論文　フライアッシュコンクリートの自己治癒効果に関する検討

進藤　義勝[*1]・宗金　昌典[*2]・上田　隆雄[*3]・渡邉　健[*4]

要旨：フライアッシュを混和したコンクリート中におけるポゾラン反応の進行に伴い，乾燥収縮や凍結融解作用で発生したマイクロクラックに対する自己治癒効果が期待されている。本研究では，フライアッシュコンクリートの自己治癒効果を評価することを目的として，実験的検討を行った。Ⅱ種フライアッシュを細骨材代替で混和した供試体と無混和供試体を作製し，促進劣化後に各種自己治癒促進養生を行った後に自己治癒効果を評価した。コンクリートの電気抵抗や超音波伝播速度の経時変化および圧縮強度の増加割合から，フライアッシュコンクリートは無混和コンクリートよりも自己治癒効果が大きいことが分かった。

キーワード：フライアッシュ，自己治癒，ひび割れ，超音波伝播速度，コンクリートの電気抵抗，電食試験

1. はじめに

石炭火力発電所からのフライアッシュ発生量は電力需要の増大と共に年々増加しており，コンクリート用混和材としての利用拡大が期待されている。セメント代替で用いることによる CO_2 削減効果や，天然骨材資源の代替材料としての利用など，フライアッシュは環境面でも注目される材料の一つであると言える。フライアッシュをコンクリートに混和した場合，流動性や水密性の向上などの利点が明らかにされている [1)]が，フライアッシュを混和したコンクリート構造物の耐久性については不明な点が多いのが現状である。フライアッシュをセメント代替で用いた場合，初期強度の発現や中性化抵抗性能が問題となる場合があるが，フライアッシュを細骨材代替で混和することで，無混和の場合と同程度以上の初期強度や中性化抵抗性能が期待できることも指摘されている [2)]。

一方，今後増大するコンクリート構造物の維持管理業務を効率化する観点から，乾燥収縮や凍結融解作用などによってコンクリートに発生するマイクロクラックに関して，コンクリートの持つ自己修復機能や自己治癒効果によって対処するという考え方が，最近検討されてきている [3)]。このような自己治癒効果が期待できるコンクリートの一つにフライアッシュコンクリートが挙げられる。実際に，フライアッシュの長期的なポゾラン反応によって，ひび割れ閉塞などの自己治癒効果が確認されたという報告 [3)]もあるが，現状ではデータが不足しており，自己治癒効果が期待できる条件や，効果の大きさについても明確になっていない。

そこで本研究では，フライアッシュコンクリートの自己治癒効果を評価することを目的として，Ⅱ種フライアッシュを細骨材代替で混和した供試体と無混和供試体を作製し，促進劣化後に各種自己治癒促進養生を行った後に自己治癒効果を評価した。劣化促進方法として圧縮載荷および電食作用を採用し，自己治癒促進環境で養生を行うことによる自己治癒効果を相対動弾性係数，コンクリートの電気抵抗および超音波伝播速度の変化によって評価するとともに，コンクリート割裂断面の自己治癒状況を目視観察した。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合及び使用材料

本実験で用いたコンクリートの配合を**表－１**に，使用したフライアッシュの物性値を**表－２**に示す。なお配合名は，フライアッシュ無混和の場合を N，フライアッシュを混和したものを FA とする。フライアッシュは，JIS A 6201 で規定されたⅡ種フライアッシュを単位細骨材量に対する容積割合で 20%混和した。セメントは普通ポルトランドセメント（(密度：3.16 g/cm^3，比表面積：3280 cm^2/g)），細骨材は鳴門市撫養町産砕砂（密度：2.56 g/cm^3，F.M.：2.79），粗骨材は鳴門市撫養町産砕石（密度：2.55 g/cm^3，Gmax：15 mm）を用いた。**表－１**に示した２配合のコンクリートについて，フレッシュ性状と 28 日圧縮強度を**表－３**に示す。**表－３**に示されるように，今回の検討では，フライアッシュを細骨材代替で混和したため，材齢 28 日の FA 配合の圧縮強度は N 配合の約 1.7 倍の大きさとなった。

