

# 論文 フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混和したコンクリートの自己修復効果の比較

羅承賢\*1・濱幸雄\*2・谷口円\*3・佐川孝広\*4

**要旨:** 本研究では、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混和した AE コンクリートを対象として、材齢 1 年までの自己修復効果の持続性を比較・検討することを目的として実験を行った。微細ひび割れの導入方法として繰り返し載荷法を採用し、自己修復効果の確認方法として相対動弾性係数の変化を用い、材齢の進行にともなう耐凍害性を考慮した自己修復効果評価指標を提案した。その結果、20℃水中養生・材齢 1 年においてもフライアッシュおよび高炉スラグ微粉末による自己修復効果が持続していることを確認した。

**キーワード:** 自己修復効果, 耐凍害性, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 繰り返し載荷法, 評価指標

## 1. はじめに

環境保護, 財政面での制約等から建築ストックの有効かつ長期的な活用が求められ, 今後新たに造られる建築物には総合的なコストの低減や高い耐久性に加えて信頼性の確保が求められている。特に, 寒冷地ではコンクリートの耐凍害性の向上が大きな課題として挙げられる。また, 環境負荷低減の観点から, フライアッシュや高炉スラグ微粉末等の産業副産物の有効利用も期待されている。

日本コンクリート工学協会・セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究委員会では, セメント系材料の自己修復現象を「自己治癒」, 「設計型自己修復」および「自然治癒」, 「自律治癒」, 「自動修復」に分類して定義している<sup>1)</sup>。

そこで著者らは, 既往の研究において, 上記分類の中の「自律治癒」に該当する, 混和剤として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自己修復性について検討を行ってきた。藤原らは, フライアッシュ混入によるモルタルおよびコンクリートを用いて自己修復効果の検討を行い, 置換率が高く, 水セメント比が小さいほど高い修復効果を有することや材齢の進行とともに修復効果は小さくなる傾向にあることを報告している<sup>2)</sup>。また, 村井らはフライアッシュを用いたコンクリートの自己修復性状の検討を行い, 自己修復の評価指標を提案している<sup>3)</sup>。以上の研究から, フライアッシュのポゾラン反応を利用することで供用期間中に凍害などにより発生したマイクロクラックを水和物で充填し, 中性化進行の抑制に寄与することが期待できることが明らかとなっている。

一方, 高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を利用した自

己修復効果の研究も行われており, 澁谷らは高炉スラグ微粉末混入によるモルタルの自己修復効果の実験を行い, 高炉スラグの粉末度が小さいほど高い自己修復効果が大きくなること, 特に内割りしたモルタルの場合に高い自己修復効果を発揮することを指摘している<sup>4)</sup>。しかし, これらの自己修復がコンクリートの耐久性向上に寄与する効果を定量的に評価する方法が確立されておらず, 同一の条件でのフライアッシュと高炉スラグ微粉末の混入による自己修復効果の比較検討も必要である。さらに, 既往の研究では凍結融解の繰り返しによって生じた微細ひび割れに起因する中性化速度係数の変化により自己修復効果を確認していたが, 凍結融解ではそれぞれの試験体の耐凍害性が異なると設定した条件まで劣化を進行させるサイクル数が異なり, 劣化程度を一定にすることが難しいという問題や凍結融解試験および中性化試験の結果が得られるまでに長い時間がかかるという問題があった。

そこで本研究では, 微細ひび割れの導入方法として凍結融解の繰り返しに代えて繰り返し載荷法<sup>3)</sup>を採用するとともに, 修復効果の確認のために中性化速度係数と相関の高い相対動弾性係数を用い, フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混和した AE コンクリートを対象として, 材齢 1 年までの自己修復効果の持続性, 修復効果に及ぼす水分供給の影響を比較・検討することを目的として実験を行った。

## 2. 実験計画および方法

### 2.1 使用材料および調合

セメントは普通ポルトランドセメントを, 混和材としてフライアッシュ (JIS II 種) および高炉スラグ微粉末

\*1 室蘭工業大学大学院 工学研究科建設環境工学専攻 (正会員)

\*2 室蘭工業大学大学院 工学研究科くらし環境系領域教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 北海道立総合研究機構北方建築総合研究所 環境科学部研究主任 博士 (工学) (正会員)

