

論文 コンクリート損傷度評価へ及ぼす空隙特性の影響に関する研究

鈴木 哲也*1・奥津 広太*2・青木 正雄*3・大津 政康*4

要旨:本研究では、コンクリート損傷度評価へ及ぼす空隙分布の影響を明らかにすることを目的としている。コンクリート空隙は、X線CT法とコア断面の可視画像データの2値化処理に基づく評価値を併用した。コンクリート損傷度は、圧縮破壊挙動をAE法により計測し、AE発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルの関係から評価した。その結果、空隙分布の定量的評価には、X線CT法は有効であるが、詳細評価には空隙-モルタル-骨材境界のCT値特性を考慮する必要があることが示唆された。コンクリート圧縮破壊挙動は、空隙面積が発達した供試体での低応力下でのAEの頻発が確認され、損傷と破壊挙動、空隙の相互関係が示唆された。

キーワード:コンクリート損傷, 空隙構造, X線CT法, Acoustic Emission

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の長寿命化が社会的課題として着目されることに伴い、損傷を含めたコンクリート材質の定量的評価法の開発が急務な課題となっている。コンクリート損傷度評価には、空隙分布を含めたコンクリート内部構造の定量化が不可欠であるが、既往の研究では空隙分布と強度特性との関係が主に論じられているのみで、コンクリート損傷へ及ぼす影響については十分に検討されていないのが現状である¹⁾。技術的課題は、空隙構造の可視化に基づく定量的評価法を確立し、コンクリート損傷との関連を明確にすることである。コンクリート空隙の定量的評価は、ガス吸着法や水銀圧入法、光学顕微鏡法およびX線CT法などが適用されている。いずれの手法も空隙構造の可視化は可能であるが、その精度と評価範囲は手法により異なる。

筆者らは、コンクリート・コアを用いて断面の可視画像から2値化処理に基づく空隙構造の定量化と同一供試体での損傷度評価を試みている。既にAE (Acoustic Emission: AE) 法を用いたコンクリート損傷度評価法を提案しており、コンクリート空隙構造の発達と損傷との関係を衝撃荷重下での既設コンクリート構造物において検討している^{2), 3), 4), 5)}。

本論では、既往の研究において示唆されたコンクリート損傷へ及ぼす空隙分布の影響を明らかにするために、コア供試体の断面構造と物性、圧縮破壊挙動との関係から、コンクリート空隙分布特性が損傷度評価値へ及ぼす影響について考察する。コンクリート空隙構造は、X線CT法を用いてコンクリート・コアの断面構造を可視化するとともに、コア断面の可視画像の2値化処理に基づく空隙評価との比較を行う。コンクリート損傷度評価は、

圧縮応力下での破壊挙動をAE法によりモニタリングし、AE発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルの関係³⁾から考察する。これらの結果を踏まえて、コンクリート損傷と空隙分布特性との関係を検討した結果を報告する。

2. 実験・解析手法

2.1 コンクリート空隙構造の定量的評価

(1) X線CT法

本研究では、コア供試体を用いて空隙構造を評価した。空隙構造の可視化は、X線CT法およびコア断面の2値化処理画像を用いて行った。

X線CT法とは、計測対象にX線を照射させ、トモグラフィ処理により物体の内部構造を評価するものである。照射されたX線は、計測対象の物性に応じて吸収および減衰する。物体を通過したX線は、照射位置から対面側に存在するX線検出装置に記録される。CTのデータは、どの方位からどの程度のX線が吸収されたかを表す吸収率によって評価される。吸収率の単位は、一般的に水を0、空気を-1,000としたHU(Hounsfield Unit)として定義がされている。これによる透過率をCT値と呼び、CT値の定義は下式により評価される。

$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (1)$$

ここで、 μ_t : 組織のX線吸収係数、 μ_w : 水のX線吸収係数(-1)である。Kは、任意に設定できる係数であり、本研究では $K=1,000$ とした。この場合、水のCT値は0となり、空気のCT値は-1,000となる。CT値は、X線吸収係数が物質の密度に比例することから、同様の傾向を示すものと考えられる。

