空間統計パラメータを援用した損傷コンクリートの圧縮破壊特性評価

山岸俊太朗[1]・鈴木哲也[2*]・森井俊広[2]・河合隆行[3]

（平成25年８月25日受付）

要　約

コンクリート損傷は外部環境の影響を受けて進行し、圧縮強度試験に代表される力学特性から評価されることが多い。凍結融解損傷に代表されるひび割れの発達したコンクリートでは、十分に力学特性の観点から損傷度を評価できていないのが現状である。本論では、ひび割れ損傷の進行したコンクリート・コアの圧縮破壊挙動を三次元画像解析と AE 法により詳細評価し、ひび割れ損傷の進行が力学特性へ及ぼす影響について考察した。コンクリート・コアは凍害損傷が顕在化した開水路構造物から採取した。検討の結果、圧縮応力下の AE 発生挙動は、局所的に発達したひび割れ損傷に影響を受けることが明らかになった。定量評価には AE パラメータの有効性が確認された。ワイブル解析を利用して画像解析より求めた変形挙動と AE との関係を検討した結果、両指標の相互関連が示唆された。

新大農研報, 66(1):57-63, 2013

キーワード：ひび割れ損傷、コンクリート、圧縮破壊、画像解析、AE

はじめに

長期供用下のコンクリート構造物では、各種環境要因によりひび割れ損傷が顕在化する。構造材料の力学特性は、一般的に圧縮強度試験により評価されるが、ひび割れ損傷の進行したコンクリートの物性値を的確に評価することは困難な場合も多い。

筆者らは、X 線 CT 画像を用いて凍害損傷が進行したコンクリート・コアの断面構造を評価し、損傷コンクリートの圧縮破壊時に発生する AE（Acoustic Emission）と変形挙動との関連を考察している（Suzuki *et al.*, 2010; 山岸ら, 2013（a）; 山岸ら, 2013（b））。既往の研究により、ひび割れ損傷の進行したコンクリートでは圧縮強度の低下と低応力下での AE の頻発が確認されている。その際、ひび割れ部位での変形の促進と無損傷コンクリート・コアとの相違が確認されおり、一連の研究結果からひび割れ損傷の進行したコンクリートの詳細評価には内部構造の定量的評価と破壊挙動に基づく特性評価が不可欠であると示唆された。

本論では、X 線 CT 法を用いて損傷コンクリートをひび割れ損傷の発達した損傷域と損傷が顕在化していない無損傷域に区分し、ひび割れ損傷の進行が力学特性へ及ぼす影響について考察する。圧縮強度試験には、既往の研究において実施してきた AE 計測に三次元画像解析（Sutton *et al.*, 2009）を組み合わせた。解析的検討では、空間統計学モデルであるセミバリオグラム（鈴木ら, 2008）により、損傷域と無損傷域の相違を評価し、空間統計パラメータを用いてその特性を定量評価した。

解析手法

１．画像解析

本研究で用いた画像解析手法は、デジタル画像相関法（DICM）である。本システムは、２台の CCD カメラで撮影した可視画像をパソコンに保存し、取得した画像から変位量やひずみ分布を算出するものである。画像解析の原理は、特定の幾何学模様（本研究では黒点）の移動量を数値解析し、変位量やひずみ分布を算出するものである（Sutton *et al.*, 2009）。取り込んだ画像データは、初期状態における画像の小領域（サブセット）を一定時間後の試験画像の中から正規化された相関係数の最適値となる領域を探し出すことによってランダムパターンの移動量（変位量）を評価する。変形前後の画像間における小領域の移動量は粗探査と精密探査により特定される。粗探査では、１画素単位の計測精度で小領域の移動量を求めている。精密探査では、１画素以下の精度で移動量を求めている。本解析では小領域（サブセット）を 21 × 21 ピクセル、ステップ数を５、サンプリングレートを 100 Hz に設定した。画像解析により算出される変位量やひずみ分布には、一般にノイズが含まれている。このため、本研究ではガウス分布の関数を用いて、算出されたひずみ分布を平滑化している。

