

既存コンクリート構造物の欠陥探査と損傷度評価 のための非破壊的な調査法に関する研究

大津 政康¹・飯田 剛史²・渡辺 健²

¹正会員 工博 熊本大学教授 工学部環境システム工学科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

²学生員 工修 熊本大学大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

To investigate the structural integrity of concrete structures, a variety of techniques for nondestructive evaluation (NDE) are under development. In the present paper, to identify internal defects visually, stack imaging of spectral amplitudes based on the impact echo is developed. In order to estimate the damage degree of concrete from core samples, the rate process analysis of acoustic emission (AE) activity is proposed and examined. Results on these two techniques are discussed.

Key Words : concrete structure, nondestructive evaluation, acoustic emission, impact echo

1. はじめに

既存コンクリート構造物の点検・調査には様々な検査法が用いられている。本研究では、非破壊的な内部欠陥の探査とコンクリート躯体の損傷度評価に着目し、衝撃弾性波法 (Impact Echo) の改良とコア供試体の一軸圧縮試験にアコースティック・エミッション (AE) 法を適用する調査法について検討した。

2. コンクリート内部欠陥の評価法

(1) SIBIE の開発

衝撃弾性波法は、impact-echo 法とも言われ欧米を中心にコンクリート構造物の内部欠陥探査への適用が報告されている。しかし、実用化にあたっては各種の問題点が指摘されており、これを弾性波動論に基づいて検討し問題点を解明した¹⁾。その結果、図-1に示す版厚、鉄筋、空隙による共振周波数 f_T 、 f_{steel} 、 f_{void} などを衝撃力に対する応答波形のスペクトル図から抽出することは一般には容易ではなく、また、これらの周波数を十分に包含する周波数帯の必要性が明らかになった。

そこで、計測装置は 50 kHz までの帯域を有する加速度計システムを用い、衝撃入力には径 10 mm 長さ

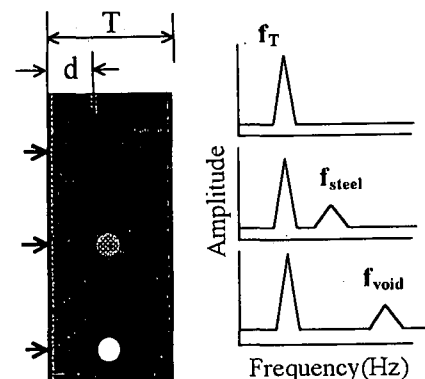


図-1 Impact Echo 法の原理

20 mm のアルミ弾をコンプレッサーを用いて打ち当てることにした。実験を行ったのは、図-2に示す断面のコンクリート供試体 (圧縮強度: 37.9 MPa) であり、内部に径 30 mm の空隙を有する断面と無欠陥の断面で実験を行った。図には、別に実施した鋼球落下の様子も示している。しかし、50 kHz までの周波数帯を確保するには、Herz の衝撃理論によれば径 5 mm 以下の鋼球を使用せねばならず、入力の振幅が十分ではなかった。

なお、使用したコンクリート供試体で共振周波数を算定したところ、 $f_T=8$ kHz、 $f_{void}=19.1$ kHz であった。

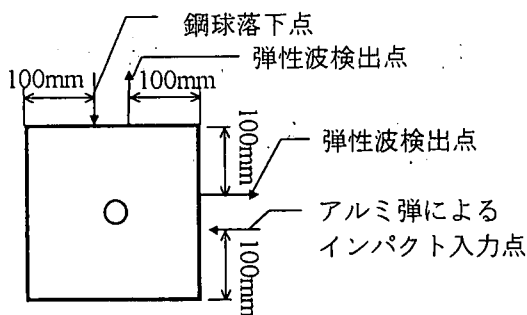


図-2 衝撃実験の概要

この場合、参考文献1)で考慮した空隙位置による半波長の共振周波数は $f_{\text{void}} = 38.9 \text{ kHz}$ となる。したがって、これらの周波数は 50 kHz までの帯域があれば十分観察されることが確認された。

