

# 論文 AE法を用いたフライアッシュコンクリートの自己修復性の評価

細木 良成<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:** フライアッシュコンクリートはポズラン反応による自己治癒効果が期待されている。また自己修復性を適切に評価する方法の確立が望まれる。そこで本研究では、非破壊試験法の一つであるAE(アコースティック・エミッション)法を用いて、載荷により生じたクラックにより生成されるAE波形のパラメータを分析し、くり返し損傷を与えたフライアッシュコンクリートの自己修復性を評価した。その結果、AE法による累積AEヒット数と振幅の関係やb値の評価を行うことで、フライアッシュコンクリートの自己修復性の有効性を示した。

**キーワード:** AE法, フライアッシュ, 自己治癒, くり返し載荷

## 1. はじめに

近年、コンクリートの自己修復性に関する研究が注目されている<sup>1)</sup>。この研究が注目されるようになった背景には、持続可能な社会の構築が求められるようになったことがあげられる。既存の建物にはコンクリートを大量に使用した構造物が多く、より高い耐久性が求められている。コンクリート構造物の耐久性を高めるためには、ひび割れが構造物の弱点となる前に、補修・補強などの対策を取り、安全性を高める必要がある。しかし、コンクリート構造物はあらゆる場所と用途で使用されており、大規模構造物であることが多いことから、補修の必要性を判断するための検査を行うだけでも、莫大な費用と時間が必要となる。

よって、コンクリート自身が持つ自己治癒性能を利用することができれば、このような手間と労力を取り除くことができ、また不可避免的に発生するひび割れを制御することが可能となり、より計画的な耐久設計が可能になるのではないかと考えた。

一方で、火力発電所の副産物であるフライアッシュをコンクリートに配合することで、長期的なポズラン反応により、自己治癒性能が向上することが期待されている。

既往の研究により、超音波法を用いた動弾性係数により治癒の効果の評価が行われており、一定の成果を得ている<sup>2)</sup>。しかし、これらの手法では、荷重等により生じた微細なひび割れが生成物の析出により閉塞することを示しているが、その付着力などについては不明確である。

そこで本研究では、荷重作用によって生じたひび割れに対する修復性を、非破壊試験法の一つであるAE(アコースティック・エミッション)法を用いて評価することを

目的とした。AE法により、治癒後の再劣化時に生じるクラックの特性を評価し、修復性の評価に結び付けることを期待した。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セメント代替または細骨材代替で混和した供試体を作製し載荷による劣化後、治癒養生を行い、治癒の状態をAE法で評価した。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリートの配合および使用材料

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、フライアッシュ無混和、単位セメント量の容積割合で15%外割置換、15%内割置換の3配合とした。フライアッシュは、JIS A 6201で規定されたII種を用いた。なお配合名の記号は、フライアッシュ無混和の場合を「FA0」、フライアッシュを外割置換した場合を「FA15外割」、内割置換した場合を「FA15内割」とする。セメントは、早期に水和が進み、それに伴い早期にポズラン反応が生じることを期待して早強ポルトランドセメント(密度:3.14g/cm<sup>3</sup>)を使用した。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SP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3配合のコンクリートについてのフレッシュ性状と7日、28日圧縮強度を表-3に示す。本実験では、空気量5%±1を目標のコンクリートを目標とした。表-3より、フライアッシュ無混和、フライアッシュを細骨材代替で混和した供試体ともに材齢7日に比べ、材齢28日では圧縮強度が増加していることが分かる。

\*1 徳島大学 工学部ものづくり創造システム系建設工学科4年 (学生会員)

\*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

表-1 配合表

配合	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						
				W	C	FA	S	G	SP 剤	AE 剤
FA0	20	55	42	170	309	—	736	1009	3.708	—
FA15 外割						46	684		1.854	2.473
FA15 内割						263	722		1.578	2.104

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	63.3	0.23	1.9	2.31	3960	107	85	99

表-3 フレッシュ性状と圧縮強度

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	強度(N/mm <sup>2</sup> )	
			7 日	28 日
FA0	11	4	44.0	52.9
FA15 外割	6.5	4.2	42.1	52.0
FA15 内割	10	4.1	33.8	44.5

