

論文 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

村井洋公^{*1}・濱 幸雄^{*2}・谷口 円^{*3}・桂 修^{*4}

要旨: 本研究では、フライアッシュを外割り混合したコンクリートの材齢 1 年までの強度増進性状、耐凍害性の検討を行うとともに、凍害劣化後の自己修復効果を相対動弾性係数および中性化速度係数によって評価した。劣化と修復を繰返す実環境下では劣化程度よりも修復効果が上回ることが必要であることから、劣化と修復のバランスを表わす自己修復効果の評価指標を示し、フライアッシュを混入した AE コンクリートでは劣化程度と修復効果のバランスの良い優れた自己修復効果が確認された。また、耐凍害性に優れたコンクリートでの自己修復効果評価のための促進試験方法として繰返し載荷法が適用可能であることを示した。

キーワード: フライアッシュ, AE コンクリート, 耐凍害性, 自己修復, 繰返し載荷

1. はじめに

RC 建築物の耐久性の確保のために、従来からコンクリートの高強度化により劣化作用を抑制する方策がとられている。しかし、高強度コンクリートにおいても、供用期間中には内外の温度差や乾燥によるマイクロクラックが入ることで、耐凍害性の低下や中性化促進の原因になることが指摘されている¹⁾²⁾。

著者らは鉱物組成を調整したセメントとフライアッシュを適切に配合し、長期にわたり計画的に反応を継続させることで、水和析出物により供用期間中に生じるマイクロクラックを埋めることが可能となる自己修復コンクリートの開発・研究を行ってきた。既報³⁾⁴⁾では、フライアッシュを用いたモルタルおよびコンクリートにおいて、フライアッシュ混合による潜在的な自己修復性能の高さを確認し、JISII 種灰の範囲ではフライアッシュの品質による自己修復効果の差は小さく、フライアッシュの置換率が高いほど修復効果が大きくなることを示した。また、劣化および修復によって直径 50nm~10000nm の比較的粗大なコンクリート中の細孔が大きく変化することを明らかにした。

しかしながら、既報ではマイクロクラックの発生要因を凍結融解作用と想定し、自己修復効果を検討することを目的としていた。そのため、マイクロクラックの導入は促進凍結融解試験によるものとした。明らかに劣化を生じさせ、その修復効果を比較するため、コンクリートは non-AE の範囲の実験に限定していた。non-AE の自己修復コンクリートの中には、高い自己修復性能を持つものの、それ自体の耐凍害性に劣るものも認められた。そのため、自己修復コンクリートを実際の建造物に適用していくには空気量の確保が必要であると考えられた。

以上をふまえ、本研究では、AE コンクリートも含めたフライアッシュを外割り混合したコンクリートの材齢 1 年までの強度増進性状、耐凍害性の検討を行い、凍結融解繰返しによる劣化に対する自己修復効果を相対動弾性係数と中性化速度係数の変化によって評価した。また、AE コンクリートの場合には促進凍結融解試験条件では、凍害劣化を受けにくく、修復効果を明確に評価できない場合がある。よって、これらの耐凍害性に優れたコンクリートでの自己修復効果を評価する試験方法についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用したフライアッシュの品質を表-1 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント (密度 3.16 g/cm³, プレーン比表面積 3270cm²/g) を使用した。比較用試験体(記号 N, NA)は普通ポルトランドセメントを使

表-1 フライアッシュの品質

項目		JIS規格 II 種	WA
二酸化けい素 (%)		45.0以上	68.6
湿分 (%)		1.0以下	0.15
強熱減量 (%)		5.0以下	1.7
密度 (g/cm ³)		1.95以上	2.20
粉末度	45 μ ふるい残分 (%)	40以下	16
	比表面積 (cm ² /g)	2,500以上	3,890
フロー値比 (%)		95以上	106
活性度指数 (%)	材齢28日	80以上	86
	材齢91日	90以上	104

*1 室蘭工業大学大学院 建設システム工学専攻 (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 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 研究職員 工修 (正会員)

*4 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 科長 博士 (工学) (正会員)