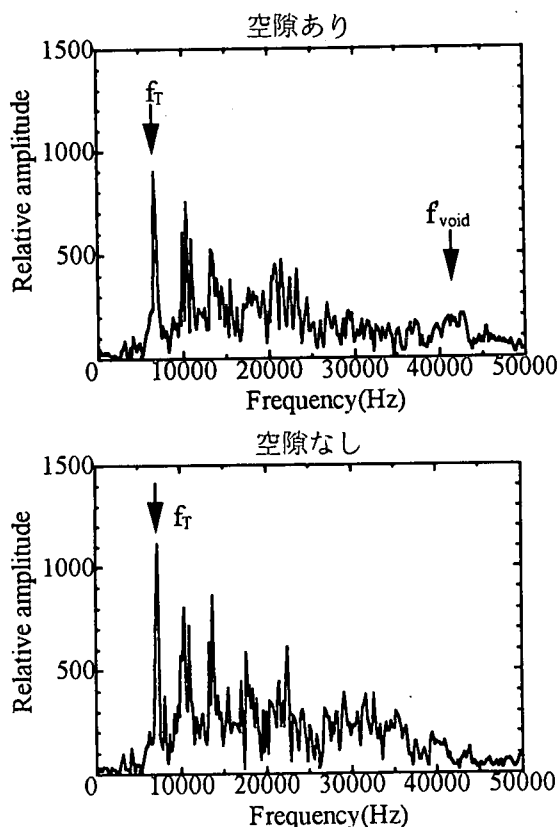


図-3 スペクトル解析結果

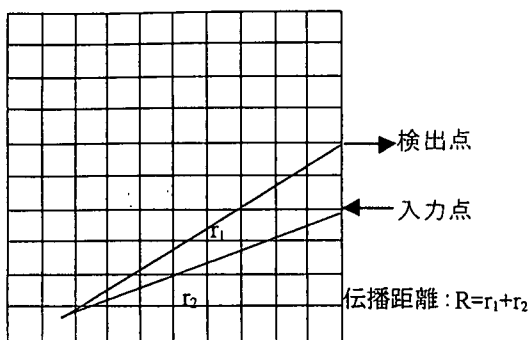


図-4 イメージングの原理

図-3に空隙部で検出された加速度波形とそのフーリエ・スペクトルを示す。これより、 f_r は明確に認められるが、 f_{void} は他のピーク周波数に紛れて認められず、 f_{void} は何とか認められる程度であることがわかる。これが、図-1の関係のみから欠陥位置を決定する Impact Echo 法の問題点である。

このことから、検査断面のイメージング処理による方法 (Stack Imaging of Spectral Amplitudes based on Impact Echo: SIBIE) を開発した。それは、図-4のように測定断面を要素に分割し、入力点から各要素中心で反射し出力点で検出される場合の伝播距離 $R = r_1 + r_2$ を求め、仮定の共振周波数

$$f_1 = v_p / (R/2), f_2 = v_p / R, f_3 = v_p / 2R \dots \dots \quad (1)$$

を求める。ここで、 v_p はP波の伝播速度である。式(1)の周波数に相当するスペクトル振幅を図-3の検出スペクトルより求め、その値を要素毎に重ね合わせて各要素の stack image とした。

(2) 解析結果

空隙のある断面と無い断面で結果を、図-5に示す。ここで、波形の記録のサンプリング時間 $\Delta t = 5 \mu \text{ sec}$ であり $v_p = 4496 \text{ m/s}$ を考慮すると最短の反射経

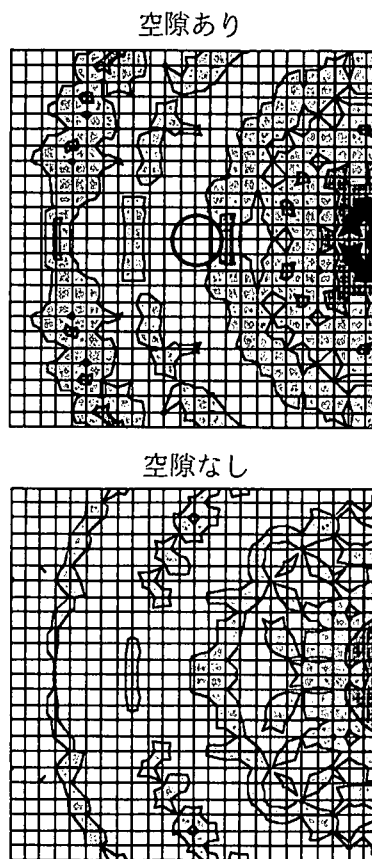


図-5 SIBIE 解析結果

路の距離は、 $\Delta x = vP \cdot \Delta t/2$ より約11 mmとなる。ことから、断面分割は10 mmで行っている。図より明らかなように空隙の存在による像が観察され、SIBIEの有効性が確認された。