\*4 日鐵セメント株式会社 製品開発部製品開発グループ 博士 (工学) (正会員)

(粉末度 4000cm<sup>2</sup>/g)を使用した。表-1にフライアッシュの品質試験結果を、表-2に高炉スラグ微粉末の品質試験結果を示す。細骨材は登別産陸砂(表乾密度 2.69g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 2.70), 粗骨材は白老産砕石(表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 粗粒率 6.64)を用いた。化学混和剤として、AE 減水剤標準形(リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体)および空気量調整剤を用いた。空気量調整剤には、AE 剤(アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤), フライアッシュ用 AE 剤(高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体)および消泡剤(ポリアルキレングリコール誘導体)を使用した。

コンクリートの調合および練上がり性状を表-3に示す。試験体は W/C=0.55 を基本とし、混和材置換による W/B の低下を考慮して W/C=0.48 の水準を加えた。コンクリートはすべて AE コンクリートとして、混和材無混入の NA-H, NA-L, フライアッシュを混入した FA-15(外)(15%wt セメント外割り置換), 高炉スラグ微粉末を混入した SA-15(外)(15%wt セメント外割り置換), SA-15(内)(15%wt セメント内割り置換), SA-45(内)(45%wt セメント内割り置換)の6種類の調合とした。

## 2.2 実験方法

試験項目は凍結融解試験と自己修復性状試験である。凍結融解試験は、7.5×7.5×40cm の角柱供試体を用いて ASTM C 666 A 法に準拠して行った。また、凍結融解試験前の養生期間の違いによる耐久性指数を把握するため、凍結融解試験前の養生条件を 20℃水中養生で試験前の養生期間 2 週および 1 年とした。測定項目は質量変化、長さ変化およびたわみ振動による一次共鳴振動数とした。一次共鳴振動数の測定結果より、耐久性指数を算出した。

自己修復性状は、φ10×20cm の円柱試験体を用いて、初期、劣化後および修復養生後における性状試験により評価した。打設・脱型から 20℃水中 4 週、13 週および 1 年養生後に初期性状試験として相対動弾性係数の測定を行い、その後繰返し載荷によって微細ひび割れを導入した後に劣化後性状試験を行った。修復養生は、夏期に北海道において受ける修復環境を想定した条件とし

て 20℃水中 1 週養生、それぞれのコンクリートが持つポテンシャルとしての自己修復効果を把握するための条件として 40℃水中 4 週養生、および水分を供給しない場合の修復効果を把握するための条件として 20℃封かん 4 週養生を設定した<sup>4)</sup>。

なお、マイクロクラックの導入方法として、凍結融解試験によって劣化を与える場合には AE コンクリートなど耐凍害性に優れたコンクリートでは劣化が生じず、凍結融解 300 サイクル時においても目標の劣化程度に達しない場合がある。そのため、既往の研究<sup>3)</sup>において、耐凍害性に優れた AE コンクリートで凍害劣化と類似のマイクロクラックを導入する方法としての繰返し載荷による力学的手法が提案されており、本研究では、修復養生前の劣化程度を相対動弾性係数 90%程度を目標とし、遠藤らの繰返し載荷に関する実験結果<sup>5)</sup>をもとに、最大圧縮荷重の 80%の荷重を 10 回繰返し載荷する方法を採用した。各性状試験の検討項目は、相対動弾性係数の変化とした。相対動弾性係数は縦振動による一次共鳴振動

表-1 フライアッシュの品質試験結果

品質項目		試験値
二酸化ケイ素(%)		68.61
塩分(%)		0.15
強熱減量(%)		1.72
密度(g/cm <sup>3</sup> )		2.15
粉末度	45μm ふるい残分(%)	16
	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	3890
活性度指数(%)	材齢28日	86
	材齢91日	104

表-2 高炉スラグ微粉末の品質試験結果

品質項目		試験値
密度(g/cm <sup>3</sup> )		2.91
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)		4030
化学組成(%)	酸化マグネシウム	6.21
	二酸化ケイ素	34.12
	酸化アルミニウム	16.07
	酸化第二鉄	0.38
酸化カルシウム		42.06
塩基度		1.89

