#### AE 法による曲げ試験下での FA コンクリートの自己治癒性能の検証 論文

細木 良成\*1・渡辺 健\*2・橋本 親典\*3・石丸 啓輔\*4

要旨:近年,新設の構造物では高耐久性が求められる中で,自己治癒コンクリートが注目されている。ま た, 混和剤としてフライアッシュを混入することで, 長期的なポゾラン反応によりコンクリートの自己治癒性 能向上が期待されている。本研究ではスリットを設けた角柱の曲げ試験によるひび割れの導入とその治癒お よび治癒後の破壊挙動を AE 法により評価することにより、治癒後の性状評価を試みた。AE 法による計測 の結果, b 値や2次元位置評定から自己治癒の効果を示すことができた。また, フライアッシュを混和する ことによる自己治癒性能の変化を定性的ではあるが捉える事ができた。

キーワード:AE法,フライアッシュ,自己治癒,曲げ試験

# 1. はじめに

近年、コンクリート構造物の長寿命化が要求されてお り、既存構造物においては維持管理が進められている。 一方,新設の構造物の高耐久性が求められており,劣化 による欠陥、特にひび割れをおのずから閉塞することが できる自己治癒コンクリートが注目されている<sup>1)</sup>。

コンクリート中には未水和のセメントが存在し,ひび 割れが生じるとコンクリート中の未水和のセメントが水 和することで,ひび割れが閉塞することが既往の研究に より明らかになっている<sup>2)</sup>。また, 混和材としてフライア ッシュを混入することで,長期的なポゾラン反応により コンクリートの自己治癒性能向上が期待されている。こ れまでの本研究室の研究の成果より, 凍結融解作用のよ うに劣化外力が相対的に小さくかつ繰り返されるような 劣化に対して、フライアッシュの自己治癒の効果をコン クリートの相対動弾性係数を計測することにより、評価 することができた<sup>2)</sup>。これは、劣化による内部の平均的 な損傷およびそれらに対する治癒は共鳴振動数や超音波 の伝播速度の低下で評価ができているといえる。一方で, フライアッシュによる治癒効果は、劣化により生じるマ イクロクラックの閉塞とその効果の持続性であるが、自 己治癒後の治癒部分の品質は明確とはなっていない。

著者らは、アコースティック・エミッション法(以下AE

法とする)による評価を進めており、これまでに圧縮試 験下での治癒状況と再劣化時の破壊挙動について検討を 進めてきた<sup>3)</sup>。この評価手法による圧縮試験では破壊挙 動が複雑となるため、その評価が難しくなっていること が懸念される。

そこで、本研究ではスリットを設けた角柱の曲げ試験 によるひび割れの導入とその治癒および治癒後の破壊挙 動を AE 法により評価することにより、治癒後の性状評 価を試みた。

#### 2. 実験概要

#### 2.1 作製供試体概要

本実験で用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。 供試体は、フライアッシュ無混和、単位セメント量の容 積割合で15%外割置換の2配合として、100×100×400mm のコンクリート角柱供試体を各3本作製した。鉄筋はD13 の異型鉄筋を供試体上面から,かぶり25mmで配筋した。 また、ひび割れをスパン中央部に誘発させるために、供 試体中央に幅 2mm, 深さ 10mm のスリットを導入した。 フライアッシュは, JIS A 6201 で規定された II 種を用い た。セメントは、普通ポルトランドセメント(密 度:3.16g/cm3)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

14 1 11 日 14	表-	1	配合表
--------------	----	---	-----

条件	W/C	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )				- (-(0/)	SP 剤	~ 호비	
	W/C	W	С	FA	s	G	s/a(%)	(g/m³)	
FA0	55	170 309	200	0	756	1008	42	3708	2A
FA15			309	46	705		40	3708	2A

\*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)

\*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

\*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)

-1636-

	スランプ		28 日強度		
	(cm)	王文(里(%))	(N/mm²)		
FA0	18	4.7	36.8		
FA15	18	3.3	44.1		

表-2 フレッシュ性状と圧縮強度

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2配合のコンク リートについてのフレッシュ性状と28日圧縮強度を表 -2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-2の28日圧縮強度を比較す ると、FA15はFA0よりも圧縮強度が大きくなった。こ の要因としては、フライアッシュを外割置換し、セメン ト量を減じずに配合したことに加え、細骨材を粒度の小 さなフライアッシュに置き換えたことによるフィラー効 果の影響であると考えられる。

#### 2.2 劣化促進方法および治癒環境

劣化促進と治癒の手順を以下に示す。載荷時の AE 測 定の様子を図-1 に示す。供試体への損傷導入は4点曲 げ試験により行い、パイゲージを用いてひび割れ幅が 0.4mm に達するまで載荷した。また,載荷中は同時に AE の測定を行う。載荷の前後にマイクロスコープによる供 試体表面の撮影をし,自己治癒進行状況を目視により確 認をした。治癒環境は,20℃の水中およびフライアッシ ュを混入したものでは20℃の気中環境下で行った。なお 各ケースの記号は,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で水中にて治癒させた場合を「FA15」,気中にて治癒させた場合を「FA15気 中」とする。マイクロスコープによる観察により治癒完 了が確認され次第再度載荷を行い,載荷と治癒を3回く り返し行った。

