

論文 AE レートプロセス解析に基づいたコンクリートの損傷度評価

渡辺 弘史*¹・一ノ瀬 誠*²・大津 政康*³

要旨: コンクリート供試体の一軸圧縮試験時に AE 計測を実施することにより, コンクリート構造物の損傷度を定量的に評価する手法を研究中であり, その最新の結果を報告した。昨年研究成果である健全時のヤング率をレートプロセス解析結果から推定する手法の適用性を, 若材齢・長期材齢及び凍結融解劣化による損傷度の制御された供試体の圧縮試験において検討した。さらに, 少数の供試体数でも適用可能なデータベースを用いた方法を考察し, 既存構造物のコア供試体において検討した。

キーワード: AE, 損傷度評価, レートプロセス解析, 損傷力学

1. はじめに

コンクリート構造物は, 耐久性が優れているために, 従来“メンテナンスフリー”と考えられていた。しかし, 近年種々の環境問題の中で, コンクリート構造物の早期劣化や耐久性低下の事例が多数報告され始め, 社会的にも大きな反響を引き起こしている。このような中, コンクリート構造物の維持管理に関わる技術の必要性が高まり, 新設及び既設構造物の調査法, 劣化診断法, 補修補強工法等に関する研究開発が多く実施されるようになってきている。本研究で対象とする AE (アコースティック・エミッション) 法もそのような中で研究開発が進められている技法である¹⁾。

本研究は, 損傷を受けたコンクリート供試体の損傷度評価を, 供試体の一軸圧縮下での破壊挙動より行う方法^{2), 3)}について最新の研究成果をまとめたものである。水中凍結融解試験により人工的に損傷を与えた供試体, 若材齢並びに長期材齢などの損傷度の制御された供試体を用いて一軸圧縮試験で AE 計測を実施した。AE についてはレートプロセス解析により発生頻度を近似し, 応力 - ひずみ挙動から損傷力学の損傷パラメータを評価した。これら AE 計測と損傷パラメータとを比較検討することにより, AE

法によるコンクリートの定量的な損傷度評価法について検討した。さらに, 少数の供試体数でも提案している手法が適用可能となるデータベースを作成し, 既設橋梁から採取されたコア供試体を用い, このデータベースの有効性について検討を行なった。

2. 解析理論

2.1 レートプロセス解析²⁾

一軸圧縮試験における AE の発生挙動の定式化には, レートプロセス理論を適用する。AE 総発生数を N , AE 発生確率関数を $f(V)$ とすると, 応力レベル V から $V+dV$ への応力増分に対し, 以下の式を得る。

$$f(V)dV = dN / N \quad (1)$$

ここで, 式(1)で得た AE 発生確率関数 $f(V)$ に, 損傷度の定量化のため以下の双曲線関数を仮定する。

$$f(V) = a / V + b \quad (2)$$

ここでの a, b は定数である。

式(1), (2)より, 応力レベル V に対する総 AE 発生数 N との関係は以下のように近似できる。

$$N = CV^a \exp(bV) \quad (3)$$

ここでの C は積分定数である。

式(2)において, a 値は応力レベルでの AE

*1 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学大学院 自然科学研究科環境土木工学専攻

*3 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 工博 (正会員)

の発生頻度を反映し，低応力レベルの段階で， 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。

2.2 ローランドモデル⁴⁾

損傷力学における損傷変数 Ω は弾性係数の比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 ：損傷を受けた材料の弾性係数

E^* ：健全な材料に相当する弾性係数

ローランドは損傷変数 Ω と一軸圧縮下でのひずみの関係を以下のように仮定した。

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

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)，(5)より以下の式を導出できる。

$$\sigma = (E_0 - E^* A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \quad (6)$$

ここで， E_0 ：材料の初期ヤング率，

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

である。

3. 実験概要

3.1 供試体

一軸圧縮下での AE 計測のため，表-1の配合の2種類のコンクリート供試体を使用した。これらを用いて，若材齢，長期材齢及び水中凍結融解試験後に一軸圧縮試験を実施した。

水中凍結融解試験を行う供試体については，劣化を促進させるため，混和剤として AE 剤を用いないで打設された供試体を使用した。この場合の空気量は表のように 2.2%であった。