ひずみの算出は求める点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形前後の２点間の長さの変化量を求め、計測点のひずみとする解析手法である。ひずみの計算では、任意の２点間の長さを 21 ピクセルに設定した。ピクセルサイズは 0.286mm/pixel であり、約 6.0mm のひずみゲージに相当する。なお、ひずみの計測精度は 0.001% である。

一般的に、カメラのレンズには収差があり、撮影された画像はひずみを含んでいる。２台の CCD カメラで撮影を行う場合、

[1] 新潟大学大学院自然科学研究科
[2] 新潟大学農学部生産環境科学科
[3] 新潟大学災害・復興科学研究所
* 代表著者：suzuki@agr.niigata-u.ac.jp

カメラの位置合わせとレンズの収差補正が不可欠である。このため、計測前に校正プレートを用いて、位置および角度を変えながら20枚程度撮影し、カメラ画像の位置合わせと画像のひずみ補正を行った。

2．セミバリオグラムモデルによる空間物性解析

画像解析により求めたひずみ量の空間分布特性は、空間統計学のセミバリオグラムモデル（鈴木ら, 2008）により評価した。空間統計学では、データを確率場における実現値と見なし、領域 D 上の確率場 $Z(x)$ を考える。計測位置 $x_1, x_2, \cdots, x_n$ における確率変数 $Z(x_1), \cdots, Z(x_n)$ を計測データとした場合、空間統計学を適用するには、以下に示す2つの仮定が成立する必要がある。

$$E[Z(x)] = \mu$$

対象とする領域で変数の期待値が一定であること。

$$E\left[\{Z(x) - Z(x+h)\}^2\right] = 2\gamma(h) < \infty$$

ベクトル h だけ離れた2点間の変数値の差の期待値は有限であり、h のみの関数である。

2γ がバリオグラム（variogram）であり、γ がセミバリオグラムである。本論ではセミバリオグラムモデルを用いて検討を行う。セミバリオグラムを用いた空間構造評価は、環境管理や土壌物性値評価、鉱物資源評価など、時・空間的変動する物理量を定量的に評価する手法として用いられており、物理量の空間依存性に関する解析には一般的にセミバリオグラムが用いられる。これは、横軸にラグ（lag, h: サンプリング間隔）、縦軸にセミバリアンス（semi-variance, $\gamma(h)$）をとり、その関係を評価するものである（図1）。ラグ h のセミバリアンス $\gamma(h)$ は、距離 h だけ離れた全ての組み合わせ $N(h)$ の評価値間のばらつきの程度を表す。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \left[Z(x_i) - Z(x_{i+h})\right]^2 \qquad (1)$$

式（1）は、直線上を等間隔に n 点計測を行い、地点 x_i, x_i+h での計測値がそれぞれ $Z(x_i), Z(x_i+h)$ である場合は、式（2）が得られる。

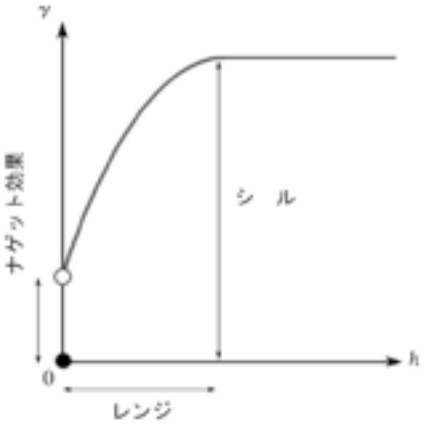


図1　セミバリオグラム概念図

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} \left[Z(x_i) - Z(x_{i+h})\right]^2 \qquad (2)$$

セミバリアンスは、ラグの増加に伴う上昇し、ある特定の距離で最大値に達する場合が多い。この最大値をシル（Sill）といい、データの内在的なばらつきを表す。シルに達する時のラグをレンジ（Range）という。レンジは空間依存性の限界を表す。換言すると、データの内挿が可能な範囲を示すものである。ラグ0におけるセミバリアンスをナゲット（Nugget）と呼び、実験誤差等の偶然のばらつきを示している。