#### 2.3 AE 法による評価

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 4ch のものであ り、図-1に示すようにAEセンサの配置が底辺125 mm, 高さ 50 mm の平行四辺形となるように設置した。この理 由としては、それぞれのセンサが 3 つで三角形をなすよ うに配置することでより正確な 2 次元位置評定を行うた めである。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。しきい値は 40dB に設定 した。AE パラメータによる解析として、ひび割れ幅と AE 発生数の関係、破壊過程を識別する b 値、2 次元位置評 定を行い、治癒効果を評価した。



図-1 供試体とセンサの配置

## 実験結果および考察

#### 3.1 マイクロスコープによる表面上のひび割れ観察

写真-1(a), (b), (c), (d)に, マイクロスコープ(倍 率 20 倍) で撮影した供試体スリット付近の自己治癒進行 状況の一例を示す。写真-1(a), (b)を見ると, 供試体表 面にひび割れが発生していることがわかる。写真-1(c), (d) はそれぞれの供試体を 2 週間水中で治癒させた後の 写真である。初載荷後と2週間治癒させたものを比較す ると、どちらの供試体でもひび割れ箇所から析出物が析 出しひび割れが閉塞しつつあることがわかる。また2回 目載荷を行った後も析出物の析出が確認されている。一 方, FA15気中では析出物によるひび割れの閉塞は見られ なかった。このことから、コンクリートは曲げによって 発生した約0.4mmのひび割れでも水中にて治癒を行えば、 析出物によりひび割れが閉塞をすることが確認された。 しかし、これはフライアッシュ混和の有無かかわらず閉 塞しており,フライアッシュの混和による自己治癒性能 の向上効果は確認できなかった。そこで以下の AE 法に よる評価を用いて, フライアッシュによる自己治癒性能 の向上を検証する。

#### 3.2 AE パラメータによる評価

## 3.2.1 ひび割れ幅と AE 発生数の関係

図-2(a), (b), (c), (d), (e)および(f)に, AE 頻度 および、ひび割れ幅と時間の関係の一例示す。時間軸の 0の定義は載荷開始時とする。ここでは、各ケースの初載 荷時と2回目載荷時の結果を示した。まず,各ケースの 初載荷時と2回目載荷時の結果について比較する。全て のケースにおいて, 初載荷時はある荷重に達するとひび 割れが突発的に大きく開き、それに伴い AE も集中的に 発生していることがわかる。このことから、コンクリー トが脆性的に破壊挙動を示していることがわかる。2回 目載荷時では、初載荷時とは異なりひび割れは荷重の増 加に伴い徐々に広がり, AE もひび割れ幅の増大に応じて 発生している。この結果から, FA0, FA15 ではカイザー 効果が失われており自己治癒が行われていることがわか る。しかし、各ケースでの有意な違いは認められず、フ ライアッシュ混入による自己治癒性能の向上は確認でき なかった。



写真-1(a) FA0 初載荷後



写真-1(c) FA0 2週間治癒後







写真-1(b) FA15 初載荷後



写真-1(d) FA15 2週間治癒後



(FA0 2 回目載荷)





#### 3.2.2 AE ヒット数の比較

図-3 に載荷時に計測された初載荷から3回目載荷ま でのAE ヒット数の推移を示す。値はそれぞれ3本の供 試体の平均値である。全てのケースにおいて,初載荷時 に最大のAE ヒット数を示しており,2回目載荷以降の AE ヒット数は減少している。FA0とFA15では2回目載 荷および3回目載荷で大きくAE ヒット数が減少してい る。FA15気中では,2回目載荷にAE ヒット数の減少は 見られるものの,3回目載荷時にはわずかに増加する結 果となった。この要因としては,FA15外割は気中で治癒 を行ったため水和に必要な水分が不足し,十分な治癒が 行われていないことが予想できる。したがって,載荷時 にコンクリート内部のひび割れ同士が接触することによ る2次AE が発生したのではないかと考えられる。この 現象についてはAE ヒット数のみでは評価が困難であり, 他のパラメータによる評価の検討が必要である。

## 3.2.3 b値による評価

b 値は, 破壊過程を識別するパラメータとして用いられ, 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る。本研究では以下の式(1)をもとに算出した<sup>4</sup>。

# logN=α-bloga

b 値が大きくなれば小振幅の破壊が卓越し破壊規模は 小さく、b 値が小さくなれば大振幅の破壊が卓越し破壊 規模は大きくなる<sup>4)</sup>。





図-4に各ケースのb値のグラフを示す。値は、それ ぞれ3つの供試体の平均値を示したものである。2回目 載荷の時点までは、それぞれの挙動の有意な違いは見ら れない。しかし、FA0とFA15気中では3回目の載荷に おいてb値が減少しているのに対し、FA15では3回目 載荷でb値が増加している。つまり、FA0およびFA15 気中は2回目載荷から3回目載荷にかけて、大規模な破 壊が卓越し、FA15では小規模な破壊が卓越しているこ とがわかる。FA15では大規模な破壊を生じるレベルの 析出物は析出されておらず、フライアッシュ混入による ひび割れの付着力の向上は見られなかった。