本研究において計測したコンクリート・コアの断面画

*1 日本大学 生物資源学部生物環境工学科 専任講師 博士(工学) (正会員)

*2 日本大学大学院 生物資源科学研究科

*3 日本大学 生物資源学部生物環境工学科 准教授 博士(農学) (正会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 工博 (正会員)



図 - 1 X線CT法によるコンクリート・コアの断面画像（昭和36年施工，構造体コンクリート）

表 - 1 X線CT計測条件

Helical Pitch	15.0
Slice Thickness	0.5mm
Speed	7.5mm/rotation
Exposure	120kW and 300mA
Recon Matrix	512×512
Field of View	100-200mm

表 - 2 配合設計（ポーラスコンクリート）

W/C (%)	混和剤率 (%)	単位量(kg/m ³)			
		W	C	G	混和剤量 (ml)
18.9	2.0	49.2	261	1,540	5.21

像を図 - 1 に示す。空隙，モルタルおよび骨材の分布構成が判別できる。計測条件を表 - 1 に示す。本研究では，後述（3）供試体）する既設構造物より採取したコンクリート・コアと実験室内で作製したポーラスコンクリートを用いて実験を行った。既設構造物より採取したコンクリート・コア（φ100mm×H200mm）は，採取後，風乾状態にした後に試験を行った。計測データは，断面画像の2値化処理を施した後に空隙分布を評価した。

コア供試体は，X線CT法による計測を行った後に，精密研磨に基づくコア断面の可視画像を取得した。

(2) 可視画像の2値化処理

X線CT法による計測後，供試体は精密研磨を表面から1.0mm深まで0.2mm幅で行った。表面から1.0mm深までの各5断面では，断面に蛍光塗料を塗りこんだ後に，ブラックライトを照射して可視画像をデジタルカメラ

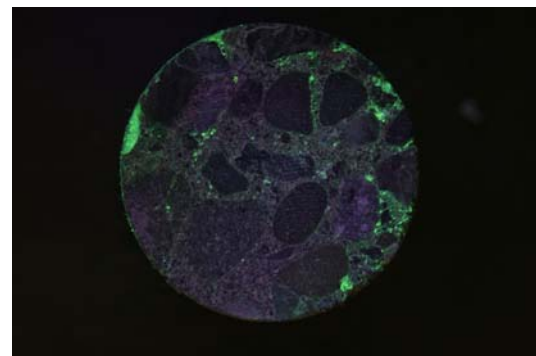


図 - 2 可視画像データ（構造体コンクリート）

により取得した（図 - 2）。取得画像は，X線CT法と同様に2値化処理を行い，空隙分布を評価した。

(3) 一軸圧縮下でのAE計測

供試体のコンクリート物性は，一軸圧縮試験により評価した。その際，一軸圧縮試験にAE計測を導入し，AE発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルの関係からコンクリート損傷を評価した。評価式は，既往の研究より提案している式(2)および式(3)を用いた。

一軸圧縮下でのAE発生挙動は，微小ひび割れの発生過程と対応しており，その定式化にレートプロセス理論が適用できる。AE発生総数 N ，応力レベル V の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，以下の式を得る。

