

論文 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 コンクリート内部空隙の検出

渡辺 健*¹・橋本 親典*²・大津 政康*³・一宮 桂一郎*⁴

要旨：インパクトエコー法は弾性波を利用した定量的な非破壊検査手法であり、コンクリート構造物の内部欠陥の検出への有効性が期待されている。しかし、適応時において内部欠陥の存在を明確にすることは容易ではない場合も多く、この手法の本質的な欠点となっていた。そこで、インパクトエコー法により得られる周波数スペクトルをイメージングすることにより、調査対象の断面をビジュアル化し評価する手法 SIBIE を採用した。この手法をコンクリート内部の空隙検出に適用し、その有効性と空隙検出に適したイメージング条件について検討を行った。

キーワード：インパクトエコー法、弾性波、周波数スペクトル、イメージング、内部空隙

1. はじめに

弾性波を利用した非破壊検査手法のインパクトエコー法¹⁾は、トンネルの欠陥調査において広く使用されている打音法に類似した手法で、周波数スペクトルのピーク周波数から内部欠陥の位置を判断する検査手法である。しかし、理論上では検出可能な内部欠陥の影響により生じるピーク周波数を、実計測より得られる周波数スペクトルにおいて明瞭に同定することは困難な場合が多い。

そこで、内部欠陥の存在を周波数スペクトルのピーク周波数で判断するのではなく、検査対象である断面のどの位置からの反射の影響が周波数スペクトルに多く含まれているかを比較し、その断面画像をビジュアル化することにより評価する手法としてスペクトルイメージング SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo)²⁾という画像処理手法を開発している。この手法はプレストレストコンクリートのグラウト充填度の評価およびコンクリートの表面ひび割れ深さの評価において実験室レベ

ルでその有効性が示されている^{2),3)}。

本研究では、インパクトエコー法に基づいたイメージングによる画像処理による内部欠陥の評価手法を確立するために、大きさの異なる内部空隙を有するコンクリート供試体を作製し内部空隙の検出を実験的に試みた。さらにイメージング条件を変化させることにより、内部空隙の検出に適したイメージング条件とその有効性について検討を行った。

2. インパクトエコー法

インパクトエコー法の原理によれば、内部に空隙を有するコンクリートの場合、板厚によるピーク周波数 f_T 、空隙での反射によるピーク周波数 f_{void} が出現すると考えられている¹⁾。検出原理の概要を図-1 に示す。出現するピーク周波数は、P波の伝播速度を C_p とすると、それぞれ以下の式(1)、式(2)のように表される。ただし、式(1)、式(2)中に見られる係数 0.96 はP波測定の補正係数とされており、インパクトエコー法の原理と直接関連するものではない。

*1 徳島大学助手 工学部建設工学科 博士(工学) (正会員)

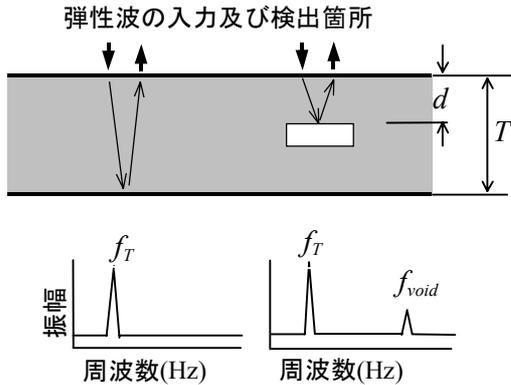
*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 熊本大学大学院教授 自然科学研究科環境共生科学専攻 工博 (正会員)

*4 徳島県生コンクリート工業組合事務局次長

表-1 コンクリートの配合表

最大 粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (kg)	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
25	56	44.2	153	273	823	1049	2.9	8	4.2



f_T : 板厚によるピーク周波数
 f_{void} : 内部空隙によるピーク周波数

図-1 インパクトエコー法による
内部空隙の検出原理

$$f_T = 0.96 \frac{C_p}{2T} \quad (1)$$

$$f_{void} = 0.96 \frac{C_p}{2d} \quad (2)$$

ここで、波動現象は時間と空間の両者に依存する場であることより、入力周波数に対する攪乱が確実に生じる条件を考慮すると⁴⁾、内部空隙からの反射によるピーク周波数として式(3)が示される²⁾。

$$f'_{void} = \frac{C_p}{d} \quad (3)$$

式(3)は式(2)よりさらに高周波数帯でのピーク周波数の存在を示している。

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体として図-2のような内部空隙を有する300×900×900mmのコンクリートブロックを作製した。内部空隙は大きさと厚さの異なる

