

論文 SIBIE による PC グラウト未充填部の評価に関する考察

三原 真一^{*1}・Ninel Ata^{*2}・大津 政康^{*3}

要旨: インパクトエコー法はコンクリート構造物の内部欠陥を検出する非破壊検査手法であり, 検出波動の周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥を検出する。しかし, 実際にピーク周波数のみによる内部欠陥の同定は困難な場合も多く, 非破壊検査手法として確立されているとは言い難い。そこでインパクトエコー法により得られた周波数スペクトルを用いて断面上に画像化する SIBIE と名付けた手法を現在開発中である。本論では SIBIE の精度向上のため, インパクトエコー法を行う際の弾性波の入力・検出方法について検討し, 2次元 BEM 解析を用いた応力解析により考察した結果を報告する。

キーワード: インパクトエコー法, 周波数スペクトル, 弾性波, BEM 解析

1. はじめに

コンクリート構造物の一つとしてプレストレストコンクリート (PC) があるが, グラウトの充填不良は PC 鋼材の損傷を始めとして橋梁の健全性に大きな影響を及ぼす。充填度を確認する方法として, 種々の非破壊検査手法が提案されているが, 確固たる成果を得ていない。

そこで, コンクリート構造物の非破壊検査手法の一つであるインパクトエコー法¹⁾において得られる周波数スペクトルにより, 調査断面において弾性波の反射の影響を画像化し未充填部を評価する, SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on the Impact Echo)²⁾という手法を研究中である。

本研究では PC グラウト未充填部検出の評価技術としての SIBIE の確立および信頼性の向上を目的とし, グラウト未充填部・充填部を有するコンクリート供試体について実験および解析の双方よりグラウト未充填部検出の実務性を検証した。ここで, BEM による応力解析を行うことにより SIBIE の改良を行った。さらに, イン

パクトエコー法を用いる際の波形の検出法についても検討を加えた。

2. グラウト未充填部検出の原理

2.1 インパクトエコー法

インパクトエコー法の概念によれば, 図-1 に示すように板厚による共振周波数 f_r , 内部欠陥反射による共振周波数 f_{void} が出現するとされている。供試体中を伝わる P 波の伝播速度を C_p とすると, 出現するピーク周波数は図-1 に示

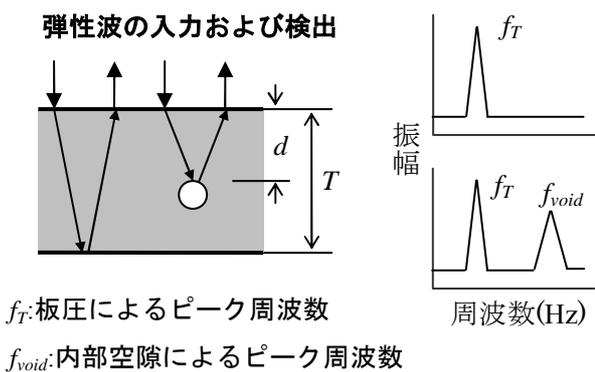


図-1 インパクトエコー法による欠陥検出の原理

*1 熊本大学 自然科学研究科博士前期課程環境土木工学専攻 (正会員)

*2 熊本大学 自然科学研究科博士後期課程共生科学専攻 修士

*3 熊本大学大学院 自然科学研究科共生科学専攻教授 工博 (正会員)

す値を用いることにより以下の式で表される。

$$f_T = C_p / 2T \quad (1)$$

$$f_{void} = C_p / 2d \quad (2)$$

次に波動現象と欠陥位置までの深さについて考察する。寸法と波長の寸法パラメータとして、

$$\alpha = fL / v = L / \lambda \quad (3)$$

が導かれている³⁾。ここで f : 周波数, L : 部材長, v : 弾性波の波速, λ : 波長である。空隙の反射の影響による攪乱は $\alpha \geq 1$ のときに顕著に現れるとされる。したがって、グラウトの未充填部による反射の影響のスペクトルピークが発生する周波数として v を C_p , L をシース管の埋設深さ d に置き換えると、 $\alpha = 1$ の場合に

