

# 論文 AE 法によるコンクリート乾燥収縮機構の解明

野崎渉太\*1・川崎佑磨\*2・松尾拓也\*3・大津政康\*4

**要旨:** 近年, コンクリート構造物の乾燥収縮によるひび割れが問題視されており, 乾燥収縮に関する社会的関心は大きい, 拘束応力によるコンクリートのひび割れメカニズムを解明している研究は少ない。本研究では, 拘束条件を考慮した供試体を作製し, 供試体が乾燥収縮する間にアコースティック・エミッション(AE)計測を行った。実験により得られた AE 波形に SiGMA 解析を適用し, 拘束条件のあるコンクリートの破壊進行状況の把握を行った。その結果, AE 発生源の位置標定や微小クラックの識別および集積過程を可視的に明らかにできる可能性が示唆された。

**キーワード:** 乾燥収縮, 拘束圧, アコースティック・エミッション (AE), SiGMA 解析

## 1. はじめに

昨今, コンクリート構造物において乾燥収縮により発生したひび割れが問題になっている<sup>1)</sup>。これまで土木構造物は建築構造物に比べ乾燥収縮によるひび割れが問題になることは少なかったが, 上記の事例および示方書が改訂されたことから土木分野においても乾燥収縮ひび割れに対する考え方が変わってきた。それに伴い, コンクリート構造物を長期間安全に使うため, また一定の品質を維持するために乾燥収縮によって生じるコンクリートのひび割れ機構の解明への社会的関心も高まっている。

一般に, 普通コンクリートの収縮メカニズムはセメントペーストの収縮に加え, その収縮を拘束する骨材も収縮する。またセメントは乾燥収縮だけでなく, 水和収縮が原因となって生じる自己収縮も存在し, これらが複雑に働く。この時, コンクリートが何の拘束も受けなければコンクリート全体が収縮するだけでひび割れは発生しないが, 実際のコンクリート構造物は何かしらの拘束を必ず受けているために, コンクリートの収縮は外的・内的に拘束され, この収縮拘束圧によってひび割れが発生する。これまで乾燥収縮に関する研究事例は多くあるが, 乾燥収縮にアコースティック・エミッション (AE) 法を用いた研究や AE 法を用いて拘束圧によるコンクリートのひび割れメカニズムを詳しく解明しているものは少ないのが現状である。

非破壊検査手法の一つである, AE 法は微細レベルでの破壊現象に対して高い検出能力を発揮し<sup>2)</sup>, 直接確認することが困難なコンクリート内部の破壊進行状況を AE 法により把握可能であることが報告されている<sup>3)</sup>。さらに, AE 波動の基礎理論<sup>4)</sup>に基づいた SiGMA (Simplified

Green's functions for Moment tensor Analysis) 解析<sup>5)</sup>により, コンクリート内部の微小破壊の進行過程を理論的かつ定量的に把握することができ, 視覚的にも容易に表現可能である。

以上のような背景から, 埋設物の影響でコンクリートに発生した拘束圧により生じたひび割れメカニズムを解明することを目的として, 鋼球を配置したコンクリート供試体を作製し, AE 法を適用することで拘束圧を受けたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ機構の解明について検討を行った。

## 2. SiGMA 解析理論

AE センサは図-1 に示すように, 感度指向性を持っており, その方向  $t$  は AE 波の進行方向と一致することはない。また, AE センサは弾性体の境界面上に設置するために, 検出される AE 波は境界面上で反射の影響を受けてしまう。よって, AE 波が発生源から AE センサへ進行する方向  $\gamma$  と AE センサの感度指向方向  $t$  による補正係数  $Ref(t,r)$  を考慮すると, AE センサに AE 発生源より

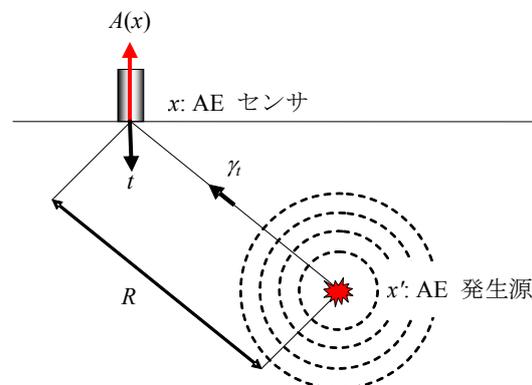


図-1 AE センサによる波動検出

\*1 熊本大学大学院 自然科学研究科社会環境工学科専攻 (正会員)

