

AE計測によるコア・コンクリート供試体の 定量的損傷度評価に関する考察

大津 政康¹・渡辺 弘史²

¹工博 熊本大学教授 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪2-39-1)

²大学院学生 熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程 (同上)

Damage estimation of structural concrete from concrete samples is developed, combining acoustic emission (AE) measurement with damage mechanics. AE activity of a concrete sample during a uniaxial compression test is quantitatively analyzed, based on the rate process theory. Empirically, it is confirmed that the rate is substantially associated with pore volume responsible for the damage in concrete. In the present paper, the damage is quantitatively defined by damage mechanics. Correlating the rate with the damage parameter, quantitative estimation of the damage is proposed. An applicability of the procedure is studied in concrete samples of early age and of controlled damage due to freezing and thawing.

Key Words: acoustic emission, rate process analysis, damage mechanics, damage evaluation

1. はじめに

既存鉄筋コンクリート構造物の耐震性調査において、コンクリートの損傷度の評価は重要であると考えられる。例えば、震災後の調査等では特に評価したい項目と言える。しかし、コンクリートは材齢とともに強度が増加する特性があり、かつ、材齢28日での初期強度以外の資料は一般に存在しないため、調査時点での検査結果から損傷度を評価することは容易ではない。多くの場合には設計図書等を参考にコア供試体での強度試験結果と比較しているに過ぎず、定量的損傷度評価法の開発は急務と考えられる。

筆者等は、AE計測をコア供試体の圧縮試験に適用し、コンクリート部分の損傷度を定量的に評価する手法について研究開発を進めている¹⁾。

本論文では損傷力学の概念を導入し、弾性係数の低下として損傷度を定量的に評価する手法の開発を試みた結果について述べる。

2. 圧縮下の損傷力学解析

コア供試体の1軸圧縮試験において、損傷力学における損傷パラメータ Ω を導入し、ヤング率 E の変

化を定義すれば、

$$E = E^*(1 - \Omega) \quad (1)$$

と置ける。ここで E^* は、健全時のヤング率と定義される。図-1のようにヤング率は、初期接線係数 E_0 から破壊時の割線係数 E_c へと変化し、その間に損傷度は Ω_0 から Ω_c へと増加する。コア供試体の採取時に評価すべき損傷度とは、この初期損傷度 Ω_0 に相当する。したがって、

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

$$E_c = E^*(1 - \Omega_c) \quad (2)$$

となる。この式に基づいた応力-ひずみ関係の決定にLoland Model²⁾を導入し、

$$\Omega = \Omega_0 + B\varepsilon^2 \quad (3)$$

と置けば、

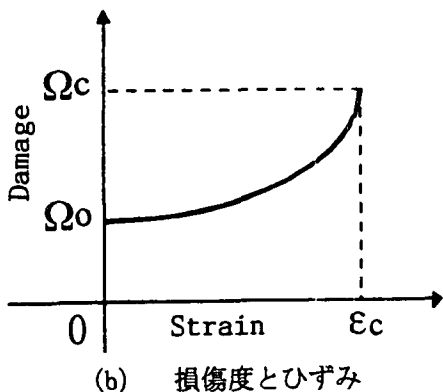
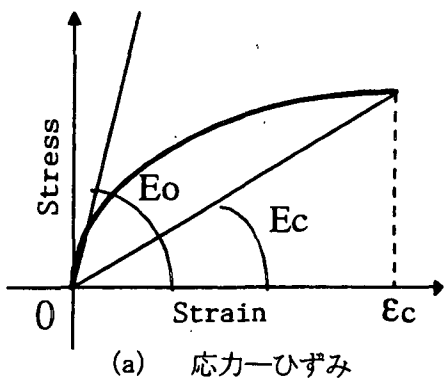