$$f(V)dV = \frac{dN}{N} \quad (2)$$

式(2)の $f(V)$ を以下の双曲線関数と仮定する。

$$f(V) = \frac{a}{V} + b \quad (3)$$

なお， a ， b は定数である。

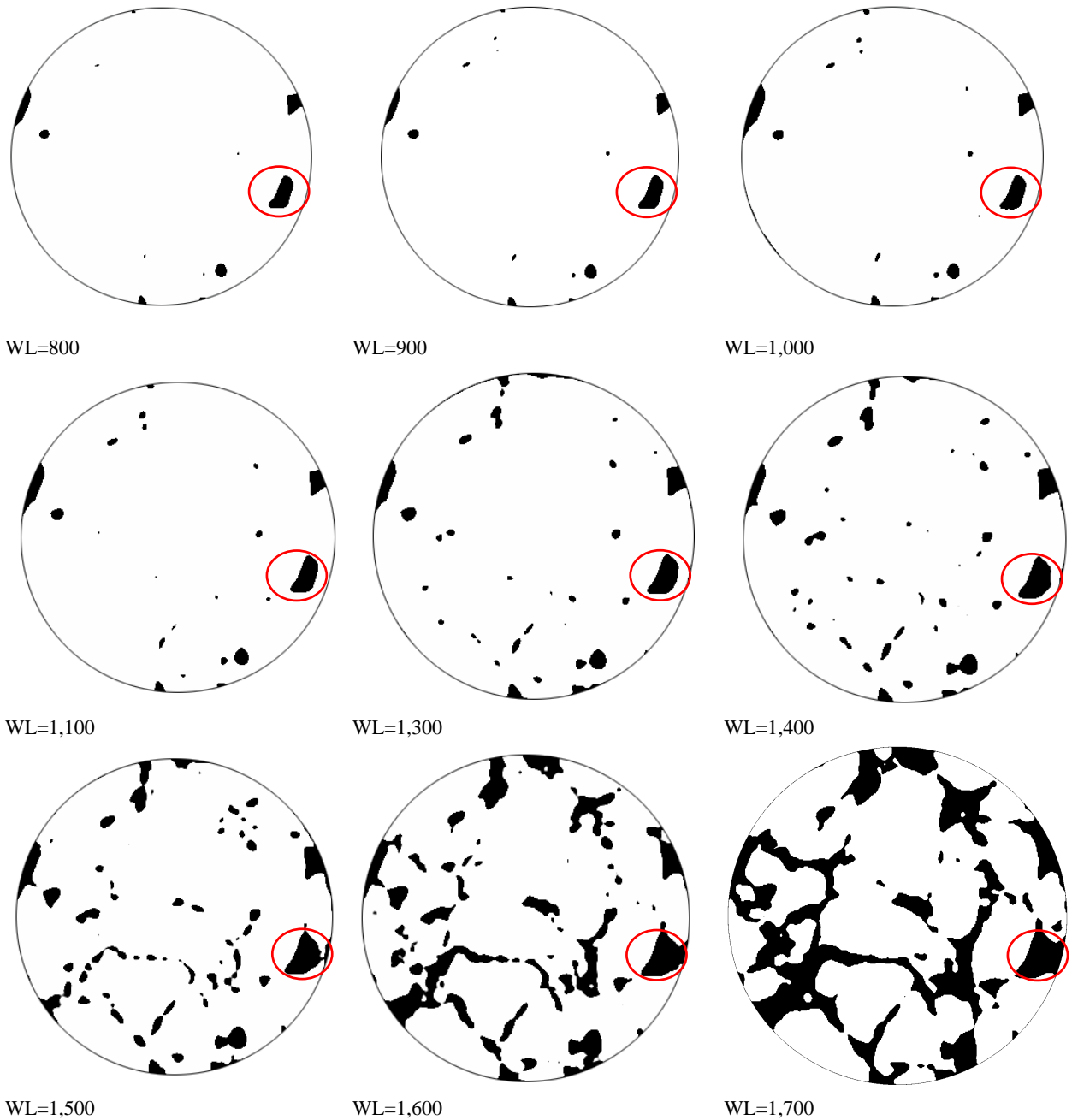


図 - 3 構造体コンクリート X 線 CT 画像 (2 値化処理後) (○ : 図 - 5 評価面積部位)

式(3)で a 値は応力レベル V での AE 発生頻度を反映し、低応力レベルの段階では a 値の正負により AE の発生確率が大きく異なるモデルになっている。 a 値が正ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで高いことを意味し、コンクリートが劣化した状態であると評価することができる。 a 値が負ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで低いことを意味し、健全な状態であることが評価できる。したがって、一軸圧縮試験に AE 測定を導入し、レートプロセス解析を適用することにより、コンクリートの破壊挙動を定量的に評価できる^{2),3),4)}。