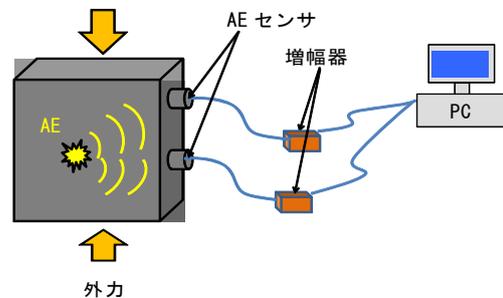


図-1 AE 測定方式

## 2.2 作製供試体および養生方法

実験では、100×100×400mm のコンクリート角柱供試体を作製し、40℃・1 週間水中養生後コンクリートカッターを用い、100×100×40mm に切断した。また強度試験を行うため、φ100×200mm の円柱供試体を作製した。ここで、供試体を切断した理由として、骨材を露出させることで、骨材界面のひび割れに対する自己治癒の経過を目視によって確認しやすくするためである。

養生方法は、水を貯めた水槽にヒーターを設置し、定期的に水温を計測し水温 40℃を保持させた状態で養生を行った。40℃の水中で養生を行う理由としては、高い水温で治癒させた場合、コンクリート内部でポゾラン反応が活性化し治癒が促進されることが既往の研究で知られているからである<sup>1)</sup>。

## 2.3 劣化促進方法と治癒環境

劣化時の AE 測定方式を図-1 に示す。供試体への損傷導入は一軸圧縮荷重により行い、最大荷重まで荷重した場合と、最大荷重の 85%でくり返し(5 回)荷重の場合の 2 種類の荷重を行った。ここで、最大荷重までの荷重は大きなひび割れの発生に対する治癒効果を評価するためである。くり返し荷重は凍結融解作用によるひび割れを想定した<sup>2)</sup>。荷重の手順を以下に示す。

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動弾性係数の測定を行う。100×100×40mm の供試

体を最大荷重までとそれぞれの最大荷重の 85%まで荷重した後、除荷する。くり返し荷重の場合は、これを 5 回くり返し行う。荷重による劣化後、超音波測定器により相対動弾性係数の測定を行い、供試体を 40℃の水中治癒を行う。ここで、40℃の水中治癒を行う理由は 2.2 で述べた養生方法と同様の理由である。治癒開始から 1 週間おきに相対動弾性係数の測定を行い、初期値付近まで回復次第荷重を行うものとする。

## 2.4 自己治癒評価方法

自己治癒効果の評価は、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。

治癒環境は、40℃・水中治癒とした。治癒期間は1週間おきに超音波法により相対動弾性係数を測定し、初期値付近まで回復した時点で治癒完了とした。

超音波測定は、供試体の測定面にグリスを使用し、センサと測定面の接触が良好になるように押し当てた状態で、センサで挟む透過法で行った。

AE センサは、60kHz 共振型を用い、グリスにて供試体に密着させた。使用した計測システムは 2ch のものであ

り、センサは縦一列に AE センサ間を 50 mm として密着させた。検出した信号はプリアンプで 40dB の増幅を行い AE 計測器により計測した。閾値は 40dB に設定した。また、 載荷する際に供試体と載荷面の摩擦を低減するために摩擦低減シートにグリスを塗り供試体と載荷面の間に挟み込んだ。計測後の AE 信号に対して簡易的な 1 次元の位置評定を行い、センサ間で発生した AE のみを選定した。AE パラメータによる解析として、カイザー効果、累積 AE ヒット数と振幅の関係、破壊過程を識別する b 値について評価を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 撮影による供試体表面の観察

カットした FA15 外割の角柱供試体表面の劣化後およびその 1 週間治癒後の写真の一例を写真-1、写真-2 に示す。写真-1 を見ると、横方向に 100 mm 程のひび割れが見られるが、写真-2 ではひび割れが閉塞していることがわかる。FA0 でもひび割れの閉塞は見られたが、フライアッシュを混和した供試体では写真-1 のような 100 mm 程度のひび割れも閉塞していることから、フライアッシュ混和により自己修復性が向上したと考えられる。