前報⁶⁾で損傷度を算出した既設橋の橋台及び橋脚より採取したコア供試体については，データベースを用いて新たに損傷度を算出した。

3.2 動弾性係数の算出

コンクリート供試体の劣化程度を目安としては，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，ヤング率測定器を使用し，縦振動法により測定を行った。ただし，JIS 規格によらず，弾性波動論より動弾性係数 E_D は，次式より決定した。

$$E_D = \frac{(1+\nu)(1-2\nu)\rho}{1-\nu} (2Lf)^2 \quad (8)$$

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

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-1に示す。なお，供試体の上面と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 の低減に努めた。AE 計測条件として，AE センサは広域帯型（共振周波数：約 1MHz）のものを使用し周波数帯域は 10kHz-300kHz，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 の発生数の計測に際して，しきい値は 42dB とした。なお，AE は，縦横ひずみと同様に 2 チャンネルで実施し，全てのデータはその平均値を採用した。

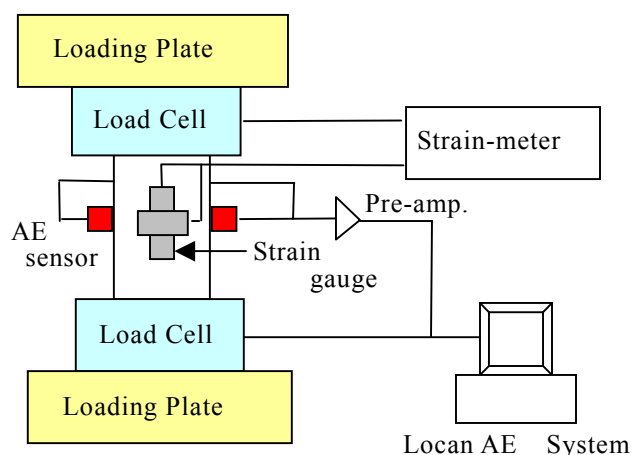


図-1 AE 計測装置

表-1 示方配合

G max (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			
20	50	47	171	342	865	1131	0	1.2	2.2
20	55	47	146	266	864	1130	79	1.2	4.5

4. 実験結果及び考察

4.1 力学特性

初期接線ヤング率 E_0 を定量的に接線勾配として求めるため、応力 ひずみ曲線を以下の式で近似した。

$$\sigma = a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 \quad (9)$$

ただし、 a_1 、 a_2 は係数である。

式(9)において、 $d\sigma/d\varepsilon|_{\varepsilon=0} = E_0$ とすると、

$$a_1 = E_0$$

となり、初期接線ヤング率 E_0 の算出が可能となる。式(9)を用いて E_0 を算出した一例を図-2 に示す。

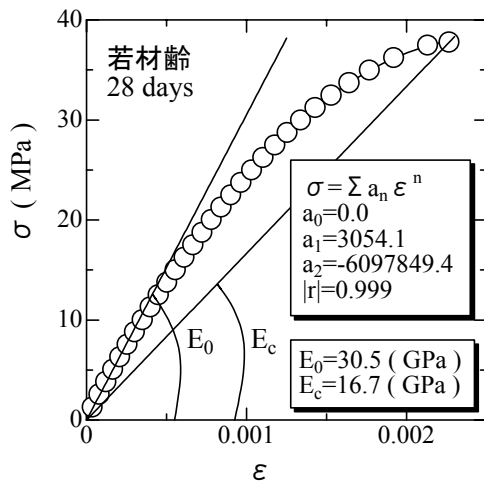


図-2 初期接線ヤング率の算出

式(9)により算出した初期接線ヤング率 E_0 を強度、相対動弾性係数とともに表-2 に示す。表-2 より、各供試体において、材齢、サイクル数による明確な変化が認められる。

4.2 レートプロセス解析結果

レートプロセス解析により得られた結果の一例として、水中凍結融解試験 50 サイクル後の一軸圧縮試験結果を図-3 に示す。解析を行う際の対象範囲は応力レベル V が 30(%)から 80(%)の間とした。これは、載荷初期に端面で発生する AE と、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。図より、実験値と解析値がよく一致していることが認められる。

表-2 力学特性

	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 E_0 (GPa)	相対ヤング率 (%)	相対動弾性係数 (%)
若材齢				
3 days	18.6	20.7	67.6	70.2
4 days	23.8	23.9	78.1	75.2
5 days	26.1	24.6	80.4	80.8
6 days	29.5	27.3	89.2	86.5
7 days	31.0	27.6	90.2	89.8
10 days	33.7	29.9	97.7	92.7
14 days	34.9	28.6	93.5	94.9
17 days	35.7	30.5	99.7	94.7
21 days	37.5	32.4	105.9	95.9
24 days	36.8	30.4	99.3	93.7
28 days	38.3	30.6	100.0	100.0
凍結融解				
0 cycle	35.7	35.3	100.0	100.0
20 cycle	36.0	32.9	93.2	97.2
30 cycle	34.8	34.3	97.2	94.0
50 cycle	37.0	34.8	98.6	94.2
長期材齢				
28 days	21.2	26.1	100.0	100.0
196 days	23.2	30.4	116.5	104.1
252 days	23.5	31.1	119.2	104.0
308 days	23.8	30.8	118.0	104.6
364 days	23.7	31.4	120.3	105.5
420 days	24.2	29.5	113.0	106.9
476 days	22.7	34.0	130.3	109.1