スチロール材により模擬し、これらを埋設深さ150mmと30mmの位置に設置した。コンクリートの配合を表-1に、28日水中養生後の力学的特性を表-2に示す。

供試体中のP波の伝播速度を超音波法の透過法で計測したところ、P波の伝播速度 C_p は

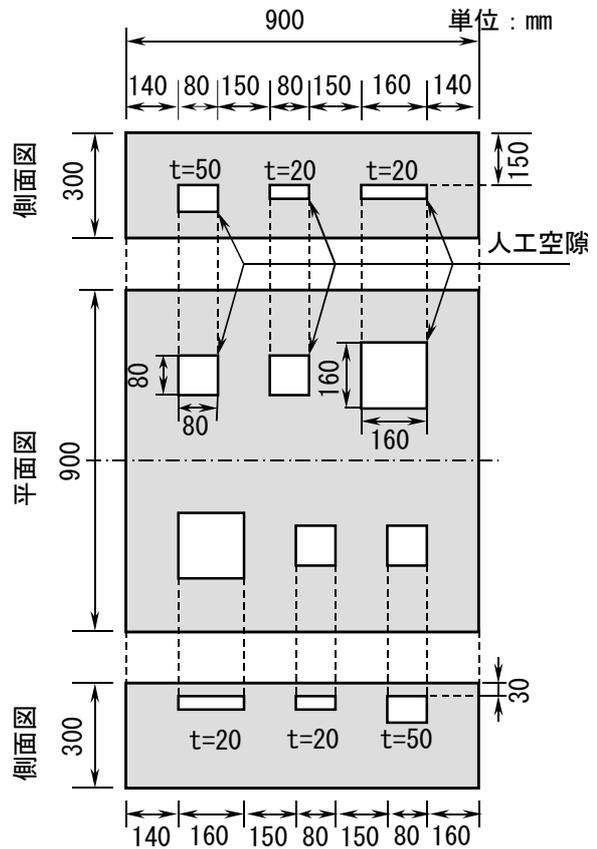


図-2 コンクリート供試体

表-2 コンクリートの力学的特性値

引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン 比
3.0	37.9	28.7	0.2

4139m/s 程度であった。供試体の厚さによる共振周波数および空隙による共振周波数を表-3に示す。

表-3 供試体における共振周波数

	健全部	空隙深さ 30mm	空隙深さ 150mm
板厚によるピーク 周波数 f_T (kHz)	6.6		
空隙によるピーク 周波数 f_{void} (kHz)		66.2	13.2
空隙によるピーク 周波数 f'_{void} (kHz)		138.0	27.6

3. 2 インパクト試験

鋼球落下により生じる衝撃力の上限周波数は、鋼球とコンクリートの接触時間により決定され、接触時間は鋼球の直径に依存している。鋼球の直径を D とすると接触時間は式(4)より、上限周波数は式(5)より決定される。

$$T_c = 0.0043D \quad (4)$$

$$f_c = \frac{1.25}{T_c} \quad (5)$$

今回の実験では直径 19.0mm と 9.5mm の鋼球を使用しインパクト試験を実施した。式(4)、(5)より上限周波数はそれぞれ 15.3kHz, 30.6kHz となる。表-3 と比較すると、深さ 150mm の空隙に対して直径 19.0mm の鋼球は f_{void} まで、直径 9.5mm の鋼球では f_{void} と f'_{void} まで含んでいる。深さ 30mm の空隙に対しては、鋼球の上限周波数は f_{void} も f'_{void} も含んでいない。

インパクト試験は、衝撃の入力点および加速度計センサによる波形検出点の間隔を 40mm とし、健全部は供試体中央の空隙がない箇所にて計測、また各空隙上での計測を行った。その後、検出した弾性波の波形を FFT 処理することにより周波数スペクトルを求めた。求めたスペクトルは基本周波数 $\Delta f=100\text{Hz}$ 、サンプリング数 $N=400$ である。

