

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2016

課題番号：15K14023

研究課題名(和文) AE法に基づいた確定論的破壊予知法に関するフィージビリティスタディ

研究課題名(英文) Feasibility Study on Deterministic Failure Prediction by AE

研究代表者

大津 政康(OHTSU, Masayasu)

京都大学・インフラシステムマネジメント研究拠点ユニット・研究員

研究者番号：80109016

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)： AEパラメータ解析によるクラック分類法:最終破壊に向けて平均周波数の低下とRA値の上昇が明らかになり、確定論的な破壊予知の可能性を確認した。地震の断層破壊過程へのSIGMA解析:せん断亀裂により破壊する鉄筋コンクリート梁のSIGMA解析を行って、断層形成機構における初期引張クラックの発生を確認した。時間依存性破壊における提案手法の有効性:実際に交通荷重下のコンクリート構造物でのAE計測にクラック分類法を適用し、補修時期の判定を行った。フィージビリティスタディの総括:確定論的な破壊予知法の確立に関連して、コンクリート構造物の最終破壊および補修の評価のためのインフラドック検査を提案した。

研究成果の概要(英文)： Based on the parameter analysis of Acoustic Emission (AE), the decrease in the average frequency and the increase in RA value are confirmed to be applicable to the failure prediction. With relation to an application of the earthquake prediction, diagonal-shear failure in a reinforced concrete beam (RC) similar to fault motion is studied, applying the SIGMA analysis. Thus, nucleation of tensile cracks in the early stage of shear failure is clarified. Crack classification by AE parameter analysis is applied to concrete structures under traffic loads. It is found that the time for repair could be estimated quantitatively by periodical measurements. Associated with a deterministic prediction of failure, an infra-dock is proposed for the prognosis of concrete structures in service.

研究分野：コンクリート構造診断学

キーワード：アコースティック・エミッション コンクリート非破壊検査 破壊予知 インフラドック

## 1. 研究開始当初の背景

コンクリート材料における AE 研究においてクラックの分類手法を研究し、

1) K. Ohno and M. Ohtsu, "Crack Classification in Concrete based on AE," *Construction and Building Materials*, Vol. 24, Issue 121, 2339-2346, 2010

を公表している。その成果により申請者が以前に主宰した RILEM TC212-ACD 研究委員会から RILEM の推奨案

2) M. Ohtsu, "Test Method for Classification of Active Cracks in Concrete Structures by AE," *Materials and Structures*, No. 43, 1187-1189, 2010

を発表済みである。これらの研究成果は、世界的に注目されており、AE パラメータによるクラックの分類法として認められている。

一方で、Pseudo-Brittle 材料の Meso-Scale 破壊過程は引張りクラックからせん断クラックへと遷移することは、周知の知見と言えることから、クラックの遷移過程に基づいた破壊予知に関するフィージビリティスタディを提案するに至った。

AE パラメータ分析に関しては、RILEM Recommendation (上記の文献 2)) で提案した RA 値と平均周波数による引張クラックとせん断クラックの分類法がある。この有効性を定量的に確認したのが上記の文献 1) である。この研究では AE 発生機構の決定に関して、クラック毎に引張型、混合型、せん断型に分類可能なモーメントテンソル解析を可能とした SiGMA (Simplified Green's function for Moment tensor Analysis) 法を開発済みである。その論文

3) M. Ohtsu, "Simplified Moment Tensor Analysis and Unified Decomposition of AE Source," *J. Geophysical Research*, Vol. 96(B4), 6211-6221, 1991

は地震学の研究者からも問い合わせがあるなど注目されている。

このように AE パラメータ分析と SiGMA の分類結果の差異については研究実績があるが、破壊予知に適用した場合は検討しておらず、この点を明らかにすることを考えた。

破壊予知の研究は、地震予知が先行しており、材料科学の分野では疲労破壊のパリス則などの統計的な手法が見られる程度である。地震予知の可能性が様々に議論されているように、困難な研究テーマと考えられているが Pseudo-Brittle 材料の破壊過程が既知の事実であり、その過程を AE 計測によって定量的に追跡可能ならば、クラック発生機構の遷移から主破壊の発生時期に関して確定的な破壊予知が可能となると考えられた。

これまでに、地震予知あるいは破壊予知に AE 計測を適用した研究例は認められるが、震源探査 (破壊源探査) を適用したものが多く、このような試みを行ったものは無いと言える。そこで、挑戦的萌芽研究としてチャレンジする価値のある研究であると考えに至った。