\*2 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻 (正会員)

\*3 熊本大学 工学部社会環境工学科 (非会員)

\*4 熊本大学大学院 自然科学研究科複合新領域科学専攻教授 工博 (正会員)

伝播、到達してくる AE 波の初期振幅値  $A(x)$  は以下の式 (1) で表される。

$$A(x) = C_s \cdot \frac{\text{Ref}(t, \gamma)}{R} \cdot \gamma_p \gamma_q M_{pq} \cdot DA \quad (1)$$

ここで、 $C_s$  は AE センサの感度も含めた材料の物性値の係数、 $DA$  はひび割れ面の面積、 $R$  は AE 発生源とセンサの距離、 $\gamma_p, \gamma_q$  は AE 波のセンサへの入射方向  $\gamma$  の  $p$  方向および  $q$  方向への余弦ベクトルを表す。

SiGMA 解析では、図-2 に示すように AE 波の到達時間と AE 波の初動振幅値の 2 つのパラメータを用いて、AE 発生源の位置標定を行い、ひび割れの種類や運動方向を決定する。それぞれの AE センサで検出される AE 波形から AE 波の到達時間を読み取り、この到達時間差から AE 発生源の位置標定を行い、式(1)に AE 波形の初動振幅値とこれらの値を代入することにより未知数のモーメントテンソル  $M_{pq}$  を決定する。 $M_{pq}$  は応力やひずみと同じく 2 階のテンソルなので、固有値解析を行えばマイクロクラックの種類や運動方向を決定することができる。なお、ひび割れの種類は、引張型ひび割れ (Tensile Crack)、混合型ひび割れ (Mixed-Mode Crack)、せん断型ひび割れ (Shear Crack) に識別される。

### 3. 実験概要

実験供試体は 100×100×400mm の角柱で、コンクリート供試体内部に埋設物として鋼球を配置した。この時、鋼球の配置箇所は供試体中央でひび割れを起こさせることを目的として決定した。コンクリートの配合を表-1 に示す。コンクリートの 28 日圧縮強度は 30.0N/mm<sup>2</sup>、引張強度は 3.33N/mm<sup>2</sup> であった。

実験供試体は 7 日間標準水中養生後、恒温恒湿 (20℃, 60%) の養生室内に保管して AE モニタリングを実施した。その際、使用した AE 計測装置には AE WinSAMOS (PAC 社製)、AE センサは R15I-AST (PAC 社製) を使用し、しきい値は 40dB とした。AE センサはエレクトロニックボックスにて貼付した。なお、実験中には表-2 および図-3 に示すように 6 個の AE センサを供試体表面に設置した。AE 発生源が、供試体中央に設置した鋼球の影響から供試体中央部に多く検出されると予測できるため、供試体中央 100 mm 四方の上表面と側面に AE センサを配置した。

同時に実験供試体と同じ配合の供試体を 3 本作製し、それぞれの供試体において長さ変化試験も行った。この時、供試体の両端にゲージプラグを埋め込み、供試体の長さ変化を計測するための標点とした。計測器にはダイヤルゲージを付属した計測枠に供試体をはめ込み、標準尺との差から長さ変化を求めた。

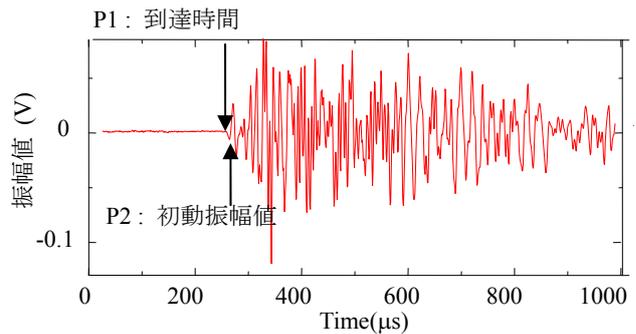


図-2 検出される AE 波形

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 (%)	スランプ (cm)	
20	55	44.15	6	8	
単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 A	AE助剤 A
170.0	309.1	741.0	1161.0	0.625	0.0125

