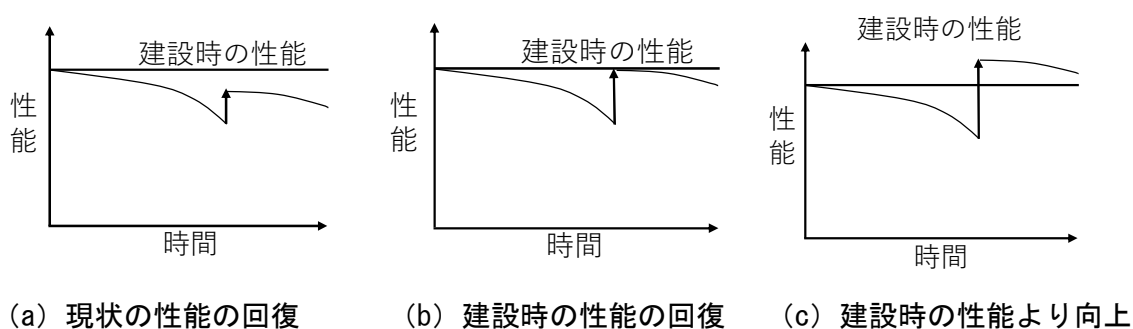


図 1-2-1 目標とする補修・補強の水準

PCM とは結合材に合成樹脂やゴム類等のセメント混和用ポリマーを用いたモルタルであり、モルタル中に分散したポリマーがセメントの水和反応の進行と共にセメント水和物と細骨材間の複雑に入り組んだ間隙を充填するように皮膜状のポリマーフィルムを形成し、ポリマー無混和のモルタルに比べ結晶組織が緻密化し、強度発現、防水性、耐久性等に優れ、外部因子の遮断効果を持つとともに、躯体との付着性も改善する断面補修に最適な材料である【5】【3】。

FRPCM は、PCM の劣化因子の遮断効果や付着性の改善効果に加え、合成繊維などの短繊維による引張性能やひび割れ幅低減効果などの長所を合わせた高性能な補修材料として現在研究・開発が行われており【6-8】、補修材として用いられる繊維にはスランブロスや施工性を阻害しない合成繊維を用いる場合が多い【9】。

1-2-1. 繊維補強セメント複合材料の分類

繊維補強とは、セメント系硬化体に作用する引張方向の力を長さ数ミリから十数ミリに切断した短繊維により負担し、引張性能を向上させ、脆性的な破壊挙動の改善を行う方法であり、繊維補強コンクリート (Fiber Reinforced Concrete : FRC) や繊維補強モルタル (Fiber Reinforced Mortar : FRM) などの繊維補強セメント複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite : FRCC) が現在活用されている。混入する繊維の材質は主に鋼、ガラス、炭素および有機系があり、錆びることなく化学抵抗性に優れ、比較的成本が低く左官施工時に影響や用途に応じて使い分けている。

FRCC の分類を図 1-2-2 に示す【10, 11】。繊維補強セメント複合材料は靱性によって大きく 3 つに分類される。最も靱性の高い材料として、一軸引張応力下において疑似ひずみ硬化挙動を示す、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC : High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite)。次に、曲げ引張応力下でたわみ硬化特性を示す、高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC : Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite)。最後に引張応力下でひずみ軟化挙動を示す FRCC である。

HPFRCC は複数ひび割れや微細ひび割れを発生させるマルチプルクラック特性を有し、指針 (案) では一軸引張試験による引張終局ひずみが 0.5%以上、かつ平均ひび割れ幅が 0.2mm 以下と定められている【10】。また、Victor C. Li により一方向の連続繊維による補強を前提とした架橋則モデル (図 1-2-3) により繊維の埋め込み長さおよび配向角に確率分布を与え、架橋中の各繊維の引張抗力を積分することで FRCC の架橋則を初めて解析的に表現した ECC (Engineered Cementitious Composite)【11】【12】は HPFRCC の中でも特に靱性が高く、最大引張ひずみが 8%にも達する高靱性材料である。さらに、より広範な繊維を取り扱えるように繊維-マトリクス界面の化学付着強度および繊維破断を考慮したモデル【13】や化学付着の剥離を破壊力学に取り扱った精密な架橋則も示されている【14】。

一般にセメント系硬化体は圧縮方向の力には強く引張方向の力には弱いといった特性があり、セメント系硬化体の引張強度を超えると図 1-2-4 に示すように急激に荷重低下を起こす脆性挙動を示す。しかし、セメント系硬化体に繊維を混入することで脆性挙動を改善し塑性挙動に移行させることが可能となる。特に、初期ひび割れ発生後に応力の増加とともにひずみが増加する挙動を『疑似ひずみ硬化挙動』といい、金属材料が降伏後に示す「ひずみ硬化挙動」とメカニズムが異なるため、金属材料のひずみ硬化挙動と区別して疑似ひずみ硬化としている。

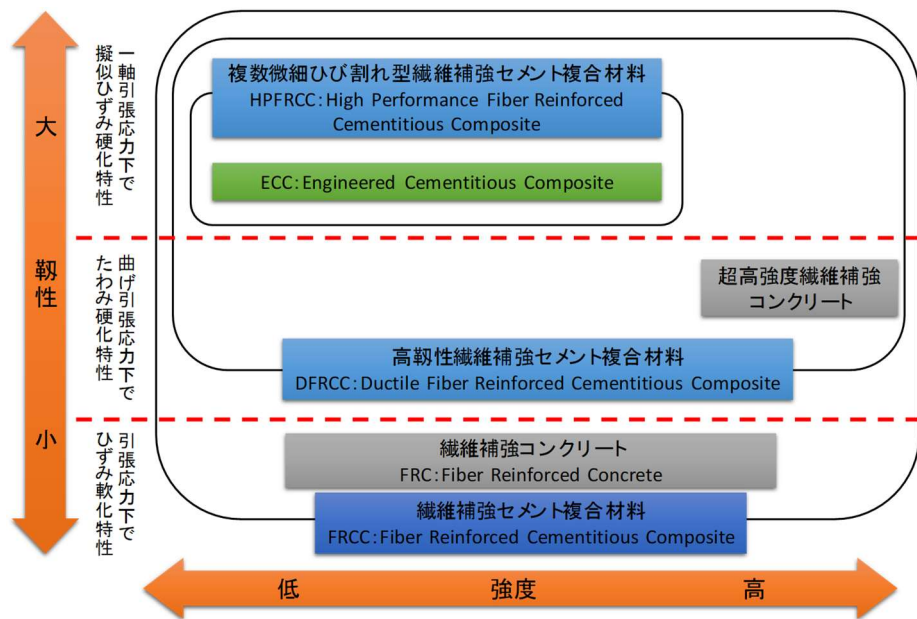


図 1-2-2 繊維補強セメント複合材料の分類

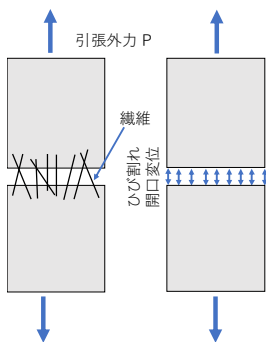


図 1-2-3 架橋則のモデル化

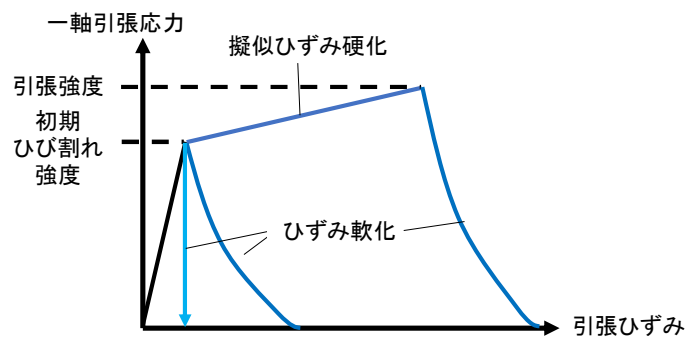


図 1-2-4 引張応力下におけるひずみ軟化およびひずみ硬化特性の概念

1-2-2. FRPCM のフレッシュ性状および硬化性状

1) フレッシュ性状

谷ヶ崎らの報告では、繊維混入率 (V_f) の増加に伴いフロー値は減少し、繊維種類によるフロー値の違いはほとんどないとされている【8】。また、白川らや、長谷川らの報告では、ポリマーを混入することでフロー値の減少傾向を示す報告もされているが、ポリマーの混入によりフロー値の増加を報告している論文もあり【15, 16】、ポリマーの組成や分子構造により傾向が異なり、フロー値に及ぼす影響は一概には決まらなると考えられる。そのため、ワーカビリティに影響のない範囲で添加量を調整する必要がある。

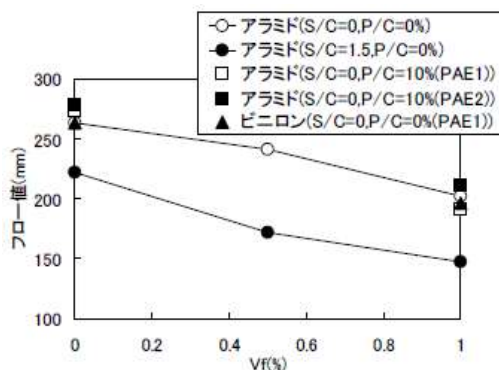
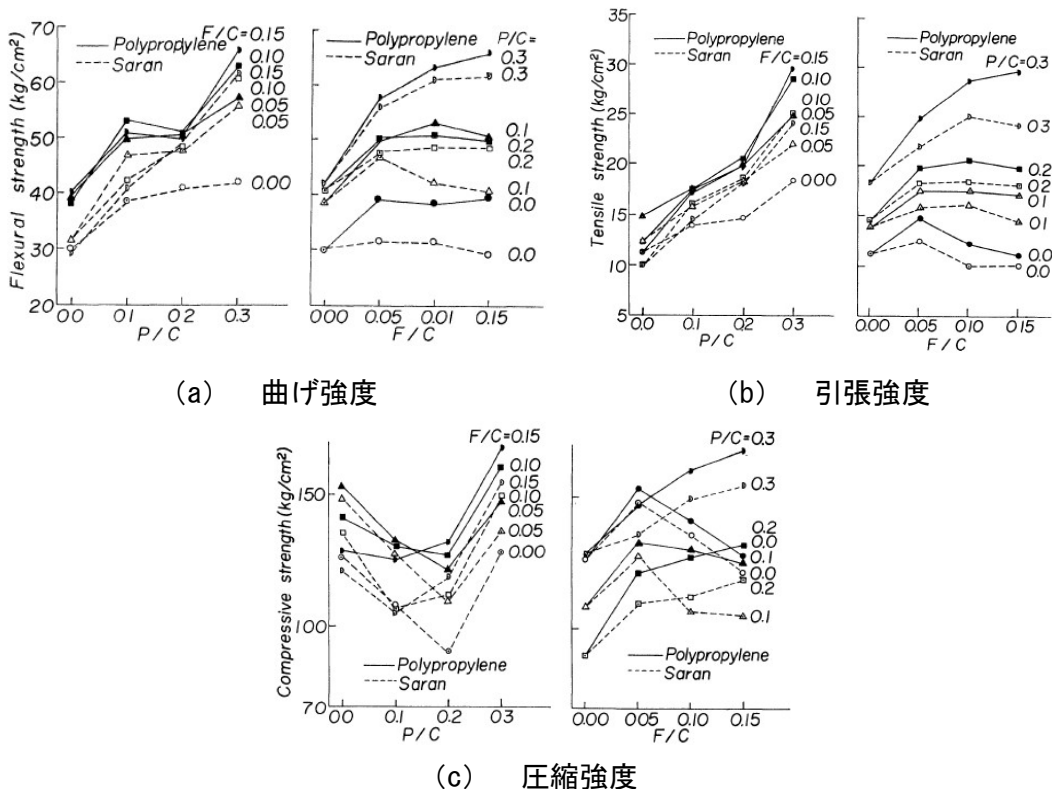


図 1-2-5 フローの変化



(a) 曲げ強度

(b) 引張強度

(c) 圧縮強度

図 1-2-6 FRM の各強度に及ぼす P/C および F/C の影響

空気量の影響ではポリマーおよび繊維を混入することで空気を巻き込み、空気量は増加する傾向にある【15】ことが報告されている。これらの報告に加え、繊維を混入したセメント複合材料を混練する場合、繊維添加量の増加や繊維長さを長くすることで、繊維同士が絡まる『ファイバーボール』を形成し、マトリックス内に繊維が均等に分散せず期待する靱性を発揮できないため、良好なワーカビリティと靱性を両立させる調配合を適せん確認しながら作製する必要がある。

2) 強度性状

久保田らや長谷川らの報告によれば P/C および F/C の各強度に及ぼす影響は、繊維の架橋効果により曲げ強度や引張強度は無混入のものより増加傾向を示す (図 1-2-6)【16】。しかし、ポリマーセメント比 (P/C) や繊維セメント比 (F/C) により各強度でピークが存在することが示唆されており、一概に傾向を示すことは難しく適切な調合を確認する必要がある。

圧縮強度の場合、繊維を混入することで無混入のモルタルより圧縮強度が同等もしくはわずかに低下する研究結果がしえされているが【17】、アラミド繊維やスチール繊維を混入した場合、圧縮強度が増加する傾向を示す結果も報告されている【18】。

表 1-2-1 長さ変化試験方法

試験規格	モルタルおよびコンクリートの長さ変化測定方法	ポリマーセメントモルタルの試験方法	構造物施工管理要領 左官工法
試験規格	JIS	JIS	NEXCO
測定項目	長さ変化率	長さ変化率	硬化収縮性
測定方法	JIS A 1129	JIS A 1129	JIS A 1129-3
供試体寸法	40×40×160mm	40×40×160mm 100×100×400mm	40×40×160mm
養生条件	1日脱型後 20±2℃材 齢 7日まで水中養生	脱型後 5日 20℃水中	2日脱型
環境条件	温度:20±2℃ 相対湿度:60±5%RH	温度:20±2℃ 相対湿度:60±10%RH	温度:23±2℃ 相 対 湿 度 :50 ± 5%RH
測定日	1, 4, 8 週ならびに 3, 6, 9, 12 ヶ月	脱型後 28 日まで	脱型後 28 日
供試体本数	3 本	3 本	3 本

3) 長さ変化率

乾燥収縮において鋼繊維の場合【19】，鋼繊維によってその変形が拘束されることから無混入のものと比較して乾燥収縮が小さいが，ナイロンやポリプロピレン繊維では繊維混入による乾燥収縮への影響は確認できない【20】。

高速道路株式会社の規格により【21】断面修復用に開発されたセメント系材料は一般的なモルタルやコンクリートの収縮試験の方法とは異なり，詳しくは4章に記載するため割愛するが，分野（建築や土木）の違いや補修工法（左官，吹付け，充填工法）による違いがあり，表1-2-1には，日本高速道路株式会社（NEXCO）が定めている構造物施工管理要領と日本工業規格（JIS）とでは同様の長さ変化率試験であっても養生条件や乾燥方法，期間が異なる．本実験ではNEXCOの構造物施工管理要領に記載されている左官工法，吹付け工法の方法に従って試験を行った．

4) 耐凍害性

林らの報告では，繊維を混入することにより凍結融解780回経過後においても繊維の架橋効果によって微細ひび割れの発生が抑制され，ポリプロピレン繊維では混入率0.35，0.5vol.%では85%程度を保持し，ECCでは相対動弾性係数100%のままであった（図1-2-7）．一方，質量減少率ではポリプロピレン繊維を混入した供試体で繊維混入率によらず約8%の質量減少が起こった．しかし，ECCでは質量減少率は無く，細く短い繊維を多量に使用したことが影響を及ぼした可能性を示唆している【22】（図1-2-8）．

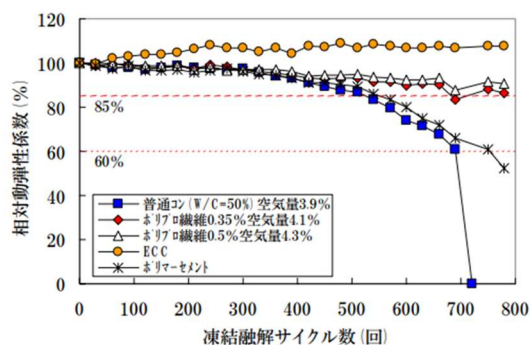


図 1-2-7 相対動弾性係数

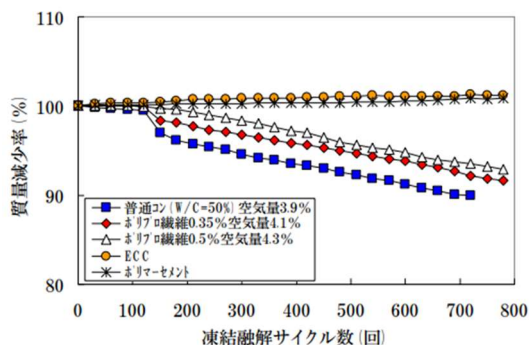


図 1-2-8 質量減少率

また，加藤らの報告によるとひずみを導入したダンベル型供試体の耐凍害性ではひずみを導入しない供試体では養生方法によらず優れた耐凍害性を示している．ひずみを導入した供試体では気中養生よりも水中養生を行った供試体では養生の影響よりも，ひび割れ幅が大きくなるほど劣化しやすいことを示した【23】。

よって，凍結融解が問題となる寒冷地では繊維混入が有効であり，繊維の架橋効果により表面ひび割れを抑制し耐凍害性，スケーリングに有利である．しかし，ポリプロピ

レン繊維では質量減少が大きいため使用には注意が必要である。

5) 靱性

繊維補強材料にはセメント系材料の脆性的な破壊挙動改善を期待されており、ひずみ硬化挙動やマルチプルクラック特性を有する高靱性材料も存在している。川又らの報告によると、4点曲げ試験における曲げ靱性においてポリプロピレン繊維では初期ひび割れ発生後急激に荷重が低下しモルタルにおいては強度が $10\text{N}/\text{mm}^2$ 程度である。ビニロン繊維では初期ひび割れ発生後も高い荷重を保持し靱性に優れた繊維であることが言える (図 1-2-9) 【24】。

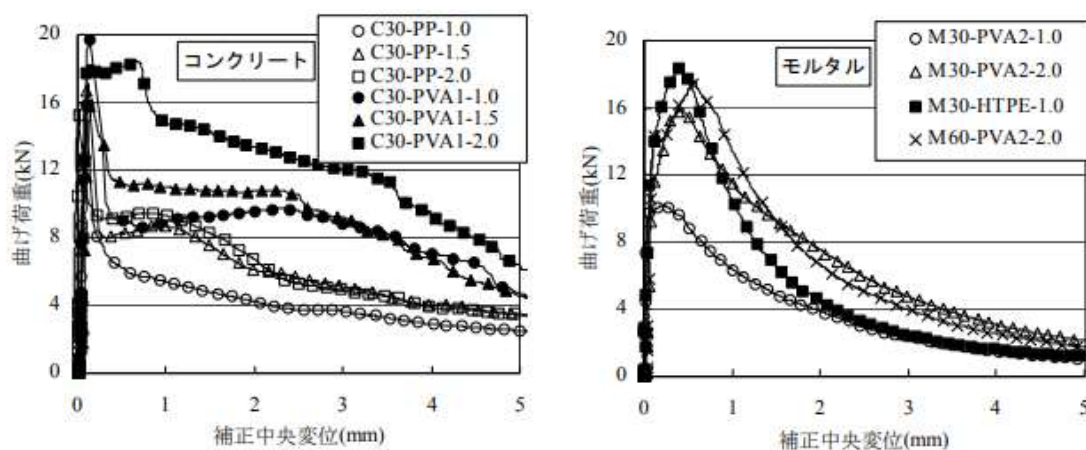


図 1-2-9 曲げ荷重-補正中央変位曲線

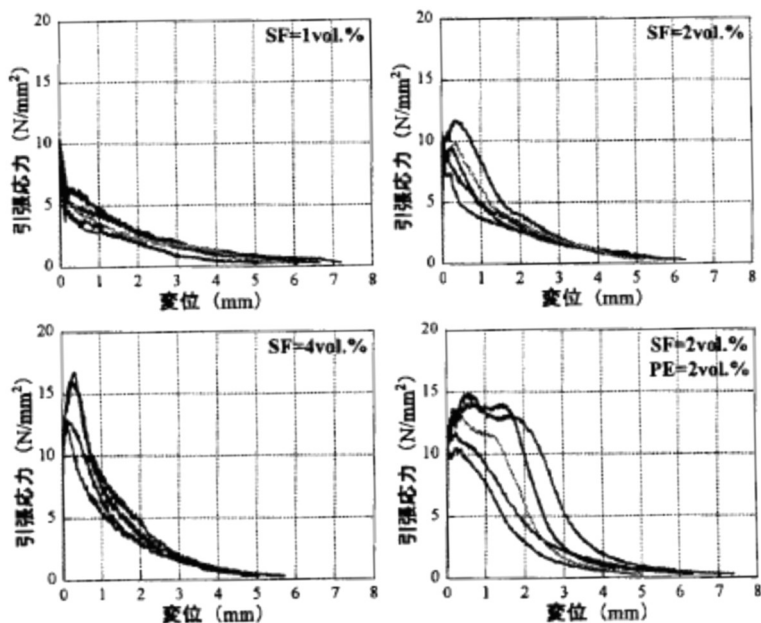


図 1-2-10 引張応力-変位関係

また、菊地らの報告によると鋼繊維 2vol.%のみ混入した場合比較して、ポリエチレン繊維を併用する場合と比較して引張強度は約 2.5N/mm² 増加し、引張靱性が約 1.7 倍となった【25】としている(図 1-2-10)。これは、ポリエチレン繊維の混入によって、鋼繊維周辺のもルタルマトリクスが靱性的になった結果、鋼繊維の引き抜け抵抗性が向上していることによると考察している【26】。よって、ポリエチレン繊維は繊維強度も高く靱性に有効であることが推察される。

湯地らの報告によると繊維を 1.0%以上混入することで顕著な靱性の向上が確認できる【7】。また、水越の報告によると図 1-2-11 に示すように、繊維量 2.0%混入するとマトリクス中の繊維の分散性が低下し、靱性が低下することが確認された【27】。これは、繊維の分散性が低下したことが原因と考えられ、靱性を確保するために混入できる繊維の最大量は 1.5%が適当であると考ええる。

早川らの実験では(図 1-2-12)、実験室で作製する方法と実施工における吹付け工法で供試体を作製し、引張終局ひずみを比較した結果、砂セメント比(S/C)を 1.8とした場合引張終局ひずみが小さくなったが、S/Cを 1.0とした供試体では同程度である【28】。これは、モルタルに用いる細骨材の量を少なくすることで吹付け施工後も靱性を担保できる可能性を示唆している。

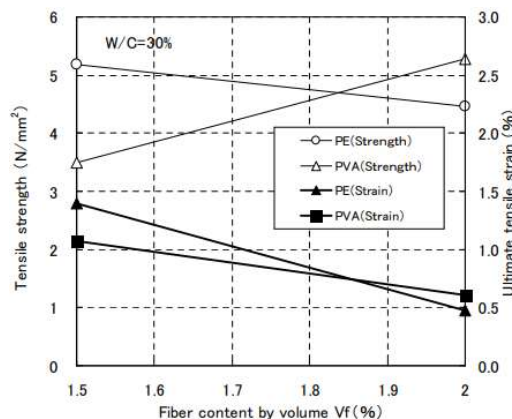


図 1-2-11 引張性能と繊維混入率の関係

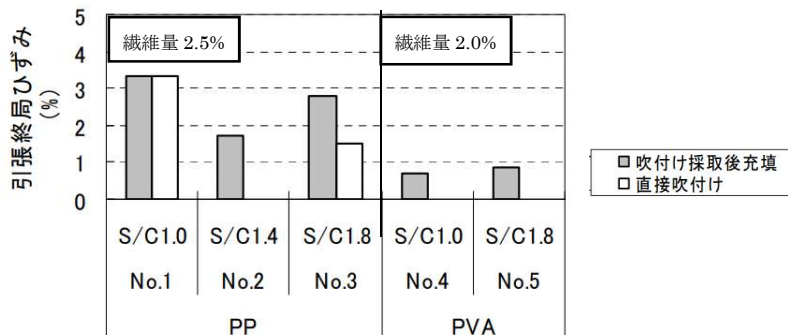


図 1-2-12 一軸直接引張試験結果

1-3. 本論文の構成

本研究では結合材と細骨材に産業副産物を用いた ECO-FRPCM の開発と性能評価を行った。ECO-FRPCM の開発には既往研究や既製品として販売されている補修材を基に土木構造物や建築構造物を補修対象とし、寒冷地での利用を目的に耐凍害性に優れ、国や地方自治体による環境負荷低減に資する製品等の特定調達品目を積極的に取り入れた ECO-FRPCM の基本調合を示した。

さらに、ECO-FRPCM の性能評価として中性化抵抗性、耐硫酸性、遮塩性の評価を行い、ECO-FRPCM の収縮性状に及ぼす膨張材、収縮低減剤および温湿度条件の影響を検討し、収縮に影響する要因を明らかにした。さらに、凍害劣化を受けた FRM と ECO-FRPCM の靱性の評価を行った。

以下に、本研究の概要について各省ごとに述べるとともに、図 1-3-1 に本研究の流れを模式的に示した。

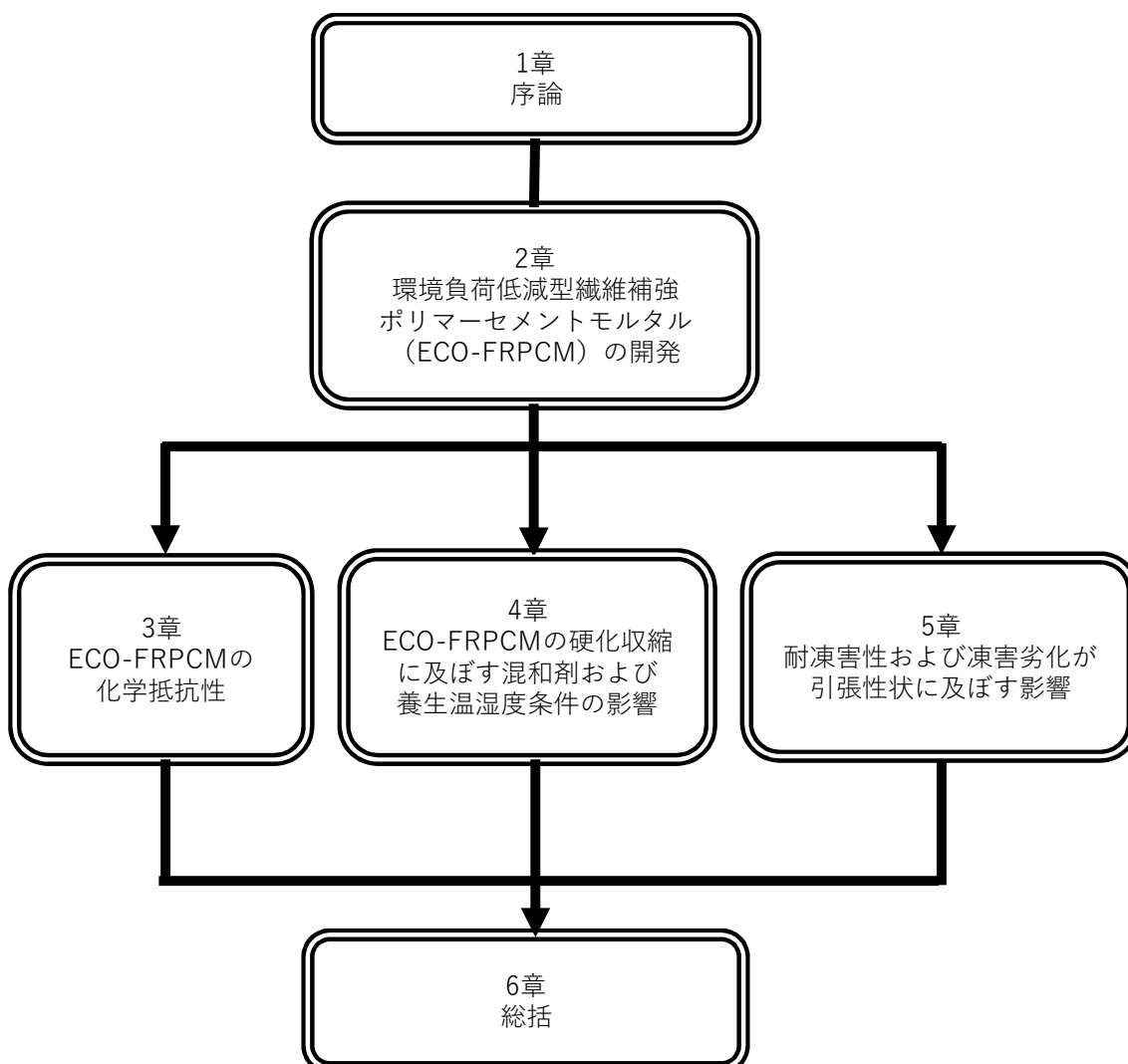


図 1-3-1 本論文の流れ

第1章では本研究の背景，既往文献，本論文の構成を述べている。

第2章では寒冷地での施工を想定した補修材の開発のために市販品 FRPCM の調合推定，チクソ性，曲げ強度，圧縮強度，硬化収縮率，耐凍害性，施工性，靱性に及ぼす混和材や繊維種類の影響の検討を行い，寒冷地での施行に適応した ECO-FRPCM の基本調合の提案を行った。

第3章では提案した ECO-FRPCM に用いられている高炉スラグ微粉末やフライアッシュに期待される化学抵抗性の評価として，中性化抵抗性，耐硫酸性，遮塩性を同一水結合材比の普通モルタルと比較評価している。

第4章では，ECO-FRPCM の収縮性状に及ぼす膨張材，収縮低減剤および温湿度条件の影響を検討し，収縮に影響する要因を検討するとともに，膨張材による収縮補償を考慮した硬化収縮率の評価について試みている。

第5章では，凍害劣化が繊維補強モルタル (FRM) と繊維量 1.5% の ECO-FRPCM の引張性状に及ぼす影響を比較検討した。FRM では軽微な凍害劣化でも引張性状に影響を及ぼすことを確認した。しかし，ECO-FRPCM では相対動弾性係数が 80% を下回ると期待されている疑似ひずみ硬化特性が失われ，ひずみ軟化挙動を示すことを把握し，繊維付着強度と複合亀裂先端靱性の関係から引張破壊挙動を推定する方法について提案を試みた。

6章では1章から5章までで得られた知見をまとめて，本論文の総括とした

【参考文献】

- 【1】 農林水産省：農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補強編】（案），2013.10
- 【2】 国土交通省：道路の老朽化対策 老朽化対策の取組み
- 【3】 大濱嘉彦ら：硬化剤無混和エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおけるエポキシ樹脂とセメント水和物の相互作用，日本建築学会東北支部研究報告集，No.62，pp.383-386，1999.6
- 【4】 セメント協会：すぐに役立つセメント系補修・補強材料の基礎知識，2011
- 【5】 大濱嘉彦，出村克宣：ポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリート，シーエムシー出版，2002
- 【6】 角野 嘉則，生森 勝久，村上 聖：高靱性ポリマーセメントモルタル積層補強と炭素繊維シートおよびプレート接着工法による RC 梁の曲げ補強効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1555-1560，2008
- 【7】 湯地輝，山口明伸，武若耕司：吹付け用繊維補強ポリマーセメントモルタルの補強効果に関する基礎的研究，第 64 回年次学術講演会概要集，土木学会，pp.639-640，2009.9
- 【8】 谷ヶ崎 世司，三浦 智之，大下 英吉，出井 丈也：短繊維混入形ポリマーセメントモルタルの性能評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.319-324，2009
- 【9】 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），2007
- 【10】 池田淳，笹倉博行，三輪充，大沢孝史：各種繊維を用いた補強モルタル吹付け厚さに関する基礎実験，土木学会第 65 回年次学術講演会，pp.1039-040，2010
- 【11】 日本コンクリート工学会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会，2004
- 【12】 Victor C.Li, YoujiangWang, StanleyBacker : A micromechanical model of tension-softening and bridging toughening of short random fiber reinforced brittle matrix composites, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Vol. 39, No.5, pp.607-625, 1991
- 【13】 Kanda. T., and Li, V. C. : Effect of Apparent Strength and Fiber - Matrix Interface Properties on Crack Bridging in Cementitious Composites, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 125, No. 3, pp. 1-10, 1999
- 【14】 Lin, Z. Kanda, T, Li, Victor C. : On Interface Property Characterization and Performance of Fiber Reinforced Cementitious Composites, J. Concrete Science and Engineering, RILEM, Vol.1, pp.173-184, 1999.
- 【15】 白川敏夫，花井伸明：ポリマーセメントモルタルの気体拡散性状へのポリマー量

