

AE法に基づくひび割れ損傷の進行したコンクリートの 圧縮破壊挙動評価に関する研究

鈴木哲也^{1*}・山岸俊太郎²・森井俊広¹・河合隆行³

(平成25年1月31日受付)

要約

コンクリート構造物の詳細調査にはコンクリート・コアの採取に基づく力学特性評価が不可欠である。本研究では、ひび割れ損傷の進行したコンクリートを対象にAE (Acoustic Emission) 法を用いた損傷度評価法を開発することを目的としている。筆者らは、AE法とスカラー損傷度概念を用いたコンクリートの定量的損傷度評価法 DeCAT (Damage Estimation of Concrete by Acoustic Emission Technique) を開発している。本論では凍害損傷の進行したコンクリート製開水路からコア供試体を採取し、圧縮応力下でのAE発生挙動を評価した結果を報告する。検出されたAEの発生挙動は損傷分布に影響を受け、AEパラメータにより評価可能であることが示唆された。力学特性の低下はAE発生挙動に加えて、検出波特性により評価可能であることが明らかになった。

新大農研報, 65(2):171-177, 2013

キーワード：凍害損傷、コンクリート、ひび割れ、AE (Acoustic Emission)、圧縮強度試験

はじめに

農業水利施設の主な建設材料はコンクリートである。鉄筋コンクリート構造物の長期耐久性は、コンクリートのひび割れ損傷と密接に関連しているが、損傷の進行した構造材料に関する力学特性の評価方法は確立されていない。この背景には、破壊過程が不均質であることに加えて、力学特性と損傷度との関連が明確に評価できないことに起因している。

筆者らは、凍害損傷の進行したコンクリート製開水路を対象にX線CT法とAE (Acoustic Emission) 法を組み合わせた材質評価 (Suzuki *et al.*, 2010) や損傷の進行が弾性波伝播挙動へ及ぼす影響について検討している (鈴木, 2012)。既往の研究において、ひび割れ損傷の発達は、その幾何学的形状が弾性波伝播挙動を特異に変質させることが明らかになっている。長期供用に伴い構造材料の損傷は局所的に進行し、ひび割れを伴う不均質化が力学特性を変質させる。

本論では、凍害損傷の進行したコンクリート製開水路からコンクリート・コアを採取し、局所的にひび割れの発達したコンクリートの圧縮破壊過程をAEパラメータの観点から詳細評価することを目的としている。実験的検討を踏まえて、ひび割れの発達したコンクリートの力学特性と圧縮破壊過程で発生するAEとの関連を考察した。

解析手法

1. AEレートプロセス解析

コンクリートの圧縮強度試験においてAEの発生挙動は、微小ひび割れの発生過程と対応している。微小ひび割れは漸増的に発生・集積され、主破壊に至る。ひび割れ発生に対応するAE発生挙動は、微小ひび割れの集積により累進的に増加する。この

過程は、ある応力レベルで発生するひび割れ総数に依存し、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配すると考えられる。その場合、確率過程論における定式化が可能である (鈴木ら, 2004)。

AEの発生総数を N 、応力レベルを V とし、AE発生確率関数を $f(V)$ とすると、 V から $V+dV$ への応力増分に対し、以下の式(1)を導くことができる。

$$f(V)dV = \frac{dN}{N} \quad (1)$$

AE発生確率関数 $f(V)$ に対し、損傷度の定量化のために以下の双曲線を仮定する。

$$f(V) = \frac{a}{V} + b \quad (2)$$

ここで a 、 b は定数である。

式(1)および式(2)より応力レベル V に対するAE発生総数 N は式(3)より表される。

$$N = C \cdot V^m \exp(b \cdot V) \quad (3)$$

式(2)において、 a 値は応力レベル V でのAE発生頻度を反映し、載荷初期段階のAE発生確率により、その正負が決定する。 a 値が正の場合、AE発生確率関数 $f(V)$ は載荷初期段階の低応力レベルで高いことを意味し、コンクリートが損傷した状態であると評価することができる。 a 値が負の場合、AE発生確率関数 $f(V)$ は低応力レベルで低いことを意味し、材料が健全な状態であると評価できる。