2.2 供試体の作製および養生

本実験で用いた供試体は**図－１**に示すように，φ100×200 mm の円柱コンクリート供試体の円形断面中央に銅より線（直径 0.25 mm の細経銅線を 14 本束ねてより

*1 徳島大学大学院　知的力学システム工学専攻建設創造システムコース　(正会員)
*2 一条工務店（株）
*3 徳島大学大学院　ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門教授　工博　(正会員)
*4 徳島大学大学院　ソシオテクノサイエンス研究部エコシステムデザイン部門准教授　工博　(正会員)

表－１　コンクリートの配合

配合名	W/C (%)	s/a (%)	G_{max} (mm)	単位量（kg／m^3）						
				C	W	S	G	FA II	WRA	AEA
N	55	48	15	340	187	805	869	－	1.3	0.02
FA				340	187	644	869	145	1.3	0.02

表－２　フライアッシュの物性値

品質	SiO_2 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm^3)	ブレーン比表面積(cm^2/g)	フロー値 (%)	活性度指数	
							材齢 28 日 (%)	材齢 91 日 (%)
試験値	62.5	0.11	2.4	2.28	3947	106	84	100

表－３　コンクリートのフレッシュ性状と28日強度

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	28日強度 (N/mm^2)
N	6.0	5.0	30.6
FA	7.0	5.0	52.6

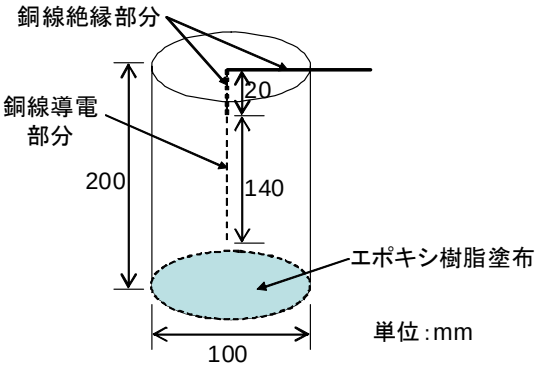
線としたもの）を１本配したものとした。ここで銅より線を供試体中に配したのは，後述するように，劣化促進手法，自己治癒促進養生手法および自己治癒効果の評価手法として電気化学的手法を利用したためである。なお，今回の供試体の銅線配置を決定するにあたり，予備実験を行い，銅線の配置の有無がコンクリートの圧縮強度にほとんど影響を与えないこと，および，この銅線を用いて種々の通電や電気化学的測定が可能であることを確認した。

これらの供試体は，コンクリート打設日翌日に脱型し，20℃の恒温室中で 28 日間の封緘養生を行った後に，劣化促進試験を実施した。

2.3 自己治癒促進および各種試験

28 日間の封緘養生終了後，**図－１**に示したように，供試体の打設面にエポキシ樹脂を塗布し絶縁処理を行った。さらに，劣化状態として以下の３条件を設定した。①健全：劣化促進を行わない場合，②圧縮劣化：万能試験機で圧縮載荷を行い，最大荷重到達後に速やかに除荷した場合，③電食劣化：5%NaCl 溶液を満たしたプラスティック容器中に，供試体と供試体を囲むチタンメッシュを浸漬し，供試体中の銅線を陽極，チタンメッシュを陰極として，コンクリート表面積に対して 1.0 A/m^2 の直流電流を１週間供給した場合，とした。なお，電食劣化は FA 配合のみで採用した。また，いずれの劣化状態においても，供試体に外観上のひび割れは発生していなかった。