-
- およびセメントの水和の影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.67，No.1，pp.231-236，2013
- 【16】長谷川聖史，伊達重之，笠井哲郎：PVA 繊維を添加した超軽量モルタルの特性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.29，pp.423-428，2007
- 【17】久保田浩典，坂根邦良：ポリマーエマルジョンと合成繊維の混和によるセメントモルタルの性質改善に関する研究，材料 16 (167)，pp.676-685，1967
- 【18】中村裕，三橋博三：短繊維補強モルタルの曲げ挙動と圧縮挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.253-258，2011
- 【19】小林一輔，魚本健人，峰松敏和：鋼繊維補強コンクリートの乾燥収縮に関する研究 (2) 拘束条件下における収縮性状，生産研究 31 (12)，pp.767-770，1979
- 【20】勇元淳一，黒野薫，清原千鶴，佐藤喜昭，大谷俊浩，上田賢司：ナイロン繊維混入コンクリートの諸特性に関する研究，日本建築学会研究報告九州支部.1，構造系，pp.33-36，2005
- 【21】東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，(株)高速道路総合技術研究所，2013
- 【22】林大輔，芦澤良一，横関康祐，坂田昇有：機繊維補強セメント複合材料の耐久性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1585-1590，2005
- 【23】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
- 【24】川又篤，高橋貴蔵，掘越哲郎，松岡茂：繊維種及び混入量が繊維補強セメント系複合材料の靱性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.95-300，2005
- 【25】菊地俊文，橋田浩：超高強度繊維補強モルタルの高靱性かに関する基礎的検討，日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸)，pp.813-814，2010.9
- 【26】河野悠一，三橋博三：繊維補強セメント系材料の靱性向上機構に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.59，pp.404-410，2005
- 【27】水越睦視：ポリエチレン繊維補強モルタルの基礎的性状と引張部位への適用に関する研究，香川高等専門学校研究紀要，pp.69-75，2010
- 【28】早川健司，平田隆祥，紀陸和昭，大屋戸理明：有機短繊維を使用した湿式吹付け高靱性ポリマーセメントモルタルの基礎性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.379-384，2009

第2章 環境負荷低減型繊維補強ポリマーセメントモルタル（ECO-FRPCM）の開発

2-1. はじめに

近年、ストック型社会への転換を実現するために構造物を維持補修し、長期的に使用する事が重要な課題である。そこで断面欠損部分や劣化部分に対して行う補修工法が重要であり、中でも代表的な工法としてポリマーセメントモルタル（以下、PCM）を用いた湿式吹付け工法による断面修復が挙げられる【1】。PCMとは結合材に合成樹脂やゴム類等のセメント混和用ポリマーを用いたモルタルであり、モルタル中に分散したポリマーはセメントの水和反応の進行と共にセメント水和物と細骨材間の複雑に入り組んだ間隙を充填するように皮膜状のポリマーフィルムを形成し、ポリマー無混和のモルタルに比べ結晶組織が緻密化する。ポリマーフィルムの形成によって、強度発現、防水性、耐久性等に優れ【2】、外部因子の遮断効果を持つとともに、躯体と補修材料との付着も良好な断面補修の用途に最適な材料と言われている。また、ポリエチレン繊維やビニロン繊維を混入することで、ひび割れ発生後でもみかけのひずみの増加に伴って応力が増加する「ひずみ硬化特性、および無数の微細ひび割れが分散する「マルチプルクラック特性」を有する繊維補強ポリマーセメントモルタル（FRPCM）が従来のPCMに代わる高性能な補修材料として研究・開発されている。

近年大規模な建築・土木構造物の補修分野でこのFRPCMが注目され【3】、粉末状ポリマーを用いた既調合製品が各社より製品化されており、品質の安定、現場での労働負荷・産業廃棄物の排出量の低減が可能となった。一方で、構成材料が未公開の場合が多いため、製品の安全性を確認する必要があることや、製品の流通価格が原材料価格に対して比較的高価であることが指摘されており、積極的な利用促進のために、性能の安定性や経済性の問題を解決する必要があるため、より安価で高性能な製品の研究・開発が求められている。

そこで、本研究では、FRPCMの混和材料の違いがFRPCMに与える影響および繊維種類、繊維組み合わせ、砂結合材比が靱性に及ぼす影響について検討した。

2-2. ECO-FRPCMの開発コンセプト

ECO-FRPCMの開発にあたり、従来では耐久性指数60以上であれば耐凍害性に優れているとされているが、寒冷地耐用の補修材開発において凍結融解作用を受けてもほとんど劣化を許容しないことを目的に耐久性指数90以上とした。また、補修材には躯体のコンクリートに施工した後に、いかなる場合でも収縮ひび割れを発生させてはならないため、収縮率を0.05% (500×10^{-6}) 以下であることと定めた。NEXCOでは補修材の力学性能として圧縮強度の基準値を「補修設計で定めた設計基準強度以上であること」と定めているため、圧縮強度は35N/mm²以上とした。ここで、開発する補修材の対象とするコンクリート強度は、設計基準強度（圧縮強度30N/mm²以下）のコンクリートとし、高強度コンクリートは対象外とする。

補修対象は土木構造物では橋梁、ダム、ボックスカルバート、トンネル覆道部、擁壁、用排水路、護岸、防波堤など、建築ではコンクリート構造物全般を対象とし、引張応力が作用する構造物も対象とするため、変形に対する能力として「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）」【4】を参考に、引張終局ひずみ0.5%以上の靱性を有した補修材の開発を目指した。また、上記の性能を有し、かつ持続可能な社会を築いていくために、使用材料にも「グリーン法、の特定調達品目に指定されている高炉スラグ細骨材を補修材の細骨材に全量使用し、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュをセメントに置換して材料設計を行い、ひび割れ幅低減を目的に繊維量を0.5%混入した汎用型、ならびに脆性挙動の改善、引張応力の作用する構造物の補修を対象に繊維量1.5%混入した靱性型の開発を行った。

2-3. ECO-FRPCM の構成材料の影響

2-3-1. 実験計画

初めに、既存の補修材に用いられている材料を把握するために、市販されている補修材料を洗い分析にかけ使用材料の構成を推定した。次に、推定した割合から水セメント比（以下、W/C）を0.35およびセメント砂比（以下、S/C）を0.82とし、ポリマーの種類およびポリマーセメント比（以下、P/C）を水準に表2-3-1に示す組み合わせを用いて、混和用ポリマーの種類がフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響を検討した。フレッシュ性状および硬化性状の評価基準は表2-3-2に示している。最後に混和材の影響では、表2-3-3に示す膨張材（以下、EX）、収縮低減剤（以下、SR）の混入量およびその併用効果、フライアッシュ（以下、FA）の影響、石灰石微粉末（以下、LS）の混入方法による影響、高炉スラグ微粉末（以下、BFS）の混入量とW/Cの影響をフレッシュ性状、曲げ強度、圧縮強度、収縮率を用いて検討を行った。

表 2-3-1 混和用ポリマー種類がフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響

W/C	S/C	ポリマー	P/C	減水剤	消泡剤
0.35	0.82	P1	0.05	0.10%	0.02%
		P2	0.09		
		P3	0.15		

表 2-3-2 評価基準

評価	フレッシュ性状試験				硬化性状試験		
	Air (%)	Flow (mm)	Slump (mm)	チクソ性	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	収縮率 (%)
◎	6.5 以上	200 以上	60 未満	フロー/スランプ=2 以上○	16 以上	40 以上	0.1 以下
○	5.0~6.5	150~200	60~90		12~16	35~40	0.1~0.15
△	2.5~5.0	100~150	90~120	フロー/スランプ=2 より下×	8~12	30~35	0.15~0.20
×	2.5 未満	100 未満	120 以上		8 未満	30 未満	0.2 以上

表 2-3-3 フレッシュ性状および硬化収縮に及ぼす混和材の検討

No.	W/C	C/S	P/C	消泡剤	EX	SR	FA	LS	BFS
				(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
N	0.35	0.82	0.05	0.02	-	-	-	-	-
EX1					2	-	-	-	-
EX2					7	-	-	-	-
SR1					-	1	-	-	-
SR2					-	2	-	-	-
FA1					-	-	10	-	-
FA2					-	-	20	-	-
ES					7	2	-	-	-
FES1					7	2	10	-	-
FES2					7	2	20	-	-
LSI1					-	-	-	5	-
LSI2					-	-	-	10	-
LSO1					-	-	-	5	-
LSO2					-	-	-	10	-
BS351					-	-	-	-	25
BS352					-	-	-	-	45
BS301					0.30				-
BS302	-	-	-	-					45

*膨張材（EX），フライアッシュ（FA），高炉スラグ微粉末（BFS）はセメント内割混入

*LSI：石灰石微粉末を内割混入，LSO：石灰石微粉末を外割混入

2-3-2. 使用材料

表 2-3-4 に使用材料を、表 2-3-5 にポリマーの物性値を示す。開発する ECO-FRPCM はプレミクス製品を目指しているため、すべての混和剤は粉末系とした。ポリマーは一般的に販売されている種類の中からエチレン・酢酸ビニル共重合系（以下、P1）、アクリル・酢酸ビニル・ベオバ系（以下、P2）、アクリル酸エステル・メタアクリル酸エステル系（以下、P3）の3種類を採用した。セメントは普通ポルトランドセメント（以下、OPC）とし、細骨材には珪砂（以下、S）を用いた。

表 2-3-4 使用材料

使用材料	記号	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm ³ ）
細骨材	S	7号珪砂（表乾密度 2.62g/cm ³ ）
ポリマー	P1	エチレン・酢酸ビニル共重合系
	P2	アクリル・酢酸ビニル・ベオバ系
	P3	アクリル酸エステル・メタアクリル酸エステル系
膨張材	EX	CSH 系膨張材
収縮低減剤	SR	ポリオキシアレン系収縮低減剤
フライアッシュ	FA	JIS II 種 密度 2.33g/cm ³
石灰石微粉末	LS	-
高炉スラグ微粉末	BFS	比表面積 4000cm ² /g 密度 2.89g/cm ³

表 2-3-5 混和用ポリマー種類と特性

No.	主成分	揮発分 (%)	見掛け密度 (mg/l)	粒子径 (%)	最低造膜温度 (°C)	ガラス転移温度 (°C)
P1	酢ビ/エチレン共重合樹脂	2.0 以下	0.50±0.10	2 以下	0	10
P2	酢ビ/ベオバ/アクリル共重合樹脂	2.0 以下	0.53±0.10	2 以下	0	14
P3	アクリル酸エステル/メタアクリル酸エステル共重合樹脂	2.0 以下	0.50±0.10	2 以下	0	8(計算値)

*粒子径 (%) : 300μm ふるい上残分

2-3-3. 実験方法

1) フレッシュ性状試

フローは JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」 に準じて行った。フロー試験はフローテーブル、フローコーンおよび突き棒を使い、フローコーンに 1/2 ずつ 2 層に分けて試料を詰め、各層は 15 回均等に突き、モルタルに落下運動を与えてモルタルが広がった後の直径をフロー値として測定を行った。目盛りは 1mm まで測定した。空気量は JIS A 1128 「フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法「空気室圧力方法」」 に準じて行った。容器のほぼ 1/3 ずつ 3 層に分けて試料を詰め、各層は突き棒で 25 回均等に突き、容器の外側を 15 回木槌でたたいた。スランプは JIS A 1171 「ポリマーセメントモルタルの試験方法」 に準拠した。スランプ試験はスランプコーンに 2 層に分けて詰め、各層 15 回一様に突き、2~3 秒をかけ引き揚げた。

2) 曲げ強度および圧縮強度試験

曲げ強度および圧縮強度試験は所定の材齢まで 20℃水中で標準養生を行い、試験を行った。なお、供試体寸法は 40×40×160mm とした。

3) 硬化収縮試験

硬化収縮試験はゲージプラグを用い供試体寸法 40×40×160mm を用い、収縮率は JIS 1129-3 ダイヤルゲージ法に準拠し、供試体は 2 日間封緘養生を行い脱型後 28 日後の収縮率を測定した。

2-3-4. 試験結果および考察

1) 既製品の材料推定

補修材の材料構成を把握するため、市販されている2種類の製品（AおよびB）を洗い試験を行い使用材料の推定を行った表2-3-6に推定した材料を示す。今後は、推定結果を参考にポリマーや各種混和材の影響を検討する試験を行うこととした。

表 2-3-6 既製品の材料推定

推定項目	A	B
セメント種	OPC	OPC
混和材料	石灰石微粉末（9%） 膨張剤 フライアッシュ（10%）など	膨張剤 フライアッシュ（26%） など
細骨材	珪砂	砕砂
砂セメント比	0.82	-
ポリマーセメント比	4.0%	3.3%

2) 混和用ポリマー種類がフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響

表2-3-6に示した材料推定の結果を用いてW/Cを35%、C/Sを0.82とした。表2-3-7に混和用ポリマー種類がフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響のフレッシュ性状を、図2-3-1から図2-3-4にポリマー種類がチクソ性、曲げ強度、圧縮強度ならびに硬化収縮率に及ぼす影響を示す。フレッシュ性状では、成り行きとし、チクソ性はフローをスランプで除した値とした。材料の施工性を判断するチクソ性では、ポリマーの種類によらず同程度であるが、P2-35-5が最も高い値となった。曲げ、圧縮強度ではP3>P2>P1の順となった。収縮率では、P3ならびにP2が同程度であり、P1が最も収縮低減効果が見られたが、28日の収縮率で0.15%以上となった。評価した結果を表2-3-8に示す。最も安定した性状を示したポリマーはP2のアクリル・酢酸ビニル・ベオバ系であった。

表 2-3-7 混和用ポリマー種類によるフレッシュ性状

No.	Air (%)	Flow (mm)	Slump (mm)	チクソ性
P1-35-5	4.6	252	136	1.9
P2-35-5	4.0	172	80	2.2
P3-35-5	2.8	187	99	1.9

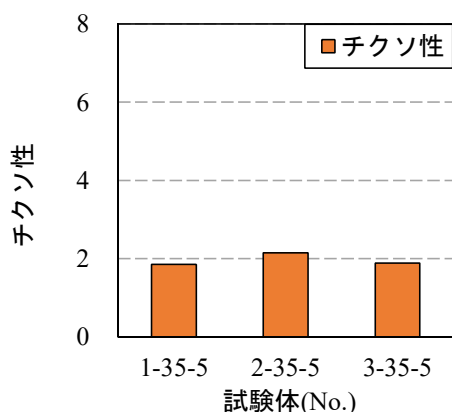


図 2-3-1 ポリマー種類がチクソ性に及ぼす影響

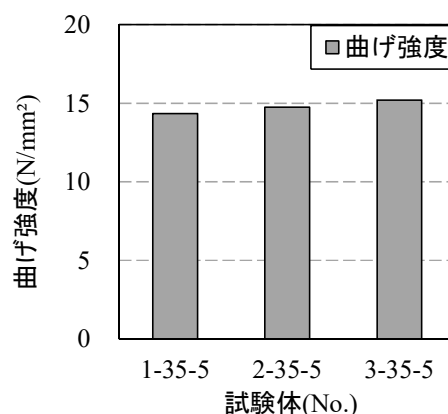


図 2-3-2 ポリマー種類が曲げ強度に及ぼす影響

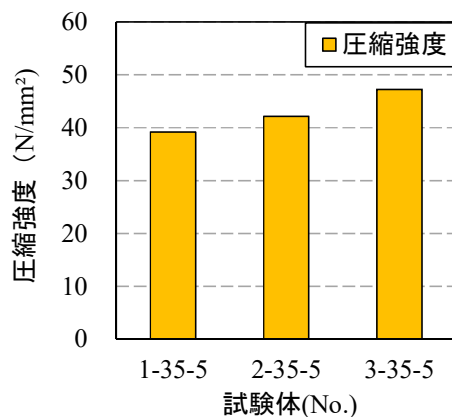


図 2-3-3 ポリマー種類が圧縮強度に及ぼす影響

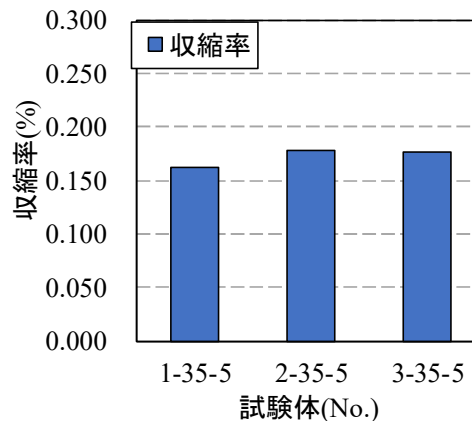


図 2-3-4 ポリマー種類が硬化収縮率に及ぼす影響

表 2-3-8 水セメント比 35%, ポリマー量 5%でのポリマー種類による評価結果

ポリマー種類	フレッシュ性状試験				硬化性状試験		
	Air	Flow	Slump	チクソ性	曲げ強度	圧縮強度	収縮量
P1-35-5	△	◎	×	×	○	○	△
P2-35-5	△	○	○	○	○	◎	△
P3-35-5	△	○	△	×	○	◎	△

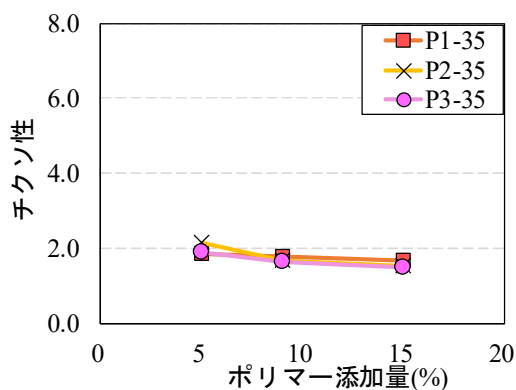


図 2-3-5 ポリマー量がチクソン性に及ぼす影響

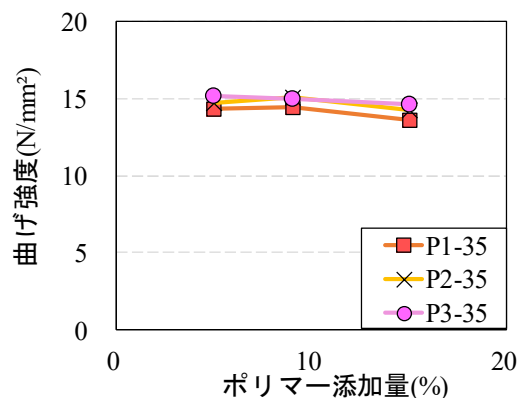


図 2-3-6 ポリマー量が曲げ強度に及ぼす影響

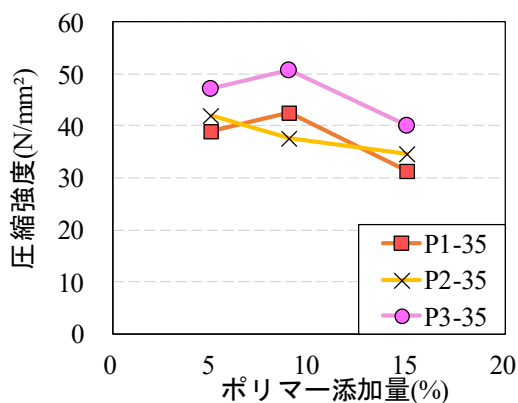


図 2-3-7 ポリマー量が圧縮強度に及ぼす影響

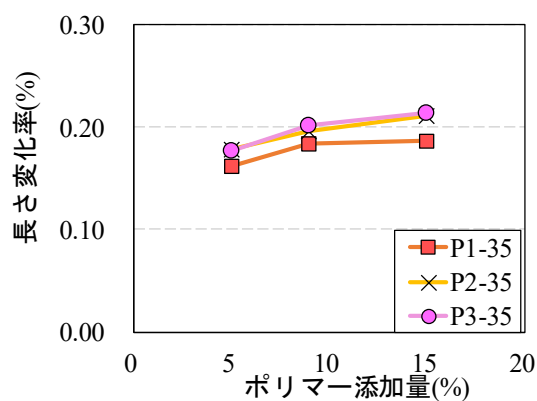


図 2-3-8 ポリマー量が硬化収縮率に及ぼす影響

図 2-3-5 から図 2-3-8 にチクソン性，曲げ強度，圧縮強度，収縮率の結果を示す．ポリマーを混入することで曲げ強度は増加し，収縮は低減することが知られているが【5】，すべての結果においてポリマー量を増やすことで性能が低下することが明らかとなった．よって，ポリマーの混入率は5%程度が有効であると考えられる．

3) 混和材の検討

表 2-3-9 にフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす混和材の検討で作成した供試体のフレッシュ性状および曲げ強度（28 日）の結果を示す．空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ 以内となり，フローではすべての供試体において $155 \pm 20\text{mm}$ の範囲となった．

図 2-3-9，図 2-3-10，図 2-3-11 に各種混和材料が基礎性状に与える影響を示す．また，各種混和材料の評価結果を表 2-3-10 に示す．

a) 膨張材および硬化収縮低減剤の影響

膨張材・硬化収縮低減剤は，どちらの混和材料についても混入率が高くなるに従い，

フロー値および圧縮強度の若干の低下が確認できるが、混入による流動性および強度性状への悪影響は小さい。また、膨張材と硬化収縮低減剤を併用することで高い収縮低減効果を発揮する。

b) フライアッシュの影響

フライアッシュをセメント内割置換で混入した場合、ボールベアリング効果により混入率の増加に従ってフロー値の増加がみられたことから流動性の改善に有効であるといえる。フライアッシュをセメント置換で混入した場合、単位セメント量が減少することで収縮率が減少することが知られている【6】。しかし、今回の結果では、フライアッシュ単体で混入した場合には収縮率が増加する傾向を示した。また、圧縮強度の低下が見られ、強度性状および収縮特性を悪化させることが確認された。圧縮強度の低下については、セメント内割置換によるセメント量の減少が原因だと考えられる。

c) 石灰石微粉末の影響

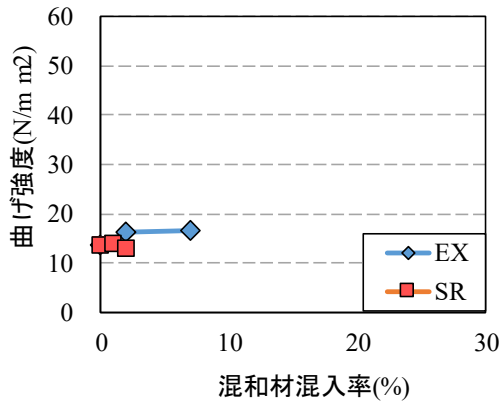
石灰石微粉末をセメント内割置換で混入した場合は、混入率の増加に伴いフロー値の増加が見られ、追加で用いた場合は混入率5%（LSO1）において大幅なフロー値の増加がみられることから、流動性の改善に有効であることが確認された。また、強度性状については未混入のものと同様、硬化収縮についてはセメント内割置換では悪化、セメント内割置換せずに追加した場合は未混入のものと同様であることが確認された。

d) 高炉スラグ微粉末の影響

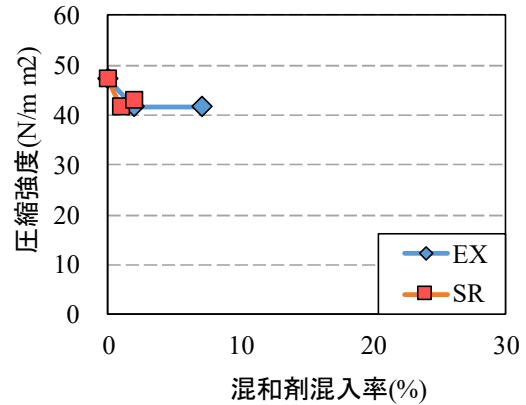
高炉スラグ微粉末をセメント内割置換で混入した場合、低水セメント比においても混入率の増加に従ってフロー値、圧縮強度の増加がみられた。また、既往研究【7】と同様に、収縮率の増加が確認された。したがって、流動性の改善および強度発現に優れるが、収縮特性においては悪影響があるといえる。

表 2-3-9 フレッシュ性状および曲げ圧縮強度（28日）

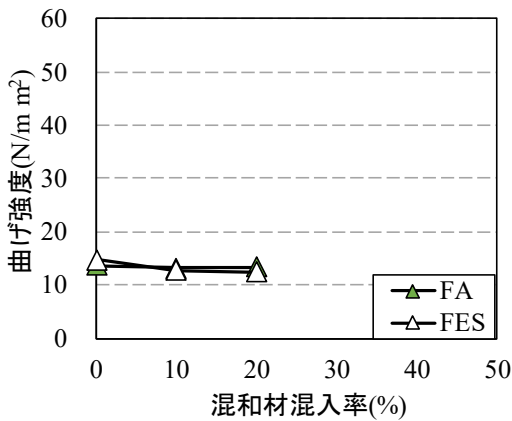
No.	Air (%)	フロー (mm)	温度 (°C)	曲げ強度 (N/mm ²)	No.	Air (%)	フロー (mm)	温度 (°C)	曲げ強度 (N/mm ²)
N	4.3	155	27.5	13.7	LSI1	5.8	164	28.5	14.6
EX1	4.5	159	27.5	16.4	LSI2	4.6	165	27.8	14.2
EX2	4.1	149	28.5	16.7	LSO1	4.7	194	25.0	15.0
SR1	3.6	144	29.0	14.0	LSO2	4.5	151	24.0	14.6
SR2	4.2	151	28.5	13.1	BS351	4.2	178	22.0	13.8
FA1	4.6	163	27.0	13.2	BS352	4.1	184	21.0	13.9
FA2	4.5	167	27.0	13.4	BS301	4.9	137	23.0	16.1
ES	5.2	144	26.0	14.8	BS302	5.3	147	22.5	14.9
FES1	3.4	173	22.5	12.7					
FES2	3.6	167	22.0	12.4					



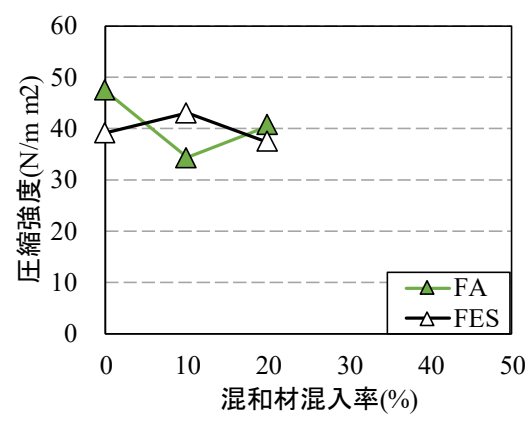
(a) 膨張剤および収縮低減剤



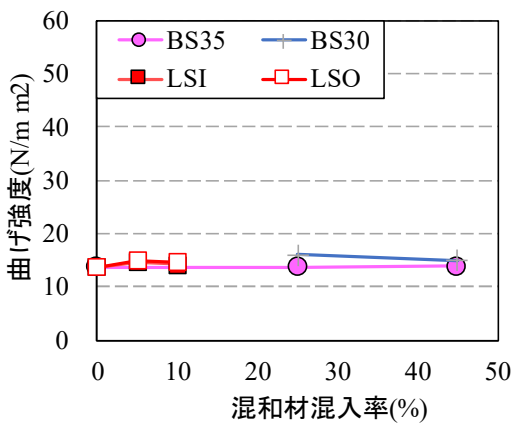
(a) 膨張剤および収縮低減剤



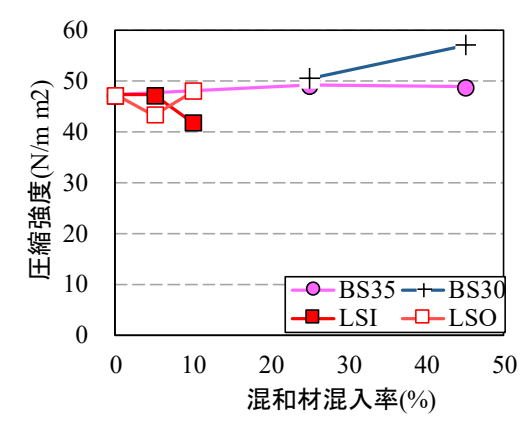
(b) 膨張材, 収縮低減剤の併用効果



(b) 膨張材, 収縮低減剤の併用効果



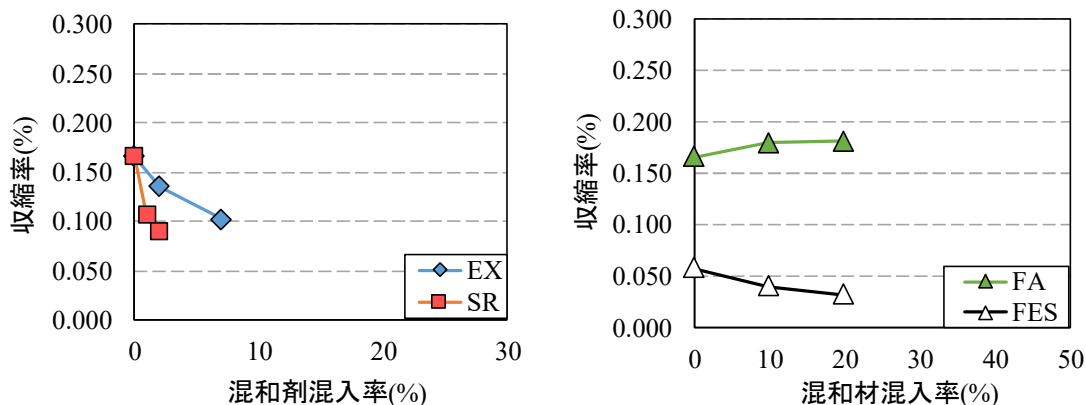
(c) 石灰石の混入方法, 高炉スラグ微粉末の混入率および水比



(c) 石灰石の混入方法, 高炉スラグ微粉末の混入率および水比

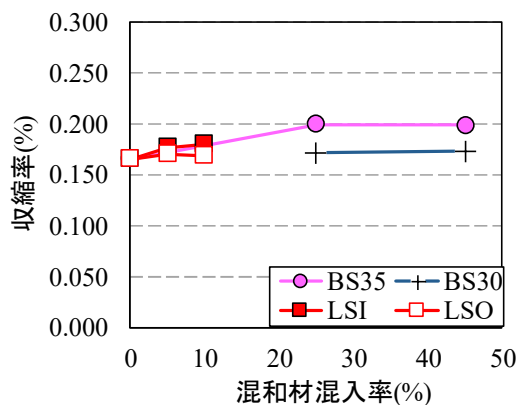
図 2-3-9 曲げ強度に及ぼす各種混和材の影響

図 2-3-10 圧縮強度に及ぼす各種混和材の影響



(a) 膨張剤および収縮低減剤

(b) 膨張材, 収縮低減剤の併用効果



(c) 石灰石の混入方法, 高炉スラグ微粉末の混入率および水比

図 2-3-11 収縮率に及ぼす各種混和材の影響

表 2-3-10 各混和材の基礎性状に及ぼす影響評価

	フレッシュ性状		硬化性状		
	Air	Flow	曲げ強度	圧縮強度	収縮率
膨張剤	△	△	◎	△	○
収縮低減剤	△	△	△	△	○
膨張剤+収縮低減剤	△	△	△	△	◎
フライアッシュ	△	○	△	×	×
石灰石微粉末	△	○	△	△	×
高炉スラグ微粉末	△	○	△	○	×

◎ : 非常に良好 ○ : 良好 △ : 影響なし × : 悪影響あり

2-4. ECO-FRPCM の基礎性状および靱性の検討

2-4-1. 実験計画

実際の使用状況に即した評価を行うため、表 2-4-1 に示す調合を用いてポンプ圧送後のモルタルを型枠に詰め供試体を作製し行った。試験項目はフレッシュ性状、曲げ強度、圧縮強度、凍結融解試験およびリニアトラバース法による気泡間隔係数の測定、硬化収縮試験、H,J,K では施工性の評価として垂直な壁面に対して実際に吹付け施工試験を行い、母材コンクリートとの付着について評価した。

靱性の検討では、ECO-FRPCM の靱性に及ぼす繊維種類および砂結合材比の影響の実験計画を表 2-4-2 に示す。全ての供試体の水結合材比（W/B）は 36%とした。初めに繊維種類が靱性に及ぼす影響では、砂結合材比（S/B）を質量比率で 75%とし、4 種類の繊維（ポリエチレン（PE）繊維、ビニロン（PVA）繊維、2 種類のポリプロピレン（PP）繊維（PPA,PPB））を用い、繊維を単独で混入した供試体（No.1~5）、2 種類の繊維を体積混入比 25:75、50:50、75:25 の 3 水準で組み合わせた供試体（No.6~23）において、フレッシュ性状を成り行きとし、圧縮強度、引張強度、曲げ靱性係数および引張終局ひずみを測定した。次に、調合条件が靱性に及ぼす影響を No.24~31 の繊維組み合わせにおい

表 2-4-1 基礎性状、耐凍害性、施工性の検討

No.	W/B (%)	内割り (粉体:B,%)					火山灰	石灰石	S (%)	P (%)	SR (%)	増粘剤	繊維														
		C	FA	EX	BFS	SF							PVA 8mm	PVA 12mm	PP 12mm												
																V/B	SL/B	S/B	P/B	SR/B	T/B	Vol.%					
A	37	O P C	10	8	-	-	9%	82.3	4	5	-	1.2	0.3	-													
B	35																										
C																											
D																											
E	15														8	15	-	0.5%	15%	80	4	5	0.06%	-	0.3		
F	-																										
G	15																										
H	33														15	-	-	0.5%	15%	80	4	5	0.06%	-	-	0.3	
I																											
J																											
K	35														-	-	30	5	-	-	4	6	3	-	-	-	0.5
L																											

*ポリマーは H では P2, I では P3, それ以外では P1 を使用している

*砂は L では S2 をそれ以外では S を使用している

表 2-4-2 韌性に及ぼす繊維種類および砂結合材比の影響

No.	繊維		W/B (%)	S/B (%)	B		P (C×wt.%)	目標値		試験項目
	種類	混入比			C(%)	FA(%)		フロー (mm)	空気量 (%)	
N	-		36	75	75	25	6	-	-	フレッシュ性状 曲げ強度 圧縮強度 一軸直接引張
1	PVA1	-								
2	PVA2	-								
3	PPA	-								
4	PPB2	-								
5	PE2	-								
6	PVA2:PE2	25 : 75								
7		50 : 50								
8		75 : 25								
9	PVA2:PPB2	25 : 75								
10		50 : 50								
11		75 : 25								
12	PPB2:PE2	25 : 75								
13		50 : 50								
14		75 : 25								
15	PVA1:PE1	25 : 75								
16		50 : 50								
17		75 : 25								
18	PVA1 : PPB1	25 : 75								
19		50 : 50								
20		75 : 25								
21	PVA1:PE2	25 : 75								
22		50 : 50								
23		75 : 25								
24	PE2	-		35				160±15	7±1	
25	PPB2:PE2	75 : 25								
26	PVA1:PE1	25 : 75								
27		50 : 50								
28		75 : 25								

て, S/B を 35% に変更し, フレッシュ性状を目標フロー $160\pm 15\text{mm}$ および空気量 $7.0\pm 1.0\%$ と定めて, 強度性状および靱性へ及ぼす影響確認を行った. S/B=75% の供試体では, 減水剤, AE 剤, 消泡剤 をそれぞれ B の質量に対して 0.07%, 0.15%, 0.25% 混和した. S/B=35% の供試体では減水剤と消泡剤の使用量を適宜変更してフレッシュ性状を調節した. ポリマーは B の質量に対して 6.0%, 繊維は供試体の体積あたり 1.5% を混入した.