2. ワイブル解析

ワイブル解析は、コンクリートに代表される脆性破壊を評価方法として用いられる確率分布である。本研究では、コンクリート・コアの圧縮破壊過程に検出されるAEをワイブル分布により評価した。ワイブル分布の確率密度関数 $f(x)$ を式(4)に示す。

^{1*} 新潟大学農学部生産環境科学科

² 新潟大学大学院自然科学研究科

³ 新潟大学災害・復興科学研究所

* 代表著者：suzuki@agr.niigata-u.ac.jp

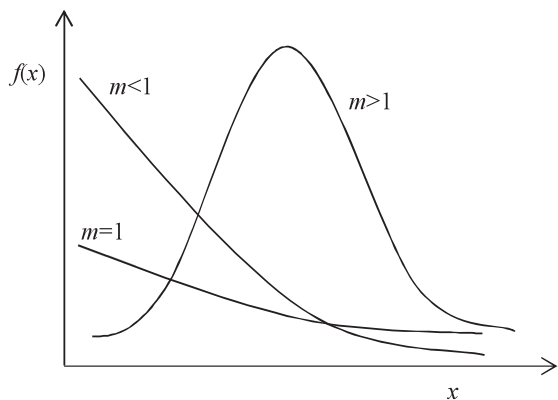


図 1. ワイブル分布

$$f(x) = \frac{m}{x_0^m} \cdot x^{m-1} \cdot \exp\left\{-\left(\frac{x}{x_0}\right)^m\right\} \quad (4)$$

ここで、 m : 形状パラメータ、 x_0 : 尺度パラメータである。

式(4)で用いられる形状パラメータ m および尺度パラメータ x_0 の推定には、 $\ln(x)$ を横軸、 $\ln\ln(1-F)-1$ を縦軸とするワイブルプロットが用いられる。ワイブルプロットにおいてワイブル分布は直線となり、その直線の傾きが形状パラメータ m となる。切片から尺度パラメータ x_0 が算出される。本研究では、破壊確率 F_i の推定のため、メディアンランク法を用いた。メディアンランク法とは、数値データを小さい順に並べ、その順序 i を用いて、破壊確率 F_i を推定する手法であり、式(5)より算出される。

$$F_i = \frac{i-0.3}{n+0.4} \quad (5)$$

ここで、 F_i : 破壊確率、 i : 数値データを小さい順に並べた順序数、 n : サンプルサイズである。

ワイブルプロットより求められる形状パラメータ m は確率密度関数 $f(x)$ のばらつきを示す指標であり、ワイブル分布の形状は m 値により変化する。 $m \leq 1$ のとき $f(x)$ は単調減少となり、 $m > 1$ のとき $f(x)$ は極大値をもつ分布となる。 $m > 1$ の場合、 m 値が大きければ、ばらつきの小さい分布形状を示し、 m 値が小さければ、ばらつきの大きい分布形状となる。ワイブル分布の確率密度関数 $f(x)$ の概要図を図 1 に示す。

実験方法

1. 既存施設からのコンクリート・コアの採取

コンクリート・コアの採取は、凍害損傷が顕在化した農業用コンクリート製開水路の側壁部で行った。コンクリート・コアは、ブロック状の側壁部を現地より(独)寒地土木研究所(札幌市)へ移設し、コアドリルを用いて採取した(図 2)。サンプル直径は $\phi 104\text{mm}$ である。コアの高さは 213mm から 247mm である。

供試したコンクリート・ブロックは、常に水流の影響を受けていた水流部と水面より上部にある気中部に分けることができる。気中部では、水中部と比較して凍害損傷と考えられるひび割れが発達していた。水中部では、目視によりひび割れは確認されなかった。コンクリート・コアの採取位置は、ひび割れ損傷が発達した気中部より Type A と Type B を採取した。凍害損傷が進行していない水中部より Type C を採取した。