表-3 コンクリートの調合および練上がり性状

試験体記号	調合										練上がり性状					
	W/C (%)	W/B (%)	目標スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	絶対容積(l/m <sup>3</sup> )				AE減水剤	空気量調整剤 B×wt(%)	温度 (°C)	空気量 (%)	スランブ (cm)		
						W	C	S	G						混和材	
NA-H	55	55	18	4.5	45	174	100	309	372	-	250ml /B100kg	0.002***	25.5	4.3	19.5	
SA-45(内)						163	51	316	380	46		-	0.0012*	26.0	6.5	20.5
SA-15(外)						172	99	289	379	16		-	0.0012*	26.0	5.9	19.5
FA-15(外)						169	97	289	379	-		21	0.018**	27.0	5.5	18.0
SA-15(内)	48	48	18	4.5	43	177	99	286	374	19	-	0.0012*	26.5	4.2	20.5	
NA-L						180	119	284	372	-	-	0.002***	26.0	4.0	19.5	

注) \*AE剤 \*\*FA用AE剤 \*\*\*消泡剤

数の測定により算出した。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 耐凍害性

図-1に凍結融解試験前の養生期間(2週および1年)の違いによる試験体の耐久性指数を比較して示す。養生期間2週では、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入した試験体は置換率および置換方法によらず、混和材無混入の試験体と同等以上の耐凍害性を示しているものの、フライアッシュを混和したもの(FA-15(外))の耐凍害性が高炉スラグ微粉末を混和した試験体よりやや劣る結果となっている。養生期間1年では、NA-L以外の試験体の耐凍害性指数は増大しており、特に、材齢2週時の耐凍害性がやや劣っていたFA-15(外)とSA-15(内)の耐久性指数の増大が顕著であり、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入した試験体の耐久性指数は全てほぼ同程度となっている。

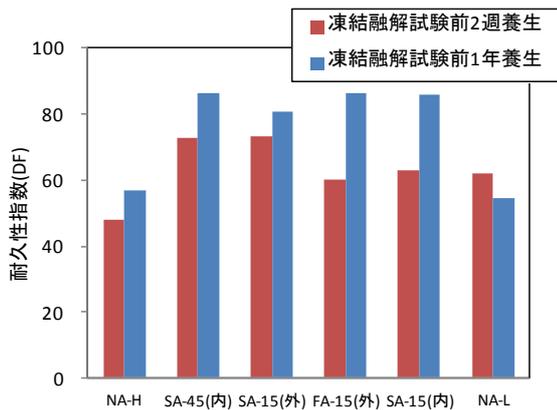


図-1 凍結融解試験前の養生期間の違いによる耐久性指数の比較

#### 3.2 自己修復性状

既往の研究<sup>3) 4) 5)</sup>では、修復効果の中性化速度係数の変化で評価していたが、試験期間が長期に及ぶこと、中性化速度係数比と相対動弾性係数の間には高い相関性が認められることから、本研究では相対動弾性係数を評価指標として用いることとした。

初期養生4週の場合の自己修復性状試験結果として、初期、劣化後および修復養生による相対動弾性の変化を図-2に示す。フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入した試験体(SA-45(内), FA-15(外))において、40℃水中4週修復養生条件後に初期性状以上までの回復が認められた。また、修復養生期間と修復程度の特徴として、修復開始から修復1週での修復程度が大きく、復養生期間が長くなるにつれて修復程度が小さくなる傾向が見られた。また、修復4週では封かん養生

での修復程度は、40℃水中での修復程度よりも小さい結果となったものの、外部からの水の供給が無い条件でも初期性状の95%以上まで回復しており、ある程度の修復を期待できることが確認できた。

初期養生1年の場合の自己修復性状試験結果を図-3に示す。初期養生4週の場合とほぼ同様の傾向を示しているが、いずれのコンクリートにおいても修復養生による相対動弾性係数の回復程度は小さくなっている。また、いずれのコンクリートにおいても20℃封かん養生と40℃水中養生での修復養生期間4週での修復程度がほぼ同程度となっている。

#### 3.3 自己修復効果の評価指標

既往の研究<sup>3)</sup>では、初期養生後、劣化後、修復養生後の各性状試験における中性化速度係数の変化を用いて自己修復効果を評価する指標として式(1)が提案されている<sup>2)</sup>。

$$E_S = P_S / D_I \quad (1)$$

ここに、

$E_S$ : 自己修復効果 (=  $P_S / D_I$ )