4.3 応力-ひずみ関係の解析結果

図-3 と同じ供試体のローランドモデルでの解析結果を図-4 に示す。図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、実験値と解析値がよく一致していることが認められる。

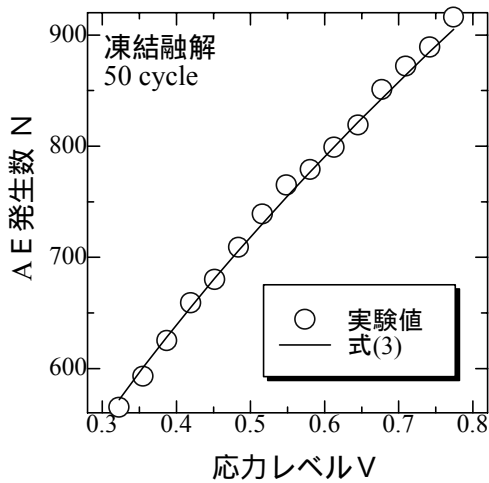


図-3 レートプロセス解析結果

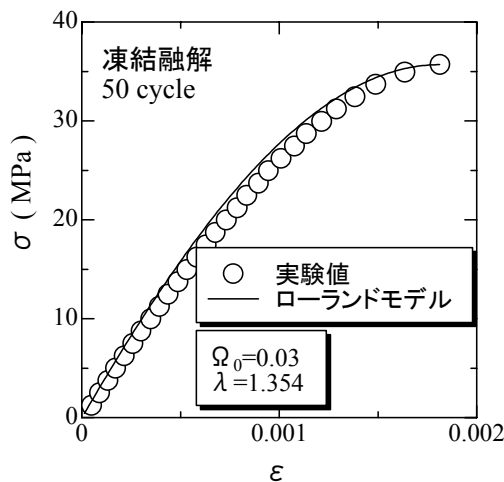


図-4 ローランドモデル解析結果

4.5 健全時のヤング率 E^* の算出

式(5)のように、損傷力学での初期損傷度 Ω_0 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、ローランドモデルにおいては、 Ω_0 を求める際に健全時のヤング率 E^* が必須となる。しかし、既存の実構造物において健全時のヤング率 E^* を得ることは困難である。そこで、健全時のヤング率 E^* を AE 計測結果から推定する方法を考察した。

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-3)、応力 - ひずみ(図-4)の關係に着目する。これら 2 つの關係に相関が見出せれば、AE 法による損傷度評価が可能になると考えられる。

凍結融解試験を施したコンクリート供試体におけ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値 a 値との相関關係

及び相関式を図-5 に示す。図のようにバラツキはほとんど認められず、 $\log_e(E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析値 a 値とはよく対応していることが認められる。この結果は、 a 値の増加がコンクリート中の損傷に関わる細孔容積の増加に対応するという港湾構造物での調査結果⁵⁾ともよく一致している。

ヤング率の低下 $E_0 - E_c$ は式(4)より、

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^*(1 - \Omega_0) - E^*(1 - \Omega_c) \\ &= E^*(\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (10)$$

となり、図-5 中の近似式より、以下の式を得る。

$$\begin{aligned} \log_e(E_0 - E_c) &= \log_e[E^*(\Omega_c - \Omega_0)] \\ &= aX + Y \end{aligned} \quad (11)$$

$E_0 = E^*$ の時、 $\Omega_0 = 0$ 、 $a = 0$ と仮定すると、式(7)より以下の式が得られ、 E^* の推定が AE レートプロセス解析より可能となる。