#### 3.2 相対動弾性係数の比較

##### (1) 最大荷重の場合

各供試体の最大荷重まで載荷した際の相対動弾性係数の経時変化を図-2 に示す。結果は、各配合 4 体の供試体の平均を示す。また、供試体ごとのばらつきは小さかった。相対動弾性係数 E は以下の式(1)で表わされる。

$$C_p = (E/\rho)^{1/2} \quad (1)$$

$$E = C_p^2 \times \rho \quad (2)$$

$$E = E_i/E_0 \times 100 \quad (3)$$

$C_{p0}$ : 劣化前の伝播速度  $C_{p1}$ : 劣化後の伝播速度  
 $E$ : 相対動弾性係数  $E_0$ : 劣化前の動弾性係数  
 $E_i$ : 劣化後の動弾性係数  $\rho$ : 密度

図-2 より、初載荷時における劣化後において、FA0、FA15 外割に対して FA15 内割の劣化が大きいことが分かる。これは、治癒 1 週間では FA0、FA15 外割と同程度まで相対動弾性係数が回復していることから、内割置換の場合ほかの配合よりもセメント量が少なく、強度発現が遅れたためと考えられる。また、再劣化後、再々劣化後の FA15 外割の相対動弾性係数を見ると、FA0、FA15 内割と比較して相対動弾性係数が小さい傾向が確認された。これは、ひび割れを閉塞させている生成物が載荷により損傷を受けにくい可能性を示していると考えられる。

##### (2) くり返し載荷(最大荷重の 85%)の場合

各供試体の最大荷重の 85% までの荷重で 5 回くり返し載荷した際の相対動弾性係数の経時変化を図-3 に示す。

最大荷重の 85% までの載荷では、FA15 外割は 20°C の恒温室中における気中での治癒も行った。ここで、気中での治癒は水中で治癒させた場合との差を明確にするために行った。気中治癒の相対動弾性係数を見ると、治癒 1 週目で降大きな相対動弾性係数の回復は見られない。これは、ポゾラン反応に必要な水が供給されないため、40°C・水中治癒と比較して、十分に治癒が行われなかったためである。また、40°C・水中治癒の各配合を比較すると、FA15 内割は、載荷による劣化も小さく、治癒も他の 2 配合よりも早い。このことから、最大荷重の 85% でのくり返し載荷の場合は、FA15 内割が最も治癒が行われている。また FA0 と FA 外割を比較すると劣化後の相対動弾性係数が高いことが分かる。

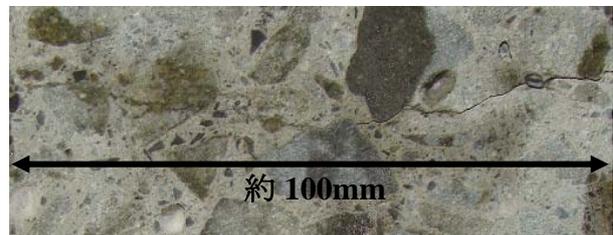


写真-1 FA15 外割 劣化後



写真-2 FA15 外割 1 週間治癒後

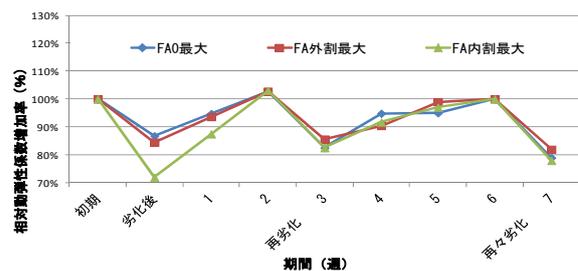


図-2 相対動弾性係数増加率(最大荷重)

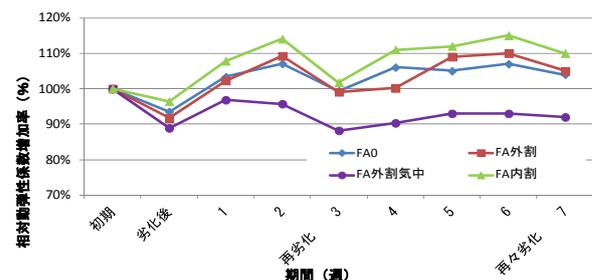


図-3 相対動弾性係数増加率(くり返し荷重)