各パラメータを解析的に求めるには、ラグとセミバリアンスの関係から最小二乗法による回帰分析により求められる。一般的には、球形モデル、指数モデルおよび直線モデル等が用いられている。本項では、本論において用いた球形モデルを示す。

$$\gamma(h) = C_0 + C\left[\frac{3}{2}\frac{h}{a} - \frac{1}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] \quad (0 < h \le a) \qquad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad (h > a) \qquad (4)$$

ここで、C_0：ナゲット、$C_0 + C$：シル、a：レンジである。

層状ひび割れの発達したコンクリート・コアは圧縮載荷過程においてひび割れ界面に応力集中が発生し、ひび割れ部位の局所変形が進行する。セミバリアンスはラグ（計測点の距離）に対する計測値のばらつきを示したものであり、載荷過程における縦ひずみのばらつきに比例し増大する。このため、ひび割れ損傷に起因する局所変形をセミバリオグラムモデルにより評価できるものと考えられる。

実験方法

1．コンクリート・コア

コア供試体の採取は、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（図2）。サンプル直径は ϕ 104mmである。コアの高さは210mmから264mm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「水中部」と水面より上部にある「気中部」に分類できる。気中部では、水中部と比較して凍害損傷と考えられる層状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よりType A、水中部よりType BとType Cを採取した。

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1,550mm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。

供試体のひび割れ構造はX線CT法によるX線画像から判断した。本研究ではX線CTスキャナの解像度を512×512ピクセルに設定し、コンクリート・コアの撮影を行った。X線CT画像では、幅0.2mm以上のひび割れを判断することが可能である。ひび割れ幅は供試体表面のひび割れをクラックスケールで評価した。Type Aでは0.05mmから2.0mmのひび割れがコア全域で確認され、Type Bでは0.15mmから0.55mmのひび割れが表面から約半分の100mm深まで確認された。Type Cにおいてはひび割れが確認されなかった。

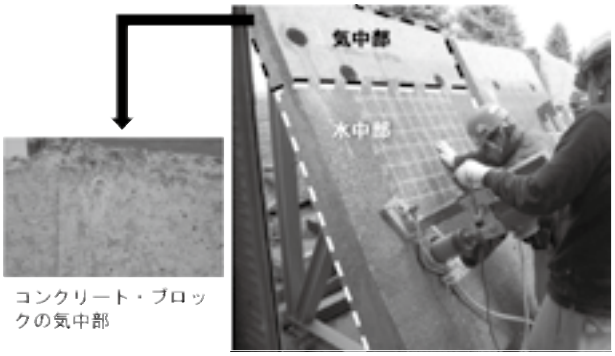


図２　コンクリート・コア採取状況

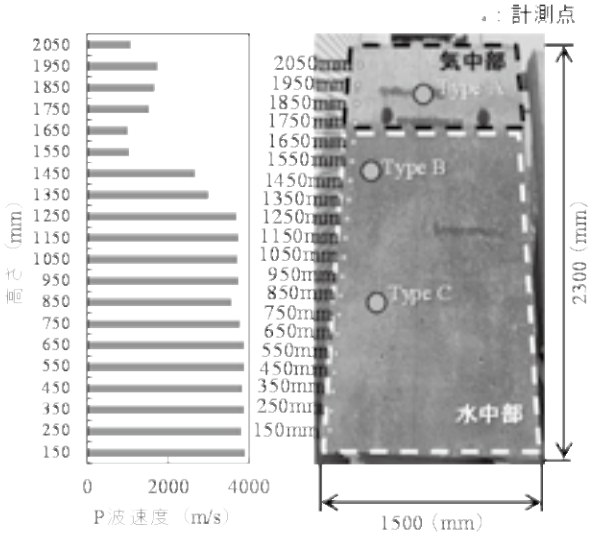


図３　コンクリート・コアのＰ波速度分布

２．圧縮応力下の AE 計測

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 共振型センサである。試験概要を図４に示す。

結果および考察

１．コンクリート力学特性

供試したコンクリート・コアの力学特性は、圧縮強度が Type A 7.0N/mm^2、Type B 3.8N/mm^2 および Type C 28.2N/mm^2 であった。開水路側壁の水中部において最も深い位置より採取した Type C が最も高く、圧縮強度が最も低い Type B の約 7.4 倍であることが確認された。Type A は Type B の約 1.8 倍であり、Type B の圧縮強度が極度に低下していることが確認された。

