

AE パラメータ解析による凍害損傷を受けたコンクリートの圧縮破壊特性評価に関する研究

新潟大学大学院	学生会員	山岸 俊太郎
新潟大学	正会員	鈴木 哲也
新潟大学	正会員	森井 俊広
鳥取大学	正会員	緒方 英彦
鳥取大学大学院	学生会員	周藤 将司

1. はじめに

ひび割れの発達したコンクリートでは、無損傷と比較して圧縮強度や弾性係数などの力学特性の低下が顕在化する。既存施設の適切な維持管理には、劣化や損傷機構の解明とともに、ひび割れの発達した材料の物性評価の方法論を確立することは重要な技術的課題である。

筆者らは、ひび割れを有するコンクリート・コアを用いて X 線 CT 法と AE (Acoustic Emission) 法による定量評価を試みている¹⁾。既往の研究では、コンクリート中のひび割れ発達は、CT 値の低下と圧縮破壊過程において低応力下での AE の頻発を引き起こすことを明らかにしている。

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ンクリート・コアを採取し、ひび割れの発達したコンクリートの圧縮破壊過程の特性を詳細評価することを目的としている。圧縮破壊過程は、AE 法によりモニタリングし、ワイブル解析により定量評価を試みた。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における AE 発生挙動との関連を考察した。

2. 解析手法

2. 1 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の評価方法として用いられる確率分布である²⁾。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(1)に示す。

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

ここで、 m : 形状パラメータ、 x_0 : 尺度パラメータである。式(1)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ている。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(2)より算出される。

$$F_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \quad (2)$$

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³⁾。

3. 実験方法

3. 1 コンクリート・コア

供試体は凍害損傷が顕在化したコンクリート製開水路の側壁部より採取したコンクリート・コアである。開水路の側壁は、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・コアは、ひび割れ損傷が発達した気中部 (Type A と Type B) と、凍害損傷が進行していない水中部 (Type C) を

キーワード 凍害, コンクリート, 圧縮強度試験, AE (Acoustic Emission), ワイブル分布

連絡先 〒950-2181 新潟県新潟市西区五十嵐 2 の町 8050 番地 新潟大学大学院 TEL025-262-6303

E-mail : f12e016c@mail.cc.niigata-u.ac.jp

採取した。

供試体のひび割れ状況は目視により観察した。ひび割れ幅はクラックスケールを用いて評価した。Type A では 0.1mm から 0.45mm のひび割れが表面から 5cm 深まで確認された。Type B では 0.15mm から 1.4mm のひび割れが表面から 3cm 深まで確認された。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。

3. 2 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 発生挙動の計測および AE 源の位置標定を実施した。計測装置は SAMOS (PAC 社製) である。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 共振型センサを用いた。試験の概要図を図 1 に示す。

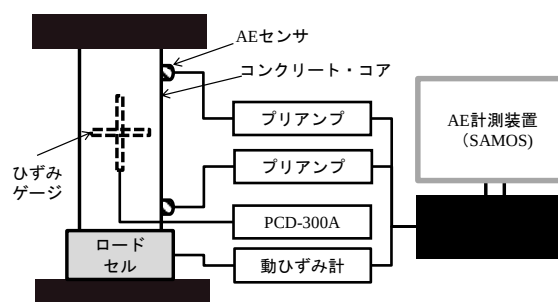
4. 結果および考察

4. 1 圧縮破壊過程における AE 発生位置

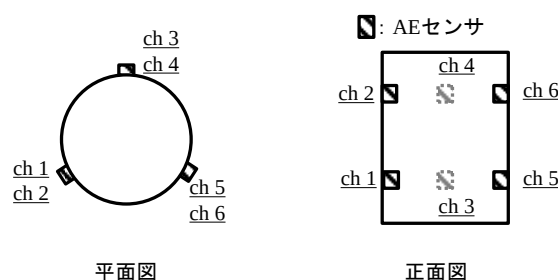
圧縮強度は Type A 12.0N/mm^2 、Type B 9.9N/mm^2 、Type C 27.0N/mm^2 であり、開水路側壁の水中部より採取した Type C が最も高く、圧縮強度が最も低い Type B の約 2.7 倍であることが確認された。Type A は Type B の約 1.2 倍であり、圧縮強度は同程度であることが確認された。

図 2 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载荷初期段階（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 2 (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 $3,500\text{m/s}$ 以上であることが確認された。これに対し、Type A や Type B では P 波速度の低下が確認された。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、検討を行った。損傷域の設定は P 波速度分布から $3,200\text{m/s}$ 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。その結果、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 $3,200\text{m/s}$ 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・コアは、圧縮応力下において载荷初期から AE が頻発する⁴⁾。そこで本研究では、低応力レベル 10%～30%の AE 発生挙動に着