表-2 コンクリート調合表および練上がり性状

W/C %	SL cm	Air %	s/a %	単位量(kg/m ³)					絶対容積(l/m ³)				混和剤(kg/m ³)			練上がり性状			
				W	C	FA	S	G	C	FA	S	G	高性能減水剤	AE剤	FA用	温度 ℃	SL cm	Air %	塩化物量 kg/m ³
51	18	1.0	47	151	296	—	942	1070	94	—	350	395	3.85	—	—	23.0	16.5	4.0	0.029
		4.5	46	151	296	—	880	1038	94	—	327	383	3.26	0.067	—	23.0	17.5	5.5	0.028
		1.0	48	151	296	44	907	1049	94	21	337	387	3.85	—	—	20.0	18.0	2.6	0.036
		4.5	46	151	296	44	823	1038	94	21	306	383	3.26	—	0.289	20.5	19.0	5.1	0.034

用し、自己修復コンクリートとして、普通ポルトランドセメント使用しフライアッシュを混入した試験体（記号F, FA)の計4種類とした。NAおよびFAにはAE剤を使用した。フライアッシュはJISII種灰に相当するWAを用い、セメント質量の15%を外割で混合した。細骨材は錦多峰産陸砂（表乾密度2.69g/cm³、粗粒率2.74）、粗骨材は峯朗産碎石（表乾密度2.71g/cm³、粗粒率6.61）を使用した。混和剤は、AE剤I種（主成分：天然樹脂酸塩）、フライアッシュ用AE剤（主成分：特殊界面活性剤）および高性能減水剤I種（主成分：ナフタリンスルホン酸・ホルマリン高縮合物塩）を使用した。コンクリートの調合表および練上がり性状を表-2に示す。

2.2 試験方法と実験水準

(1) 圧縮強度試験

コンクリートの基礎性状として、圧縮強度試験を行った。φ10×20cmの円柱試験体を用いて、材齢7日、28日、91日および1年で圧縮強度を測定した。なお、養生方法は20℃水中養生とした。

(2) 耐凍害性

耐凍害性の検討は、7.5×7.5×40cmの角柱供試体を用いて、JIS A 1148 A法に準拠した水中凍結融解試験を行い、30サイクル毎に質量変化、長さ変化およびたわみ振動による一次共鳴振動数の測定を行った。なお、凍結融解試験の開始材齢は4週、13週および1年とし、それまで20℃水中養生を行った。この結果を自己修復性能の評価における初期性状として位置付けた。

(3) 促進凍結融解試験による自己修復性能の評価

自己修復性能は、既報²⁾と同様に促進凍結融解試験による劣化の修復性能から評価することとした。

7.5×7.5×40cmの角柱供試体を用いて、初期、劣化後および修復養生後における相対動弾性係数および中性化速度係数の変化によって評価した。相対動弾性係数はたわみ振動による一次共鳴振動数の測定により求めた。

中性化速度係数は、初期、劣化後、修復養生後の各性状時において、20℃・60%RHの恒温恒湿室で4週間乾燥させた後、JIS A 1153に準拠して促進中性化試験を行い求めた中性化深さから算出した。

劣化後性状は、20℃水中養生・材齢4週、13週および

1年の各材齢においてJIS A 1148 A法に準じた凍結融解作用を与えて相対動弾性係数を80~90%まで低下した状態のものとした。

修復養生後性状は、劣化後に40℃水中・4週養生を行ったものとした。この修復養生条件は、各コンクリートの潜在能力としての自己修復性を評価するための条件と位置付けている。

実際にコンクリートが供用される環境では、冬季の凍結融解作用と夏季の高温が想定され、経年とともに劣化-修復のサイクルが繰り返されると考えられる。これらの実環境を想定した劣化-修復の繰り返し条件として、30サイクルの凍結融解と40℃水中・3日養生を3サイクル繰返す条件についても、検討を行うこととした⁴⁾⁵⁾。これらの条件の決定は、劣化条件である一冬に受ける凍結融解回数を促進試験の30サイクルと想定し、修復養生は北海道の夏季の温湿度の実測から等価積算温度を算出し設定したものである³⁾。3サイクル繰返すことにより、実環境下で3年間に相当するものと考えた。

(4) 力学的手法によるマイクロクラックの導入

促進凍結融解試験によって劣化を与えようとする場合、耐凍害性に優れたコンクリートでは劣化が生じず、修復効果を評価することができない。本研究では、修復性状を検討するにあたり、劣化後性状を相対動弾性係数80~90%程度と設定した。しかし、AEコンクリートでは凍結融解300サイクル経過時においても目標の劣化程度に達しない可能性があった。そこで、凍結融解作用で生じるコンクリート内部のマイクロクラックを力学的な手法により導入し、その修復効果を検討することとした。

