

(a-2)

AEレートプロセス解析による 既設構造物の定量的損傷度評価の考察

大津政康¹・鈴木哲也²

¹ 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)

² 農修 株式会社 日本水工コンサルタント 技術部 (〒862-0935 熊本県熊本市御領3丁目15番48号)

A diagnostic technique for deterioration is considered to be most important for the maintenance and management of concrete structures. In the present study, using acoustic emission method and damage mechanics, quantitative damage evaluation of concrete is studied. Structural concrete from concrete-core sample and damaged by freezing and thawing process were examined. It is found that AE behaviors of concrete differ depending on the degree of damage, and could be analyzed by using the rate process analysis. Introducing Loland's model, a relationship between stress and strain is approximated, and the suitability of the damage parameter Ω is confirmed. By calculating the relative damage, the initial damage Ω_0 of an actual structure is successfully estimated. Further, the database is constructed for practical application.

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

1. はじめに

平成7年に兵庫県南部地震が発生して以来、耐久性の向上を踏まえたコンクリート構造物の補修・改修計画の必要性が高まり、構造物の損傷度など強度特性以外の物性値の重要性が見直されている¹⁾。今日まで、老朽化構造物の調査診断にはコア供試体を用いた一軸圧縮強度試験による圧縮強度やシュミットハンマーを用いた反発硬度が頻繁に用いられている²⁾。しかし、これらの結果は、主に現行の設計基準等に記載されている基準強度との対比により、劣化状況が判断されているため、構造物の内部欠損などの損傷状況を必ずしも明確に示すものではない。このことから、既設構造物の損傷度を適切に評価するための定量的な調査診断手法の確立が求められている。筆者らは、コンクリート構造物の定量的損傷度評価に関する手法の一つとして、AE (Acoustic Emission; アコースティック・エミッション) 法および損傷力学 (Damage mechanics) を応用して、コンクリートコア供試体を用いた定量的損傷度評価手法について検討している^{3),4),5)}。

本報では、一軸圧縮試験にAE計測を導入し、既設構造物の定量的な損傷度評価方法について検討した結果を報告する。使用した供試体は、既設橋梁より採取したコア供試体および人工的に水中凍結融解試験により劣化させた供試体の2種類である。試験結果は、レートプロセス解析によりAE発生頻度を近似し、応力-ひずみ挙動から損傷力学の損傷パラメータをローランドモデルにより評価した。加えて、少数の供試体でも提案手法が適用可能となるデータベースを作製し、実構造物での本手法の有効性を検証した。

2. 解析手法

(1) レートプロセス解析

コンクリート供試体の一軸圧縮下での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、耐荷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、このことから微小ひび割れの集積により累進的に増加することになる。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て、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る。そこで一軸圧縮下のAE発生挙動の定式化にレートプロセス理論を適用する。

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。

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

式(1)の $f(V)$ に次のような双曲線関数を仮定する。

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

なお、 a 、 b は定数である。

式(1)および(2)より、AE発生総数 N と応力レベル V との関係を下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。

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

表-1 示方配合

Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	Weight per volume (kg/m ³)				Admixture (cc)	Slump (cm)	Air (%)
			W	C	S	G			
20	55	47	177	322	864	1130	0	3.0	1.9

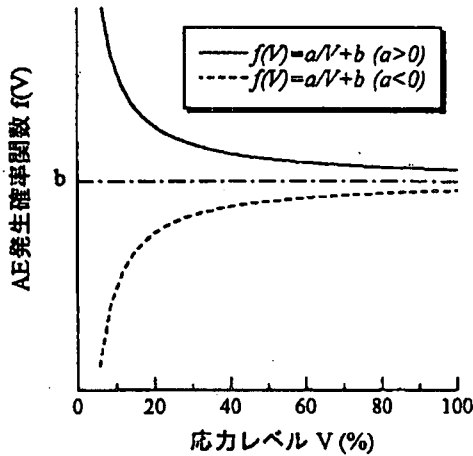


図-1 AE 発生確率関数と a 値の関係

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ことを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を評価することができる。

したがって、一軸圧縮試験に AE 測定を行ない、レートプロセス解析を適用することにより、AE 発生挙動からコンクリートの損傷度評価を定量的に行なうことができるものと考えられる。

