

論文 電気炉酸化スラグ細骨材と膨張材を使用した短繊維補強コンクリートの急速凍結融解抵抗性の検討

清水 光^{*1}・橋本親典^{*2}・渡邊 健^{*3}・石丸啓輔^{*4}

要旨: 鋼材の使用量を削減するための短繊維補強コンクリートの普及・高性能化を最終目的として、短繊維を混入することで著しく損なわれてしまう流動性を向上させるために電気炉酸化スラグ細骨材を使用した。さらに、収縮特性やひび割れ抑制に効果的な膨張材を用いた短繊維補強コンクリートのスケーリングに着目した急速凍結融解に関する実験的検討を行った。短繊維としては、鋼繊維とビニロン繊維の2種類とし、短繊維容積混入率を最大4Vol.%, 膨張材量は最大30kg/m³とした。実験的検討の結果、単位水量200kg/m³の短繊維補強コンクリートは膨張材の有無にかかわらず高い急速凍結融解抵抗性を有することが明らかになった。

キーワード: 凍結融解抵抗性, 液化窒素, 短繊維補強コンクリート, 鋼繊維, ビニロン繊維, 膨張材

1. はじめに

近年、二酸化炭素排出量の削減が急務となっている。コンクリートにおける二酸化炭素排出量のほとんどがポルトランドセメントの製造時に発生するものであり、低炭素型のセメント・コンクリートが必要とされている。しかし、低炭素型セメント・コンクリートは環境負荷低減が期待されるが、中性化が早まり、鉄筋腐食が懸念される。鋼材自体も二酸化炭素排出量が多い。著者らは、鋼材の使用量を削減するための短繊維補強コンクリートの普及・高性能化の開発を目指している。

短繊維補強コンクリートとは、コンクリートに数十ミリ程度の繊維を混入することでコンクリートの引張、曲げ、脆性などの弱点を改善することのできるコンクリート複合材料である。短繊維容積混入率は、鋼繊維は2Vol.%, ビニロン繊維は3Vol.%程度が限界と認識されている¹⁾。短繊維容積混入率の増加に伴い、ファイバーボールが形成され短繊維の分散の程度が極端に悪化する。その結果、コンクリートの流動性が低下し、フレッシュ性状や締固め性等を確保することが困難であるためである。

しかしながら、著者らは、風砕した電気炉酸化スラグ細骨材(以後、EFSと称す)を用いることで、短繊維容積混入率の限界を4Vol.%まで拡大することに成功した²⁾。

電気炉スラグは、鉄スクラップ等を溶解して製鋼する際に発生するもので、酸化精錬過程で発生するものが酸化スラグであり、その後の還元精錬過程で発生するものが還元スラグである。現在の電気炉製鋼法は、生産性と溶鋼の品質を向上させるために、酸化工程と還元工程が明確に区別され、電気炉酸化スラグのコンクリート用骨

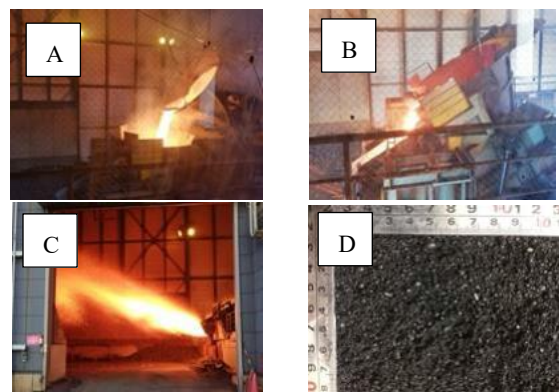


写真-1 風砕EFSの製造状況および外観

材としての使用が可能となり、JIS規格が整備されている。さらに、風砕したEFSの製造が可能になった。

風砕EFSの製造状況および外観形状を写真-1に示す。まず、専用の釜で電気炉から副産された熔融スラグを専用車両で風砕建屋に運搬する。その後、傾動式の釜に熔融スラグを移し替える(A)。移し替えられた熔融スラグの入った釜を徐々に傾け(B)、流れ落ちる熔融スラグに後方から風を送り空気中に飛散させる(C)ことで、角張がなく球状に近い形状のスラグ骨材(D)が生成される。このEFSは、同一単位水量でコンクリートの流動性を向上させることができる³⁾。その能力は川砂よりも勝る。