図-1 ヤング率と損傷度

$$\sigma = E_0 \varepsilon - E^* B \varepsilon^{\lambda+1} \quad (4)$$

と書ける。したがって実験で得られた応力-ひずみ関係は、式(4)の係数 λ と B を決定すれば近似される。そこで破壊点は式(4)の極値であると見なし、

$$d\sigma/d\varepsilon = 0, \text{ at } \varepsilon = \varepsilon_c$$

とすれば、

$$\lambda = \varepsilon_c / (E_0 - E_c)$$

$$E^* B = (E_0 - E_c) / (\varepsilon_c^\lambda)$$

を得る。

このように式(4)で応力-ひずみ関係を近似するには、ヤング率 E_0 、 E_c 、限界ひずみ ε_c の決定が必要となる。

この場合に初期接線係数 E_0 は、応力-ひずみ関係から接線として求めなければならない。土木学会標準示方書「設計編」での応力-ひずみ式と式(4)を比較すれば、学会基準では $\lambda = 1$ と設定されているこ

とがわかる。そこで、実験で得られた応力-ひずみ関係で $\lambda = 1$ を仮定し、2次関数として

$$\sigma = a_1 \varepsilon + a_2 \varepsilon^2 \quad (5)$$

により最小二乗近似し、 $\varepsilon = 0$ での接線係数 a_1 として E_0 を決定することにした。

3. AE レートプロセス解析と損傷度

1軸圧縮下のAE発生数 N は、レートプロセス解析により応力レベル V (%)の関数として、

$$N = C \cdot V^a \exp(bV) \quad (6)$$

と表わせることを既に提案している¹⁾。これと振幅分布の統計則、

$$n(A) = k \cdot A^{-m}$$

とを組み合わせれば、圧縮試験中の損傷度の累加は、以下のように表現することができる。

$$\begin{aligned} \Omega_c - \Omega_o &= \int n(A) \cdot A \cdot DA \\ &= (1 - m) A_o \cdot C \cdot (100)^a \exp(100b) / (2 - m) \end{aligned}$$

ここで、 A_o は計測可能な最小振幅値である。上式からわかることは、試験中の損傷の累加が係数 m 、 a 、 b に関連していることである。

実際にこれまでの実験データを用いて相関係数を決定した結果、係数 a が、最も相関の高いことが判明した¹⁾。この結果は、係数 a の増加がコンクリート中の損傷に係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³⁾ともよく一致している。

式(2)によれば、損傷度の増加をヤング率の変化として表せば、

$$\Omega_c - \Omega_o = (E_0 - E_c) / E^* \quad (7)$$

となる。以上の結果に基づけば、実験で決定可能なヤング率の変化 $E_0 - E_c$ が係数 a と大きな相関を有

していることを示唆している。そこで、この関係から E^* を推定することを試みる。

4. 実験概要

コア供試体への適用可能性を検討するためにコンクリート円柱標準供試体（直径 10 cm x 高さ 20 cm）を作成し、若材齢のものとして 28 日水中養生後に水中凍結融解試験を実施して人工的に劣化させたものを用意した。コンクリートの配合は、一般的な強度のものを想定し、表-1 に示すものを用いた。

表-1 コンクリートの配合

単位量 (kg/m ³)				空気量 (%)
W	C	S	G	
179	326	816	1040	7.6

粗骨材の最大粒径は 20 mm であり、AE 剤により空気量は調整している。

なお、若材齢の供試体は、Loland モデルの近似度の確認と、応力-ひずみ関係における 2 次関数近似の妥当性を確認するためのものであり、材齢 7 日、14 日、21 日、28 日において各 3 本の圧縮試験を実施した。

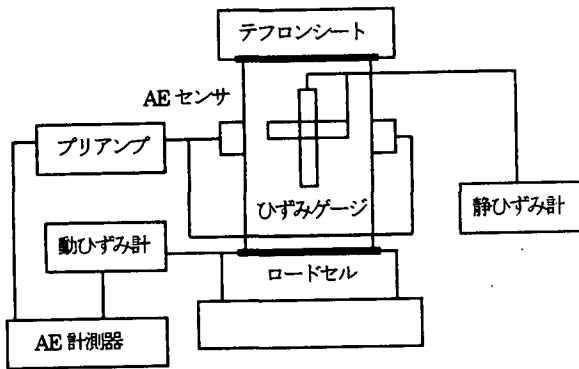


図-2 試験装置

凍結融解試験は、水中凍結融解装置（3℃から-16℃までを 3 時間で繰り返す）により、100 サイクル、200 サイクル、300 サイクルを実施した。その後、図-2 に示すようにひずみゲージの他に AE センサを取り付けてひずみと AE 事象を同時に計測しながら圧縮試験を実施した。この場合も同一条件での実験供試体は 3 本である。