$P_S$ : 潜在的自己修復性能 (=  $D - S$ )

$D_I$ : 劣化指数 (=  $D - I$ )

$I$ : 初期性状時の中性化速度係数  
(mm/√週)

$D$ : 劣化後性状時の中性化速度係数  
(mm/√週)

$S$ : 修復後性状時の中性化速度係数  
(mm/√週)

しかし、式(1)では自己修復コンクリートの修復ポテンシャルは評価されているものの、本来持っている劣化抵抗性が考慮されていない。そもそもの劣化抵抗性が劣る場合、自己修復効果を有していても全体として耐久性は低いものになってしまう。ゆえに、自己修復コンクリートの耐久性を評価するにあたっては、劣化抵抗性と自己修復効果の双方を考える必要がある。

そこで本研究では、劣化抵抗性として凍結融解試験結果から得られた耐久性指数(DF)を用い、従来の自己修復効果( $E_S$ )を考慮した新たな耐久性評価指標式(2)を提案する。なお、ここでは $I$ 、 $D$ 、 $S$ の性能値として、従来の中性化速度係数に代えて、相対動弾性係数を用いることとする。

$$S_I = E_S \cdot DF \quad (2)$$

ここに、

$S_I$ : 自己修復効果を考慮した耐久性

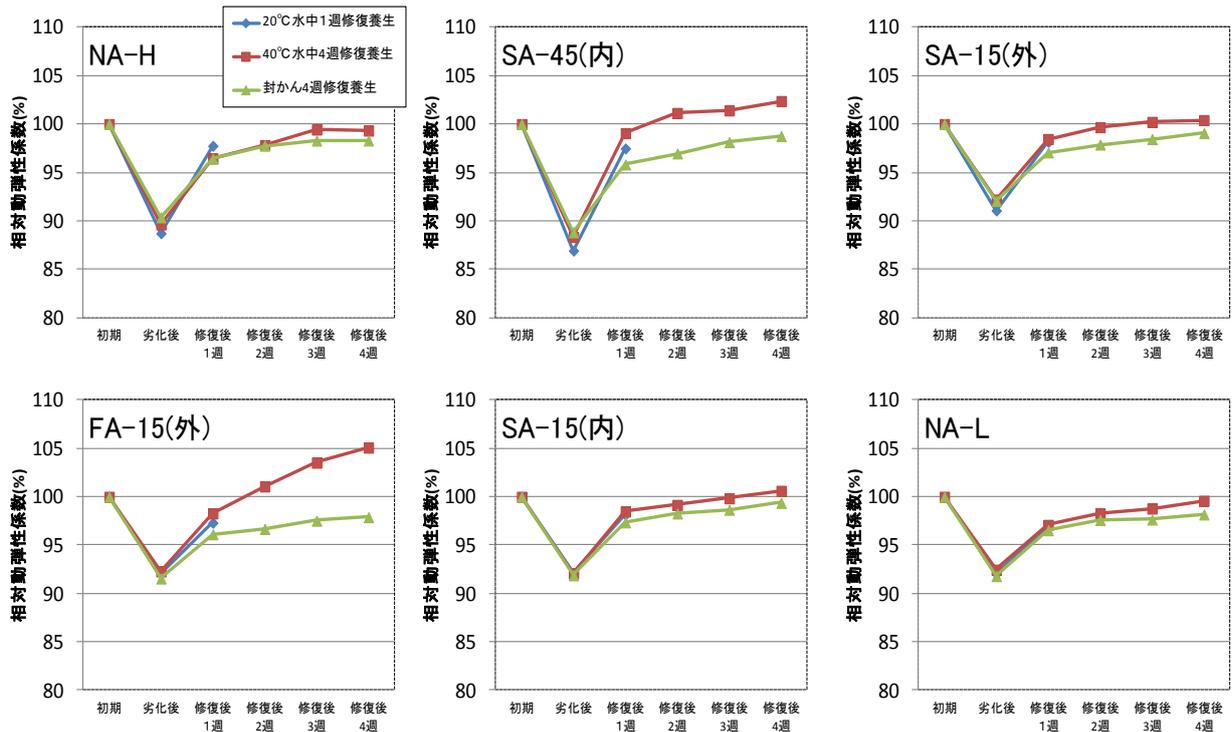