予備実験において、φ10×20cmの円柱供試体を用いて最大圧縮荷重の85%を数回繰返し載荷し、載荷前に対する相対動弾性係数を90%まで低下させた。試験体断面に生じたマイクロクラックは松村らの方法²⁾で観察した。

写真-1に力学的手法によりひび割れを入れたコンクリートの切断面に蛍光塗料を含浸させ研磨し、紫外線ランプを照射し撮影した写真を示し、また、凍結融解試験を行ったコンクリートで同様の処理により得られた写真を示す。その結果、促進凍結融解試験によって生じるコンクリート内部のマイクロクラックの状態とほぼ類

似していることを確認された。

よって、凍結融解作用に相当するマイクロクラック導入手法として繰返し载荷を採用した場合の修復性状についても検討を行った。試験に用いた供試体は 20℃水中養生 1 年のものとした。劣化条件は、最大圧縮荷重の 85% の繰返し载荷を行い、相対動弾性係数を 90% まで低下させた。その後は 20℃水中で修復養生を行い、50 日まで継続的に一時共鳴周波数を測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 強度増進性状

強度増進性状を図-1 に示す。フライアッシュを外割混合した同一水セメント比のコンクリートで初期強度にフライアッシュの有無による差は認められない。一方、フライアッシュを混合した場合の材齢 28 日以降の強度の伸びが大きく、特に F における材齢 91 日から 1 年までの強度増進が顕著である。また、AE と non-AE による強度の差は、一般的に言われている空気量の差に相当する程度である。

3.2 耐凍害性

凍結融解試験における相対動弾性係数の変化を図-2 に示す。フライアッシュ混合の有無および凍結融解試験開始材齢によらず、AE コンクリートの耐久性指数は 70~80 でほぼ一定であった。一方、non-AE コンクリートでは試験開始材齢 4 週のフライアッシュを混合した試験体 F の耐凍害性がきわめて劣る結果となった。しかし、試験開始材齢が長期材齢となるほど N と F の差は小さくなりフライアッシュ混合の有無による耐凍害性の差は、材齢 1 年ではほぼ同等の結果となった。本実験では、単位セメント量および水セメント比の等しい調合であるため、フライアッシュの混合の有無による耐凍害性の差は小さいことが想定されたが、材齢 4 週でのフライアッシュ混合の non-AE コンクリートの耐凍害性が大きく劣る傾向にあった。しかし、空気連行と材齢の進行によって、フライアッシュ混合コンクリートと普通コンクリートの耐凍害性の差が小さくなることが明らかとなった。

3.3 自己修復性能の評価

(1) 相対動弾性係数の変化

自己修復性能評価試験の各性状時における相対動弾性係数を図-3 に示す。いずれのコンクリートにおいても、劣化後の修復養生で相対動弾性係数が回復している。材齢 4 週では初期性状と同程度まで回復しているのに対して、材齢が進行すると、その回復程度は小さくなる傾向にあり、また、フライアッシュの混合の有無による明確な差は認められない。

