

# 論文 超音波法によるフライアッシュ外割混和コンクリートの凍結融解作用に対する自律治癒効果の評価

藤原 悠貴<sup>\*1</sup>・渡辺 健<sup>\*2</sup>・橋本 親典<sup>\*3</sup> 石丸 啓輔<sup>\*4</sup>

**要旨:** フライアッシュのポゾラン反応による自律治癒効果を付与したコンクリートの性状に関する実験が行われているが、明確な評価方法が確立されていない。本研究では、超音波法を用いた凍結融解作用に対するフライアッシュコンクリートの自律治癒効果の評価を目的とした。実験はフライアッシュの置換率、種類を変えフライアッシュを細骨材代替で混和したコンクリートを作製し、促進劣化後に治癒養生を行い、治癒過程を超音波伝播特性により評価した。その結果、フライアッシュⅡ種およびⅣ種において、同程度の治癒効果があることが分かった。また、超音波伝播特性が治癒効果を確認する有効な指標であることを示した。

**キーワード:** フライアッシュ, 自律治癒, 超音波法, 動弾性係数

## 1. はじめに

近年、資源リサイクルの観点から火力発電所の副産物であるフライアッシュの有効利用と、普及拡大が進められてきている。フライアッシュのコンクリートへの利用は、施工効果の向上や耐久性の向上などのコンクリートの性能向上に係わる利点のみならず、セメント代替によるCO<sub>2</sub>削減、近年の骨材事情の悪化に伴う細骨材の代替材料としての利用などのメリットも兼ね備えている。

また、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微細なひび割れに対して、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、検討されている。このような自己治癒効果をコンクリートに付与させる手法としてセメント系材料のコンクリートへの混和が挙げられる。実際に、セメントにフライアッシュを適切に配合することで、長期的に水和反応およびポゾラン反応を起こさせ、微細なひび割れを反応生成物で埋めるといった自己修復の報告がある<sup>1)</sup>。ここで、自律治癒とは適切な混和材の使用などの材料設計を行ったコンクリートにおいて、ひび割れが閉塞する現象のことを言い、自己治癒とは水分などが存在する環境下でコンクリートのひび割れが自然に閉塞する現象全体と定義されている<sup>2)</sup>。

一方で、自己治癒の評価方法として強度試験や促進中性化試験などが一般的<sup>3)</sup>である。また、凍害における自律治癒の確認方法として相対動弾性係数や細孔構造が用いられた事例<sup>1)</sup>があるが確立されたとは言えない。そこで、超音波法に着目した。超音波法は、コンクリート

中に存在するひび割れ、空隙やコンクリート表面の浮き、剥落などの欠陥を検出し、その状態や品質を調べる非破壊技法である<sup>4)</sup>。超音波法で評価が可能であれば、より効率的にコンクリートの自律治癒性能を確認することができる。

そこで本研究では、超音波法を用いた凍結融解作用に対するフライアッシュコンクリートの自律治癒効果の評価を目的とした。実験は、フライアッシュ無混和の供試体とフライアッシュを細骨材代替で混和した供試体を作製し促進劣化後に治癒養生を行い、治癒過程を超音波伝播特性により評価した。

## 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。配合は、AE剤の有無、フライアッシュの置換率、フライアッシュの種類から合計6配合とした。フライアッシュは、JIS A 6201で規定されたⅡ種またはⅣ種を用い、単位細骨材量に対する容積割合でⅡ種は15%混和、Ⅳ種は5、15%混和した。なお配合名の記号は、フライアッシュ無混和の場合をFAA0、フライアッシュを混和したものをFA、その後のAは空気量の有、数字はフライアッシュの置換率、英数字はフライアッシュの種類を意味する。英数字の記述のないものはすべてフライアッシュⅣ種である。セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm<sup>3</sup>)、細骨材は鳴門市撫養町産砕砂(密度:2.56g/cm<sup>3</sup>, F.M.:2.79)、粗骨材は鳴門市撫養町産砕石(密度:2.55g/cm<sup>3</sup>, G<sub>max</sub>:20mm)を用いた。混和剤はAE剤またはAE減水剤および高性

\*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻修士前期課程1年 (正会員)

\*2 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 博(工) (正会員)

\*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 (正会員)