$$f'_{void} = C_p / d \quad (4)$$

が導かれる。式(4)は高周波数帯のピーク周波数の存在を示唆している。

2.2 SIBIE の原理

周波数スペクトルのピーク周波数は、理論的には入力された弾性波が不連続面で反射することにより生じる。そこで、供試体断面での弾性波の反射位置を画像化するために SIBIE という画像処理法を考案している²⁾。手順は、まず解析対象の断面を図-2に示すように正方形要素に分割しモデル化する。次に、分割された各要素の中心からの弾性波の反射による共振周波数を求める。その際、弾性波は入力点、要素中心点、出力点といった伝播経路を通るが、その最短伝播経路を R とすると式(5)で表される。

$$R = r1 + r2 \quad (5)$$

解析対象中を伝わる P 波の波速を C_p とすると共振周波数は、式(6)のように考えられる。

$$f_1 = C_p / (R/2), f_2 = C_p / R \quad \dots \quad (6)$$

$$f_3 = C_p / (2R), f_4 = C_p / (3R)$$

実測した周波数スペクトルにおいて、式(6)で求められる理論的な反射による共振周波数の振

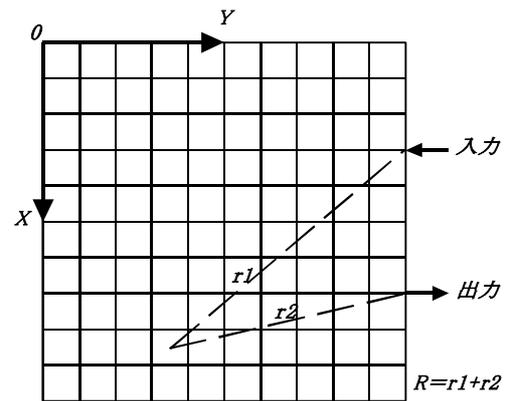


図-2 イメージングモデル

幅値を合計することにより各要素からの反射の影響を検出する。

ここで合計の対象となる周波数は f_1 と f_2 とした場合に最適な結果が得られることが認められている⁴⁾。さらに f_1 の振幅を強調するため、

$$f_{r1} = C_p / r1, f_{r2} = C_p / r2 \quad (7)$$

と二つに分けることにする。よって合計する周波数は f_{r1}, f_{r2}, f_2 の三つとし、さらに上限を 50kHz とした。なお下限については 5.1 節で検討を行う。

3. 実験概要

3.1 供試体

図-3に示すような 300×350×500mm の角柱供試体で供試体内部に径 30mm のシース管を 2 本埋設し、その内の一本のシース管にグラウトを充填した。コンクリートの配合を表-1に、力学的特性を表-2に示す。

供試体中の P 波の伝播速度 C_p を透過法により測定したところ、4200m/s であった。

表-2 コンクリートの力学的特性

圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	ポアソン 比
39.1	27.3	0.21

表-1 コンクリートの配合表

粗骨材の 最大寸法(mm)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (cc)	スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G			
20	50	172	344	830	1021	104	3.8	6