(2) 中性化速度係数の変化

自己修復性能評価試験の各性状時における中性化速

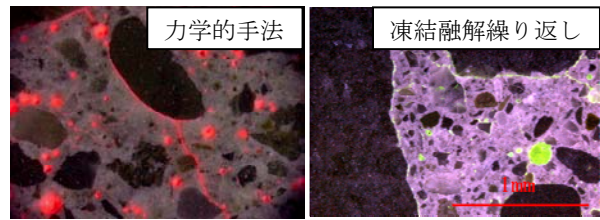


写真-1 力学的手法および凍結融解によるひび割れ

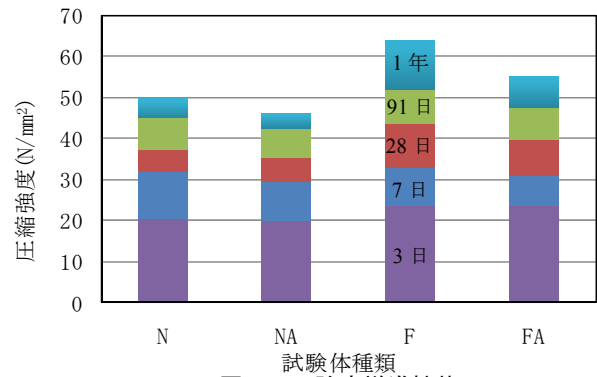


図-1 強度増進性状

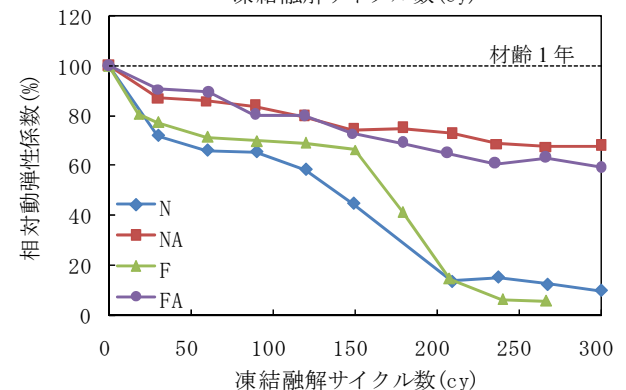
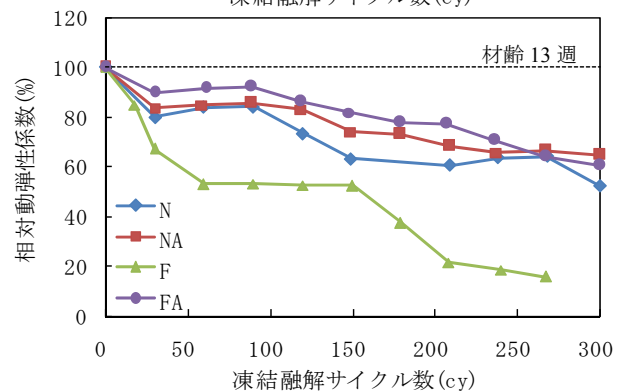
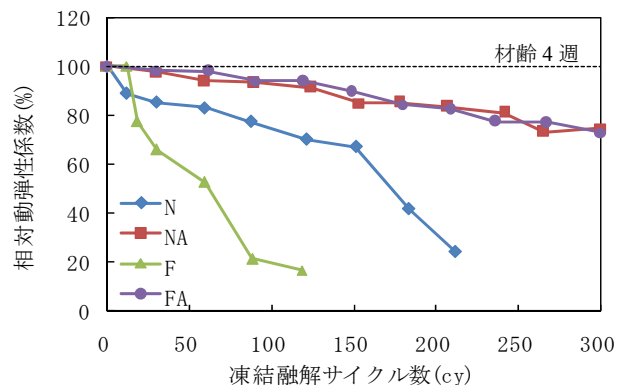


図-2 凍結融解試験結果

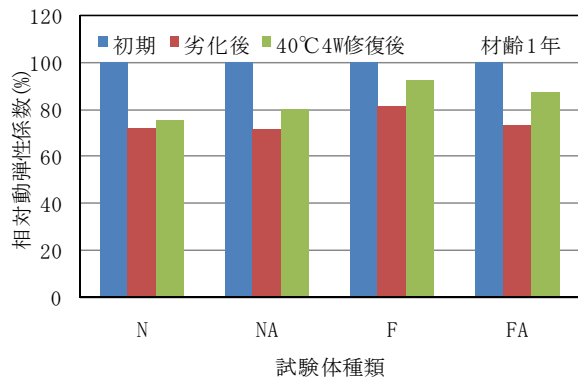
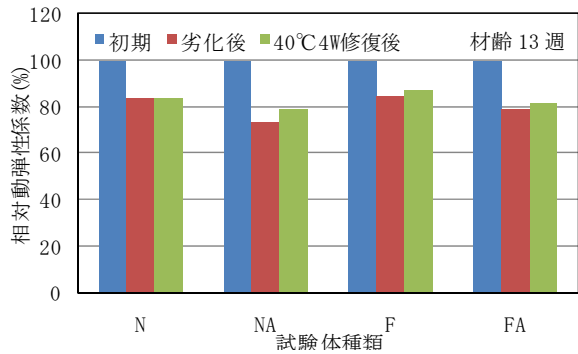
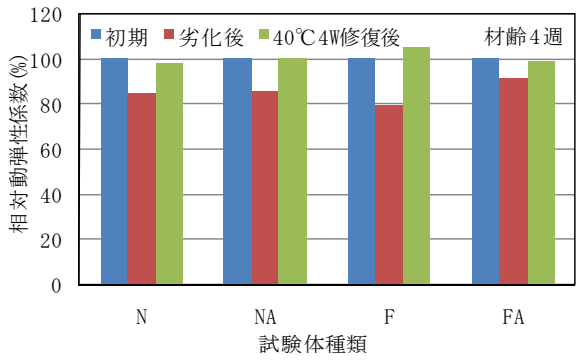