4. スペクトルイメージングの原理

周波数スペクトルの測定値を基にイメージングを行い、断面での弾性波の反射位置を表すスペクトルイメージングとして SIBIE (Stack Imaging of spectral amplitudes Based on Impact Echo) という画像処理手法を考案している^{2),3)}。

解析手順としては、始めに検査対象の断面内に等間隔で要素点を設けモデル化する。今回使用した解析モデルを図-3 に示す。今回は供試体および空隙の寸法を考慮し 200×300mm の領域をもつモデルとし、要素点間隔は 10mm とした。

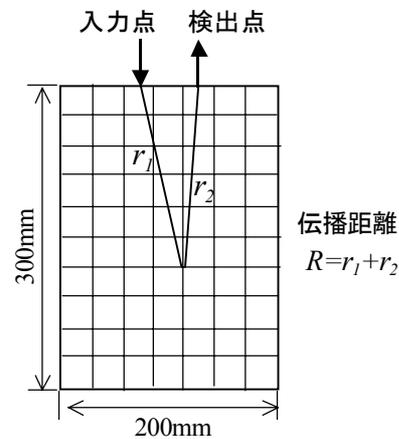


図-3 供試体断面のイメージングモデル

次に、各要素点からの弾性波の反射による共振周波数を求める。その際、各要素で反射が発生すると仮定すると、弾性波は入力点→要素点→出力点という伝播経路を通るが、その最短伝播経路を R とすると式(6)のように表される。

$$R = r_1 + r_2 \quad (6)$$

解析対象中を伝わる P 波の波速を C_p 、分割された各要素で P 波が反射すると仮定すると、生じる共振周波数は式(7)のように表される。

$$\begin{aligned} f_1 &= C_p / (R/2), & f_2 &= C_p / R \\ f_3 &= C_p / (2R), & f_4 &= C_p / (3R) \dots \end{aligned} \quad (7)$$

実測した周波数スペクトルにおいて、式(7)で求められる理論的な反射による共振周波数の振幅値を合計することにより各要素点からの反射の影響を検出する。

5. 結果および考察

5. 1 インパクトエコーによる空隙検出

深さ 30mm の内部空隙上で直径 19.0mm の鋼球を使用したインパクト試験により得られた周波数スペクトルを図-4 に示す。(a)と(d)を比較すると、(d)の空隙幅 160mm の周波数スペクトルにおいて、(a)の健全部に見られる板厚によるピーク周波数 f_T よりも低い位置にピーク周波数が現れている。これは、表-3 に示す反射によるピーク周波数ではなく、空隙上部を覆うコンクリートのたわみ振動の影響であると考えら

