

論文 フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果

藤原 佑美^{*1}・濱 幸雄^{*2}・山城 洋一^{*3}・齋藤 敏樹^{*4}

要旨：本研究は、フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果を把握することを目的として行った。フライアッシュの種類および置換率を変化させたモルタルを作製し、凍結融解試験によって一定の劣化を与えた後の再養生による自己修復効果を圧縮強度、曲げ強度、相対動弾性係数および中性化速度係数の変化を測定するとともに、細孔構造の変化とひび割れ本数との関係について考察した。その結果、劣化後の再養生による自己修復効果が確認され、フライアッシュの自己修復潜在能力は大きいことが明らかになった。

キーワード：自己修復, フライアッシュ, 中性化速度, 細孔構造, ひび割れ

1. はじめに

環境保護や経済性の観点から今後新たに建築される建築物については、優良なストックとして維持していくために長期にわたる高い耐久性と信頼性の確保が求められている。また、産業廃棄物最終処分場の確保の問題から火力発電所から排出されるフライアッシュの有効利用が大きな課題となっている。

これまでは、コンクリートを高強度化することにより劣化作用を抑制し、耐久性向上を目指してきた。しかし、供用期間中に生じるマイクロクラックが耐凍害性の低下や中性化促進の原因になっている。一方、フライアッシュは外割りで適切な量を配合することで無混合の場合より初期強度が増加¹⁾することや、中性化に対する抵抗性が向上²⁾することが知られている。

また、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することで、長期にわたって計画的に反応を起こし、供用期間中に凍害などの劣化により生じた微細ひび割れを反応生成物で埋めるにより、コンクリートの耐久性を高める自己修復効果が期待できる。

本研究では、フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果を把握することを目的とした

実験を行った。フライアッシュの種類および置換率を変化させたモルタル試験体を作製し、凍結融解試験によって一定の劣化を与えた後再養生を行い、自己修復効果を圧縮強度、曲げ強度、相対動弾性係数および中性化速度係数の変化により評価するとともに、細孔構造の変化とひび割れ本数の関係について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料および実験水準

本実験に使用したセメントの品質を表-1に、フライアッシュの品質を表-2に、実験ケースおよび調査表を表-3に示す。試験体 N 以外のセメントは初期強度発現性と C₂S 量を考慮し、早強と低熱を質量比 7:3 の割合で混合して使用した。フライアッシュは二酸化けい素およびブレイン比表面積の異なる 4 種類を使用し、細骨材と置換とした。細骨材は、陸砂(表乾密度 2.69

表-1 セメントの品質

記号	セメントの種類	鉱物組成 (%)				物理性状	
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	密度 (g/cm ³)	フレン比表面積 (cm ² /g)
N	普通	73.8	11.3	5.9	9.0	3.16	3,250
H	早強	79.7	7.0	5.4	7.9	3.13	4,650
L	低熱	28.8	60.4	2.1	8.6	3.24	3,330

※ 鉱物組成は、XRD(リートベルト法)により定量

*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 建設システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 北海道電力株式会社 総合研究所土木グループ (正会員)

*4 北電総合設計株式会社 土木部試験技術室 (正会員)

表-2 フライアッシュの品質

フライアッシュ種類	化学成分					物理性状									
	強熱減量 (%)	二酸化けい素 (%)	API (%)	ガラス化率 (XRD) (%)	pH	フレンメル吸着量		湿分 (%)	密度 (g/cm ³)	粉末度			フロー値比 (%)	活性度指数	
						電発法 (mg/g)	セメント協会法 (mg/g)			フレン比表面積 (cm ² /g)	45μmふるい残分 (%)	BET比表面積 (m ² /g)		材齢 28日 (%)	材齢 91日 (%)
JIS規格 (II種)	5以下	45以上	—	—	—	—	—	1以下	1.95以上	2500以上	40以下	—	95以上	80以上	90以上
A	1.5	73.2	57.4	88.8	10.9	0.43	0.41	0.16	2.15	4,090	17	1.63	105	87	97
B	2.1	59.9	62.4	86.2	11.9	0.53	0.45	0.14	2.22	4,040	18	1.99	107	88	100
C	1.9	58.7	62.8	88.4	7.8	0.52	0.51	0.20	2.26	3,160	15	1.83	108	83	94
D	1.7	60.5	51.9	80.6	8.8	0.54	0.53	0.11	2.21	2,830	17	1.63	105	79	99