表-2 AE センサの座標

	x(m)	y(m)	z(m)
1CH	0.100	0.070	0.170
2CH	0.100	0.020	0.230
3CH	0.020	0.100	0.180
4CH	0.070	0.100	0.240
5CH	0.000	0.080	0.240
6CH	0.000	0.020	0.170

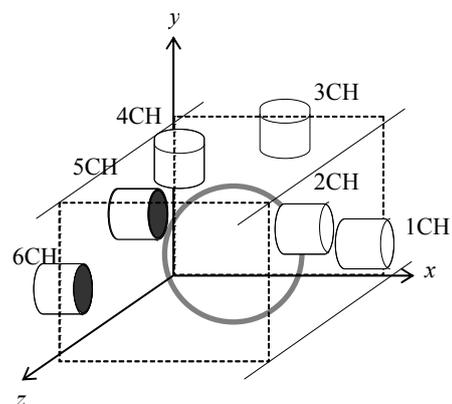


図-3 AE センサ配置

## 4. 実験結果

### 4.1 乾燥収縮ひずみの経時変化

図-4 に表-1 と同様の配合で作製したコンクリート

の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。図-4 から、本研究で行った実験でのコンクリートは材齢初期段階で乾燥収縮ひずみが大きくなっており、その後時間が経過すると共に乾燥収縮ひずみも緩やかに大きくなっていくことが確認された。このことから、実験に使用するコンクリートは材齢が若い段階で乾燥による影響を大きく受けていることが確認された。そのため、材齢が若い時に乾燥収縮の影響による AE は多く検出されると考えられる。

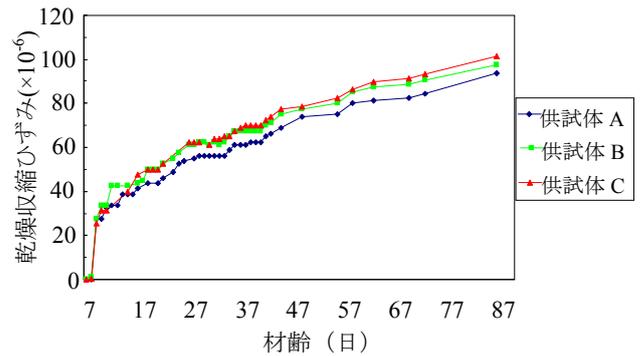


図-4 乾燥収縮ひずみの経時変化

#### 4.2 応力解析を用いた AE 発生挙動の予測

図-4 に示した乾燥収縮ひずみの経時変化と弾性応力解析を用いて AE の発生挙動を予測した。

引張試験によって得られた引張強度と応力解析により導いた鋼球周辺に働く引張応力の近似解<sup>6)</sup>を用いて、応力解析による AE 発生挙動の予測を行った。引張強度と応力解析により導いた鋼球周りに働く引張応力の近似解の関係を図-5 に示す。図-5 から、材齢 8 日目前後で鋼球周辺に働く引張応力の近似解が、引張試験により得られたコンクリートの引張強度を超えていることが確認できる。よって、乾燥収縮ひずみの経時変化と合わせて考えると、8 日目以降に鋼球による引張力がコンクリートの引張強度を超えることでコンクリート内部に微小ひび割れが入り始める可能性があり、微小ひび割れが発生した時の AE とコンクリートが乾燥収縮することにより発生する AE を多く検出されると考えられ、材齢の早い段階から AE の頻発が予測できる。また、引張応力の近似解と引張強度の差が大きくなるほど、コンクリート内部の微小ひび割れが伸びていくと考えられ、AE も卓越して検出されると予測できる。このことから、日数が経過すると共に AE ヒット数も頻繁に検出されると考えられる。そして、コンクリート内部のひび割れが供試体表面に到達する時に、AE ヒット数の急激な増加が予測される。

