

AE レートプロセス解析に基づく中性化コンクリートの損傷度評価

Damage Evaluation of Carbonated Concrete based on AE Rate Process Analysis

鈴木哲也*・池田幸史**・米野現樹**・大津政康***

Tetsuya SUZUKI, Yukifumi IKEDA, Genki KOMENO and Masayasu OHTSU

* 正会員 修士 (農学) 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2 丁目 39 番 1 号)

** 学士 (工学) 熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2 丁目 39 番 1 号)

*** 正会員 工博 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生科学専攻 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2 丁目 39 番 1 号)

The degradation of concrete structure occurs due to external effect as carbonation. Carbonation changes to physical and chemical qualities of concrete. The degree of carbonation is, in most cases, evaluated by carbonation depth using 1% phenolphthalein solution. However, this method is not applicable to damage evaluation. For quality assessment of carbonated concrete, it is necessary to evaluate not only the carbonation depth but also the degree of damage. Quantitative damage evaluation of concrete is proposed by applying acoustic emission (AE) method and damage mechanics. In the present study, carbonated concrete samples are examined. Samples were made by accelerated carbonation process and taken out of existing structure. AE behavior of the concrete under compression is dependent on the degree of damage, and could be approximated, applying the rate process analysis. Using Loland's model, a relationship between stress and strain is modeled, then a relation between AE rate and the damage parameter is correlated. By calculating the relative damage from the database on this relation, damage of carbonated concrete is successfully evaluated.

Key Words: AE, rate process analysis, damage mechanics, Loland's model, carbonation

1. はじめに

コンクリートの中性化は、アルカリ性の低下と鉄筋腐食との関係について数多くの議論が行われてきた。しかし、コンクリートに対する中性化の影響は鉄筋腐食にとどまらず、それ自体の物性値を変化させ耐久性に影響を及ぼすことが以前から指摘されており¹⁾、構造物の適切な維持管理や更新などの観点から中性化現象が構造体コンクリートへ及ぼす影響を定量的に評価する必要性が見直されている。

構造体コンクリートの中性化は、表面より進行するが、コンクリート材料は完全な均質体ではなく不均一な多孔質構造であることから、部位によりその度合いは異なる。中性化の進行は、コンクリート材質の不均一性をさらに増加させるとともに、中性化領域での変質を進行させる。この場合、作用する平均応力が低くても応力集中などにより微視的な破壊が生じるものと考えられる。

このことから、中性化による変質作用を受けたコンクリートの材質評価には、圧縮強度などの材料特性を平均化したもののみでなく、破壊過程に着目した検討が必要であるものと考えられる。

筆者らは、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission; AE) 法および損傷力学を応用して、コア供試体を用いたコンクリートの定量的損傷度評価について検

討している^{2),3),4)}。これは、コンクリートの圧縮応力下での AE 発生挙動を AE レートプロセス解析により近似し、応力-ひずみ挙動から損傷パラメータをローランドモデルにより評価するものである。既に水中凍結融解処理 (JIS A 1148) や、既設構造物から採取したコア供試体を用いて損傷の進行と評価値との関係を確認している。

本研究では、中性化の進行がコンクリートに及ぼす影響を物性値および空隙構造の観点から明らかにし、中性化深さの異なる供試体を用いて AE 法による定量的損傷度評価を試みた。供試体は、促進中性化処理したものと、中性化の進行した既設構造物より採取したものの 2 種類である。定量的損傷度評価は、コンクリートの圧縮破壊過程を AE レートプロセス解析により評価し、応力-ひずみ曲線から力学特性を算出して行なった。空隙構造は水銀圧入法により評価し、中性化の進行がコンクリートに及ぼす影響を考察した。

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いる。微小ひび割れは、漸増的に発生・集積され、主破壊となり、耐力力の低下をもたらす。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よる取り扱いが可能であり、本研究では一軸圧縮下のAE発生挙動の定式化にレートプロセス理論⁵⁾を適用した。

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。

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

式(1)の $f(V)$ を以下の双曲線関数と仮定する。

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

なお、 a 、 b は定数である。

式(2)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。AE発生確率関数 $f(V)$ と a 値の関係を図-1に示す。 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、構造物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、構造物が健全な状態であることが評価できる。

式(1)および(2)より、AE発生総数 N と応力レベル V との関係を以下の式により近似できる。

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

なお、 C は積分定数である。

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、コンクリートの損傷度を定量的に評価することができる。

2.2 ローランドモデル⁶⁾

損傷力学における損傷変数 Ω は弾性係数の相対的变化として、以下のように定義される。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (4)$$

ここで、 E ：コンクリートの弾性係数

E^* ：損傷のないと想定された場合の弾性係数である。ローランドは、損傷変数 Ω と一軸圧縮下でのひずみとの関係を以下のように仮定している。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (5)$$