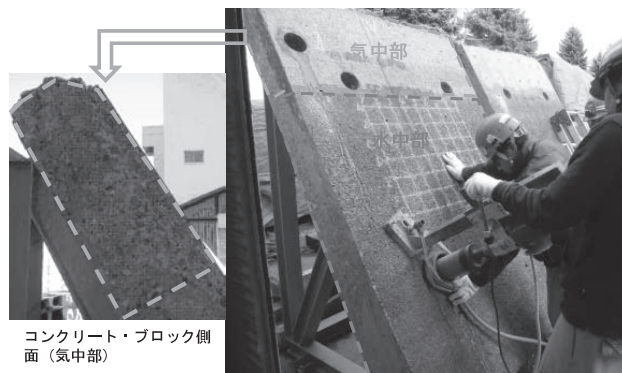


図 2. サンプル採取状況

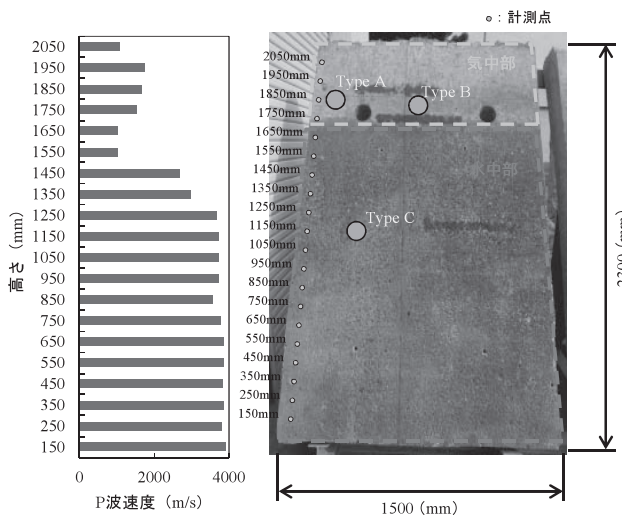


図 3. サンプル採取位置と P 波速度分布

コンクリート・コアの採取に先立ち、ブロックの P 波速度を超音波法(透過法)により評価した。計測結果を図 3 に示す。高さ $1,550\text{mm}$ 以上では P 波速度が大幅に低下し、気中部の P 波速度は $2,000\text{m/s}$ を下回っていることが確認された。

供試体のひび割れ状況を目視により観察した結果、Type A で 0.1mm から 0.45mm のひび割れが表面から 5cm の間で確認された。Type B では 0.15mm から 1.4mm のひび割れが表面から 3cm の間で確認された。Type C は開水路側壁の水中部より採取した供試体であり、ひび割れは確認されなかった。

2. P 波速度試験

コンクリート・コアのひび割れ損傷を詳細に評価するため、コアの断面方向の P 波速度を計測した。計測装置は Pundit Lab (PROCEQ 社製)を使用した。計測はコンクリート・コアの天端部から 10mm 間隔で測定した。探触子にはグリスを薄く塗布し、供試体との密着性を高めた。入力超音波は 54kHz である。