上記の劣化状態の供試体に対して適用する自己治癒促進条件として，以下の３条件を設定した。



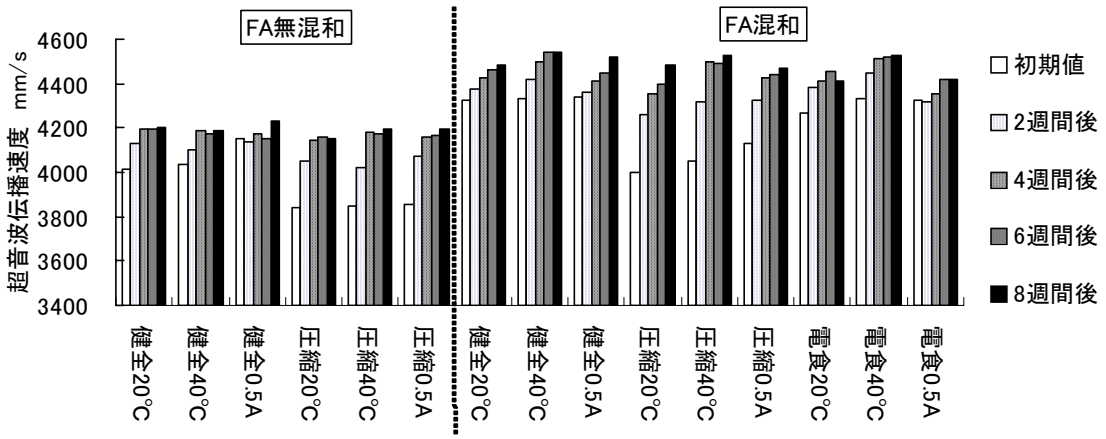
図－１　供試体の外観

表－４　実験要因一覧

配合名	劣化状態	自己治癒促進条件
N	健全	20℃水中 40℃水中 0.5 A/m^2通電
	圧縮劣化	
FA	健全	20℃水中 40℃水中 0.5 A/m^2通電
	圧縮劣化	
	電食劣化	

①20℃水中, ②40℃水中, ③防食通電：電解液として 0.1N Li_3BO_3 を満たしたプラスティック容器中に，供試体と供試体を囲むチタンメッシュを浸漬し，供試体中の銅線を陰極，チタンメッシュを陽極として，コンクリート表面積に対して 0.5 A/m^2 の直流電流を供給した。なお，自己治癒促進期間は，いずれの条件の場合も８週間とした。自己治癒促進条件として，防食通電を選定したのは，このような通電に伴うカソード反応により，供試体中のアルカリ性が上昇し，フライアッシュのポゾラン反応を刺激する可能性があると考えたためである。以上の実験要因をまとめると，**表－４**のように示すことができる。

劣化状態形成直後，および，自己治癒促進期間中，定



図－２　超音波伝播速度の経時変化

期的に自己治癒効果評価指標として，超音波伝播速度とコンクリートの電気抵抗を測定した。超音波伝播速度は，周波数 10,000 Hz の超音波に対して円柱供試体の 200 mm の軸方向における超音波伝播速度を測定した。コンクリートの電気抵抗は，防食通電と同様にチタンメッシュを対極とした矩形波電流分極法で印加電流 10 μA，周波数 800 Hz のインピーダンス値として求めた。**表－４**に示した各実験要因に対して，供試体は３本ずつ用意し，自己治癒促進期間終了後，各要因の３本の供試体の内，２本で圧縮強度を測定し，残りの１本は割裂して割裂断面の状況を目視で観察した。