(2) ローランドモデル

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。

$$\sigma = E^* (1 - \Omega_0 - A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon$$

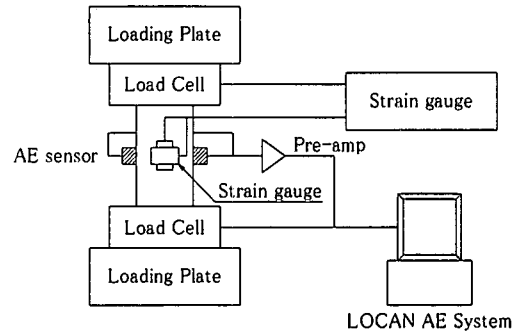


図-2 AE 計測システム

$$= E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \quad (6)$$

ただし

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

である。

3. 実験概要

(1) 供試体

供試体は、既設橋梁より採取した供試体および水中凍結融解試験を行った円柱供試体の 2 種類である。円柱供試体は、径 10cm、高さ 20cm である。水中凍結融解試験を行ったコンクリートの配合を表-1 に示す。なお、供試体の配合は、劣化を促進させるために AE 剤を添加せずに作製した。

(2) 水中凍結融解試験

コンクリート構造物は、凍結融解を繰り返すことにより劣化する。凍結融解作用を受けたコンクリートは、コンクリート中の自由水の凍結により膨張し、内部組織の破壊などを引き起こすことにより耐久性が低下する。

本研究では、供試体の中心温度が $5 \pm 2^\circ\text{C}$ から $-18 \pm 2^\circ\text{C}$ を 3 時間以上 4 時間以内で繰り返し与えた供試体を 0, 10, 20, 50 サイクルの 4 段階に分けて準備した。その際、供試体にスケーリング等は確認されなかった。

(3) 動弾性係数の算出

コンクリートの劣化度の目安として共振周波数を測定し、動弾性係数を算出した。共振周波数の測定に際しては、ヤング率測定器 (東京測器研究所製) を使用し、縦振動法により測定した。なお、共振周波数 f は、弾性波動論⁹⁾より以下の式で算出した。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{(1-\nu)E_D}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \quad (8)$$

ここで、L：供試体の長さ、 ν ：ポアソン比、 E_D ：動弾性係数、 ρ ：密度

式 (8) より、動弾性係数 E_D は、

$$E_D = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}{1-\nu} (2Lf)^2 \quad (9)$$

となる。式 (9) より、各凍結融解サイクルの共振周波数と健全な供試体の共振周波数との2乗比より、各供試体の相対動弾性係数を求めた。

(4) 一軸圧縮試験

AE 計測は一軸圧縮試験時の AE 計測システムを図-2 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 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、全てのデータは 2 箇所での平均値を採用した。

4. 実験結果および考察

(1) コンクリートの力学特性の評価

本研究では、初期接線ヤング率 E_0 を定量的に応力-ひずみ曲線の接線勾配として求めた。

したがって、

$$\sigma = a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 \quad (10)$$

ここで、 a_1 、 a_2 はそれぞれ実験定数である。

式 (6) において

$$\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=0} = E_0$$

より、

$$a_1 = E_0$$

となり、初期接線ヤング率 E_0 の算出が可能になる。

式 (10) を用いて、初期接線ヤング率 E_0 を算出した一例を図-3 に示す。なお、 E_c は破壊時の割線ヤング率である。相関係数 $|r|$ は、0.999 と非常によく a_1 が推定されている。