3. 圧縮強度試験

圧縮強度試験には AE 計測を導入し、破壊過程における AE 発生挙動を計測した。計測装置は SAMOS (PAC 社製)である。

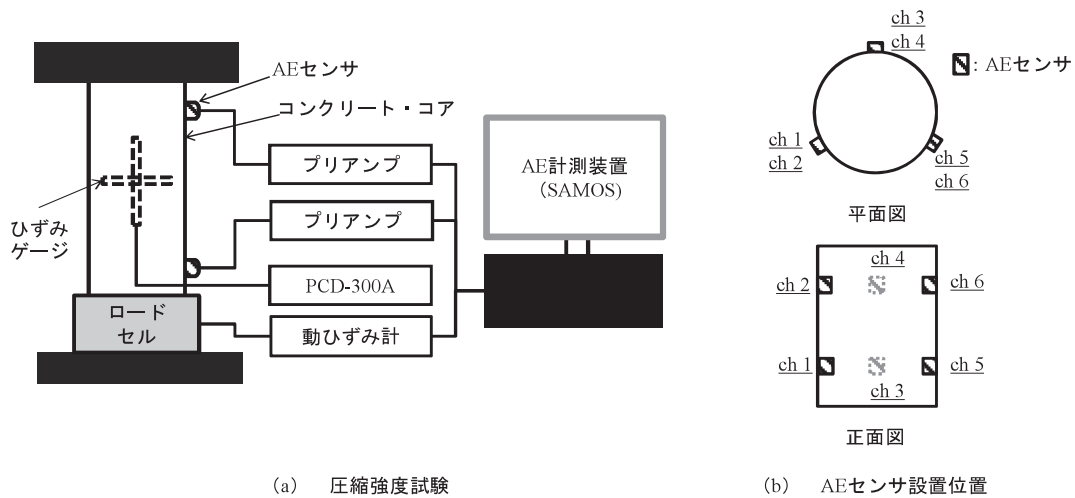


図4. 試験概要図

AEセンサは、コンクリート・コアの側面部に計6個設置した。しきい値は42dBとし、60dBの増幅をプリアンプとメインアンプで行った。使用したAEセンサは150kHz共振型センサである。試験の概要図を図4に示す。

結果および考察

1. 圧縮破壊過程におけるAE発生位置

圧縮強度はType A $12.0\text{N}/\text{mm}^2$ 、Type B $9.9\text{N}/\text{mm}^2$ 、Type C $27.0\text{N}/\text{mm}^2$ であり、開水路側壁の水中部より採取したType Cが最も高く、圧縮強度が最も低いType Bの約2.7倍であることが確認された。Type AはType Bの約1.2倍であり、圧縮強度は同程度であることが確認された。

図5はType Bを基準にコンクリート・コアの損傷状況と圧縮強度試験の載荷初期段階（応力レベル10%～30%）において計測されたAEの位置標定結果である。図5(b)はコンクリート・コアのP波速度分布を示したものである。水中部より採取されたType CのP波速度は、いずれの部位も $3,500\text{m}/\text{s}$ 以上であることが確認された。これに対し、Type AとType BではP波速度の低下が顕著となった。本研究では、P波速度分布よりコンクリート・コアを損傷域と無損傷域に区分し、検出波の定量評価を試みた。損傷域の設定はP波速度と目視によるひび割れ分布から $3,200\text{m}/\text{s}$ 未満の部位とし、基準値より下回る領域を損傷域、基準値以上の領域を無損傷域とした。検討の結果、Type Aではコア高さが160～200mmの領域が損傷域となった。Type Bでは、コア高さ180～200mmの領域が損傷域となった。Type CはP波速度 $3,200\text{m}/\text{s}$ を下回る領域が確認されなかった。

ひび割れが発達したコンクリート・コアの圧縮破壊挙動は、既往の研究より載荷初期からAEが頻発することが確認されている（大津、2005；Suzuki *et al.*, 2010）。そこで本研究では、低応力レベル10%～30%のAE発生挙動に着目し、AE発生位置と損傷との関係を考察した（図5(c)）。応力レベルは圧縮強度が最も低かったType Bを基準とし、圧縮強度 $9.9\text{N}/\text{mm}^2$ を応力レベル100%とした。応力レベル10%は荷重8.4kN、応力レベル20%は荷重16.8kN、応力レベル30%は荷重25.2kNである。Type Bに対してType Aの応力レベルは荷重8.4kN

で8.9%、16.8kNで17.7%および25.2kNで26.6%である。Type Cでは荷重8.4kNで4.2%、16.8kNで8.4%および25.2kNで12.7%である。