2-4-2. 使用材料および調合

基礎性状，耐凍害性，施工性の検討に用いる使用材料は2-3 で用いた材料と表-2-4-3 に示した材料を用いた．表 2-4-4 に韌性に及ぼす繊維種類および砂結合材比の影響に用いる使用材料，表-2-4-5 に合成繊維の物性値を示す．結合材（B）には普通ポルトランドセメント（OPC）およびフライアッシュ（FA）を用いた．細骨材（S）には粒径の異なる高炉スラグ細骨材（粒径 0.6mm 以下および 0.6~1.2mm）を用いた．

練り混ぜは，消泡剤を除く材料を一括投入し，空練りを 30 秒，本練りを 3 分間行い，消泡剤を投入し練り混ぜを 1 分間行った．本実験の FRPCM は，吹付け施工を想定しているため，消泡剤を投入する前の状態を吹付け前，投入後の状態を吹付け後と仮定して作製を行った．

表 2-4-3 基礎性状，耐凍害性，施工性の検討に用いる使用材料

使用材料	記号	備考
細骨材	S2	高炉スラグ細骨材（表乾密度 2.62g/cm ³ ）
シリカフューム	SF	密度 2.11g/cm ³
火山灰	V	-
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸塩系
増粘剤	T	粉末増粘剤

表 2-4-4 韌性に及ぼす繊維種類および砂結合材比の影響に用いる使用材料

材料	種類
結合材 (B)	普通ポルトランドセメント（C：密度 3.16g/cm ³ ）
	フライアッシュII種（FA：密度 2.33g/cm ³ ）
細骨材 (S)	高炉スラグ細骨材（表乾密度 2.62g/cm ³ ）
混和剤	酢酸ビニル系ポリマー
	ポリカルボン酸系減水剤
	脂肪族アルコール系 AE 剤
	ポリエーテル系消泡剤

表 2-4-5 合成繊維の物性値

記号	繊維長さ (mm)	繊維直径 (μm)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング率 (kN/mm^2)	密度 (g/cm^3)	アスペクト 比
PPA	12	13.9	670	-	0.91	863
PPB1	6	42.6	482	5	0.91	14
PPB2	12	42.6	482	5	0.91	282
PVA1	8	40	1400	36	1.3	200
PVA2	12	40	1560	41	1.3	300
PE1	9	12	2600	88	0.97	750
PE2	12	12	2600	88	0.97	1000

2-4-3. 実験方法

1) フレッシュ性状試

2-3-3 と同様のため割愛する.

2) 強度試験および硬化収縮試験

圧縮強度では, 2-3-3 と同様のため割愛する.

3) 凍結融解試験および細孔径分布試験

凍結融解試験は, JIS A 1148 の水中凍結融解試験方法 (凍結融解 A 法) に準拠し供試体寸法 100×100×400mm を用い, 20°C 水中養生 28 日 (標準養生後) に行った. モルタル中の気泡間隔係数は ASTM C457 (リニアトラバース法) により測定を行った. なお, ペースト率は調合からの計算値を採用した.

4) 4 点曲げ試験

4 点曲げ試験では, 20×100×400 (mm) の供試体 4 体とした. スパンは 300mm, 載荷速度は 0.15mm/min とし 3 等分点載荷を行い, 応力と載荷点変位の関係から曲げ靱性係数を求めた. 曲げ靱性係数の式を (2-1) に示す.

$$f_b = T_b / \delta_{ib} \cdot L / bh^2 \quad \dots (2-1)$$

ただし, f_b は曲げ靱性係数 (N/mm²), T_b はスパンの 1/150 のたわみまでの荷重-載荷点変位曲線下の面積 (N・mm), δ_{ib} はスパンの 1/150 のたわみ (mm), L はスパン (mm), b は破壊断面の幅 (mm), h は破壊断面の高さ (mm) である.

5) 一軸直接引張試験

一軸直接引張試験は, 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) 【8】に準拠し, ダンベル型供試体 (厚さ: 13mm, 幅: 30mm) を 3 体作製し, 変形速度 0.5mm/min の速度で測定を行った. ひずみの測定は万能試験機インストロンに供試体を挟み, くびれからくびれの距離 (約 8cm) をビデオ伸び計により終局ひずみを求め, 力とひずみの関係から引張終局ひずみおよび引張強度を求めた. 引張終局ひずみの式を (2-2) に示す.

$$\varepsilon_{tui} = (l_u - l_o) / l_o \times 100 \quad \dots (2-2)$$

ただし, ε_{tui} は引張終局ひずみ (%), l_u は終局点の標点間距離 (mm), l_o は原標点間距離 (mm) である.

2-4-4. 試験結果および考察

1) 流動性の検討

図 2-4-1 に A~K のフローを示す。A~F ではフロー値が大きく高い流動性が確保されていた。しかし、H~K ではフライアッシュや石灰石微粉末のような、流動性の向上効果を持つ混和材料を A~F よりも高い水準で混入されているにもかかわらず、フロー値が小さくなっている。これは、一般に繊維の分散性が向上すると粘りが増加するといわれており、H~K では繊維種を変更することで繊維の分散性が向上し、粘りが増加することでフロー値が小さくなったものと思われる。

2) 曲げ強度および圧縮強度の検討

図 2-4-2, 図 2-4-3 に FRPCM の曲げ強度および圧縮強度を示す。曲げ強度は B,I 以外では目標値 8.5N/mm^2 を上回っており、特に F,G では高強度となっており、圧縮強度では全ての条件で目標値 45N/mm^2 を上回っており、特に F,J,および K では高強度となっている。これは、F では曲げ・圧縮強度を低下させるフライアッシュの代わりに高炉スラグ微粉末を混入しており、J,K ではシリカフェームを混入していることが理由として考えられる。

よって、FRPCM において特に高強度が必要な場合はフライアッシュを混入せず、高炉スラグやシリカフェームを混入するとよい。

3) 収縮率および砂種類の検討

図 2-4-4 に FRPCM の収縮率を示す。B,H,I,J,および K で目標値とする経過日数 28 日における収縮率 0.05% (500×10^{-6}) に収まることを確認された。A と B では水セメント比以外の条件が同じであるため、B では W/C が小さくなることで単位水量が減少し収縮低減がなされたと考えられる。H,J は他の FRPCM とはポリマーの種類が異なるため、そのポリマーが収縮低減に影響を与えた可能性がある。また、H,I,J,および K ではビニロン繊維だけでなくポリプロピレン繊維を併用していることが収縮低減に影響を与えたのではないかと考えられる。これは、ポリプロピレン繊維がほとんど吸水しないのに対し、ビニロン繊維が高い吸水性を持っており、このような吸水特性の違いが収縮に対する繊維の拘束効果に影響を及ぼしているのではないかとと思われる。また、図 2-4-5 に砂種類と収縮率の関係では、砂種類を珪砂から高炉スラグ細骨材に変更しても目標とする収縮率を満足することができる。

4) 耐凍害性の検討

図 2-4-6, 図 2-4-7 に空気量と耐久性指数の結果、気泡間隔係数と耐久性指数の結果を示す。すべての供試体では空気量が 4%~12%、気泡間隔係数 $300\mu\text{m}$ 以下と良質な気泡を含んでおり、耐久性指数 80 以上と高い耐凍害性を示した。特に H,J,K では、目標値である耐久性指数 90 以上を大きく上回り耐久性指数 98 を示した。J,K では比較的空気量も少なく、特に K では気泡間隔係数も $300\mu\text{m}$ 程度と最も大きくなっているにもかかわらず目標値を満足している。これは、ポリマーには水の浸入を防ぐことで耐凍害

性を向上させる働きがあるといわれており, J,K ではポリマーセメント比がそれぞれ 8%,6%と他よりも高い水準になっていることが影響したと考えられる.

5) 施工性の検討

施工性の検討では H, I, K の調合を用いて垂直に立たせたコンクリート面に 10mm の枠を付け, 実際に吹付け施工を行い一晩経過した後の状況を示している (写真 2-4-1). H では写真のように吹付け施工後 20 秒程度でほとんどが落ちた. I では H のように流れ落ちることはないが, 2 分程度で上部から 4 分の 1 が下がり下部にたまるように固まった. H と I の調合において, 混和材料の混入率に違いはなく, ポリマー種類が異なっている. どちらのポリマーも固い性質のものを使用しており, ポリマーの物性値にも H,I で大きな差はないが, H のポリマーでは主成分が酢ビ/ベオバ/アクリル系によるものだが, I では酢ビ/エチレン系の樹脂であり, H,I のダレの違いはポリマーの主成分の違いと考えられる.

しかし, K ではダレはほとんど確認されず, 一晩経過しても型枠内に収まり正常な状態を維持することができた. これは, K に含まれるシリカフェームには増粘作用があり, 混入したことで粘性が増しダレを抑制したものと思われる. 断面修復材料において吹付け施工時のダレを抑制することは材料の性能や施工性の観点からも重要であり, ダレを簿横死する方法としては主成分が酢ビ/エチレン系のポリマーを使用することや, シリカフェームを混入して粘性を増す必要がある.

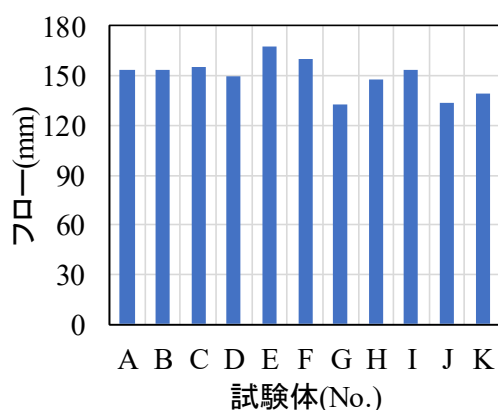


図 2-4-1 FRPCM のフロー

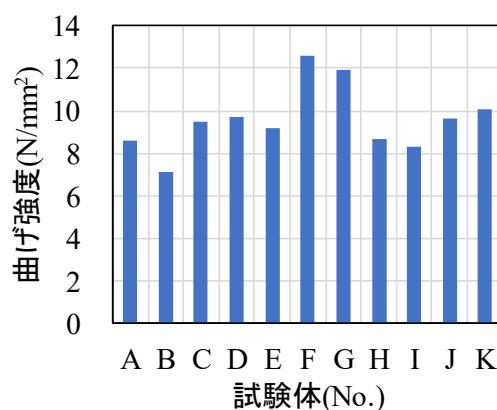


図 2-4-2 FRPCM の曲げ強度

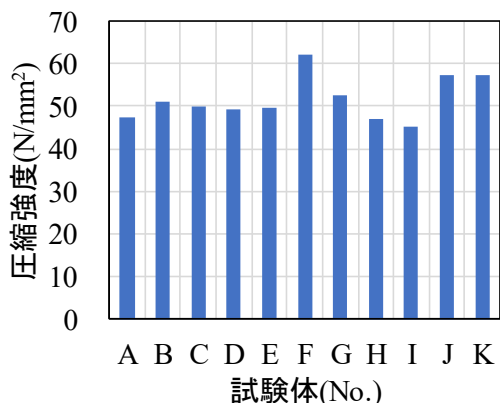


図 2-4-3 FRPCM の圧縮強度

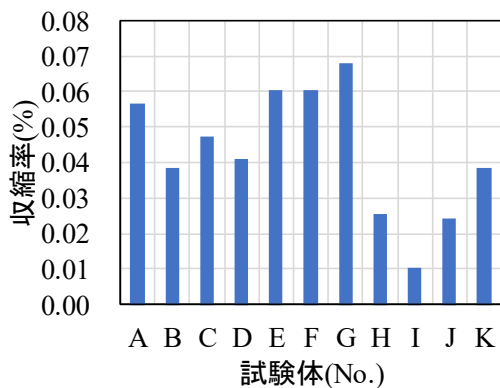


図 2-4-4 FRPCM の収縮率

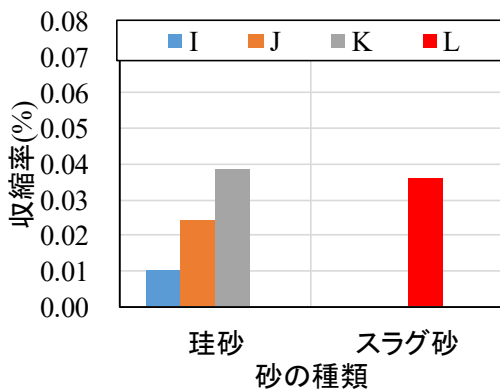


図 2-4-5 砂種類と収縮率の関係

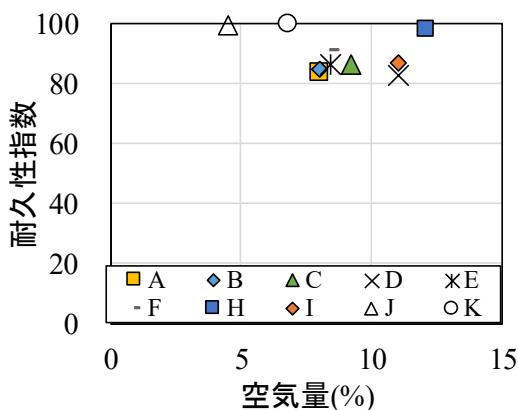


図 2-4-6 空気量と耐久性指数の関係

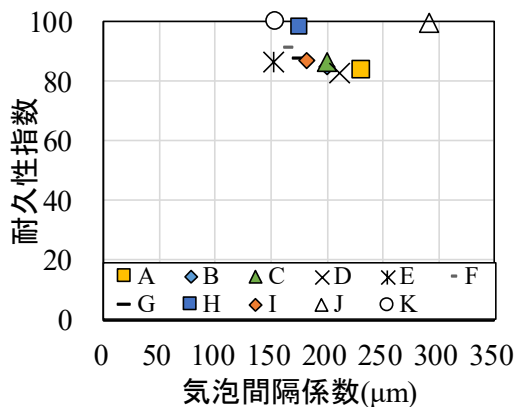


図 2-4-7 気泡間隔係数と耐久性指数

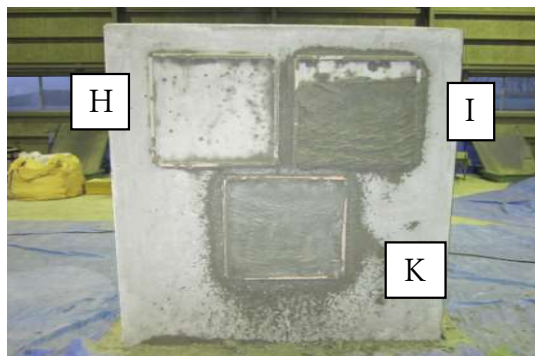


写真 2-4-1 施工後一晩経過後の様子

6) 靱性の検討

a) 繊維種類が靱性に及ぼす影響

図 2-4-7 に S/B=75%とした供試体のフレッシュ性状を示す。繊維を混入していない供試体 N ではフロー162mm, 空気量 8.0%であるのに対し, 繊維を混入することでフローでは混入した繊維の種類, 組み合わせによらず 20 から 40mm フローの低下が起こり,

繊維を混入することで施工性が損なわれる結果となった。

繊維混入による空気量への影響では No.2 の PVA2 と No.5 の PE2 を単独で混入した供試体では空気量が N より低下したが PVA1, PPA および PPB2 を単独で混入した供試体 (No.1, 3, 4) において空気量は N と同程度となった。2 種類の繊維を混入した供試体 (No.6~No.23) では繊維混入比による空気量への影響は確認できなかった。

図 2-4-8 から図 2-4-11 に繊維種類による強度性状および靱性の結果を標準偏差と合わせて示す。本研究では吹付け施工を想定した FRPCM の開発を行い、標準偏差を含め、目標性能を満足した供試体を塗りつぶしたバー、満足していない供試体を白抜きのバーで表している。破線はそれぞれの目標性能を示している。

圧縮強度では、一般的に躯体の圧縮強度は $24\sim 27\text{N/mm}^2$ と想定し、補修材となる FRPCM は同程度以上の強度を有している必要があると考え、目標性能を 30N/mm^2 以上とした。その結果、全ての繊維組み合わせにおいて目標性能を満足する結果が得られた。これは、W/B が 36% と低いことで目標性能を満足したと考える。

引張強度および曲げ靱性係数では、ひび割れによる耐力低下、劣化因子の侵入を防ぎ耐久性の向上、部材の剥落抑制に有利であると考え、市販されている FRPCM の性能値を参考に、それぞれ 3.0N/mm^2 以上、 2.3N/mm^2 以上を目標性能とした。

引張強度では、繊維を混入していない N においても目標性能を満足していることから、W/B を 36% と低いことで、十分な圧縮強度が得られたため、目標性能を満足した。

曲げ靱性係数では、繊維を混入していない N に加え PPA および PPB 繊維を単独で混入した両供試体 (No.3, 4) において目標性能を満足しなかった。これは、PP 繊維の繊維引張強度が他の繊維に比べて低いことが原因と考えられる。PPB 繊維は平均値では目標値を超えていた。これは PPB 繊維が PPA とは異なり繊維表面に凹凸が存在することがマトリクスとの付着を改善することで、PPA 繊維との結果の違いが表れたと考える。

引張終局ひずみでは、「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)」【8】より、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HPFRCC) の性能である 0.5% 以上を目標性能とした。その結果、PE2 繊維を単独で混入した供試体 (No.5), PPB2-PE2 を 75:25 で混入した供試体 (No.14), および PVA1-PE1 を 25:75,

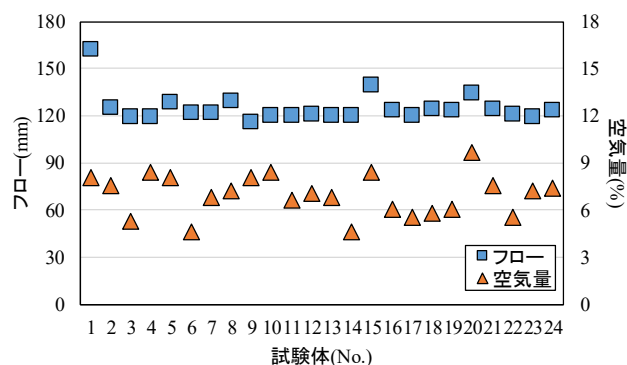


図 2-4-7 繊維種類と混入比率による FRPCM のフレッシュ性状

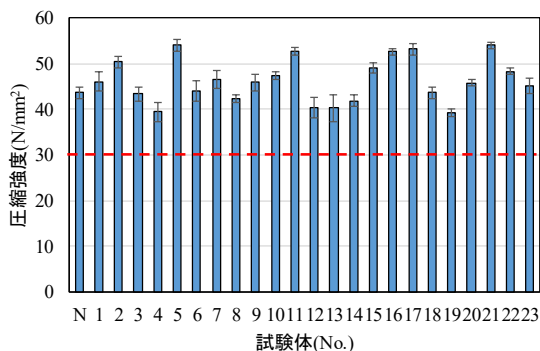


図 2-4-8 繊維種類と混入比率による FRPCM の圧縮強度

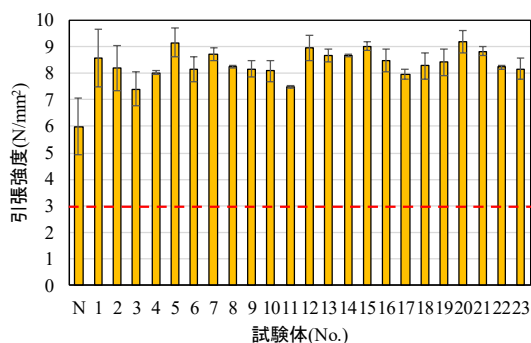


図 2-4-9 繊維種類と混入比率による FRPCM の引張強度

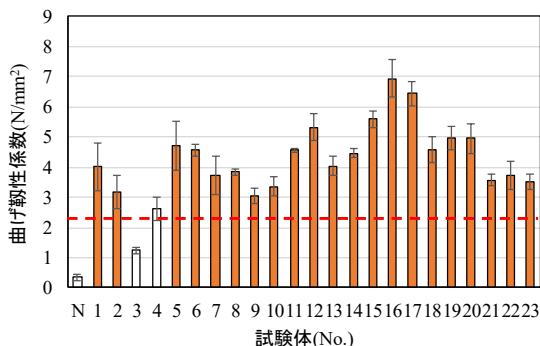


図 2-4-10 繊維種類と混入比率による FRPCM の曲げ靱性係数

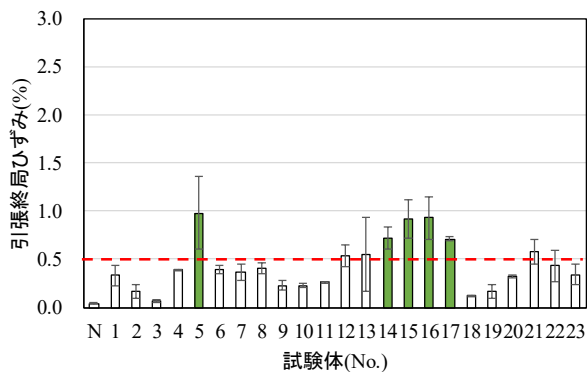


図 2-4-11 繊維種類と混入比率による FRPCM の引張終局ひずみ

50:50, 75:25 で混入した供試体 (No.15, 16 および 17) の5種類において目標性能を満足した。繊維の引張強度が最も高いPE 繊維を用いることで、引張終局ひずみに影響を及ぼしていることが考えられるが、PE 繊維を用いた場合でも目標性能を満足しない繊維組み合わせが存在するため、さらに検討を行う必要がある。

以上の結果より、全ての目標性能を満足する繊維の組み合わせは引張終局ひずみ0.5%を満足した5種類の繊維組み合わせ (No.5, 14, 15, 16 および 17) である。しかし、

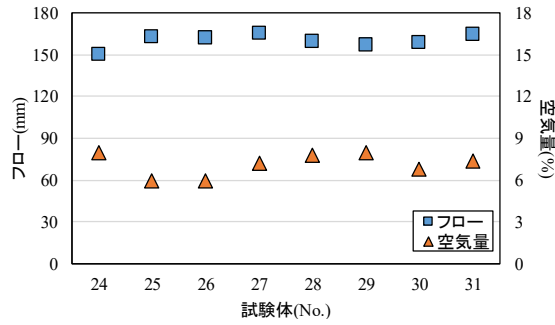


図 2-4-12 S/B=35%の供試体のフレッシュ性状

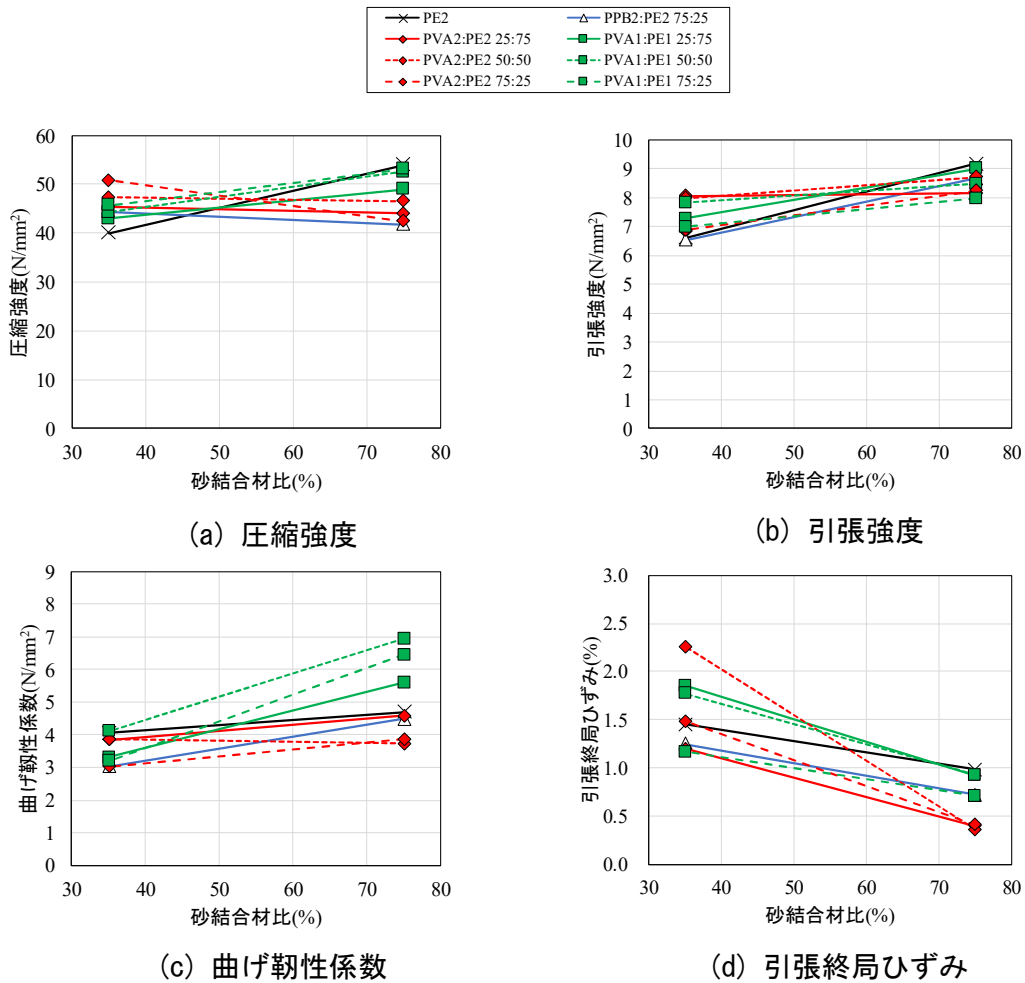


図 2-4-13 砂結合材比が強度および靱性に及ぼす影響

既往研究【9】【10】では繊維長さの長い繊維を用いることで靱性が向上することが言われているため、PVA1 および PE1 の繊維組み合わせで繊維長さを 12mm に変更した PVA2-PE2 25:75, 50:50, 75:25 (No.6, 7 および 8) では靱性が向上する可能性があり、3 種類の繊維組み合わせを追加した合計 8 種類を用いて調合条件の検討を行った。

b) 靱性に及ぼす砂結合材比の影響

S/B を 35%に変更した供試体のフレッシュ性状を図 2-4-12 に示す。調合条件による靱性への影響ではフローを $160\pm 15\text{mm}$ 、空気量は $7.0\pm 1.0\%$ を目標値としてフレッシュ性状を揃えた。

図 2-4-13 の (a) ~ (d) に S/B が強度性状ならびに靱性に及ぼす影響を示す。S/B を下げることで PPB2-PE2 75:25 および PVA2-PE2 の繊維組み合わせにおいて、圧縮強度の増加が見られた。PE2 および PPB1-PE1 の繊維組み合わせでは、S/B=75%よりも同程度以下の圧縮強度となった。空気量が低いと圧縮強度がやや高くなる傾向が見られるが、PE2 および PPB1-PE1 の繊維組み合わせでは空気量を考慮しても圧縮強度は減少傾向にある。既往研究において、S/B が 1 以下の場合、圧縮強度が最も高くなる S/B が存在する【11】ことが報告されているが原因は不明である。

曲げ靱性係数では、多くの繊維組み合わせにおいて S/B を下げることで引張強度が下がり、初期のひび割れが低い応力で発生し、その後は S/B によらず同様の勾配でひずみ硬化を示したため、変位 2mm までの曲げ応力-載荷点変位曲線の面積から求める曲げ靱性係数は減少したと考えられる。

引張終局ひずみでは、S/B=35%とすることで繊維組み合わせによらず S/B=75%の場合より約 1.5 倍以上となる高靱性が確認された。特に、S/B=75%の場合に引張終局ひずみの目標値を満足しなかった PVA2 と PE2 を組み合わせた全ての混入比において引張終局ひずみ 1.0%以上となり、S/B を下げることで繊維とマトリックスの付着面積が向上し、ひずみに寄与したと考えられる。以上の実験結果より、S/B が靱性に大きく影響していることが確認され、8 種類の繊維組み合わせにおいて引張終局ひずみ 1.0%以上の高靱性 FRPCM となることが確認できた。

図 2-4-14 に PVA 繊維と PE 繊維の長さ及び砂結合材比を変更した引張応力ひずみ曲線尾を写真 2-4-2 にその引張供試体のひび割れ状況を示す。S/B=75%では数本のひび割れが発生しただけだが、S/B を 35%とすることで複数の微細なひび割れが測定区間全体に発生した。特に、PVA2-PE2 50:50 S/B=35%において最もひび割れ本数が多く、ひび割れ分散性も良好であると考えられる。