なお、 Ω_0 ：一軸圧縮試験開始時点での初期損傷度

A_0 、 λ ：材料固有の定数

式(4)および(5)より以下の式が得られる。

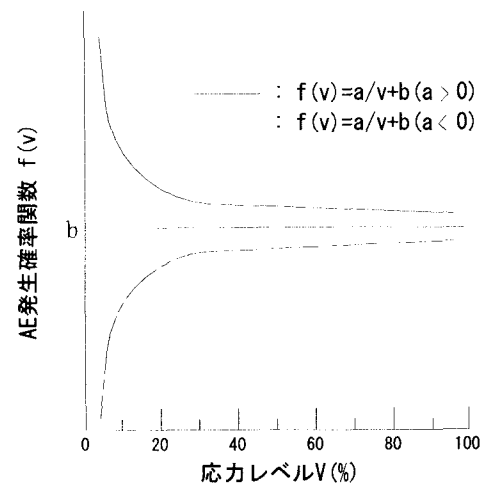


図-1 AE発生確率関数と a 値の関係

$$\begin{aligned} \sigma &= E^* (1 - \Omega_0 - A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \\ &= E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし

$$E_0 = E^* (1 - \Omega_0) \quad (7)$$

2.3 データベース構築に伴う弾性係数の推定

本研究では、AE発生挙動をレートプロセス解析により、応力-ひずみ曲線をローランドモデルにより近似した。定量的損傷度評価では、これらの結果から健全時の弾性係数 E^* を推定し、初期接線弾性係数 E_0 との相対比である E_0/E^* を求めた。

その際、既設構造物から採取された少数の供試体でも検討手法が適用できるよう、計測結果のデータベース(250サンプル)を構築した⁷⁾。

コンクリートの圧縮特性を示すものとして「AE発生総数-応力レベル」の関係、「応力-ひずみ」の関係に着目した。一軸圧縮下での弾性係数の変化 $\ln(E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析の a 値との関係を図-2に示す。一軸圧縮下での弾性係数の低下 $E_0 - E_c$ は式(4)より、

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^* (1 - \Omega_0) - E^* (1 - \Omega_c) \\ &= E^* (\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 E_0 ：初期接線弾性係数

E_c ：終局時の割線弾性係数

である。

図-2中の近似式より、以下の式を得る。

$$\ln(E_0 - E_c) = \ln[E^* (\Omega_c - \Omega_0)]$$

これを直線近似すると、

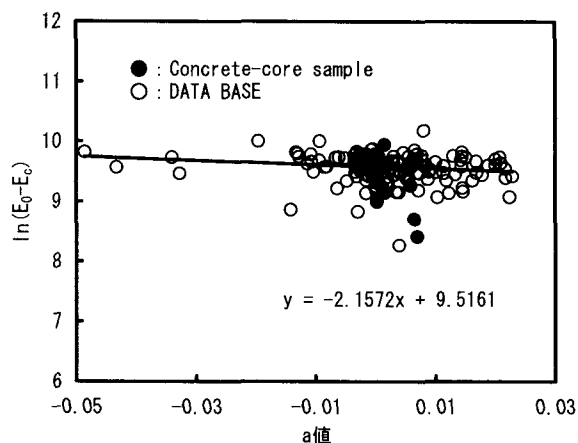


図-2 $\ln(E_0 - E_c)$ と a 値との関係

$$\ln(E_0 - E_c) = aX + Y \quad (9)$$

ここで、 $E_0 = E^*$ のとき、 $\Omega_0 = 0$ 、 $\alpha = 0$ と仮定すると、式 (10) が得られる。これにより、健全時の弾性係数 E^* を AE レートプロセス解析結果から推定することが可能となる。

$$E^* = E_c + e^Y \quad (10)$$

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体は、促進中性化処理を行ったものと、既設構造物より採取したものの 2 種類である。供試体の概要を表-1 および表-2 に示す。

促進中性化処理を行ったコア供試体（径 10cm、高さ 20cm）は、 CO_2 濃度を一定にした条件下で作製した。セメントは、普通ポルトランドセメントと高炉セメントの 2 種類である。

既設構造物からは、同一構造物から径 5cm、高さ 10cm のコア供試体を 10 本採取した。これらは黒ボク土中に埋

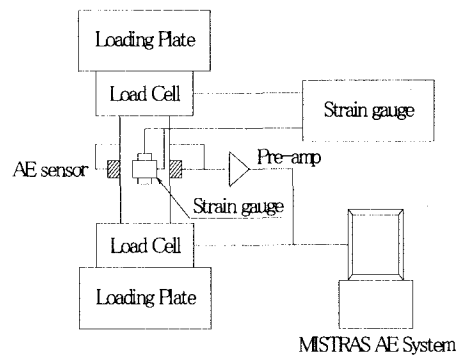


図-3 AE 計測概要

設されており、施工後 36 年が経過したものである。中性化深さは、6mm から 108mm と部位による相違が大きいことが確認された。圧縮強度や弾性係数についても、中性化深さ同様、採取部位による相違が顕著に認められた。