AE源位置標定の結果、8.4kN（Type B：応力レベル10%）では、コア中央部にAEの集中が確認された。Type AおよびType Bでは、損傷域においてもAEが多数検出された。応力レベルの増加に伴い、AEの発生位置はコア中央部に集中することが確認された。コンクリートの圧縮強度試験では、供試体の端部と載荷板との間に摩擦が作用するため、コンクリートの横方向への膨らみが載荷板によって拘束される（笠井ら、1998）。このような横拘束の効果は供試体端面から離れるに従って減少するため、供試体端面は破壊されない円錐状の部分が存在し、中央部だけが破壊に至るのが一般的である。本試験においてもType CのAEの発生源はコア中央部に集中していることから同様の破壊が発生したと考えられる。Type AとType Bでは、Type Cとは異なり、荷重8.4kNの際に損傷域でAEが検出された。低応力下におけるAEの頻発は、コア表面に発達したひび割れ挙動に強く影響されたものと考えられる。本供試体では圧縮応力下において、ひび割れの密着や発達損傷域でのAE発生挙動に影響したものと考えられる。

2. 圧縮破壊過程におけるAEパラメータ特性

本研究では、損傷域と無損傷域において発生したAE波の相違を評価するためにAEパラメータによる特性評価を試みた。使用したAEパラメータは最大振幅値であり、その定量評価にはワ이블解析を用いた。検討には、AE源位置標定より発生位置が明確になったものを対象とした。

検討結果を図6(a)・(b)に示す。本図は、荷重8.4kN（Type B：応力レベル10%）において、損傷域と無損傷域で検出されたAEの最大振幅値の頻度分布を示したものである。供試体の構成はType AとType Bである。ここで、図6(a) Type Aのワ이블分布の最頻値は、損傷域51dB、無損傷域62dBである。図6(b) Type Bのワ이블分布の最頻値は損傷域50dB、無損傷域65dBである。両図より損傷域と無損傷域の最大振幅値の相違が確認された。これは損傷域起源のAEが現存のひび割れ挙動によるAEであるのに対して、無損傷域では新たに発生したひび割れによるAEであると考えられる。検出波