$$E^* = E_c + e^Y \quad (12)$$

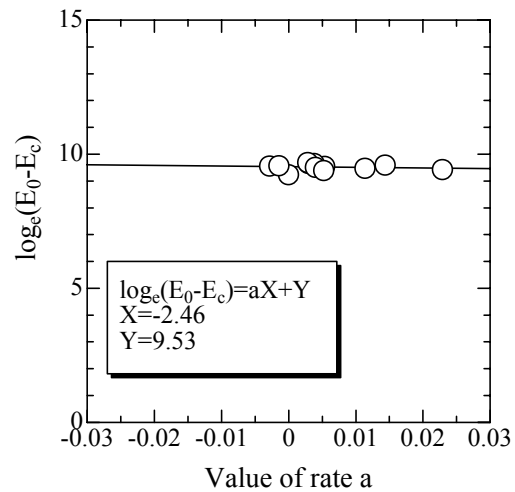


図-5 $\log_e(E_0 - E_c)$ と a 値との相関關係

4.6 相対損傷評価

式(12)により、既存の実構造物において得ることが困難である健全なヤング率 E^* を算出する可能性が示された。そこで、全ての供試体において、実験時のヤング率 E_0 との相対比である E_0/E^* を求めることによって損傷度評価を試みた。その結果を図-6~8 に示す。図には比較のために若材齢、長期材齢では材齢 28 日、凍結融解では 0 サイクルを基準とし、実験で得られたヤング率の相対比 E_0^{ndays}/E_0^{28days} 、

$E_0^{n\text{cycle}}/E_0^{0\text{cycle}}$ (表-2 参照)と推定結果 E_0/E^* を示している。

図より，AE法により推定された健全時のヤング率 E^* と一軸圧縮試験で得られた初期接線ヤング率 E_0 との比である E_0/E^* と $E_0^{n\text{days}}/E_0^{28\text{days}}$ ， $E_0^{n\text{cycle}}/E_0^{0\text{cycle}}$ は変化の傾向はほぼ一致していることがわかる。ただし，図-6 の若材齢では14日以前，図-7 の長期材齢では全般的に，両者の一致はあまりよくない。一方，図-8 の凍結融解では一致は著しい。このように，本推定手法は，損傷劣化について適用性は高いが，未硬化とか，過健全な場合には多少不十分な評価となる可能性が認められた。