一方、コンクリートの高性能化の手法として、膨張材による収縮低減やケミカルプレストレスによるひび割れ抑制が実用化されている。しかしながら、最近の高性能な膨張材を用いたコンクリートの耐久性、特に、凍結融解抵抗性に関する研究論文は少ないのが現状である。

以上の短繊維補強コンクリートに関する技術の現状

*1 徳島大学大学院 創成科学研究科理工学専攻博士前期課程 社会基盤デザインコース (学生会員)

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 教授 工博 (正会員)

*3 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部 准教授 博(工) (正会員)

*4 徳島大学大学院 常三島技術部門 技術専門職員 (正会員)

を鑑み、本研究では、EFS と膨張材を使って短繊維容積混入率を 4Vol.%まで増加させた高性能な短繊維補強コンクリートを対象に凍害に関する実験的検討を実施した。

凍害の定量的評価方法は、かぶりコンクリートのスケールリングを対象として、著者らが提案した液化窒素を用いた急速凍結融解試験⁴⁾によって評価した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および物性

使用材料および物性値を表-1 に、鋼繊維の外観を写真-2、ビニロン繊維の外観を写真-3 に示す。

使用材料は、普通ポルトランドセメント、フライアッシュⅡ種、細骨材には徳島県産砕砂のほか、電気炉酸化スラグ細骨材を使用し、粗骨材は徳島県産砕石を使用し、最大寸法は普通コンクリートで使用される 20mm とした。繊維にはビニロン繊維と鋼繊維を使用し、繊維長はファイバーボール抑制のため 30mm とした。

表-1 使用材料および物性値

材料名	記号	種類および物性値
セメント	C	普通ポルトランド 密度：3.16g/cm ³ 、比表面積3340cm ² /g
膨張材	E	エトリンガイト系膨張材 密度：3.08g/cm ³ 、比表面積3920cm ² /g
フライアッシュ	FA	フライアッシュⅡ種 密度：2.22g/cm ³ 、比表面積3420cm ² /g
細骨材	S	徳島県産砕砂 密度：2.58g/cm ³ 、粗粒率：2.85 吸水率：1.66%、実積率：57.5%
	EFS	電気炉酸化スラグ5-0.3 密度：3.59g/cm ³ 、粗粒率：3.25、吸水率：0.42%
粗骨材	G1	徳島県産砕石1505 密度：2.57g/cm ³ 、粗粒率：6.42 吸水率：1.62%、実積率：59.4%
	G2	徳島県産砕石2010 密度：2.68g/cm ³ 、粗粒率：6.68 吸水率0.41%、実積率：59.9%
繊維	VF	ビニロン繊維 密度：1.3g/cm ³ 、繊維長30mm、直径：0.66mm 引張強度：820N/mm ² 、弾性係数：12.7GPa
	SF	鋼繊維（端部フック） 密度：7.85g/cm ³ 、繊維長：30mm、直径：0.62mm 引張強度：1080N/mm ² 、弾性係数：200GPa
混和剤	SP	高性能AE減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）
	AE	AE剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）



写真-2 鋼繊維

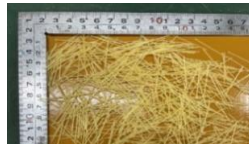


写真-3 ビニロン繊維

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合表を表-2 に示す。W/C は 50%、目標空気量 4.5±1.5%とした。短繊維補強コンクリート

表-2 実験に供したコンクリートの配合表

配合名	W/Cs/a		単位量 (kg/m ³)								
	W	C	FA	E	S	EFS	G1	G2	VF・SF		
VF-0-0	50	48	157	314	70	0	401	598	560	389	0
VF0-20	50	48	157	296	70	20	401	598	560	389	0
VF0-30	50	48	157	286	70	30	401	598	560	389	0
VF0.5-0	50	48	200	400	100	0	344	538	504	350	7
VF1-0	50	48	200	400	100	0	344	538	504	350	13
VF4-0	50	83	200	400	100	0	628	931	165	115	52
VF3-20	50	66	200	380	100	20	449	673	294	196	39
VF3-30	50	66	200	370	100	30	449	673	294	196	39
SF1-20	50	48	200	380	100	20	341	511	460	306	79
SF1-30	50	48	200	370	100	30	341	511	460	306	79
SF1.5-20	50	48	200	380	100	20	338	506	456	304	118
SF1.5-30	50	48	200	370	100	30	338	506	456	304	118
SF2-20	50	48	200	380	100	20	335	502	452	301	157
SF2-30	50	48	200	370	100	30	335	502	452	301	157