表-1 配合表

配合	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単用量 (kg/m <sup>3</sup> )							
				W	C	FA	S	G	高性能 AE 減水剤	AE 減水剤	AE 剤
FAA0	20	55	42	170	304	—	706	1040	—	0.927	2.778
FA5						16	737	1116	—	—	—
FAA5							686	1116	2.472	—	4.635
FA15						55	688	1040	—	—	—
FAA15(II)							636	1116	2.472	—	13.905
FAA15(IV)							646	1116	2.472	—	9.270

表-2 フライアッシュの物性値

品質	SiO <sub>2</sub> (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	フロー値 (%)	活性度指数	
							材齢 28 日 (%)	材齢 91 日 (%)
II種	62.4	0.20	2.0	2.33	3880	106	85	100
IV種	64.0	0.05	0.4	2.00	1620	93	73	83

表-3 フレッシュ性状と圧縮強度

配合	スランブ (cm)	空気量 (%)	強度(N/mm <sup>2</sup> )	
			28 日	91 日
FAA0	12	4.8	42.4	45.4
FA5	0	0.5	42.2	53.0
FAA5	16.5	5.3	39.0	42.3
FA15	0	0.5	48.5	51.4
FAA15(II)	13.0	6.0	34.9	41.5
FAA15(IV)	10.5	5.0	35.4	42.2

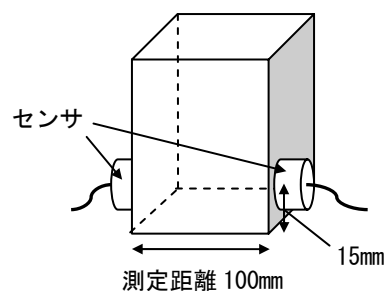


図-1 測定位置

能 AE 減水剤を用いた。混和剤の使用量は、目標空気量になるよう調整した。表-1 に示した 6 配合のコンクリートについてのフレッシュ性状と 28 日、91 日圧縮強度を表-3 に示す。表-3 よりフライアッシュを細骨材代替で混和した供試体は材齢 28 日に比べ、材齢 91 日では圧縮強度が増加していることが分かる。

## 2.2 供試体作製と養生方法

実験では、100×100×400mm のコンクリート角柱供試体を作製し、20℃・4 週間水中養生後コンクリートカッターを用い、100×100×200mm または 100×100×40mm に切断した。また、供試体は各配合につき 2 体ずつ作製し(a), (b)とした。100×100×200mm 角柱供試体は、片面がカット面、100×100×40mm 角柱供試体は両面カット面である。ここで、供試体を切断した理由として、供試体の寸法と骨材の露出が自律治癒効果に与える影響を確認するためである。一般に、フライアッシュは、水和生成物を生成させ、組織、特に、骨材周辺の遷移帯組織を緻密にさせると言われる<sup>3)</sup>。

これらの供試体は、コンクリート打設後 1 日で脱型し、20℃・4 週間水中養生または、20℃・12 週間水中養生した後、劣化促進試験を実施した。養生期間を変えたのは、フライアッシュを混和した供試体の材齢による治癒効

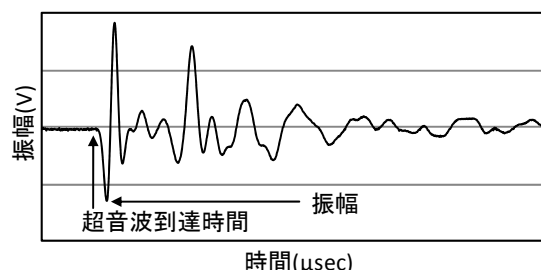


図-2 受信波から求める超音波伝播特性

果の違いを確認するためである。

## 2.3 劣化促進方法

劣化状態は凍害によるものとし、劣化促進方法は、液体窒素を用いた簡易的な急速凍結融解試験を用いた<sup>5)</sup>。この方法は、一般的な凍結融解試験と比較して、短いサイクルで凍害を引き起こすことができる。そのため、この試験方法を用いた。試験は既往の研究から、次のような手順で行った。

初期値として超音波測定器により、超音波の到達時間から超音波伝播時間を測定し超音波伝播速度を求める。100×100×200mm の供試体は骨材の露出のない面を液体窒素に暴露させ、100×100×40mm 供試体はカット面を暴露させた。