3.2 促進中性化試験

促進中性化処理は、JIS A 1153(2003)を準じて行った。 CO_2 濃度は 10% である。供試体は 28 日間水中養生した後、上下面をエポキシ樹脂によりシールし、乾燥後、 CO_2 に暴露した。暴露期間は 14、28、42 日の 3 種類である。コア供試体は、規定の日数まで促進中性化処理したものから一軸圧縮試験を実施した。一軸圧縮試験後、中性化深さを 1% フェノールフタレインを用いて断面方向に測定した。

3.3 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験時の AE 計測システムを図-3 に示す。供試体の上下面にはシリコングリースを塗布し、テフロンシートを挿入することによって摩擦により発生する AE を低減させた。AE 計測条件は、広域帯型（共振周波数：約

表-1 コンクリートの示方配合（促進中性化処理）

セメント	粗骨材の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				AE 剤 (cc)	スランプ (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G			
普通ポルトランドセメント	20	55	43.0	182	331	746	1204	133	7.9	6.3
高炉セメント	20	55	43.1	170	310	750	1005	128	8.7	4.0

表-2 既設構造物から採取したコア供試体の力学特性

採取位置	サンプル (10cm×5cm)	圧縮強度 (N/mm^2)	初期接線弾性係数 (GPa)	中性化深さ (mm)
敷設後 36 年経過した 無筋コンクリート	10 本	8.7~20.4 (13.3)	8.7~26.2 (17.7)	6~108 (68)

(*1) 圧縮強度、初期接線弾性係数、中性化深さのカッコ内数値は 10 サンプルの平均値を示す。

1 MHz) の AE センサを使用した。周波数帯域は 10kHz～300kHz である。検出された AE 信号は、プリアンプ 40dB、メインアンプ 20dB の計 60dB で増幅した。また、AE 発生数の計測には、しきい値を 42 dB に設定し、不感時間は 2msec とした。なお、AE 計測は、縦横ひずみと同様に 2 チャンネルで実施した。

4. 実験結果および考察

4.1 コンクリート物性値へ及ぼす中性化の影響

(1) 圧縮強度の変化

コンクリートは、中性化反応に伴い C-S-H や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が CaCO_3 に変質する。その際、分子量は、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が 74 に対して CaCO_3 が 100 であり、比重は 2.24 と 2.71 である。この結果、コンクリートの空隙構造が影響を受け力学特性が変化する。

力学特性の中でも圧縮強度は、既往の研究から促進中性化処理の結果、増加することが報告されており^{8),9)}、本研究においても同様の傾向が確認された。 CO_2 の暴露日数と圧縮強度の関係を図-4 に示す。普通ポルトランドセメントでは、促進中性化処理日数の経過に伴い、42 日間に 40% の増加が認められた。同様の傾向は、高炉セメントを用いた供試体においても確認された。これらの結果は、中性化に伴う空隙率の低下が一因であると考えられる。水銀圧入法による細孔径分布試験結果を図-5 に示す。サンプルは、促進中性化後、供試体の表面、表面から 2.5cm、中心の 3 点から採取した。図-5 に示す空隙率は、3 点の平均値である。この結果、 CO_2 暴露日数の増加に伴い、空隙率 (= 細孔容積 × かさ密度 × 100) の減少が確認された。普通ポルトランドセメントでは、促進中性化処理 42 日間に 4.9% 減少した。高炉セメントでは 3.7% 減少した。

(2) 応力 - ひずみ挙動へ及ぼす影響

コンクリートの圧縮強度は、載荷力の最大値を供試体断面で割った平均値である。中性化コンクリートの応力 - ひずみ曲線を非中性化コンクリートと比較すると、応力上昇域での剛性の低下および最大応力の増加が認められた。応力 - ひずみ曲線の一例を図-6 に示す。圧縮強度の増加は前述の通り、供試体全体の空隙率の減少により生じたものと考えられる。しかし、ひずみ量の増加を伴う剛性の低下は、空隙率のみではなく、コンクリートが CO_2 に暴露されることに伴う収縮作用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、中性化反応に伴い C-S-H や $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が CaCO_3 に変質することにより脱水作用を伴う収縮現象が報告されている¹⁰⁾。本研究においても、同様の現象が促進中性化した供試体において発生したものと考えられる。加えて、 CO_2 がコンクリートへ浸透した場合、 CaCO_3 の析出および収縮作用により、空隙率の減少のみではなく、細孔直径別の空隙構成にも影響を受けているものと考えられる。細孔直径別の空隙割合 (=