はすべて単位水量 200kg/m³とした。EFS 置換率は細骨材の体積当たりの内割置換とし、置換率は 50%とした。使用した繊維は鋼繊維とビニロン繊維であり、鋼繊維は 1～2Vol%，ビニロン繊維は 0.5～4Vol%混入した。また、鋼繊維を混入した配合とビニロン繊維を 3Vol%混入した配合は、膨張材を 20、30kg/m³使用した。フライアッシュ使用理由は、EFS により生じるブリーディング抑制と単位水量 200 kg/m³に対する材料分離抵抗性向上である。

2.3 コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには強制 2 軸練りミキサーを用いた。最初にセメント、フライアッシュ、細骨材、膨張材を 30 秒間空練りしたあと、混和剤を溶解した水を加えて 30 秒練混ぜ、さらに粗骨材と繊維を加えて 60 秒間練混ぜを行った。ミキサーの回転停止後、高性能 AE 減水剤と AE 剤の効果を引き出すため 5 分間の静置を行い、その後、30 秒間練混ぜを行い排出した。

2.4 試験項目および方法

試験項目および試験方法を表-3 に示す。

フレッシュ性状では、スランプ、スランプフロー、空気量試験を行った。硬化性状では、圧縮強度試験、引張強度試験、急速凍結融解試験、拘束膨張試験を行った。

表-3 試験項目および実験方法

試験項目	試験方法	備考
スランプ	JIS A 1150	12±2.5cm (目標値)
スランプフロー	JIS A 1150	45±7.5cm (目標値)
空気量	JIS A 1128	4.5±1.5% (目標値)
圧縮強度	JIS A 1108	標準水中養生28日
引張強度	JIS A 1113	標準水中養生28日
凍結融解試験	急速凍結融解試験	標準水中養生28日
拘束膨張試験	JCI-009-2012	

2.4.1 圧縮強度試験

JISA1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠した。供試体は標準水中養生を行った。Φ100×200mmの円柱供試体を使用した。材齢は28日とした。

2.4.2 引張強度試験

JISA1113「コンクリートの引張強度試験方法」に準拠した。供試体は、標準水中養生を行った。短繊維補強コンクリートの引張強度は、一軸引張強度試験で評価する機会が多い。しかし本実験では、普通コンクリートとの比較を行うために、Φ100×200mmの円柱供試体を用いた割裂引張試験で評価した。材齢は28日とした。

2.4.3 急速凍結融解試験

液化窒素を用いた急速凍結融解試験は、コンクリートの耐凍害性の評価を早く判定する方法の1つである。特に、かぶりコンクリートのスケーリングの再現を試みた試験方法であり、著者が提案した。JISA1148「コンクリートの凍結融解試験方法(A法)」による方法とは凍結融解のメカニズムが異なるものの、既往の研究から、急速凍結融解試験のサイクル数1回がJIS規格試験の繰り返し回数30回に相当することを明らかにした⁹⁾。供試体は、Φ100×200mmの円柱供試体を使用し、養生槽から取り出してウェスで表面の水分を除去した湿潤状態で試験を行った。試験材齢は28日とした。保冷用容器と窒素ガスボンベを写真-4、融解用温水を写真-5、超音波測定器を写真-6、供試体を写真-7に示す。



写真-4 保冷用容器、窒素ガスボンベ 写真-5 融解用温水



写真-6 超音波測定器



写真-7 供試体

試験は以下の手順で実施した。

- 1, 供試体の底面15mmの位置に測定位置を定め、超音波伝搬速度を測定する。
- 2, 保冷用容器に供試体を入れ、液化窒素を30秒間吹き付ける。
- 3, 吹き付け終了後30秒間静置し、計60秒間液化窒素に浸す。
- 4, 供試体を保冷容器から取り出し、約40℃の温水に5分

間浸し融解させる。

5, 融解後、供試体表面の水分をふき取り、超音波伝搬速度を測定する。

6, 2~5の手順を1サイクルとし、この作業を繰り返し10サイクル行うか、相対動弾性係数が60%を下回った場合試験を終了する。

相対動弾性係数は以下の式(1)により算出した。

$$\text{相対動弾性係数 (\%)} = P_n = \left(\frac{V_{L_n}}{V_{L_0}} \right)^2 \times 100 \quad (1)$$