図-2 劣化および修復養生による相対動弾性の変化（劣化前の養生期間：水中4週）

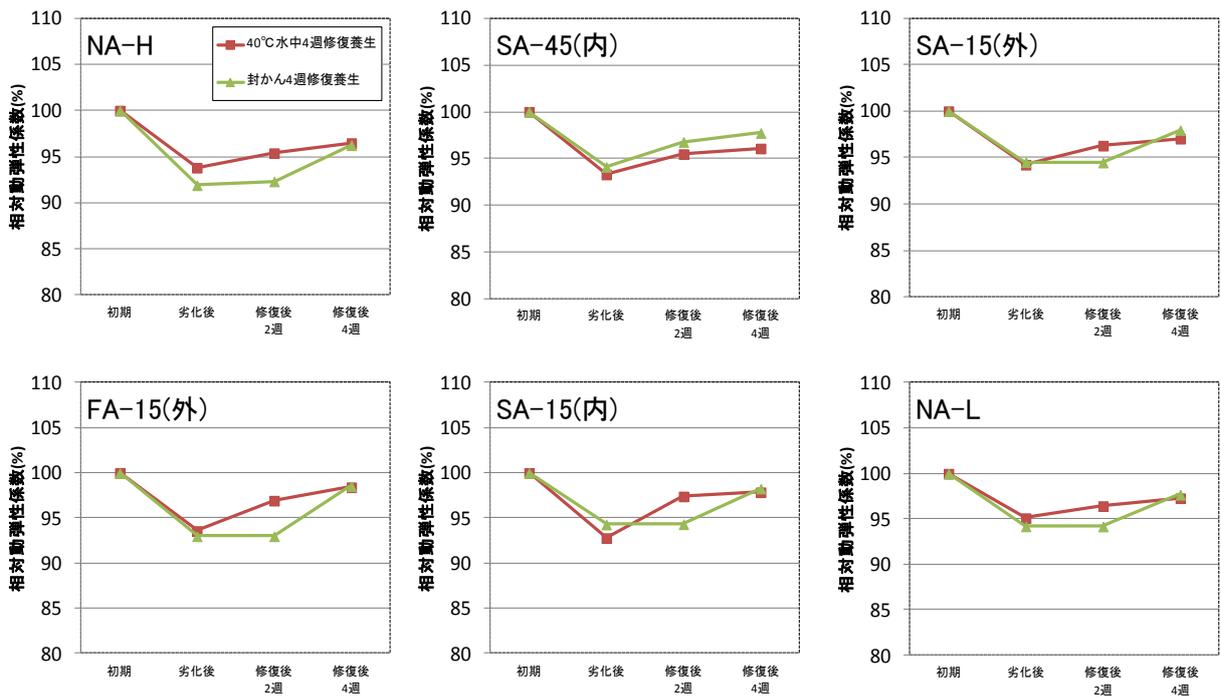


図-3 劣化および修復養生による相対動弾性の変化（劣化前の養生期間：水中1年）

$E_S$ ：自己修復効果（ $=P_S/D_I$ ）

$P_S$ ：潜在的自己修復性能（ $=S-D$ ）

$D_I$ ：劣化指数（ $=I-D$ ）

$I$ ：初期性状時の相対動弾性係数（%）

$D$ ：劣化後性状時の相対動弾性係数（%）

$S$ ：修復後性状時の相対動弾性係数（%）

$DF$ ：耐久性指数

40°C水中修復養生（4週修復）の場合の式（2）による

$S_I$ の評価結果を図-4に示す。ここで用いた $DF$ 値は凍結融解試験前の養生期間2週の結果である。劣化前の養生期間の違いによらず、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混入したものは、混和材が無混入のものよりも $S_I$ の値が大きくなった。W/C、置換率及び置換方法が同一であるFA-15(外)とSA-15(外)を比較すると、FA-15(外)の $S_I$ の値が大きく、フライアッシュの方が高炉スラグ微粉末よりも自己修復による耐久性回復効果が高いと