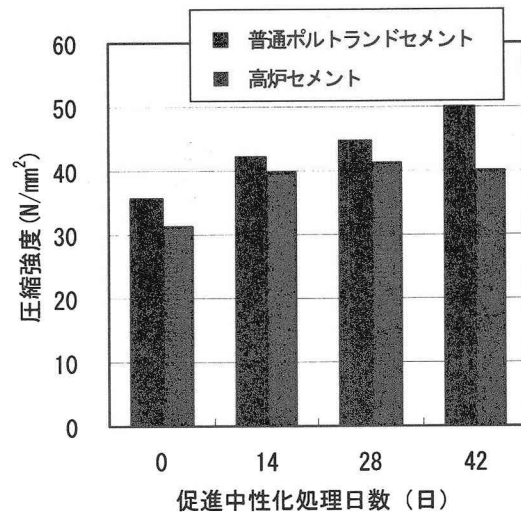


図-4 CO_2 暴露日数と圧縮強度の関係

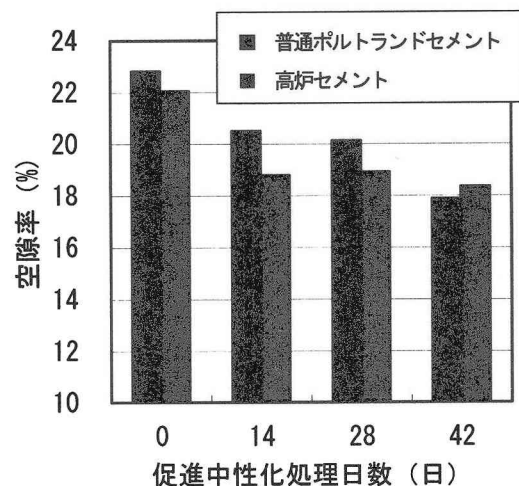


図-5 CO_2 暴露日数と空隙率の関係

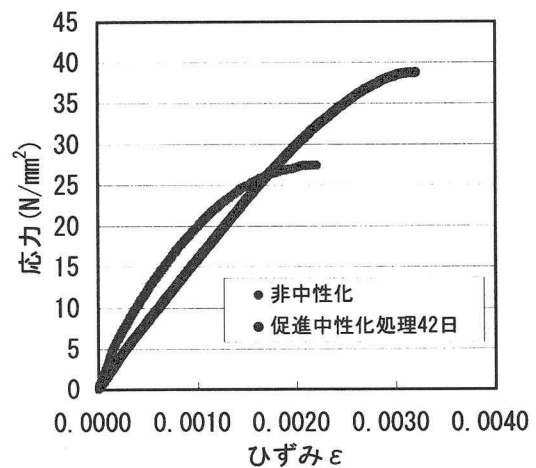


図-6 応力 - ひずみ曲線

細孔直径別空隙率 / 全空隙率) を 42 日間促進中性化したものと、水中養生直後のもの (非中性化コンクリート) で比較すると、中性化に伴い細孔空隙の減少が確認できる (図-7)。28 日間の水中養生を行った供試体では、中性化コンクリートと比較して $0.013\mu\text{m}$ 以下の細孔空隙が顕著であることが確認された。これに対して、中性化コンクリートでは、 $0.03\mu\text{m}$ 以上の空隙の占有率が高いことが確認された。

図-5 および図-7 の結果から、コンクリートの中性化は、微細空隙の減少に伴う空隙率の低下を引き起こしていることが確認された。これは、 CO_2 が H_2O に溶解し、 HCO_3^- になることにより中性化反応が進行することに起因している。空隙中に水分を保持できる微細な空隙ほど中性化が進行し、細孔の閉塞が進行するものと考えられる。

ここで、応力-ひずみ曲線から導かれる圧縮強度と初期接線弾性係数の関係から中性化コンクリートの力学特性を考察する。コンクリートは、中性化反応に伴い、圧縮強度は増加するが (図-4)、圧縮応力下での剛性は低下する (図-6)。図-8 に中性化コンクリートの圧縮強度と初期接線弾性係数の関係を示す。中性化が進行した場合、圧縮強度は増加するが、ひずみ量の増加による初期接線弾性係数の低下が普通ポルトランドセメントと高炉セメントの双方で確認された。

以上の結果から、中性化の進行は、コンクリート材質の不均一性を増加させるとともに、中性化領域で収縮作用を伴う微細空隙の減少を引き起こす。この場合、作用する平均応力が低くても空隙構造の相違による応力集中や材質の変化に伴う微視的な破壊が発生するものと考えられる。そこで本研究では、中性化コンクリートの破壊過程を AE 法でモニタリングし、定量的損傷度評価を試みた。