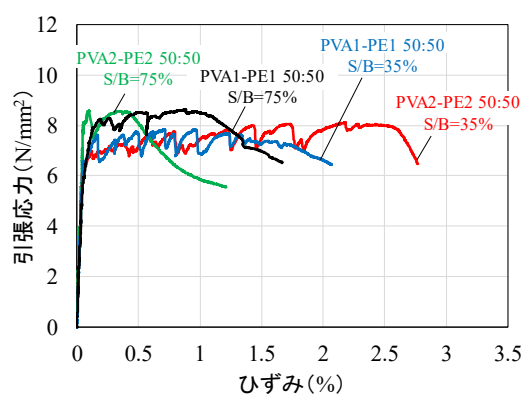


図 2-4-13 繊維長さおよび砂結合材比を変更した引張応力ひずみ曲線

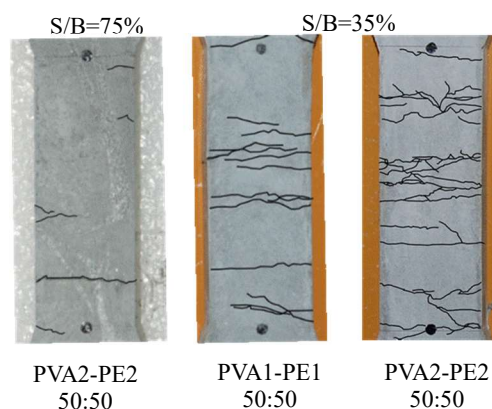


写真 2-4-2 繊維長さおよび砂結合材比を変更した供試体のひび割れ状況

2-5. ECO-FRPCM の調合決定および CO₂ 排出量低減効果

上記の結果より ECO-FRPCM の調合にはフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用い細骨材には高炉スラグ細骨材を使用し、強度と付着性の確保にはシリカヒューム、収縮ひび割れ防止の観点から膨張材と収縮低減剤を併用することとした。フレッシュ性状の制御はAE 剤、減水剤、消泡剤を用いて行った。また、共同研究者の企業とコストを考慮しながら、ひび割れ幅低減効果を狙った繊維量 0.5%の F05 および引張応力下において有害なクラックを発生しない繊維量 1.5%の F15 の基本調合を提案した。表 2-5-1 に各調合を示す。F05 ならびに F15 では圧縮強度を確保するために水結合材比 35 ならびに 36 とした。S/B では、砂の量を増やすことでセメントの使用量を減らし、CO₂ 排出量を削減できるため、S/B をなるべく高くしたい、そのため F05 では 1、靱性を必要とする F15 では S/B を低く設定することが望まれるが、セメントの使用量が増えるとコストが増加するため、0.7 とした。結合材には F05 では C, BFS, SF, EX とし、F15 では C, FA, SF, EX とした。砂は F05, F15 とともに全量を高炉スラグ細骨材として、作業歴 20 年以上の左官工から作業性を伺いながら粒度を F05 では粒径 0.6~1.2mm (S_M) : 0.6mm 以下 (S_L) を 6 : 4, F15 では S_M : S_L を 7 : 3 と決めた。混和材は、空気量 7±2%, フローを 135~160mm となるように添加量を定めた。繊維は靱性を必要としない F05 ではひび割れ幅の低減や、ダレを防止する目的で PP 繊維を採用した。F15 では終局ひずみ 0.5%以上を確保できる繊維組み合わせである PVA 繊維と PE 繊維の混入比をコストも考慮して 6 : 4 の比率で用いることとした。使用した材料を表 2-5-2 に繊維を表 2-5-3 に示す。

コンクリート材料の CO₂ 排出量の原単位【12】(表 2-5-4) から提案した基本調合の CO₂ 排出量低減効果を図 2-5-1 に示す。結合材の全量をセメントに置き換えたと仮定した N と比較して CO₂ 排出量では F15 で 200kg, F05 で 300kg 以上の排出量を低減し CO₂ 排出量比では F15 で約 3 割, F05 で約 5 割の CO₂ 排出量を低減することに成功した。

表 2-5-1 ECO-FRPCM の基本調合

記号	W/B (%)	S/B	繊維種類	繊維量 (vol.%)	結合材 (B) (%)					砂(S)割合 (%)		P	SR	減水剤	消泡剤	AE 剤
					C	FA	BFS	SF	EX	粒径						
										S _M	S _L					
										(B×%)						
F05	35	1	PP	0.5	52	0	35	5	8	60	40	2	4	0.06	0.17	0.2
F15	36	0.7	PVA:PE (60:40)	1.5	64	25	0	3	8	70	30	6	4	0.07	0.25	0.15

表 2-5-2 ECO-FRPCM の使用材料

使用材料	記号	密度 (g/cm ³)	備考
セメント	C	3.17	普通ポルトランドセメント
高炉スラグ微粉末	BFS	2.89	比表面積 4000cm ² /g
フライアッシュ	FA	2.33	JISII種
シリカフェーム	SF	2.25	—
膨張材	EX	2.93	エトリンガイト系膨張材
高炉スラグ細骨材	S _M	表乾密度 2.62	粒径 0.6~1.2mm
	S _L	表乾密度 2.62	粒径 0.6mm 以下
ポリマー	P	—	酢酸アクリル系化合物
収縮低減剤	SR	—	ポリオキシアレン化合物
減水剤	—	—	減水剤:ポリカルボン酸系
消泡剤	—	—	消泡剤:ポリエーテル系
AE 剤	—	—	脂肪族アルコール系
繊維	PP	0.91	ポリプロピレン
	PVA	1.30	ポリビニルアルコール
	PE	0.97	ポリエチレン

表 2-5-3 繊維種類

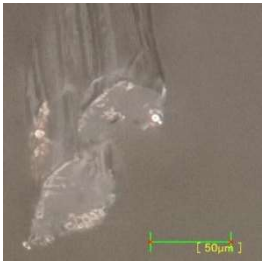
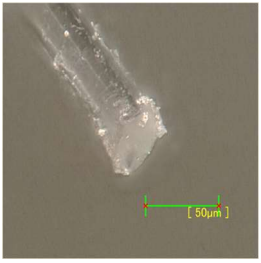
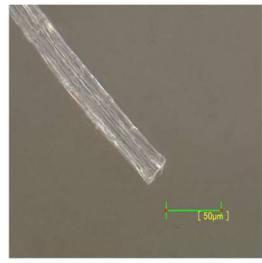
	PP	PVA	PE
繊維種類			
長さ	6mm	8mm	9mm
直径	42.6µm	40µm	12µm

表 2-5-4 コンクリート材料の CO₂ 排出量の原単位

材料	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /t)
OPC	766.6
FA	19.6
BFS	26.5

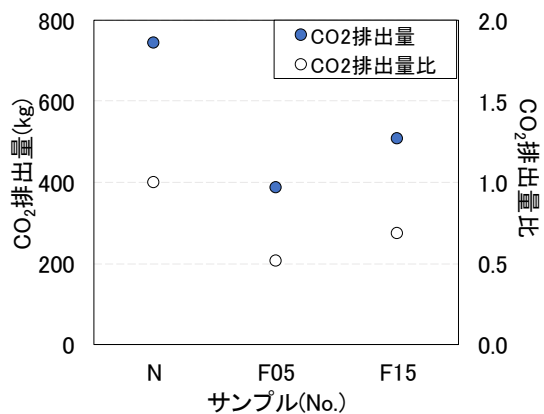


図 2-5-1 ECO-FRPCM の CO₂ 排出量低減効果

2-6. まとめ

ECO-FRPCM の基本調合の決定に当たり、ポリマー、膨張材、収縮低減剤、フライアッシュ、石灰石微粉末ならびに高炉スラグ微粉末が基礎性状に及ぼす影響を硬化性状、耐久性、施工性について検討した。以下にその結果をまとめる。

- 1) ポリマーは酢酸ビニルベオバアクリル系ポリマーを用いることで基礎性状が最も安定すること、また、添加量は10%を超えると基礎性状に悪影響を及ぼすことを把握した。
- 2) 膨張剤は曲げ強度を増加する傾向を示し、収縮低減剤は収縮低減効果が良好であった。また、その併用効果では収縮率の低減に非常に有効であった。
- 3) フライアッシュはボールベアリング効果で流動性改善効果はあるが、セメントに内割置換することで圧縮強度は低下する。
- 4) 石灰石微粉末では5%の添加量で流動性を増加させた。また、外割置換では収縮率に影響は確認ないが、内割置換では悪影響があることを確認した。
- 5) 高炉スラグ微粉末では流動性、圧縮強度ともに増加傾向を示し、水結合材比、混入率にかかわらず収縮率の増加が確認された。
- 6) 膨張材、収縮低減剤は、混入率に応じて収縮率が減少する。石灰石微粉末では内割、外割による混入方法の違いはほとんどなく、混入率の増加に伴い収縮率は同程度以上となる。高炉スラグ微粉末では、混入率の増加に伴い収縮率は増加するが、水セメント比が30%ではほとんど収縮率は変わらない。フライアッシュによる影響では、混入率の増加に伴い収縮率が増加するが、膨張材と収縮低減剤を同時に混入すると収縮率低減効果がみられる。
- 7) 耐凍害性および施工性の検討では、すべての調合で耐凍害性が優れている結果となった。吹付け施工後の性状では、Kの調合において、だれることなく母材コンクリートにしっかりと付着していた。
- 8) 硬化性状、耐凍害性に優れたポリプロピレン繊維を0.5%およびポリビニルアルコールとポリエチレン繊維を6:4で1.5%混入したECO-FRPCMの基本調合を提案した。
- 9) 環境負荷低減の観点ではCO₂排出量を結合材の全量をセメントに置き換えた材料と比べF15で約3割、F05で約5割のCO₂排出量を低減することに成功した。

【参考文献】

- 【1】 槇島修ほか：吹付け施工による断面修復材の耐久性に関する研究,コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.1529-1534, 2003
- 【2】 大濱嘉彦ら：硬化剤無混和エポキシ樹脂混入ポリマーセメントモルタルにおけるエポキシ樹脂とセメント水和物の相互作用,日本建築学会東北支部研究報告集, No.62, pp383-386, 1999.6
- 【3】 若松雅佳ほか：ポリマーモルタルを使用したコンクリート・RC 構造物の補修事例,土木学会年次学術講演会講演概要集, Vol.53, No.6, pp. 572-573, 1998.
- 【4】 大濱嘉彦：よくわかるポリマーセメントコンクリート/ポリマーコンクリートの基本と応用, 2007.
- 【5】 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領：(株)高速道路総合技術研究所, 2013
- 【6】 中川隆夫, 大野義照, 徐錫紹, 松田成貴：フライアッシュを用いたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.1, pp.483-488, 2004.
- 【7】 李長江, 依田彰彦, 横室隆：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの細孔構造と乾燥収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.187-192, 1998.
- 【8】 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), 2007.
- 【9】 董賀祥, 西村正, 関博：合成短繊維の付着特性が補強コンクリートの曲げ特性に与える影響に関する研究, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.1, pp. 1-13, 2009.
- 【10】 水越睦視, 内田美生, 前田徳一, 上東泰：高強度高じん性繊維補強セメント複合体の開発実験, セメント・コンクリート論文集, No. 57, pp. 444-449, 2003.
- 【11】 吉川茂, 辻幸和, 大谷杉郎, 小島昭：高炉スラグ微粉末を用いた短炭素繊維補強モルタルの性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, pp.635-640, 1988.
- 【12】 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), コンクリートライブラリー, 2005

第3章 ECO-FRPCMの化学抵抗性

3-1. はじめに

2章で開発した繊維量 0.5% (F05) と繊維量 1.5% (F15) の補修対象は土木構造物では橋梁, ダム, ボックスカルバート, トンネル覆道部, 擁壁, 用排水路, 護岸, 防波堤など, 建築ではコンクリート構造物全般を想定している. 火山列島である日本には温泉地が多く存在しており, 北海道も温泉地は多く存在する. 温泉には硫黄に代表される酸が土壌や排水に混ざることによってコンクリートのアルカリ性と反応し中性化することで鉄筋の発錆を促進させる. また, 硫酸腐食により石膏が生成され, コンクリート表面が剥落するなどの問題が生じることから, 温泉街などで用いるコンクリートには酸に対しての抵抗性が求められる. また, 補修する材料には躯体以上の耐久性が求められる. また, 北海道などの寒冷地では海からの飛来塩分だけでなく内陸地においても融雪剤に用いられる塩化ナトリウムによる塩化物イオンがコンクリート内の鉄筋と反応し, 膨張ひび割れを発生させる塩害も多く発生している【1】. さらに, コンクリート構造物はセメントの水酸化カルシウムのアルカリ性によって鉄筋の不導体が保護され, 錆が発生しない状態に保たれることで各種強度や耐久性が得られるため, 中性化深さがコンクリートのかぶりを超えて鉄筋に達すると鉄筋が錆び, 膨張ひび割れが発生することで構造物が成り立たなくなるといった問題も生じる.

そこで, 本章では促進中性化試験, 急速塩分浸透性試験, 硫酸浸漬試験を行い, 提案した ECO-FRPCM の化学抵抗性を評価した.

3-2. 実験計画および方法

3-2-1. 実験計画および使用材料

作製した F05 および F15 の ECO-FRPCM を用いて繊維無混入の結合材以外は F05 と同じ材料，水結合材比（W/B）のモルタルを比較用に促進中性化試験，硫酸浸漬試験，急速塩分浸透性試験を行い，作製した ECO-FRPCM の化学抵抗性を評価していく．ECO-FRPCM の化学抵抗性実験計画を表 3-2-1 に示す．促進中性化試験および硫酸浸漬試験は 26 週まで行い，急速塩分浸透性試験では塩化物イオンの実効拡散係数をそれぞれ 3 本平均で求めた．

表 3-2-2 に配合，表 3-2-3 に使用材料を，表 3-2-4 に使用した繊維種類を示す．調査は 2 章で開発した F05，F15 および F05 の結合材にセメントのみ使用した繊維無混入の N を比較対象とした．使用材料の全てはプレミクス製品を目指したため粉末状の材料である．

表 3-2-1 ECO-FRPCM の化学抵抗性実験計画

No.	W/B (%)	試験項目
N	35	フレッシュ性状 促進中性化試験 硫酸浸漬試験 急速塩分浸透性試験
F05	35	
F15	36	

表 3-2-2 化学抵抗性試験で用いた配合

記号	W/B (%)	S/B	繊維種類	繊維量 (vol.%)	結合材 (B)					砂 (S) 割合 (%)	
					C	FA	BFS	SF	EX	粒度	
										S _M	S _L
N	35	1	—	—	100	0	0	0	0	60	40
F05	35	1	PP	0.5	52	0	35	5	8	60	40
F15	36	0.7	PVA:PE (60:40)	1.5	64	25	0	3	8	70	30

3-2-2. 実験方法

1) フレッシュ性状試

2章と同様であるため、省略する。

2) 促進中性化試験

促進中性化試験は JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」に準拠して行った。供試体寸法は 100×100×400mm とし、二酸化炭素濃度は 5%とし、供試体個々の環境条件が等しくなるように、各供試体は 20 mm 以上の間隔をとって行った。中性化深さ測定にはフェノールフタレイン溶液を噴霧し、フェノールフタレイン溶液が乾燥してからノギスを用いて行った。測定期間は 1, 2, 4, 8, 13, 26 週で中性化深さを測定した。

3) 硫酸浸漬試験

硫酸浸漬試験では材齢 4 週まで標準養生を行い、5%濃度の希硫酸水溶液に浸漬し 1, 2, 4, 8, 13, 26 週で質量変化を測定した。

4) 急速塩分浸透性試験

塩化物イオンの実効拡散係数は JSCE-G 571「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」【2】に準拠して行った。供試体は φ100×200 の円柱供試体を両端から 25mm の部分を除き、残った部分から 1 体 5cm の厚さで切り出した。直流定電圧 15V を印加した。測定は陽極側に塩化物が確認されるまでは 3~7 日おきに測定した。

3-3. 試験結果および考察

3-3-1. ECO-FRPCMの中性化抵抗性

図3-3-1に中性化深さを、図3-3-1に中性化速度係数を写真3-3-1~3-3-2に促進中性化供試体の写真を示す。ECO-FRPCMのF05, F15ではそれぞれ0.7, 1.2 mm/√week程度となった。これは、セメントの代わりに添加した混和材の影響であり、島添らによれば【3】、FAと高炉スラグを外割で添加することで、コンクリートが密実になり中性化速度に及ぼす混和材の影響はないが、内割混入した場合は中性化が進行することが示されており【4~6】、であるF05とF15の結果の差にはBFSを用いて十分に養生を行うことで組織の緻密化が図られていると考えられる【7】。よって、FAを用いているF15よりBFSを用いたF05において中性化抵抗性に優れていると考える。

補修材には一般的なコンクリートと同等以上の中性化抵抗性が求められ、コンクリートの中性化速度係数はおよそ2~4mm/√week【8】【9】であるため、開発したECO-FRPCMは中性化抵抗性に対して十分な耐久性を有していることが言える。またNが中性化抵抗性に優れている理由としては、結合材にセメントを100%使用していること、さらに一般的な知見としてW/Cが低いほど中性化抵抗性に優れる【10】ことが知られているため、比較用に作製したNでは、ほとんど中性化が進行しない結果となった。

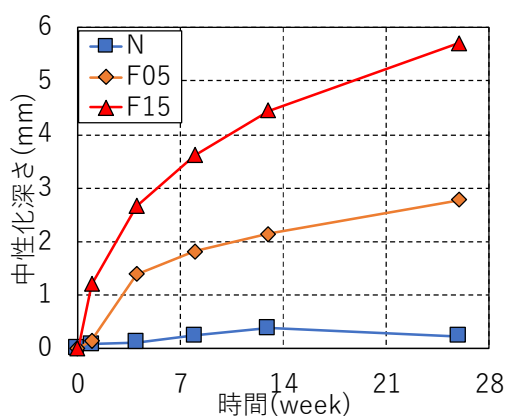


図3-3-1 ECO-FRPCMの促進中性化深さ

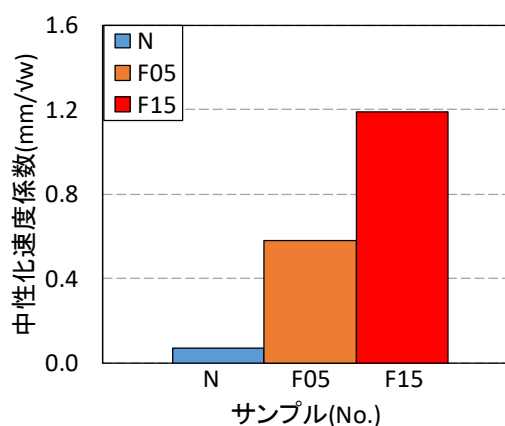


図3-3-2 ECO-FRPCMの中性化速度係数

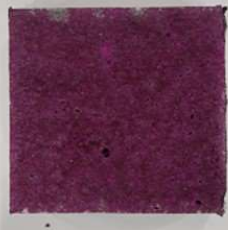











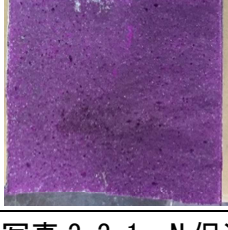
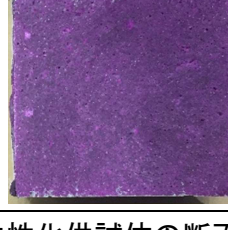
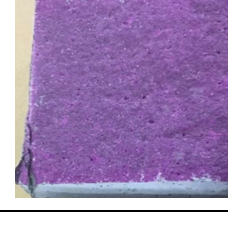
材齡 \ 供試体	N		
	1	2	3
1 週目			
4 週目			
8 週目			
13 週目			
26 週目			

写真 3-3-1 N 促進中性化供試体の断面

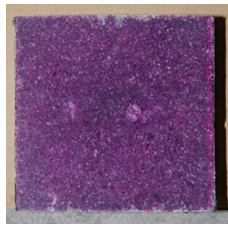





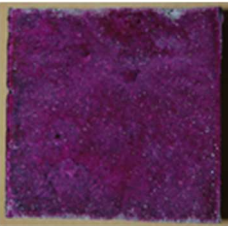
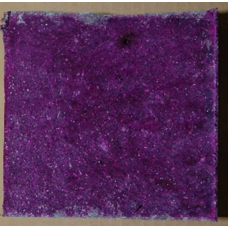
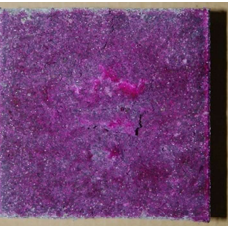
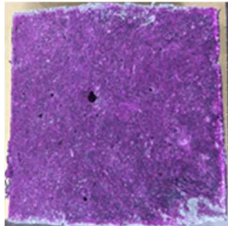
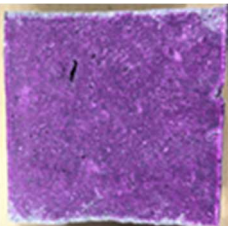
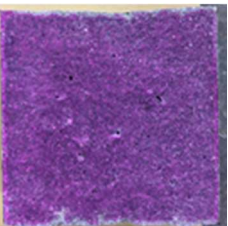



材齡 \ 供試体	F05		
	1	2	3
1 週目			
4 週目			
8 週目			
13 週目			
26 週目			

写真 3-3-2 F05 促進中性化供試体の断面



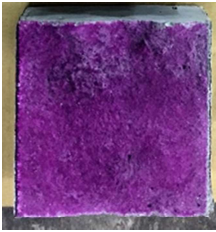

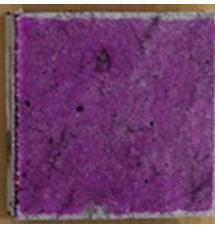

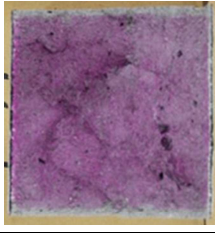
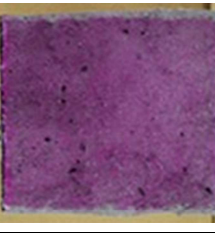
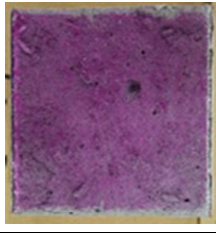






材齡	供試体		
	F15		
	1	2	3
1 週目			
4 週目			
8 週目			
13 週目			
26 週目			

写真 3-3-3 F15 促進中性化供試体の断面

3-3-2. ECO-FRPCM の耐硫酸性

図 3-3-3 に硫酸試験による質量変化率を示す。4 週までは F15>F05>N の順に質量増加が確認されたが、8 週目では N に質量増加がみられたが、13 週目以降は供試体全体の表面が剥離した(写真 3-3-4)。これは、硫酸と水酸化カルシウムや C-S-H の反応により 2 水石膏およびエトリンガイトを生成することで膨張したためである。

硫酸と水酸化カルシウムの反応式を式 (3-1) に、C-S-H との反応を式 (3-2) に、2 水石膏とアルミネートの反応によるエトリンガイト生成までの反応を式 (3-3) に示す【11】。2 水石膏およびエトリンガイトが生成されることで 1mol あたり 41cm³ と 254cm³ の体積膨張が起こり【12】、N では表層から剥離を発生したと考えられる。

山下らや小川らによると、FA の添加によってエトリンガイトや石膏の生成に必要な水酸化カルシウム (CH) が少なくなり、また、外来からの硫酸イオンの浸透が抑制されたため、FA の添加は耐硫酸塩性に優れていると報告されている【13】【14】。さらに、市坪らの報告によると、高炉副産物を用いることで二水石膏およびシリカの成長および消費速度を遅延するため耐硫酸性に優れていると明らかにした。また、細骨材中の CaO が耐硫酸性に寄与することも把握された【15】。したがって、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを加えた F05 や F15 は耐硫酸性に優れる。

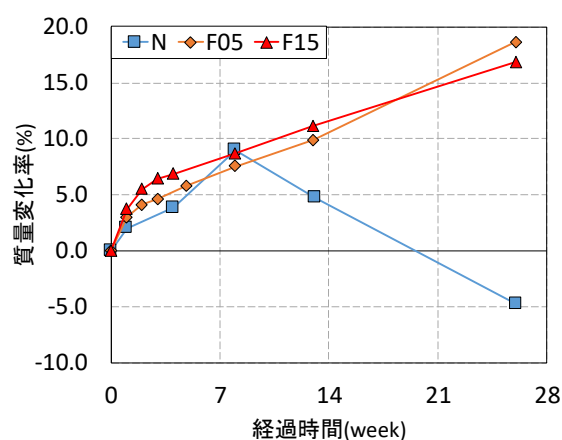
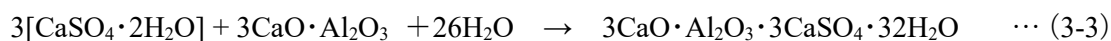
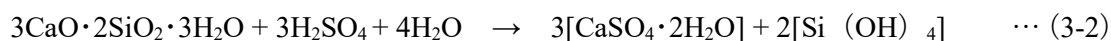


図 3-3-2 硫酸浸漬による質量変化率

写真 3-3-4 13 週目 N 供試体の写真

3-3-3. ECO-FRPCM の耐塩害性

図 3-3-3 から図 3-3-4 に急速塩分浸透性試験の電気泳動試験の結果および塩化物イオンの実効拡散係数を示す。電気泳動試験では 3 本の平均値を用いて評価を行っているが、F05 の供試体において塩化物イオンが検出されていない供試体が 1 本あるため、2 本平均で示している。一般に BFS は塩化物イオンの拡散速度が遅く、固定塩分量が多いため高い遮塩性を有していることが知られている【16】。また、鈴木らの報告によれば同一の積算通過電荷量であるならば BFS に比べ FA の方が塩化物イオンの浸透深さが大きくなることを示しているが【17】、今回の実験では、F15 が最も塩分を通しにくい結果となった。これは F05 と F15 に用いられているポリマーの量による影響だと考えられる。ポリマーはセメント硬化体の隙間をポリマーフィルムで充填し、物質透過性を低減し外部からの劣化因子を遮断するために、BFS を用いた F05 よりも F15 において高い遮塩性を示す結果となった。

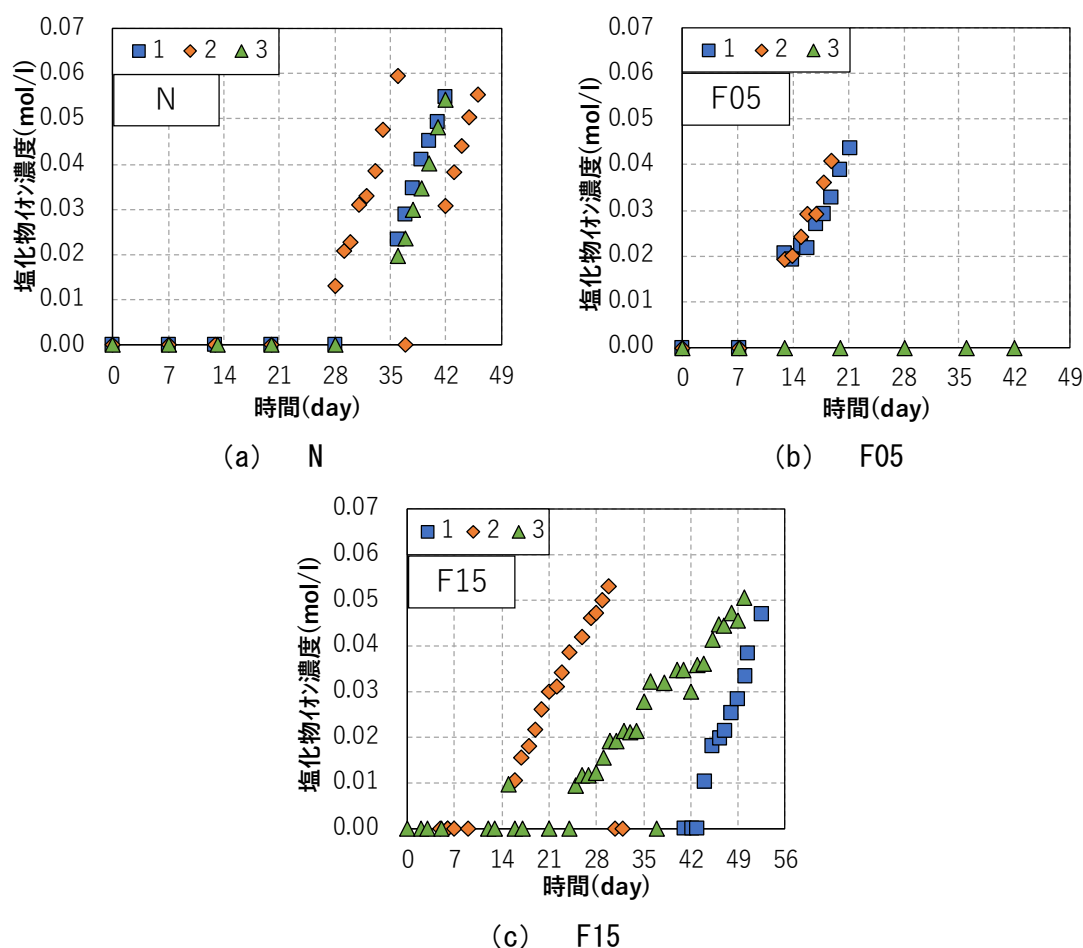


図 3-3-3 電気泳動試験結果

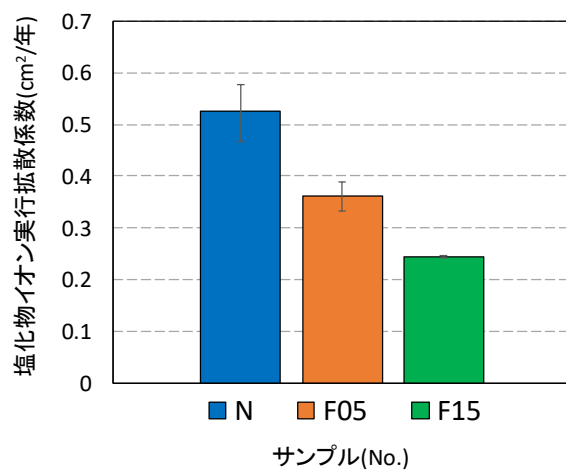


図 3-3-4 空気量と耐久性指数の関係

3-4. まとめ

ECO-FRPCMの化学抵抗性評価のために中性化抵抗性、耐硫酸塩性、耐塩害性について同じ水結合材比のモルタルと比較を行った。以下に結果を示す。

- 1) 中性化抵抗性では、セメント100%のNよりも中性化速度係数は大きくなるが一般的なコンクリート構造物よりも中性化速度係数は低く、十分な使用に耐えられる。また、F05とF15の中性化速度係数の違いはBFSを用いて十分に養生を行うことで組織の緻密化が図られたことでCO₂の侵入を抑制したF05においてF15よりも中性化が抑えられたと考える。
- 2) 耐硫酸性では、FAの添加によってエトリンガイトや石膏の生成に必要な水酸化カルシウム(CH)が少なくなり、また、外来からの硫酸イオンの浸透が抑制されたため、耐硫酸塩性に優れている結果となった。さらに、高炉副産物を用いることで二水石膏およびシリカの成長および消費速度を遅延するため、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを加えたECO-FRPCMは耐硫酸性に優れる。Nにおいてはエトリンガイトの生成により13週目に表面側から層状に剥離し、大幅に質量が減少した。
- 3) 耐塩害性では、ポリマーを多く添加することで、ポリマーフィルムがセメント硬化体の隙間を埋め、FAを用いた供試体であっても一般に遮塩性に有効とされているBFSよりも高い遮塩性を発揮する結果となった。

【参考文献】

- 【1】 内藤哉良, 鶴田浩章, 松下博通, 佐川康貴, 福田諭士: 各種混和材を混入したコンクリートの中性化に関する検討, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.25-26, 2003
- 【2】 土木学会: 「電気泳動によるコンクリート中の塩化物イオンの実効拡散係数試験方法(案)」, 2004
- 【3】 島添洋治, 白川敏夫, 麻生實: フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの中性化に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.943-944, 1999
- 【4】 船本憲治, 宝口繁紀, 永松武教, 小谷一臣: フライアッシュを45%まで内割使用したコンクリートに関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, pp.73-78, 2000
- 【5】 郭度連, 國府勝郎, 宇治公隆: 高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの中性化進行速度の評価, 土木学会論文集, No.802, pp.49-59, 2005.11
- 【6】 内藤哉良, 松下博通, 鶴田浩章, 佐川康貴, 福田諭士: 各種混和材を混入したコンクリートの中性化に関する検討, 土木学会第58回年次学術講演会, pp.25-26, 2003
- 【7】 雨宮栞, 今本啓一, 清原千鶴, 榊田佳寛, 棚野博之, 親本俊憲, 陣内浩: 混合セメントを用いたコンクリートの中性化と透気係数に関する実験的研究, 日本建築学会関東支部研究報告集, pp.173-176, 2015
- 【8】 大賀宏行, 長瀧重義: 促進試験によるコンクリートの中性化深さの予測と評価, 土木学会論文集, pp.225-233, 1988
- 【9】 全洪珠, 嵩英雄: コンクリートの強度および耐久性に及ぼすフライアッシュの種類・置換率の影響に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.71, pp.1-7, 2006
- 【10】 山崎順二, 立松和彦: 実機で製造した再生骨材コンクリートの強度および耐久性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.1563-1568, 2004
- 【11】 坂井悦郎: コンクリート構造物の耐久性上の問題点とその対策—化学的腐食—, コンクリート工学, Vol.33, No.2, pp.66-72, 1995
- 【12】 水上国男: コンクリート構造物の耐久性シリーズ「科学的腐食」, 技報堂出版, 1996
- 【13】 小川彰一, 野崎隆人, 山田一夫, 坂井悦郎: フライアッシュ混合セメントの耐硫酸塩性に及ぼすフライアッシュの特性とSO₃量および石灰石微粉末の効果, Cement Science and Concrete Technology, Vol.66, pp.414-421, 2012
- 【14】 山下弘樹, 野崎隆人, 平尾宙, 山田一夫: セメントの耐硫酸塩性におよぼす混和材の複合効果, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.621-626, 2008