#### 3.2.4 2次元位置評定による評価

2次元位置評定により,供試体に取り付けた4つのAE センサにより,検出したAEの到達時間からその発生位 置を特定した。ここに示すのは,4つのセンサの内3つ 以上が検出したAEについて位置評定を行った。

図-5(a),(b),(c),(d),(e)および(f)に,FA0,FA15 の初載荷時および3回目載荷時の2次元位置評定の結果 の一例を示す。図は供試験体の100×400mmの面を示した ものであり,円で囲んだポイント1から4はAEセンサ の取り付け位置を示す。また,図-5(a),(d)は位置評定 結果全体を示したものであり,図-5(b),(c),(e),(f) は,エネルギーが大きいものほど,破壊により放出され るAEが大きいことから,エネルギーを35db<sup>2</sup>以上含むも

(1)

のに限定したものである。ここで各ケースのデータを比 較し, エネルギー35db<sup>2</sup>をしきい値とした時に最も有意な 差が見られたことから, エネルギー35db<sup>2</sup>をしきい値とし た。図-5(a),(d)を見ると,中央部にAEが多く発生し ていることがわかる。しかしこのままでは,2回目載荷以 降 AE 発生の減少傾向は見られるが,ケース毎の差は見 られなかった。そこで,エネルギー35db<sup>2</sup>以上を持つAE に限定した図-5(b),(c),(e)および(f)を比較する。FAO の初載荷時はスリットを入れた供試体中央 200mm付近 に広く分布していることが分かるが,3回目載荷では,供 試体表面の観察と位置評定の結果を合わせると,スリッ ト付近に発生したひび割れ付近に比較的大きなAEが集 中していることがわかった。また,FA15では,初載荷時 は FA0 同様, スリットを入れた供試体中央 200mm 付近 に広く分布している。しかし 3 回目載荷では, 位置評定 可能な AE はほとんど検出されなかった。2 次元位置評定 精度の問題も考えられるが,位置評定で検出可能な AE が 検出されないということから, 析出物が付着力を十分に 持つほど析出しておらず, 載荷時に再びひび割れが開い たため, 3 回目載荷時にはエネルギーを 35db<sup>2</sup> 以上持つ AE が発生しなかったものと考えられる。これはb 値での 考察と同様の傾向を示している。フライアッシュを外割 混入した自己治癒コンクリートでは, 一般的には力学的 な特性は回復しないとされている。よって本研究におい ては, フライアッシュ混入によるひび割れの付着力の向 上は確認されなかった。



図-5(a) 2次元位置評定 FAO 初載荷



図-5(b) 2次元位置評定 FAO 初載荷(エネルギー35db<sup>2</sup>以上)



図-5(c) 2次元位置評定 FAO 3回目載荷(エネルギー35db<sup>2</sup>以上)



図-5(d) 2次元位置評定 FA15 初載荷



図-5(e) 2次元位置評定 FA15 初載荷(エネルギー35db<sup>2</sup>以上)



図-5(f) 2次元位置評定 FA15 3回目載荷(エネルギー35db<sup>2</sup>以上)

## 結論

本研究では AE 法を用いて, FA 無混和, FA 外割置換の コンクリートの自己治癒性能の比較を行った。比較の結 果を以下に示す。

- (1) マイクロスコープによる表面上のひび割れ観察の 結果から、水分の供給によりひび割れが析出物によ り閉塞することが確認された。ただし、これは FA 混和の有無かかわらず自己治癒しており、表面の観 察のみでは FA の有効性は評価できない。
- (2) ひび割れ幅と AE 発生数の関係から,2回目載荷時 にカイザー効果が失われており,閉塞した析出物に よる付着箇所の破壊が主に生じているといえる。
- (3) b値の結果から, FA0と FA15気中に比べて FA15ではb値が増加し,破壊規模が小さくなっていることが示された。FA15では大規模な破壊を生じるレベルの析出物は析出されておらず,フライアッシュ混入によるひび割れの付着力の向上は見られなかった。
- (4) 2次元の位置評定の結果より、規模の大きな破壊が 目視により確認されたひび割れ付近に多く発生し ていることが確認された。しかし、3回目載荷では エネルギーを35db<sup>2</sup>以上持つAEがほとんど検出さ れず、フライアッシュ混入によるひび割れの付着力 の向上は確認されなかった。

## 謝辞

徳島大学4年生中石譲君には本研究の遂行に当たり, 実験サポートやデータ整理など,日々多大なご協力を頂 きました。心から感謝の気持ちと御礼を申し上げます。

## 参考文献

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)藤原悠貴,渡辺健,橋本親典,石丸啓輔: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

3) 細木良成,渡辺健,橋本親典,石丸啓輔: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, コンクリート工学年次論文集:Vol35, No.1, pp1387-1392
4)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