4.2 AE レートプロセス解析結果

圧縮応力下の AE 発生挙動は、レートプロセス解析により定式化した。レートプロセス解析では、実測値から応力レベル 30%~80% の範囲を対象とした。これは、载荷初期に端面に発生する応力レベル 30% 以下での AE と、80% 以上の終局付近で加速度的に発生する AE は、劣化に直接関連するとは考えにくいためである。

実験結果である AE 発生確率関数と応力レベルとの関係を図-9 に示す。本図は促進中性化処理 42 日後の結果である。中性化コンクリートでは、応力レベル 30~40% の段階 (低応力時) から AE が頻発し、応力レベル 70~80% の段階と比較しても両者の相違が 2 倍程度であることが確認された。これは、中性化に伴い空隙構造と材質の変化が低圧縮応力下での微小クラックの発生を誘発した結果であると考えられる。加えて、鈴木ら¹¹⁾により指摘されているように、中性化の進行は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ のみではなく C-S-H も分解も引き起こすことから、粗骨材とモルタルと

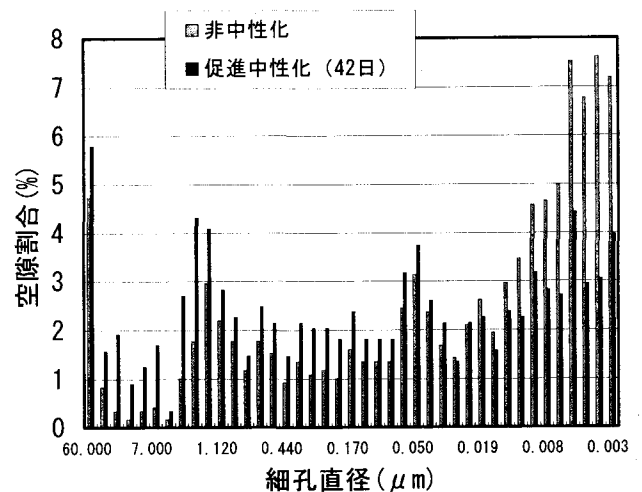


図-7 細孔径分布と空隙割合の関係

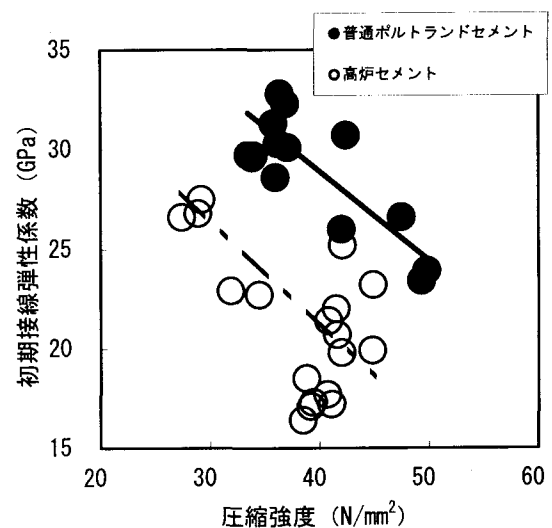


図-8 圧縮強度と初期接線弾性係数の関係

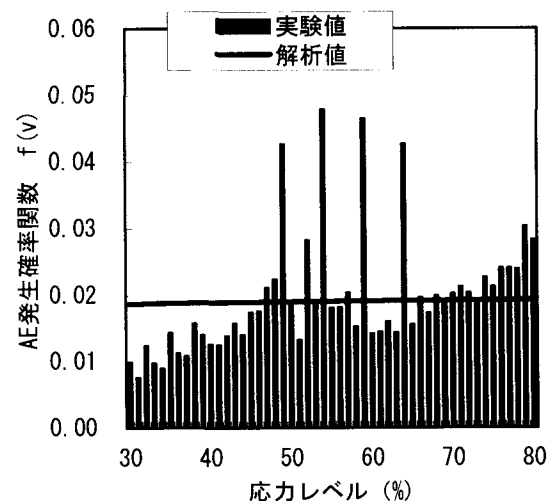


図-9 AE 発生確率関数と応力レベルの関係

の界面において結合力の低下も低応力下でのAE発生挙動の一因として考えられる。

4.3 弾性係数の推定に基づく相対損傷度評価

(1) 相対損傷度評価値の実験値と解析値の比較

そこで、本研究では、弾性係数の推定に基づく中性化コンクリートの定量的損傷度評価を試みた。

損傷力学における初期損傷度 Ω_0 は、式(4)に示す通り、コンクリートの損傷に関する定量的な指標として定義されている。本研究では、初期接線弾性係数 E_0 （実験値）とAEレートプロセス解析結果から推定した E^* の相対比である E_0/E^* を求めることにより、各供試体条件の相対的な損傷度評価を行なった。相対損傷度評価の実験値と解析値の関係を図-10に示す。図中の実験値とは、健全時の弾性係数として促進中性化処理を行っていない供試体の実験結果（応力-ひずみ曲線）から算出した初期接線弾性係数を用いたものである。解析値とは、健全時の弾性係数をデータベース（図-2）の活用により推定したものである。本図より、実験値と解析値が良い対応関係にあることが分かる。