- 【15】 市坪誠, 山田宏, 堀口至, 山口隆司: 各種モルタルの耐硫酸性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, pp.1119-1124, 2004
- 【16】 高橋佑弥, 林政典, 石田哲也: 高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたセメント硬化体の塩分遮蔽性能に関する実験的検討, 第68回セメント技術大会講演要旨, pp.296-297, 2014
- 【17】 鈴木聡, 中村英佑, 渡辺博志: 各種モルタル供試体を用いた非定常・電気泳動試験に関する実験的研究, 第21回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.97-102, 2012

第 4 章 ECO-FRPCM の硬化収縮に及ぼす混和剤および養生温湿度条件の影響

4-1. はじめに

補修材は耐久性の確保や強度回復を目的に既設構造物に施工される材料であり、躯体コンクリートとの収縮量の差が問題となり、浮きや界面からの剥離が発生し、再劣化の危険がある。断面修復を行う既設コンクリートには施工後十年以上経過している構造物が多く、補修材の収縮量が重要となる。

今回開発した ECO-FRPCM は日本高速道路株式会社（以下、NEXCO）の構造物施工管理要領【1】（以下、NEXCO 基準）の左官工法、吹付け工法に適合する収縮性能を有しており、脱型後 28 日までの収縮率で評価を行っている。

コンクリート構造物の主な断面修復工法には左官工法、吹付け工法、打込み工法、充填工法などがあり【2】、NEXCO 基準には左官工法、吹付け工法、打込み工法の性能照査が定められている。NEXCO 基準では各工法で長さ変化の試験項目名が異なり、左官工法、吹付け工法、打込み工法でそれぞれ硬化収縮性、寸法安定性、乾燥収縮性と記載されている。しかし、硬化収縮性と寸法安定性は同様の試験方法（表 4-1-1）であり、それぞれの名称となった根拠が示されていないため混乱を招きやすい。NEXCO 基準を確認する限り左官工法に用いるモルタルと、吹付け工法に用いるモルタルの作製方法が異なる基準（JIS と NEXCO）に準拠しているために発生した問題であると推察はできるが、定かではない。また、市販されている断面修復材には NEXCO 基準に記載されている工法と試験名の組み合わせを正しく表記しているカタログは希である（表 4-1-2）。

図 4-1-1 に各工法におけるおおよその塗布厚を示す。打込み工法に用いられるモルタルは型枠を組んでから流し込まれるため、正確な厚さを記載できないが吹付け工法以上の塗厚で施工が可能であると考えられる。

硬化収縮とは本来、「固まる過程において化学反応による架橋密度や体積収縮などの変化を伴う収縮【3】」であり、硬化後のモルタルの収縮量を測定する NEXCO 基準の

表4-1-1 NEXCO 構造物施工管理要領より各工法における長さ変化率の基準

工法	試験項目	基準値	試験方法
左官工法	硬化収縮性	0.05%以下	JIS A 1129-3 2日脱型後 28日後の長さ変化
吹付け工法	寸法安定性	0.05%以下	試験法 432 2日脱型後 28日後の長さ変化
打込み工法	乾燥収縮性	5×10^{-4} 以下	JIS A 1129-3 2日脱型後 3か月後の長さ変化

表4-1-2 断面修復材のカタログに記載されている塗厚と収縮の名称

	左官用	吹付け用	打込み用
A	10～20mm 硬化収縮性* 最大 30～40mm 長さ変化率 (28日) *	寸法安定性 (長さ変化率 28日) *	乾燥収縮率 (91日) *
B	10～20mm 長さ変化率 (28日) **	30～40mm 硬化収縮性* 10～20mm 長さ変化率 (28日) **	長さ変化率 (28日) *
C	最大 40mm 硬化収縮性*	30～50mm 寸法安定性*	硬化収縮*
D	20mm 程度 乾燥収縮 (28日)	—	記載なし***
E	10～30mm 硬化収縮率 (28日)	10～50mm 硬化収縮率 (28日)	長さ変化率 (91日)
F	収縮の記載なし (セメント系) ****	20～40mm 硬化収縮性 (28日)	寸法安定性* 長さ変化率 (28日)

*NEXCO 構造物施工管理要領

**農林水産省 農業水利施設の補修補強工事に関するマニュアル[開水路補修編] (案)

=NEXCO と同様の試験方法

***JIS 規格

****JWWA 規格 (水道用資機材)

記載例) 塗厚 (mm) 収縮の名称 (測定期間)

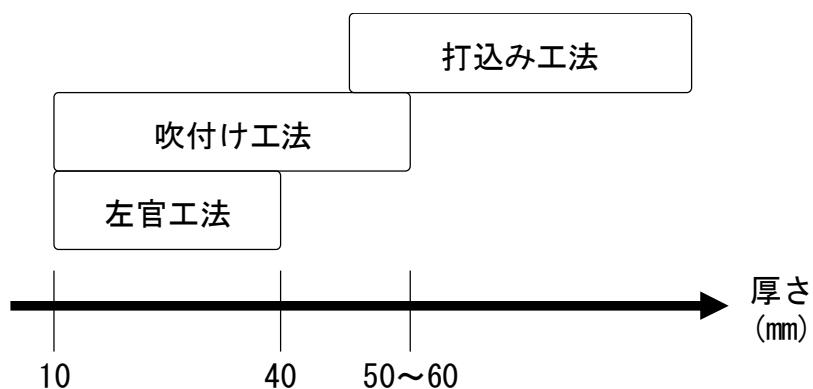


図 4-1-1 各工法における塗厚

試験方法において測定しているのは乾燥収縮が妥当であると言えるが、今回の実験では硬化収縮と表現している。

本章では、開発された ECO-FRPCM に使用されている膨張剤、収縮低減剤が硬化収

縮性状に及ぼす影響について検討する。また、収縮特性については NEXCO 試験法 432（断面修復用吹付けモルタルの試験方法）に規定されている 20℃、60%RH 環境下での材齢 28 日における長さ変化率を性能値として評価している。しかし、実際の施工環境の温湿度条件は広範に変動するため、実施工での硬化収縮挙動は 20℃、60%RH 環境での試験結果とは異なる【4】。また、材齢 28 日以降の収縮挙動を把握することも重要と思われる。

そこで本研究では、膨張材、収縮低減剤が硬化収縮に及ぼす影響、実環境を想定した温湿度条件における ECO-FRPCM の硬化収縮特性を検討し、硬化収縮性状の評価方法の最適化を目的とした実験を行った

4-2. 膨張材と収縮低減剤が硬化収縮に及ぼす影響

4-2-1. 実験概要

1) 実験計画

表4-2-1に実験計画を示す。セメントは普通ポルトランドセメントとした。水結合材比(W/B)を36%、砂結合材比(S/B)を1とし、ポリプロピレン繊維を体積あたり0.5%混入した。膨張材はエトリンライト系の膨張材を使用し、収縮低減剤に粉末特殊非イオン配合物を使用した。

ECO-FRPCMの膨張材、収縮低減剤の併用効果および膨張材が収縮挙動に及ぼす影響を検討するため、膨張材の混入量を0, 4, 8%, 収縮低減剤の混入量を0, 2, 4 B×wt.%の組み合わせから、収縮低減効果が期待される6水準を選定した。養生温湿度条件は、すべて標準養生(20°C60%RH)とした。

ECO-FRPCMの混練後フレッシュ状態として空気量、フロー、スランプおよび練上がり温度を測定し、供試体の作製を行った。フロー、スランプ、練上がり温度においても、成り行きとした。作製したECO-FRPCMは所定の材齢まで養生を行い圧縮強度試験、硬化収縮試験を行った。圧縮強度試験では、打設してから直ちに封緘養生を行い、材齢3, 7, 28日に圧縮強度を測定した。膨張率試験では、打設してから直ちにアルミ製サミットモールド缶に打設し、データロガーに接続した後、1~7日までの膨張挙動の測定を行った。硬化収縮試験では、測定期間を材齢28日(乾燥期間26日)までとし、2日後脱型から2~9, 14, 21, 28日に長さ変化率と質量変化率を測定した。

表 4-2-1 膨張材と収縮低減剤が硬化収縮に及ぼす影響実験計画

記号	W/B (%)	結合材 (B) (%)				骨材 (S)		混和剤 (B×wt.%)				繊維 (vol.%) PP (6mm)	養生温湿度	測定項目	
		OPC	BFS	SF	E	粒径 (S×wt.%)		P	SR	減水剤	消泡剤				AE剤
						SL	SM								
N*	36	52	35	5	8	40	60	2	4	0.07	0.18	0.2	0.5	20°C 60%RH	長さ変化率 * 膨張率
P*		0			0										
SR		4			4										
S2E4*		4			2										
E4*		4			0										
E8*		8			0										

2) 使用材料

本研究で使用した材料を表4-2-5に示す。結合材として、普通ポルトランドセメント(OPC)と高炉スラグ微粉末(BFS)を用いるとともに、セメント混和用ポリマー、シリカフェーム、膨張材を用い、骨材には高炉スラグ細骨材を用いた。ここで、BFSおよび高炉スラグ細骨材は環境負荷低減を目的として採用している。また、繊維は第2章で用いた繊維長さ6mmのポリプロピレン繊維(PP)を使用し、混和材料として収縮低減剤(SRA)と減水剤、AE剤、消泡剤を用いた。

表 4-2-5 使用材料

種類	記号	材料	密度
結合材 (B)	C	普通ポルトランドセメント (OPC)	3.17
	BB	高炉スラグ微粉末 (BFS) :比表面積 4000cm ² /g	2.89
	SF	シリカヒューム	2.25
	EX	膨張材:エトリンガイト系	2.93
骨材	S	高炉スラグ細骨材:粒径 (mm) =0.6~1.2, 0.6 以下	2.66
混和材料	P	セメント混和用酢酸アクリル系ポリマー	1.05
	SRA	ポリオキシアレン系 収縮低減剤	-
	SRB	粉末特殊非イオン配合系 収縮低減剤	-
	-	ポリカルボン酸系減水剤	-
	-	脂肪族アルコール系 AE 剤	-
	-	ポリエーテル系消泡剤	-

4-2-2. 実験結果と考察

図4-2-1に膨張率試験結果を示す。なお、膨張率試験はプラス側を膨張ひずみとした。膨張材の混入量が8%では、混入量4%の場合より、最大膨張量が約7.3倍になる結果となった。NとS2E4を比較したときにも、材齢2日までの最大膨張ひずみを比較すると約4.2倍になっており、膨張材の混入量を2倍にしたとき、それ以上の膨張ひずみを見込める結果となった。膨張材を混入した供試体が初期に膨張挙動を示していることに対して、Pのひずみについては、材齢2日の時点で-91 μm であった。また、既往研究【5】で膨張材と収縮低減剤を併用することで、エトリンサイト量の減少が停滞し、結合水量あたりの水酸化カルシウムの生成時期の遅延が確認され、これらが収縮低減効果に影響していると示している。今回の結果において、膨張材のみの供試体と収縮低減剤を加えた供試体を比較すると、膨張材と収縮低減剤を併用した供試体がある経過時間から膨張挙動が停滞し、若干膨張し続ける挙動を示していることから、これは収縮低減剤によるエトリンサイトの減少の停滞と水酸化カルシウムの生成時期の遅延が原因だと考えられる。NとE8、S2E4とE4を比較すると、収縮低減剤を混入した供試体の最大膨張ひずみの方が大きくなる結果となった。

図4-2-2に硬化収縮率試験の結果を示す。最も収縮率が小さい供試体はNの約-300 μm であり、次いでS2E4とS4の約-500 μm と、SRとEXの併用効果が確認された。

図4-2-1および図4-2-2から膨張過程を考慮した長さ変化率を図4-4-3に示す。膨張コンクリートの場合、膨張材の膨張量を収縮補償として考えられているが、補修材に膨張材が含まれている場合には収縮補償を考慮せず、28日までの硬化収縮試験によって長さ変化率を判断しているため、膨張率を考慮することで28日の長さ変化率でNは-100 μ 以下となり膨張剤および収縮低減剤を基本調合の半分ずつ添加したS2E4では収縮補償を考慮した長さ変化率で考えると硬化収縮試験の基準値-500 μ を満足している

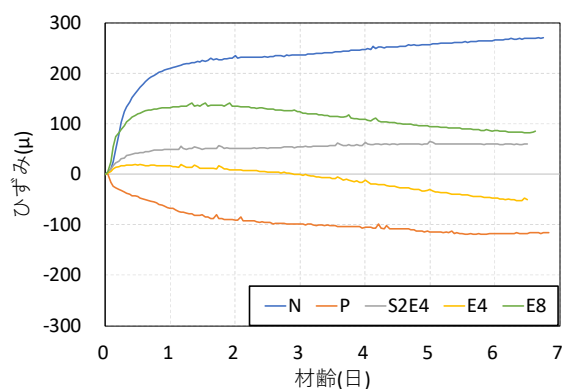


図4-2-1 膨張率試験結果

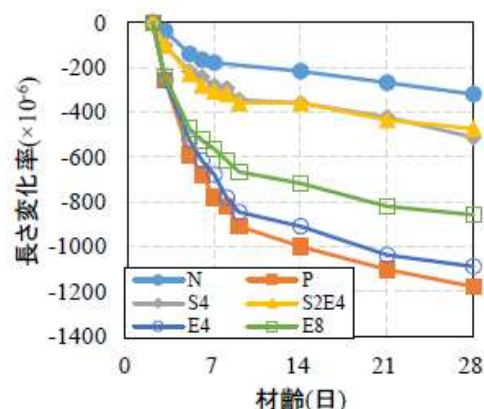


図4-2-2 硬化収縮率試験結果

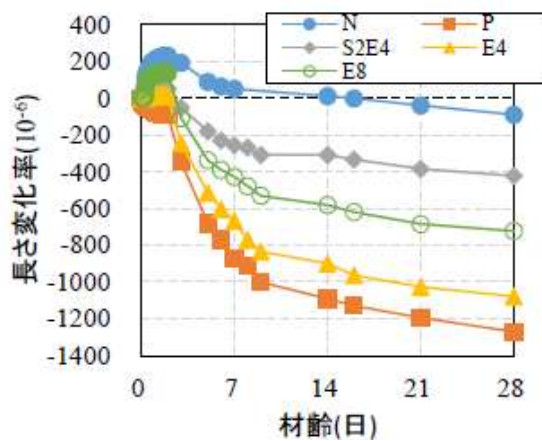


図 4-2-3 膨張率を考慮したときの長さ変化率

4-3. 養生温度条件の影響

4-3-1. 実験概要

1) 実験計画

表 4-3-1 に実験計画を、表 4-3-2 に調合を示す。ECO-FRPCM の調合は水結合材比 (W/B) を 33%, 砂結合材比 (S/B) を 1.0 とし、繊維を 0.5vol%混入した。また、混和材料として主成分の異なる SRA (A 種および B 種) を用いた。目標空気量 $8.0 \pm 0.5\%$ を基準とし、空気量の変動を考慮した $4.0 \pm 0.5\%$ および $12.0 \pm 0.5\%$ の条件を加えて、AE 剤および消泡剤の添加量により空気量の調整を行った。目標練り上がり温度は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ とした。

脱型後の養生環境の温湿度条件は、屋外を含めた 10 水準とした。温度条件は一般的な外気温を想定して 5, 20, 30°C の 3 水準とした。湿度条件は国内の気象データを参考にして、各養生温度において 3 水準の湿度条件とし、 5°C で 20, 60, 90%RH, 20°C で 40, 60, 95%RH, 30°C で 40, 60, 75%RH とした。養生温湿度の制御は、所定の温度の恒温室内にデシケーターを設置し、表 4-3-3 に示す各温湿度条件に用いる塩 (JIS A 1475 附属書 3) をイオン交換水に溶かし、飽和塩水溶液を作製し、湿度調整を行った。なお、 5°C , 20°C の 60%RH の条件については、恒温恒湿室で供試体を養生した。また、実環境での温湿度が変動する影響を把握するために、屋外 (室蘭工業大学構内: 北海道室蘭市) にも供試体を設置した。屋外では降雨、降雪の影響を避け、温湿度のみの変動を与えるために写真 4-3-1 のようにブロックで供試体の周囲を囲み、上から蓋をして養生を行った。すべての養生条件で温湿度の測定を継続的に行った。表 4-3-4 に養生期間中の平均温湿度を示す。使用材料は 4-2 と同様である。

表 4-3-1 硬化収縮に及ぼす養生温度の条件の影響実験計画

供試体名	W/B (%)	S/B	繊維 (vol%)	収縮低減剤		目標物性		養生条件	測定項目
				A種	B種	空気量 (%)	練り上がり温度 ($^\circ\text{C}$)	温度 (相対湿度)	
EA	33	1	0.5	○	-	8 ± 0.5	20 \pm 2	5 $^\circ\text{C}$ (20,60,90%RH)	空気量 フロー スランプ 練り上がり温度 圧縮強度 (封緘養生) 長さ変化率 質量変化率
EB				-	○			20 $^\circ\text{C}$ (40,60,95%RH)	
EA4				○	-			30 $^\circ\text{C}$ (40,60,75%RH)	
EB4				-	○	4 ± 0.5		5 $^\circ\text{C}$ (60%RH)	
EA12				○	-			20 $^\circ\text{C}$ (60%RH)	
EB12				-	○			30 $^\circ\text{C}$ (60%RH)	

表 4-3-2 測定材齢および終了条件

供試体名	W (kg/m ³)	繊維 (kg/m ³)	B (kg/m ³)					S (kg/m ³)		混和材料 (kg/m ³)				
			OPC	BFS	P	SF	EX	粒径 (mm)		SRA		減水剤	消泡剤	AE剤
								0.6~1.2	0.6以下	A種	B種			
EA	313	4.6	475	332	19	47	76	570	380	38	-	0.6	16	1.7
EB										-	38			
EA4										38	-			
EB4										-	38			
EA12										38	-			
EB12										-	38			

表 4-3-3 飽和塩水溶液

温度 (°C)	塩	溶解度 (g/100gH ₂ O)	目標相対湿度 (%RH)	相対湿度 (%RH)
5	ヨウ化リチウム LiI	171	20	21.5
	塩化カリウム KCl	30	90	87.5
20	炭酸カリウム K ₂ CO ₃	111	40	43
	硝酸カリウム KNO ₃	31.6	95	97
30	炭酸カリウム K ₂ CO ₃	114	40	43
	塩化コバルト CoCl ₂	59.7	60	61
	塩化ナトリウム NaCl	36.1	75	75

写真 4-3-1 屋外の供試体の養生状態



表 4-3-4 各材齢での平均温湿度

設定 温湿度	材齢28日		材齢182日	
	温度 (°C)	相対湿度 (%RH)	温度 (°C)	相対湿度 (%RH)
5°C20%RH	5.5	46	5.3	24
5°C60%RH	5.0	54	5.5	62
5°C90%RH	5.3	91	5.5	88
20°C40%RH	19.2	50	19.5	43
20°C60%RH	19.1	55	19.3	55
20°C95%RH	18.9	98	19.6	96
30°C40%RH	29.7	42	29.6	36
30°C60%RH	29.8	67	29.8	55
30°C75%RH	30.2	79	29.8	76
屋外	3.5	76	3.4	74

2) 実験方法

圧縮強度は JIS A 1108 に準拠し行った。供試体寸法は 1φ50×100mm の円柱供試体を用い、5°C、20°C、30°Cでの封緘養生を行い、材齢 3、7、28 日で行った。硬化収縮試験は、40×40×160mm の角柱供試体を用い、打設後 20°Cで封緘養生を行い、材齢 2 日で脱型し、脱型後直ちに所定の温湿度環境に移動し基長を測定した。長さ変化率の測定は JIS A 1129-3 (ダイヤルゲージ法) に準じて行った。なお、脱型前後の養生温度が異なるため、線膨張率を $9.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として基長を補正した。硬化収縮の測定期間は、材齢 182 日までとした。

4-3-2. 試験結果および考察

1) フレッシュ性状および圧縮強度

表 4-3-1 にフレッシュ性状を図 4-3-1 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。各配合条件で、目標としたフレッシュ性状を満足している。圧縮強度では、養生温度が異なる条件の ECO-FRPCM の強度増進は、一般のコンクリートと同様に積算温度で一意的に表すことができる。

表 4-3-1 フレッシュ性状

供試体名	測定結果			
	空気量 (%)	フロー (mm)	スランプ (mm)	練上がり温度 (°C)
EA	8.4	137.5	31.0	19.5
EB	8.4	131.5	13.0	22.0
EA4	3.9	130.0	12.0	21.0
EB4	4.2	113.0	5.0	20.0
EA12	12.5	146.5	30.0	18.0
EB12	12.5	131.5	21.0	18.0

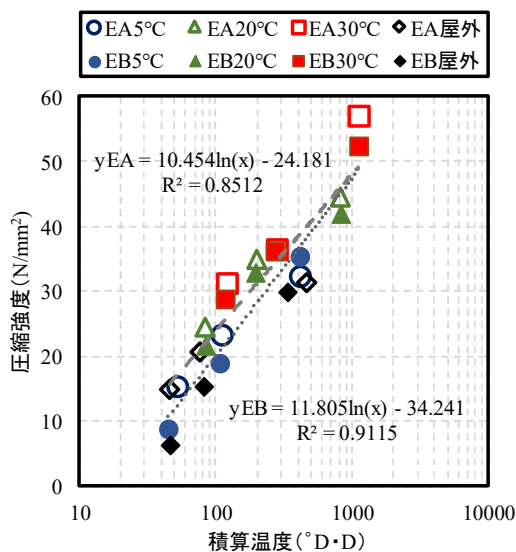


図 4-3-1 積算温度と圧縮強度の関係

2) ECO-FRPCM の硬化収縮挙動

図 4-3-2 に材齢 28 日における長さ変化率および質量変化率と温度の関係を示す。養生温度が高いほど長さ変化率、質量変化率ともに増加する傾向にあるが、相関はそれほど高くない。

図 4-3-3 に材齢 28 日における長さ変化率および質量変化率と相対湿度の関係を示す。養生温度、SRA の種類によらず、養生相対湿度が低いほど長さ変化率、質量変化率ともに大きくなっている。この理由としては、相対湿度により乾燥する空隙径が決定するため【6】、相対湿度が低いほど小さな空隙中の自由水が逸散することで、毛細管張力が大きくなることで説明できる。

図 4-3-4 に材齢 28 日における長さ変化率および質量変化率と空気量の関係を示す。空気量が多いほど長さ変化率および質量変化率ともに大きくなった。これは、空隙量が多いほど、乾燥しやすく、自由水の逸散量が多くなることと考えられる【7】。

図 4-3-5 に材齢 28 日における長さ変化率と質量変化率の関係を示す。長さ変化率と質量変化率の関係は、ほぼ比例関係にあるが、SRA の種類によって両者の相関に差があり、本研究で用いた 2 種類の SRA では EA の方が両者の相関係数が高くなっている。

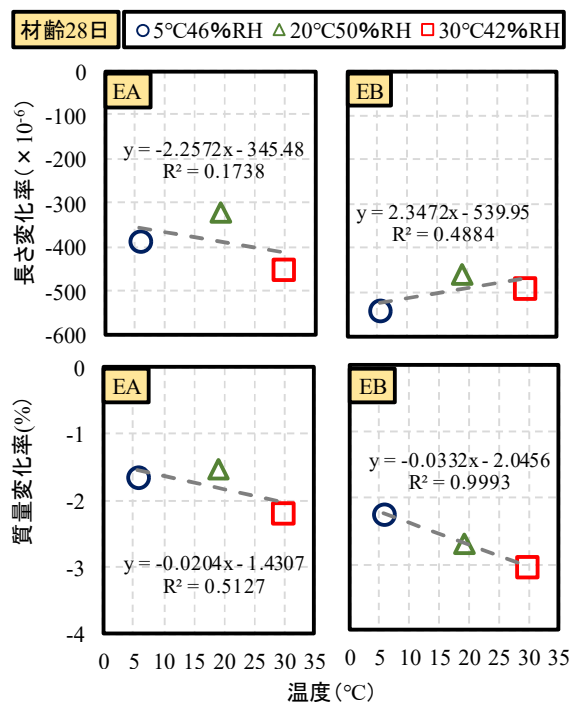


図 4-3-2 温度と長さ変化率および質量変化率の関係

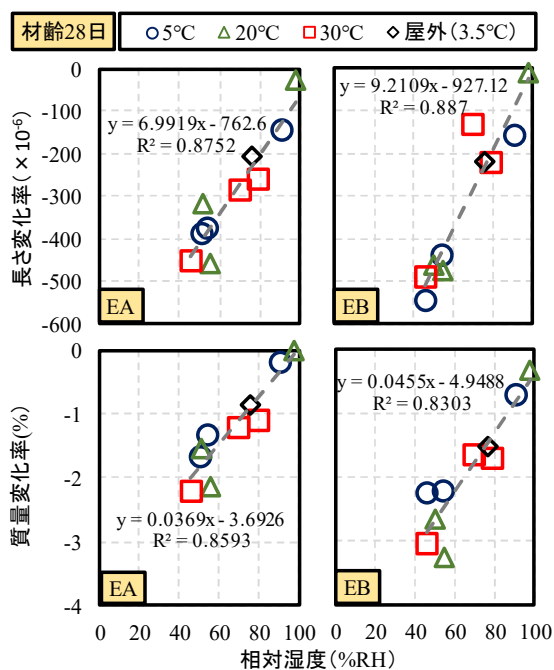


図 4-3-3 相対湿度と長さ変化率および質量変化率の関係

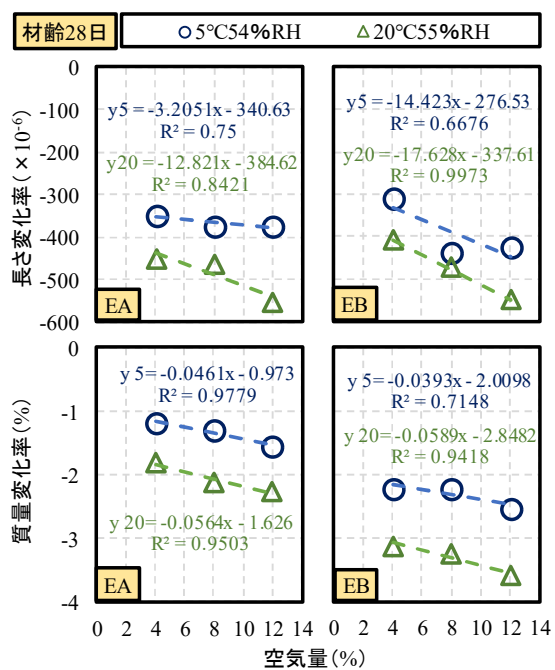


図 4-3-4 空気量と長さ変化率および質量変化率の関係

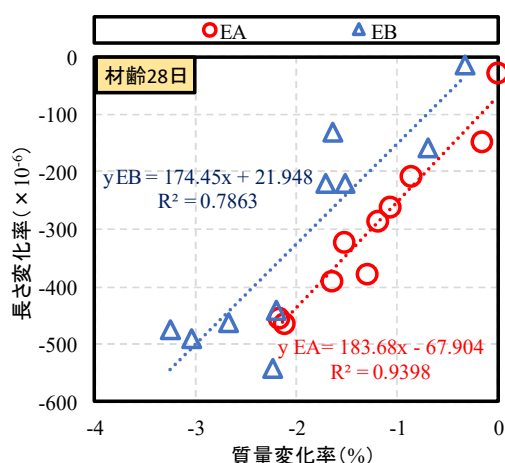


図 4-3-5 長さ変化率と質量変化率の関係

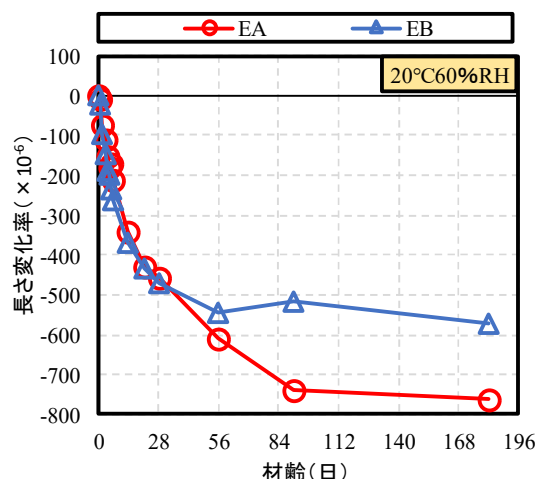


図 4-3-6 材齢 182 日までの長さ変化率

図 4-3-6 に 20°C, 60%RH 環境での材齢 182 日までの長さ変化率の変化を示す. JIS A 1171 や NEXCO 試験法 432 では, 材齢 28 日の長さ変化率で性能評価しており, 材齢 28 日の長さ変化率は EA, EB とも 500×10^{-6} 程度でほぼ同じである. しかし, 材齢 182 日では EA は 760×10^{-6} , EB は 570×10^{-6} まで長さ変化率が増加している. このことから, 長期的な長さ変化率は SRA 種類やその他の使用材料により異なる可能性があるといえる. したがって, ECO-FRPCM の性能評価において, 施工する部材の寸法や塗厚等の条件によりひび割れ防止のために必要となる性能値は異なるため【8】, その設定は試験材齢の延長も含めて検討する必要がある.