3. コンクリート損傷度の評価法

(1) 損傷力学とAEレートプロセス解析

コンクリート躯体の力学的な特性の評価のためには、コア供試体の圧縮試験が一般に実施される。そこで、強度以外の情報を得るためにAE計測を適用することを提唱し、AE発生挙動はレートプロセス解析により、定量的に評価できること明らかにしている²⁾。これによれば、圧縮試験時のAE発生挙動は、発生頻度をN、圧縮強度に対する応力レベルをV(%)として

$$N = C \cdot V^a \cdot \exp(bV) \quad (2)$$

と表される。ここで、Cは積分定数、a、bは特性パラメータである。強度45.4 MPaのコンクリート供試体で300サイクルの水中凍結融解試験を実施した後の圧縮試験時に観察されたAE発生挙動の例を図-6に示す。図より式(2)によってAE発生挙動が近似できることは明らかである。

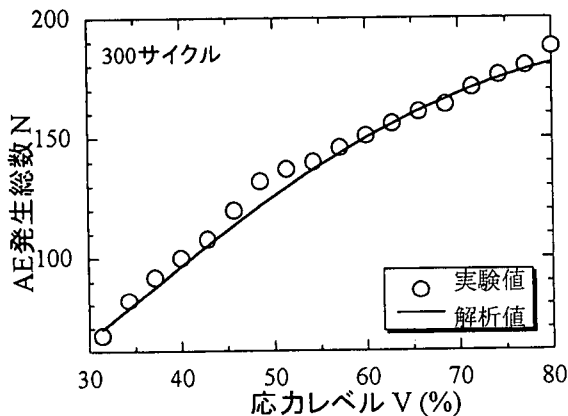


図-6 AE発生挙動

これまでの、このような結果から係数aの変化と劣化度の関係について研究してきた³⁾。ここでは、さらに損傷力学を導入し、損傷度パラメータの推定をAEレートプロセス解析結果より試みる。

損傷力学では、スカラー損傷パラメータΩは、

$$\Omega = 1 - E/E^* \quad (3)$$

と定義される。ここで、Eは材料の試験時のヤング

率、E*は健全無垢な場合のヤング率である。ローランド³⁾は、一軸圧縮試験時の損傷増加をひずみεの関数として

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (4)$$

とモデル化した。この時、Ω₀は圧縮試験時に既にコンクリートに集積されている初期損傷度である。式(3)と組み合わせれば

$$\begin{aligned} \sigma &= E^*(1 - \Omega) \\ &= E^*(1 - \Omega_0 - A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \\ &= E^*(1 - \Omega_0) \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \\ &= E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \end{aligned} \quad (5)$$

が導かれる。式(5)で圧縮破壊点を $d\sigma/d\varepsilon = 0$ であると見なせば

$$\lambda = E_c/(E_0 - E_c) \quad (6)$$

となる。ここで、E₀は式(5)で定義された初期ヤング率、E_cは破壊点における割線ヤング率である。

さらに、式(6)と式(3)より

$$\Omega_0 = 1 - (1 + \lambda)(\Omega_c - \Omega_0) \quad (7)$$

が誘導される。なお、Ω_cは破壊時の損傷度である。これより応力-ひずみ曲線が求まれば、式(6)より係数λが決定されるので、損傷度の累積Ω_c - Ω₀が求められるならば、式(7)によって初期損傷度が推定出来る。この手法が確立されれば、健全無垢なコンクリートでの値を必要とせずに推定できるという特徴がある。

(2) 検討結果

この手法の妥当性を検討するには予め初期損傷度の明らかなコンクリート供試体が必要であるため、同じコンクリート供試体で水中凍結融解試験を100, 200, 300サイクル実施した後に圧縮試験を行った。その試験結果を表-1に示す。

表-1 凍結融解試験後の力学特性

Cycle	圧縮強度(MPa)	ヤング率(GPa)
0cycle	45.36	31.12
100cycle	42.41	31.14
200cycle	45.65	29.34
300cycle	43.69	29.55