3. 自己治癒促進期間中における各種指標の変化

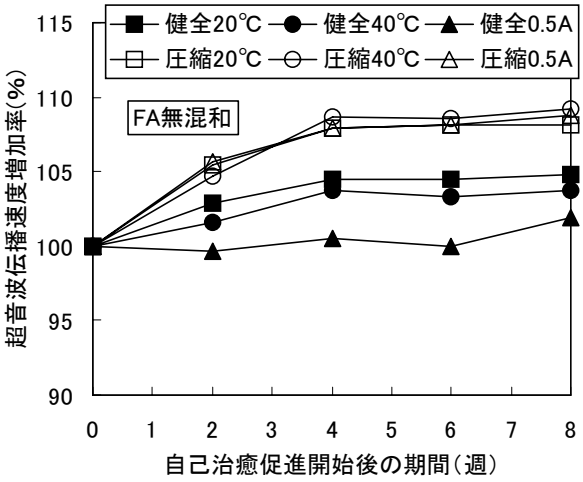
3.1 超音波伝播速度

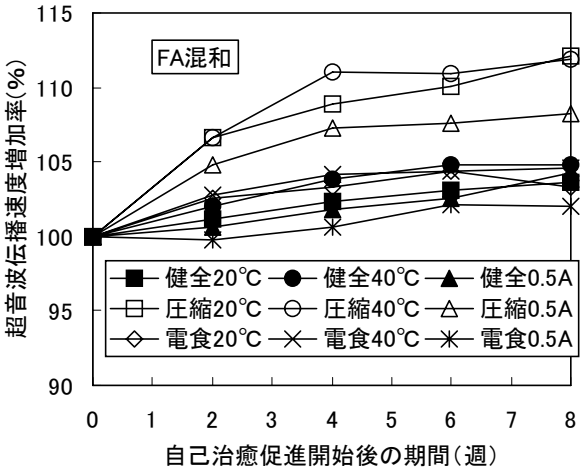
自己治癒促進養生開始後の超音波伝播速度の経時変化を**図－２**に，超音波伝播速度増加率の経時変化を**図－３**に示す。なお，ここでは，超音波伝播速度増加率 P を下式で計算した。

$$P = (V - V_0)/V_0 \times 100\ (\%) \qquad (1)$$

ここに，V：超音波伝播速度の測定値，V_0：自己治癒促進養生開始時の超音波伝播速度（初期値）

図－２より，全体的な傾向としてフライアッシュ混和供試体は，フライアッシュ無混和供試体よりも大きな超音波伝播速度を示している。これは，**表－３**に示したように，フライアッシュ混和供試体の方が無混和供試体よりも圧縮強度が大きいことが原因であると考えられる。また，初期劣化の影響に着目すると，フライアッシュ混和の有無に関わらず，圧縮載荷を行った供試体は，健全な供試体と比較して，超音波伝播速度の初期値が低下していることが分かる。その低下幅は健全供試体の約 30% 程度に達しており，本実験で採用した方法による圧縮載荷により，コンクリート内部に微細ひび割れが導入され，超音波の伝播経路に影響を与えたことが分かる。これに





図－３　超音波伝播速度増加率の経時変化

対して，電食を行ったフライアッシュ混和供試体については，健全供試体と比較して超音波伝播速度の初期値にほとんど変化が見られない。これは，今回採用した細径の銅線より線では，電食生成物の形成によってコンクリート内部に十分な初期劣化を与えることができなかっ

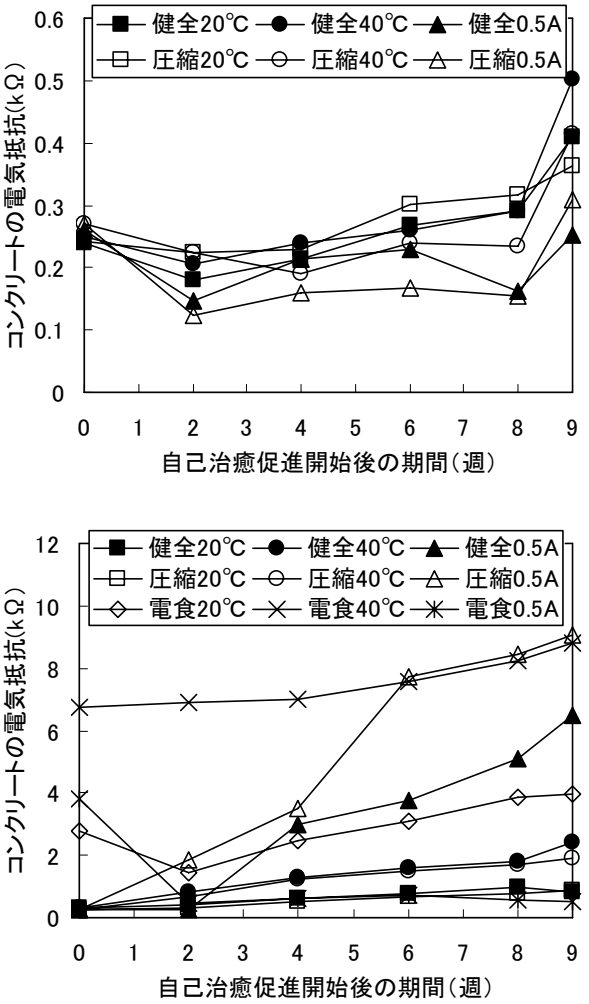
たことが原因と考えられる。今回の実験では，圧縮強度に影響を与えないことを目的として導電線を選定したが，電食を効果的に行うためには，もう少し太径の鉄線等を選定する必要があると思われる。