- 1) 供試体を容器に入れ、容器のふたをして 30 秒間液体窒素を注ぐ。
- 2) 液体窒素の注入をとめてから数十秒間放置する。
- 3) 供試体を取り出し、融解するまでお湯（約 40℃～60℃程度）に浸す。
- 4) 完全に融解したら水分をふき取り、1)と同様に超音波測定器により、超音波伝播速度を求める。

1)～4)の作業を1サイクルとし、相対動弾性係数が80%程度に達した時点を試験終了とした。また、一部の供試体にひび割れを確認することができ、それらについては顕微鏡によるひび割れ観察を行った。

図-1 に超音波伝播時間を測定するための発・受信センサの測定位置を示す。測定位置は、供試体底面部から15mm離れた側面とした。

各試験で測定した超音波伝播速度を用いて、凍結融解試験を評価する相対動弾性係数は、式(1)から求めた<sup>6)</sup>。ただし、ポアソン比と密度の変化は考慮していない。

$$V_n = (V_{pn}^2 / V_{p0}^2) \times 100 \quad (1)$$

$V_n$  : 凍結融解 n サイクル後の相対動弾性係数

$V_{pn}$  : 凍結融解 n サイクル後の超音波伝播速度(m/s)

$V_{p0}$  : 凍結融解 0 サイクルにおける超音波伝播速度(m/s)

#### 2.4 自律治癒評価方法

自律治癒効果の評価は、劣化直後を劣化後性状とし、その後治癒を行ったものを治癒後性状とし、治癒の過程において超音波法を用い測定を行った。また、顕微鏡によるひび割れ観察も行った。治癒は、20℃・4週間水中養生の供試体においては、20℃・水中養生。20℃・12週間水中養生の供試体は、20℃・水中養生または20℃の恒温室中における気中養生とした。いずれも治癒期間は4週間とした。

自律治癒評価方法は、超音波法を用い超音波伝播特性により評価した。図-2に測定した超音波波形の一例を示す。この波形より、超音波到達時間および縦波の振幅を得る。超音波測定は、供試体の測定面に水溶性の接触媒質を使用し、センサと測定面の接触が良好になるように押し当て、センサで挟む透過法で行った。センサは、外径28mmの広帯域型探触子を使用した。入力周波数は200, 400, 800kHz, 電圧300V, サンプル数20Mである。

### 3. 実験結果および考察

#### (1) 20℃・4週間水中養生供試体の結果

各コンクリート供試体の入力周波数 400kHz 時の、相対動弾性係数の経時変化を図-3 に、超音波伝播速度増加率の経時変化を図-4 に示す。配合、測定条件が同一で寸法の異なる供試体の超音波伝播速度増加率の経時変化の一例を図-5 に示す。また、超音波の入力周波数