これより0サイクルの供試体は無垢なコンクリート (E^*) と見なし、式(3)により各サイクルでの初期損傷度 ($1 - E/E$) を決定した。

さらに式(3)に基づけば、損傷度の累積は

$$\Omega_c - \Omega_o = (E_o - E_c)/E^* \quad (8)$$

となるので、 $E_o - E_c$ とレートプロセス解析の a 値の関係について検討した。その様子を図-7 に示す。これらの関係を線形近似すれば

$$E_o - E_c = E^*(\Omega_c - \Omega_o) = p \cdot a + q \quad (9)$$

となり、無垢な場合 $E_o = E^*$ は $a = 0$ のときにあると仮定すれば

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

が導かれる。したがって、図-7 の線形近似式の切片 q を求めれば、 E^* が式(10)から推定できる。

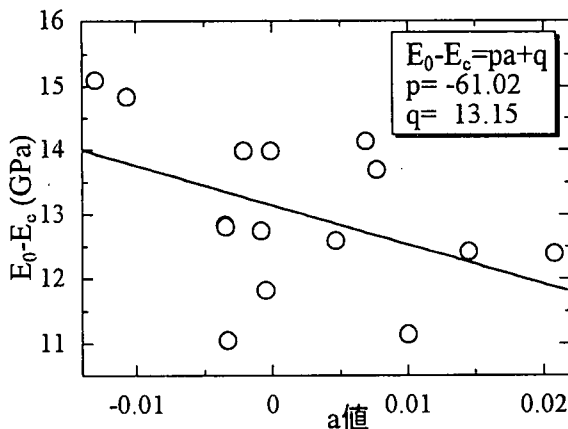


図-7 a値とヤング率の関係

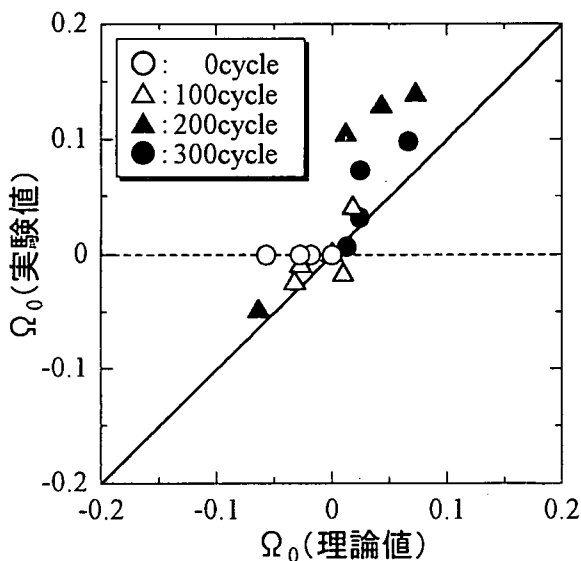


図-8 初期損傷度の推定結果

実際に、凍結融解試験で劣化させたコンクリート供試体の一軸圧縮試験時の結果より、各サイクルにおける Ω_o 及び Ω_c を求め、AE計測の結果より式(8)と(10)から $\Omega_c - \Omega_o$ を決定した。次に、これを式(7)に代入し試験時に得た初期損傷度 Ω_o と比較した。

その結果が図-8に示されている。これよりAEレートプロセス解析によって健全無垢な供試体に対する損傷度を決定する可能性が示されたと考えられる。

4. 結論

非破壊的な内部欠陥の探査と構造体コンクリートの損傷度評価に着目し、衝撃弾性波法の改良とコア供試体の一軸圧縮試験にアコースティック・エミッション(AE)法を適用する調査法について検討した。

(1) Impact-echo法を弾性波動論に基づいて検討し問題点を解明した。特に、この手法で本質的である共振周波数をスペクトルから抽出する点については、実用的とは言えないことから、検査断面のイメージング処理による方法をSIBIEとして開発し改良した。そして、本手法を内部空隙の検出に適用した結果を報告した。

(2) コンクリートの力学的な特性の評価のためには、コア供試体の圧縮試験が実施される。その際にAE発生挙動をレートプロセス解析する手法を提唱した。さらに損傷力学を導入し、損傷度パラメータの推定をAEレートプロセス解析結果より試みた結果を報告した。これによって、健全時のデータの無いコア供試体で損傷度を推定する可能性が示された。

参考文献

- 1) 渡辺 健、大津政康、友田祐一：インパクトエコー法によるPCグラウト充填度評価に関する考察、材料、Vol. 48, No. 8, pp.870-875, 1999
- 2) M. Ohtsu: Estimation of Crack and Damagr Progress in Concrete by Quantitative AE Analysis, Materials Evaluation, Vol. 57, No. 5, pp.521-525, 1999
- 3) M. Ohtsu, T. Iida: Damage Estimation of Concrete Samples based on the Rate Process Analysis of AE, Proc. 8th Int. Conf. on Structural Faults and Repair (in CD-ROM), 1999