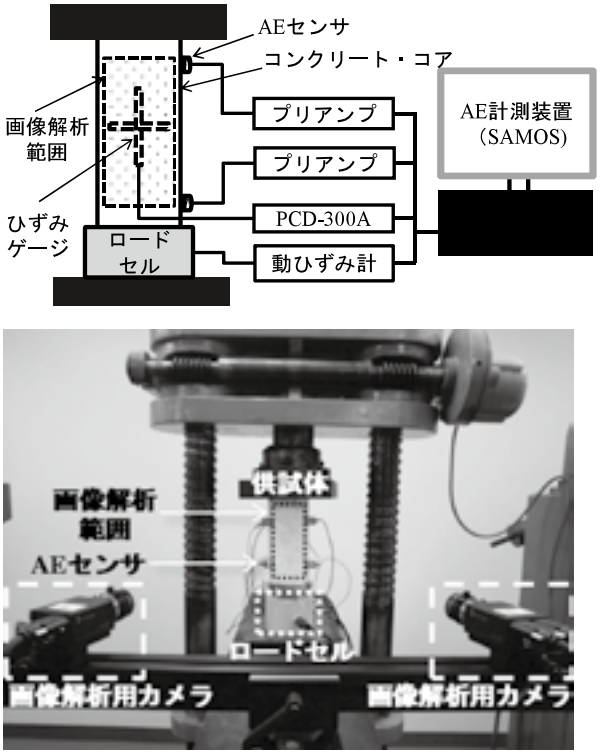


図４　圧縮強度試験概要

２．ひび割れ損傷に起因する局所変形挙動のセミバリオグラム解析

画像解析により求めた縦ひずみ分布をセミバリオグラムにより評価した。計測値のばらつきは、一般的に全計測値の散らばりと計測値の空間構造の２つに分類される。前者は、推定統計学により評価され、後者は空間統計学により評価される。本研究では、計測値のばらつきを計測点の空間的分布によるものと仮定している。このことから、圧縮載荷過程におけるコンクリートの縦ひずみのばらつきをセミバリオグラム用いて評価した。計測点概要を図５に示す。

解析画像より抽出したひずみ量と計測点の座標データを用いて、セミバリオグラムにより縦ひずみの局所化を評価した。代表例として Type B を示す。Type B はひび割れが発達している損傷域とひび割れが顕在化していない無損傷域が内在する供試体である。損傷域はＸ線 CT 画像とＰ波速度の試験結果から、ひび割れの発達とＰ波速度の低下が確認される領域とした。Type B ではコア高さ 110 ～ 200mm の領域を損傷域とした。計測点は得られた解析画像から格子状に設定した。計測点の間隔を縦 10mm、横９mm とした（図５）。計測点の間隔（ラグ）において、ラグが小さい場合、セミバリオグラムモデルによる推定が不安定となる。逆にラグが大きい場合、空間構造の評価が困難となる。Journel *et al.*（1978）の指標では、組み合わせ数 $N(h)$ が 30 以上となるラグが目安として提案されている。

Type B の損傷域と無損傷域のセミバリオグラムモデルでの解析結果を図６に示す。図６（a）は荷重 9.8kN における解析結果である。損傷域の $\gamma(h)$ の最大値（シル）は 6.2×10^{8}、無損傷域は 2.7×10^{8} であり、損傷域は無損傷域の約 2.3 倍であった。図６（b）は荷重 16.3kN における解析結果であり、損傷