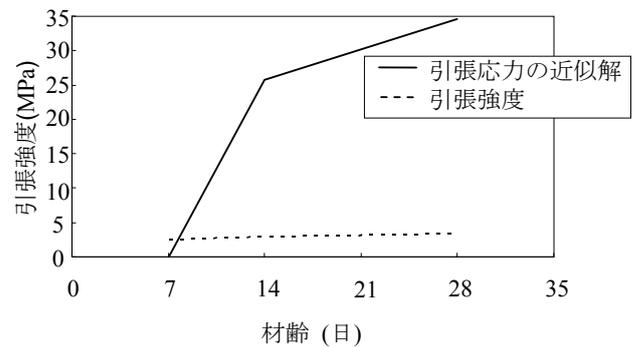


図-5 引張強度と引張応力の近似解との関係

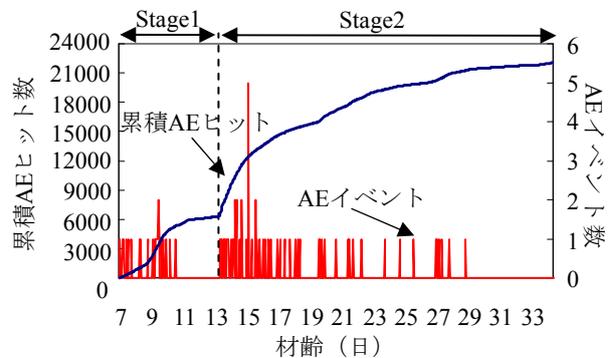


図-6 累積 AE ヒット数と AE イベント数

#### 4.3 AE 発生挙動

1 時間毎の 6 個の AE センサ全てで検出された AE ヒット数と AE イベント数の関係を図-6 に示す。本実験での AE イベント数とは、1 つの AE 現象に対して、6 個の AE センサ全てで検出された個数としている。図-6 より、実験開始後から AE ヒット数が徐々に増加しており、9 日目で AE ヒット数が急激に増加していることが確認できる。これは、鋼球の影響でコンクリート内部にひび割れが入り始めたため、AE が多く検出されたと考えられる。その後、11 日目から 13 日目まで AE ヒット数は減少し、AE イベント数は確認されなかった。14 日目以降にかけて急激な AE ヒット数の増加および AE イベント数の増加が確認された。

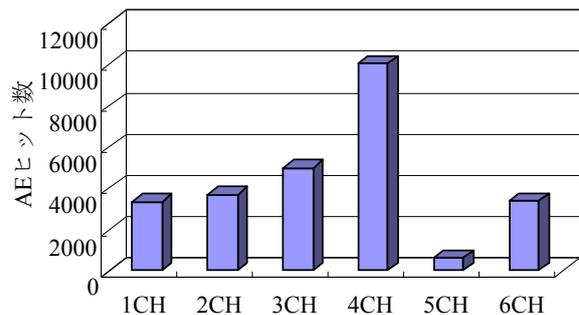


図-7 各 AE センサの AE ヒット数

ント数が確認された。これは、9日目以降にひび割れが発生し、そのひび割れが進展して供試体表面にまで達したことでAEヒット数の頻発が確認された。したがって、実験開始から材齢13日目までは鋼球によって働いた拘束圧を主とする引張力により、コンクリート内部にひび割れが発生した影響によるAEが検出され、材齢14日目以降は、供試体内部で発生したひび割れが進展していくことで発生したAEが検出されたと考えられる。これらの結果より、鋼球によるひび割れメカニズムを時系列

ごとに認識するために、図-6においてAE発生頻度のパターンから2段階に分けた。実験開始から材齢13日目までをStage1、材齢14日目から実験終了までをStage2とした。また、実際のAE発生挙動と乾燥収縮ひずみと応力解析によるAE発生挙動が同じ傾向であることが確認できた。