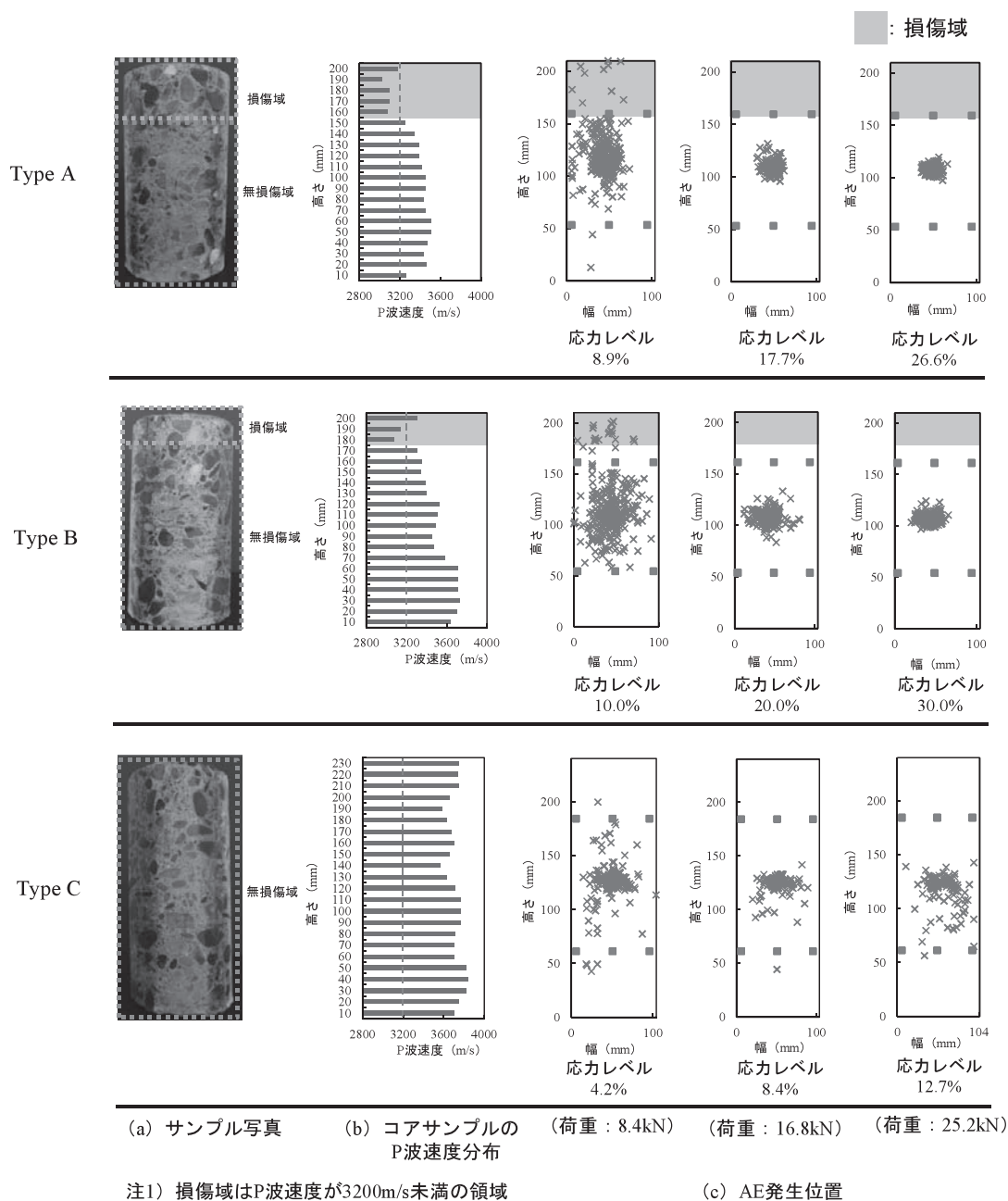


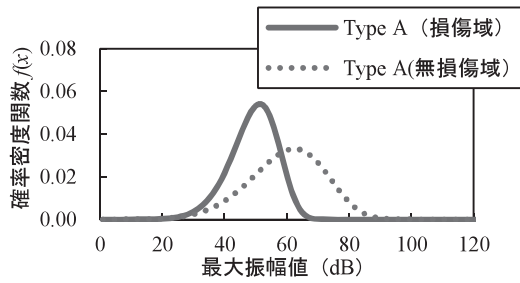
図5. コンクリート・コアの凍害損傷と圧縮応力下での AE 発生位置

の最大振幅値の相違は、発生起源に加えて、放出されるエネルギー量の相違が影響したものと考えられる。図6(c)はType AおよびType Bの無損傷域起源のAEとType Cの全AEである。検討の結果、Type A、Type BおよびType Cの分布範囲はおおよそ一致しており、無損傷域では検出されたAEの最大振幅値は同規模であったことが確認された。

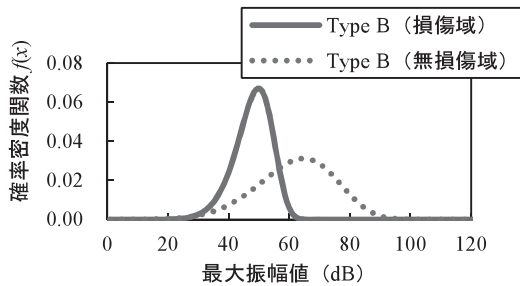
図7は圧縮強度が最も低いType Bと圧縮強度が最も高いType CのAEレートプロセス解析の結果である。 a 値はType Bで 14.0×10^{-4} 、Type Cで -14.4×10^{-4} となった。 a 値の観点からType Bは損傷、Type Cは健全と評価される。図8に示し

たワイブル分布は、レートプロセス解析の対象範囲である応力レベル30%から80%において発生したAEの最大振幅値分布を示したものである。Type A、Type BおよびType Cの最頻値は66dB、68dBおよび72dBであり、明確な差異は確認されなかった。