このことから、劣化コンクリートや建設当初の弾性係数が不明な構造体コンクリートなどで、弾性係数の推定に基づく相対損傷度評価の可能性が示唆されたものと考えられる。

(2) 中性化コンクリートの相対損傷度評価

中性化コンクリートの相対損傷度評価の結果を図-11および図-12に示す。相対損傷度評価は、普通ポルトランドセメント、高炉セメント共に CO_2 暴露日数の増加に伴い、評価値の低下が確認された。中性化の進行したコンクリートは、圧縮応力下でひずみ量が増加し、微小クラックの発生に伴う損傷の進行が、AE発生確率関数の解析結果（図-9）に加えて、本結果からも示唆された。

中性化深さと相対損傷度との関係を図-13に示す。中性化深さが5mm未満の場合、相対損傷度評価は1.0以上になりコンクリートの損傷は確認されなかった。これに対して、中性化深さの増加に伴い、相対損傷度評価が低下し、損傷の進行が確認された。この結果から、構造体コンクリートにおいて頻繁に確認される、中性化深さ5mm程度の表面部の中性化では、損傷を受けているとは考えられない。しかし、中性化が極度に進行した場合、C-S-Hの分解などを引き起こしながら損傷が進行するものと考えられる。

以上のことから、中性化が進行したコンクリートの材質評価では、圧縮強度のみでは十分ではないものと考えられる。より詳細な損傷度評価には、コンクリートの破壊過程に着目した検討が必要であり、その際にはAEレートプロセス解析に基づく相対損傷度評価が有効であると考えられる。

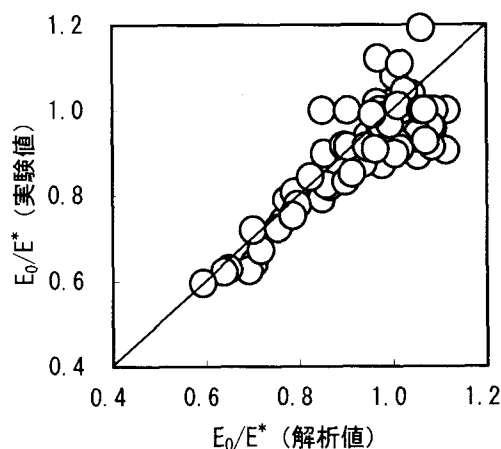


図-10 相対損傷度評価の実験値と解析値の比較

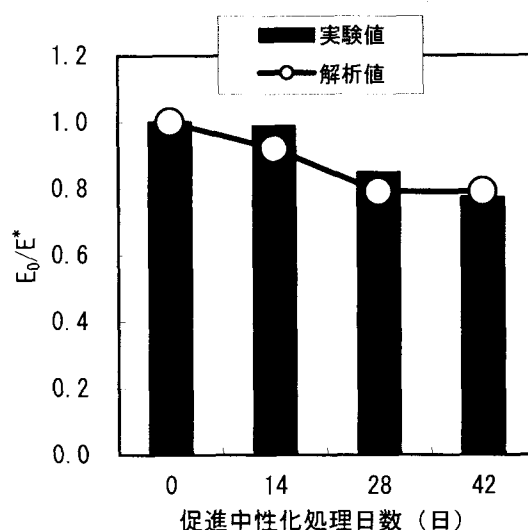


図-11 相対損傷度評価（普通ポルトランドセメント）

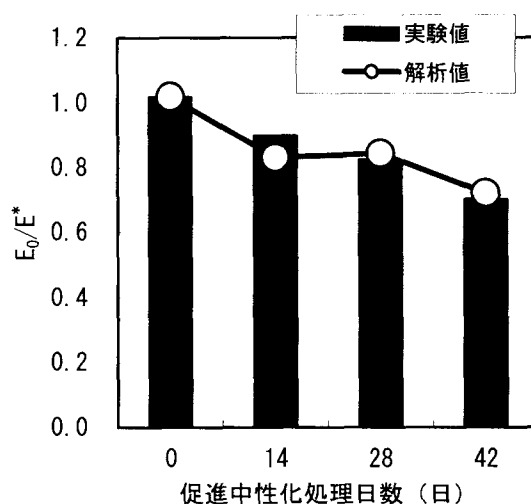


図-12 相対損傷度評価（高炉セメント）

4.4 既設構造物への相対損傷度評価の応用

(1) 相対損傷度評価と圧縮強度の関係

促進中性化処理を施したコンクリートの損傷度を定量的に評価できる可能性が実験段階で確認できたことから、本研究では、中性化の進行した構造体コンクリートの相対損傷度評価を試みた。供試体の概要は前項の表-2に示す。