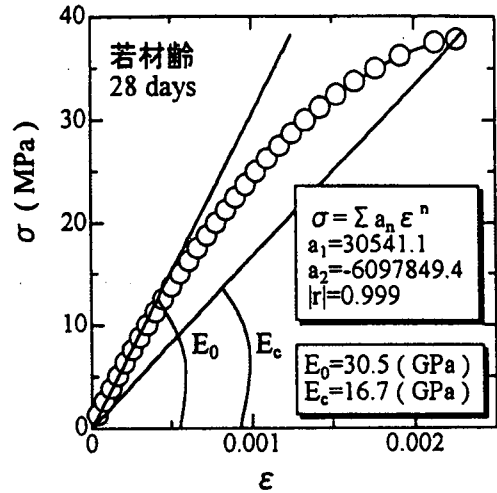


図-3 初期接線ヤング率の算出

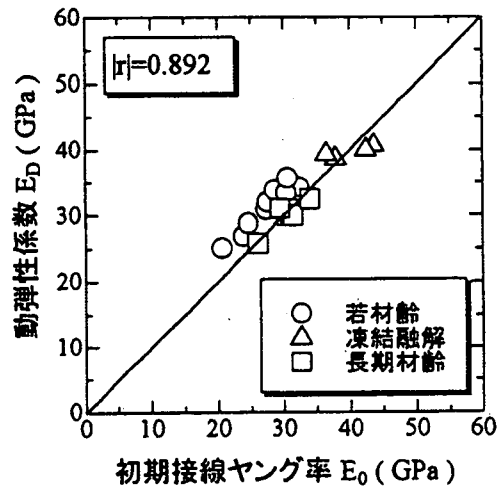


図-4 E_D と E_0 の関係

(2) 動弾性係数と初期接線ヤング率の関係

動弾性係数 E_D と初期接線ヤング率 E_0 の関係を図-4 に示す。動弾性係数 E_D と初期接線ヤング率 E_0 とは、相関係数が 0.892 を示し、高い相関関係にあることが認められた。これより、接線勾配による静的ヤング率は、式 (9) を用いた動弾性係数と一致することが確認できた。

(3) レートプロセス解析結果

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-5 に、レートプロセス解析結果を図-6 に示す。実験および解析の結果、劣化を受けた供試体では载荷初期において活発に AE が発生していた。図より式 (3) により解析した結果、実験値と解析値がよく一致してい