(4) 供試体

本研究では、既設構造物から採取したコンクリート・

コア (以下、“構造体コンクリート”と記す) と実験室内で作製したポーラスコンクリートの 2 種類の供試体を用いて実験を行った。既設構造物から採取した供試体は、昭和 36 年に施工されたコンクリート水利構造物より採取したものである。コンクリート表面は、水流による磨耗が顕在化していた。ポーラスコンクリートは、表 - 2 に示す配合により実験室内で作製した。供試体の空隙率は、25%である。使用骨材は、最大寸法 20mm の碎石 (埼玉県秩父産) を使用した。

X 線 CT 計測は、両供試体で行い、AE 計測を含む一軸圧縮試験は既設構造物から採取した構造体コンクリートでのみで行った。

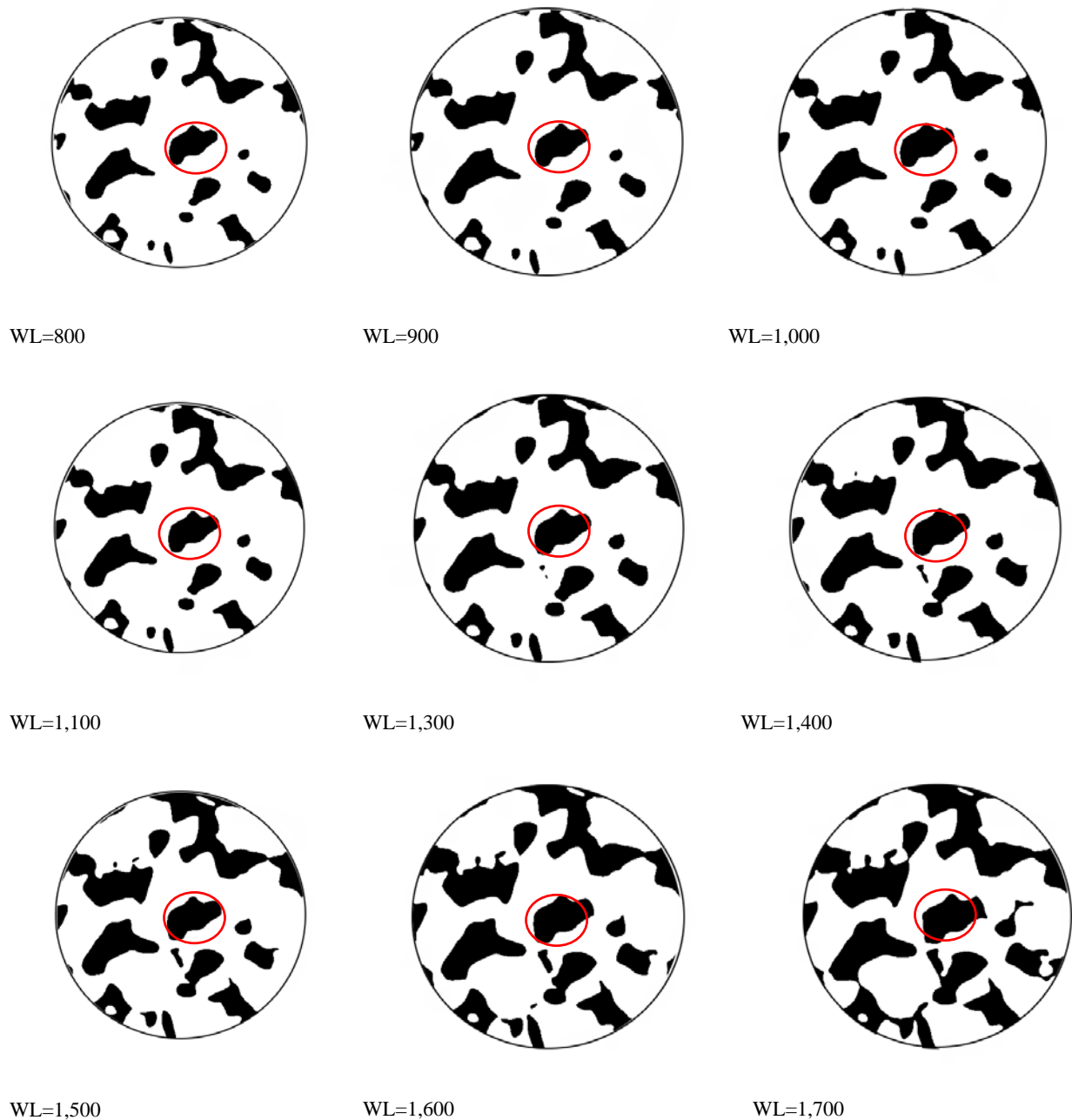


図 - 4 ポーラスコンクリート X 線 CT 画像 (2 値化処理後) (○ : 図 - 5 評価面積部位)