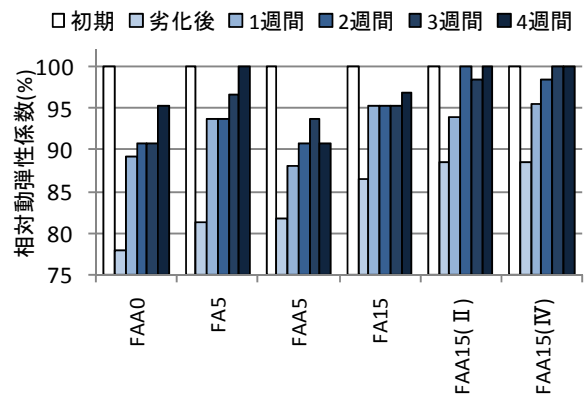


図-3 相対動弾性係数の経時変化

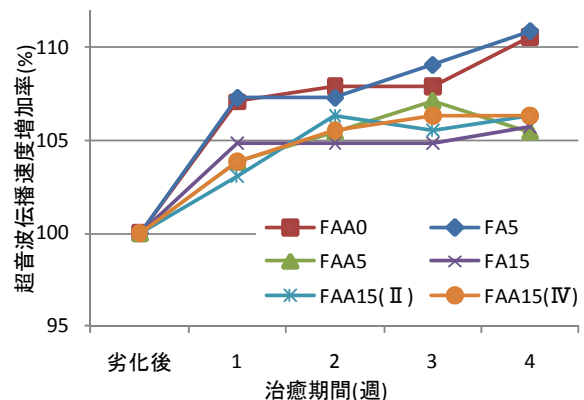


図-4 超音波伝播速度増加率の経時変化

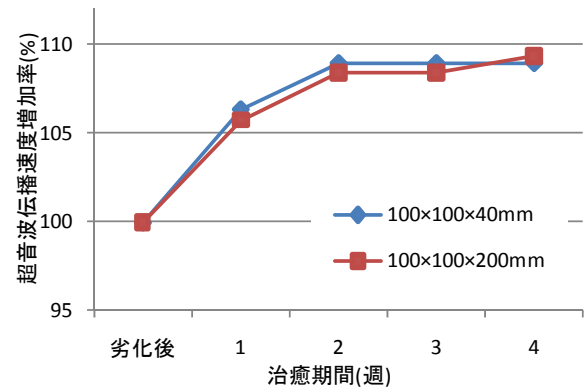


図-5 供試体寸法ごとの経時変化

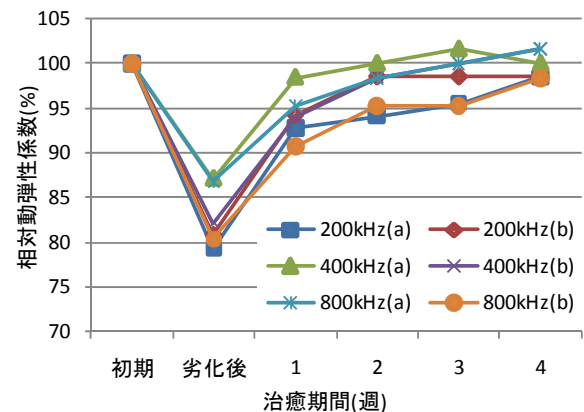


図-6 入力周波数ごとの経時変化

ごとの相対動弾性係数の経時変化の一例を図-6に示す。結果は、各配合2体の供試体のうち代表的なものを示した。また、供試体ごとのばらつきは小さかった。超音波伝播速度増加率  $P_n$  は以下の式(2)で表わされる。

$$P_n = (V_n - V_0) / V_0 \times 100 (\%) \quad (2)$$

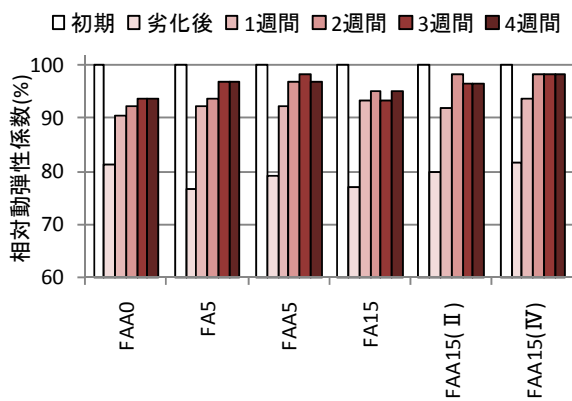
$V_n$  : 超音波伝播速度の測定値(m/s)

$V_0$  : 治癒開始時の超音波伝播速度 (m/s)

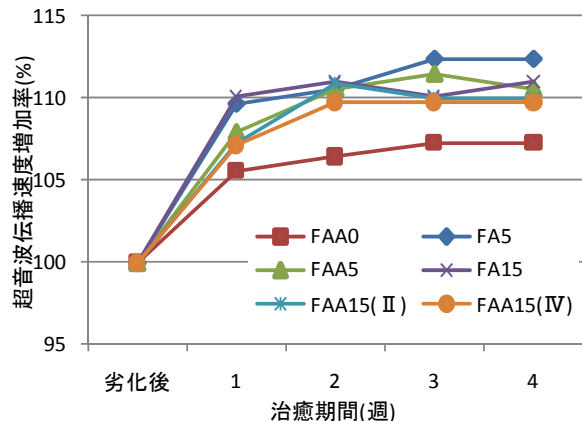
図-3より、いずれの供試体においても凍結融解試験後は相対動弾性係数が健全状態に対して78%~85%付近まで低下している。凍結融解試験により供試体の内部に微細なひび割れが発生し、超音波の伝播経路に影響を与えたと言える。したがって、各供試体に十分な初期劣化を与えていることが分かる。各供試体における相対動弾性係数に着目すると、どの供試体も促進治癒養生3~4週間で相対動弾性係数が増加している傾向にあるが、最終的な動弾性係数はFAA0に比較してFAA15(II)およびFAA15(IV)が大きく、フライアッシュ混和による自律治癒効果が発揮されていると言える。