5. 実験結果及び考察

(1) 初期ヤング率

若材齢の供試体で得られた応力-ひずみ関係の 1 例を図-3 に示す。これより、式(5)の近似式から接線ヤング係数を決定した。しかし、一般にコンクリ

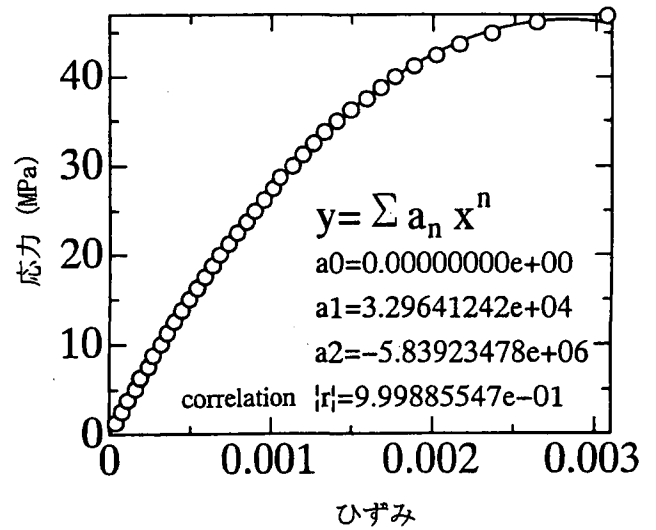


図-3 応力-ひずみ計測結果

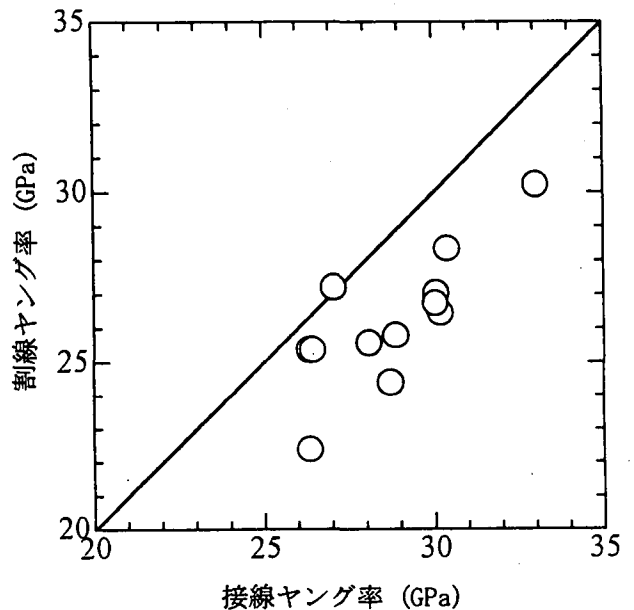


図-4 ヤング率の比較

ートの圧縮試験では 1/3 強度点と原点の割線係数でヤング率は求められる。そこで、ここで求めた接線ヤング係数を従来の方法で求めた割線ヤング係数と比較した。結果を図-4 に示す。明らかに接線ヤング率は割線係数より大きくなっている。この差は、

一般に動的ヤング率が、静的な割線ヤング率より大きく決定される理由の一つとされている。そこで、共鳴法によって縦共振周波数 f を測定し、

$$E_d = (1+\nu)(1-2\nu)\rho(2Lf)^2/(1-\nu) \quad (8)$$

によって動的ヤング率を求めた。ここで、 ν はポアソン比、 ρ は密度、 L は供試体高さ (20 cm) である。 $\nu = 0.25$ として接線ヤング率を E_d と比較した結果を図-5 に示す。