3) ECO-FRPCM の硬化収縮に及ぼす要因の重回帰分析による検討

ここでは, 実験結果を用いた重回帰分析により, 長さ変化率および質量変化率に及ぼす各種要因の検討を行う. 表 4-3-2 に材齢 28 日の長さ変化率と質量変化率の分散分析表を示す. 目的変数に長さ変化率 (Y1) および質量変化率 (Y2), 説明変数に養生温度 (X1), 養生相対湿度 (X2), 空気量 (X3), SRA の種類 (X4) を設定した. X4 については数量化 I 類により, ダミー変数として数量化して分析を行った. 式 (4-1), 式 (4-2) に重回帰式を, 各説明変数の有意性の有無は, 「P-値」による有意水準の判定から決定した【9】.

$$y_1 = 8.5x_2 - 11.5x_3 - 776.1 \quad \dots (4-1)$$

$$y_2 = -0.02x_1 + 0.04x_2 + 0.8x_4 - 3.4 \quad \dots (4-2)$$

長さ変化率を目的変数とした場合、養生相対湿度と空気量を説明変数とした重回帰式の式(4-1)で、決定係数 $R^2=0.83$ の相関となった。この式から、相対湿度が低いほど、空気量が多いほど長さ変化率は大きくなることがわかる。質量変化率を目的変数とした場合、養生温度と養生相対湿度ならびにSRAの種類を説明変数とした重回帰式の式(4-2)で、決定係数 $R^2=0.86$ の相関となった。この式から、温度が高いほど、相対湿度が低いほど、質量変化率は大きくなることがわかる。

材齢182日の長さ変化率と質量変化率の分散分析表を表4-3-3に示す。前項と同様に、材齢182日の長さ変化率および質量変化率に及ぼす各種要因の検討を重回帰分析により行った。得られた重回帰式を式(4-3)、式(4-4)に示す。

$$y_1 = 13.9x_2 - 1258.7 \quad \dots (4-3)$$

$$y_2 = -0.03x_1 + 0.06x_2 + 0.8x_4 - 5.5 \quad \dots (4-4)$$

長さ変化率を目的変数とした場合、養生相対湿度を説明変数とした重回帰式の式(4-3)で、決定係数 $R^2=0.76$ の相関となった。材齢28日では、説明変数に空気量に加わっていたが、材齢182日では養生相対湿度のみになっている。このことから、長さ変化率に対して相対湿度の影響が卓越しているといえる。次に、質量変化率を目的変数とした場合には、養生温度と養生相対湿度ならびに収縮低減剤の種類を説明変数とした重回帰式は式(4-4)となり、決定係数 $R^2=0.89$ の相関となった。この式から、材齢28日の場合と同様に、温度が高いほど、相対湿度が低いほど、質量変化率は大きくなり、SRAの主成分の違いによる影響も大きいことがわかる。

表4-3-2 材齢28日における分散分析表

材齢28日	Y1:長さ変化率				Y2:質量変化率			
	自由度	変動	分散	有意F	自由度	変動	分散	有意F
回帰	4	549234.7	137308.7	5.98×10^{-10}	4	20.73	5.18	4.04×10^{-11}
残差	27	114367.8	4235.8		27	3.40	0.13	
合計	31	663602.5			31	24.13		
	標準誤差	t	P-値	判定	標準誤差	t	P-値	判定
X1:温度	1.11	0.202	0.841	-	0.0061	-2.9	0.0074	**
X2:相対湿度	0.768	11.04	1.63×10^{-11}	**	0.0042	10.4	5.51×10^{-11}	**
X3:空気量	4.44	-2.59	0.015	*	0.0242	-2.00	0.056	-
X4:収縮低減剤	23.02	0.287	0.776	-	0.125	6.63	4.08×10^{-7}	**

** : 1%有意 * : 5%有意

表 4-3-3 材齢 182 日における分散分析表

材齢182日	Y1:長さ変化率				Y2:質量変化率			
	自由度	変動	分散	有意F	自由度	変動	分散	有意F
回帰	4	1315694.2	328923.5	2.68×10^{-10}	4	36.29	9.07	1.08×10^{-13}
残差	27	254855.0	9439.1		27	3.61	0.13	
合計	31	1570549.2			31	39.90		
	標準誤差	t	P-値	判定	標準誤差	t	P-値	判定
X1:温度	1.61	0.66	0.518	-	0.0060	-4.7066	6.7×10^{-5}	**
X2:相対湿度	1.03	11.56	5.83×10^{-12}	**	0.0039	14.1539	5.2×10^{-14}	**
X3:空気量	6.63	-1.63	0.115	-	0.0250	-2.0119	0.054	-
X4:収縮低減剤	34.36	-1.97	0.060	-	0.1293	6.2974	9.7×10^{-7}	**

** : 1%有意 * : 5%有意

4) 屋外の温湿度変動と硬化収縮挙動の関係

図 4-3-7 に屋外の温湿度変動を示す。試験期間中（2015 年 11 月 26 日～2016 年 5 月 26 日）の温度は-6～17℃で季節変動しているが、相対湿度は 47～98%RH の振幅で変動し、振幅は広いものの季節による差は大きくないといえる。

図 4-3-8 に同一期間の屋外に設置した供試体の長さ変化率を示す。なお、長さ変化率は実測値を示している。これまでの実験室実験の検討で、長さ変化率に対しては温度ではなく相対湿度の影響が大きいことが明らかになっている。一方、屋外環境の供試体では 56 日までは実験室実験の場合と同様に材齢の進行とともに収縮挙動を示しているが、それ以降は膨張に転じている。これは、季節変動による気温の上昇と対応しており、ECO-FRPCM 自身の熱膨張による現象である。このことから、温湿度が変化する実環境での長さ変化率を評価する場合は、温度変化による線膨張係数の影響を考慮する必要があるといえる。

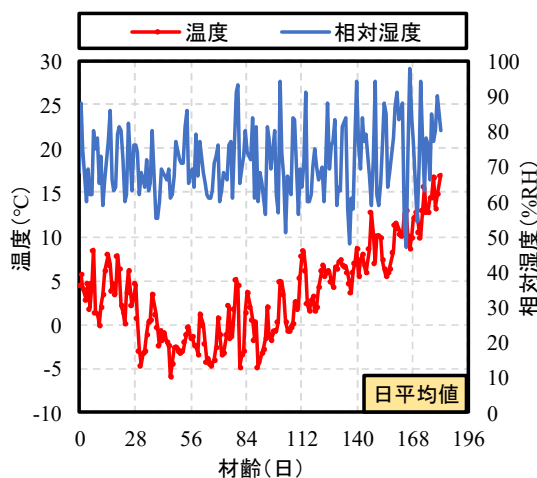


図 4-3-7 屋外の温湿度変動

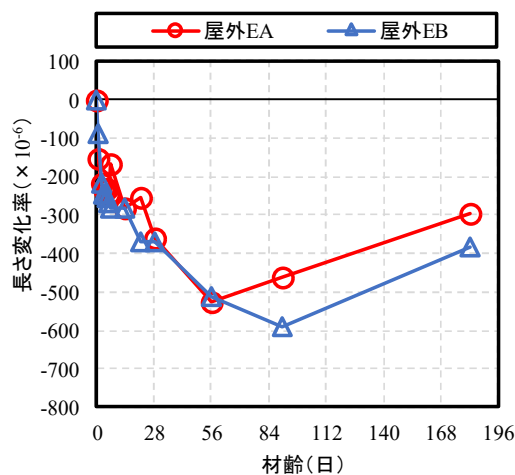


図 4-3-8 屋外供試体の長さ変化率

4-4. ECO-FRPCM の硬化収縮性状の評価方法の最適化

NEXCO 基準では左官工法，吹付け工法の硬化収縮，長さ変化試験は打設後 28 日で評価されているが，**図 4-3-6** の結果からもわかるように打設後 28 日間では収縮が安定しないため，現在 NEXCO で行われている試験方法では収縮によるひび割れや剥離が生じる可能性がある．そこで，左官工法，吹付け工法の収縮試験においても打込み工法と同じ 91 日までの期間で評価を行うことにより安全側で評価を行うことができる．

また，補修材には収縮低減のために収縮低減剤を混入しているが，収縮低減剤と膨張材を併用することによる相乗効果が得られることも知られている．そのため，より収縮を抑えるために左官工法，吹付け工法を対象とした材料であっても膨張材を用いている場合がある．NEXCO 基準では左官工法，吹付け工法には膨張量の基準は設けられていないが，膨張材の収縮補償を考慮するために膨張の性能を**図 4-2-3** の簡易モールド法により膨張量を測定し，収縮補償の判断に用いることを提案する．

4-5. まとめ

ECO-FRPCMの硬化収縮に及ぼす混和剤の影響を膨張剤、収縮低減剤を用いて検討し、養生温湿度の影響を5℃、20℃、30℃で各3水準の相対湿度を用いて実験を行った、本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 膨張剤単体で使用した場合、膨張ピーク後に収縮挙動を示すが、収縮低減剤と併用することで収縮挙動を示さずに7日目まで膨張傾向が続いた。
- 2) ECO-FRPCMの硬化収縮試験における質量変化率は、養生環境の温度と相対湿度の両方の影響を受ける。
- 3) ECO-FRPCMの硬化収縮試験における長さ変化率に対しては、温度ではなく相対湿度の影響が卓越している。
- 4) 温湿度が変化する実環境での長さ変化率を評価する際には、温度変化による線膨張係数の影響を考慮しなければならない。
- 5) NEXCOで行われている試験方法では左官工法、吹付け工法において現在の28日で判断を行うと収縮によるひび割れや剥離が生じる可能性がある。そこで、打込み工法と同じく91日までの期間で収縮評価を行うことに、より安全側で評価を行うことができる。また、左官工法、吹付け工法を対象とした材料であっても膨張材の収縮補償を考慮するために膨張の性能を簡易モールド法により測定し、収縮補償の判断に用いることを提案する。

【参考文献】

- 【1】 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社 : 構造物施工管理要領 : (株)高速道路総合技術研究所, 2013
- 【2】 北山良, 渡辺博志, 久田真, 中村英祐 : 断面修復材の硬化収縮に関する研究, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, 14巻 pp.97-100, 2005
- 【3】 日本材料学会 : コンクリート混和材料ハンドブック, 2004
- 【4】 岩城一郎, 木村悠一郎, 三浦尚 : 周囲の温湿度条件が高強度コンクリートの収縮挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.472-478, 2003
- 【5】 寺本篤史, 堀田和宏, 大久保孝昭, 丸山一平 : 膨張時および収縮低減剤を使用した低水結合材比シリカヒュームセメントペーストの若材齢体積変化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015
- 【6】 鳴海玲子, 張文艶, 岸本嘉彦, 濱幸雄 : 収縮低減剤を用いたモルタルの収縮性状と耐凍害性に及ぼす空隙構造の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.148-153, 2012
- 【7】 林信嘉, 寺西浩司, 前田大介 : モルタルの乾燥収縮に対する空気量および化学混和剤の影響, 日本建築学会学術講演梗概集 (東海), pp.101-102, 2003
- 【8】 浅沼潔, 竹下治之, 藤井学 : 部材厚さが乾燥収縮に及ぼす影響とその評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.621-626, 1995
- 【9】 田畑美紀, 森勇介, 古谷治昭, 高海克彦 : モルタルフローによる研磨砕砂の粒子性状評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.95-100, 2006

第5章 ECO-FRPCMの耐凍害性および凍害劣化が引張性状に及ぼす影響

5-1. はじめに

繊維補強セメント系材料（FRCC）の耐凍害性は、凍結融解試験の工学的特性および微細構造を調べる目的で、様々な研究者によって徹底的に調査されている【1-6】。また、HPFRCCは軽微な凍害を受けても引張性能に著しい低下はない【7】とされているが、凍害がより進行した場合、マイクロクラックやスケーリングにより繊維表面とマトリクスの付着力が低下し引張性能に影響を及ぼす可能性が考えられるが、知見は得られていない。

本研究は繊維種類を変えた繊維補強モルタル（FRM）において凍結融解に有効な繊維を確認したのち、FRMの結果を用いてECO-FRPCMの耐凍害性および凍害劣化が靱性に及ぼす影響を把握する。耐凍害性に関する試験では、相対動弾性係数および質量減少量を検討した。凍害劣化が靱性に及ぼす影響に関する試験では圧縮特性、曲げ特性、靱性についてECO-FRPCMを比較検討する。

5-2. 耐凍害性に及ぼす繊維種類の影響

5-2-1. 実験概要

表 5-2-1, 表 5-2-2 に実験計画と調合を示す. 凍結融解 A 法により劣化を与え, 100 サイクルごとに FRM の圧縮特性および曲げ特性, 質量損失および相対動弾性係数を含む種々の特性を調べた. さらに, 繊維の有無にかかわらずセメント系複合材料の走査型電子顕微鏡 (SEM) 画像による気泡間隔係数, 細孔径分布および微細構造物解析の空隙特性の影響について検討した. 供試体は空気量 4.5% および 7.8% の繊維無混入 Plain 供試体 2 種類 (P1 および P2), 空気量 4.5% および 4.6% の PVA 供試体 2 種類 (PVA1 および PVA2), 空気量 7.5% の PP 供試体 (PP) 1 種類とした. 各調合から, 凍結融解試

表 5-2-1 FRM の耐凍害性実験計画

No.	W/B	S/B	B		繊維量 (vol.%)	SP	試験項目
			C	FA			
PVA1	0.4	0.35	85	15	1.5	0.5	圧縮強度 曲げ性能 耐凍害性
PVA2							
PP							
P1					-	-	空隙特性 SEM 画像
P2					-	0.1	

表 5-2-2 FRM の調合

供試体 種類	W/B (%)	繊維混入率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	FA	S	Fiber
P1	40	0	453	963	170	396	0
P2			453	963	170	396	0
PVA12		1.5	453	963	170	396	19.2
PVA8			453	963	170	396	19.2
PP			453	963	170	396	13.4

表 5-2-3 FRM の使用材料

種類	物理的性質
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度 : 3.15g/cm ³
フライアッシュ	密度 : 2.30g/cm ³ , 粉末度 : 3,228cm ² /g
細骨材 (硅砂)	密度 : 2.54g/cm ³ , 吸水率 : 1.01%, 7 号
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤

験のために、6つの（ $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱、 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ の角柱および3つの $100 \times 20 \times 400$ （幅 \times 厚さ \times 長さ）mm の長方形の試料を調製した。円柱、角柱および平板供試体は、相対湿度 $60 \pm 5\%$ 、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ で1日封緘養生を行い硬化させた後、脱型し、 $20 \pm 3^\circ\text{C}$ の水中で材齢28日まで養生を行った。

表5-2-3にFRMの使用材料を示す。供試体は普通ポルトランドセメント（OPC）およびフライアッシュ（FA）を結合材として用いた。砂には珪砂を用いた。繊維にはPVA繊維（長さ8および12mm）およびPP繊維（長さ12mm）を用いた。PVAおよびPP繊維の物性は第2章に示す繊維と同様であるため省略する。

5-2-2. 実験方法

1) フレッシュ性状

フレッシュ状態はASTM C1437と同様のKSL5111(2005年韓国工業標準試験機関発行)のフローテーブル試験により測定した. 空気量はASTM C231に準拠して測定した.

2) 強度特性

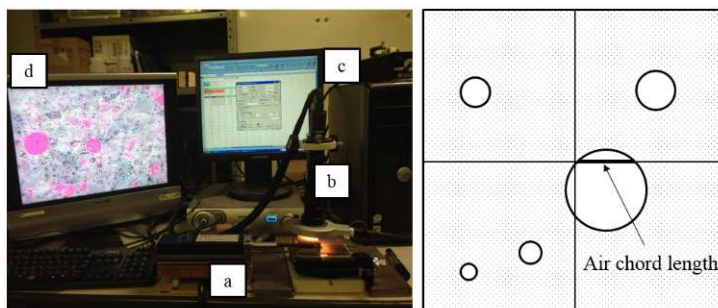
FRM およびプレーン供試体の圧縮および曲げ特性の実験的調査は, それぞれASTM C39 およびASTM C78 に準じて行った.

3) 凍結融解試験

試験にはJIS A 1148を満たす凍結融解試験装置を使用した. これはASTM C666手順B(気中凍結水中融解)と同様である.

4) 空隙特性

本研究では, 写真5-2-1に示す計測機器を用いてセメント系複合材料の空隙特性を解析した. 空隙特性を解析するためのリニアトラバース法は, ASTM C457に沿って行った. 空隙特性の評価は, 空気量, 比表面積, 気泡間隔係数, 弦長, および気泡直径であった. 細孔径分布は, Autopore Master33多孔度計を用いたMIP法を用いて測定した. ここで, 圧力を生成する油圧ポンプと接触センサを用いて侵入する水銀の体積を測定した. 接触角 140° を仮定して, 水銀の表面張力は 0.480N/m , 水銀密度は 13.546g/ml であった.



- a. Linear gauge sensor
- b. Microscope (the camera with charge coupled device)
- c. The controller for video conditions
- d. Monitoring for air-void conditions

写真5-2-1 リニアトラバース法に用いた試験機器

5-2-3. 結果および考察

1) フレッシュ性状

繊維の有無によるセメント系複合材料のフローおよび空気量の試験結果を表 5-2-4 に示す。PVA 繊維を添加することにより、PP 繊維を添加した供試体と比較してワーカビリティが低下する。さらに、PP 繊維は空気連行性を有しており、PVA 繊維より空気量が多くなった PVA1, PVA2, PP の空気量は、それぞれ 4.5%, 4.6%, 7.5%であり、PVA 供試体および PP 供試体の空気量と同等になるように P1 および P2 の空気量を 4.5%および 7.8%とした。

一般的に、耐凍害性のための最適なモルタルの空気量は体積の 4~9%であり【8】本研究では、空気量の影響を考慮し、PVA1, PVA2, P1 と比較して PP と P2 の供試体が耐凍害性に優れることが予測される。しかし、予想される結果と異なる傾向を示した場合、短繊維の補強効果により FRM の耐凍害性が向上したことが確認できる。

2) 圧縮および曲げ性能

図 5-2-1 に凍結融解前後の FRM および Plain 供試体の圧縮強度を示す。PVA1, PVA2 および PS1 の場合、材齢 28 日の圧縮強度はそれぞれ約 47,46 および 57N/mm²であり、繊維の長さにおける影響はない。それぞれの空気量は約 4.5 および 4.6%である。空気量が 7.5 および 7.8%である PP および PS2 では、それぞれ約 37 および 46 N/mm²となり、繊維種類によらず繊維を混入することで圧縮強度が低下する結果となった。

PVA1, PVA2 および PP についての同じ空気量の範囲における圧縮強度は、繊維無添加の供試体における PS1 および PS2 値よりも低いと評価された。しかし、凍結融解サイクル前後の PVA1 および PVA2 供試体の圧縮強度低下率は、それぞれ 1.51%および 2.18%である。一方、凍結融解サイクル後の PP 供試体の圧縮強度低下率は 16.58%と評価された。PP 供試体は、PVA 供試体と比較して、耐凍害性に有効な空気量を有するが、凍結融解サイクルによって圧縮強度が大きく低下する。これは、PVA 供試体に添加された繊維の物理特性および付着特性が、PP 供試体と比較して優れているために有意な結果として現れたといえる。

さらに、PS1 および PS2 供試体の圧縮強度低下率は 20%以上であるが、PS2 の圧縮強度低下率は PS1 未満であることが確認された。これは、PS2 が PS1 と比較して空気量が多いため、凍結時の未凍結水による水圧を緩和させ耐凍害性に優れた結果となっている。

図 5-2-2 に凍結融解前後の曲げ性能を示す。凍結融解前では PVA1 において急激な荷重低下が確認されたが、凍結融解後には緩やかな荷重低下を確認した。PVA2 では凍結融解作用によらず緩やかに荷重低下が起こった。これは PVA1 では PVA2 と比較して繊維長さが短いため引き抜けたと考えられる。PVA1 および PVA2 は凍結融解作用により曲げ強度の低下が観察された。凍結融解作用による FRCC のこれらの特性も報告されている【1】。また、PP は最大曲げ荷重後急激に荷重低下を引き起こし破壊に至った。300

サイクルの凍結融解前後で最大曲げ強度の低下は小さいが、凍結融解の有無によらず PVA 供試体の変形能力よりも著しく低い。

図 5-2-3 に厚さ 30mm の供試体における FRM の曲げ応答およびひび割れ発生状況を示す。凍結融解サイクル後の PVA1 および PVA2 の曲げ性能において、厚さ 100mm の供試体では複数ひび割れは観察されなかった。しかし、厚さ 30mm の供試体は、300 回の凍結融解サイクル後に PVA1 および PVA2 で複数ひび割れが確認された。FRCC は RC 構造物の断面修復や表面被覆を目的に施工される場合 10~30mm の厚さで施工されるため、PVA 供試体においては十分に使用に耐えられる変形性能を有していると考えられる。さらに、PVA 供試体では、一般に耐凍害性に有効な空気量が 5~9%とされているなか、有効な空気量よりも低い結果であるにもかかわらず、PP 供試体と比較して凍結融解後の変形性能が優れている結果となった。

表 5-2-4 FRM のフレッシュ性状

No.	Air (%)	Flow (mm)
PS1	4.5	178
PS2	7.8	195
PVA1	4.5	172
PVA2	4.6	177
PP	7.5	195

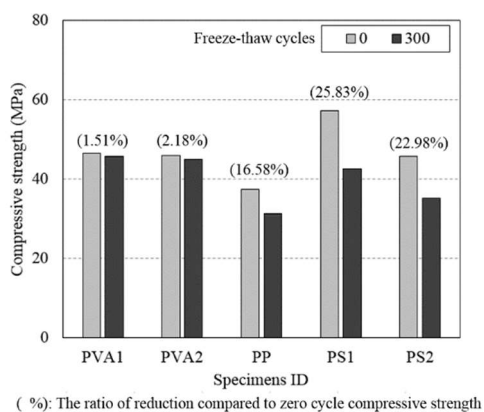


図 5-2-1 凍結融解前後の FRM および Plain 供試体の圧縮強度

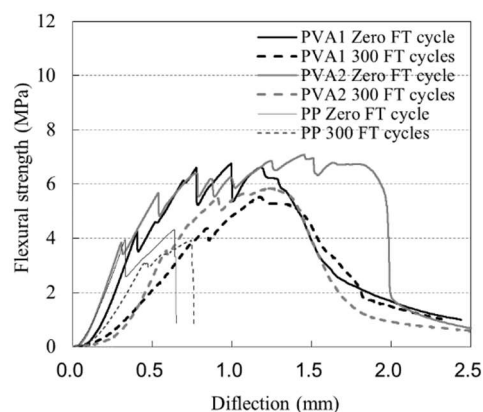


図 5-2-2 凍結融解前後の曲げ性能

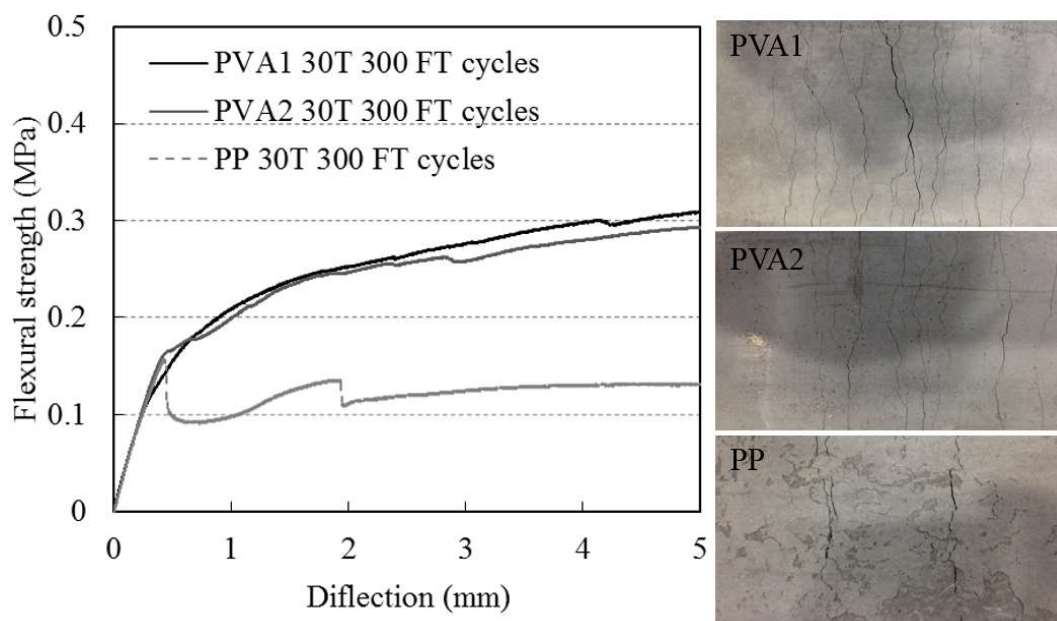


図 5-2-3 FRM の曲げ応答およびひび割れ発生状況

3) 耐凍害性

図 5-2-4 に FRM および Plain 供試体の質量減少率を示す。繊維を混入した供試体は繊維無混入の供試体に比べてスケーリング量が少なく、PS1, PS2 に比べ質量損失率は PP12 で約半分の 0.6%, PVA12, PVA8 で約 3 分の 1 の 0.3% となった。PVA において繊維長さが質量損失に及ぼす影響はない。PP 供試体では同じ空気量範囲における PS2 の質量損失の約半分であり、耐凍害性に有効な空気量を有しているが PVA 供試体のほぼ 2 倍である。

図 5-2-5 に供試体表面のスケーリング状態を示す。PP 供試体では、表面のスケーリングにより混和された繊維の露出が観察された。これらの現象は、繊維の付着特性およびマトリックス界面の影響を受ける。PP 繊維は、繊維の分子構造から水と反応しない疎水性を有しているが、PVA 繊維は分子構造にヒドロキシル基が存在しているためセメントが化学反応により硬化する際に繊維表面が水に溶け、わずかに繊維表面とセメントが混ざるように硬化するため、凍結融解においても界面が弱点とならず、マトリックスと繊維が付着しているが PP 繊維は繊維とマトリックスの界面に水などが存在することで凍結融解作用により付着力が低下しスケーリング抵抗性に劣る結果となった。したがって、マトリックスと繊維界面の付着性状は凍結融解作用によって引き起こされるセメントマトリックスの引張応力低下よりも耐凍害性に影響が大きい。

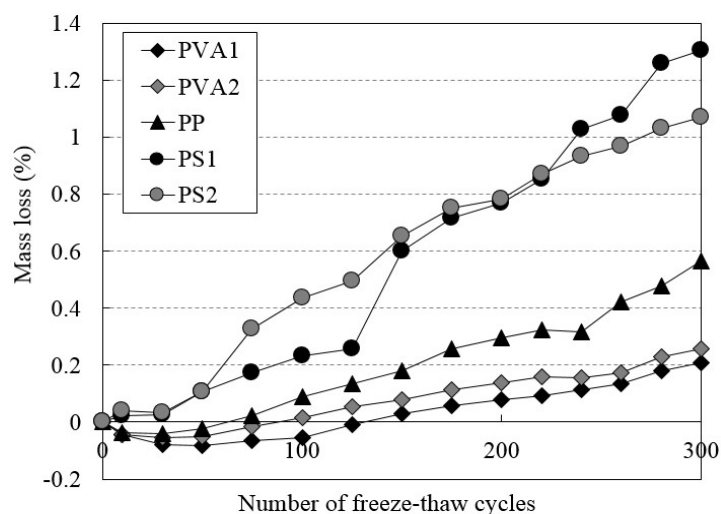


図 5-2-4 凍結融解試験による質量減少率



図 5-2-5 供試体表面のスケーリング状態

FRM および Plain 供試体の凍結融解サイクルと相対動弾性係数の結果を図 5-2-6 に示す。各 PVA 供試体について、300 サイクルの凍結融解後、相対動弾性係数は約 10% 低下する。この結果は既往研究【2】、【9】、【10】と同様に、凍結融解 300 サイクルでは PVA を混入した供試体に顕著な劣化が生じないことを示している。PVA 供試体は空気量が 4.5% 程度と耐凍害性に有効とされる空気量より低い空気量ではあるが、良好な耐凍害性を有している。これは前頁に既述したように PVA 繊維の物理特性により繊維表面とマトリクス界面に弱点ができなかったことにより、水の凍結による膨張圧を負担したと考えられる。

しかし、疎水性を有しマトリクスと摩擦付着を行っている PP 繊維を用いた供試体では、凍結融解作用により繊維とマトリクスとの付着が弱まり、期待していた凍結による

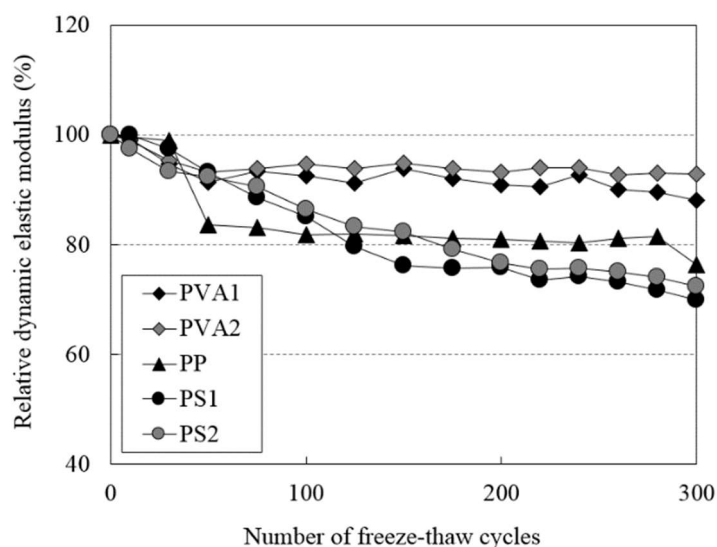


図 5-2-6 FRM および Plain 供試体の凍結融解サイクルと相対動弾性係数

膨張圧を負担できなくなり凍結融解 50 サイクル後において急速に相対動弾性係数の低下が確認され、300 サイクル後に相対動弾性係数は約 76% となり、繊維を混入していない P1 および P2 供試体の相対動弾性係数よりわずかに大きいだけの結果となった。

4) 空隙特性

図 5-2-7 に各供試体の気泡弦長と気泡数の関係を示す。この図から気泡の数は空気の含有量と高い相関を有することが明らかである。また、同じ空気量の範囲では、繊維を混入した供試体の弦長は Plain に比べて均一に分布し、0.03~0.18mm の範囲に偏っていない。以上の FRM の気泡弦長と気泡数との関係から、短繊維の添加とその特性が空隙径に重要な役割を果たしたと言える。すなわち、ランダムに分布した短繊維は複合マトリックス中に微細な空隙を分散させるのではなく、比較的大きな独立した気泡の生成を阻害したことになる。したがって、耐凍害性に有効な気泡が多く混入されたと考えられる。これらの結果は、既往研究【3】で見出された結果と一致する。

さらに、各供試体の空隙特性を表 5-2-5 に示す。FRM の硬化後の空気量は、フレッシュ時の空気量と比較的同一の結果を示した。しかし、PS1 および PS2 供試体では 1.0% 以上に増加した。PVA および PP 供試体において、比表面積はそれぞれ 27.8, 29.4 および 28.8mm⁻¹ である。さらに、PS1 および PS2 混合物の比表面積は 44.5 および 31.2mm⁻¹ であり、これらの値は FRM 供試体よりも大きかった。混和された短繊維は、弦長および気泡の直径の平均値を有意に増加させることが観察される。PS1 混合物の気泡弦長と気泡直径の平均値は、空気の含有量の影響によって減少した。しかし、空気量が 5% 未満である PVA 供試体では、気泡弦長および気泡直径の平均値は約 7% の空気含量の混合物と比較的同一であることが観察された。一般に耐凍害性に有効とされている気泡間隔係数は 0.250mm 以下であり、PVA 供試体ではそれを上回っているため下回っている PP 供

試体より空気量の観点から言っても耐凍害性が劣っているはずである。しかし、今回の気泡間隔係数の結果は PVA 供試体の質量損失および相対動弾性係数を含む耐凍害性に悪影響を及ぼさず PVA 供試体は著しい質量損失および表面スケーリングも観察されなかった。しかし、気泡間隔係数 0.250mm 以下であった PP, PS1 および PS2 では凍結融解試験において耐凍害性を確保することができなかった。

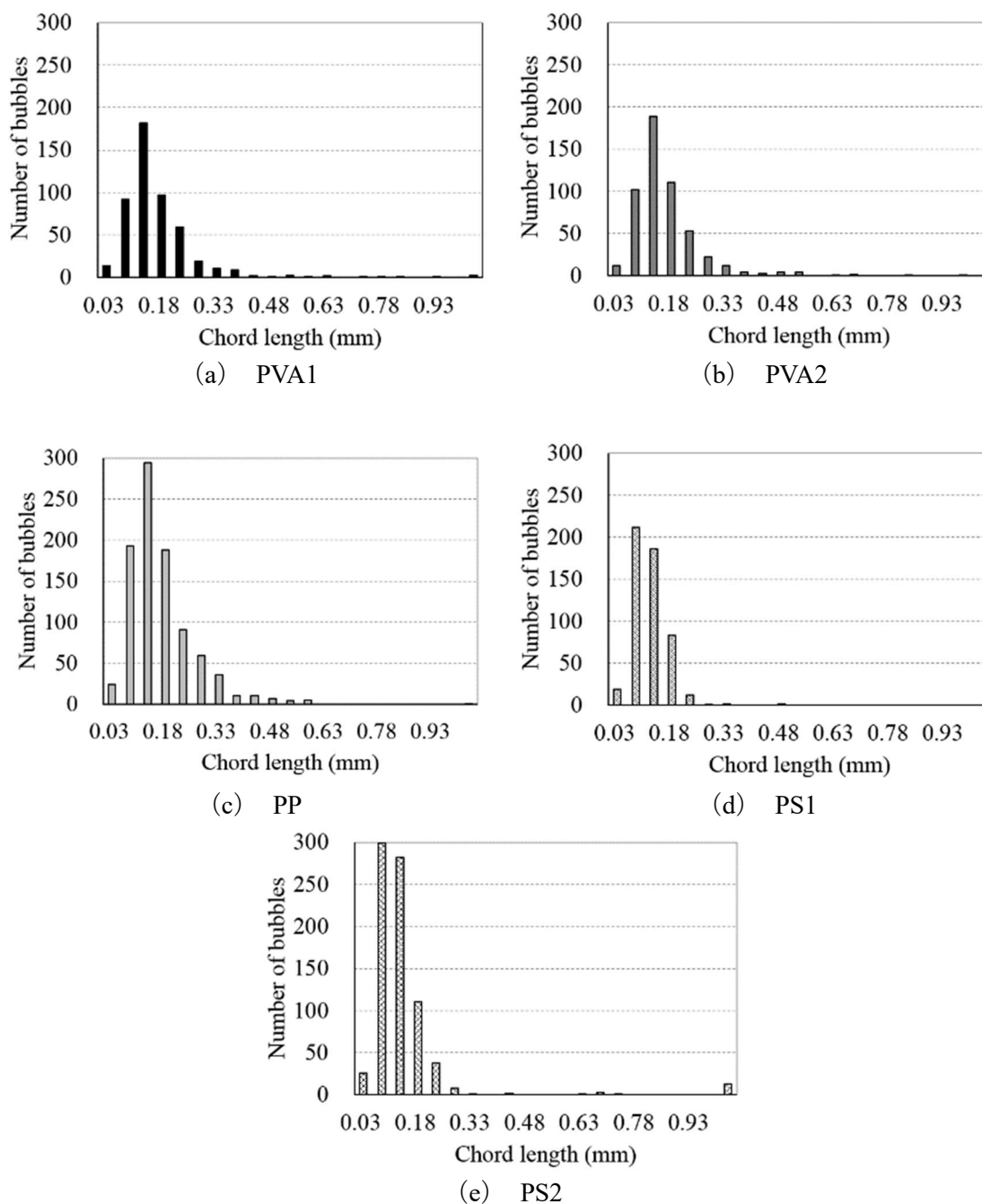


図 5-2-7 各供試体の気泡弦長と気泡数の関係

表5-2-5 各供試体の空隙特性

	PVA1	PVA2	PP	PS1	PS2
Hardened air content (%)	4.8	4.7	7.3	3.1	6.8
Specific surface (mm^{-1}) ^a	27.8	29.4	28.8	44.5	31.2
Spacing factor (mm) ^a	0.292	0.279	0.233	0.218	0.222
Average chord length (mm)	0.144	0.136	0.139	0.090	0.128
Average bubble diameter (mm)	0.216	0.204	0.208	0.135	0.192

^a For freeze/thaw resistant concrete, the American Concrete Institute (ACI) recommends that [10]: Min. specific surface = 24 mm^{-1} , and Maximum spacing factor = 0.2 mm.