図-4によると図-3と同様に、フライアッシュの混和の有無に関係なく、治癒後は超音波伝播速度が増加している。これは、治癒養生時に未水和のセメントが水和反

応し、微細なひび割れを反応生成物で修復したものだと考えられる。フライアッシュの置換率に着目し、フライアッシュ無混和、フライアッシュ5%混和およびフライアッシュ15%混和の治癒効果を比較すると、超音波伝播速度増加率にばらつきが見られ、フライアッシュの置換率による影響は小さいという結果となった。これは、養生期間28日ではフライアッシュのポゾラン反応が十分に発現していないことが要因と考えられる。フライアッシュの種類に着目し、フライアッシュはII種およびフライアッシュIV種における自律治癒効果を比較すると、FAA5を除いて、フライアッシュの種類に関係なくほぼ同程度の超音波伝播速度増加率となった。この結果は、フライアッシュIV種の比表面積および活性度指数はフライアッシュII種に比べて低いが、外割置換での自律治癒効果を期待した場合、フライアッシュIV種でも十分な効果が得られる可能性を示している。次に、空気量の有無に着目する。一般に自己修復コンクリートでは空気量の有無にかかわらず相対動弾性係数の回復が認められている<sup>7)</sup>。しかし、本研究ではFAA5はFAA5と比べて、相対動弾性係数の回復が小さかった。この原因は、今後検討が必要である。

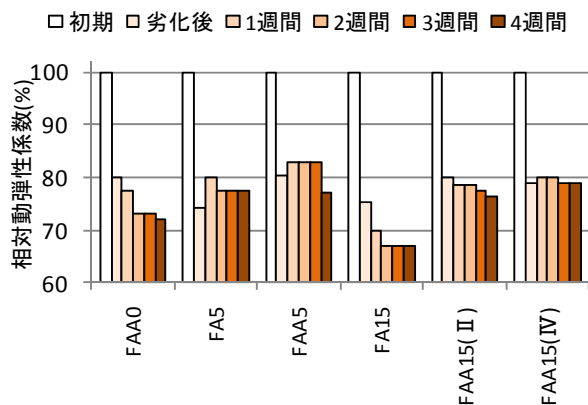


(a) 相対動弾性係数

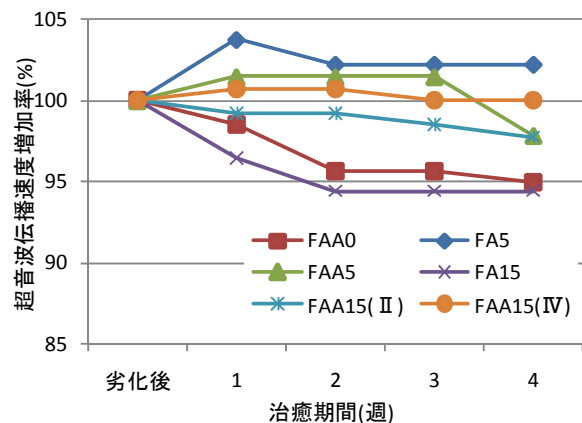


(b) 超音波伝播速度増加率

図-7 20°C・水中養生供試体の経時変化



(a) 相対動弾性係数



(b) 超音波伝播速度増加率

図-8 20°C・気中養生供試体の経時変化

図-3と図-4を比較すると、劣化後性状における相対動弾性係数が低い供試体が高い超音波伝播速度増加率を示し、この傾向は他の供試体にも見られた。このような傾向が見られたため自律治癒効果をより正確に評価するために、劣化後性状を揃える必要があると考えた。

一方、図-5 よりいずれのコンクリート供試体において、寸法の影響、骨材の露出の有無に関して治癒効果の差は見られない。また、図-6 より治癒後性状に着目すると、入力周波数における治癒効果の評価精度は今回の劣化性状の評価においてはその差は見られなかった。