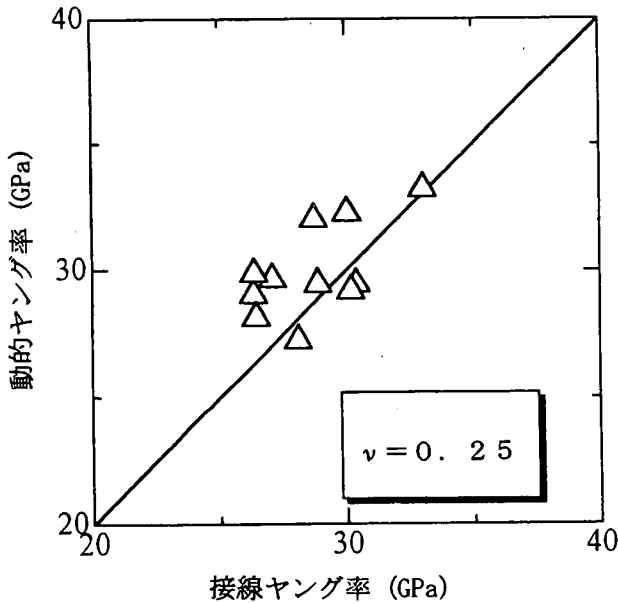


図-5 動的・静的ヤング率

このようにポアソン比の設定は多少実際のコンクリートより大きめではあるが、動的ヤング率と接線ヤング率がよく対応することが認められる。これより、コンクリート工学で知られている動的ヤング率と静的ヤング率の差異は、ポアソン比の無視が影響しており実際には大きくないことが明らかになった。

ところで、接線ヤング率の決定には式(5)のように式(4)で $\lambda=1$ を仮定した。この妥当性を確認するために、若材齢の供試体の試験でのヤング率の結果から λ を求めた。その結果を図-6 に示す。

材齢とともに λ は大きくなり、材齢 28 日で 1 となることが明確に認められる。それ以前の段階でも多少 1 より小さいがほぼ 1 であり、土木学会示方書での応力-ひずみ関係の実用性ならびに、式(5)の妥当性が確認できたと考えられる。

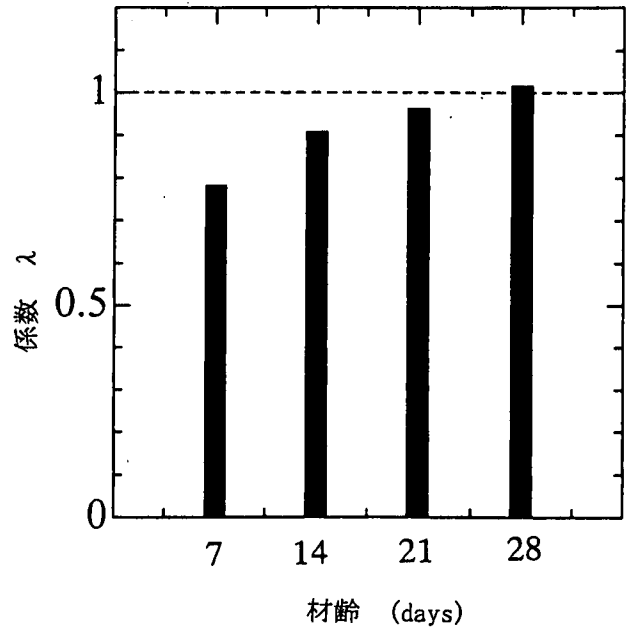


図-6 係数 λ の変化

(2) 凍結融解試験

凍結融解試験の各サイクル終了時に 3 本の供試体を圧縮試験した。その力学的特性の平均値を表-2 に示す。

表-2 供試体の力学特性

サイクル数	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)
0	45.4	31.1
100	42.4	31.1
200	45.7	29.6
300	43.7	29.3

この結果を 0 サイクルに対する相対値として整理した結果を図-7 に示す。強度の低下はあまりなく、ヤング率もわずかに低下している程度である。これは、凍結融解作用による劣化を低減するために空気量を多めにした影響であると考えられる。

(3) 損傷度の評価

AE 発生挙動を図-8 のようにレートプロセス (式(6)) で近似し、係数 a を求めた。これらを図-9 のようにヤング率の変動 (E_0-E_c) と a 値の関係としてプロットし、相関関係を線形近似することを試みた。これより、線形近似関係から