3. 結果および考察

3.1 コンクリート空隙評価

(1) X 線 CT 法と可視画像データの比較

X 線 CT 法により取得した断面画像に関して 2 値化処理を施した結果を図 - 3 および図 - 4 に示す。その際、X 線 CT 画像の WL (Window Level: WL) は 800~1,700, WW (Window Wide: WW) は 10 に設定した。WL とは、CT 値の中心値を示し、WW はその範囲を示す。

断面画像の CT 値の範囲は、構造体コンクリート-724~3,104, ポーラスコンクリート-1,024~2,873 であった。

可視画像 (図 - 2) と X 線 CT 画像を比較した結果、

CT 値が極端に低下する部位では、画像データにおいて実際の空隙形状との乖離が確認された (図 - 3 赤円部)。その原因には、X 線 CT 法は X 線の透過量により画像データを構築していることから、空隙近傍の X 線吸収率が空隙やモルタル部において変化が少ない場合、画像データとして識別が困難になるものと考えられる。可視画像データと X 線 CT 画像を比較した場合、構造体コンクリートでは、ウインドウレベル (WL) の増加に伴い可視画像データと X 線 CT 画像の相対比が指数的に増加するのに対して、ポーラスコンクリートでは WL に関わらずほぼ一定の値が確認された (図 - 5)。

表 - 3 コンクリート空隙面積の統計的特性 (単位: cm²)

処理・サンプル	平均値	標準誤差	中央値	標準偏差	尖度	歪度	合計	標本数
可視画像・構造体コンクリート	0.006	0.001	0.002	0.009	14.396	3.639	0.621	108
X線CT画像・構造体コンクリート	0.010	0.002	0.009	0.006	-1.147	-0.219	0.730	21
可視画像・ポーラスコンクリート	0.234	0.058	0.210	0.209	-1.322	0.524	3.046	13
X線CT画像・ポーラスコンクリート	0.211	0.071	0.129	0.246	4.289	2.021	2.533	12

*1 ウィンドウレベル (WL) : 800, ウィンドウワイド (WW) : 10

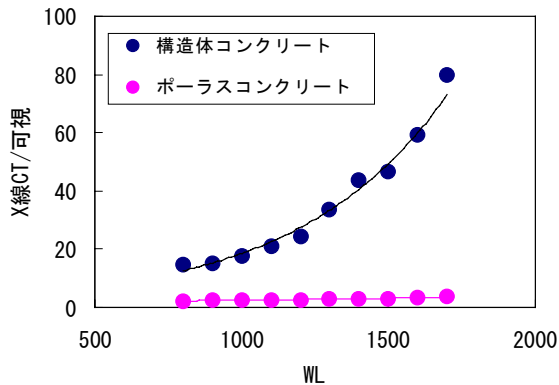


図 - 5 X線CT画像のWLが空隙面積の相対比 (X線CT画像/可視画像) へ及ぼす影響

これらのことから、コンクリート空隙構造をX線CT法により評価する場合、X線吸収率に影響を及ぼすと考えられる、空隙径やモルタル部位の損傷度がCT値に影響し、その結果としてX線CT画像を用いた空隙分布と実断面との乖離が生まれるものと考えられる。