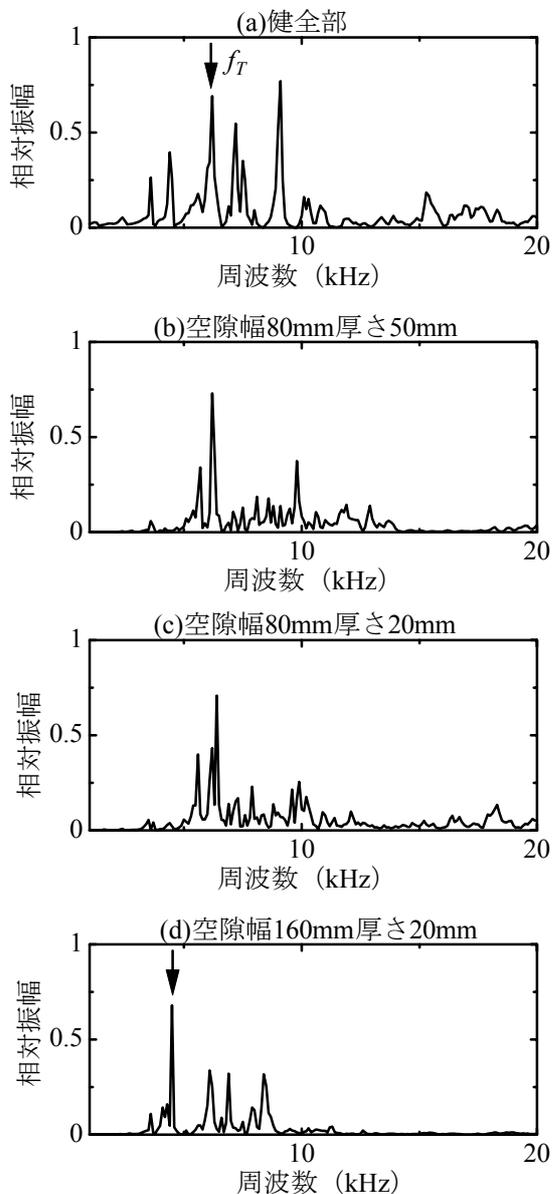


図-4 空隙深さ 30mm の箇所での周波数スペクトル(鋼球直径 19.0mm)

る。この現象は、実験時に健全部との違いを可聴音としても確認できた。

次に深さ 150mm の内部空隙上で直径 9.5mm の鋼球を使用した際のインパクト試験により得られた周波数スペクトルを図-5 に示す。(f), (g), (h)を比較すると、空隙の幅にかかわらず 12~13kHz 付近に空隙からの反射によるピーク周波数 f_{void} が矢印の位置に検出されたが、 f'_{void} によるピーク周波数はほとんど見られなかった。また図-4, 図-5 のいずれの結果にも空隙の厚さの影響はほとんど見られなかった。

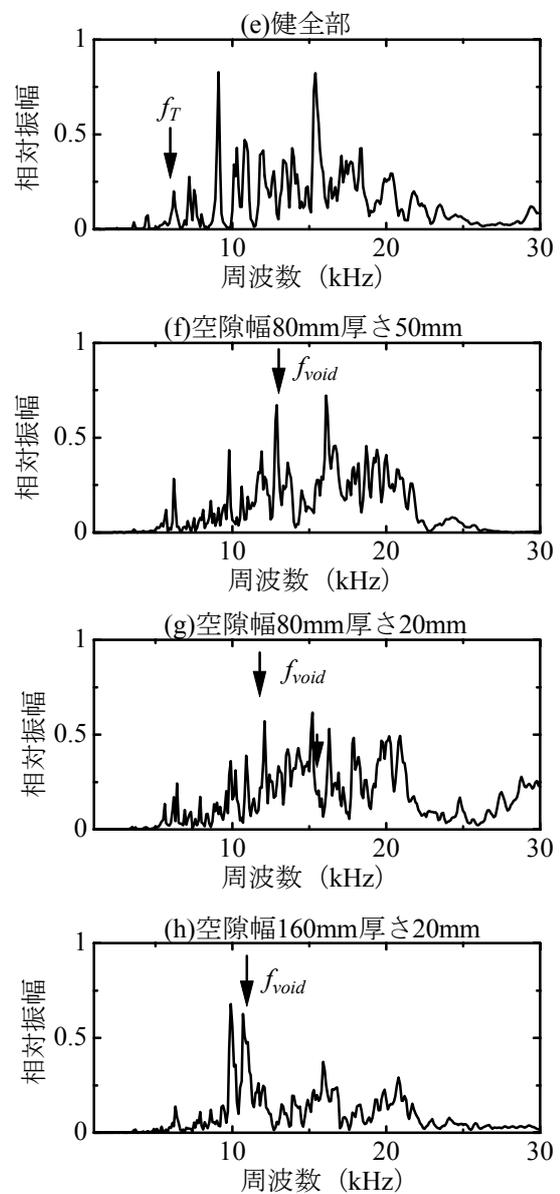


図-5 空隙深さ 150mm の箇所での周波数スペクトル(鋼球直径 9.5mm)

5. 2 イメージングによる断面画像

空隙深さ 150mm でのインパクト試験により得られた周波数スペクトルにイメージング手法を適用し、断面画像による内部空隙の検出を試みた。イメージングは表-4 に示すような条件でそれぞれ実施した。9.5mm の鋼球を用いた場合において、式(7)に準じてイメージングした結果を図-6 に、 f_{void} と f'_{void} の共振周波数をイメージングした結果を図-7 にそれぞれ示す。インパクト試験での周波数スペクトルにおいて空隙の厚さの影響は少なかったため、空隙の厚さ 20mm の結果のみを示す。断面画像は色が濃いほど、その位置での周波数スペクトルの振幅値