### 3.3 最大応力の比較

各配合条件における最大荷重まで載荷時の最大応力を図-4に示す。図-4によると、FA0とFA15外割は初載荷、再載荷、再々載荷のすべてにおいて同等の最大応力となった。しかし、FA15内割はFA0、FA15外割と比較して最大応力が低い結果となった。これは3.1(1)でも述べたように、FA15内割は他の2配合と比較してセメント量が少ないため強度発現が遅れ、最大応力も他の2配合よりも低くなったと考えられる。

また、各配合の初載荷、再載荷、再々載荷における最大応力の推移を見ると、3配合とも再載荷時に最大応力がピークとなり、再々載荷ではすべての配合で初載荷時の最大応力よりも低くなった。これは、初載荷時にはまだ未水和のセメントがあり、初載荷後の治癒中に未水和のセメントが水和したため初載荷時の最大応力よりも大きくなったと考えられる。

### 3.4 AEパラメータによる比較

#### 3.4.1 カイザー効果

FA0、FA外割の初載荷および再載荷時の荷重、AE数と時間の関係を図-5、図-6、図-7、図-8に示す。カイザー効果は、それ以前の載荷履歴に対して、その先行荷重を超えて載荷されなければAEがほとんど検出されない現象<sup>3)</sup>とされており、FA0、FA15外割のどちらでも、

カイザー効果が見られ、再載荷時にはカイザー効果が失われることがわかる。しかし、初載荷時から再載荷において、どの供試体でも同様の傾向にあり、配合の違いによる評価を行うことが難しい。

#### 3.4.2 累積AEヒット数と振幅の関係

各配合のくり返し荷重載荷における累積AEヒット数と振幅の関係を図-9、図-10、図-11に示す。この関係を各配合で比較することで、どの程度の大きさの振幅が多く発生しているかを見ることができ、治癒によって発生した析出物の強度を間接的に知ることができると考えた。

図-9において、FA0では初載荷時から再載荷時にかけて、40-50dBの小さな振幅の増加が大きく、再載荷時に発生した累積AEヒット数では、40-50dBの振幅の増加が大きく、AEヒット数は全体の50%以上を占めている。一方、再載荷時の55-60dBの振幅の増加はほとんどないことから、再載荷および再々載荷における破壊は、

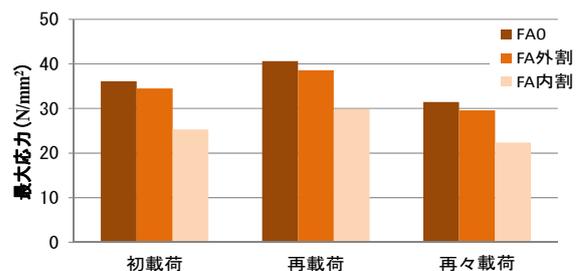


図-4 最大応力

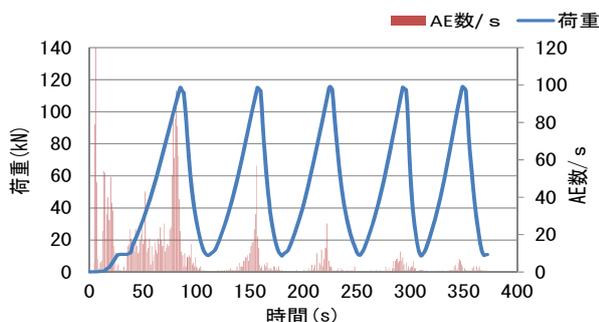


図-5 荷重, AE数-時間 (FA0 初載荷)

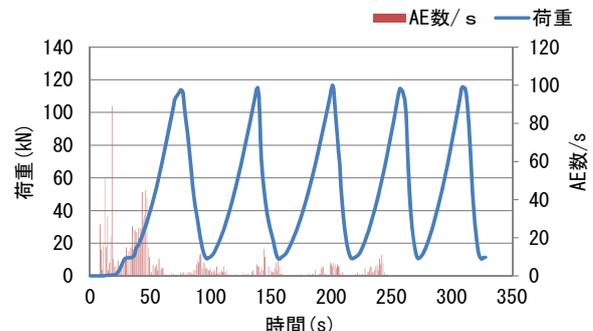


図-6 荷重, AE数-時間 (FA0 再載荷)