(2) 空隙分布特性の統計指標による評価

そこで本研究では、コア供試体の計測断面全体を対象にX線CT法により計測した空隙分布と可視画像から評価したものとを比較検討した。評価結果を表-3に示す。ポーラスコンクリートでは、空隙面積の平均値が可視画像から評価したものが0.234cm²であるのに対して、X線CT法によるものは0.211cm²と誤差10.9%であった。平均値以外の統計指標は、歪度および尖度以外の指標値の類似性が確認された。構造体コンクリートでは、ポーラスコンクリートとは異なり、X線CT法での標本数が可視画像を用いたものと比較して5.1倍の差が確認された。その他の統計指標の相違は、ポーラスコンクリートと同様にX線CT画像と可視画像データとでは相違は少ない。このサンプル数の相違は、空隙-モルタル-骨材境界部位のCT値特性(部位によるX線吸収率の相違)の違いが影響しているものと考えられる。既往の研究においても、構成材料の境界部分の画像解析結果に及ぼすCT値特性の影響は指摘されている^{6),7)}。

これらのことから、X線CT法によりコンクリート空隙分布を評価する際には、空隙-モルタル-骨材の詳細評価には境界部位におけるCT値特性を考慮する必要がある

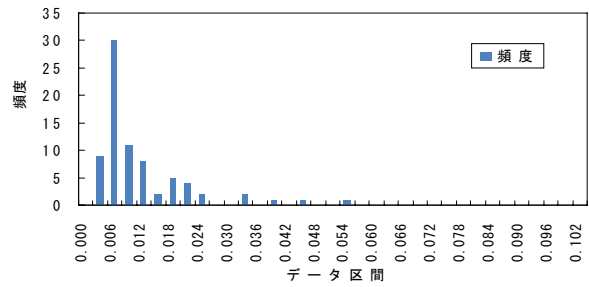


図 - 6 ヒストグラム (Case A)

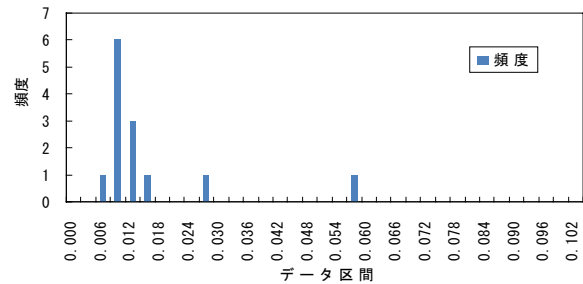


図 - 7 ヒストグラム (Case B)

あるものと考えられる。コンクリート断面の平均的な空隙面積のみの検討には、X線画像と可視画像との相違を検証(例えば図-5)することにより、取得したX線CT画像データの実空隙分布値への変換は可能になるものと考えられる。特に、ポーラスコンクリートに代表される空隙構造が発達したサンプルでのX線CT法の適用性は高いものと考えられる。

3.2 コンクリート破壊挙動に基づく損傷度評価

構造体コンクリートの空隙分布特性とコンクリート圧縮破壊挙動から評価される損傷度との関係を考察した。コンクリート損傷度は、筆者らが提案しているAE発生確率関数 $f(v)$ を用いて評価した。コンクリート断面の空隙面積の評価は、X線CT画像データ(WL:800)を用いて行った。X線CT画像の2値化処理後の空隙分布と可視画像データにより判別される空隙分布との相違は、可視画像データを規準に両データを確認した後に、空隙分布を評価した。

供試した構造体コンクリートは、圧縮強度が13.6N/mm²(Case A)と15.9N/mm²(Case B)とほぼ同一であるが、総空隙面積が4.4倍の差が認められる供試体

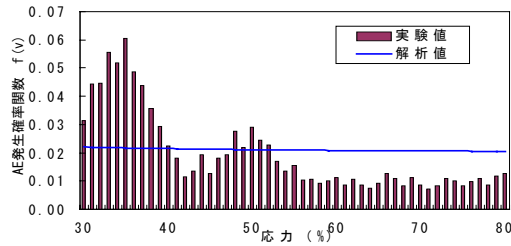


図 - 8 AE 発生確率関数と応力レベルの関係
(Case A)

を用いて評価した。評価断面における総空隙面積は、Case B では 0.195cm^2 であるのに対して、Case A では Case B の 4.4 倍にあたる 0.858cm^2 であった。