図-7にAEセンサ別のヒット数を示す。図-7から、供試体平面の3CHと4CHでAEヒット数が多く検出されていることが分かる。これは、供試体側面の1CH, 2CH

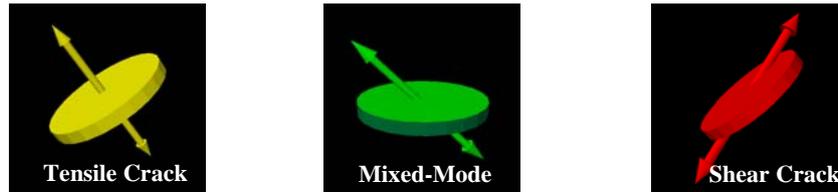
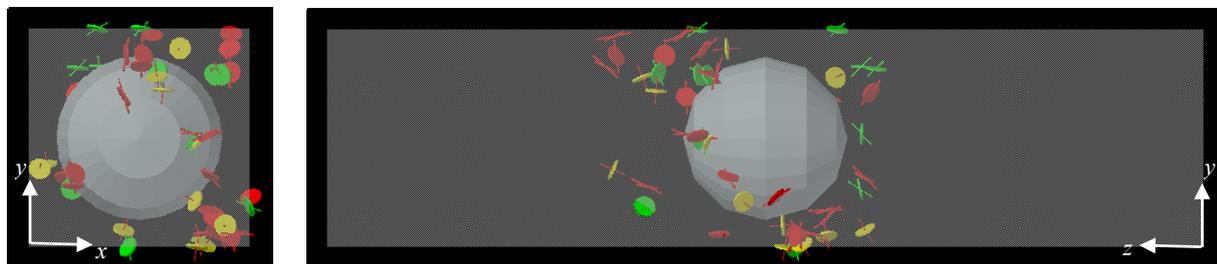


図-8 SiGMA解析に用いたクラックモデル

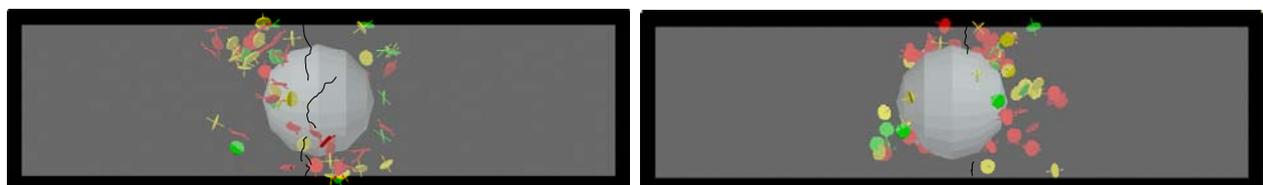


(a) Stage1のSiGMA解析結果



(b) Stage2のSiGMA解析結果

図-9 SiGMA解析結果



(a) 供試体側面(1CH,2CH)

(c) 供試体平面(3CH,4CH)



(b) 供試体側面(5CH,6CH)

(d) 供試体底面

図-10 SiGMA解析結果とひび割れの位置

および 5CH, 6CH よりも拘束圧の影響を受けたため、拘束圧により発生した AE 現象を多数検出したと考えられる。

#### 4.4 SiGMA 解析結果

AE 計測によって得られた AE 波形について初動振幅値と立ち上がり時間を読み取り, SiGMA 解析を行うことで, AE 発生源の 3 次元の位置標定およびひび割れ識別を行った。本実験の SiGMA 解析において, AE イベントを定義するための Event Definition Time (EDT) は 100 $\mu$ sec に設定した。EDT とは, AE が発生した際, 発生源に最も近い AE センサでの到達時間と, その他の 5 個の AE センサとの到達時間の差であり, 最初に検出された AE 波から 100 $\mu$ sec 以内にその他全ての AE センサで AE ヒットが検出されたものを AE イベントと定義した。なお, EDT は実験供試体の長さ (400mm) と実験供試体の P 波速度 (4080m/s) を考慮して決定した。また, 解析に使用した物性値として, P 波速度は 4080m/s, ポアソン比は 0.2 を使用した。解析に使用した AE イベントは, 6 個の AE センサ全てで同定されたものとした。

AE イベントのクラックの形成モードについて, モーメントテンソルのせん断成分が占める割合(せん断成分比)により類別を行った。せん断成分比が 0~40% の AE イベントを引張型クラック, 60~100% の AE イベントをせん断型クラック, 40~60% の AE イベントを混合型クラックと分類した。図-8 に SiGMA 解析に用いたクラックモデルを示す。なお, SiGMA 解析結果を 3 次元空間で表現するため, 本研究では Light Wave 3D (New Tek 社製) を用いて図化を行った。矢印はクラックの運動方向であり, 中央の円盤は微小ひび割れ面をモデル化している。