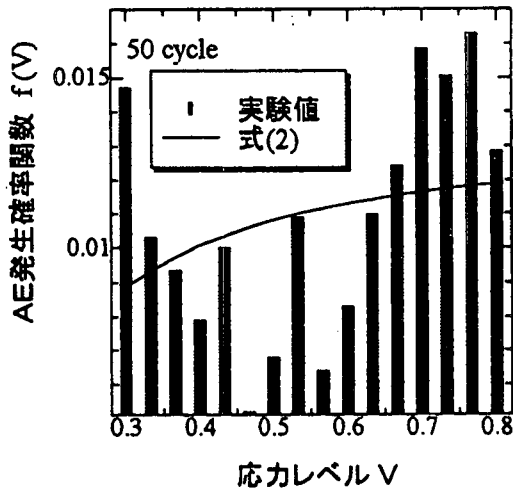


図-5 AE 発生確率関数と応力レベルの関係

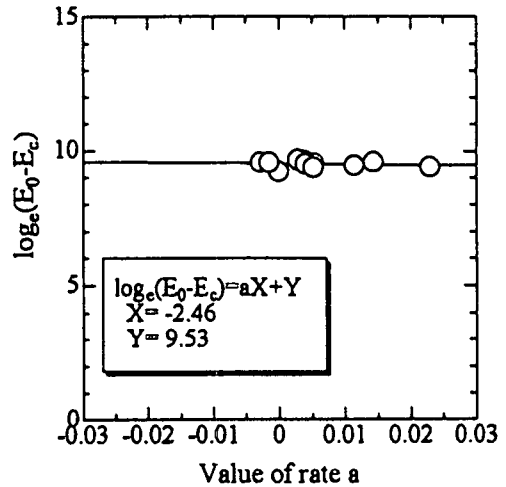


図-8 $\log_e(E_0 - E_c)$ と a 値の関係

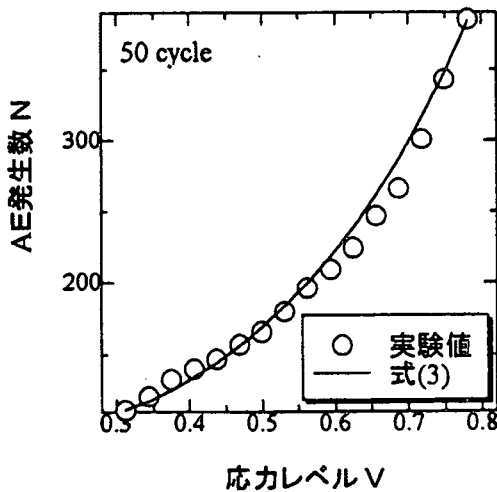


図-6 AE 発生数と応力レベルの関係

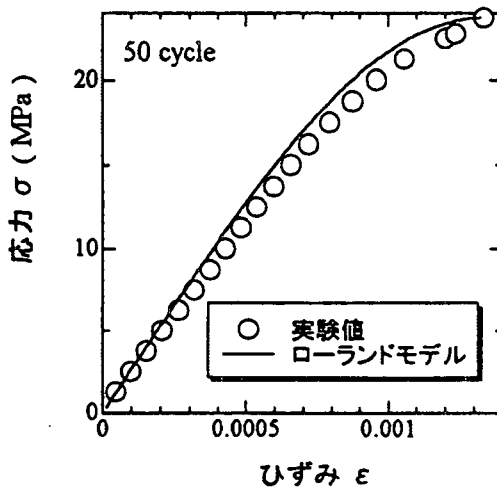


図-7 応力-ひずみ関係

ることが認められる。同様の結果は全ての供試体で確認されたことから、レートプロセス解析により AE 発生挙動は十分に近似されるものと考えられる。

(4) 応力-ひずみ関係の解析結果

図-6 と同一供試体のローランドモデルでの解析結果を図-7 に示す。これは、応力と縦ひずみの関係を式 (6) でモデル化した結果である。図より、実験値と解析値が、ほぼ一致していることが確認できる。このことから、損傷変数 Ω を用いたモデルにより、一軸圧縮下の応力-ひずみ挙動は十分近似されていることがわかる。

(5) 健全時のヤング率 E^* の算出

式 (4) に示すとおり、損傷力学における損傷変数 Ω は、コンクリートの損傷を示す定量的な指標として定義されている。ただし、ローランドモデルでは、式 (7) のように初期損傷度 Ω_0 を求める際に、健全時のヤング率 E^* が必須である。しかし、既設の構造物では、健全時のヤング率 E^* を求めることは困難である。そこで、健全時のヤング率 E^* を AE 計測結果から推定し、初期損傷度 Ω_0 を算出する手法について検討した。

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 (図-6)、応力-ひずみ (図-7) の関係に着目する。この 2 つに関係が見出せれば、AE 法による損傷度評価が可能になるものと考えられる。

一軸圧縮下でのヤング率の低下 $\log_e(E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析の a 値との関係を図-8 に示す。図-8 は凍結融解試験を実施した供試体である。これより $\log_e(E_0 - E_c)$ と a 値はよく対応していることが認められる。一軸圧縮下でのヤング率の低下 $E_0 - E_c$ は式 (4) より、

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^* (1 - \Omega_0) - E^* (1 - \Omega_c) \\ &= E^* (\Omega_c - \Omega_0) \quad (11) \end{aligned}$$