(a) 圧縮強度試験



(b) AE センサ設置位置

図 1 試験概要図

目した。その際、AE を評価するために、圧縮応力下における AE 発生源の位置標定を試みた (図 2 (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 9.9N/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において、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。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⁵⁾。本試験においても 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、荷重 8.4kN の際に損傷域で AE が検出されたが、応力レ

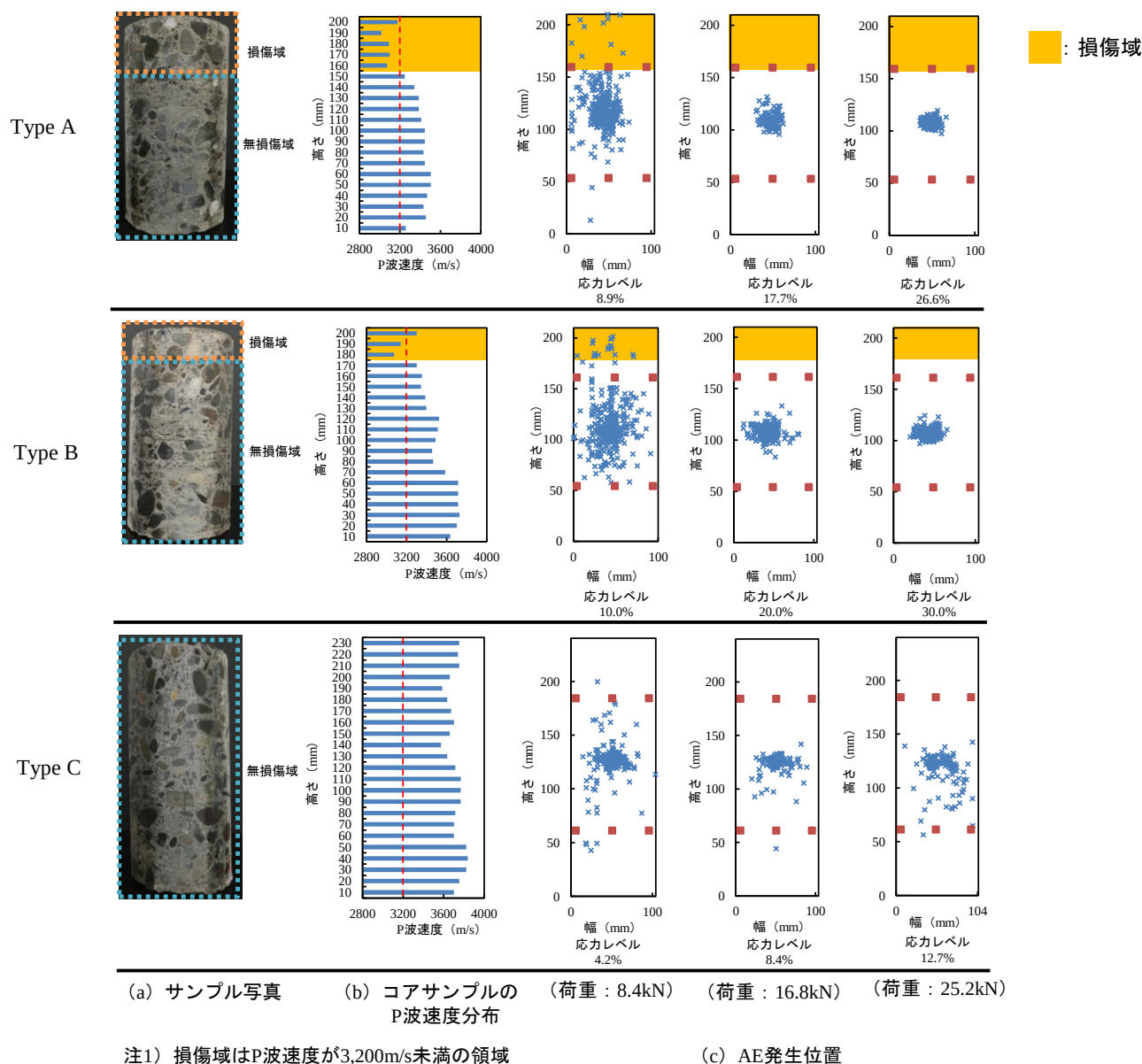


図 2 コンクリート・コアの損傷状況と AE 源位置標定

ベルの増加に伴い、AE は検出されなくなった。低応力下における AE は、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が損傷域での AE 発生挙動に影響したものと考えられる。