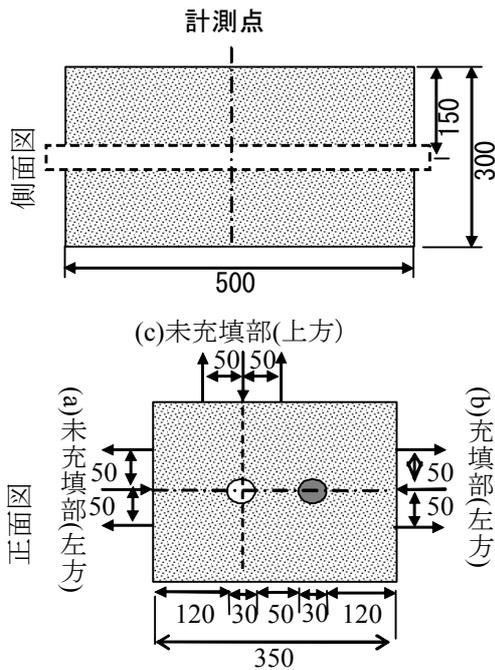


図-3 供試体と計測点

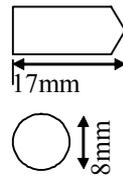


図-4 アルミ飛翔体

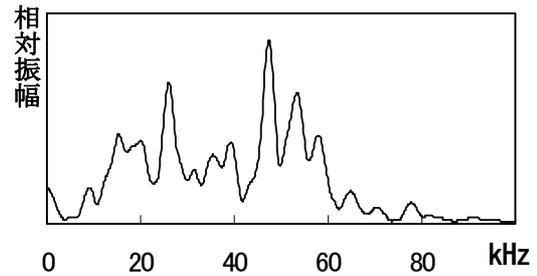


図-5 アルミ飛翔体の周波数応答スペクトル

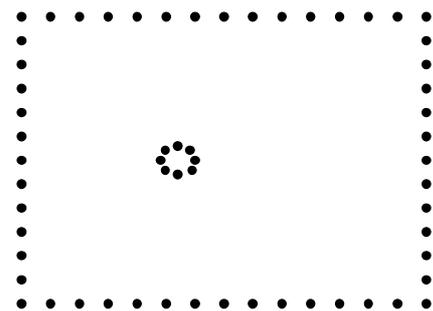


図-6 2次元BEMモデル

3.2 インパクト試験

供試体に衝撃を入力するため、図-4に示すような直径8mm、長さ17mmのアルミ飛翔体を使用し、空気圧約0.05MPaで図-3に示す(a)グラウト未充填部(左方)、(b)グラウト充填部(右側)、(c)グラウト未充填部(上方)の三ヶ所についてインパクト試験を行った。図-3の矢印はインパクトの位置および波形を計測する位置を示している。式(4)、式(5)より表-3に示すような共振周波数が現れると予測される。アルミ飛翔体の周波数応答を計測した結果を図-5に示す。この図から60kHz程度の周波数帯域までに存在するピーク周波数の検出が可能であることが確認できた。これより、表-3に示すピーク周波数は全て検出できると考えられる。

インパクト試験は、図-3に示すようにシース管中央を衝撃の入力点とし、上下50mmの2ヶ所に加速度計を設置し波形を検出した。記録

表-3 供試体における共振周波数(kHz)

	(a)	(b)	(c)
f_{void}	17.5	10.5	16.8
f'_{void}	35.0	21.0	33.6
f_T	6.0	6.0	7.0
f'_T	12.0	12.0	14.0

した波形にFFT処理を行い周波数スペクトルを求めた。波形を記録する際、サンプリングタイムは4μsec、サンプリング数は2048とした。

4. 解析概要

SIBIE解析においては周波数 f を連続的に0~50kHzまで変化させて解析することにより、供試体における周波数スペクトルの再現を境界要素法(BEM)解析により行った。その結果を用いてSIBIE解析を行った。BEM解析に用いた実験供試体断面のモデルを図-6に示す。境界の節点間隔は5mmとし、グラウト充填部は健全部として特にモデル化は行わなかった。BEM解析を行う際、密度は2.423g/cm³としポアソン比と弾性係数は表-2の値を使用した。

5. 結果および考察

5.1 SIBIEの改良

SIBIEを行う際、理論的には2.2節で述べた方法によりコンクリート内部の欠陥を検出することができるが、欠陥部の反射が弱いため無関係の反射源が確認されることがあった。そのため、

BEM 解析で得られる周波数スペクトルを用いて SIBIE の改良を検討した。図-7 以降の SIBIE 画像の見方として、色が濃いほどその要素での周波数スペクトルの振幅値の和が大きく、その要素からの反射の影響が強いことを意味する。断面図中の円形はグラウト未充填部を意味しており、矢印は衝撃の入力点および波形の検出点を示している。イメージングモデルは 300mm×350mm の大きさで、要素点間隔を 10mm とした。

図-7 は BEM 解析より得た周波数スペクトルを元に、合計する周波数の下限を従来の f_T として SIBIE を行った結果である。これより、画像中央付近に同心円状のやや強い反射が見られる。これは図-9 に黒丸で示すピーク周波数の影響であると考えられる。このピーク周波数について BEM 解析を用いて応力解析 (σ_{xx}) を行った結果を図-10 に示す。この図より板厚付近で引張力が大きいことがわかる。しかし、図-7 の中央部の同心円状の反射源に相当する応力の

変化は存在しない。よって図-9 に示すピーク周波数は $\alpha=1$ の場合の板厚によるピーク周波数

$$f'_T = Cp/T \quad (8)$$

であると考えられた。そこで SIBIE を行う際、足し合わせる周波数の下限を f'_T とした。その結果を図-8 に示す。図-7 と図-8 を比較すると中央付近の同心円状の反射をほぼ除去することができたといえる。

