

A E 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

Damage Evaluation of Concrete using Acoustic Emission Method

鈴木哲也*・渡辺弘史**・大津政康***

Tetsuya SUZUKI*・Hiroshi WATANABE**・Masayasu OHTSU***

* 正会員 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)

** 工修 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒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)

In recent years, the deterioration of concrete structures has become a public problem and maintenance and management techniques have been subjected to intensive research. For maintenance it is important to evaluate not only strength of concrete but also other characteristics such as degree of damage. Using acoustic emission (AE) and damage mechanics can make quantitative damage assessment of concrete. In the present study, early-age concrete, long-term cure concrete, and concrete damaged by freezing and thawing process are examined in order to assess a quantitative damage evaluation method. It is found AE behaviors of concrete differ depending on the degree of damage, and could be simulated by using the rate process analysis. Introducing a 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.

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

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の劣化が社会問題化し、構造物の維持管理の重要性が見直されている。コンクリート構造物を維持管理するためには、構造物の現況を調査し、適切に評価する必要がある。しかし、その診断手法は、コンクリートの損傷度などを評価していくことが重要な課題であるにもかかわらず十分行われていないのが現状である。このことから、定量的にコンクリートの損傷度を評価するための手法の確立が求められている¹⁾。

本研究は、若材齢、長期材齢および水中凍結融解試験を行った供試体を作製し、損傷度評価の有効な手法の一つである AE (Acoustic Emission; アコースティック・エミッション) 法を用いて一軸圧縮下での破壊挙動から定量的な損傷度評価について検討した。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、既設橋梁より採取したコア供試体について、実構造物での本手法の有効性を検証した。

2. 解析手法

2.1 レートプロセス解析^{2,3,4)}

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。

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。

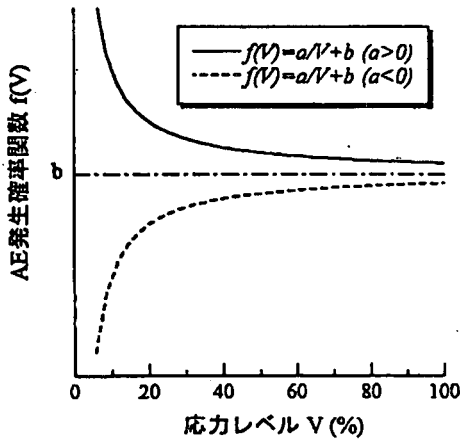


図-1 AE発生確率関数とa値の関係

2.2 ローランドモデル^{5,6)}

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。

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

ただし

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

2.3 MOE - MOR 関係⁷⁾

Nielsen⁷⁾は、図-2に示すクラックが図-3のように存在しているとき、MOE-MOR (modulus of elasticity - modulus of rupture) 関係として、以下の2式を損傷力学理論より導いている。

$$\frac{S}{S^*} = \exp \left[-\frac{3}{4} \left(\frac{E^*}{E} - 1 \right) \right] \quad (8)$$

$$\frac{S}{S^*} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \frac{E}{E^*} \quad (9)$$