既設構造物では、建設当初の弾性係数 (E^*) が不明な場合が多い。本検討では、健全時の弾性係数をデータベース (図-2) を活用して推定した。相対損傷度評価と圧縮強度の関係を図-14 に示す。供試した 10 試料で評価値が 0.48~1.25 を示し、9 試料で 1.0 を下回った。相対損傷度評価は、圧縮強度の低い供試体ほど評価値が小さくなる傾向を示し、両者がほぼ同様の挙動を示した。これより、圧縮強度に加えて、相対損傷度評価を導入することにより強度のみによる評価を補うデータが得られるものと考えられる。

(2) 相対損傷度評価と中性化深さの関係

中性化コンクリートでは、前項の促進中性化試験の結果から、中性化深さと相対損傷度評価とが逆比例の関係にあることが明らかになった (図-13)。

構造体コンクリートの中性化深さと相対損傷度評価の関係を図-15 に示す。本図より、促進中性化処理を施した供試体同様、中性化深さの増加に伴い、評価値の低下が認められた。しかし、本結果は、10 試料での結果であることから、より詳細な検討にはサンプル数の増加が必要であると考えられる。

(3) 圧縮強度と初期接線弾性係数の関係

以上のことから、中性化が進行した構造体コンクリートにおいて、相対損傷度評価の低下が確認された。

そこで、圧縮強度と初期接線弾性係数の関係から、中性化の進行した構造体コンクリートの力学特性について考察する。図-16 に圧縮強度と初期接線弾性係数の関係を示す。この結果、構造体コンクリートでは、促進中性化処理を行った供試体とは異なり、圧縮強度と初期接線弾性係数の間に正比例の関係が確認された。この相違は、構造体コンクリートの圧縮強度が平均 13.3N/mm^2 と非常に低いことが一因であると考えられる。加えて、中性化の進行が初期接線弾性係数の低下を引き起こすのではなく、空隙構造の変化の結果として、弾性係数などの力学特性が影響を受けているものと考えられる。