表-3 実験ケースおよび調合表

試験体種類	水セメント比 W/C (mass%)	フライアッシュ種類	フライアッシュ置換率 f/(s+f) (vol%)	劣化度 (相対動弾性係数) (%)	修復養生	単位量 (kg/m ³)						
						水 W	セメント C			フライアッシュ F	細骨材 S	
							普通 N	早強 H	低熱 L			
N	55	A	20	60	20°C水中1週	342	621	—	—	—	1,241	
HL						342	—	434	187	—	1,241	
FA20						342	—	434	187	195	994	
FA10						342	—	434	187	97	1,119	
FA30						342	—	434	187	293	870	
FAX	45	B	20	80		40°C水中4週	316	—	492	211	221	1,125
FAY	65						380	—	409	175	183	937
FB	55						342	—	434	187	195	994
FC							342	—	434	187	207	994
FD							342	—	434	187	205	994

※ 設計空気量は0%とした。

g/cm³, 吸水率 1.71%, 粗粒率 2.70)を使用した。

2.2 実験方法

自己修復性能の検討は、□4×4×16cm のモルタル試験体を使用した。打設から 20°C・4 週水中養生後に基準値を測定した後、凍結融解試験によって相対動弾性係数を 80%または 60%程度まで低下させ劣化後性状を測定した。その後、20°C・1 週水中または 40°C・4 週水中の条件で修復のための再養生(以下、修復養生という)を行い、修復後性状を測定した。なお、20°C・1 週水中養生は、実構造物が夏季に北海道において受ける環境を模擬し、40°C・4 週水中養生は、各材料の自己修復潜在能力を検討するための条件として設定した。

測定項目は、圧縮強度、曲げ強度、一次共鳴振動数、中性化深さ、細孔構造およびひび割れ本数とした。

凍結融解試験は JIS A 1148 A 法に準拠した。

促進中性化試験は、20°C・RH60%で 4 週間乾燥させた後、JIS A 1153 に準拠し、促進期間 1 週、4 週、13 週において中性化深さの測定を行った。

細孔構造の測定は、試験体を 5mm 角程度に切

断後アセトンに 24 時間浸漬し、D 乾燥を 3 日間行った後、水銀圧入ポロシメータを用いて細孔直径 6nm~250μm の範囲で行った。

ひび割れ観察は、試験体切断後、切断面を研磨し、2 分間の超音波洗浄を行った後、松村らの方法³⁾に準じて顕微鏡(倍率 200 倍)を用いて測線長を横切るひび割れ本数を測定し、単位長さ当たりのひび割れ本数を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 相対曲げ強度, 相対圧縮強度および相対動弾性係数

基準値を 100%として、試験体ごとに各段階での相対曲げ強度、相対圧縮強度および相対動弾性係数の変化を図-1 に示す。相対曲げ強度および相対動弾性係数は全ての試験体において、劣化後に修復養生した場合、劣化後より数値は大きくなり、回復したことが認められる。一方、相対圧縮強度は、劣化後に 20°C・1 週の修復養生を行っても回復しない試験体もあるが、40°C・4 週の修復養生では全ての試験体の強度回復が認められる。また、フライアッシュを使用

した試験体の 40°C・4 週の修復養生後の相対圧縮強度および相対動弾性係数は、基準値以上に回復していることが認められる。

水セメント比が異なる試験体 FA20, FAX および FAY を比較した場合、劣化度が異なるため修復養生による回復率は水セメント比との相関性は明瞭ではない。

フライアッシュ品質が異なる試験体 FA20, FB, FC および FD を比較した場合、劣化度が異なるため明瞭ではないが、修復養生による回復率はフライアッシュ品質による相違は大きくないと考えられる。