ここで、S*：健全な材料に相当する強度

S：損傷を受けた材料の強度

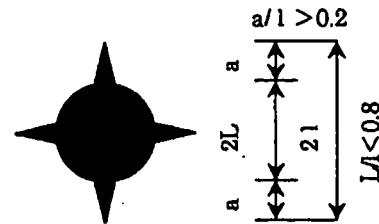


図-2 理論クラック形状

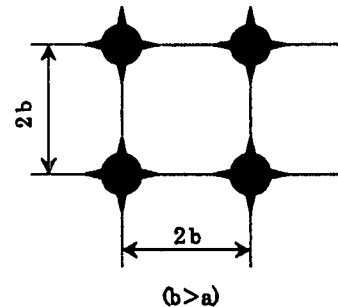


図-3 理論クラックの配置図

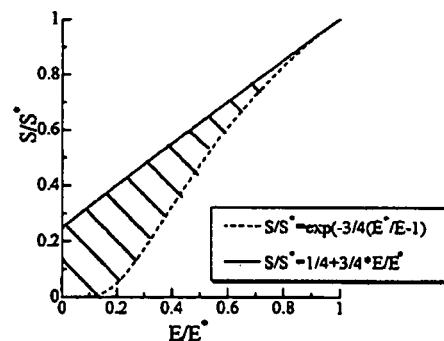


図-4 MOE-MOR 関係

式 (9) は空隙から進展するクラック a が $a/L=1$ となった場合の漸近解である。

式 (8) および (9) の関係を図-4 に示す。Nielsen は、図-3 のようにクラックが連結せず分布するとき、強度とヤング率の関係は図-4 中の式 (8) および (9) に囲まれた斜線の範囲内にあると想定している。

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体は径 10cm、高さ 20cm の円柱供試体を作製した。供試体の種類は、若材齢、長期材齢および水中凍結融解試験を行った供試体の 3 種類である。コンクリートの配合を表-1 に示す。水中凍結融解試験を行なう供試体は、表-1 上段の配合で作製した。これは、劣化を促進させるために AE 剤を添加せずに作成した。若材齢および長期材齢の供試体については表-1 下段のとおりの AE 剤を添加し作製した。

また、実験室内で作成した供試体に加えて、既設橋梁より採取したコア供試体を準備した。

3.2 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 $5\pm2^{\circ}\text{C}$ から $-18\pm2^{\circ}\text{C}$ 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、供試体にはスケーリング等は確認されなかった。

3.3 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。

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{(1-\nu)E_D}{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}} \tag{10}$$

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 (10) より、動弾性係数 E_D は、

$$E_D = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}{1-\nu} (2Lf)^2 \tag{11}$$

となる。式 (11) 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。

3.4 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験時の AE 計測システムを図-5 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 1MHz）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。

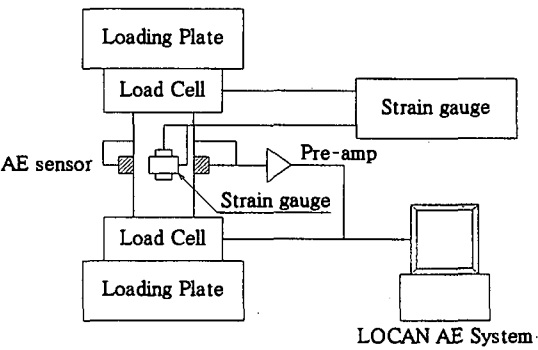


図-5 AE 計測システム

4. 実験結果および考察

4.1 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ることにした。

したがって、

$$\sigma = a_1 \epsilon + a_2 \epsilon^2 \tag{12}$$

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

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

とすると、

$$a_1 = E_0$$

表-1 示方配合

G max (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)				AE 剤 (cc)	スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G			
20	55	47	177	322	864	1130	0	3.0	1.9
20	55	47	176	321	741	1179	128	7.3	4.0

となり、初期接線ヤング率 E_0 の算出が可能になる。

式 (12) を用いて、初期接線ヤング率 E_0 を算出した一例を図-6 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。

式 (12) より求めた初期接線ヤング率 E_0 を若材齢および長期材齢では、材齢 28 日を、水中凍結融解試験では 0 サイクルを基準に、相対初期接線ヤング率および相対動弾性係数を算出した。計算結果を表-2 に示す。

4.2 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-7 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見とめられた。これより、接線勾配による静的ヤング率は、式 (11) を用いた動弾性係数と一致することが確認できた。