ここに、 V_{L_0} :試験開始前における超音波伝搬速度(km/s)

V_{L_n} : nサイクル終了時の超音波伝搬速度(km/s)

耐久性指数は、次の式(2)によって算出し、四捨五入によって整数に丸める。

$$DF = \frac{P \times N}{M} \quad (2)$$

ここに、 DF :耐久性指数

P : N サイクルのときの相対動弾性係数(%)

N :相対動弾性係数が60%になるときのサイクル数、または、10サイクルのいずれかの小さいもの

M :10サイクル

2.4.4 拘束膨張試験

膨張材を用いた短繊維補強コンクリートに対しては、膨張量を計測するために、円筒型枠を用いた膨張コンクリートの拘束膨張試験方法(JCI-009-2012)を行った。

3. 実験結果

3.1 フレッシュ性状

本研究におけるフレッシュ性状の結果を表-4に示す。短繊維容積混入率変化による材料分離は見られなかった。

短繊維補強コンクリートについては単位水量を増加させたことによりフレッシュ性状を確保することができ

表-4 フレッシュ性状

配合名	スランブフロー スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
VF0-0	スランブフロー-37.5	5.5	20.3
VF0-20	スランブフロー-45	7	21.2
VF0-30	スランブフロー-40	8	22.1
VF0.5-0	スランブフロー-37.5	5.5	20.3
VF1-0	スランブフロー-44.5	5	20.4
VF4-0	スランブフロー-39	6	20.6
VF3-20	スランブ9.0	6	20.8
VF3-30	スランブ10.0	2	21.6
SF1-20	スランブ3.0	3	19.3
SF1-30	スランブフロー-37.5	5.5	20.1
SF1.5-20	スランブフロー-37.5	5.5	20.8
SF1.5-30	スランブフロー-41	7.5	21.2
SF2-20	スランブフロー-45	6	20.8
SF2-30	スランブフロー-37.5	5.5	20.5

たが、VF3-20, VF3-30, SF1-20 の 3 配合においては十分な流動性が確保できず、スランプとなった。特に SF1-20 は、スランプ 3cm であった。高性能 AE 減水剤の添加量の影響であった。ただし、本研究の目的は、硬化コンクリートの耐久性であり、コンシステンシーは、供試体の成型ができればよしとしたため、このフレッシュ性状のコンクリートを用いた。

F0-20, F0-30, の 2 配合においては空気量が目標に対して 1~2%多くなり、VF3-30, SF1-20 の 2 配合においては 1.5~2.5%少ない結果となった。

3.2 圧縮強度試験結果

膨張材を使用していない配合の圧縮試験結果を図-1、膨張材を 20kg/m³ 使用した配合の圧縮試験結果を図-2、膨張材を 30kg/m³ 使用した配合の圧縮試験結果を図-3 に示す。

膨張材を使用せず、ビニロン繊維のみを添加している VF0.5-0, VF1-0, VF4-0 の 3 配合については圧縮強度の

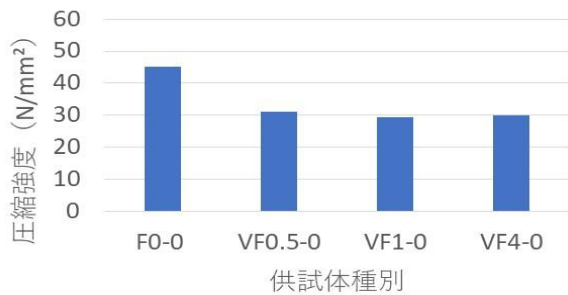


図-1 膨張材を使用していない配合の圧縮強度



図-2 膨張材 20kg/m³ 配合の圧縮強度



図-3 膨張材 30kg/m³ 配合の圧縮強度

低下が見られたが、短繊維容積混入率による変化はなかった。W/C は一定であるが、単位水量 200kg/m³ の影響と繊維の存在による微細な欠陥の影響があると思われる。

膨張材を 20kg/m³ 使用している配合については鋼繊維については短繊維容積混入率により強度が上下する結果となり、1%において最も低い値を取り、1.5%において最も高い値を取った。ビニロン繊維においては、強度の変化はほぼ見られなかった。膨張材を 30kg/m³ 使用した配合では、鋼繊維において、短繊維容積混入率の増加に伴い、強度が増加する結果となった。ビニロン繊維においても強度が増加する結果となった。