4. 2 圧縮破壊過程における AE パラメータ特性

本研究では、損傷域および無損傷域において圧縮破壊過程で検出される AE パラメータの特性評価を試みた。AE パラメータの定量評価にはワイブル解析を用いた。使用した AE パラメータは最大振幅値である。検討対象は、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 3 と図 4 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 の最大振幅値の分布特性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 3 Type A のワイブル分布の最頻値は、損傷域 51dB、無損傷域 62dB となった。図 4 Type B のワイブル分布の最頻値は損傷域 50dB、無損傷域 65dB である。図 3・図 4 において、損傷域と無損傷域の相違が確認された。これは、損傷域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 であるため、両者の最大振幅値の相違が明確に表れたものと考えられる。図 5 は Type A および Type B の無損傷域と Type C のワイブル分布である。検討の結果、Type A、Type B および Type C の分布範囲はおお

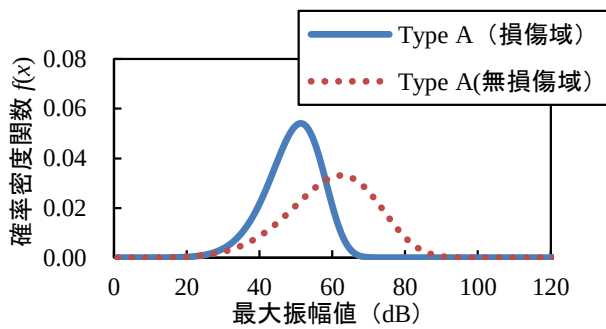


図 3 最大振幅値の分布特性 (Type A)

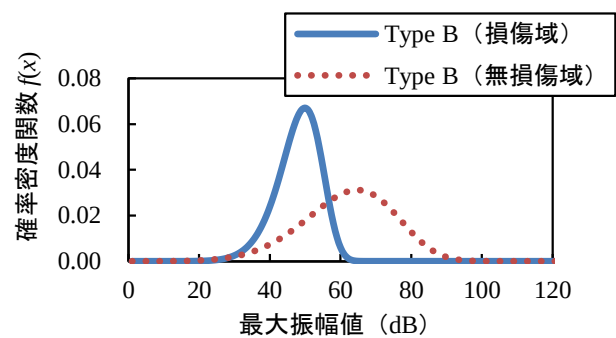


図 4 最大振幅値の分布特性 (Type B)

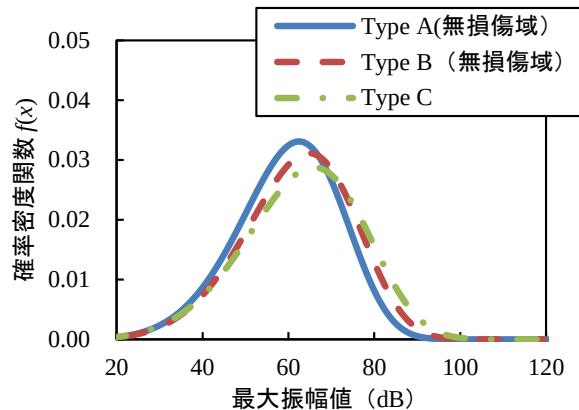


図 5 最大振幅値の分布特性

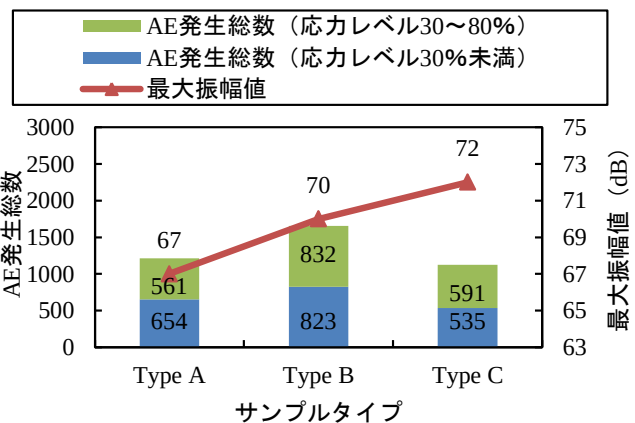


図 6 AE 発生総数と最大振幅値の関係

よそ一致しており、無損傷の領域では発生する AE の最大振幅値は同程度であったと推察される。

各サンプルの AE 発生総数と最大振幅値の関係を図 6 に示す。図中に示す最大振幅値は応力レベル 80%未満で検出した 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 を確認した。AE 発生総数では、応力レベル 30%未満で 535 から 823、応力レベル 30%から 80%で 561 から 832 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 の発生総数が異なることが確認された。

5. おわりに

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。P 波速度試験の結果、開水路側壁の気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 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。その結果、荷重初期段階に損傷域で多数

の AE が検出された。

- 3) 荷重初期段階において、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確認された。

引用文献

- 1) 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.
- 2) 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, 2007.9.
- 3) 榎学: マテリアルの力学的信頼性, 内田老鶴圃, pp. 71-79, 2006.4.
- 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, 2005.8.
- 5) 笠井芳夫: コンクリート総覧, 技術書院, pp. 416-419, 1998.6.