3.2 中性化速度係数

試験体ごとに各段階での中性化速度係数の変化を図-2に示す。中性化速度係数は、凍結融解により増大し、中性化に対する抵抗性が低下

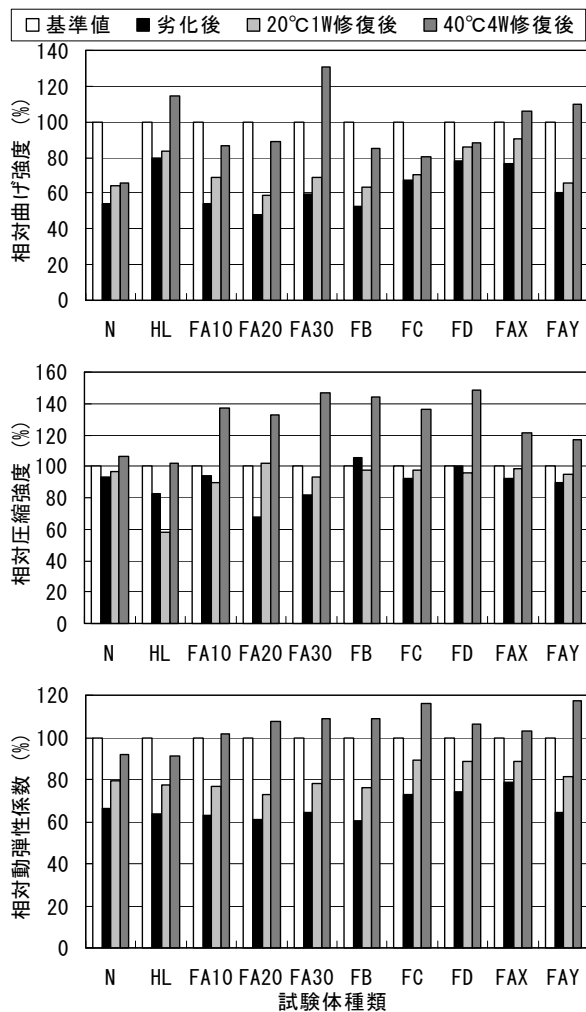


図-1 相対曲げ強度、相対圧縮強度および相対動弾性係数の変化

していることが分かる。その後、20°C・1 週の修復養生を行った場合、中性化速度係数の回復は明瞭ではないが、40°C・4 週の修復養生を行った場合は、中性化速度係数が劣化後より小さくなり、中性化に対する抵抗性が回復していることが認められる。特に、フライアッシュを使用した場合、中性化速度係数は基準値より小さくなり、中性化に対する抵抗性の回復が顕著に認められる。

フライアッシュの細骨材容積置換率と中性化速度係数の関係を図-3に示す。フライアッシュの細骨材置換率が増加しても基準値の中性化速度係数は大きくなり、若干小さくなること認められる。また、劣化後の中性化速度係数は置換率によらず同程度である。その後修復養生した場合、20°C・1 週では劣化後と同程度の中性化速度係数であり回復が認められない。一方、40°C・4 週では置換率が大きいほど中性化速度係数は小さくなり、中性化に対する抵抗性が向上していることが認められる。