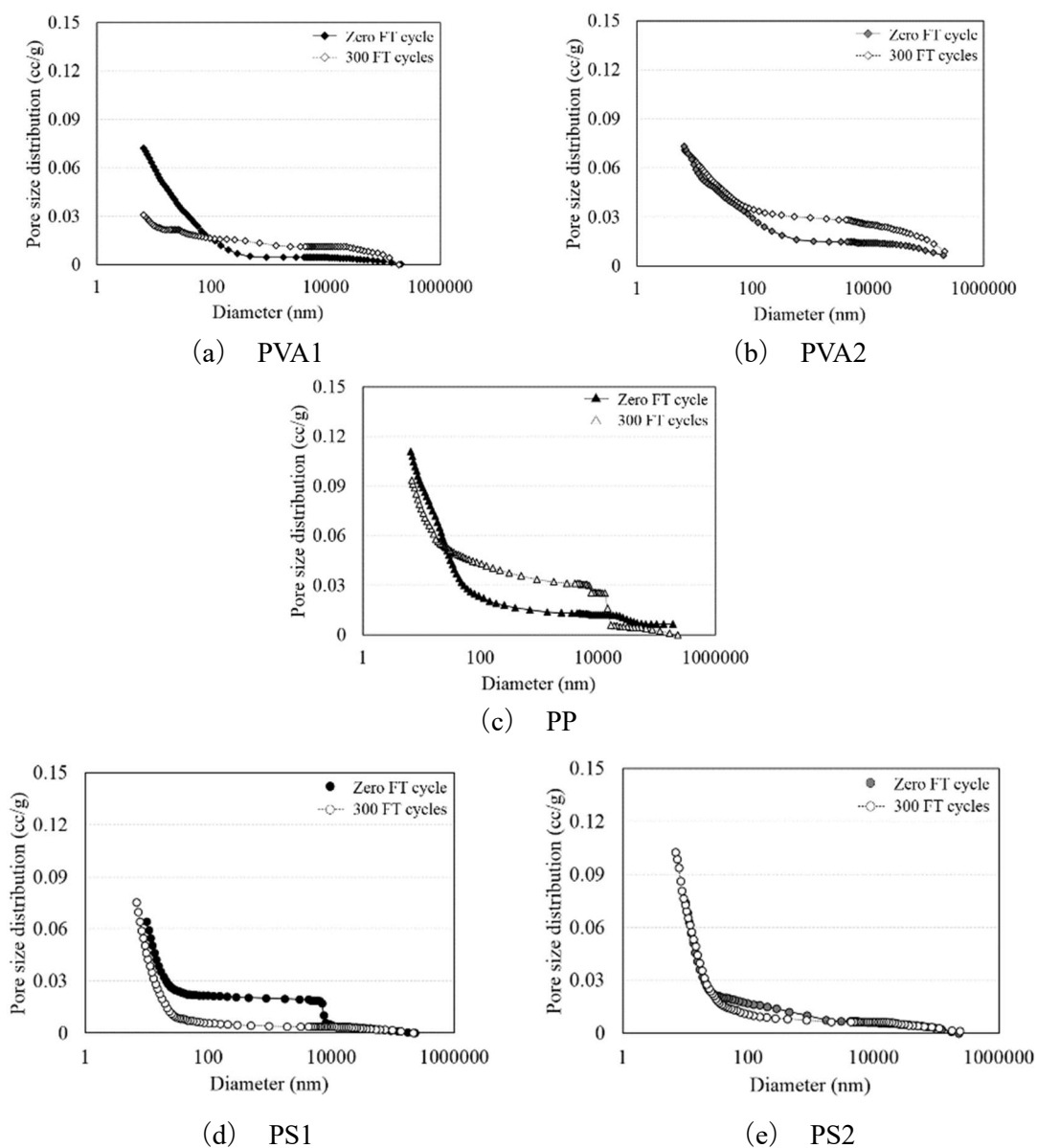
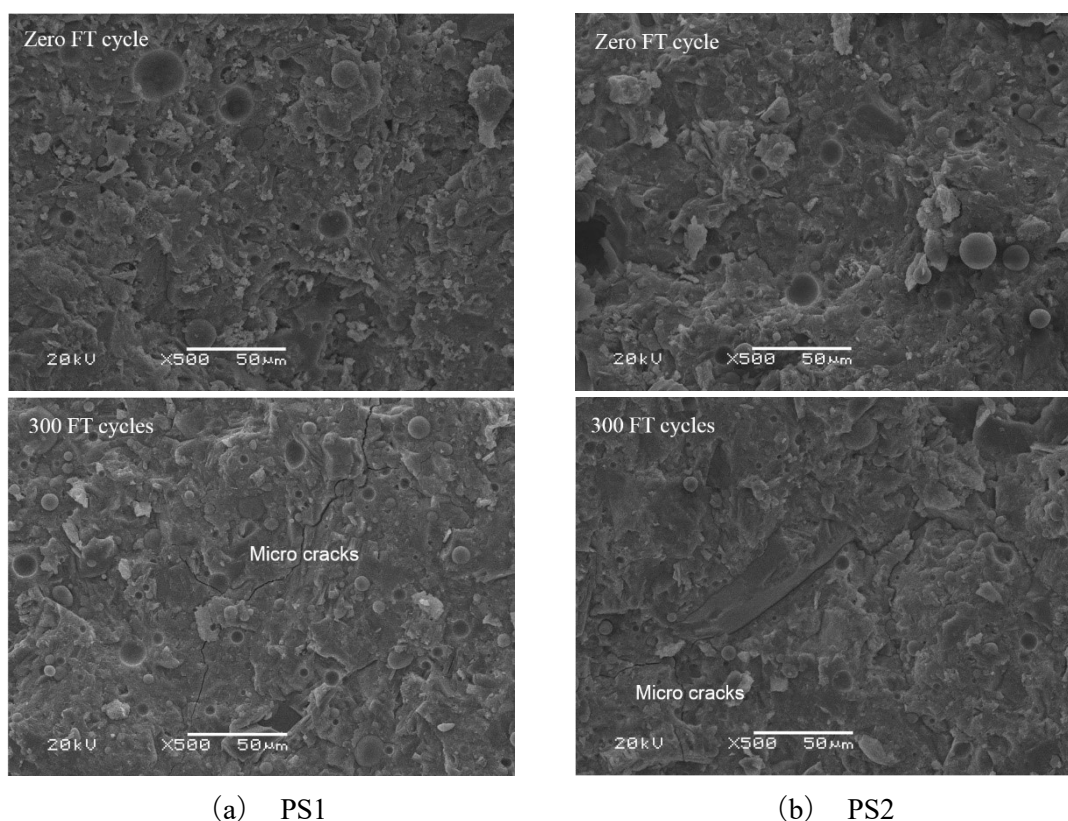


図 5-2-8 凍結融解前後の細孔径分布

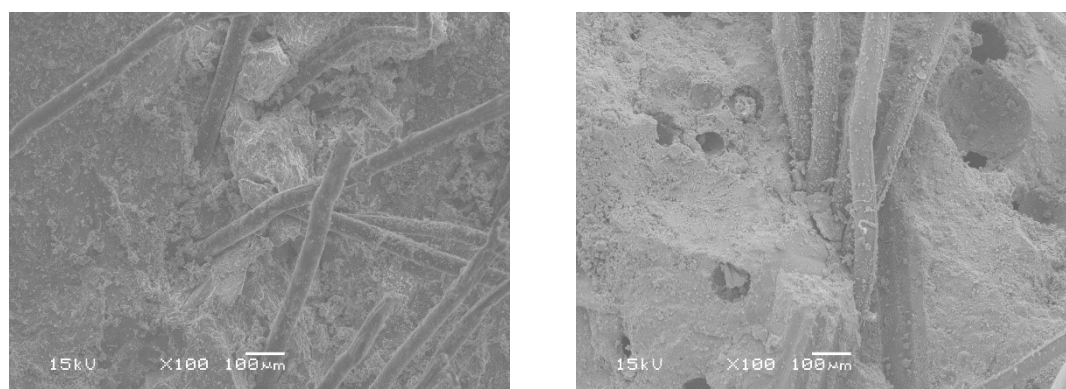
図5-2-8に凍結融解前後の細孔径分布を示す。繊維を混入したPVA1, PVA2, PP供試体はPS1およびPS2供試体と比較して、凍結融解300サイクル後に100から10,000nmの範囲の細孔直径が増加した。PS1では凍結融解前に10000nmの細孔が多く存在しているがPVA供試体では100nm以下の気泡が比較的多く存在している。PS2では凍結融解の有無によらず細孔径分布に変化は確認されなかった。既往研究【11-13】によれば、セメント系複合材料の直径が約300nmより大きい孔は良好な耐凍害性を有していることが知られており、FRMにおいても直径300nmを超える細孔が確認された。しかし、PP, PS1およびPS2は、PVA1およびPVA2と比較して著しく小さい細孔を有する。既往文献によれば、セメント系硬化体において無限小の細孔が凍結融解抵抗性に寄与しないため、影響を受けない【14】とされている。

PS1およびPS2は、凍結融解300サイクル後に全細孔で空隙量の減少が確認され、凍害に対して空気量が不十分であると考えられる。特にPS1においてより明瞭に観察された。上記の考察に基づいて、耐凍害性と細孔構造との間の傾向を確認することはできない。しかし、この研究では、300サイクルの凍結融解作用後の細孔減少に対する短繊維補強の有効性が確認された。



(a) PS1 (b) PS2

図5-2-9 PS1およびPS2の300サイクル後のSEM画像



(a) PVA1 (b) PP

図5-2-10 凍結融解前のPVAおよびPP繊維の分散状況

図 5-2-9 に PS1 および PS2 の 300 サイクル後の SEM 画像を示す。図から、セメント系マトリックスの比較的大きな細孔が凍結融解 300 サイクル後に減少することが観察され、これは PS1 と PS2 の 100nm 未満の細孔の細孔径分布に関する結果 (図 5-2-9) との関連性を示している。さらに、PS1 および PS2 の SEM 画像では凍結融解前と比較して、300 サイクル後にマイクロクラックの発生が明瞭に観察された。

図 5-2-10 に凍結融解前の PVA および PP 繊維の分散状況を示す。FRM の耐凍害性については、均一分散と分散不良の間に高い正の相関があることが判明した。PVA 繊維と比較して PP 繊維は数本まとまってマトリクス内に存在しているため分散不良が窺えるため、耐凍害性を阻害する要因の一つであると考えられる。さらに図 5-2-11 の SEM 画像には繊維とセメント系マトリックスとの界面の接着状況を示している。図から、PVA1 および PVA2 試料中の繊維の周りには多くのセメント系マトリックスが残っていることが分かる。しかし、PP 試料では凍結融解 300 サイクル後にはセメント系マトリックスがほとんど付着していない。図 5-2-11 (a) および (b) に示すように、凍結融解作用を受けた PVA 繊維は表面スケーリングの抵抗に大きく寄与する。一般に、セメント系マトリックスと混入繊維との界面遷移ゾーン (ITZ) は、繊維補強材料における最も重要である。

Li と Stang 【15】は、ITZ 微細構造物が、セメント系複合材の繊維の大きさおよび繊維の種類にかかわらず、0.04~0.07mm の比較的大きな厚い多孔質層および弱い層に形成されたことを報告した。ITZ の組成は、FRCC の耐凍害性の弱いリンクの形成に重要な役割を果たすと言える。セメント系マトリックスとブレンドされた繊維との間の ITZ が、凍結融解繰り返し作用下で FRCC の表面スケーリングに影響を及ぼすからである【16】。

図 5-2-12 に繊維種類におけるマトリクス-繊維界面の状況を示す。図から明らかのように、PP は貧弱な分散配合繊維の影響を受け、PVA1 と比較して ITZ 層を覆っている。したがって、ITZ による脆弱層の増加は、FRCC の微小亀裂に起因する ITZ の凍結融解サイクルに起因する FRCC の機械的特性に小さな影響を及ぼす。

さらに、PVA1の繊維/セメントマトリックス接触表面は、PVA繊維の親水性のためにPPと比較して凹凸が目立つ。

上記の観察に基づいて、ファイバタイプおよびセメントマトリックスの界面特性を調べた。本研究では、繊維の物性および表面特性が耐霜性に大きく影響することが観察されたが、混合繊維の長さの効果は不確実であった。

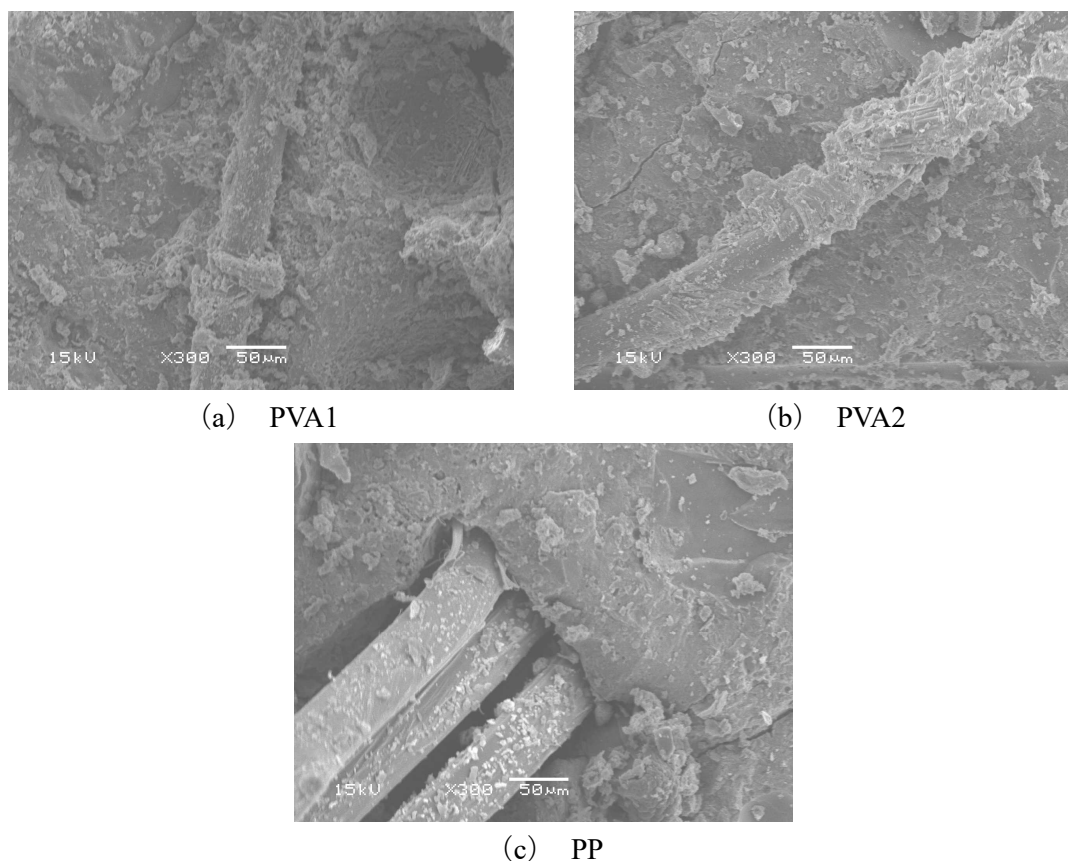


図5-2-11 300サイクル後の各繊維のSEM画像

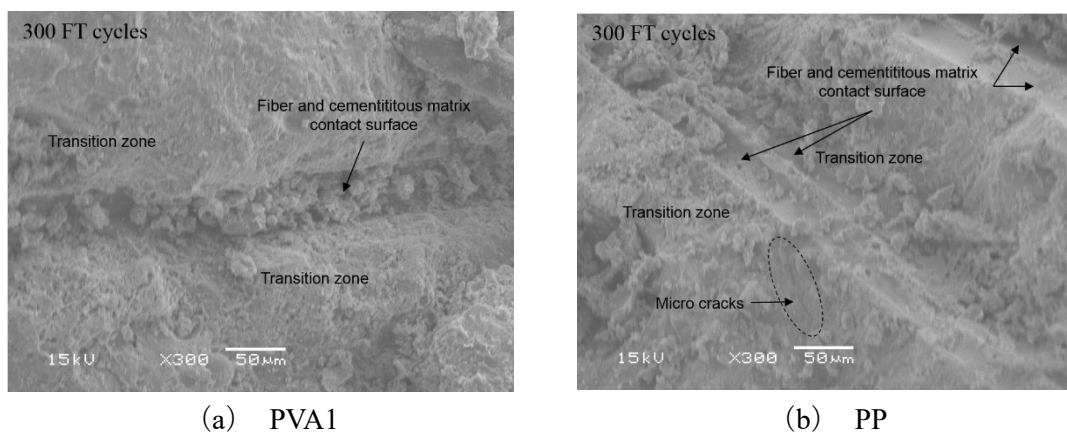


図5-2-12 繊維種類におけるマトリクス-繊維界面の状況

5-3. ECO-FRPCM の耐凍害性および凍害劣化が引張性状と強度に及ぼす影響

5-3-1. 実験概要

硬化性状および耐凍害性（シリーズ 1）の実験計画を表-5-3-1 に示す。シリーズ 1 の硬化性状試験では現場での水の使用範囲を考慮し、水の使用量の上限、下限およびその中間の 3 水準で水結合材比（W/B）を設定した。冬期および夏期での施工を想定し、養生温度を 5（L）、20（M）、30（H）℃とした。練り混ぜの際、練上がり温度がそれぞれ 5、20、30℃となるよう練り混ぜ水および粉体を練り混ぜ直前まで各温度の恒温室で保管した。静弾性係数は 20℃水中（W）および気中養生に対して測定した。凍結融解試験では、施工環境として標準期 20℃と冬期 5℃を想定した養生条件とし、水結合材比は硬化性状試験と同様に 3 水準とした。供試体の記号は数字が W/B を示し、文字が養生条件を示す。

凍害劣化が引張性能に及ぼす影響（シリーズ 2）の実験計画を表 5-3-2 に示す。使用した供試体は、シリーズ 1 の 36M と同様の供試体を用いて標準養生後、一軸直接引張試験を行った。耐凍害性に優れた FRPCM に凍害劣化を与えるため、凍結融解試験前に真空吸水により飽水状態とした後に気中凍結水中融解試験（JIS A 1148 B 法）を行い、相対動弾性係数（RDM）が所定の値まで低下した段階で、一軸直接引張試験、曲げ強度試験および圧縮強度試験を行った。

表 5-3-3 に FRPCM の配合を、表 5-3-4 に使用材料、表 5-3-5 に実験に使用した合成繊維の物性値を示す。結合材（B）には普通ポルトランドセメント（C、密度 3.17g/cm³）、フライアッシュⅡ種（FA、密度 2.33g/cm³）、シリカヒューム（SF、密度 2.25g/cm³）および膨張材（EX、2.93g/cm³）を用いた。細骨材（S、表乾密度 2.62 g/cm³）に粒径の異なる高炉スラグ細骨材（S_L:粒径 0.6mm 以下、S_M:粒径 0.6~1.2mm）、ポリマーにはポリオキシアレン化合物を用いた。シリーズ 1 およびシリーズ 2 の砂結合材比（S/B）は 70%、繊維は供試体の体積あたり 1.5%を混入し、ビニロン（PVA）繊維とポリエチレン（PE）繊維を体積混入比 60：40 とした。なお、繊維のスナビング係数は既往研究【17、18】で報告されている値を用いた。

表 5-3-1 硬化性状および耐凍害性の実験計画（シリーズ 1）

繊維量 (%)	繊維種類	W/B (%)	Temp (°C)	Air (%)	養生条件	試験項目
1.5	PVA:PE (60:40)	34 36* 38	5	7±2	5°C60%RH	圧縮強度 曲げ強度 静弾性係数*
			20*		20°C60%RH*	
			30		30°C60%RH	
					20°C水中*	
			5		5°C水中	凍結融解
			20		20°C水中	気泡組織

表 5-3-2 凍害劣化が引張性能に及ぼす影響の実験計画 (シリーズ 2)

繊維量 (%)	繊維種類	W/B (%)	劣化程度	劣化方法	試験項目
1.5	PVA:PE (60:40)	36	劣化なし* RDM80% RDM60%* RDM40%	真空吸水後 凍結融解 B 法	一軸直接引張 圧縮強度* 曲げ強度*

表 5-3-3 ECO-FRPCM の調査

W/B (%)	S/B (%)	繊維量 (%)	P/C (%)	単位量 (kg/m ³)												
				W	結合材 (B)				砂 (S)		P	SR	減水剤	消泡剤	AE 剤	
					C	FA	SF	EX	S _M	S _L						
34	70	1.5	9	348												
36				368	665	256	20	82	527	226	60	40	0.70	2.51	0.15	
38				389												

表 5-3-4 ECO-FRPCM の使用材料

使用材料	記号	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント (密度 3.17g/cm ³)
フライアッシュ	FA	JIS II種 密度 2.33g/cm ³
シリカフェーム	SF	密度 2.25g/cm ³
膨張材	EX	エトリンナイト系膨張材 密度 2.93g/cm ³
高炉スラグ細骨材	S _L	粒径 0.6~1.2mm, 表乾密度 2.62g/cm ³
	S _M	粒径 0.6mm 以下, 表乾密度 2.62g/cm ³
ポリマー	P	酢酸アクリル系化合物
収縮低減剤	SR	ポリオキシアレン化合物
減水剤	—	減水剤:ポリカルボン酸系
消泡剤	—	消泡剤:ポリエーテル系
AE 剤	—	脂肪族アルコール系

表 5-3-5 繊維物性値

物性	PVA	PE
繊維体積率 V_f (%)	0.9	0.6
繊維長さ L_f (mm)	8.0	9.0
繊維直径 d_f (mm)	0.04	0.012
繊維弾性率 E_f (N/mm ²)	36000	88000
スナビング係数 f	0.5	0.55

曲げ・圧縮強度試験は JIS A 1106 および JIS A 1108 に準じて、40×40×160mm の供試体を用い、養生温度 20℃および 30℃では材齢 1, 3, 7, 28, 91 日で、養生温度 5℃では材齢 2, 4, 7, 28, 91 日で行った。静弾性係数の測定は、φ100×200mm の供試体を用いて所定の材齢まで 20℃気中または水中養生を行い、コンプレッソメーターおよび動ひずみ計を用いて JIS A 1149 に準じて材齢 3, 7, 28 日で行った。

シリーズ 1 の凍結融解試験は 100×100×400mm の供試体を用い、凍結融解開始前の養生条件を 5, 20℃水中養生として、JIS A 1148 A 法に準じた融解温度 5℃、凍結温度-18℃の 4 時間/サイクルの凍結融解を 300 サイクル継続した。測定項目は相対動弾性係数と質量減少率とした。また、ASTM C457 (リニアトラバース法) により気泡間隔係数を測定した。なお、ペースト率は配合からの計算値を採用した。

一軸直接引張試験は、厚さ 13mm、幅 30mm のダンベル型供試体【19】を 3 体作製し、電気機械式万能材料試験機 (インストロン 5989) を用いて、変形速度 0.5mm/min の速度で引張荷重を載荷し、供試体固定治具間の距離 (約 16cm) の変位を測定してひずみを算出した。

5-3-2. 結果および考察

ECO-FRPCM のフレッシュ性状を表 5-3-6、曲げ強度を図 5-3-1 に、圧縮強度を図 5-3-2 に示す。曲げ強度では 30°C 養生より 20°C 養生の結果が高くなったものの、圧縮強度では W/B が低いほど、また養生温度が高いほど圧縮強度は高かった。水中養生を行うことで気中養生より水分供給によって 28 日以降は 30°C 養生と同等以上の圧縮強度となった。5°C 養生では 7 日以降 20°C 養生より約 10N/mm² 低い結果となった。

図 5-3-3 に材齢 28 日の 36M の圧縮強度に対する水結合材比ごとの材齢 28 日の圧縮強度比を示す。水結合材比による圧縮強度の影響は小さいものの、養生温度では冬季施工を想定した 5°C 養生で 2 割以上の強度低下が確認され、冬季の現場で使用する場合は十分に注意する必要がある。

図 5-3-4 に養生方法および水結合材比ごとの FRPCM の静弾性係数を示す。W/B=38% 以外は材齢 7 日以降の静弾性係数は同程度である。また、W/B=34% では養生方法による明確な差が見られないが、W/B=36, 38% では水中養生を行うことで水和反応が進み静弾性係数は大きくなる傾向が確認できた。

表 5-3-6 フレッシュ性状

記号	空気量 (%)	Flow (mm)	記号	空気量 (%)	Flow (mm)	記号	空気量 (%)	Flow (mm)
38H	9	126	36H	9	130	34H	8.8	124
38M	6.9	125	36M	6	121	34M	5.6	125
38L	7.4	145	36L	7	129	34L	7.1	129

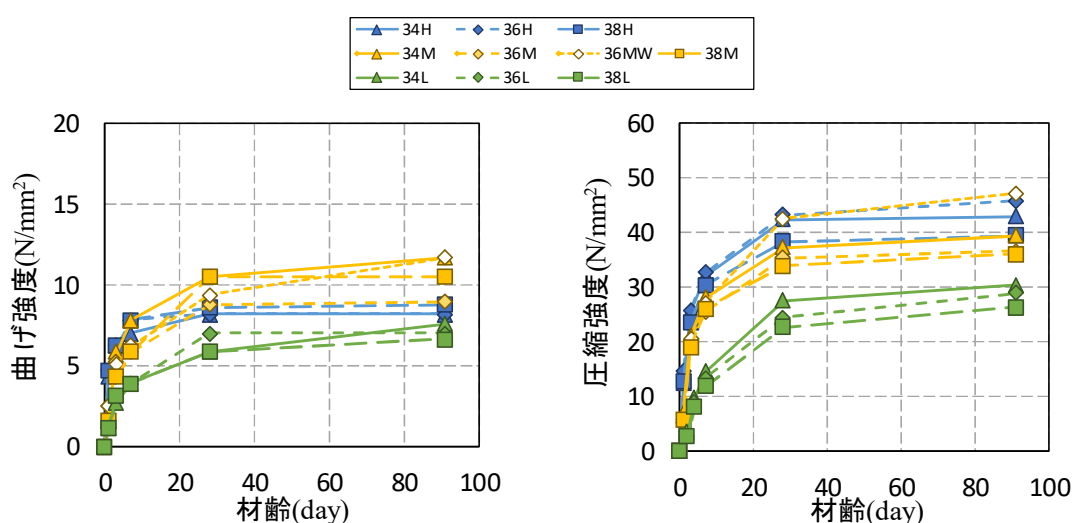


図 5-3-1 養生方法および W/B が FRPCM の曲げ強度に及ぼす影響

図 5-3-2 養生方法および W/B が FRPCM の圧縮強度に及ぼす影響

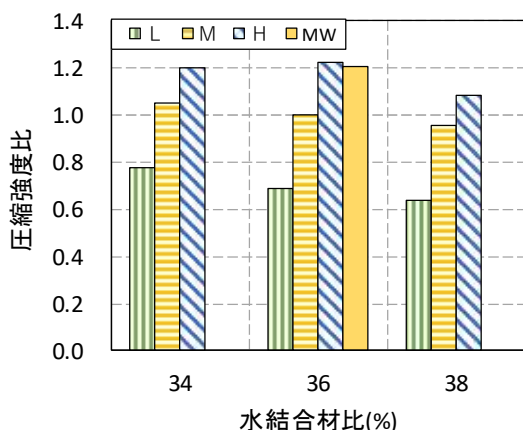


図 5-3-3 養生方法および W/B ごとの圧縮強度比 (28日)

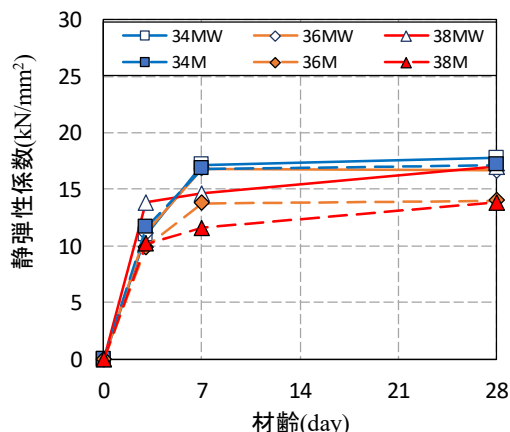
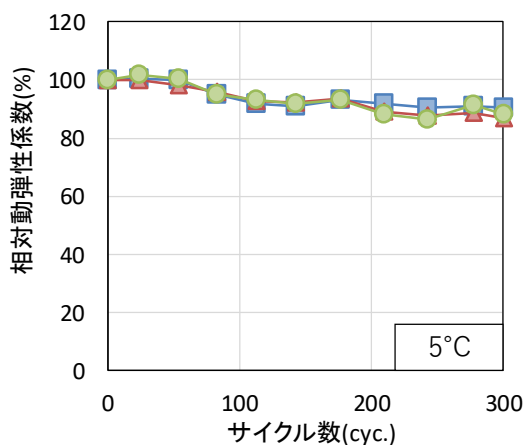


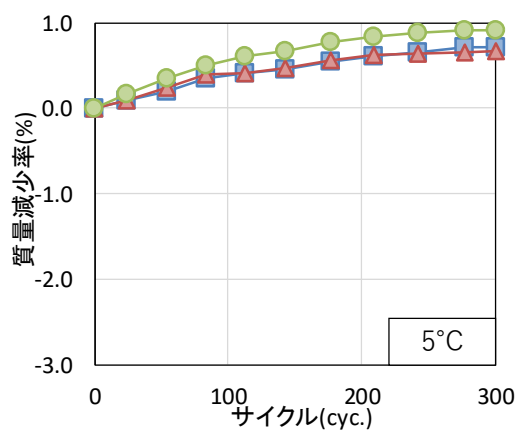
図 5-3-4 養生方法および水結合材比ごとの静弾性係数

図 5-3-5 に養生温度および水結合材比が FRPCM の耐凍害性に及ぼす影響を、図 5-3-6 に水結合材比ごとの FRPCM の耐久性指数の耐久性指数を示す。養生温度によらず耐久性指数 85 以上の優れた耐凍害性を示したが、20°C養生に比べて 5°C養生でやや劣化が進行する結果となった。また、5°C養生の場合にわずかな質量増加もみられた。FRPCM の推奨範囲内で混練水量が変動しても、耐凍害性に大きな影響はないが、低温環境下では劣化が進行する可能性があるため温度管理に配慮し養生を行う必要がある。

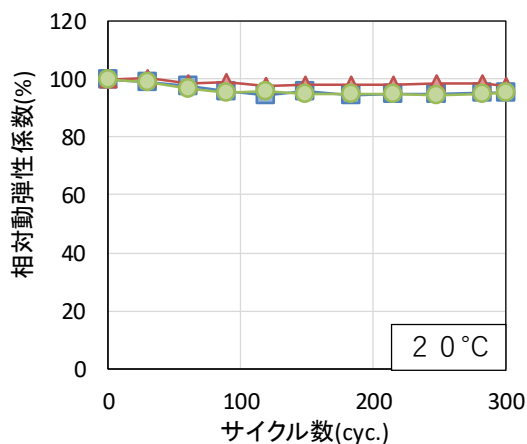
図 5-3-7 に気泡間隔係数と耐久性指数の結果を示す。一般に耐凍害性に有効とされる気泡間隔係数は 250 μm 以下【20】とされているが、本研究においても耐久性指数 85% 以上を示したすべての供試体で気泡間隔係数 250 μm 以下であることを確認した。



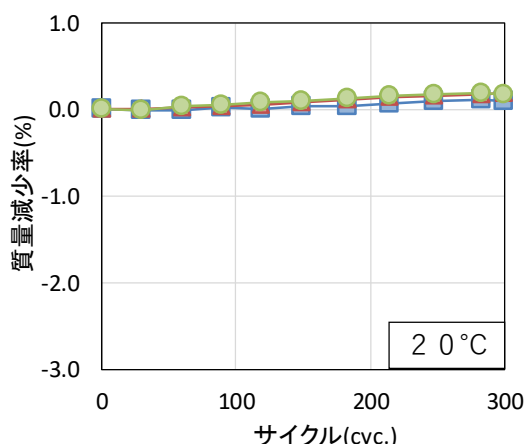
(a) 養生温度 5°C-相対動弾性係数



(b) 養生温度 5°C-質量減少率



(c) 養生温度 20°C-相対動弾性係数



(d) 養生温度 20°C-質量減少率

図 5-3-5 養生温度および水結合材比が FRPCM の耐凍害性に及ぼす影響

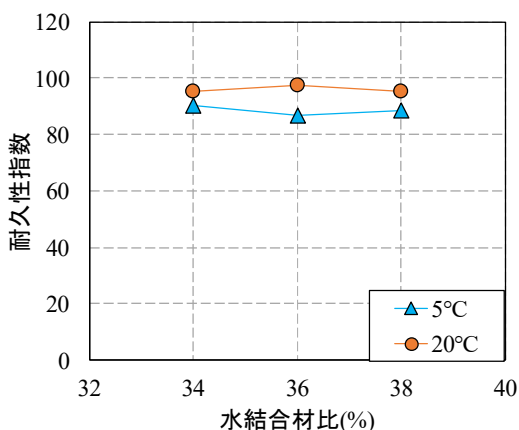


図 5-3-6 水結合材比ごとの FRPCM の 耐久性指数

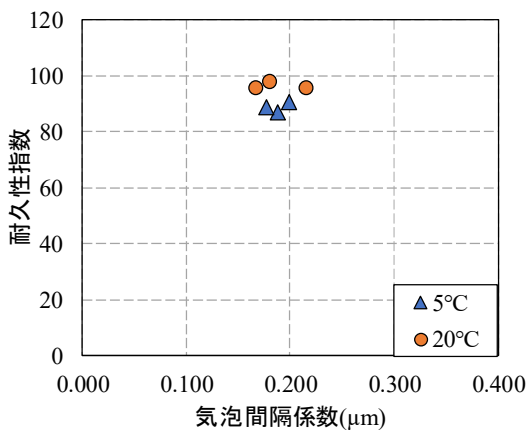


図 5-3-7 気泡間隔係数と耐久性指数

図 5-3-8 に凍害劣化程度が引張応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を相対動弾性係数 (RDM) 100%, 80%, 60%, 40%の結果を示す. 凍結融解を受けていない RDM100%の供試体では疑似ひずみ硬化挙動を示している. また, 凍結融解作用を受けた RDM80%の供試体とを受けていない RDM100%の供試体を比較すると, 引張応力の最大値に明確な差異はなく, RDM80%では凍結融解が ECO-FRPCM の引張性能に与える影響は小さい.