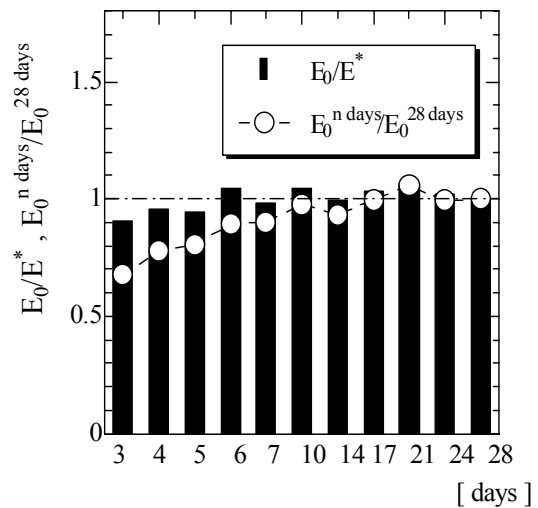


図-8 凍結融解の相対損傷度評価

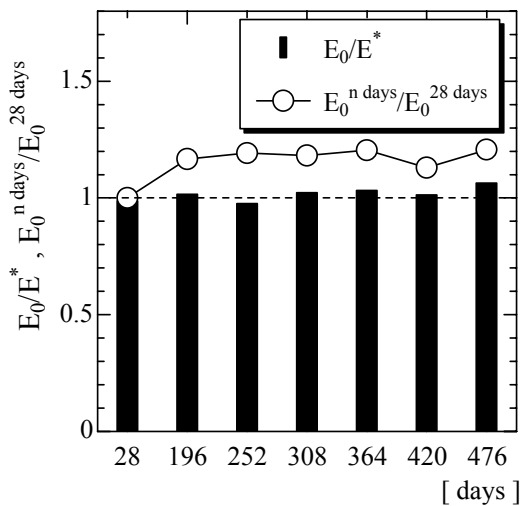


図-6 若材齢の相対損傷度評価

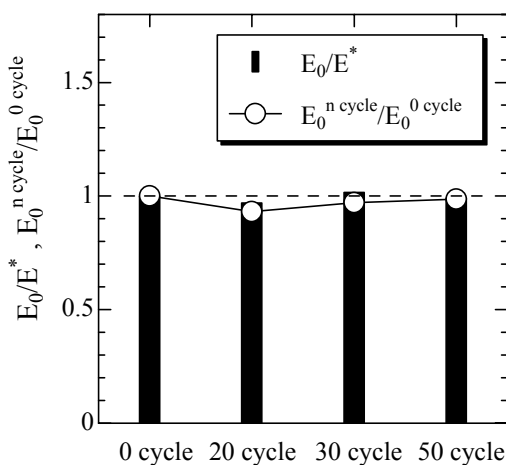


図-7 長期材齢の相対損傷度評価

4.7 データベースを用いた損傷度算出

前節において，健全時のヤング率 E^* を算出し，一軸圧縮試験により得られた初期接線ヤング率 E_0 との相対比を取ることにによる相対損傷度評価の可能性が示された。しかし，この手法では図-5 の相関図を描く際に，ある程度の供試体数が必要となる。これまでの実績では必ず9本以上の供試体データを使用した。しかし，実構造物においては，必ずしも解析に必要な数のコアを採取できるとは限らない。そこで，実構造物において採取されるコアがたとえ1本でも前節の相対損傷度評価が可能になるように，データベースを作成し，そのデータベースに評価を行なう供試体の一軸圧縮試験結果を加えることにより，そのコアの健全時のヤング率を算出し，相対損傷度評価を行なう手法について検討を行なった。

検討対象として，既往の研究⁶⁾により損傷度を算出された既設橋梁の橋台，橋脚より採取した前9本のコア供試体のデータを用いた。図-9には作成されたデータベースにコア供試体の結果を加えたものを示す。白丸(○)で示したデータベースは，全てこれまでに実験室で作製・実験された供試体データで構成されている。これに黒丸(●)のコア供試体データを加え， E^* を評価した。

図-10に、図-9より算出された相対損傷度と前報で算出した相対損傷度との比較を示す。図より、データベースを用いて算出された相対損傷度と前報で算出された相対損傷度は非常によく一致していることがわかる。このことより、実構造物から採取されるコアが少数であっても損傷度評価が行なえる可能性が示された。

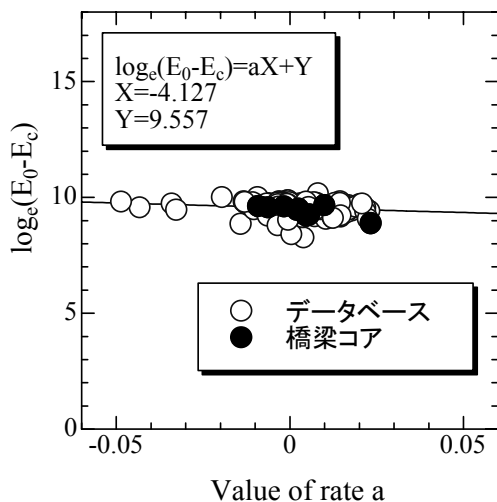


図-9 データベースを用いた $\log_e(E_0 - E_c)$ と a 値との相関関係

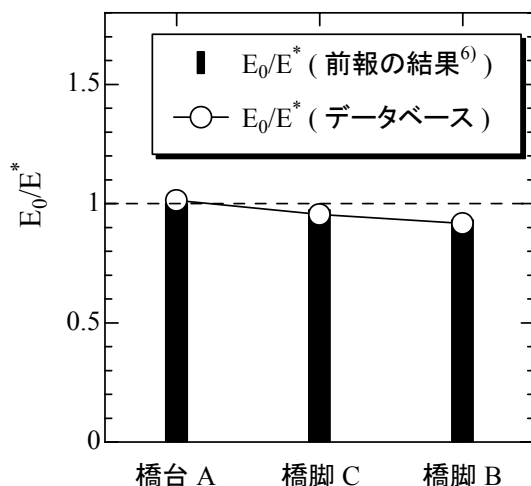


図-10 相対損傷度比較

5. まとめ

- (1) ヤング率の低下 $\log_e(E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析値 a 値との相関関係から、健全時のヤング率 E^* を算出し、実験値のヤング率との相対比を求めることによる、相対損傷度評価の可能性が劣化コンクリートで確認された。
- (2) 実構造物より採取されるコア供試体が、たとえ少数でも、データベースを用いることにより、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ことが認められた。これにより、AE 法による既設コンクリート構造物の損傷度評価の可能性が示されたと考えられる。

参考文献

- 1) 大津政康，丹羽義次：アコースティックエミッションの特性と理論，森北出版，1988
- 2) 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
- 3) 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
- 4) L.M.kachanov：Introduction to Continuum Damage Mechanics，Martinus Nijhoff Publishers，Dordrecht，1986
- 5) Ishibashi, A.，Matsuyama, K.，and Ohtsu, M.：AE Application for Diagnosis of Deteriorated Concrete of Harbar Structures, Proc. 6th Int. Sym. on AE from Composite Materials, pp.145-152, 1998.
- 6) 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.