図－２より，超音波伝播速度は自己治癒促進養生に伴って初期値から徐々に増加する傾向を示していることがわかるが，**図－３**はその増加傾向をより定量的に示している。**図－３**によると，フライアッシュ混和の有無に関わらず，圧縮載荷を行った供試体は健全供試体よりも大きな超音波速度増加率を示している。このことから，コンクリートは元来，セメントの水和反応等によって導入された微細ひび割れなどの欠陥を自己治癒する能力を有していることが分かる。さらに，フライアッシュ混和の有無で比較すると，フライアッシュ無混和の供試体は８週間の自己治癒促進によって，超音波伝播速度増加率はほぼ頭打ちの状態であるが，フライアッシュ混和供試体は，超音波伝播速度増加率の増加傾向が持続しており，さらに自己治癒促進期間を延長することで効果が増大する可能性がある。これは，フライアッシュのポゾラン反応に起因する自己治癒効果が長期的に発揮されていることによるものと推定される。自己治癒促進条件の影響に着目すると，40℃水中養生がやや大きな自己治癒効果を引き出しているようである。これに対して，0.5A/m^2 の防食通電はフライアッシュ混和の有無に関わらず，水中養生の場合と比較して超音波伝播速度増加率はやや抑制される傾向を示している。

3.2 コンクリートの電気抵抗

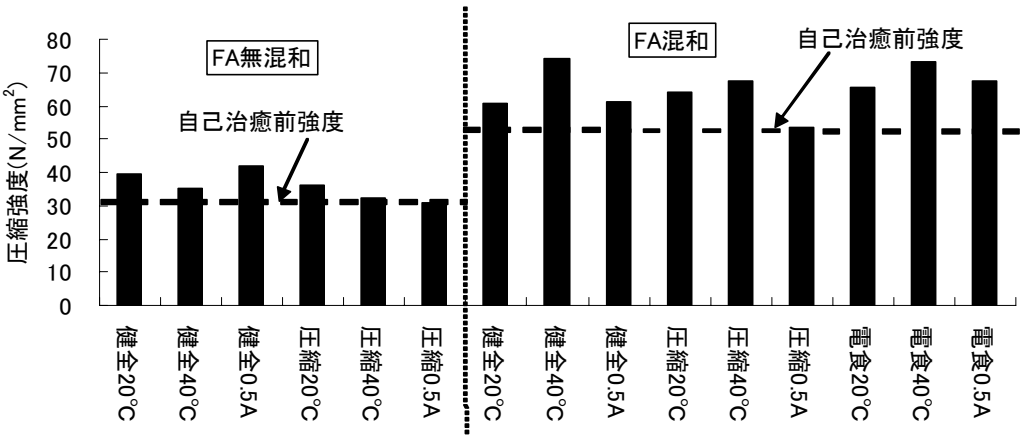
自己治癒促進養生開始後のコンクリートの電気抵抗測定値の経時変化を**図－４**に示す。コンクリートの電気抵抗値はかぶりコンクリートの細孔組織に依存し，この値によってコンクリートの密実性や物質透過抵抗性を間接的に表現できるものと考えられる。なお，**図－４**において，自己治癒促進開始後９週目まで値が示されているが，この９週目のデータは，８週間の自己治癒促進期間終了後，20℃の恒温室中において１週間の気中静置後に測定した値である。コンクリートの電気抵抗値はコンクリートの含水状態に大きく影響されるため，湿潤環境での自己治癒促進期間後，ある程度乾燥させた状態でのコンクリートの電気抵抗値として，９週目の測定を行っている。