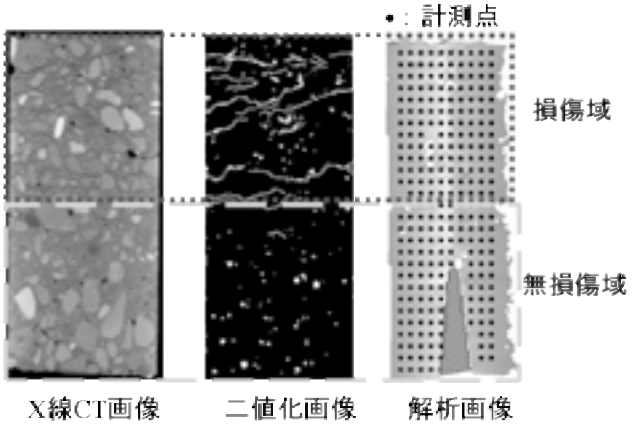


図５　セミバリオグラムにおける計測点

域のシルは 2.2 × 10^{-7}、無損傷域は 2.7×10^{-8} であり、損傷域は無損傷域の約 8.1 倍であった。荷重 26.0kN では、損傷域 9.1×10^{-7}、無損傷域 1.2 × 10^{-8} であり、損傷域は無損傷域の約 78.5 倍であった（図６（c））。いずれの荷重条件においても損傷域のシルは、無損傷域と比較して２倍以上の差が確認された。ここで、シルは縦ひずみの内在的なばらつきを示すパラメータである。

圧縮載荷過程におけるコンクリートの変形挙動は、無損傷の場合、粗骨材とモルタルの界面において局所的に進行する。これに対して、ひび割れ損傷の進行したコンクリートの場合、変形はひび割れの界面で局所的に促進される。無損傷域におけるシルの増減は、粗骨材とモルタルの界面で発生した局所変形に影響したものであると考えられる。これに対して、損傷域におけるシルの増加はひび割れ界面の局所変形に影響したものであると推察される。

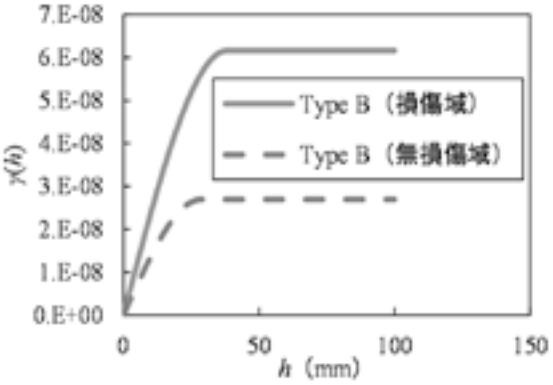
ひび割れ界面における縦ひずみのばらつきは、粗骨材とモルタルの界面で発生するばらつきと比較して大きいため、損傷域と無損傷域におけるシルの差が増大したものと考えられる。

図７は各荷重におけるセミバリオグラムモデルのシルを片対数のグラフで示したものである。図に明記した式はプロットされたデータの指数関数の近似式である。載荷荷重の増加に伴い、損傷域のシルは増加傾向にあることが確認され、無損傷域は減少傾向にあることが確認された。このことから、セミバリオグラムモデルパラメータのシルを用いることにより、コンクリートの変形特性を定量評価できるものと考えられた。

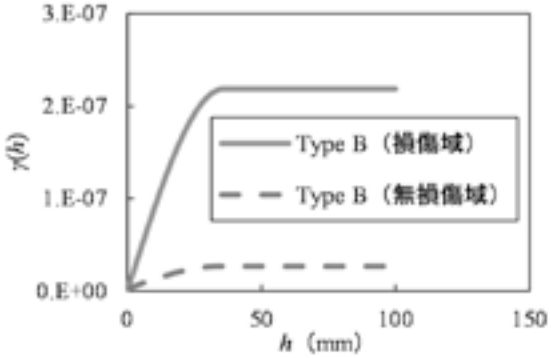
３．AE 発生挙動と縦ひずみの局所集中の関係

本試験に供試したコンクリート・コアにおいて圧縮破壊過程における局所変形が明らかになったことから、その際の AE 発生挙動を AE 発生源位置標定の観点から検討した。図８は荷重 9.8 kN、16.3 kN および 26.0 kN における AE 源位置標定の結果と縦ひずみの合成画像である。本研究では、AE パラメータである最大振幅値を位置標定の結果に反映させるため、最大振幅値を 42 ～ 59dB、60 ～ 79dB、80 ～ 99dB の３種に分類し、プロットのサイズの異なる標記を行った。