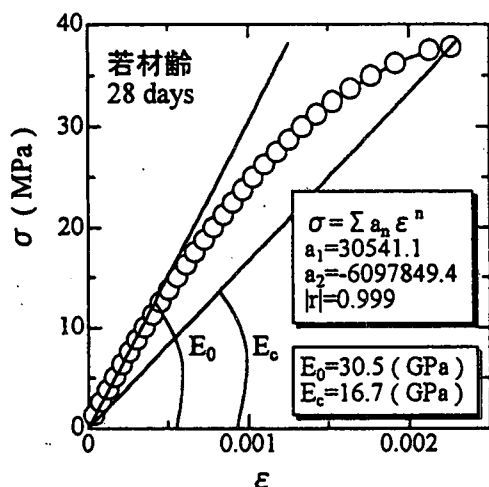


図-6 初期接線ヤング率の算出

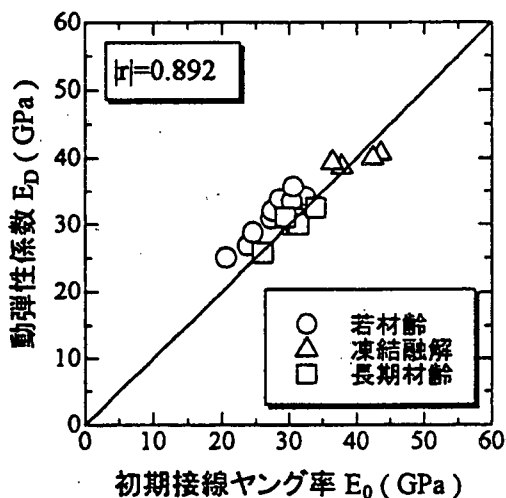


図-7 E_D と E_0 の相関関係

表-2 供試体の力学特性

	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	相対初期接 線ヤング率 (%)	相 対 動 弾性係数 (%)
若材齢				
3days	18.6	20.7	67.6	70.2
4days	23.8	23.9	78.1	75.2
5days	26.1	24.6	80.4	80.8
6days	29.5	27.3	89.2	86.5
7days	31.0	27.6	90.2	89.8
10days	33.7	29.9	97.7	92.7
14days	34.9	28.6	93.5	94.9
17days	35.7	30.5	99.7	94.7
21days	37.5	32.4	105.9	95.9
24days	36.8	30.4	99.3	93.7
28days	38.3	30.6	100.0	100.0
長期材齢				
28days	21.2	26.1	100.0	100.0
196days	23.2	30.4	116.5	104.1
252days	23.5	31.1	119.2	104.0
308days	23.8	30.8	118.0	104.6
364days	23.7	31.4	120.3	105.5
420days	24.2	29.5	113.0	106.9
476days	22.7	34.0	130.3	109.1
凍結融解				
0cycle	56.3	43.6	100.0	100.0
10cycle	54.1	42.4	97.2	98.3
20cycle	51.8	37.8	86.7	95.0
50cycle	48.4	36.4	83.5	96.7

4.3 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-8 に、レートプロセス解析結果を図-9 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。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た。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。

4.4 応力-ひずみ関係の解析結果

図-9 と同一供試体のローランドモデルでの解析結果を図-10 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-ひずみ挙動は十分に近似されていることがわかる。

なお、ローランドモデルの材料固有の定数 λ 、 A_0 は以下の式により表される⁵⁾。なお、 ϵ_c は最大応力時 (σ_c) の、ひずみを示している。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad A_0 = \frac{1}{(\lambda + 1)\epsilon_c^\lambda}$$