3.3 引張強度試験結果

膨張材を使用していない配合の引張試験結果を図-4、膨張材を 20kg/m³ 使用した配合の引張試験結果を図-5、膨張材を 30kg/m³ 使用した配合の引張試験結果を図-6 に示す。

膨張材を使用していない配合において、ビニロン繊維

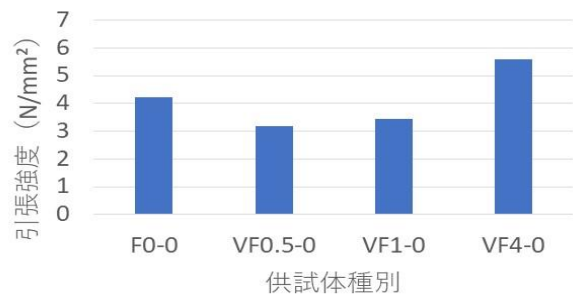


図-4 膨張材を使用していない配合の引張強度

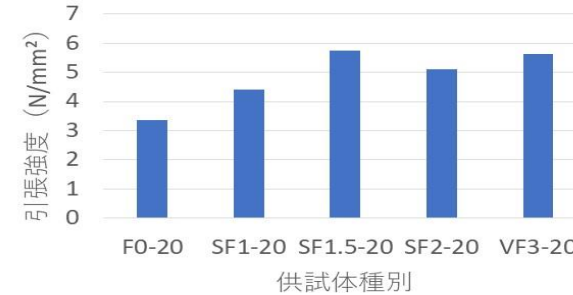


図-5 膨張材 20kg/m³ 配合の引張強度

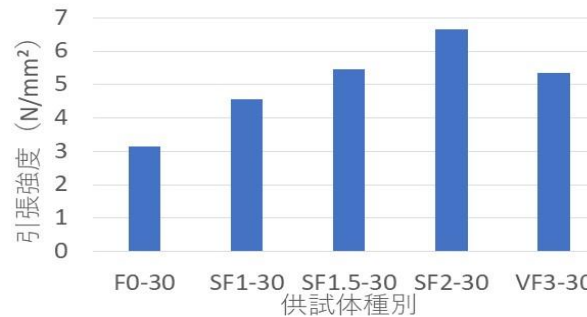


図-6 膨張材 30kg/m³ 配合の引張強度

を0.5, 1%混入した場合において強度の低下が見られたが, 4%において強度が増加する結果となった。膨張材を20kg/m³使用した配合において, 鋼繊維で短繊維容積混入率の増加に伴い, 引張強度の増加が見られ, 1.5%において最も大きな値を取った。ビニロン繊維においても短繊維を混入することにより強度が増加する結果となった。膨張材を30kg/m³使用した配合において, 鋼繊維で短繊維混入率が増加するにつれ強度の増加が見られ, 2%において最も大きな値を取った。ビニロン繊維においても短繊維を混入することにより強度が増加する結果となった。

短繊維補強コンクリートは, 引張応力によりひび割れが生じた後も繊維の架橋作用によりひび割れ面で応力が伝達される。このため, 短繊維容積混入率の増加による影響が大きく表れたと考えられる。

3.4 急速凍結融解試験結果

スケーリングに着目した急速凍結融解試験結果を図-7, 図-8に繊維の種別毎に示す。また, VF0-20, VF0-30の試験後の外観を写真-4, 写真-5に示す。

基準となる普通コンクリートは高い凍結融解抵抗性を示した。しかしながら, 膨張材のみを使用した配合において6サイクル目と7サイクル目に耐凍害性を有している基準となる相対動弾性係数60%を下回る結果となり, 凍結融解抵抗性が低いことが分かった。凍結融解面でのスケーリングが確認された。写真-4, 写真-5の赤丸に表面のスケーリング箇所を示す。

これは, 膨張量が大きくなることによって, エトリングサイト, 水酸化カルシウムが多く発生し, セメントマト



写真-4 F0-20 外観



写真-5 F0-30 外観

リックスが壊れ始めることによる強度低下や, セメントマトリックスの空隙に連続的な気泡が増えることで, 空隙自体が大きくなることにより凍結融解抵抗性が低下することが考えられる。