図－４より，フライアッシュ無混和供試体は，全体的に自己治癒促進養生によって増加傾向にはあるが，その増加割合は比較的小さいものにとどまっている。自己治癒促進養生終了後の９週目に顕著なコンクリートの電気抵抗値の増加が見られることから，むしろ含水状態の影響の方が大きいと言える。また，0.5A/m^2 で防食通電を行った供試体は，通電開始によってコンクリートの電気抵抗が低下しているが，これは通電に伴う電解液のコンクリート中への浸透に伴うものと考えられる。

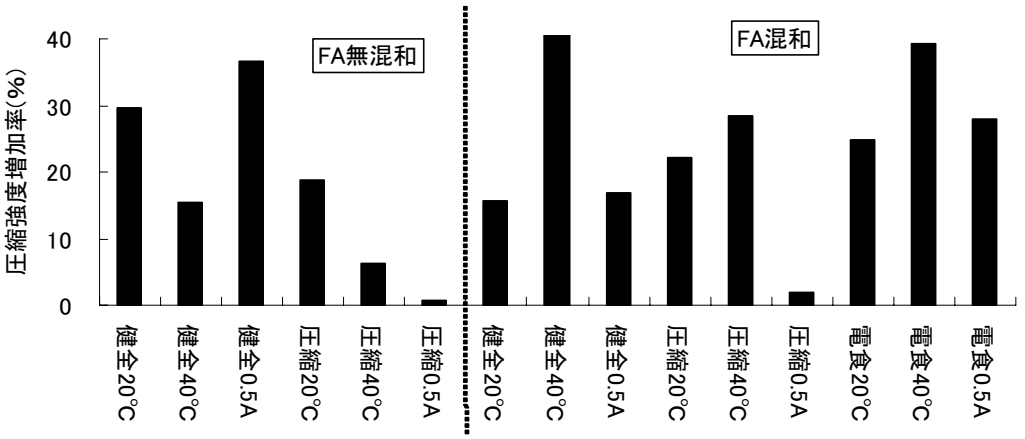


図－４　コンクリートの電気抵抗の経時変化

一方，フライアッシュ混和供試体は，全体的にフライアッシュ無混和供試体よりも大きなコンクリートの電気抵抗値を示しており，また，自己治癒促進期間中のコンクリートの電気抵抗値の増加勾配も大きくなっている。これは，フライアッシュの混和による空隙充填効果や，ポゾラン反応の進行によるコンクリート細孔組織の緻密化が原因と考えられる。特に 0.5 A/m^2 で防食通電した供試体については，水中養生を行った供試体に比べてコンクリートの電気抵抗の増加勾配が顕著に大きくなっている。これは，通電により形成されたコンクリート中の高アルカリ環境がフライアッシュのポゾラン反応を刺激・促進した可能性がある。なお，著者らの過去の検討においても，フライアッシュを混和したコンクリートに通電を行うと電気抵抗が非常に大きくなる現象が認められている [4)]。ただし，前述したように，超音波伝播速度の測定結果では，水中養生の場合と比較して防食通電の顕著な優位性は認められないことから，防食通電



図－５　自己治癒促進期間終了後の圧縮強度



図－６　自己治癒による圧縮強度増加率

による自己治癒促進効果はマクロなひび割れ閉塞効果にまでは影響を与えていないものと推定される。

電食通電を行った供試体は，初期値から大きなコンクリートの電気抵抗値を示しているが，これは，電極となるコンクリート中の銅線が電食作用によって劣化し，コンクリートとの界面劣化なども伴って見かけ上抵抗値が上昇したものと思われる。