凍結融解作用を受けた RDM60%の供試体では疑似ひずみ硬化挙動を示さずに最大引張応力に達した後にほとんどが軟化挙動を示しており, RDM80%と比較しても明らかに挙動が変化していることがわかる. さらに, RDM40%の場合には他の条件の場合とは異なり, 疑似ひずみ硬化挙動は示していないが, RDM60%よりもひずみ軟化挙動の勾配が緩やかになっている. これは凍結融解作用によりマトリクスに微細ひび割れが多数発生し, 応力を負担できずに繊維だけで応力を負担していると考えられる.

図 5-3-9 に凍害劣化程度と各強度・応力の変化を、図 5-3-10 に凍害劣化程度と各強度比の変化を示す。強度比は RDM100%の強度・応力に対する比で示す。RDM60%まで劣化することによってマトリクスにひび割れが入り圧縮では約 10N/mm²、曲げでは約 4N/mm²の強度低下を起こす。既往研究【21】では RDM60%の曲げ・圧縮強度比はそれぞれ約 0.4 と 0.7 だが、今回の結果では曲げ・圧縮強度比は約 0.6 と 0.7 であり、繊維を混入した分だけ曲げ強度において強度低下が抑えられたと考えられる。

初期ひび割れ応力比では、RDM80%まで同程度であるが、それ以降では低下傾向を示し、RDM40%では約 60%まで低下することがわかる。初期ひび割れ応力はマトリクス部分で引張応力を負担するため、曲げ・圧縮強度と同様の傾向を示すと思われたが、RDM60%では 10%程度の低下となった。

引張強度では RDM60%まで引張強度にほとんど影響はないが、RDM40%では初期ひび割れ強度同様に約 60%まで低下する。この理由として凍結融解作用により繊維付着強度が低下したためと考えられる。

図 5-3-11 に凍害劣化程度と繊維付着強度の関係を示す。繊維付着強度は既往研究【22】を参考とし、式 (5-1) および式 (5-2) を用いて、式 (5-3) から求めた。

$$\sigma_{cu} = 1/2 g \tau V_f (L_f/d_f) \quad \dots (5-1)$$

$$g = 2 (1 + e^{\pi f/2}) / (4 + f^2) \quad \dots (5-2)$$

$$\tau = 2\sigma_{cu} / (V_f (L_f/d_f) \{2 / (4 + f^2) (1 + e^{\pi f/2})\}) \quad \dots (5-3)$$

ただし、 τ : 繊維付着強度 (N/mm²)、 σ_{cu} : 最大引張応力 (N/mm²)、 V_f : 繊維体積率 (%), L_f : 繊維長さ (mm)、 d_f : 繊維直径 (mm)、 f : スナビング係数、 g : スナビングファクターとする。ここで τ は凍害劣化の程度によって変化する σ_{cu} に依存しているため、繊維付着強度は RDM 80%および 60%では変化が少なく、凍害劣化による影響はないと考えられる。しかし、RDM40%では著しく低下している。これは凍結融解作用により、PVA 繊維と PE 繊維のマトリクス界面の水分が膨張・収縮を繰り返し、繊維-マトリクス界面の付着が減少したことが考えられる。

本研究での靱性評価は既往研究【23】を参考に、擬似ひずみ硬化挙動を示す場合は、初期ひび割れ応力と同程度の応力をひずみ軟化域から読み取り、ひずみ軟化挙動を示す場合は、最大引張応力時のひずみを終局ひずみとした。

図 5-3-12 に凍害劣化程度が終局ひずみに及ぼす影響を示す。終局ひずみは RDM40%まで凍害劣化が進行するにともない直線的に減少している。図 5-3-9 に示した曲げ・圧縮強度の劣化傾向との関係が考えられたが 2 点の結果では明言できず、今後の課題とする。

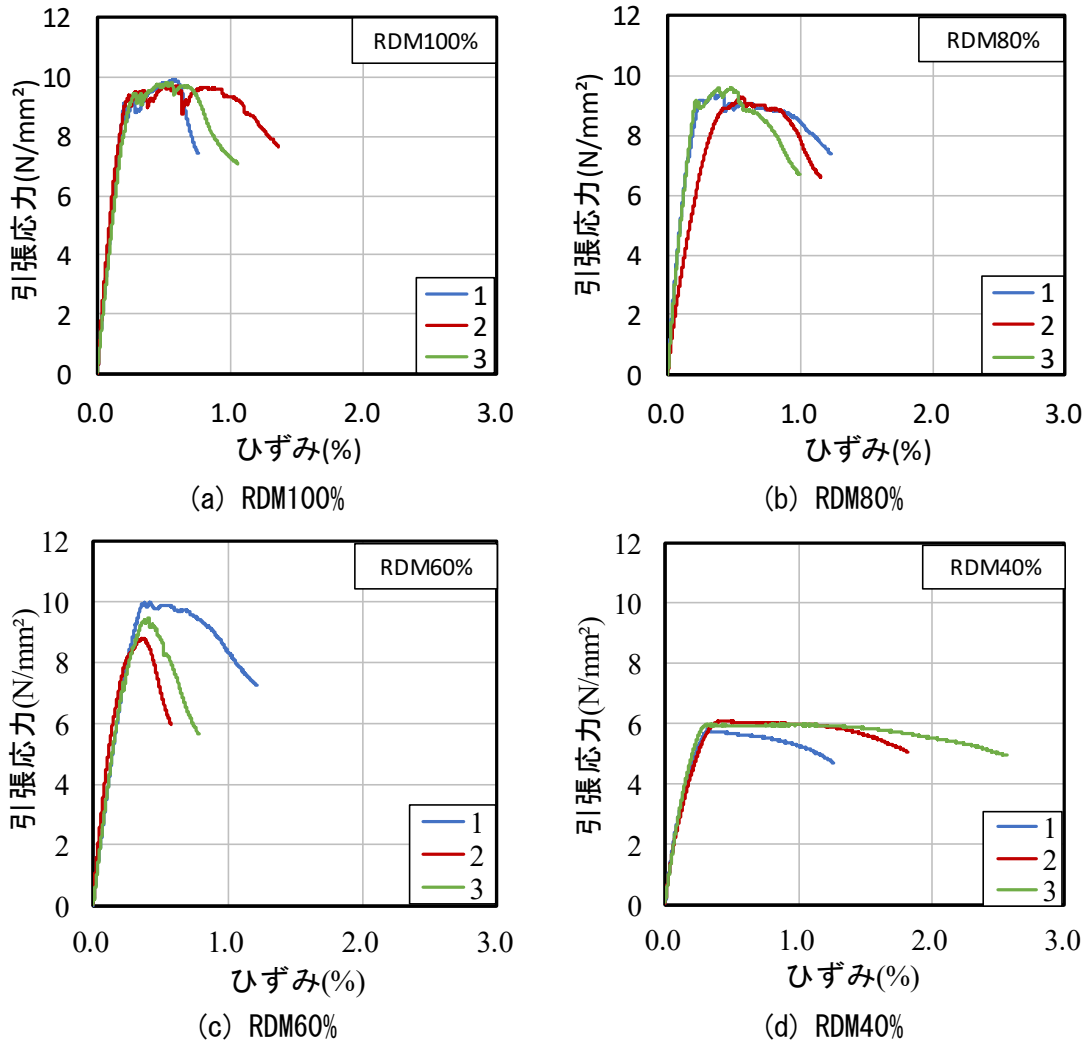


図 5-3-8 凍害劣化程度が引張応力—ひずみ曲線に及ぼす影響

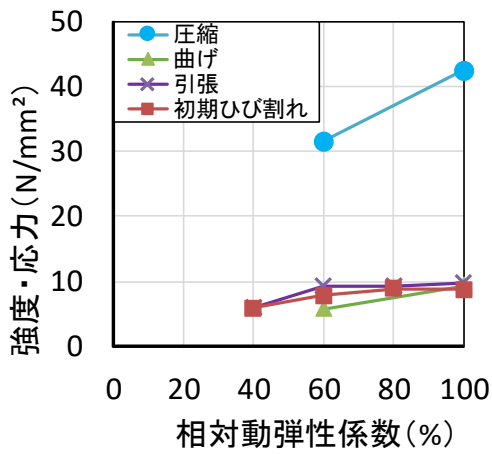


図 5-3-9 凍害劣化程度と各強度・応力の変化

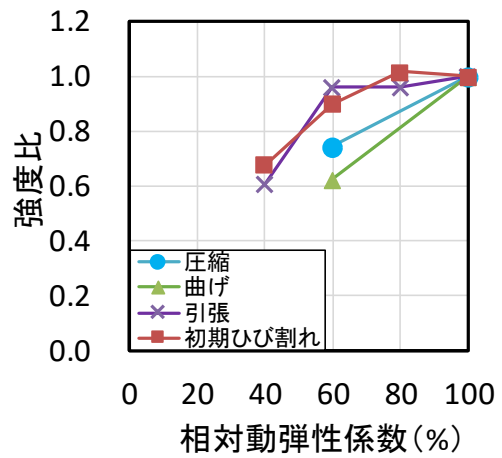


図 5-3-10 凍害劣化程度と各強度比の変化

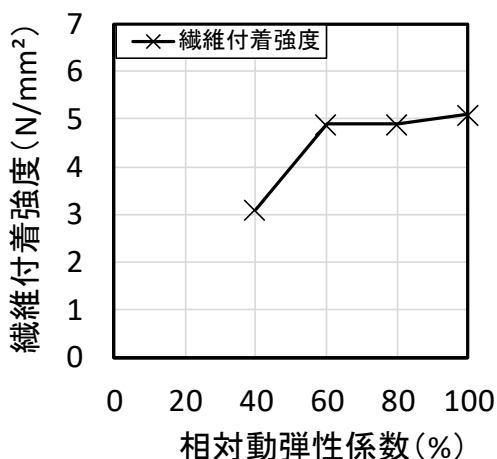


図 5-3-11 凍害劣化程度と繊維付着強度の関係

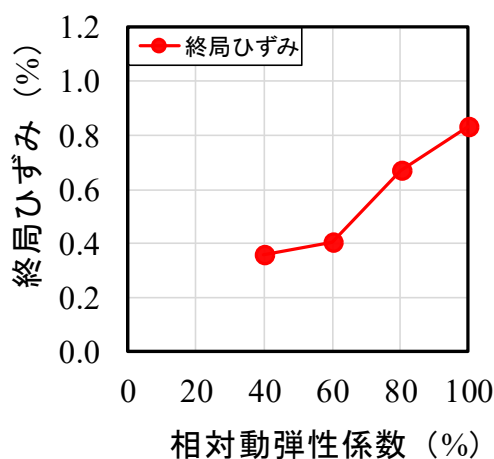


図 5-3-12 凍害劣化程度が終局ひずみに及ぼす影響

ECO-FRPCM のマトリクス強度および引張性状の結果から、破壊挙動の違いや終局ひずみの低下はマトリクス強度および繊維付着強度の低下が原因であり、最大引張応力の低下は繊維付着強度が原因であると考えられる。

Li らは【22】繊維補強セメント系複合材料 (FRCC) の破壊挙動は臨界繊維体積率を定めると複合亀裂先端靱性と繊維付着強度の関係から、疑似ひずみ硬化挙動とひずみ軟化挙動に分離できると示した。本研究でもこれらを参考とし、式 (5-4) および式 (5-5) を用い、複合亀裂先端靱性の曲線を式 (5-6) から求めた。

$$V_f^{crit} = 12J_c / (g\tau (L_f/d_f) \delta_0) \quad \dots (5-4)$$

$$\delta_0 = (\tau L_f^2) / (E_f d_f (1 + \eta)) \quad \dots (5-5)$$

$$J_c = (V_f^{crit} (L_f/d_f) \{2 (1 + e^{\tau f/2}) / (4 + f^2)\} (L_f^2/E_f d_f) \tau) / 12 \quad \dots (5-6)$$

ただし、 J_c : 複合亀裂先端靱性 (N/mm), V_f^{crit} : 臨界繊維体積率 (%), E_f : 繊維弾性率 (N/mm²), δ_0 : 開口変位 (mm) である。図 5-3-10 に臨界繊維体積率 1.5% の繊維付着強度および複合亀裂先端靱性の変動を示す。式 (6) は τ を変数とした関数であり、曲線の上側はひずみ軟化挙動を、下側では疑似ひずみ硬化挙動を示す。式 (3) で求めた ECO-FRPCM の繊維付着強度と図 5-3-8 の凍害劣化程度に応じた破壊挙動を当てはめると、複合亀裂先端靱性は RDM80% 以上で下側、RDM60% 以下では上側の範囲と仮定でき、凍害劣化が進行するに従い、複合亀裂先端靱性の範囲が曲線を境にひずみ軟化挙動側に移動し、さらに進行すると繊維付着強度が低下し、凍害劣化によってひび割れが分散しにくくなることを明らかにした。

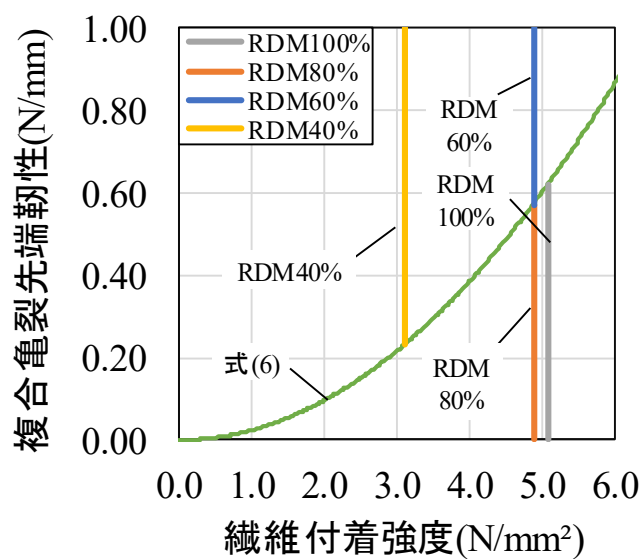


図 5-3-10 凍害劣化によって変化する引張破壊挙動と複合亀裂先端靱性の関係

5-4. まとめ

本研究では、FRM および ECO-FRPCM を対象とし、凍結融解を受けた繊維補強セメント系材料が耐凍害性に及ぼす影響を明らかにし、繊維補強セメント系材料の凍害劣化が靱性に及ぼす影響を把握した。以下に得られた結果を示す。

- 1) FRM および ECO-FRPCM において PP 繊維を除き PVA 繊維, PE 繊維を用いることで耐凍害性に有利となる。また, 繊維の架橋効果により質量減少を抑えることができる
- 2) ECO-FRPCM の施工時の水量の変動による力学性状への影響は少ないが, 5°C養生の条件では 20°C養生に比べ, 圧縮強度が約 10N/mm² 程度低下し, 冬季の現場で使用する場合は温度管理に注意する必要がある。
- 3) ECO-FRPCM の施工時の標準水量±2%の範囲および養生温度 5°Cの条件下においても耐凍害性は確保できる。
- 4) 相対動弾性係数と圧縮強度比は繊維の有無や種類によらず同程度であり, 圧縮強度比の低下は繊維混入の影響を受けないことを示唆した。
- 5) 相対動弾性係数 80%までは疑似ひずみ硬化挙動を示すが, 相対動弾性係数 80%を下回るとひずみ軟化挙動を示し, さらに劣化すると繊維付着強度が低下する。

【参考文献】

- 【1】 Yun HD. : Effect of accelerated freeze–thaw cycling on mechanical properties of hybrid PVA and PE fiber-reinforced strain-hardening cement-based composites (SHCCs). *Compos Part B: Eng*, Vol.52, pp.11-20, 2013
- 【2】 Yun HD, Rokugo K. : Freeze-thaw influence on the flexural properties of ductile fiber-reinforced cementitious composites (DFRCCs) for durable infrastructures. *Cold Regions Sci Technol*, Vol.78, pp.82-88, 2012.
- 【3】 Şahmaran M, Özbay E, Yücel HE, Lachemi M, Li VC. : Frost resistance and microstructure of Engineered Cementitious Composites: Influence of fly ash and micro poly-vinyl-alcohol fiber. *Cem Concr Compos*, Vol.34(2): 156-165,2012
- 【4】 Özbay E, Karahan O, Lacemi M, Hossain KMA, Atis CD. : Dual effectiveness of freezing–thawing and sulfate attack on high-volume slag-incorporated ECC. *Compos Part B: Eng*, Vol.45, pp.1384-90,2013
- 【5】 Çavdar A. : Investigation of freeze–thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. *Compos Part B: Eng*, Vol.58, pp.463-472,2014
- 【6】 Bolat H, Şimşek O, Çullu M, Durmuş G, Can Ö. : The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete. *Compos Part B: Eng*, Vol.61, pp.191-198,2014
- 【7】 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 HPCRCC 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
- 【8】 Lamond JF, Pielert JH. : Significance of tests and properties of concrete & concrete-making materials. *ASTM International*, 169(4),2006
- 【9】 Lepech M, Li VC. : Water permeability of cracked cementitious composites. *Proceedings of 11th International Conference on Fracture (ICF), Torino, Italy*, pp.20-25,2005
- 【10】 Şahmaran M, Li VC. : Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash. *Cem Concr Res*, Vol.39, pp.1033-1043,2009
- 【11】 Koh Y, Kamada E. : The influence of pore structure of concrete made with absorptive aggregates on the frost durability of concrete. In: *Proceedings RILEM/IUPAC international symposium on pore structure and properties of materials, Prague, Artia*, vol. 11, p. F45-62,1973
- 【12】 Lange H, Modry S. : Determination of the frost resistance of limestone aggregates in the light of porosity investigation. In: *Proceedings, Rilem Symposium on Durability of Concrete. Prague: Building Research Institute*, p. B129-68,1969
- 【13】 Litvan GG, Sereda PJ. : Particulate admixture for enhanced freeze-thaw resistance of concrete. *Cem Concr Res*, Vol.8(1): pp.53-60,1977

-
- 【14】 Hooton RD : Influence of silica fume replacement of cement on physical properties and resistance to sulfate attack, freezing and thawing, and alkali-silica reactivity. *ACI Mater J*, 90(2), pp.143-151,1993
 - 【15】 Li V, Stang H. : Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites. *Adv Cem Based Mater*, Vol.6(1), pp.1-20,1997
 - 【16】 Cwirzen A, Penttala V. : Aggregate–cement paste transition zone properties affecting the salt–frost damage of high-performance concretes. *Cem Concr Res*, Vol.35(4): pp.671–679,2005
 - 【17】 閑田徹志, Li,Victor C., 浜田敏裕 : ビニロン繊維を用いた高靱性 FRC の材料設計と開発, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.20, No.2, pp.229-234, 1998
 - 【18】 Li, Victor C. : Post-Crack Scaling Relations for Fiber-Reinforced Cementitious Composites, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.4, No.1, pp.41-57, 1992
 - 【19】 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), 2007
 - 【20】 Powers, T.C : The air requirement frost-resistance concrete, *Proceedings of the highway Research Board*, 29, pp.184-211, 1949
 - 【21】 松村宇, 桂修, 吉野利幸 : 凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究, *日本建築学会構造系論文集*, Vol.68, No.563, pp.9-13, 2003
 - 【22】 Victor C. Li, Dhanada K.Mishra, Hwai-Chung Wu : Matrix design for pseudo-strain-hardening fibre reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, Vol.28, pp.586-595, 1995
 - 【23】 吉田理紗, 菊田貴恒, 西脇智哉, 三橋博三 : 繊維の複合効果がハイブリッド型繊維補強セメント複合材料の引張性状に及ぼす影響, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.35, No.1, pp.1987-1992, 2013

第6章 総括

本研究では結合材と細骨材に産業副産物を用いた ECO-FRPCM の開発と性能評価を行った。

ECO-FRPCM の開発には既往研究や既製品として販売されている補修材を基に土木構造物や建築構造物を補修対象とし、寒冷地での利用を目的に耐凍害性に優れ、国や地方自治体による環境負荷低減に資する製品等の特定調達品目を積極的に取り入れた ECO-FRPCM の基本調合を示した。

さらに、ECO-FRPCM の性能評価として中性化抵抗性、耐硫酸性、遮塩性の評価を行い、ECO-FRPCM の収縮性状に及ぼす膨張材、収縮低減剤および温湿度条件の影響を検討し、収縮に影響する要因を明らかにした。さらに、凍害劣化を受けた FRM と ECO-FRPCM の靱性の評価を行った。

本研究のまとめとして、各章で得られた結論を以下に示す。

第1章 序論

本研究の背景と目的、既往研究ならびに本研究の構成を記した。

第2章 環境負荷低減型繊維補強ポリマーセメントモルタル (ECO-FRPCM) の開発

ECO-FRPCM の構成材料の検討に当たり、ポリマー、膨張材 (EX)、収縮低減剤 (SR)、フライアッシュ (FA)、石灰石微粉末 (LSP) ならびに高炉スラグ微粉末 (BFS) が基礎性状に及ぼす影響を検討した。以下にその結果をまとめる。

- 1) ポリマーは酢酸ビニルベオバアクリル系ポリマーを用いることで基礎性状が最も安定すること、また、添加量は 10% を超えると基礎性状に悪影響を及ぼすことを把握した。
- 2) 膨張剤は曲げ強度を増加する傾向を示し、収縮低減剤は収縮低減効果が良好であった。また、その併用効果では収縮率の低減に非常に有効であった。
- 3) フライアッシュはボールベアリング効果で流動性改善効果はあるが、セメントに内割置換することで圧縮強度は低下する。
- 4) 石灰石微粉末では 5% の添加量で流動性を増加させた。また、外割置換では収縮率に影響は確認ないが、内割置換では悪影響があることを確認した。
- 5) 高炉スラグ微粉末では流動性、圧縮強度ともに増加傾向を示し、水結合材比、混入率にかかわらず収縮率の増加が確認された。
- 6) 膨張材、収縮低減剤は、混入率に応じて収縮量が減少する。石灰石微粉末では内割、外割による混入方法の違いはほとんどなく、混入率の増加に伴い収縮率は同程度以上となる。高炉スラグ微粉末では、混入率の増加に伴い収縮率は増加するが、水セメント比が 30% ではほとんど収縮率は変わらない。フライアッシュによる影響では、

混入率の増加に伴い収縮率が増加するが、膨張材と収縮低減剤を同時に混入すると収縮率低減効果がみられる。

- 7) 耐凍害性および施工性の検討では、すべての調合で耐凍害性が優れている結果となった。吹付け施工後の性状では、Kの調合において、だれることなく母材コンクリートにしっかりと付着していた。
- 8) 硬化性状、硬化収縮、耐凍害性に優れたポリプロピレン繊維を0.5%およびポリビニルアルコールとポリエチレン繊維を6:4で1.5%混入したECO-FRPCMの基本調合を提案した。
- 9) 環境負荷低減の観点ではCO₂排出量を結合材の全量をセメントに置き換えた材料と比べF15で約3割、F05で約5割のCO₂排出量を低減することに成功した。

第3章 ECO-FRPCMの化学抵抗性

ECO-FRPCMの化学抵抗性評価のために中性化抵抗性、耐硫酸塩性、耐塩害性について同じ水結合材比のモルタルと比較を行った。以下に結果を示す。

- 4) 中性化抵抗性では、セメント100%のNよりも中性化速度係数は大きくなるが一般的なコンクリート構造物よりも中性化速度係数は低く、十分な使用に耐えられる。また、F05とF15の中性化速度係数の違いはBFSを用いて十分に養生を行うことで組織の緻密化が図られたことでCO₂の侵入を抑制したF05においてF15よりも中性化が抑えられたと考える。
- 5) 耐硫酸性では、FAの添加によってエトリンガイトや石膏の生成に必要な水酸化カルシウム(CH)が少なくなり、また、外来からの硫酸イオンの浸透が抑制されたため、耐硫酸塩性に優れている結果となった。さらに、高炉副産物を用いることで二水石膏およびシリカの成長および消費速度を遅延するため、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを加えたECO-FRPCMは耐硫酸性に優れる。Nにおいてはエトリンガイトの生成により13週目に表面側から層状に剥離し、大幅に質量が減少した。
- 6) 耐塩害性では、ポリマーを多く添加することで、ポリマーフィルムがセメント硬化体の隙間を埋め、FAを用いた供試体であっても一般に遮塩性に有効とされているBFSよりも高い遮塩性を発揮する結果となった。

第4章 ECO-FRPCMの硬化収縮に及ぼす混和剤および養生温湿度条件の影響

ECO-FRPCMの硬化収縮に及ぼす混和剤の影響を膨張剤、収縮低減剤を用いて検討し、養生温湿度の影響を5℃、20℃、30℃で各3水準の相対湿度を用いて実験を行った。本研究で得られた主な結果を以下に示す。

- 1) 膨張剤単体で使用した場合、膨張ピーク後に収縮挙動を示すが、収縮低減剤と併用することで収縮挙動を示さずに7日目まで膨張傾向が続いた。

- 2) ECO-FRPCM の硬化収縮試験における質量変化率は、養生環境の温度と相対湿度の両方の影響を受ける。
- 3) ECO-FRPCM の硬化収縮試験における長さ変化率に対しては、温度ではなく相対湿度の影響が卓越している。
- 4) 温湿度が変化する実環境での長さ変化率を評価する際には、温度変化による線膨張係数の影響を考慮しなければならない。
- 5) NEXCO で行われている試験方法では左官工法、吹付け工法において現在の 28 日で判断を行うと収縮によるひび割れや剥離が生じる可能性がある。そこで、打込み工法と同じく 91 日までの期間で収縮評価を行うことに、より安全側で評価を行うことができる。また、左官工法、吹付け工法を対象とした材料であっても膨張材の収縮補償を考慮するために膨張の性能を簡易モールド法により測定し、収縮補償の判断に用いることを提案する。

第5章 耐凍害性および凍害劣化が引張性状に及ぼす影響

本研究では、FRM および ECO-FRPCM を対象とし、凍結融解を受けた繊維補強セメント系材料が耐凍害性に及ぼす影響を明らかにし、繊維補強セメント系材料の凍害劣化が靱性に及ぼす影響を把握した。以下に得られた結果を示す。

- 1) FRM および ECO-FRPCM において PP 繊維を除き PVA 繊維、PE 繊維を用いることで耐凍害性に有利となる。また、繊維の架橋効果により質量減少を抑えることができる。
- 2) ECO-FRPCM の施工時の水量の変動による力学性状への影響は少ないが、5°C養生の条件では 20°C養生に比べ、圧縮強度が約 10N/mm² 程度低下し、冬季の現場で使用する場合は温度管理に注意する必要がある。
- 3) ECO-FRPCM の施工時の標準水量±2%の範囲および養生温度 5°Cの条件下においても耐凍害性は確保できる。
- 4) 相対動弾性係数と圧縮強度比は繊維の有無や種類によらず同程度であり、圧縮強度比の低下は繊維混入の影響を受けないことを示唆した。
- 5) 相対動弾性係数 80%までは疑似ひずみ硬化挙動を示すが、相対動弾性係数 80%を下回るとひずみ軟化挙動を示し、さらに劣化すると繊維付着強度が低下する。

上記の結果より、寒冷地での使用に対応した ECO-FRPCM の調合を表 6-1-1 に示す。提案した ECO-FRPCM は圧縮強度 35N/mm² 以上、硬化収縮 0.05%以下、耐久性指数 90 以上、引張終局ひずみ 0.5%以上、中性化抵抗性、耐硫酸塩性、遮塩性に優れ、施工性ではダレを生じない性能を有している。また、細骨材には高炉スラグ骨材を全量使用し、高炉スラグ微粉末やフライアッシュを用いて左官、吹付け工法に対応した

汎用タイプの F05 および吹付け工法専用の引張性能に優れた靱性タイプの F15 である。環境負荷低減効果では F15 で約 3 割、F05 で約 5 割の CO₂ 削減効果を有している。

今後の課題として、実環境でのひび割れ発生の有無や耐凍害性などの耐久性を確認し、用排水路での水流摩耗性の検討や付着強度に及ぼす要因の検討を行っていくことが必要である。

表 6-1-1 ECO-FRPCM の基本調合

記号	W/B (%)	S/B	繊維種類	繊維量 (vol.%)	結合材 (B) (%)					砂(S)割合 (%)		P	SR	減水剤	消泡剤	AE 剤
					C	FA	BFS	SF	EX	粒径						
										S _M	S _L					
F05	35	1	PP	0.5	52	0	35	5	8	60	40	2	4	0.06	0.17	0.2
F15	36	0.7	PVA:PE (60:40)	1.5	64	25	0	3	8	70	30	6	4	0.07	0.25	0.15