一方, 短繊維補強コンクリートは膨張材の有無に関係なく凍結融解抵抗性の低下は見られなかった。

鋼繊維補強コンクリートについては10サイクル目における相対動弾性係数が88~95%程度であった。ビニロン繊維補強コンクリートでは10サイクル目における相対動弾性係数が83~89%程度であり, 鋼繊維と比較すると若干低いが, 高い凍結融解抵抗性を有した。

鋼繊維の弾性係数が大きく, 凍結融解に伴う水の膨張圧によるマトリックスの引張りひび割れを抑制する効果が高いためであると考えられる。

なお, 本研究で実施した急速凍結融解抵抗性は, JIS A 1148の水中凍結・気中融解(A法)と異なり, スケーリングに着目した厳しい試験である。よって, JIS法による評価とは違う結果になる可能性があるので注意を要する。

3.5 拘束膨張試験による膨張量

拘束膨張試験による最終膨張量の結果を図-9に示す。

膨張材量, 短繊維容積混入率が大きいほど, 最終膨張量が大きかった。ただし, 鋼繊維の膨張材量20kg/m³では短繊維容積混入率が高いにもかかわらず繊維なしの場合の膨張量と同程度であった。ビニロン繊維は短繊維容積混入率が3%で鋼繊維よりも大きいため, 最終膨張量が大きく, 膨張材量30kg/m³では, 350μで繊維なしの場合よりも50μ以上大きくなった。

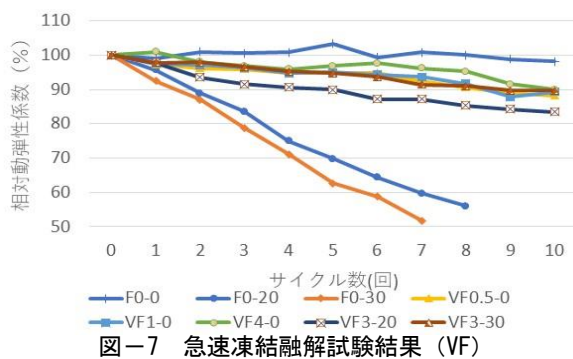


図-7 急速凍結融解試験結果 (VF)

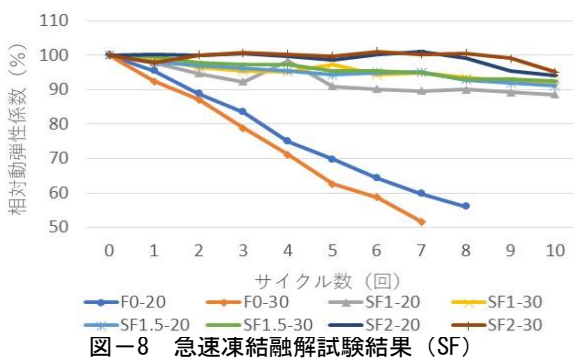


図-8 急速凍結融解試験結果 (SF)

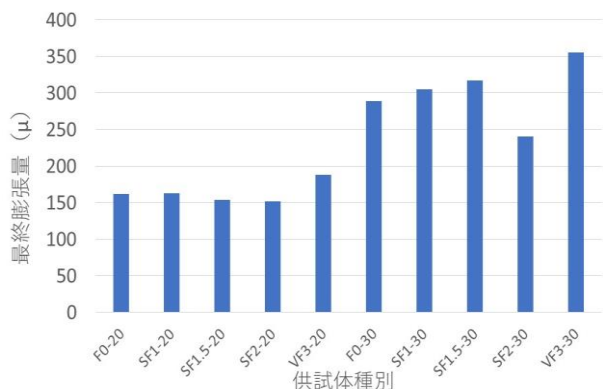


図-9 最終膨張量

3.6 耐久性指数

膨張材のみを使用したコンクリートの耐久性指数が膨張材 20kg/m³ で 42, 30kg/m³ で 35 と低いため、この2配合を除く配合に関して、圧縮強度、引張強度および最終膨張量と耐久性指数の相関性を検討した。

圧縮強度と耐久性指数との相関関係を図-10、引張強度と耐久性指数との相関関係を図-11、最終膨張量と耐久性指数の相関関係を図-12に示す。

普通コンクリートが最も耐久性指数が大きく、顕著な相関性が認められなかった。最終膨張量に関しては同一繊維かつ同一繊維混入量において正の相関が若干認められた。

興味深い点として、短繊維補強していない膨張コンクリートの耐久性は非常に低下するのに対して短繊維補強した膨張コンクリートでは、拘束膨張量が大きいほど耐久性が増加する傾向がある。短繊維補強することによって拘束膨張がコンクリートの耐久性に与える効果を改善する可能性がある。