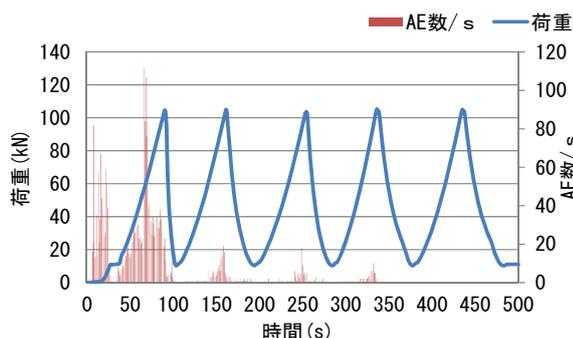


図-7 荷重, AE数-時間 (FA15 外割 初載荷)

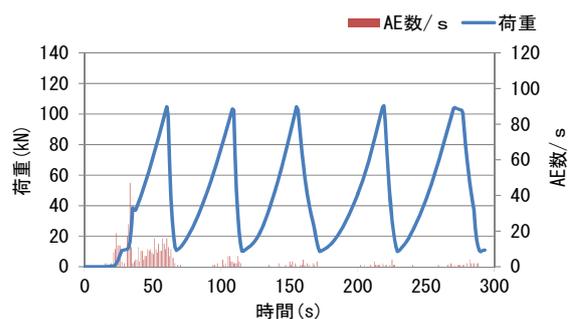


図-8 荷重, AE数-時間 (FA15 外割 再載荷)

初載荷時と比較し小振幅の破壊が生じていることがわかる。このことから、FA0 のひび割れを閉塞させている析出物の強度は低いと考えられる。図-10 では、FA15 内割の初載荷、再載荷、再々載荷のすべてにおいて 40-45dB の振幅での累積ヒット数の増加はほとんど見られず、初載荷から再載荷時にかけて、50-60dB で大きく振幅が増加している。このことより、図-9 の FA0 と比較して FA15 内割が析出物の強度は大きいと考えられる。また、図-11 についても、FA0 のような 40-50dB の振幅の累積ヒット数の増加はほぼなく、FA 内割と同様に 50-60dB で振幅の累積ヒット数が増加していることが分かる。

以上のことから、フライアッシュを混和することで、フライアッシュ無混和の場合よりも高い強度の析出物が形成されていると考えられる。

### 3.4.3 b 値による比較

b 値は、破壊過程を識別するパラメータとして用いられ、b 値が大きくなれば破壊規模が小さいものが卓越しており、b 値が小さくなれば大きな破壊現象が卓越している状態と考えられる。図-12 に b 値の概要図を示す。図-12 に示したように、b 値は AE 総発生数の対数と最大振幅の分布曲線の傾きから得られ、以下の式(2)から求められる<sup>3)</sup>。

$$\log N = a - b \log a \quad (2)$$

各配合のくり返し載荷時の b 値を比較したグラフを図-13 に示す。図-13 を見ると、FA0 では初載荷か

ら載荷をくり返すごとに b 値が増加している。FA15 外割では、FA0 とは逆に初載荷時から載荷をくり返すごとに b 値が低下している。このことから、FA0 では載荷を行うごとに小規模な破壊となり、FA15 外割では破壊が大規模になっており、フライアッシュを混入することで自己修復性が向上しているのではないかと考えられる。FA15 内割では、b 値の変化に規則性がなく、b 値による再々載荷までではフライアッシュ混入による自己修復性の向上はみられなかった。

以上のことから、フライアッシュをセメントに対して外割置換で混入した場合、載荷をくり返す度に大規模な破壊の AE が発生していることから、コンクリートにフライアッシュを混入する場合、セメントに対し外割置換で混入することで自己修復性が向上すると考えられる。

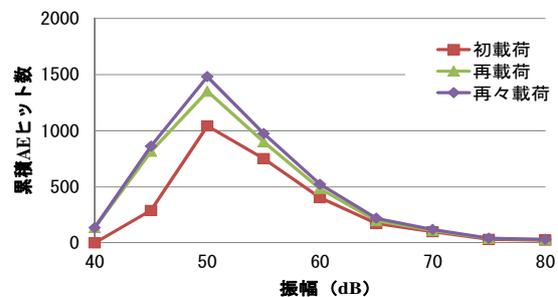


図-9 累積 AE ヒット数—振幅 (FA0 くり返し荷重)