4. 圧縮試験

自己治癒促進養生終了後の各供試体の圧縮強度を**図－５**に，自己治癒による圧縮強度増加率を**図－６**に示す。なお，図－５に自己治癒促進養生前の圧縮強度の平均値を示した。また，自己治癒による圧縮強度増加率Ｑを下式で計算した。

$$Q=(C-C_0)/C_0\times 100\ (\%) \qquad (2)$$

ここに，C：自己治癒促進養生終了後の圧縮強度，C_0：自己治癒促進養生開始前の圧縮強度

図－５より，フライアッシュ混和の有無に関わらず，自己治癒促進養生終了後の圧縮強度は自己治癒促進養生前の圧縮強度よりも大きくなっている。さらに，**図－６**によると，圧縮強度増加率は，自己治癒促進養生前に圧縮載荷を行った供試体よりも健全供試体の大きいことがわかる。このことより，超音波伝播速度などでは同程度まで回復したとしても，実際に発現する強度は圧縮履歴の影響を受けて，増加しにくくなっているものと推定される。また，フライアッシュ無混和の場合には40℃水中養生は強度発現にあまり寄与していないが，フライアッシュを混和した場合には，40℃水中養生が最も強度発現に寄与していることが分かる。これに対して，0.5 A/m^{2}の防食通電は，フライアッシュ混和コンクリートの電気抵抗増大に大きく寄与していたが，圧縮強度増進の効果は比較的小さかった。このことから，少なくとも今回採用した通電条件で防食通電を行っても，力学的な性能改善には結びつかないことが分かる。

5. 供試体割裂面の観察

自己治癒促進養生終了後，各要因１体の供試体を割裂破壊し，割裂断面の目視観察を行った結果，自己治癒養

写真－１　FA 配合供試体（圧縮 0.5A）の割裂断面

生前に圧縮載荷を行った供試体でも，載荷によるひび割れを目視で確認することは困難であった。圧縮載荷は最大荷重まで行っていることから，載荷直後は微細ひび割れ等の欠陥が存在したはずだが，これらの欠陥は自己治癒促進養生によって回復したものと推定される。フライアッシュ混和の有無による明確な違いは確認できなかったが，40℃水中養生を行った供試体は，他の供試体よりも若干白色傾向が強かったことから，セメントの水和反応やフライアッシュのポゾラン反応を活性化させた可能性がある。

防食通電を行った供試体は，**写真－１**に示すように，陰極とした銅線近傍で黒っぽく変色している領域が認められた。この領域はカソード反応の影響を強く受けるアルカリ性の高い部分である。この部分では，コンクリートの電気抵抗の増大に寄与するようなコンクリートの変質が起こっていたものと推定されるが，供試体断面全体からすれば，そのような領域は小さく，これにより，圧縮強度の増大にはつながらなかったものと考えられる。

電食劣化供試体中の銅線は，酸化腐食反応によって，ほとんど消失していたり，手でちぎれるほど脆い状態であったりした。本実験では，このような銅線の電食によってコンクリートが受けた損傷はかなり小さいものと思われる。電食劣化を発生させるためには，コンクリートに埋め込む電極を別の金属等で工夫する必要がある

6. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

(1) フライアッシュを混和したコンクリートでは，40℃水中での自己治癒促進養生によって，圧縮載荷で低下した超音波伝播速度が早期に回復した。

(2) フライアッシュを混和したコンクリートの電気抵抗は自己治癒促進期間中に経時的に増大した。このような効果は防食通電を行った供試体で特に大きかった。

(3) 自己治癒促進養生による圧縮強度の増加率は，圧縮載荷などの劣化促進を行わなかった健全供試体の方が劣化供試体よりも大きかった。圧縮載荷を行ったフライアッシュ混和供試体は 40℃水中養生によって比較的大きな圧縮強度増加率を示した。

謝辞

本研究に用いたフライアッシュは四国電力㈱からご提供いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

1) 土木学会：コンクリートライブラリー94　フライアッシュを用いたコンクリートの設計施工指針（案），1999.4

2) 土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案），2003.3

3) 日本コンクリート工学協会：JCI-TC075B 「セメント系材料の自己修復性とその利用法研究専門委員会」報告書，2009.3

4) 上田隆雄，長尾賢二，芦田公伸：混和材を用いたセメント硬化体からのデサリネーションによる脱塩効果，セメント・コンクリート論文集，No. 57，pp. 501-507，2003.12.