破壊時期の予知と言うテーマは、将来的に大きな研究課題となるとも考えられることから、フィージビリティスタディとして実験による各種破壊形式や時間依存性破壊 (クリープ、疲労) などでの破壊予知可能性について検討を行うことにした。

## 2. 研究の目的

コンクリートや岩石などの Pseudo-Brittle な材料の破壊過程における Meso-Scale での内部観察によれば、材料の破壊過程は引張クラックの生成 (nucleation)、それらの集積及び連結・合体 (coalescence)、せん断クラックの発生と最終破壊に至ることが知られている。

アコースティック・エミッション (AE) 法を、これら材料の Meso-Scale 破壊過程の観察に適用した研究成果によれば、発生する微小クラックを引張クラックとせん断クラックに

識別できることが明らかになっている。この分類法は、2010年に提案したもので、図-1のように引張クラックとせん断クラックの分類が、波形パラメータとして提案した RA 値と、平均周波数によって可能となっている。その有効性は、現在までの Citation 回数 81 と世界的に確認された手法となっている。

したがって、両者によるクラックの分類は、申請者が世界に先駆けて提案し、最もよく理解している手法と言える。

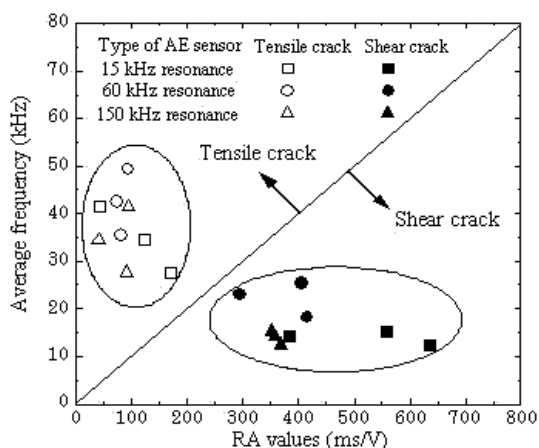


図-1 AEパラメータによるクラック分類

それゆえ、このクラック分類法を破壊の遷移過程の同定に適用し、定量的に破壊予知を行おうという試みは、有理的であり、かつ斬新な着想であると考えられた。

本研究で、これらの機構的な知見と計測技法を止揚し、材料の破壊機構に基づいた確定論的な破壊予知の可能性やその実務への応用について研究を行った。

地震予知の可能性については、大きな議論となっているようにされているように、困難な研究テーマであり、これまでに成功している例はあまりない。しかし、統計理論や確率過程論によらずモーメントテンソル解析などを駆使して AE 計測によって定量的に追跡可能ならば、確定論的な破壊予知が可能となると考えられる。その特徴は、AE 法を適用することにより、微小破壊群の集積領域が特

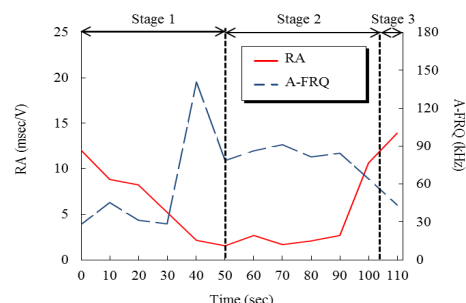
定できることであり、さらに引張からせん断への遷移過程を観測することにより主破壊の発生時期まで予知しようとするものと言える。

### 3. 研究の方法

破壊予知法の可能性に関するフィージビリティスタディを念頭に、初年度は、これまでのデータによる AE パラメータ解析結果と SiGMA 解析データの検証を手始めとして実施した。

(1) 過去の破壊実験での AE 計測結果のパラメータ解析結果の検証

クラックの分類法を適用した結果としてコンクリート供試体の割裂試験の結果を図-2



に示す。

図-2 割裂試験における AE パラメータの遷移過程

明らかに最終破壊に向けて、平均周波数 (A-FRQ) の低下と RA 値の上昇が認められる。この遷移点が定量化できれば、研究課題として確定論的な破壊予知が可能と考えられたことより、これまでの実験データの検証によってこの点を検討した。

(2) SiGMA 解析データの検証によるパラメータ解析との比較による破壊予知の検討  
SiGMA 解析結果とパラメータ解析によるクラック分類に関しては、既報の

(5) M. Mondringin and M. Ohtsu, "AE Indices for Characterization of Concrete Failure Process," Proc. of Progress in Acoustic Emission XVI, JSNDI, 2012, pp.