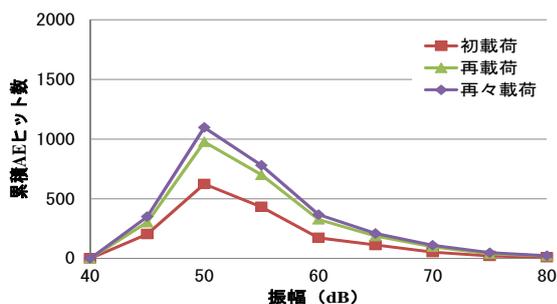


図-10 累積 AE ヒット数—振幅 (FA15 内割くり返し荷重)

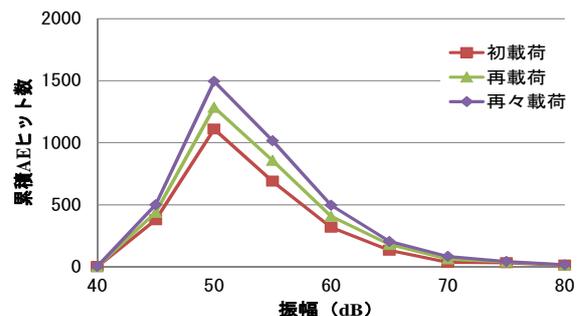


図-11 累積 AE ヒット数—振幅 (FA15 外割くり返し荷重)

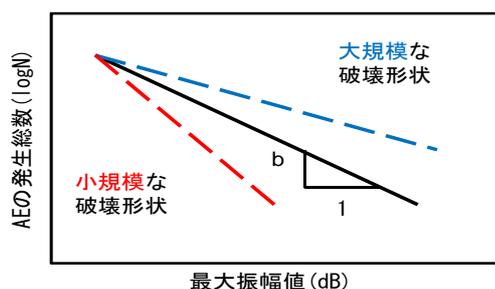


図-12 b 値概要図

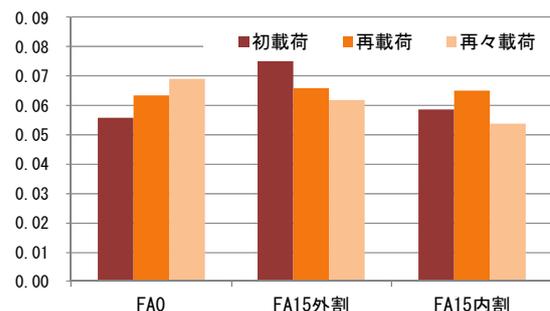


図-13 b 値比較グラフ

#### 4. まとめ

本研究では AE 法を用いて、フライアッシュ無混和、フライアッシュ外割置換および内割置換のコンクリートの自己修復性の比較を行った。

その結果以下のことが明らかとなった。

- 1) フライアッシュを混和することで、フライアッシュ無混和の場合よりも高い強度の析出物が形成される。
- 2) フライアッシュをセメントに対して外割置換で混入した場合、載荷をくり返す度に大規模な破壊の AE が発生していることから、コンクリートにフライアッシュを混入する場合、セメントに対し外割置換で混入することで自己修復性が向上すると考えられる。
- 3) 累積 AE ヒット数と振幅の関係や  $b$  値等の AE パラメータの評価により、カイザー効果のみでは確認することのできなかった修復性が明らかとなった。

#### 謝辞

徳島大学大学院 2 年玉井博貴氏には本研究の遂行に当たり、実験の実施やデータ整理など、長期間におよび多大なご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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 報告書, pp.43-49, 2009.3
- 2) 村井洋行ほか：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, Vol31, No.1, pp1195-1200, 2009
- 3) 大津政康：アコースティック・エミッションの特性と理論(第 2 版), 森北出版, pp32-38, 2005
- 4) 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—利用拡大に向けた設計施工指針試案：土木学会, 2009
- 5) 藤原悠貴：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, コンクリート工学年次論文集, Vol33, No.1, pp1433-1438, 2011
- 6) 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