その結果、空隙面積の分布範囲は、Case A および Case B 共に類似しているが、頻出面積およびその頻度が異なっていた。Case A では、 0.006cm^2 が頻出面積となっていたが、Case B では 0.009cm^2 が頻出面積となった(図 - 6, 図 - 7)。このような空隙分布特性を有する構造体コンクリートの損傷度を圧縮応力下での AE 発生挙動から評価した結果、Case A では載荷初期における AE の頻発が確認された。これは、低応力下での材料破壊の進行を示唆するものである(図 - 8)。Case B は、Case A とは異なり、応力レベル 80% 近傍での AE の頻発が確認された(図 - 9)。このことから、圧縮強度としては約 16.9% の相違が確認されるのみであるが、圧縮破壊過程を詳細に評価した結果、両サンプルのコンクリート損傷の特性は異なっているものと考えられる。

以上より、本研究では、構造体コンクリート 2 サンプルでの検討結果であることから、結論を断定することは困難であるが、空隙分布と圧縮破壊挙動とは密接に関連し、強度特性としては十分に評価できないコンクリート損傷を AE 発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルの関係から定量的に評価できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、コンクリート損傷へ及ぼす空隙分布の影響を明らかにするために、コア供試体断面の空隙分布と物性、圧縮破壊挙動との関係から考察した。コンクリート空隙分布は、X 線 CT 法を用いてコンクリート・コアの断面構造を可視化するとともに、コア断面の可視画像の 2 値化処理に基づく空隙評価との比較を行った。コンクリート損傷度評価は、圧縮応力下での破壊挙動を AE 法によりモニタリングし、AE 発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルの関係から考察した。

その結果、コンクリート空隙構造の定量的評価には、X 線 CT 法は有効であり、詳細評価には空隙 - モルタル - 骨材境界の CT 値特性を考慮する必要があることが明らかになった。計測対象の平均的な空隙分布のみを評価

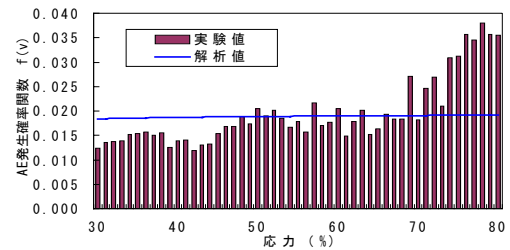


図 - 9 AE 発生確率関数と応力レベルの関係
(Case B)

するためには X 線画像と可視画像との相違を検証することにより、空隙分布が評価できることが示唆された。

空隙分布特性とコンクリート圧縮破壊挙動から評価される損傷度との関係を考察した結果、圧縮強度が類似していたとしても、コンクリート断面において空隙面積が発達した供試体では、低応力状態での AE の頻発が確認された。AE 発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルの関係から検討した結果、コンクリート損傷と圧縮破壊挙動、空隙分布の相互関係が示唆された。

これらのことから、コンクリート損傷の定量的評価には、断面構造の空隙分布特性を考慮することにより評価精度の向上が期待できるものと考えられる。

参考文献

- 1) 笠井芳夫編著: コンクリート総覧, pp.369-373, 1998.6.
- 2) 鈴木哲也, 米野現樹, 池田幸史, 大津政康: コア・コンクリートの AE レートプロセス解析に基づく損傷度評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.1, pp.95-106, 2006.2.
- 3) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 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, 2004.7.
- 4) 鈴木哲也, 渡辺弘史, 大津政康: AE 法によるコンクリートの定量的損傷度評価に関する研究, 応用力学論文集, Vol.5, pp. 809-816, 2002. 8.
- 5) Suzuki, T., Ohtsu, M., Aoki, M. and Nakamura, R.: Damage Identification of a Concrete Water-Channel in Service by AE, Advance AE, CD-R, Dec. 2007.
- 6) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X 線 CT 法を用いたコンクリート材料構成定量法化の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp.739-744, 2008.7.
- 7) Sinan Caliskan: Use of Computed Tomography in Examining the Pore Structure of Concrete Corrosion and Void in Concrete, The 11th International Conference Structural Faults+Repair-2006, June 2006.