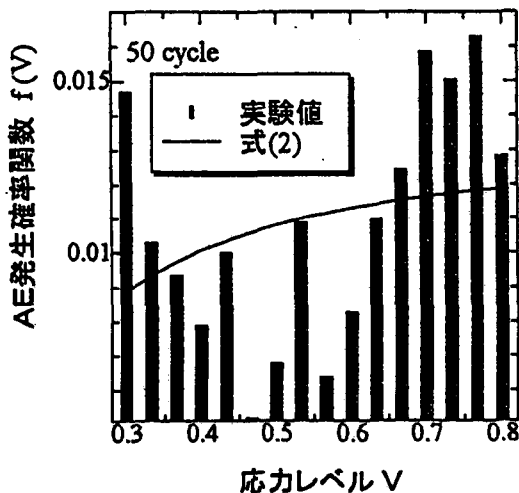


図-8 AE 発生確率関数と応力レベルの関係

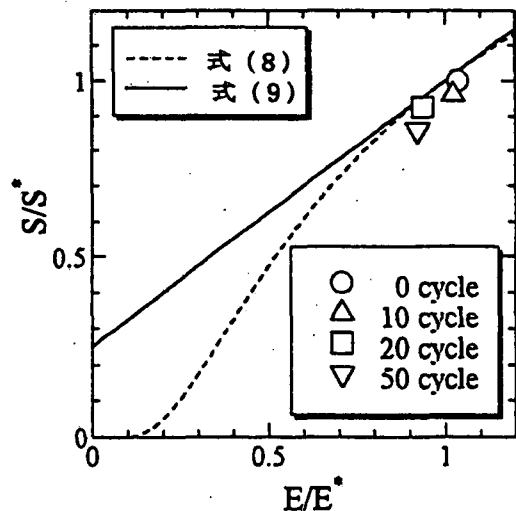


図-11 MOE-MOR 関係の解析結果

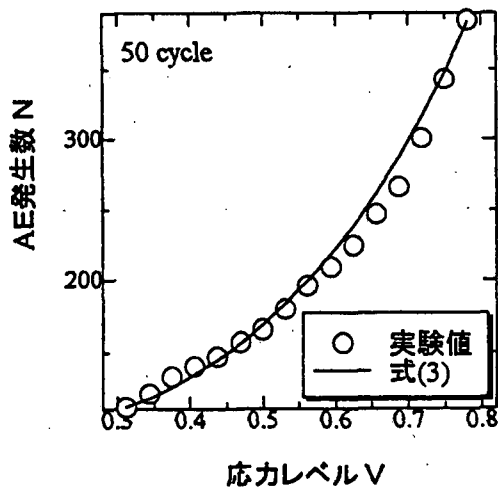


図-9 AE 発生数と応力レベルの関係

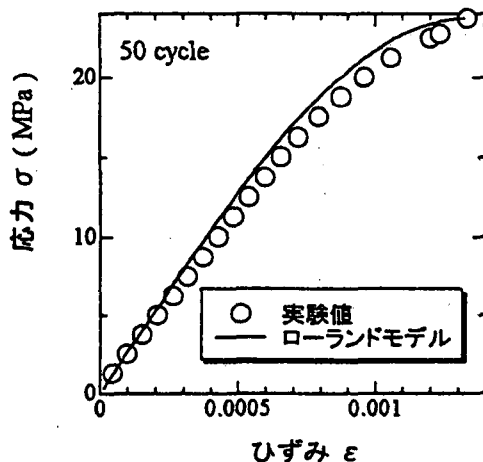


図-10 応力-ひずみ関係

4.5 MOE-MOR 関係解析結果

凍結融解試験を実施した供試体の、 S/S^* および E/E^* の関係を図-11 に示す。測定値は多少のバラツキはあるものの、Nielsen⁷⁾ が定義した範囲にデータが存在していることが認められた。このことから、MOE-MOR 関係に凍結融解に伴う劣化が含まれることが考えられる。また、このような劣化への損傷力学モデル適用の可能性が認められるものと考えられる。

4.6 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。ローランドモデルでは、式 (6) 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-9)、応力-ひずみ (図-10) の関係に着目する。この 2 つの関係に相関を見出せれば、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-12 に示す。図-12 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、

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^* (1 - \Omega_0) - E^* (1 - \Omega_c) \\ &= E^* (\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (13)$$

図-12 中の近似式より、以下の式を得る。

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

$$= aX + Y \quad (14)$$

ここで、 $E_0=E^*$ のとき、 $\Omega_0=0$ 、 $a=0$ と仮定すると、式(15)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。

$$E^* = E_c + e^Y \quad (15)$$

4.7 相対損傷度評価

式(15)によって、健全時のヤング率 E^* が算出できる。そこで、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。その結果を図-13～15に示す。

若材齢の相対損傷度評価は、材齢14日以前の供試体において E_0/E^* と $E_0^{n \text{ days}}/E_0^{28 \text{ days}}$ の一致はあまりよくない。長期材齢の供試体では、全般的に $E_0^{n \text{ days}}/E_0^{28 \text{ days}}$ が1.0を上回るのに対して、 E_0/E^* がほぼ1.0になり、両者の一致はあまりよくない。水中凍結融解試験の供試体では、若材齢および長期材齢とは異なり、 E_0/E^* と $E_0^{n \text{ days}}/E_0^{28 \text{ days}}$ とがほぼ一致した。これらの結果は、供試体の水和反応の進行などの相違が影響したものと考えられる。