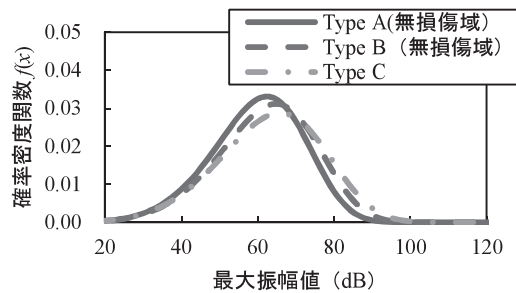
各サンプルのAE発生総数と最大振幅値の関係を図9に示す。図中に示す最大振幅値は応力レベル80%以下で検出したAEをワイブル分布により解析し、最頻値を明示したものである。検討の結果、最大振幅値は67dBから72dBが確認された。AE発生総数は、応力レベル30%未満で535～823ヒット、応



(a) Type A



(b) Type B



(c) Type A および Type B の無損傷域と Type C

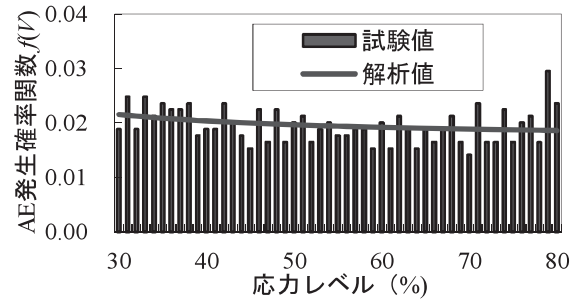
図6. 検出 AE 波の最大振幅値とワイブル特性

力レベル 30% から 80% で 561 ~ 832 ヒットであった。同一の荷重条件において Type B は AE の頻発が確認され、AE 発生総数が異なることが確認された。AE 発生総数は損傷が最も進行した Type B で高くなることが明らかとなった。

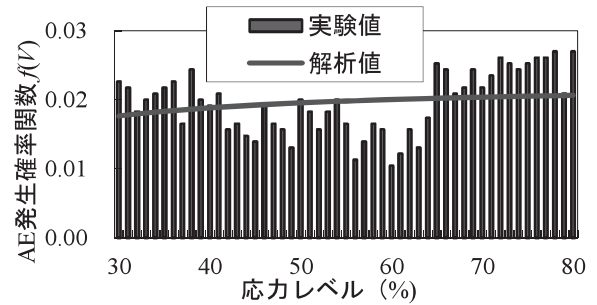
代わりに

本研究では、凍害によりひび割れ損傷が発達したコンクリート・コアを用いて AE 計測を伴う圧縮強度試験を実施し、ひび割れの発達したコンクリートの圧縮破壊特性について AE パラメータの観点から検討した。検討結果を以下に列挙する。

- (1) 凍害損傷が進行したコンクリート製開水路の側壁よりコア供試体を採取し、P 波速度試験よりコアの損傷域と無損傷域を区分した。その結果、コンクリート製開水路側壁の気