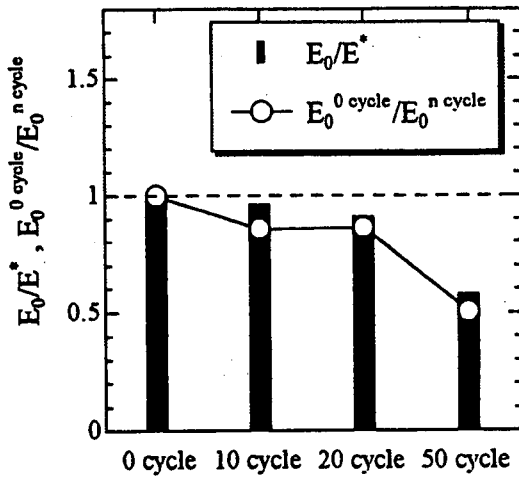


図-9 凍結融解の相対損傷度評価

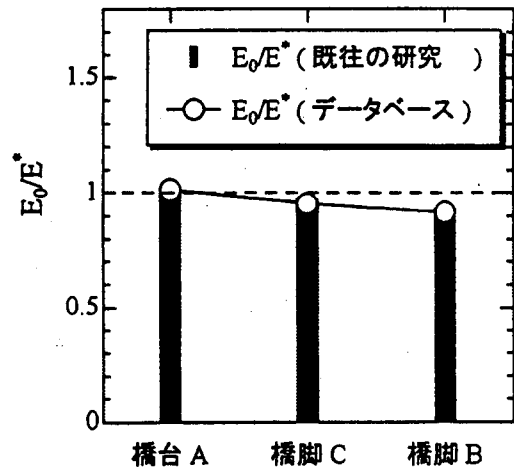


図-12 既設橋梁の相対損傷度評価

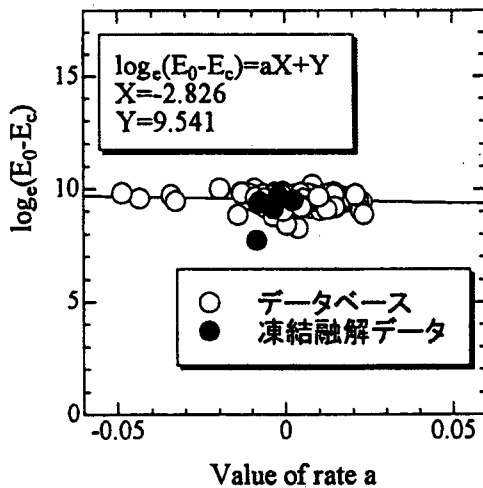


図-10 データベースを用いた $\log_e(E_0-E_c)$ と a 値の関係 (凍結融解試験)

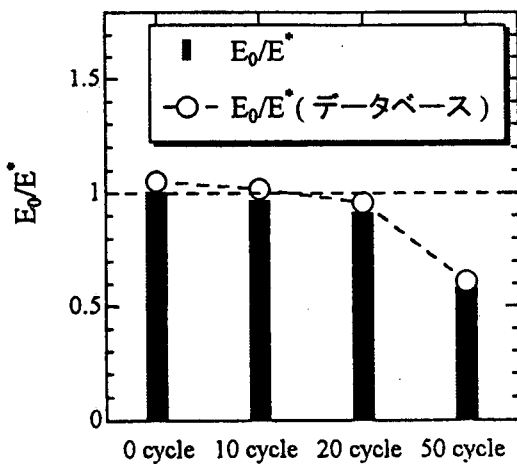


図-11 凍結融解の相対損傷度評価 (データベース)

図-8 中の近似式より、以下の式を得る。

$$\begin{aligned} \log_e(E_0 - E_c) &= \log_e[E^*(\Omega_c - \Omega_0)] \\ &= aX + Y \quad (12) \end{aligned}$$

ここで、 $a=0$ の時 $E_0=E^*$ と仮定すると、以下の式 (13) が得られる。これにより、健全時のヤング率 E^* を AE レートプロセス解析から推定することにした。

$$E^* = E_c + e^Y \quad (13)$$

(6) 相対損傷度評価

式 (13) によって、健全時のヤング率 E^* を推定し、実際の実験値 E_0 との相対比である 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試みた。凍結融解試験での結果を図-9 に示す。

水中凍結融解試験の供試体では、 E_0/E^* と $E_0^{0\text{ cycle}}/E_0^{n\text{ cycle}}$ とがほぼ一致し、式 (13) を用いた健全時のヤング率 E^* の算出値と、初期接線ヤング率 E_0 との比である相対損傷度による評価の有効性が確認された。

しかし、相対損傷度評価を行なうには多数の供試体を用いて解析する必要があるが、実構造物を想定した場合、採取できるコンクリートコアは限られている。このことから、本研究では、採取されるコアがたとえ 1 本でも相対損傷度評価が可能になるようデータベースを作製し、健全時のヤング率 E^* の算出および相対損傷度評価について検討を加えた。

水中凍結融解試験結果について検討した結果を図-10 および図-11 に示す。図-10 は $\log_e(E_0-E_c)$ とレートプロセス解析の a 値との関係のデータベースに実験値を加えたものを示す。図-11 は、データベースを用いて算出された相対損傷度と、図-10 に示されている相対損傷度との比較を示している。なお、データベースは、研究室内で作製・実験された供試体データで構成されている。その結果、新たなデータベースを用いて算出した