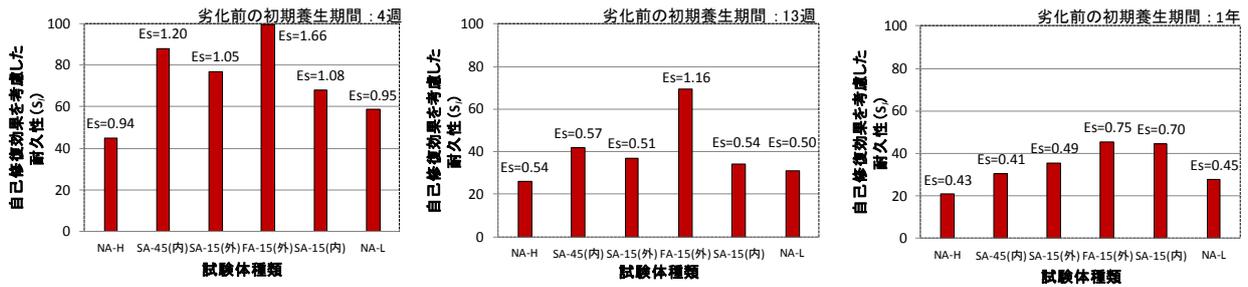


図-4 自己修復効果を考慮した耐久性  $S_f$  の比較 (劣化後 40°C水中修復養生, 凍結融解試験前 2 週での耐久性指数)

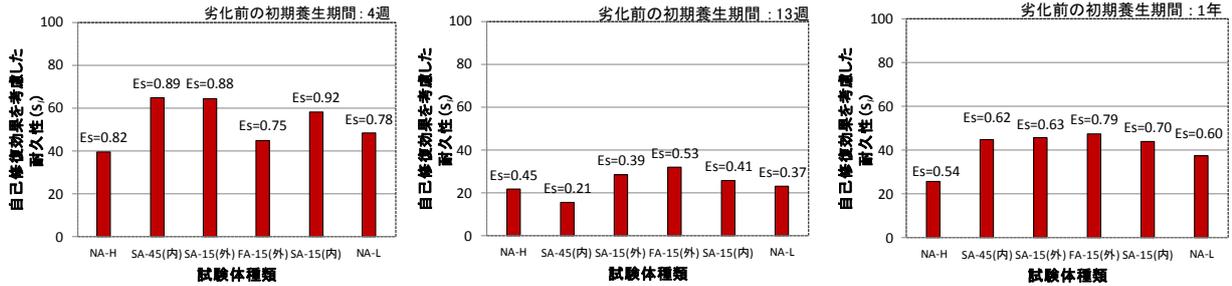


図-5 自己修復効果を考慮した耐久性  $S_f$  の比較 (劣化後 20°C封かん修復養生, 凍結融解試験前 1 年での耐久性指数)

いえる。

また、劣化前の初期養生期間が長くなると全体的に  $S_f$  の値が小さくなる傾向が認められる。混和材無混入で W/C の異なる NA-H と NA-L を比較すると、劣化前の初期養生期間 4 週では両者の  $E_s$  値には大きな差は見られないものの、耐久性指数の差が反映され、W/C の小さな NA-L の  $S_f$  値が大きくなっている。劣化前の初期養生期間 13 週および 1 年においても、 $S_f$  値に耐久性指数の差が反映される傾向は見られるものの、混和材無混入の NA および高炉スラグ微粉末混入の SA では、W/C、W/B によらず、 $S_f$  値および  $E_s$  値ともにその差はほとんどなくなっている。FA-15(外)の  $S_f$  値は劣化前の初期養生期間 13 週において比較的大きな値を示しており、フライアッシュの方が高炉スラグ微粉末よりも高い自己修復効果を示したが、劣化前の初期養生期間 1 年ではその差は小さくなっている。

20°C封かん修復養生 (4 週修復) の場合の式 (2) による  $S_f$  の評価結果を図-5 に示す。ここで用いた DF 値は材齢 2 週の結果である。40°C水中修復養生の場合とは異なり、劣化前の初期養生期間 4 週の場合の修復効果は高炉スラグ微粉末の方がフライアッシュよりも自己修復効果が大きく、フライアッシュ混入による自己修復効果はほとんど認められない結果となった。さらに、劣化前の初期養生期間 13 週の場合には、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末ともに混和材無混入の NA-H と NA-L の  $S_f$  値と差のない結果となった。また、劣化前の初期養生期間 1 年では 13 週と比べて  $S_f$  値がやや増加しているが、これは繰返し载荷による劣化程度が劣化前の