したがって、劣化コンクリートについては、式(15)を用いて健全時のヤング率 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、長期材齢や劣化を受けていない健全な供試体については、検討が必要な結果となった。

4.8 データベースを用いた相対損傷度評価

相対損傷度評価を行なうには多数の供試体について解析を行なう必要がある。しかし、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

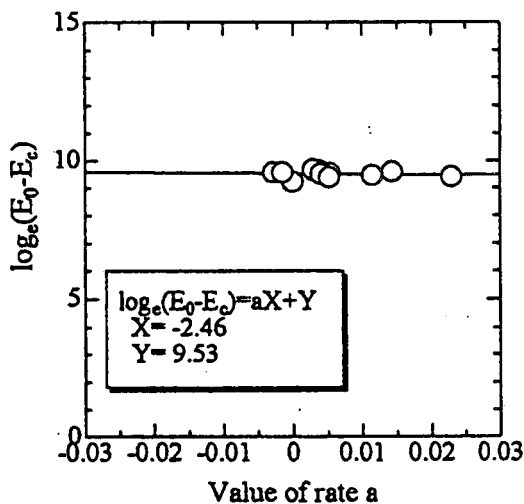


図-12 $\log_e(E_0 - E_c)$ と a 値の関係

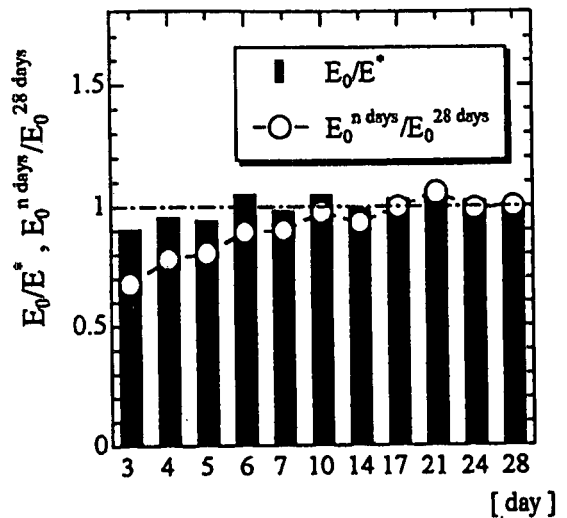


図-13 若材齢の相対損傷度評価

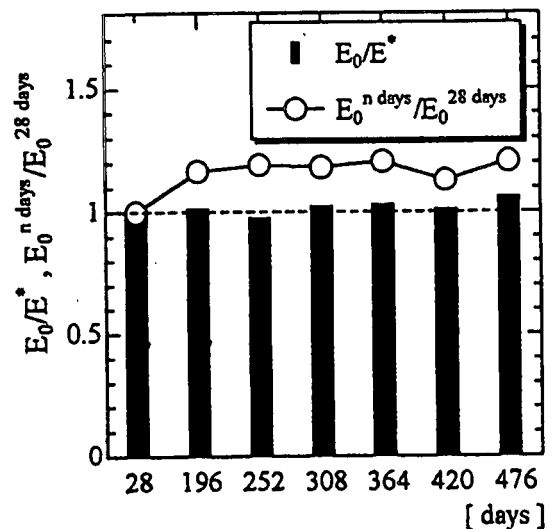


図-14 長期材齢の相対損傷度評価

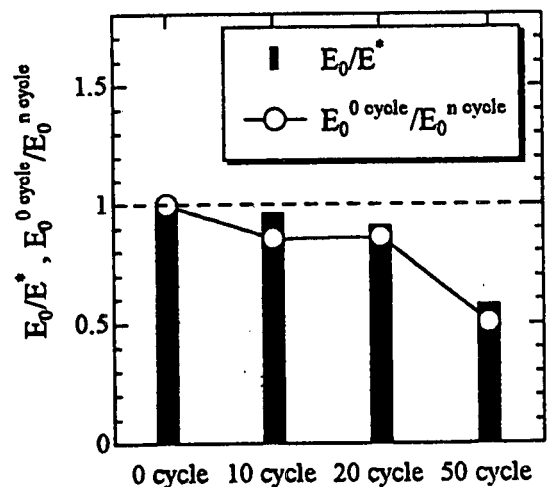


図-15 凍結融解の相対損傷度評価

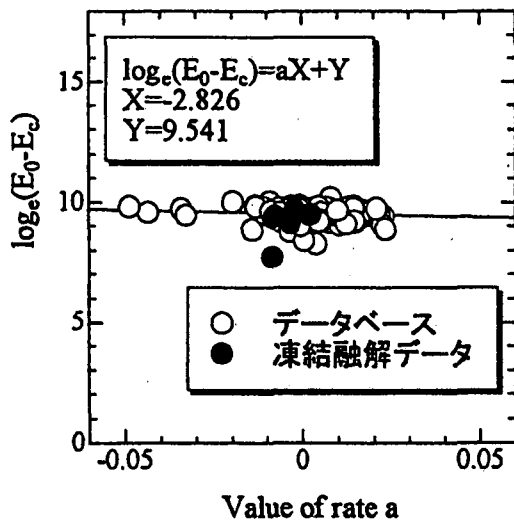


図-16 データベースを用いた $\log_e(E_0 - E_c)$ と a 値の関係 (凍結融解試験)

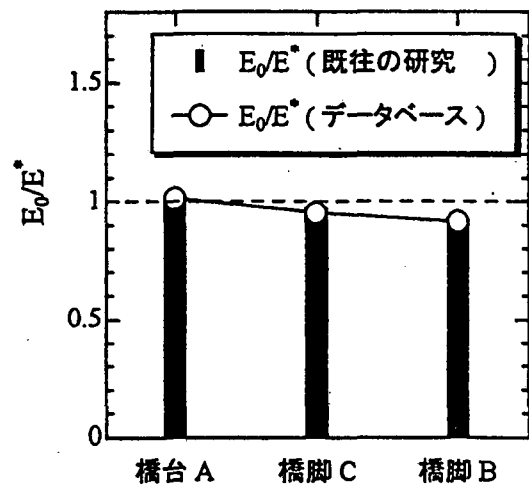


図-19 既設橋梁の相対損傷度評価

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。対象とする供試体は、前節で相対損傷度を評価した水中凍結融解試験結果および既設橋梁より採取したコアサンプルである。

前節で相対損傷度を評価した水中凍結融解試験結果について検討した結果を図-16 および 17 に示す。図-16 は $\log_e(E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析の a 値との関係を示す。図-17 は、データベースを用いて算出された相対損傷度と、図-15 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、データベースを用いて算出した相対損傷度と前節で示した手法により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有効性が確認された。

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算出結果とデータベースとの関係を図-18 および 19 に示す。なお、既設橋梁の結果は既往の研究⁹⁾により算出されたものである。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あっても相対損傷度評価が行なえることが示唆された。

4.9 初期損傷度 Ω_0 の算出

4.7 節および 4.8 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 についても検討した。

水中凍結融解試験を行なった供試体における、ローランドモデルより得られる初期損傷度 Ω_0 と圧縮強度 σ_c との関係を図-20 に示す。図より、圧縮強度の低下に伴い初期損傷度の増加が認められた。

