論文 凍害損傷の進行したコンクリートの圧縮破壊特性評価に関する研究

山岸 俊太朗*1・鈴木 哲也*2・緒方 英彦*3・周藤 将司*4

要旨:凍害に代表されるひび割れ発達を伴うコンクリート損傷は、力学的特性を変質させる。圧縮強度や弾性係数は、ひび割れの進展に伴い低下するが、その程度や特性は十分に明らかにされていない。本研究では、 凍害損傷が進行したコンクリート・コアを用いてひび割れの発達が圧縮破壊過程へ及ぼす影響を考察した。 検討手法は、圧縮破壊挙動を AE 法によりモニタリングし、AE レートプロセス解析とワイブル解析により定 量評価を試みた。検討の結果、ひび割れの発達したコンクリート・コアでは、低圧縮応力下において、ひび 割れ部位での AE の頻発と検出波特性の損傷域と無損傷域での相違を確認した。 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

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が低下する。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方法を確立 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⁾。検討の結果、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た。

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、AE レートプロセス解析とワイブル解析に 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と の関連を考察した。

2. 解析手法

2.1 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。その場合には, 確率過程論における定式化が可能である²⁾。 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。

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

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。

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

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。

$$N = C \cdot V^a \exp(b \cdot V) \tag{3}$$

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。

2.2 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 の評価方法として用いられる確率分布である³⁾。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。

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

AE の発生総数を N, 応力レベルを V とし, AE 発生確 ここで, m:形状パラメータ, x_0 :尺度パラメータである。

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (学生会員)
*2 新潟大学 自然科学系(農学部)准教授 工博 (正会員)
*3 鳥取大学 農学部生物資源環境学科准教授 農博 (正会員)
*4 鳥取大学大学院 連合農学研究科生物環境科学専攻 農修 (学生会員)

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(5)より算出さ れる。

$$F_i = \frac{i - 0.3}{n + 0.4} \tag{5}$$

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≤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⁴。

3. 実験方法

3.1 コア採取を行ったコンクリート・ブロック

コンクリート・コアの採取は、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実験場へ移 設し、コアドリルを用いて採取した。

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
 1950
 る層状ひび割れが発達していた。水中部では、1750
 目視によりひび割れは確認されなかった。

コンクリート・コアの採取に先立ち,ブロ



図-1 ワイブル分布概要図

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-2 に示す。コンクリート・ブロックの高さ 1,550mm 以上では P 波速度が大幅に低下し,気中部の P 波速度は 2,000m/s を下回っていることが確認された。

3.2 コンクリート・コア

コアの直径は ϕ 104mm である。コアの高さは 213mm から 247mm である。コンクリート・コアは, 層状ひび 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)。

コンクリート・コアのひび割れ状況を目視により観察 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の層状ひび割れが表面か ら5cm 深で確認された。Type B では0.15mmから1.4mm の層状ひび割れが表面から3cm 深で確認された。Type C は開水路側壁の水中部より採取したコンクリート・コア であり、ひび割れは確認されなかった。

3.3 コンクリート・コアのひび割れ発生状況

Type A および Type B の層状ひび割れはモルタルと粗 骨材の境界部に顕在化し、コンクリート・コアの表面と 平行に発達していた。層状に発達したひび割れはコンク リート・コアの上層部に集中し、下層部では確認されな かった。双方のコンクリート・コアは層状ひび割れの発 達した部位と損傷が顕在化していない部位の2層が並存 していることが確認された。

3.4 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



図-2 コンクリート・ブロックのP波速度分布

触子にはグリスを薄く塗布し、コンクリート・コアとの 密着性を高めた。入力超音波は 54kHz である。

3.5 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 発生源の 3 次元位置 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-3 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/mm², Type B 9.9N/mm², Type C 27.0N/mm²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。

本研究では、コンクリート・コアの圧縮破壊過程にお ける AE 発生源の3次元位置標定を実施した。図-4 はコ ンクリート・コアの損傷状況と圧縮破壊過程において計 測された AE 発生源の3次元位置標定結果である。図-4

(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,いずれの測点も 3,500m/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 3,200m/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 3,200m/s を下回る領域が確認されなかった。図-4 (c) は圧縮強度試験において計測された AE の 3 次元位置標 定の結果を 2 次元に投影したものである。

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、載荷初期から AE が頻発することが既往の研究よ り明らかとなっている⁵⁾。そこで本研究では、低応力レ ベルの 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-4(c)に明示した荷重 8.9kN、16.8kN、 25.2kN は、圧縮強度が最も低かった Type B の応力レベ ル 10%、20%、30%に相当する。ここで、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, ひび割れ損傷が顕在化してい ない Type C の場合, いずれの荷重条件においても, AE の発生はコンクリート・コアの中央部に集中しているこ とが確認された。これは, コンクリート・コアの端面と 載荷板の間で発生する摩擦の影響であると考えられる。 圧縮強度試験において, コンクリート・コアの端部と載 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 横拘束の効果はコンクリート・コア端面から離れるに従 って減少するため, コンクリート・コア端面は破壊され ない円錐状の部分が存在し, 中央部だけが破壊に至る⁶。 Type C において, 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もの考えられる。