の合計が大きいことを示しており、その要素からの反射の影響が強いことを意味する。イメージングモデルは図-3 に示す 200×300mm の大きさで、要素点間隔を 10mm としている。図中の矢印はインパクトの入力点および弾性波の計測点を示している。

図-6 において、健全部と内部空隙を有する断面を比較するとその違いが確認できる。空隙を有する断面では、深さ 150mm の空隙位置付近に反射の影響が見られる。しかし、それ以外にも反射の影響を示す箇所が多く、空隙の位置を明確に検出しているとは言い難い。

図-7 において、健全部と内部空隙を有する

表-4 インパクト試験とイメージングにおける周波数条件

インパクト試験に用いた鋼球の直径(mm)	衝撃力の上限周波数(kHz)	イメージングを行う共振周波数	イメージングの対象とする周波数帯域
19	15.3	f_{void} のみイメージング	15.3kHz 以下
		式(7)に準ずるイメージング	6.6kHz(f_T)以上, 15.3kHz 以下
9.5	30.6	f'_{void} のみイメージング	30.6kHz 以下
		f_{void} のみイメージング	30.6kHz 以下
		f'_{void} と f_{void} をイメージング	30.6kHz 以下
		式(7)に準ずるイメージング	6.6kHz(f_T)以上, 30.6kHz 以下