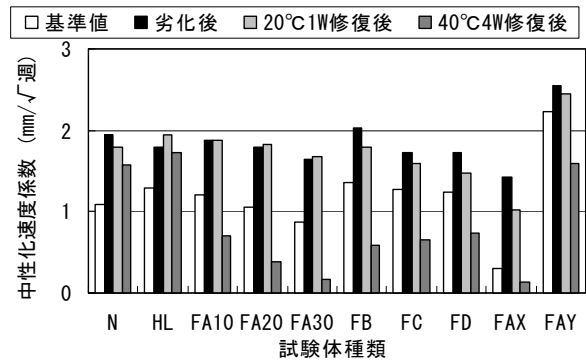


図-2 中性化速度係数の変化

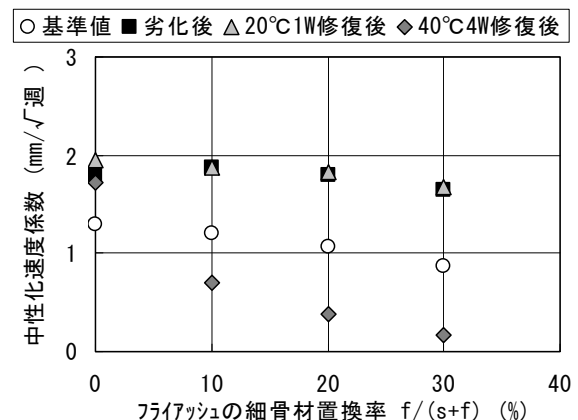


図-3 フライアッシュの細骨材置換率と中性化速度係数の関係

3.3 細孔構造

試験体ごとに各段階での細孔構造の変化を図-4に示す。明瞭ではないが、凍結融解により

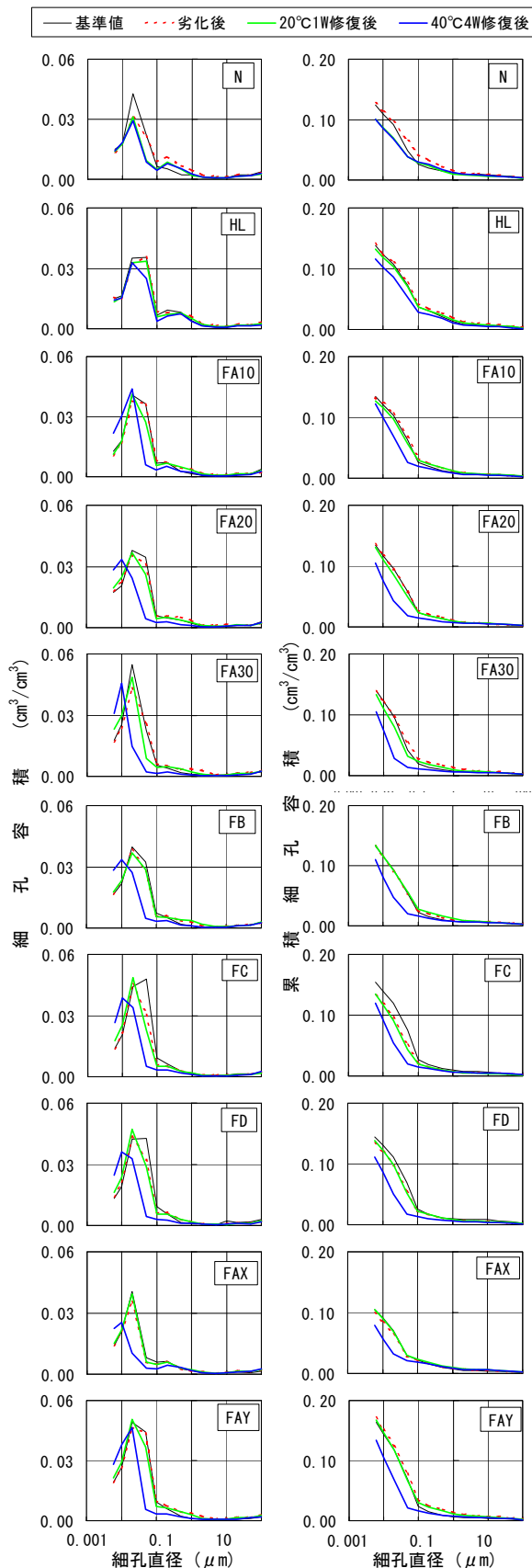


図-4 細孔構造の変化

劣化後の総細孔容積は増加する傾向がみられる。その後修復養生した場合、20°C・1週の養生では細孔構造の変化は明瞭ではないが、40°C・4週の養生では細孔容積は減少し、細孔径分布は微細径側に変化しているのが認められる。

フライアッシュの細骨材置換率と総細孔容積の関係を図-5に示す。フライアッシュの細骨材置換率が増加しても総細孔容積は大きく変動しないことが認められる。

水セメント比と総細孔容積の関係を図-6に示す。水セメント比の減少に伴い総細孔容積は減少することが認められる。また、劣化後および修復後の総細孔容積の変化は、水セメント比にかかわらず同程度である。