図-3 相対動弾性係数の変化

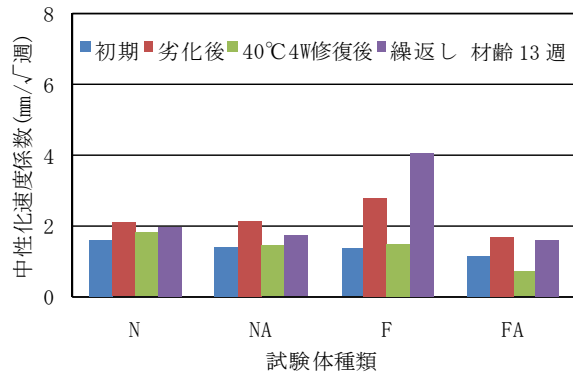
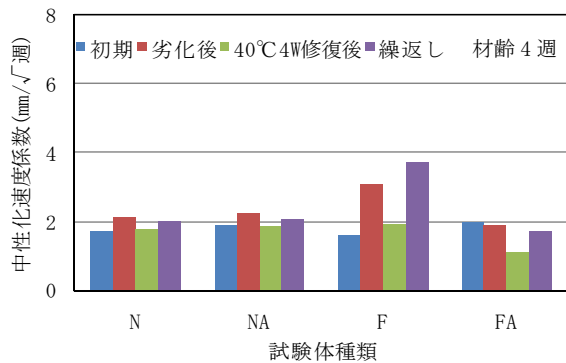
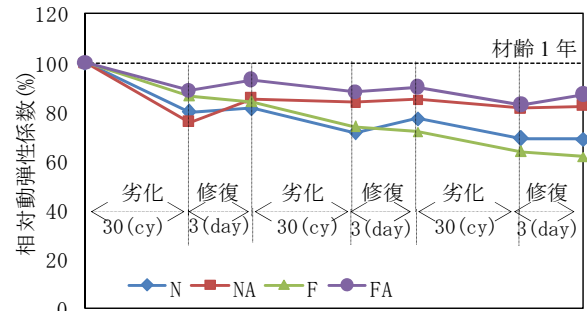
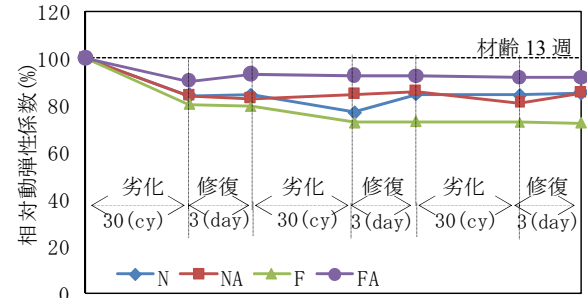
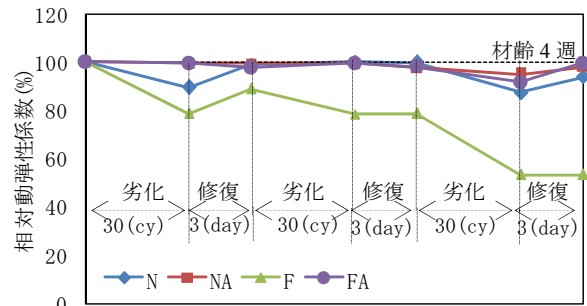


図-4 中性化速度係数の変化



サイクル(cy)および日数(day)

図-5 劣化と修復を繰り返した場合の相対動弾性係数の変化

度係数の変化を図-4に示す。いずれのコンクリートにおいても、劣化後に中性化速度係数が大きくなり、その後の修復養生で中性化速度係数が初期性状時と同等程度まで小さくなる傾向がみられる。特にフライアッシュを混合した non-AE コンクリートでの劣化後および修復養生後の中性化速度係数の変化が大きい。また、フライアッシュを混合した AE コンクリートでは、修復養生後の中性化速度係数が初期性状時よりも小さくなっている。