5.2 インパクト入力試験方法の比較

従来用いていたインパクトである一点入力一点検出で SIBIE を行った実験の結果を図-11(a) に、新たに用いたインパクト・検出法である一点入力二点検出で SIBIE を行った結果を図-11(b) に示す。後者は、図の 2ヶ所で検出されたスペクトルの SIBIE 解析結果を重ね合わせたものである。図中の黒丸はグラウト充填シーブ管を示している。この 2つの図を比較すると、(a) では欠陥部からの反射源が相対的に弱いため、より強い反射源が欠陥の位置と関係の無い部分

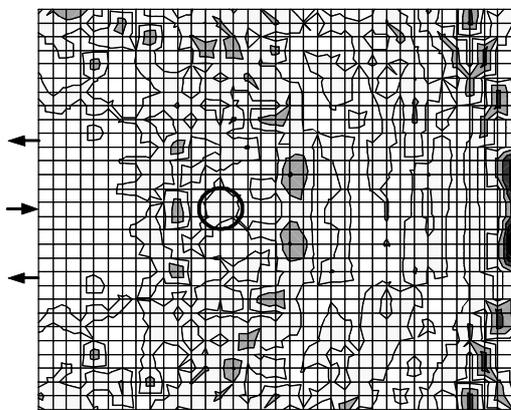


図-7 下限 f_T における SIBIE の結果

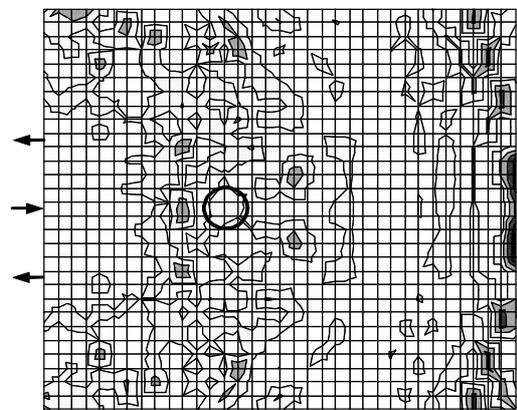


図-8 下限 f'_T における SIBIE の結果

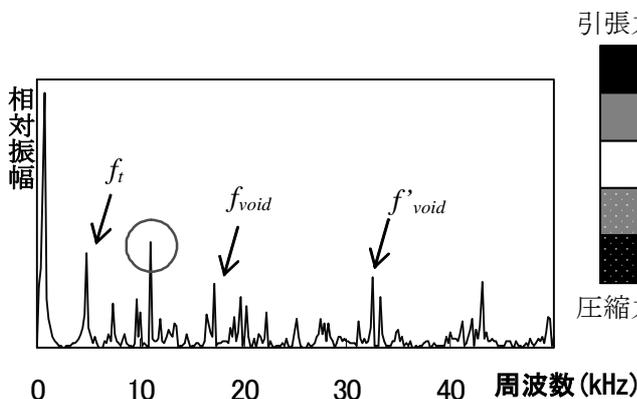


図-9 BEM における周波数スペクトル
(上方検出)

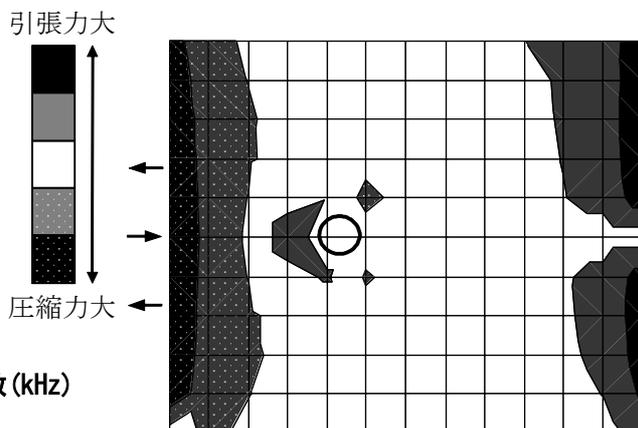


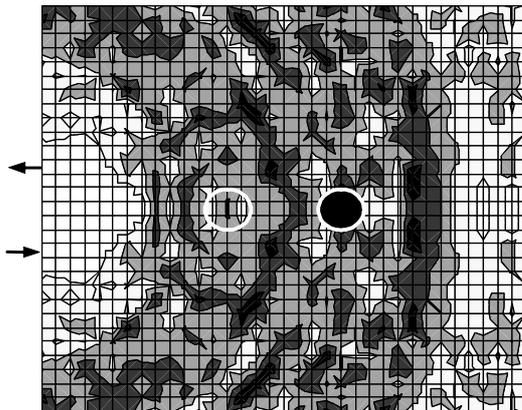
図-10 下限 f'_T における応力解析図 (σ_{xx})