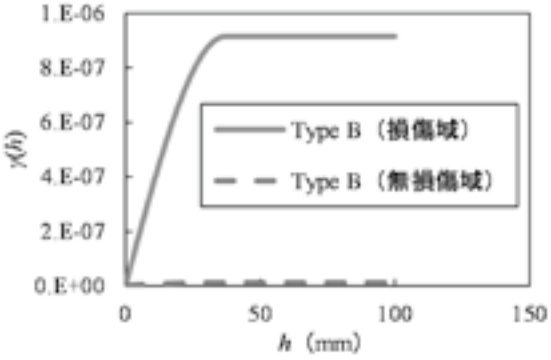
検討の結果、Type A では最大振幅値 42 ～ 59dB の AE が高頻度に検出され、コア中央部および変形部分に集中していることが確認された。載荷の進行に伴い、AE はコア中央部に集中し、ひび割れが顕在化した部位では検出される AE が比較的



(a) 荷重　9.8 kN



(b) 荷重　16.3 kN



(c) 荷重　26.0 kN

図６　縦ひずみのセミバリオグラム解析

少ないことが確認された。これは、載荷重の増加に伴い、ひび割れの進展が顕著になったことにより AE の伝播が困難になり、位置標定に必要な AE が検出できなかったものと考えられる。同様の試験結果は、渡辺らの既往の研究（渡辺ら，2002；渡辺ら，2003）においても報告されており、より詳細な評価には AE の伝播特性を明らかにする必要があるものと考えられる。