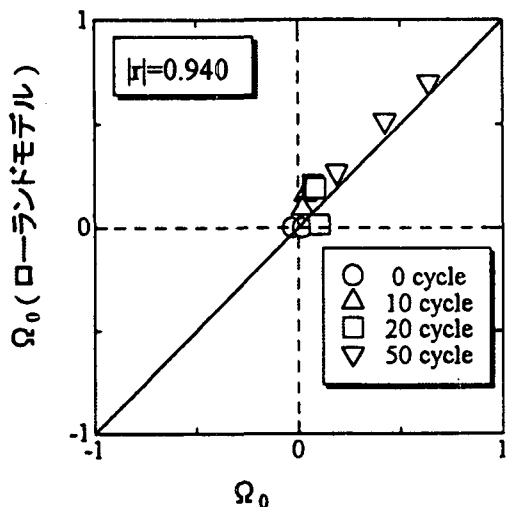


図-13 初期損傷度 Ω_0 の比較

相対損傷度と実測値から算出した相対損傷度は、よく一致していることを確認した。このことから、データベースを用いて相対損傷度を算出することは有効であると考えられる。

既設橋梁の橋台および橋脚より採取した供試体を用いて損傷度を既報⁹⁾で算出した結果とデータベースとの関係を図-12に示す。この結果、水中凍結融解試験結果と同様に、データベースを用いて算出した相対損傷度と既往の研究により算出された相対損傷度は、よく一致していることが確認できる。このことから、データベースを用いれば、実構造物から採取される供試体が少数でも相対損傷度評価が行なえることが考えられる。

(7) 初期損傷度 Ω_0 の算出

4(5)および4(6)節において E_0/E^* の有効性が示されたことから、初期損傷度 Ω_0 について検討した。

ローランドモデルより初期損傷度 Ω_0 は、

$$\Omega_0 = 1 - \frac{E_0}{E^*}$$

と表される。そこで、水中凍結融解試験を実施した供試体において4(5)節で示した手法により E_0/E^* を算出し、ローランドモデルで決定した実際の初期損傷度 Ω_0 と式

(13) で評価される初期損傷度 Ω_0 との比較を行なった。比較結果を図-13に示す。両者の相関は0.940と非常に高く、式(13)を用いて初期損傷度 Ω_0 を算出する有効性が確認された。このことにより、実験時には未知数である実構造物の初期損傷度 Ω_0 が算出される可能性が明らかになった。

5. まとめ

- (1) コンクリートの AE 発生挙動は損傷の有無により変化し、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) ローランドモデルにより、応力-ひずみ関係が近似でき、スカラー損傷変数 Ω を用いた応力-ひずみ関係の妥当性が確認された。
- (3) ヤング率の低下 $\log_e (E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析の a 値との相関関係から、健全時のヤング率 E^* を算出し、初期接線ヤング率 E_0 との相対比 E_0/E^* を求めることにより、相対損傷度評価の可能性を劣化コンクリートで確認された。
- (4) データベースを用いることにより、実構造物より採取された少数のコア供試体から健全時のヤング率 E^* を算出し、相対損傷度評価が行なえる可能性が示唆された。
- (5) 相対損傷度を算出することにより、実構造物の初期損傷度 Ω_0 が算出できる可能性が明らかになった。

参考文献

- 1) (社) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書，2001。
- 2) (社) 建築学会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル，1983。
- 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) 大津政康，時任哲郎，藤岡泰作：AE 法と損傷力学に基づいたコンクリートの劣化度評価，セメント・コンクリート論文集，No.51, pp.198-203, 1997。
- 6) 佐藤泰夫：弾性波動論，岩波書店，1978。
- 7) (社) 非破壊試験協会：コンクリート構造物の非破壊試験法，養賢堂，1998。
- 8) 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。
- 9) L.M.Kachanov：Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986。
- 10) Surendra P.Shah, Stuart E.Swartz, Chengsheng Ouyang：Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., Pp.452-459, 1995。
- 11) Lauge Fuglsang Nilsen：On Strength of Porous Material: Simple Systems and Densified Systems, Matériaux et Constructions, Vol.31, December, pp.651-661, 1998。