(3) 実環境を想定した条件下での自己修復性能

凍結融解による劣化と修復養生を繰り返した場合の相対動弾性係数の変化を図-5に示す。全体的に、最初の30 サイクルの凍結融解で比較的大きく相対動弾性係数が低下したのち、修復と劣化を繰り返しながら徐々に劣化が進行していく傾向が認められた。材齢4週で最も耐凍害性に劣っていたフライアッシュ non-AE コンクリートで、劣化と修復を繰り返しながら相対動弾性係数が低下していく様子がよくわかる。

3 サイクルの劣化と修復の繰り返しの終了後の最終的な劣化程度は、図-2に示したそれぞれのコンクリートの

耐凍害性と対応したものとなっている。すなわち、フライアッシュによる潜在的な自己修復効果が大きいコンクリートでも、その耐凍害性が劣る場合には有効な耐久性向上策とはならないことを示唆している。

劣化と修復が繰返される実環境での自己修復効果を評価するにあたっては、劣化抵抗性と修復効果のバランスを考慮する必要がある。自己修復コンクリートとして実環境でその修復性能を発揮させるには、1年間に受ける劣化程度より修復効果の方が大きくなければならず、通常のコンクリートと同様に AE コンクリートとして耐凍害性を確保することが前提となる。

3.4 自己修復効果の評価方法の提案

これまでの検討結果から、コンクリート構造物の耐久性向上のために有効となる自己修復効果は、劣化抵抗性と修復効果のバランスを考慮して評価すべきであることが明らかとなった。そこで、初期性状時、劣化後性状時およびその後の修復性状時のそれぞれの中酸化速度係数を I , D , S ($\text{mm}/\sqrt{\text{週}}$) とし、自己修復効果を表わす指標を式 (1) で定義する。

$$E_s = \frac{P_s}{D_I} \quad (1)$$

E_s : 自己修復効果

P_s : 潜在的自己修復性能 ($=D-S$)

D_I : 劣化指数 ($=D-I$)

式 (1) による自己修復効果の評価結果を図-6 に示す。 E_s が 1.0 以上であれば、自己修復によって初期性状以上の中酸化速度係数の回復が期待できることを意味する。普通ポルトランドセメントの AE コンクリート NA をみると、NA の E_s は材齢 4 週で 1.11, 材齢 13 週で 0.97 であった。それに対してフライアッシュを混合した AE コンクリート FA の E_s は、材齢 4 週で 3.87, 材齢 13 週で 1.85 と NA を大きく上回る自己修復効果を有するものとして評価できた。しかしながら、材齢の進行とともに FA の E_s は小さくなる傾向が認められた。

3.5 繰返し载荷による自己修復効果の評価

繰返し载荷によりマイクロクラックを導入した場合の劣化および修復養生による相対動弾性係数の変化を図-7 に示す。N, NA, F では载荷回数 5 回で、FA では载荷回数 8 回で相対動弾性係数が 90% を下回り、すべてのコンクリートにおいてその後の 20°C 水中養生の修復養生で相対動弾性係数の回復が見られた。相対動弾性係数の回復は、コンクリート種類によらず修復養生期間 16 日程度で一定となり、その修復程度は FA, F, N, NA の順に大きくなっていった。