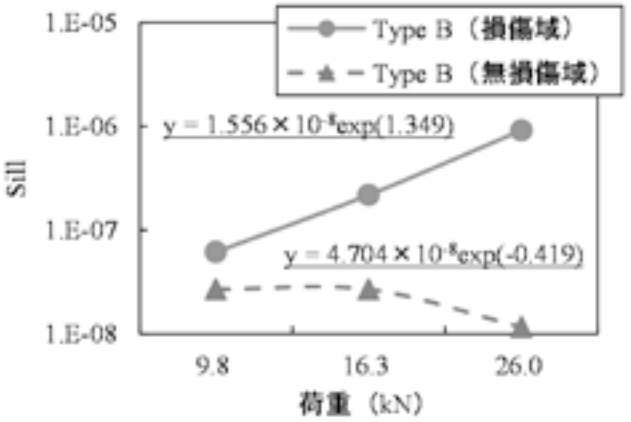


図７　シルと載荷荷重の関係

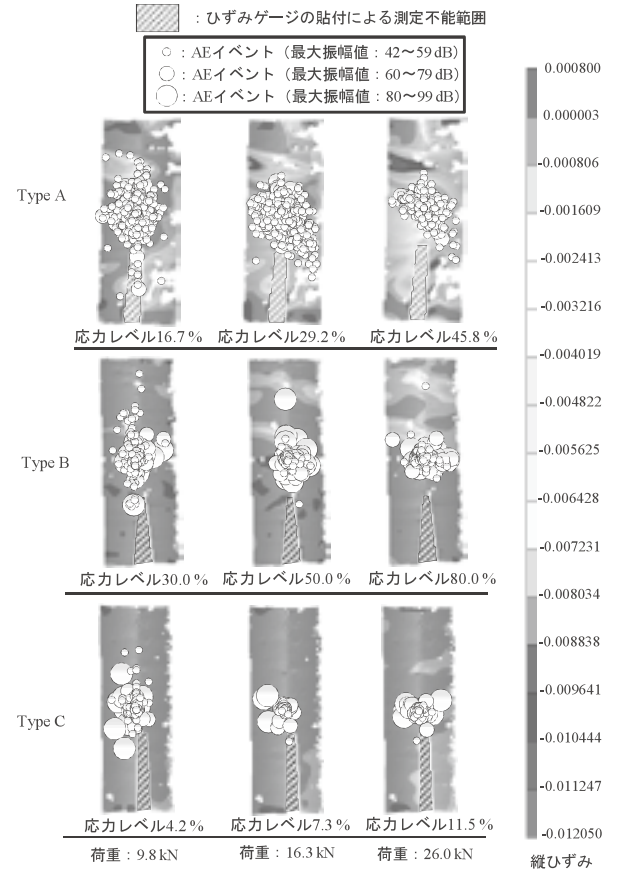
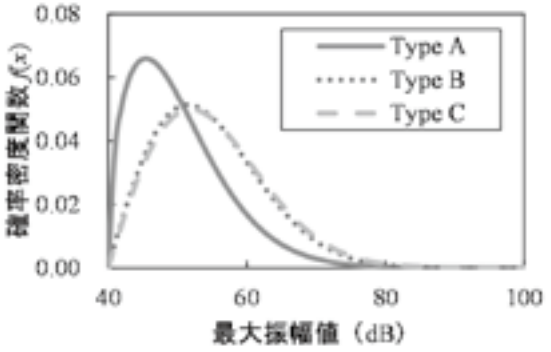
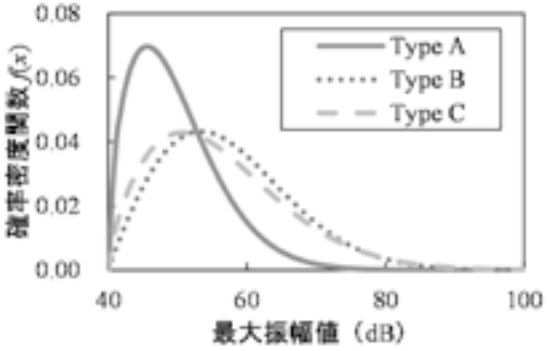


図８　AE 源位置標定と縦ひずみ分布の関係

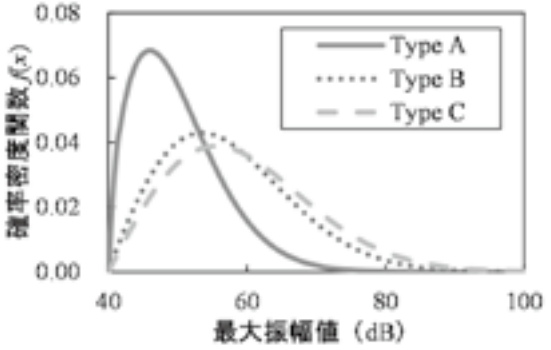
そこで、AE 源位置標定より発生位置が明確になった AE の最大振幅値に着目し、最大振幅値の特性をワイブル分布より評価した（図９）。同図より、Type A は各荷重において、分布形状およびその範囲は同程度であり、最大振幅値の約 45dB に偏在していることが確認された。Type A はコア全域においてひび割れ損傷が進行した供試体であり、検出された AE はコア



(a) 荷重　9.8 kN



荷重　16.3 kN



荷重　26.0 kN

図９　最大振幅値のワイブル分布

内部に現存するひび割れ挙動に影響を受けたものと考えられる。Type B および Type C では各荷重条件において、分布形状が類似していた。これは、Type B の無損傷域において検出された AE に影響したものと考えられる。Type A と Type B、C との間には、明確な相違が確認されたことから、ひび割れ損傷の進行が圧縮破壊過程の縦ひずみと AE 発生挙動の双方に影響を及ぼしていることが推察された。

以上のことから、長期供用下にある既存施設のコンクリート

力学特性を評価する場合、圧縮強度などの応力 - ひずみ挙動の最大値のみに着目するのではなく、圧縮載荷過程における変形挙動の空間的なばらつきと AE の発生挙動の観点から検討することで内在する損傷（微小ひび割れ）が力学特性へ及ぼす影響を定量評価できるものと考えられる。

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、画像解析と AE 計測を併用した圧縮強度試験を実施した。画像解析では載荷過程におけるコンクリートの変形挙動を計測し、その特性をセミバリオグラムモデルにより評価した。AE 計測では、AE 源位置標定より検出した AE の最大振幅値をワイブル分布により評価した。検討の結果を以下に列挙する。