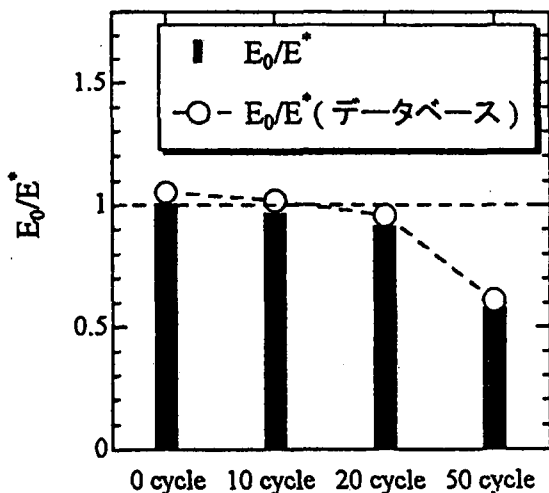


図-17 凍結融解の相対損傷度評価

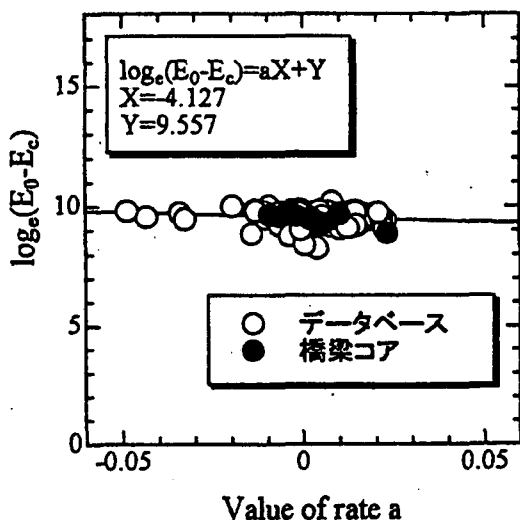


図-18 データベースを用いた $\log_e(E_0 - E_c)$ と a 値の関係 (既設橋梁)

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4.7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与えた実際の初期損傷度 Ω_0 と式(16)で評価される初期損傷度 Ω_0 との比較を行なった。初期損傷度 Ω_0 の比較を図-21に示す。その結果、両者の相関は0.940と非常に高く、式(15)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。

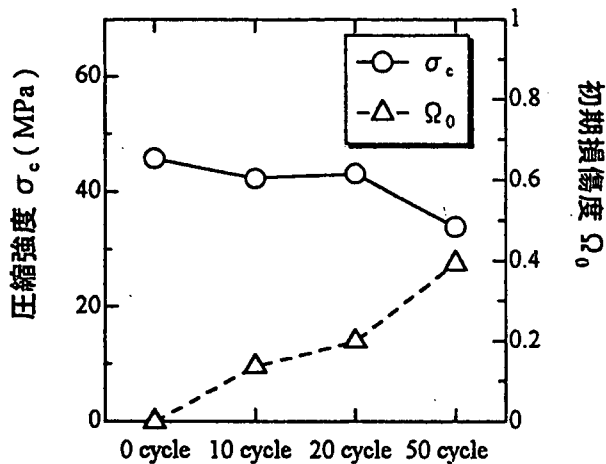


図-20 圧縮強度と初期損傷度の関係

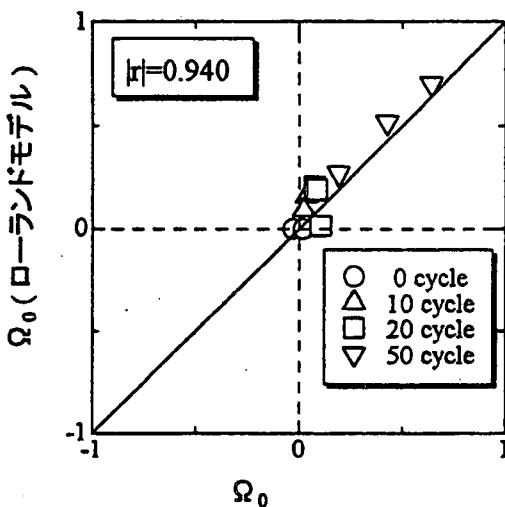


図-21 初期損傷度 Ω_0 の比較

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示唆された。

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) 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.
- 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) 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.
- 5) L.M.Kachanov : Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht, 1986.
- 6) Suredra P.Shah, Stuart E.Swartz, Chengsheng Ouyang : Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., pp.452-459, 1995.
- 7) Lauge Fuglsang Nilsen : On Strength of Porous Material: Simple Systems and Densified Systems, Materiaux et Constructions, Vol.31, December, pp.651-661, 1998.
- 8) 佐藤泰夫：弾性波動論, 岩波書店, 1978.
- 9) 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.

(2002年4月19日受付)