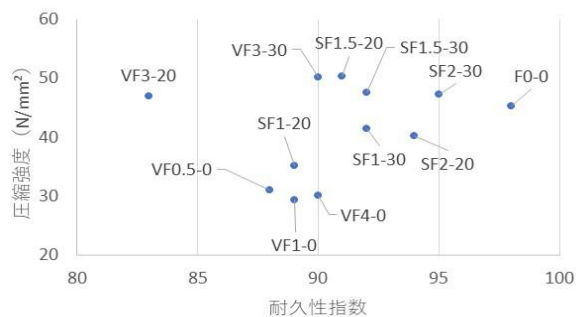


図-10 圧縮強度－耐久性指数

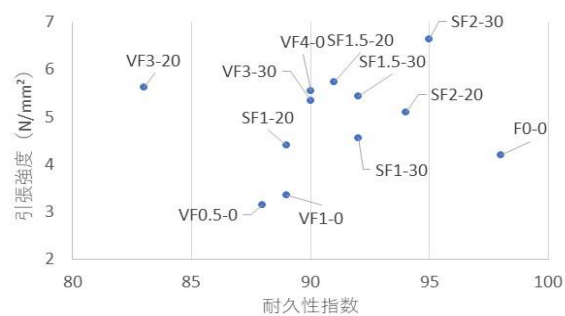


図-11 引張強度－耐久性指数

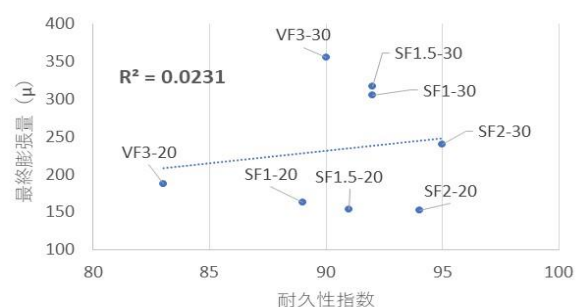


図-12 最終膨張量－耐久性指数

4. 結論

本研究では風砕EFSと膨張材を使用した短繊維補強コンクリートを作製し、繊維の種類、短繊維容積混入率や膨張材量による急速凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検討した。

本研究の範囲内で得られた知見を以下に記す。

- 1) 膨張材のみを使用したコンクリートの急速凍結融解抵抗性は著しく低いが、鋼繊維やビニロン繊維を混入することにより、単位水量 200kg/m³ の短繊維補強コンクリートは著しく急速凍結融解抵抗性が改善することが明らかになった。
- 2) 耐久性指数と強度特性には明確な相関は認められなかった。ビニロン繊維より鋼繊維のほうが耐久性指数が大きかった。最終膨張量と耐久性指数には正の相関が若干認められた。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、(株)星野産商、四国総研(株)、(株)クラレ、(株)デンカから多大なご支援をいただきました。崎谷勇貴氏(現在、鹿島建設(株))の卒業研究の成果を提供していただきました。ここに付記して謝辞の意を表します。

参考文献

- 1) 住学, 竹内博幸, 中出睦, 谷垣正治: ビニロン繊維補強コンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, 2003
- 2) 清水光, 橋本親典, 渡邊健, 石丸啓輔: 電気炉酸化スラグ細骨材を用いた繊維補強コンクリートの凍結融解抵抗性と乾燥収縮特性に関する実験的研究, jsce7-037-2023, 土木学会四国支部技術発表会講演概要集, Vol.29, 2023.5
- 3) 横山卓哉, 橋本親典, 渡邊健, 石丸啓輔: 電気炉酸化スラグ細骨材とフライアッシュを用いた粉体系高流動コンクリートの硬化性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, 1007-1012, 2020.7
- 4) 弓場上有沙, 橋本親典, 渡邊健, 石丸啓輔: 再生骨材コンクリートによる JIS の凍結融解試験方法(A法)と液化窒素を用いた簡易急速凍結融解試験方法の比較, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 941-946, 2011.7
- 5) 岩本勲, 嵯峨山剛, 眞嶋光保: 凍結融解作用を受けた繊維補強コンクリートの力学特性と微視的構造の変化, 土木学会論文集, No.538, pp27-35, 1995