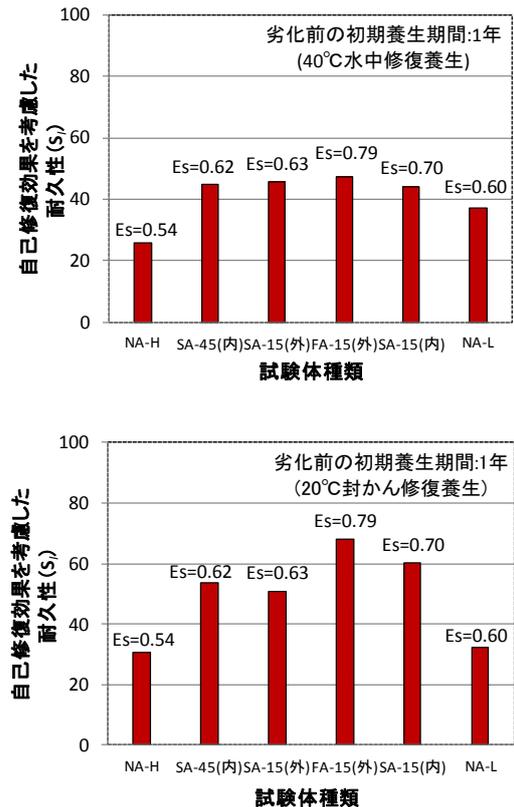


図-6 自己修復効果を考慮した耐久性  $S_f$  の比較 (凍結融解試験前 1 年での耐久性指数)

初期養生期間 13 週では 87~90%程度、劣化前の初期養生期間 1 年では 93~95%程度と若干差があったことに起因しているものと思われる。

さらに、劣化前の養生期間 1 年における  $S_f$  値と凍結融

解試験前の養生期間 1 年での  $DF$  値を用いて算出した結果を図-6 に示す。図-4 および 5 の凍結融解試験前 2 週での  $DF$  値による算出結果と比較すると、それぞれのコンクリート間の相対的な関係には大きな差は見られないが、凍結融解試験前の期間の進行のともなう耐久性指数の変化が反映され、すべてのコンクリートにおいて凍結融解試験前の期間 1 年の  $S_f$  値が増加している。特に、耐久性指数の増大が顕著だった FA-15(外)と SA-15(内)の  $S_f$  値の増加が大きい。また、修復養生条件による違いもそれほど大きくない結果となった。

#### 4. まとめ

フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を混和した AE コンクリートの初期養生材齢 1 年までの自己修復効果を比較検討し、以下の結論を得た。

- (1) 劣化前の初期養生期間 4 週においては、修復養生条件の影響が大きく、フライアッシュは高温で水分供給のある場合に高い自己修復性を発揮し、高炉スラグ微粉末は水分供給のない条件でも自己修復効果が期待できる。
- (2) 材齢の進行にともなう自己修復効果を評価する際には、耐凍害性の変化の影響を考慮する必要がある。
- (3) 劣化前の養生期間の進行にともない自己修復効果は低減するものの、20℃水中養生で材齢 1 年の時点においても、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末による自己修復効果は持続していることが確認された。
- (4) 劣化前の初期養生期間 1 年においては、自己修復効果に修復養生条件、混和材種類、置換率による大きな差は認められなかった。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、北海道立総合研究機構北方建築総合研究所の桂修氏には貴重な助言を頂いた。また実験においては、室蘭工業大学大学院修士・澁谷将氏（現（株）竹中工務店）、学部卒業生・上村直哉氏（現（株）クワザワ）のご協力をいただいた。記して謝辞を示す。

#### 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：セメント系材料の自己修復性の評価とその利用法研究委員会報告書，2009.
- 2) 藤原佑美，濱幸雄，山城洋一，齋藤敏樹：フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.303-308，2008
- 3) 村井洋公，濱幸雄，谷口円，桂修：フライアッシュを混入した AE コンクリートの自己修復効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp. 973-974，2009.
- 4) 澁谷将，濱幸雄，谷口円，桂修，佐川 孝広：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの自己修復効果，日本建築学会北海道支部研究報告論文集，Vol.83，pp.47-50，2010.
- 5) 遠藤裕丈ら：寒冷地におけるコンクリートの収縮ひび割れ対策委員会報告書，pp.50-67，2009.9.