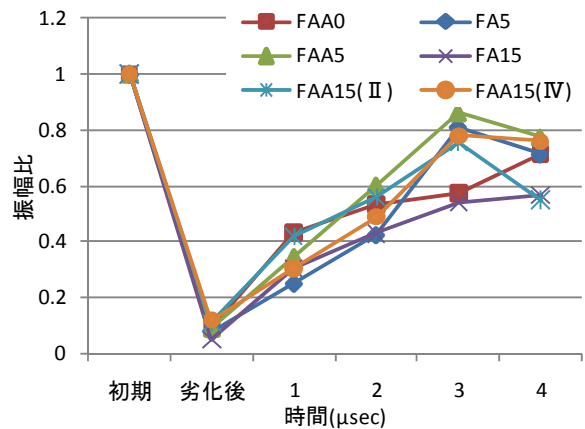
## (2) 20°C・12 週間水中養生供試体の結果

図-5 より供試体の寸法に関する治癒効果の違いは確認することができなかつたため、供試体の寸法は100×100×40mmのみとした。劣化促進試験後におけるコンクリート供試体の 20°C・水中養生の経時変化を図-7に、20°C・気中養生の経時変化を図-8に示す。入力周波数は800kHzである。

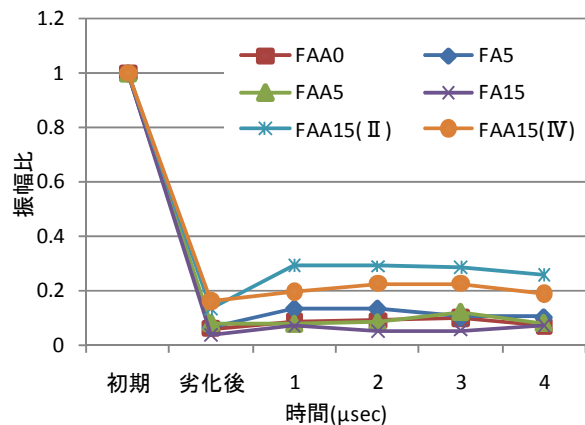
図-7(a)と図-8(a)より、治癒条件の影響に着目すると、20°C・水中養生の供試体の相対動弾性係数は、95%程度まで増加しているのに対して、20°C・気中養生の供試体は、維持またはわずかに低下している。また図-7(b)と図-8(b)を比較すると、いずれの供試体においても顕著に 20°C・水中養生で高い超音波伝播速度増加率を示した。これは、フライアッシュのポゾラン反応はセメントの水和と関係しており、20°C・気中養生では水分の供給が十分ではなくポゾラン反応による細孔構造の緻密化が促進されなかつたと考えられる。

図-7(b)によると、20°C・4 週間水中養生の結果と同様に、フライアッシュの混和の有無に関係なく、治癒養生後は超音波伝播速度が増加している。フライアッシュの置換率に着目すると、フライアッシュ無混和の供試体は超音波伝播速度増加率が 8%程度に対して、フライアッシュを混和した供試体は 10~12%前後と高い治癒傾向を示した。これは、セメントの水和反応とは別に、フライアッシュの空隙充てん効果とポゾラン反応による細孔組織の緻密化が要因と考えられる。一般に、フライアッシュの置換率が高くなるほど治癒傾向が高いと報告<sup>3)</sup>されているが、今回の実験ではフライアッシュ 5%混和の供試体においても高い超音波伝播速度増加率を示した。

図-8(b)より、フライアッシュ 5%混和空気なしの供試体以外は、劣化後性状より低い超音波伝播速度を示している。しかし、FA15を除くフライアッシュを混和した供試体はフライアッシュ無混和の供試体に比べ、各性状における超音波伝播速度増加率が高い。これは、フライアッシュを混和することで、水分の供給がない条件でもコンクリートはわずかながら治癒すると言える。フライアッシュの種類に着目すると、20°C・4 週間水中養生供試