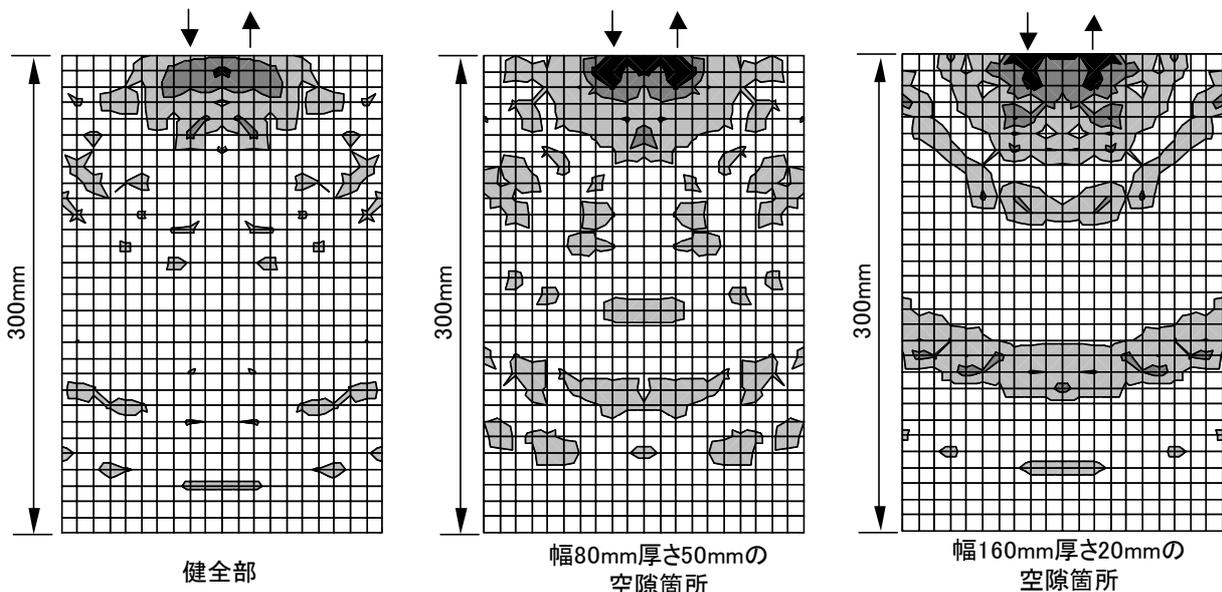


図-6 9.5mm の鋼球使用時の式(7)に準ずるイメージング処理による断面画像

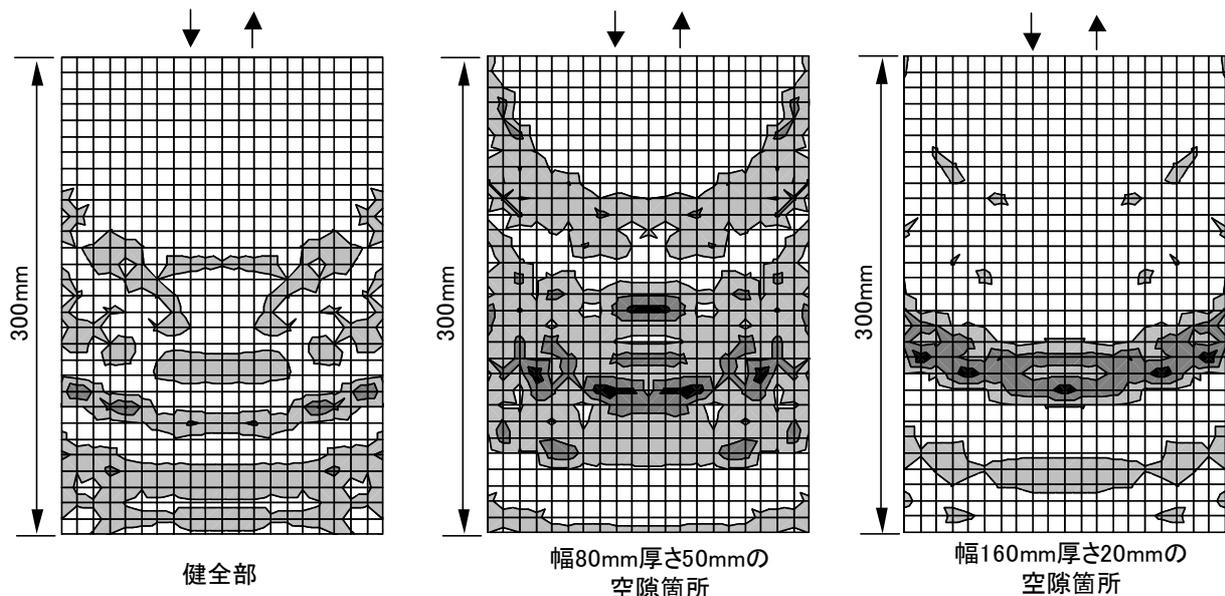


図-7 9.5mmの鋼球使用時の f'_{void} と f_{void} をイメージングした断面画像

断面を比較すると、空隙を有するそれぞれの断面に深さ 150mm の断面中央付近に空隙を示す強い反射の影響が見られる。また、それらの強い反射領域の幅は空隙の幅と完全には一致していないが、空隙の幅が大きい 160mm のほうが反射領域の幅が大きく検出されている。

以上の結果より、内部空隙の検出には共振周波数 f'_{void} と f_{void} をイメージングする条件が適しており、断面画像として空隙の深さ位置の検出および空隙幅を推定できる可能性が示された。

6. まとめ

コンクリートの内部空隙の検出において、インパクトエコー法および断面をビジュアル化して欠陥を評価するイメージング手法 SIBIE の有効性について検討した結果を以下に示す。

(1)インパクトエコー法を用いて空隙を検出する場合、浅い空隙部では周波数スペクトルの分布がたわみ振動の影響で低下することにより空隙の有無が判断できた。深い空隙部で反射による影響がピーク周波数として出現した。

(2)SIBIE によるイメージング手法の結果、適切なイメージング条件を設定することにより、コンクリートの内部空隙の深さ位置と幅を断面画像として視覚的に評価できる可能性が示された。

謝辞

本研究は（社）四国建設弘済会の「平成 12 年度建設事業の技術開発支援制度」による助成（助成番号 H12-02）により行われたものである。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Sansalone, 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集, Vol.22, No.1, pp.391-396, 2000
- 3) 渡海雅信, 小坂浩二, 大津政康 : SIBIE を用いたコンクリート中の欠陥検査法に関する考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.1, pp.499-504, 2001
- 4) M, Ohtsu : On High-Frequency Seismic Motion of Reinforced Concrete Structure, J. Materials, Concrete Structures and Pavement, JCSE, No.544/V-32, pp.277-280, 1992