(a) Type B



(b) Type C

図7. AE 発生確率関数 $f(V)$ と応力レベルの関係

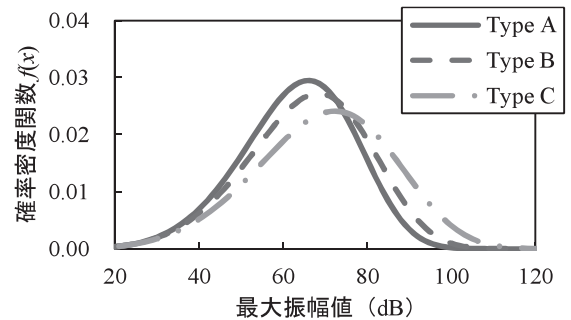


図8. 応力レベル30%~80%における最大振幅値分布

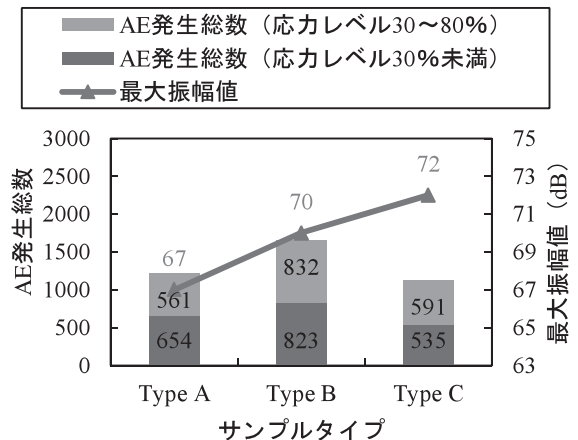


図9. AE 発生総数と最大振幅値の関係

中部より採取したコンクリート・コアではコア上部においてひび割れの進行に伴う P 波速度の低下が確認された。

- (2) 圧縮破壊過程において発生した AE 源位置標定を行った結果、載荷初期において損傷域での AE の頻発を確認した。
- (3) 載荷初期段階において、損傷域と無損傷域で発生した AE の最大振幅値は明確に異なることが明らかになった。

参考文献

- 榎学：マテリアルの力学的信頼性，内田老鶴圃，pp. 71-79, 2006.
- 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，2005.
- 笠井芳夫編著：コンクリート総覧，技術書院，pp. 416-419, 1998.
- 鈴木哲也：X 線 CT 法に基づくひび割れの進展したコンクリートの特性評価に関する研究，コンクリート構造物の非破壊

検査論文集，Vol. 4, 283-288, 2012.

Suzuki, T., Ogata, H., Takada, R., Aoki, M. and Ohtsu, M.: Use of Acoustic Emission and X-Ray Computed Tomography for Damage Evaluation of Freeze-Thawed Concrete, *Construction and Building Materials*, 24, pp. 2347-2352, 2010.

鈴木哲也，池田幸史，友田祐一，大津政康：データベース構築に基づく AE レートプロセス解析による劣化コンクリートの定量的損傷度評価，コンクリート工学年次論文集, 26(1), pp. 1791-1796, 2004.

田邊武志，月岡美佳，重石光弘，大津政康，友田祐一：アコースティックエミッションワイブル解析によるコンクリート材料の評価，アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集，Vol.16, pp.45-48, 2007.

Evaluation of Fracture Process of Cracked Concrete by Acoustic Emission

Tetsuya SUZUKI^{1*}, Shuntaro YAMAGISHI², Toshihiro MORII¹
and Takayuki KAWAI³

(Received January 31, 2013)

Summary

In recent years, as a detailed inspection of concrete structures, core samples are usually drilled out and then mechanical properties are measured. In this study, damage estimation method for cracked concrete is developed, applying acoustic emission method. By the authors, the quantitative damage evaluation of concrete has been proposed by applying AE and scholar damage parameter in the compression test. The procedure is named DeCAT (**D**amage **E**stimation of **C**oncrete by **A**coustic **E**mission **T**echnique), which is based on estimating an intact modulus of elasticity in concrete. In this study, concrete-core samples taken from reinforced concrete canal were tested. These samples are strongly influenced by freezing and thawing process. These samples were evaluated, based on fracturing behavior under unconfined compression with AE. The AE behavior of the concrete under compression is dependent on the degree of crack distribution, and could be approximated by applying AE parameter. These experiments suggest that the decrease in mechanical properties could be evaluated by comparing average AE generation behavior with detected AE quality in core test. These values are affected by the internal actual cracks.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 65(2):171-177, 2013

Key words : Freeze-thawed damage, Crack, Acoustic emission, Compression test

^{1*} Faculty of Agriculture, Niigata University

² Graduate School of Science and Technology, Niigata University

³ Research Institute for Natural Hazard and Disaster Recovery, Niigata University

* Corresponding author: suzuki@agr.niigata-u.ac.jp