基準値を100%とした細孔範囲ごとの相対細孔容積の変化の一例を図-7に示す。劣化後および修復後に細孔容積の変化が大きいのは0.05~10μmの細孔直径範囲である。これより、凍

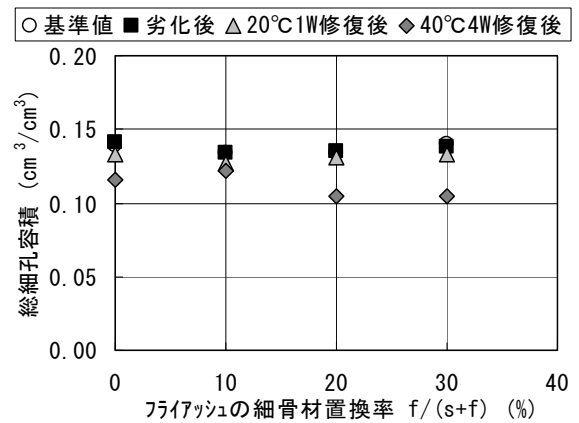


図-5 フライアッシュの細骨材置換率と総細孔容積の関係

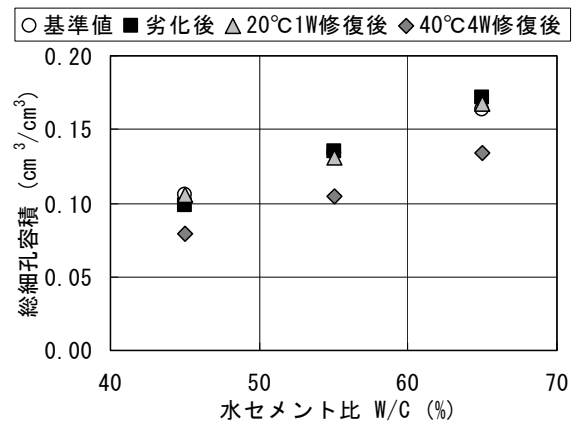


図-6 水セメント比と総細孔容積の関係

結融解の劣化により生じるマイクロクラックの大部分は $1\mu\text{m}$ 以上であり、修復養生により未水和のセメントおよびフライアッシュが反応して生成される水和物の大部分は、 $0.05\mu\text{m}$ 以上の劣化により生じたマイクロクラックを充填したものと推察される。特に、試験体 FA20 の $40^\circ\text{C}\cdot 4$ 週修復養生後の $0.05\mu\text{m}$ 以上の細孔容積の減少率は大きく、フライアッシュの反応による効果が大きいと考えられる。

総細孔容積と圧縮強度の関係を図-8に、総細孔容積と中性化速度係数の関係を図-9に示す。総細孔容積の減少に伴い、圧縮強度は増大し、中性化速度係数は減少する傾向が認められる。これより、劣化および修復養生による細孔構造の変化が強度特性、中性化速度係数に影響を及ぼしており、特に $40^\circ\text{C}\cdot 4$ 週の修復養生をした場合に圧縮強度および中性化速度係数が回