Type A および Type B の場合,荷重 8.4kN では, コア 高さ 50mm~150mm において AE の頻発が確認されると



:損傷域



図-4 コンクリート・コアの凍害損傷状況と AE 源位置標定

ともに、損傷域においても AE が多数検出された。

損傷域は層状ひび割れの発達により,空気層を多く含む。このため,損傷域の密度は無損傷域と比較して低く, Type A と Type B はコンクリート・コアの上層部と下層 部で密度が異なると考えられる。圧縮荷重は密度の低い 損傷域で局所的に作用し,層状ひび割れの密着によって, 局所変形が発生するものともの考えられる。荷重 8.4kN の際に損傷域で検出された AE は,層状ひび割れの密着 により生じたものであると考えられる。 荷重 16.8kN および 25.2kN では, AE がコンクリート・ コアの中央部に集中している。これは, コンクリート・ コアが圧縮荷重を受けることにより, 損傷域の層状ひび 割れが密着し, コンクリート・コアが安定したことによ り, Type C と同様な破壊挙動が発生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-5(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 の最大振幅値の分布特性 を示したものである。コンクリート・コアの構成は Type Aと Type B である。ここで、図-5 (a) 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-5(b) 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-5 (a)・(b) において, 損傷域と無損傷域の相違が確認された。損傷域より検出 された AE は、損傷域の層状ひび割れが荷重を受けて密 着することにより発生した AE であると考えられる。こ れに対して,無損傷域で発生した AE は圧縮荷重により 発生したひび割れに起因するものであると考えられる。



図-5 最大振幅値の分布特性

双方は、AE の発生起因が異なるだけでなく、放出され るエネルギ量が異なるものと考えられた。このことから、 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 た。加えて、損傷域では層状ひび割れが発達しており、 AE の減衰特性が影響していると考えられた。

図-5 (c) 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。

図-6 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-7 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%~80%において発生し た AE の最大振幅値を示したものである。Type A, Type B



図-6 AE 発生確率関数 f(V) と応力レベルの関係





図-8 AE 発生総数と最大振幅値の関係

および Type C の最頻値は 66dB, 68dB および 72dB であった。ワイブル分布において明確な差は確認されなかった。

本研究では、圧縮破壊過程における AE 発生総数と最 大振幅値の関係を考察した。層状ひび割れの発達した損 傷域では、載荷初期に最大振幅値の低い AE が発生して いた。このことから、AE 発生総数と最大振幅値の関係 からコンクリート・コアの損傷状況を詳細に評価できる ものと考えられた。検討結果を図-8に示す。図中に示す 最大振幅値は荷重 25.2kN 未満で検出された 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。 同一の荷重条件において AE の発生総数は Type B, Type A, Type C の順に高いことが確認された。AE の発生総数 は圧縮強度が最も低下した Type B で高くなることが明 らかとなった。AEの最大振幅値では、Type C、Type B、 Type A の順に高いことが確認されたが、Type C と Type A の差は 5dB と小さく,明確な差は確認されなかった。こ れは、Type A および Type B に含まれる無損傷域が影響 したものと考えられる。図-5(c)より, Type A および Type Bの無損傷域と Type Cの分布範囲は同程度であっ た。このことから、荷重 25.2kN 未満では明確な相違が 確認されなかったものと考えられる。

5. おわりに

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 の観点から検討した。AE 源位置標定よ り抽出した AE パラメータをワイブル分布により解析し、 圧縮強度試験における破壊特性評価を試みた。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 よりコンクリート・コアを採取し、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,載荷初期段階に損傷域で多数の AE が検出された。
- (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確認された。
- (4) 荷重 25.2kN 未満において検出された AE の発生総 数と最大振幅値の関係を考察した。AE の最大振幅 値では、明確な相違は確認されなかったものの、 AE の発生総数は損傷の進行したコンクリートにお いて高くなることが確認された。

謝辞

本研究にあたり,独立行政法人土木研究所寒地土木研 究所上席研究員中村和正氏,総括主任研究員小野寺康浩 氏,主任研究員佐藤智氏,研究員石神暁郎氏にサンプル を提供していただいた。ここに記して謝意を表す次第で ある。

引用文献

- 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, Dec. 2010
- 2) 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, Vol.26, No.1, pp. 1791-1796, 2004.
 6
- 田邊武志,月岡美佳,重石光弘,大津政康,友田祐 ー: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
- 4) 榎学:マテリアルの力学的信頼性,内田老鶴圃,pp. 71-79,2006.4
- 5) 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
- 6) 笠井芳夫:コンクリート総覧,技術書院, pp. 416-419, 1998.6