$$\ln(E_0 - E_c) = Xa + Y \quad (8)$$

が成立し、 $a=0$ の時に E_0 は E^* に一致すると仮定した。その場合には、健全な状態におけるヤング率 E^* は、

$$E^* = \exp(Y) + E_c \quad (9)$$

と決定される。

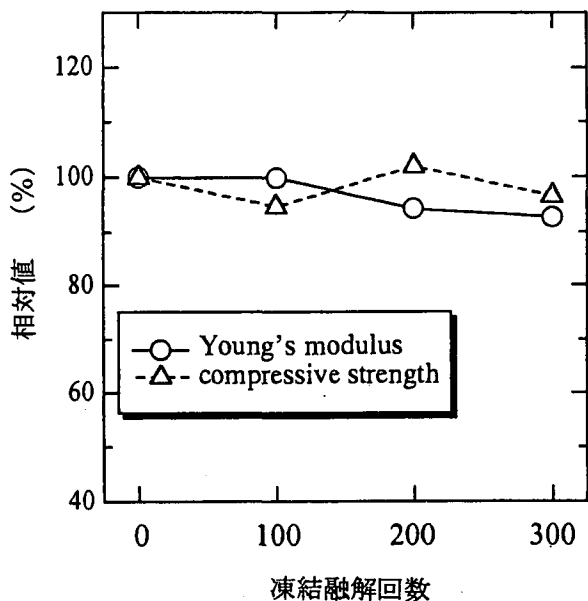


図-7 ヤング率と強度の変化

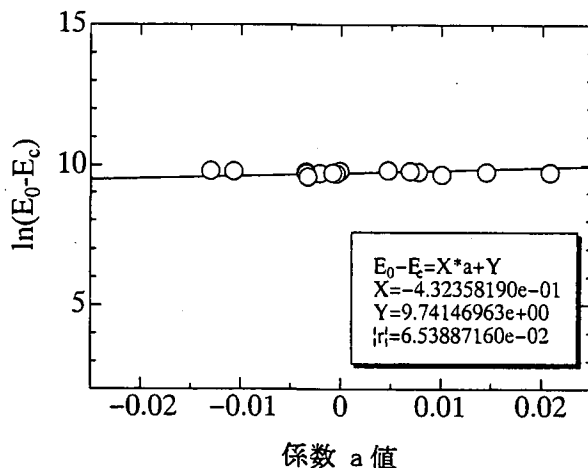


図-9 ヤング率の変動と係数 a

そこで、式(9)により E^* を求め、各サイクル終了時の供試体の平均値としての初期接線ヤング率 E_0 と比 E_0/E^* を取った結果を図-10に示す。ここでは比較のために実験での0サイクル時の接線ヤング率 E_0^0 と各サイクル終了時での接線ヤング率 E_0^n の比も示している。

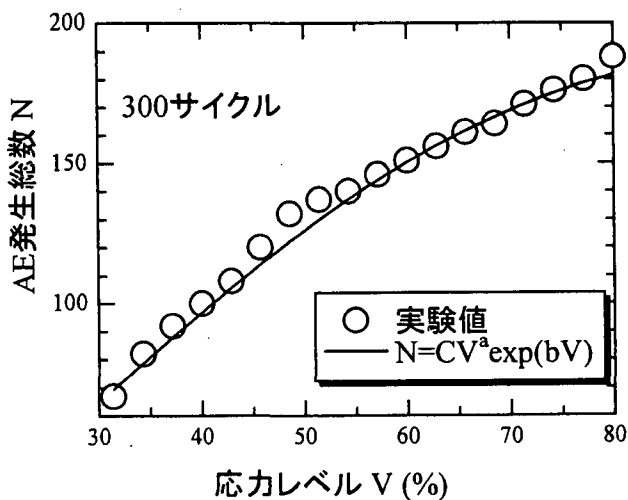
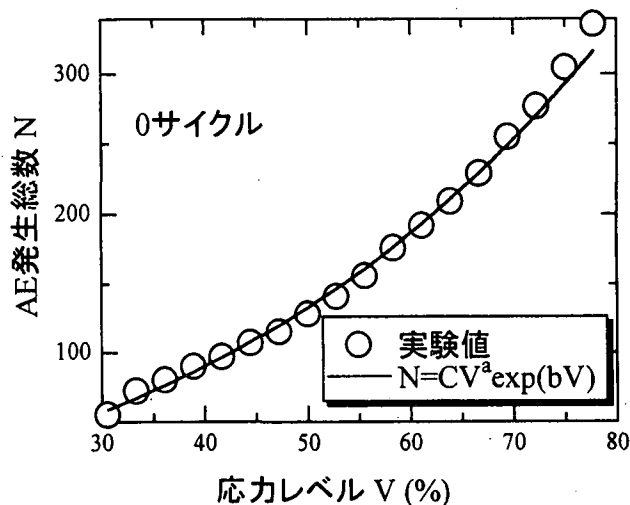