この繰返し载荷法は、耐凍害性に優れた AE コンクリートのように凍結融解による劣化を与えるのが困難な

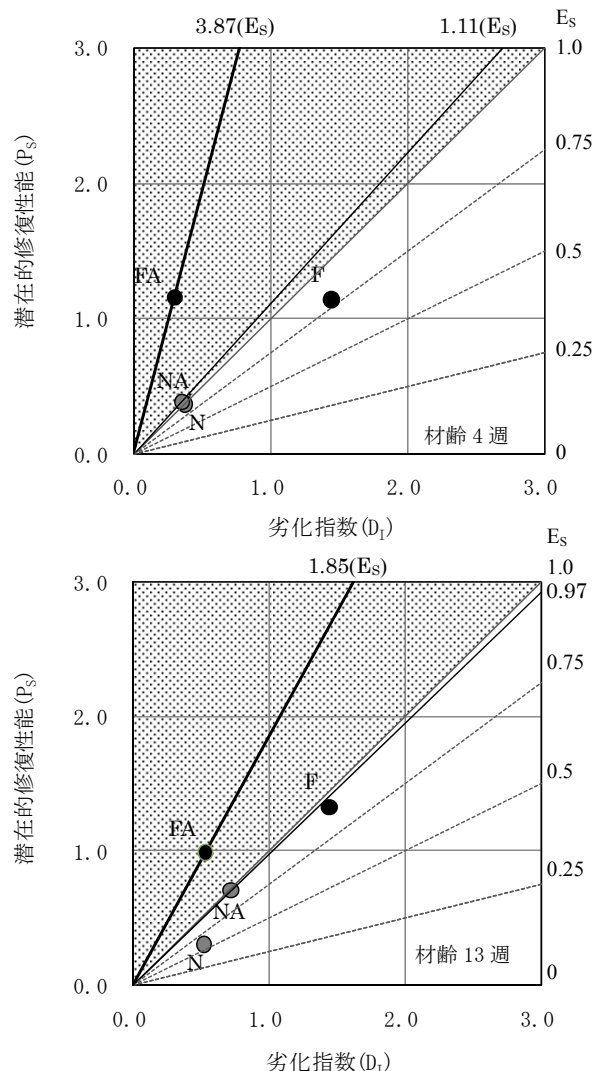


図-6 自己修復効果の評価結果

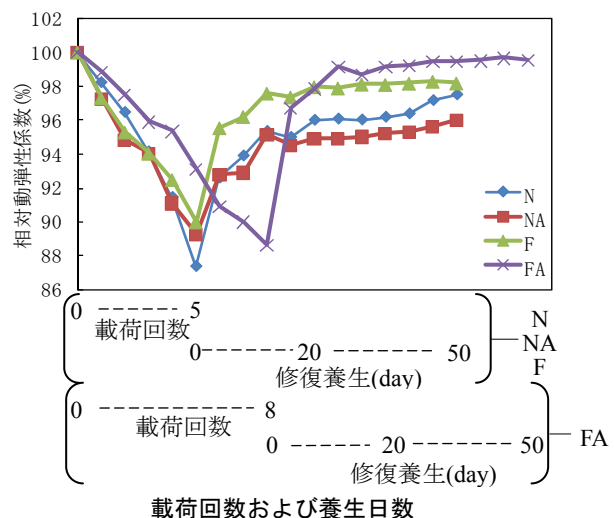


図-7 繰返し载荷後の相対動弾性係数の変化

場合の自己修復効果を評価するための促進試験方法として適用可能であると考えられる。

4. まとめ

本研究の結果、以下の結論を得た。

- 1) フライアッシュ外割り混合のコンクリートでは材齢 28 日以降の強度の伸びがきわめて大きい。
- 2) フライアッシュ外割り混合の non-AE コンクリートの耐凍害性は材齢 28 日では大きく劣る傾向にあるが、空気連行と材齢の進行によって、普通コンクリートとの耐凍害性の差が小さくなる。
- 3) コンクリート構造物の耐久性向上のために有効となる自己修復効果は、劣化抵抗性と修復効果のバランスを考慮して評価すべきであり、劣化と修復のバランスを表わす自己修復効果の評価指標として式 (1) を提案した。
- 4) フライアッシュ外割り混合の AE コンクリートでは、劣化程度と修復効果のバランスの良い優れた自己修復効果が確認された。ただし、材齢の進行とともに E_s は小さくなる傾向にある。
- 5) 繰返し載荷法は、耐凍害性に優れた AE コンクリートのように凍結融解による劣化を与えるのが困難な場合の自己修復効果を評価するための促進試験方法として適用可能である。

謝辞

本研究は、北海道立北方建築総合研究所、室蘭工業大学、日鐵セメント（株）の共同研究として実施したものの一部である。また、コンクリートの作製にあたっては、（株）上田商会の協力を得た。記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 濱幸雄ら：高強度・高流動コンクリートの耐凍害性におよぼす凍結融解試験前の養生条件の検討，セメント・コンクリート論文集，No. 56, pp. 425-430
- 2) 松村宇ら：凍害を受けたコンクリートの劣化度評価法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 563 号，pp.9-13, 2003.1
- 3) 藤原佑美ら：フライアッシュを用いたモルタルの耐凍害性と自己修復効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.29 No.1, pp.303-308, 2007
- 4) 藤原佑美ら：フライアッシュを用いたコンクリートの耐凍害性と自己修復効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.30 No.1, pp.873-878, 2008
- 5) 佐々木智和ほか：コンクリートの劣化・自己修復に影響する自然環境の評価に関する研究，北海道支部研究報告論文集，pp.29-34, 2006