19-24.

を図-3 のように発表している。

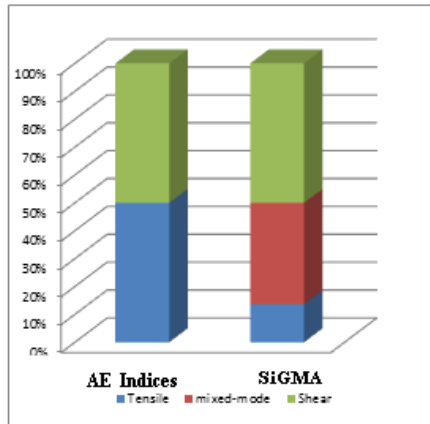


図-3 クラック分類結果の比較

しかし、異なる破壊形式についての検討は行われておらず、材料の異なる場合も含めて検証を行った。

次年度は、これらの結果の実証として

- (3) 地震予知への可能性を考慮したせん断破壊への SiGMA 解析の適用

地震学では、その発生機構について断層破壊を対象としているため、せん断破壊に対するモーメントテンソルの分析しか通常は行われていない。これに対して SiGMA 解析では、クラックを引張クラック、混合型クラック、せん断クラックに分類可能である。そこで、予めせん断亀裂を補修したコンクリート材料のせん断破壊実験に適用し、地震の断層形成に相当する破壊機構での SiGMA 解析の適用性を検討した。

- (4) 時間依存性破壊における提案手法の有効性の検証

破壊過程の制御が容易と考えらえる時間依存性破壊実験として現場計測を実施して、提案手法の実用的な手法としての検証を試みた。

- (5) フィージビリティスタディ結果の総括

以上の研究項目によって、フィージビリティスタディ結果の総括を行って、確定論的な

破壊予知法の確立に関連して、コンクリート構造物の最終破壊および補修の評価に関して、次の研究課題の提起を行った。

#### 4. 研究成果

本研究によって得られた成果は、以下のようによまとめることができる。

- (1) AE パラメータ解析によるクラック分類法について、最終破壊に向けて、全ての実験で、図-2 と同様に平均周波数の低下と RA 値の上昇が明らかになり、確定論的な破壊予知の可能性が確認された。
- (2) 地震の断層破壊過程への SiGMA 解析として、せん断亀裂により破壊する鉄筋コンクリート梁の SiGMA 解析を行い、断層形成機構における初期引張クラック発生を確認した。

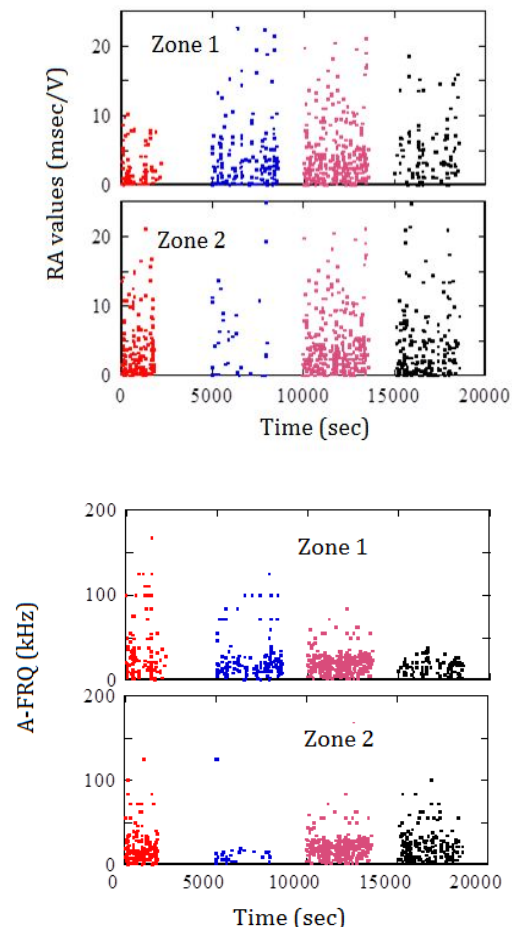


図-4 既設橋梁での交通下荷重下の AE

- (3) 時間依存性破壊における提案手法の有効性を検討するために、実際に交通荷重下のコンクリート構造物での AE 計測に図-4のようにクラック分類法を適用した。4ヶ月間に及ぶ定期的な計測の結果、疲労劣化の進んだ Zone 1 では、RA 値の上昇と平均周波数の低下が明らかに認められ、補修時期の判定を行うことができた。
- (4) フィージビリティスタディの総括では、確定論的な破壊予知法の確立に関連して、コンクリート構造物の最終破壊および補修の評価のためのインフラドック検査を提案するに至った。これは、インフラドック制度の確立に関する次世代への研究課題の提起でもある。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