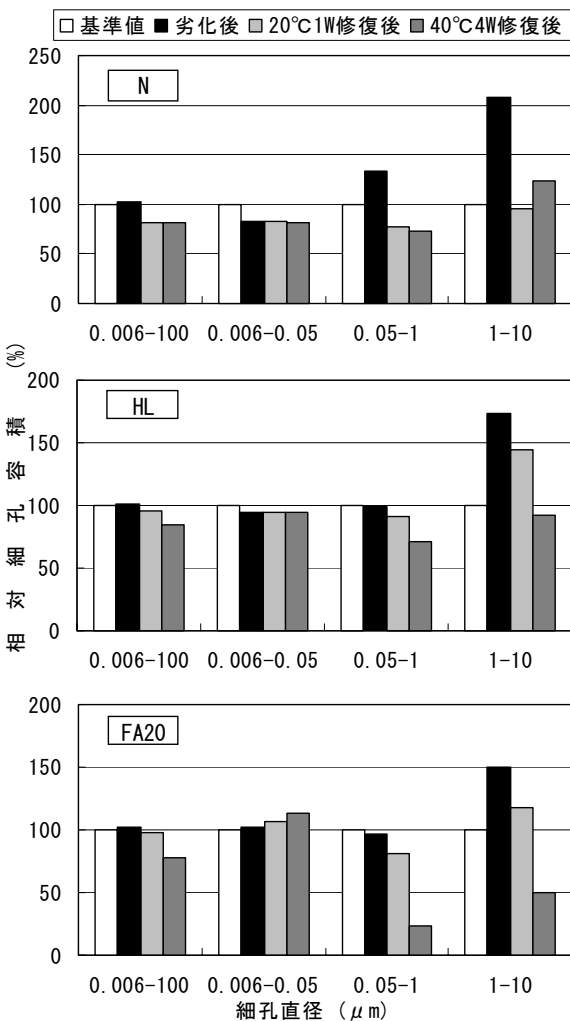


図-7 細孔範囲ごとの相対細孔容積の変化

復したのは、修復養生により未水和セメントおよびフライアッシュの反応が促進されて組織が緻密になり、総細孔容積が減少したためと推察される。

3.4 ひび割れ本数

試験体ごとに各段階でのひび割れ本数の変化を図-10に示す。試験体 N において基準値のひび割れ本数が最も多く測定され、他の試験体においても基準値が劣化後よりひび割れ本数が多い場合があるが、総じて、ひび割れ本数は劣化後に増加し修復養生後に減少する傾向であると考えられる。また、 $40^\circ\text{C}\cdot 4$ 週の修復養生後のひび割れ本数は、フライアッシュを使用した試験体の場合、種類および置換率にかかわらずフライアッシュを使用していない試験体 N および HL より少ないことが認められる。

これより、フライアッシュの使用は、凍結融解作用で生じるマイクロクラックを修復養生による水和反応により充填し、ひび割れを修復する効果があると考えられる。

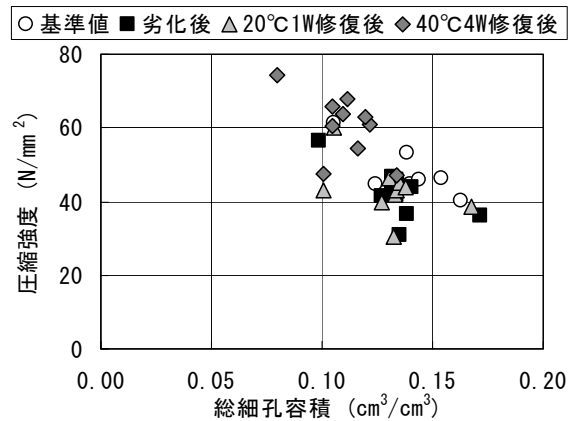


図-8 総細孔容積と圧縮強度の関係

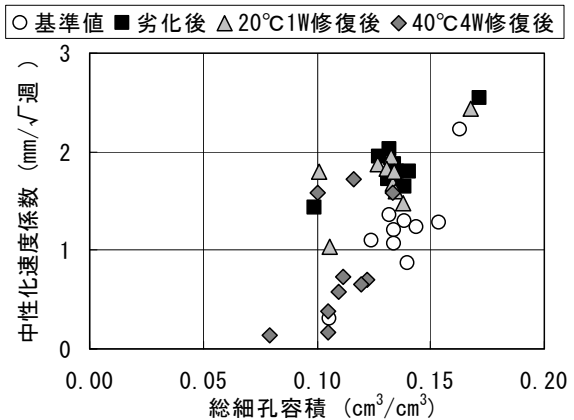


図-9 総細孔容積と中性化速度係数の関係

3.5 劣化度の違いによる修復性能

劣化度の違いによる相対動弾性係数の変化を 図-11 に、中性化速度係数の変化を 図-12 に示す。20℃・1 週修復養生の場合、劣化度 80% では試験体の違いによる相対動弾性係数の回復の相違は明瞭ではないが、劣化度 60%では試験体 FA20 の回復が若干小さい。一方、40℃・4 週修復養生の場合、フライアッシュを使用した試験体 FA20 は劣化度 60%においても基準値以上に回復していることが認められる。また、20℃・1 週修復養生の場合、試験体種類および劣化度の違いによる回復程度の差は明確ではない。一方、40℃・4 週修復養生の場合、フライアッシュを使