(b) 20°C・水中養生供試体



(a) 20°C・気中養生供試体

図-9 第一波振幅比の経時変化

体の結果と同様に、治癒条件に関わらずフライアッシュ II 種およびIV種の超音波伝播速度増加率が同程度であることが分かった。

次に、超音波特性である振幅の経時変化を図-9に示す。振幅は、各供試体で図-2に示す位置での振幅比として示した。

図-9(a)および(b)より、振幅で評価した場合においても他の測定項目と同様に、20°C・水中養生で高い治癒傾向を確認できる。各治癒条件における超音波伝播速度増加率の差は10%程度だが、振幅では50%程度と顕著な差を示した。既往の研究において、コンクリート内部の人工欠陥の増加に対して、弾性波のエネルギーと振幅は伝播速度に比べて敏感なパラメータであることが示されている<sup>8)</sup>。今回の実験により、振幅は劣化およびその治癒効果に対して敏感なパラメータであることが確認された。3 週間治癒養生後におけるフライアッシュの混和の有無に着目すると、FA15を除くとフライアッシュ無混和の供試体より混和した供試体の振幅の増加が見られた。しかし、治癒養生後の振幅に着目すると FAA0 以外は振幅値を下げている。これは、測定時の誤差による影響と考えられる。

## (4) マイクロスコープによるひび割れ観察

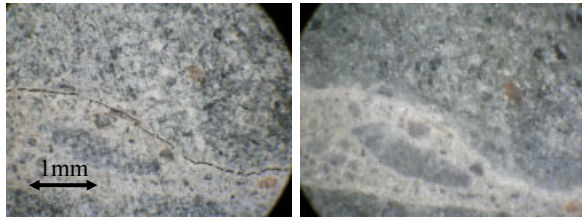


写真-1 自律治癒前後写真

20℃・12週間水中養生後のFA15における、治癒養生の前後写真を写真-1に示す。写真は倍率20倍のマイクロスコープを使用した。

写真-1より凍結融解試験により発生したひび割れが治癒養生後は、ひび割れの閉塞が確認できる。今回の観察の範囲では治癒効果は主に幅0.02mm以下のひび割れに見られ、治癒養生によりセメントの未水化分の反応または、フライアッシュのポズラン反応により細孔が充てんされたと推定できる。これよりマイクロスコープにより、フライアッシュの種類および置換率の影響は確認できなかったが、自律治癒効果は確認できたとと言える。

#### 4. まとめ

本研究では超音波法を用いてフライアッシュを外割置換したコンクリートの自律治癒効果の評価を試みた。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) フライアッシュを5、15%置換したコンクリートにおいて、十分な水分の供給により、フライアッシュ無混和のコンクリートよりも高い治癒効果が発揮された。
- 2) フライアッシュによる自律治癒効果は、フライアッシュⅡ種およびⅣ種においても、ほぼ同程度の効果を発揮した。
- 3) 超音波伝播特性の経時変化を用いることにより、コンクリートの治癒効果を詳細に評価できる有効な手法であることを示した。

#### 謝辞

徳島大学4年鉄谷美佳氏には本研究の遂行にあたり、実験の実施やデータ整理など、多大な協力を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 社団法人 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専門委員会, 社団法人 日本コンクリート工学協会, pp.7, 2009.3
- 3) 土木学会 コンクリート委員会: 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術ー利用拡大に向けた設計施工指針案ー, 社団法人土木学会, pp.111, pp.254-263, 2010.12
- 4) 加藤佳孝, 非破壊検査研究会: コンクリート構造物の検査・診断ー非破壊検査ガイドブックー, 理工図書, pp.107, 2003.8
- 5) 橋本親典, 渡辺健, 石丸啓輔: 簡易的な急速凍結融解試験の提案, 土木学会四国支部講演概要集, pp.313-314, 2003.5
- 6) 土木学会: 弾性波法の非破壊検査小委員会報告書および第2回弾性波法によるコンクリート非破壊検査に関するシンポジウム公演概要集, 土木学会, pp.34, 2008.2
- 7) 谷口円, 桂修, 濱幸雄, 佐川 孝広, 小倉東: 自己修復コンクリートの実用化, 調査研究報告書, No.245, pp.8, 2009.3
- 8) T. Shiotani, D.G. Aggelis: Wave propagation in concrete containing artificial distributed damage, Materials and Structures, Vol.42(3), pp.377-384, 2009