### 〔雑誌論文〕(計 7 件：全て査読有)

大津政康，弾性波動を利用した計測原理と品質評価，非破壊検査，査読有，Vol. 64, No. 3, 2015, 106-112

大津政康，川崎裕太郎，電気化学的手法の逆解析(PiBEM)とAE計測を用いたハイブリッド鉄筋腐食評価の検証実験，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集 (査読有) 第15巻，2015, 65-70

佐藤京介，大津政康，AE法による破壊過程予測に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集 (査読有) 第15巻，2015, 229-234

M. Ohtsu, Basics and Applications of NDE based on Elastodynamics toward Infra-Dock for Concrete Structures, Emerging Technology in NDT VI, (Reviewed), 2016, 3-11

A. Ishibashi, K. Matsuyama, N. Alver, T. Suzuki and M. Ohtsu, Round-Robin Tests in Damage Evaluation of Concrete based on the Concept of AE Rates, Materials and Structures, (Reviewed), Vol. 49, No. 7, 2016, 2627-2635

DOI: 10.1617/s1 1527-015-0672-9

M. Ohtsu, Elastic Wave Method for NDE in Concrete based on Generalized Theory of AE, Construction and Building materials, (Reviewed), Issue 122, 2016, 845-854  
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.137

T. Suzuki, T. Shiotani and M. Ohtsu, Evaluation of Crack damage in Freeze-Thawed Concrete using AE and X-Ray CT Image, Construction and Building Materials, (Reviewed), Issue 136, 2017, 619-626  
DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.013

### 〔学会発表〕(計 9 件)

佐藤京介，永井勇輔，友田祐一，大津政康，AEパラメータ解析による確定論的破壊予知に関する考察，土木学会西部支部研究発表会，土木学会，那覇，2015，3/7

三村越史，川崎裕太郎，友田祐一，大津政康，PCグラウト注入過程におけるAE法によるボイド検出能力に関する研究，土木学会西部支部研究発表会，土木学会，那覇，2015，3/7

松尾圭祐，吉良美咲，友田祐一，大津政康，SIBIE法におけるグラウト充填評価法のBEM解析に関する考察，土木学会西部支部研究発表会，那覇，2015，3/7

廣田遼次，永井勇輔，友田祐一，大津政康，弾性波インパクト装置の定量的較正法に関する研究，土木学会西部支部研究発表会，那覇，2015，3/7

友田祐一，大津政康，山田雅彦，徳光 卓，AE法によるPCグラウト注入評価に関する考察，第20回AE総合コンファレンス，仙台，2015，11/19-20

王 瑞平，菊池直人，大津政康他，鉛フリーAEセンサを用いた既設PC橋のAEモニタリングによる疲労評価，第20回AE総合コンファレンス，仙台，2015，11/19-20

M. Ohtsu, R. P. Wang, K. Sato, On-Site Assessment of Damage for Infra-Dock, (Keynote), Structural Faults & Repair-2016, Edinburgh, 2016, 5/17-10

M. Ohtsu, Visualized NDE for Internal Defects in Concrete Structures by SiGMA and SIBIE (Invited), Gordon Research Conference, Hong Kong, 2016, 8/2-5

M. Ohtsu, Development of AE Measurement in Concrete and Evolutional Applications (**Keynote**), 8<sup>th</sup> International Conference on AE, Kyoto, 2016, 12/5-8

**〔図書〕(計 2 件)**

M. Ohtsu, Elsevier, AE and Related NDE in the Fracture Mechanics of Concrete: Fundamentals and Applications, 2015 , 291 pages.

M. Ohtsu, Springer, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures, 2016, 176 pages.

**〔産業財産権〕** なし

**5 . 研究組織**

- (1) 研究代表者  
大津 政康(OHTSU Masayasu)  
京都大学大学院・工学研究科・特任教授  
研究者番号： 8 0 1 0 9 0 1 6