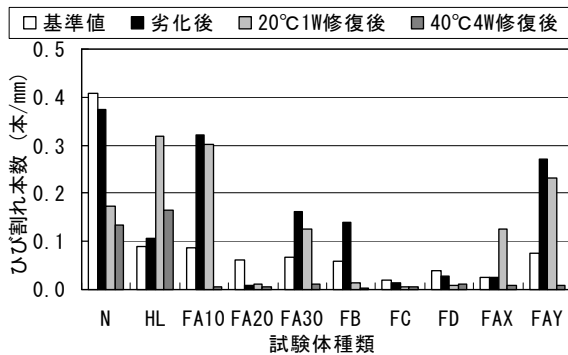


図-10 ひび割れ本数の変化

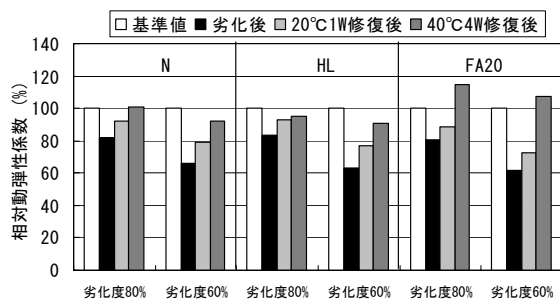


図-11 劣化度の違いによる相対動弾性係数の変化

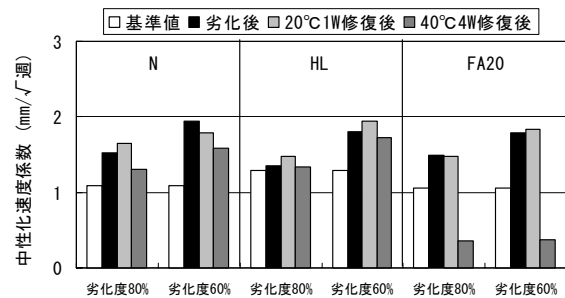


図-12 劣化度の違いによる中性化速度係数の変化

用した試験体 FA20 は劣化度によらず中性化速度の向上が顕著であることが認められる。

4. まとめ

フライアッシュを用いたモルタルの自己修復効果の検討を行った結果を以下にまとめる。

- (1) フライアッシュを用いた場合の修復効果は、本実験の範囲ではフライアッシュの品質による影響は小さく、フライアッシュの置換率が高いほど、水セメント比が小さいほど大きくなる。
- (2) 劣化および修復養生による細孔構造の変化は強度特性に影響を及ぼす。
- (3) 劣化及び修復養生によって、細孔直径 0.05 ~ 10 μm の範囲が大きく変化し、フライアッシュを用いた場合 40℃・4 週修復養生での細孔容積の減少が顕著である。

今後、暴露実験などにより実環境下における劣化現象と修復現象の検証が課題と考えている。

謝辞

本研究は北海道重点領域研究課題「自己修復コンクリートの開発」として、北海道立北方建築総合研究所、北海道大学、室蘭工業大学、北海道電力総合研究所、日鐵セメントの共同により行われた研究の一部である。

参考文献

- 1) 黄光律, 友澤史紀, 野口貴文, 飛坂基夫, 柳啓: フライアッシュを細骨材の一部と使用したコンクリートに関する研究(その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), pp.77~80, 1997.9
- 2) 黄光律, 野口貴文, 飛坂基夫, 友澤史紀: フライアッシュを外割混合使用したコンクリートの中性化特性, コンクリート年次論文報告集, Vol. 20 No.2, 1998
- 3) 松村宇, 桂修, 吉野利幸: 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