図-8 AE レートプロセス解析結果

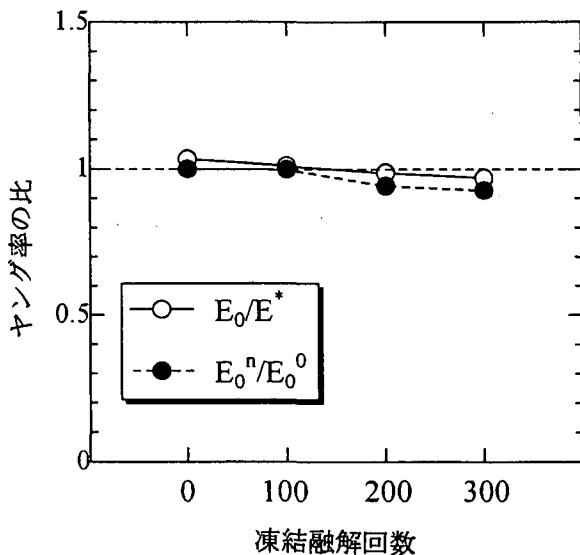


図-10 ヤング率比の変化

AE計測から求めたヤング率の低下は、実際に観察されたヤング率の低下より多少すくないが、傾向としてはよく一致していることが確認できる。このAE計測を用いた手法の特長は、初期のヤング率についてのデータ、あるいは建設時におけるヤング率のデータは不要であることである。したがって、コア試験時のAE計測のみから、コア採取時点でのコンクリートの損傷度を定量的に評価する新たな検査法として実用化が期待できる。

6. 結論

本研究は、AE計測をコア供試体の圧縮試験に適用し、コンクリート部分の損傷度を定量的に評価する手法の研究開発に関する成果をまとめたものである。新たに損傷力学の概念を導入し、弾性係数の低下として損傷度を定量的に評価する手法を、これまでの成果と結び付け、定量的な損傷度評価を試みた結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 損傷力学に基づいて損傷度をヤング率の低下により定義した結果、コア供試体の一軸圧縮試験時のヤング率の変化 $E_0 - E_c$ が AE レートプロセス解析結果の係数 a と大きな相関を有していることがあきらかになった。
- (2) この関係に基づいて、ヤング率の変化と AE レートプロセス解析の結果から健全なヤング率 E^* を推定する手法を提案した。
- (3) ヤング率の決定に接線ヤング率を用いる方法を検討した結果、ポアソン比を 0.25 とすれば、動的ヤング率と接線ヤング率がよく対応することが認められた。これより、コンクリート工学で知られている動的ヤング率と静的ヤング率の差異は、ポアソン比を考慮していないためもあり、一般に知られている程に実際には大きくないことが明らかになった。
- (4) 接線ヤング率の決定に損傷モデルで $\lambda=1$ を仮定した。この妥当性を確認するために、若材齢の供試体で実際に λ を求めた。その結果、材齢とともに λ は大きくなり、材齢 28 日で 1 となることが明確に認められた。

- (5) 提案する AE 計測から求めたヤング率の変化を、凍結融解試験で人工的に劣化させた供試体において評価した。その結果、ヤング率の低下は、実際に実験で観察されたヤング率の低下より多少は少ないが、傾向としてはよく一致していることが確認できた。
- (6) AE 計測を用いた手法の特長は、初期のヤング率についてのデータ、あるいは建設時におけるヤング率のデータは不要であることである。したがって、コア試験時の AE 計測のみから、コア採取時点でのコンクリートの損傷度を定量的に評価する新たな検査法が提案できたと考えられる。

今後、さらにデータ収集を図ることにより、評価手法の確立と精度の向上を進めたい。

参考文献

- 1) 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, 271-276, 2000.
- 2) Shah, S. P., Swartz, S. E., and Ouyang, C.: Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995.
- 3) Ishibashi, A., Matsuyama, K. and Ohtsu, M.: AE Application for Diagnosis of Deteriorated Concrete of Harbor Structures, Proc. 6th Int. Sym. on AE from Composite Materials, 145-152, 1998.