で検出されており，欠陥部を検出できたとは言い難い。しかし(b)では欠陥部付近に明確な強い反射源が確認でき，欠陥部以外に強い反射があまり見られない。これより一点入力二点検出による方法は欠陥部から明瞭な反射源を検出するという点で以前の方法を改良したと考えられる。

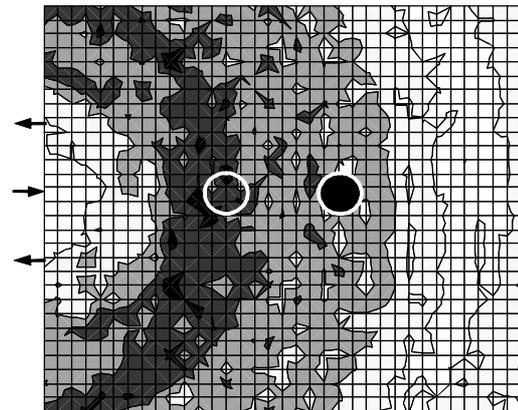
5.3 実験による SIBIE の結果と考察

3.1 節で示した供試体にインパクト試験により得られた周波数スペクトルに SIBIE を行った他の結果を図-12 に示す。なお，5.2 節で示した図-11(b)も本節で用いることとする。インパクトエコー法では，欠陥部までの距離 d と欠陥の大きさ D の比 d/D が 5 以下の場合，欠陥によるピーク周波数を確認できるとされており⁵⁾，この条件はインパクトエコー法を用いる SIBIE にも当てはまると考えられる。そこで各実験条件における d/D と，SIBIE を行った図の比較を

行う。図-11(b)および図-12(b)の d/D はそれぞれ 4.0, 4.2 であり，インパクトエコー法において検出可能な条件を満たしている。各図より，図中黒丸で示すグラウト充填部付近では強い反射が認められないが，図中白丸で示す未充填部付近で強い反射源が確認できる。よって図-11(b)および図-12(b)においては欠陥部分を検出できたと言える。図-12(a) は， d/D が 6.7 であり，インパクトエコー法では検出が難しいとされる条件である。図より，グラウト充填部付近では反射が認められず，図中白丸で示す未充填部の左側に二次的反射と思われる反射源があるものの未充填部のインパクト側に強い反射が認められる。これよりインパクトエコー法で検出が難しいとされる条件においても，SIBIE を用いることにより充填部を検出せずに未充填部のみを検出できたといえる。