1）凍害損傷の進行したコンクリート製開水路の側壁部より、ひび割れ損傷の異なる Type A から Type C の 3 種類のコンクリート・コアを採取した。ひび割れの発達したコンクリート・コアでは圧縮強度の低下が確認された。
2）圧縮載荷過程におけるコンクリートの変形挙動を CCD カメラで計測し、画像解析により縦ひずみ分布を算出した。解析の結果、層状ひび割れの発達した損傷域では、ひび割れ部位において縦ひずみが増加し、変形の局所的が確認された。
3）セミバリオグラムモデルによる縦ひずみの分布特性を評価した結果、層状ひび割れの発達した損傷域とひび割れが顕在化していない無損傷域では、セミバリオグラムの γ（h）が 2 倍以上の相違が確認された。セミバリオグラムパラメータであるシル値は、Type B の損傷域と無損傷域を比較した結果、損傷域でのシル値の増加が確認され、載荷過程における局所変形を定量的に評価できることが示唆された。
4）圧縮載荷過程における AE 発生源の位置評定を試みた。ひび割れ損傷がコア全域に発達した Type A では、最大振幅値 42 ～ 59 dB の比較的低い AE が高頻発で検出され、載荷重の増加に伴い AE の発生源はコンクリート・コア中央部に集中することが確認された。その際、変形部分では検出される AE が比較的少ないことが確認され、載荷重の増加により進展したひび割れが AE の伝播を阻害し、位置標定に必要な AE が検出できない可能性が示唆された。
5）圧縮破壊過程において検出した AE は、最大振幅値のワイブル分布により評価した結果、Type A と Type B、Type C が異なる最大振幅値分布であることが確認された。ひび割れ損傷が最も進行した Type A のワイブル分布は、最大振幅値 45 dB に偏在していることが確認され、ひび割れが顕在化していない Type C のワイブル分布との明確な相違が確認された。

参考文献

Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. W. 2009. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer: 81-118.

鈴木哲也・青木正雄・大津政康．2008．バリオグラムによる表面被覆工を施したコンクリートの熱特性評価、コンクリート工学年次論文集 , 30（2）：763-768.

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

渡辺健・岩波光保・横田弘・二羽淳一郎．2002．AE 法を用いたディープビームにおける圧縮破壊領域の推定、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.2：175-180.

渡辺健・岩波光保・横田弘・二羽淳一郎．2003．AE 法を用いた圧縮下コンクリートの破壊進展予測に関する一考察、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.2：163-168.

山岸俊太朗・鈴木哲也・森井俊広・大津政康．2013．：画像解析によるひび割れ損傷の進行したコンクリートの変形特性評価、第67回セメント技術大会講演会要旨集：58-59.

山岸俊太朗・鈴木哲也・緒方英彦・周藤将司．2013．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、コンクリート工学年次論文集、コンクリート工学会、Vol.35、No.1：385-390.

Use of Spatial Statistics Parameters for Characteristics Evaluation of Cracked Concrete in Core Test

Shuntaro YAMAGISHI, Tetsuya SUZUKI*, Toshihiro MORII and Takayuki KAWAI

(Received August 25, 2013)

Summary

Damage in concrete grows due to the environmental effects. For detailed inspection of concrete damages, unconfined compression tests have been frequently conducted. However, the mechanical properties are not good enough for practical evaluation of damage degree in cracked concrete, such as Freeze-Thawed damage. The concrete damages are affected by inner crack distribution. In this study, characteristics evaluation of compression process of cracked concrete is inspected with 3D-image analysis and acoustic emission. The core-samples were collected from a water canal of reinforced concrete, which has been strongly influenced by freeze and thawed process. The AE behavior of cracked concrete under compression was dependent on the degree of local crack distribution, and could be approximated by applying AE parameter. The results of image analysis suggested that deformation behavior of cracked concrete was localized. Thus, the deformation behavior in compression detected by 3D-analysis is clearly correlated with AE parameters identified by the Weibull analysis.

Bull.Facul.Agric.Niigata Univ., 66(1):57-63, 2013

Key words : crack, concrete, compression test, image analysis, acoustic emission

[1] Graduate School of Science and Technology, Niigata University

[2] Faculty of Agriculture, Niigata University

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

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