SiGMA 解析により, 全 Stage で 87 個の AE イベントが供試体内部に同定された。Stage1 には 25 個, そして Stage2 には 62 個の AE イベントが検出された。

それぞれの Stage の SiGMA 解析結果を図-9 に示す。Stage1 では, 鋼球まわりに AE イベントが同定された。この AE イベントは, 鋼球の拘束圧による影響でコンクリート供試体内部にひび割れが発生し, その際に発生した AE 現象であると考えられる。Stage2 では, 多くの AE イベントが同定されており, 位置標定の結果は Stage1 と比較して供試体中央部に広がっていることが分かる。また, せん断型クラックが供試体中央に多く確認され, 引張型クラックは鋼球周辺や供試体底面に集中していることが分かる。このことから, 拘束圧による引張力が鋼球の周辺に働いたことで引張型クラックが生じて微小ひび割れが発生し, その後, せん断型クラックが微小ひび割れを伸ばすように全体に進展していったと考えられる。

SiGMA 解析結果と供試体表面に最終的に形成されたひび割れを図-10 に示す。図-10 より, ひび割れは供試体中央に発生しており, せん断型クラック周辺からひび割れが伸びていることも確認された。したがって, 引張型クラックが先行して供試体内部の脆弱なところから微小破壊が発生し, その後せん断型クラックがそれらの微小クラックを繋ぐように伸びていったと考えられる。

これらの結果から, SiGMA 解析を適用することで, 乾燥収縮によるコンクリート内部のひび割れメカニズムを把握できる可能性が示唆された。また, SiGMA 解析によりコンクリート内部のひび割れが目視によりコンクリート表面に確認される前に予測できる可能性も確認された。

#### 5. まとめ

本論文では, 拘束応力によるコンクリートの破壊進行過程を把握するために, 拘束条件を考慮した乾燥収縮試験を行い, AE 法を適用することで, 破壊に至る微小クラックの進展状況に関する考察を行った。その結果, 以下のようなことが明らかとなった。

- (1) AE 発生挙動から, 鋼球の拘束圧により発生したひび割れの影響を受けた AE と, 発生したひび割れが進展していくことで発生した AE が存在し 2 パターンの AE 発生挙動が確認できた。また, 供試体平面の 3CH, 4CH が拘束圧による AE ヒット数を多数検出していたことが確認された。また, 乾燥収縮ひずみの経時変化と応力解析を用いた AE 発生挙動の予測と実際の AE 発生挙動の傾向が一致していることが確認できた。
- (2) SiGMA 解析を適用することで, Stage1 では, 鋼球周辺に AE イベントが同定され, 鋼球の拘束圧による影響でコンクリート供試体内部にひび割れが発生していることが予測できた。Stage2 では, せん断型クラックが供試体中央に多く確認され, 引張型クラックは鋼球周辺や供試体底面に確認された。コンクリート内部の微小ひび割れは, 鋼球の拘束圧により発生した引張型クラックの影響で発生し, その後せん断型クラックがひび割れを伸ばすように発生したことが確認できた。また, ひび割れが目視によりコンクリート表面に確認される前に予測できる可能性も確認された。したがって, SiGMA 解析によりコンクリート内部のひび割れがマイクロクラックの集積過程により明らかになったことから乾燥収縮機構解明に貢献できると考えられる。

#### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：垂井高架橋の損傷に関する調査特別委員会最終報告書，土木学会，2008.3
- 2) 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），pp.2-36，森北出版，2005
- 3) Ohtsu, M.: The History and Development of Acoustic Emission in Concrete Engineering, Concrete library of JSCE, No.25, pp.121-134, 1995
- 4) Ohtsu, M. and Ono, K.: A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Function in a Half Space, Journal of AE, Vol.3, No.1, pp.124-133, 1984
- 5) 大津政康，重石光弘，湯山茂徳，岡本享久：AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発，非破壊検査，Vol.42, No.10, pp.570-575, 1993
- 6) 土木学会編：構造力学公式集，p.393，土木学会，1974