したがって、コンクリートに対する中性化反応の影響は、材質変化に伴う空隙構造の変質の程度により異なるものと推察される。

一般的に多孔質体の強度は、空隙構造に影響される。また、コンクリートの空隙構造は、前述の通り、中性化反応により影響を受ける。このことから、構造体コンク

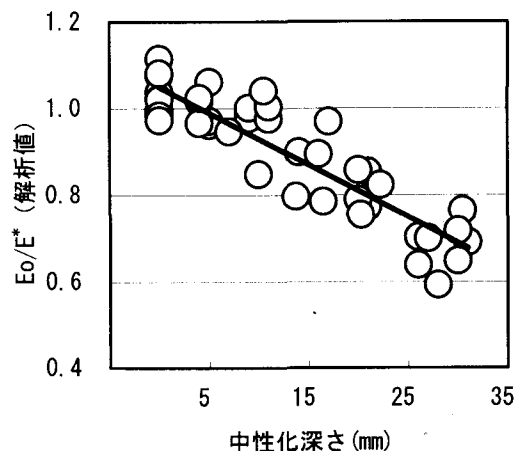


図-13 中性化深さと相対損傷度評価の関係

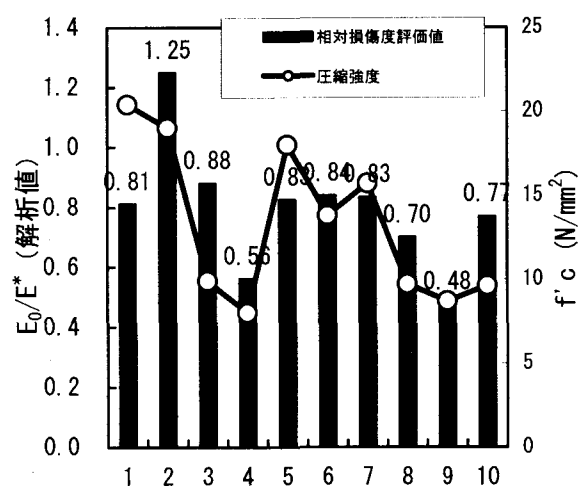


図-14 構造体コンクリートの相対損傷度評価と圧縮強度の関係

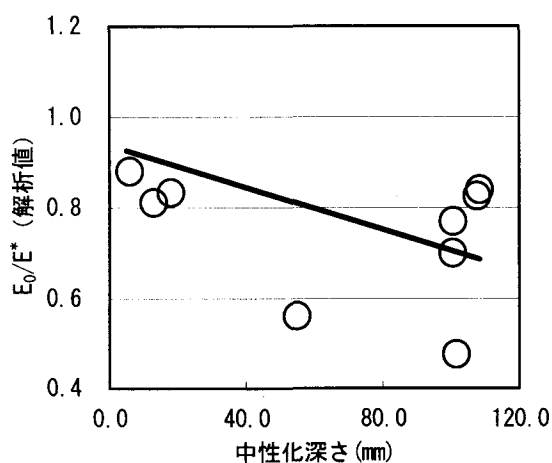


図-15 構造体コンクリートの中性化深さと相対損傷度評価の関係

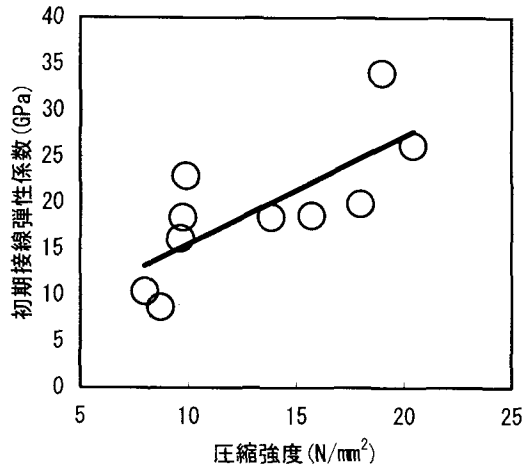


図-16 圧縮強度と初期接線弾性係数の関係

リートでは、中性化反応により材質の変化が引き起こされるのは明らかであるが、物性値へ及ぼす影響については促進中性化試験結果を即座に適用できるのではなく、評価対象の示方配合や設置環境などを考慮する必要があることが、本研究結果から明らかになった。

5. まとめ

本研究では、AE 計測を一軸圧縮試験に応用し、中性化コンクリートの定量的損傷度評価を試みた。その結果、中性化コンクリートの AE 発生挙動は、コンクリート内部の空隙構造と緊密に関係していることが示唆された。AE 発生挙動の定式化には、レートプロセス解析が有効であり、損傷力学概念の導入に伴う相対損傷度評価を行った結果、中性化によるコンクリート材質の変化と損傷との関係が示唆された。

以下に、本研究から明らかになった事項を挙げる。

- (1) 中性化コンクリートの AE 発生挙動は、中性化の進行に伴う空隙構造の変質に影響を受け、それはレートプロセス解析により近似できることが確認された。
- (2) 中性化コンクリートの力学特性は、現象の進行に伴う収縮作用や空隙構造の変化により影響を受ける。
- (3) 相対損傷度評価は、中性化の進行の程度により異なり、中性化深さと評価値との関係からコンクリートの変質を評価できる可能性が示唆された。
- (4) 構造体コンクリートにおいて、相対損傷度評価と圧縮強度が類似の挙動を示したことから、既設構造物を定量的に損傷度評価できる可能性が示唆された。

- (5) 構造体コンクリートの物性値は、中性化反応に影響を受けるが、その程度は示方配合や設置環境などを考慮した上で検討する必要があることが明らかになった。

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：炭酸化委員会報告書, 1993.
- 2) 飯田剛史・渡辺弘史・友田祐一・大津政康：AE レートプロセス解析のコンクリート損傷度評価への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol. 22, No. 1, pp. 271-276, 2000.
- 3) 渡辺弘史・一ノ瀬誠・友田祐一・大津政康：AE 法によるコア・コンクリート供試体の損傷度の同定, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 1, pp. 493-498, 2001.
- 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.
- 5) 横堀武夫：材料強度学, 技報堂出版, 1955.
- 6) Suredra P. Shah, Stuart E. Swartz, Chengsheng Ouyang : Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., pp. 452-459, 1995.
- 7) 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.
- 8) 松里広昭・船戸已知雄・山崎之典：炭酸化したセメント硬化体の強度と微細構造, 第 46 回セメント技術大会講演集, pp. 630-635, 1992.
- 9) 佐伯竜彦・米山紘一・長滝重義：中性化によるモルタルの強度変化, 土木学会論文集, No. 451/V-17, pp. 69-78, 1992.
- 10) Y. F. Houst: Influence of shrinkage on carbonation shrinkage kinetics of hydrated cement paste, in Creep and Shrinkage of Concrete, Eds, Z. P. Bazant and I. Carol, Proc. 5th Int. RILEM Symp, Barcelona, pp. 121-126, 1993.
- 11) 鈴木一孝・西川直宏・伊藤祐敏：コンクリートの劣化と生成水和物の変質, セメント技術年報, Vol. 41, pp. 351-354, 1987.

(2004 年 4 月 16 日受付)