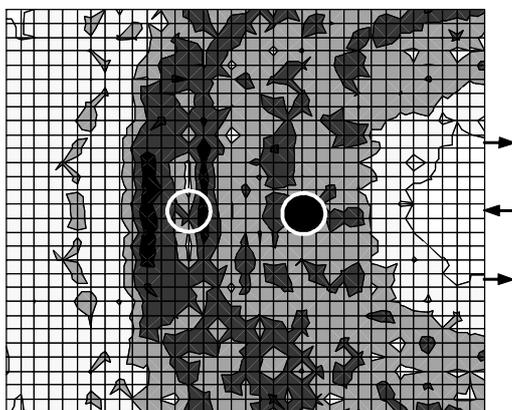


(a) 一点入力一点検出の結果

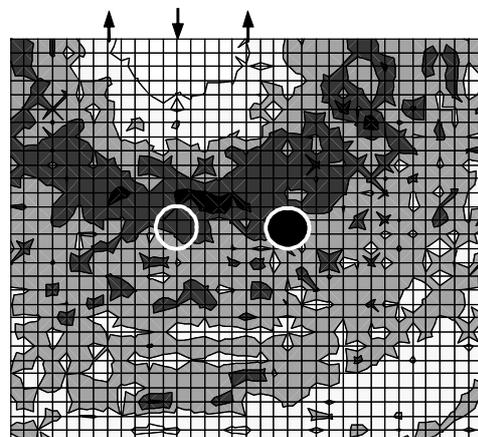


(b) 一点入力二点検出の結果

図-11 インパクト方法の比較



(a) 右側からの打撃結果



(b) 上方からの打撃結果

図-12 実験による SIBIE の結果

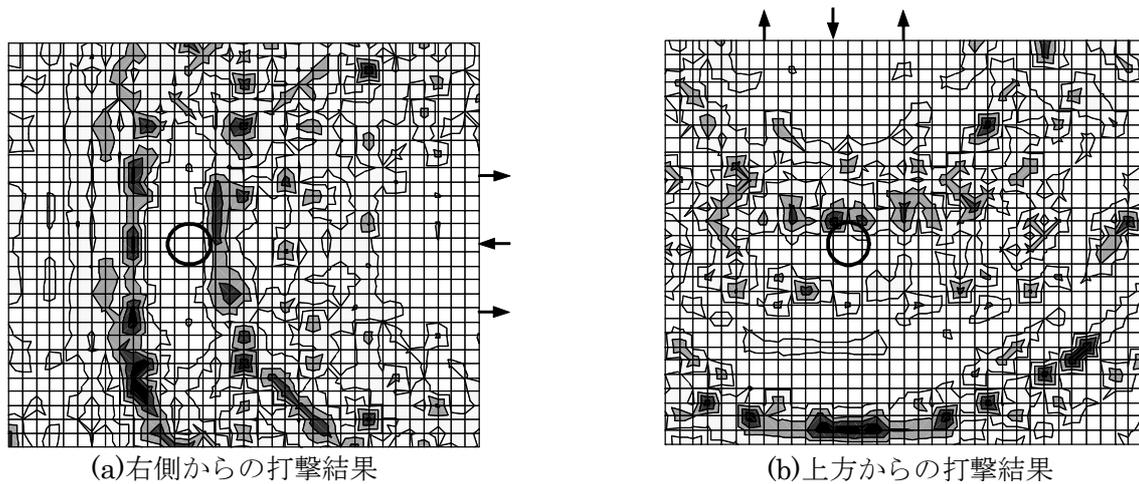


図-13 BEMの結果を用いたSIBIE

5.4 BEM解析によるSIBIEの結果および考察

4節の理論に従ってBEM解析を用いて再現された周波数スペクトルをもとに、SIBIEを行った結果を図-13に示す。5.2節で示した図-8も本節の結果と考察で用いることとする。

5.3節で示した実験の結果とBEM解析より求めた結果を比較すると、図-8において欠陥の左側、図-13のa)において欠陥の右側、b)において欠陥の上方というように実験とほぼ同等の位置に反射が確認できる。これよりBEM解析により実験結果の確認を行うことができた。

6. まとめ

インパクトエコー法を用いて調査断面を画像化するSIBIEの、PCグラウト未充填部の検出性能について検討した結果を以下に示す。

- (1)SIBIEを行う際、足し合わせる周波数の下限を f_T とすることにより、断面画像中の欠陥部の影響と無関係な反射を除去することができた。
- (2)インパクトエコー法を用いる際、検出点を二ヶ所とすることにより検出点が一ヶ所の場合よりもSIBIEによる未充填部検出性能が向上した。
- (3)グラウト未充填部・充填部の両方を有する共試体について、インパクトエコー法を用いてSIBIEを行った。未充填部までの距離 d と欠陥部の大きさ D の比 d/D が5以上の場合は

インパクトエコー法では未充填部の検出が難しいとされているが、一点入力二点検出のSIBIE解析により、充填部を検出せずに未充填部のみを検出できる可能性が示された。

- (4)供試体をモデル化しBEMにより再現された周波数スペクトルを用いることにより、実験結果を確認することができた。

参考文献

- 1) Sansalon, M.J.and Streett, W.B.; Impact-Echo, Bullbrier Press, Ithaca, N.Y., 1997
- 2) 渡辺健, 渡海雅信, 小坂浩二, 大津政康: インパクトエコー法の画像処理に関する研究, コンクリート工学年次論文報告書, Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000
- 3) M.Ohtsu: On High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J.Materials Concrete Structures and Pavement, JCSE, No.544/V-32, pp.277-290, 1992
- 4) 渡辺健, 橋本親典, 大津政康, 一宮桂一郎: インパクトエコー法に基づいたイメージング手法によるコンクリート内部欠陥の検出, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1581-1586, 2002
- 5) 野村芳弘, 大津政康: SIBIE法によるコンクリート中の欠陥検出の考察, 第4回構造物の破壊解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp13-18,2003.3