

# コンクリート構造物欠陥部周辺の加振応答特性に関する数値的検討

## Numerical study on vibration response characteristics around defects on concrete structures

正会員 ○大嶋 拓也\*

○ OSHIMA Takuya\*

コンクリート構造物の加振応答計測による欠陥部の的確な検出手法の確立を目的とし、既往研究 [1] で用いられた模擬試験体を解析対象とした有限要素法による数値的検討を行った。既往実験で得られた振動変位振幅の複雑な振動姿態は試験体の固有振動によることを明らかにし、近接した2測定点間で得られる複素振動変位実部の差分値の比較が比較的簡易な欠陥検出に有望との結果を得た。測定時の雑音への耐性の検証および無限要素の導入による開領域での検討が課題である。

コンクリート構造物	欠陥検出	加振応答	数値解析	有限要素法
Concrete structures	detection of defects	vibration response	numerical analysis	FEM

### 1 はじめに

各種コンクリート構造物の長寿命化には構造物欠陥部の適切な診断技術の確立が不可欠である。そのために構造物表面の超音波加振応答に着目した実験的研究が行われており [1] もの、高精度な診断のためにはさらに多種の欠陥形状における応答特性の蓄積が必要とされる。多数の模擬欠陥試験体を用いた実測による蓄積はコスト上困難であることから、数値解析によるパラメトリックスタディ技法の確立が望まれる。

本報では有限要素法による解析コード構築および妥当性検証を行い、実験研究で用いられた試験体の解析を通して基本的な数値的スタディ技法の確立を目指す。

### 2 解析手法

弾性を有する解析対象を三次元直方体8節点一次要素で分割し、材質に対する構造減衰を考慮して有限要素法 [2] を適用すると次式を得る。ただし系は時間因子  $e^{j\omega t}$  の調和振動状態とする。

$$([K] + j\eta[K] - \omega^2[M])\{x\} = \{f\}$$

[K]: 全体剛性マトリクス, [M]: 全体質量マトリクス  
 $\omega$ : 角周波数,  $\{x\}$ : 節点変位,  $\{f\}$ : 外力,  $\eta$ : 損失係数,  $j = \sqrt{-1}$

上式を数値的に解くことにより、複素節点変位  $\{x\}$  が算出される。

### 3 解析コードの妥当性

解析コードの妥当性確認のために、Fig. 1 および Tab. 1 に示す物性値の弾性棒材を解析対象として固有値解析を行った。

弾性棒の縦振動および屈曲振動について、Tab. 1 の諸物性値から理論的 [3] に算出した固有周波数  $\nu_n$  ( $n = 1, 2, 3$ ) および固有値解析による解析結果の比較を Tab. 2 に示す。両振動状態とも互いに良く一致している。さらに Fig. 2a, b に Tab. 2 の各固有周波数における  $x$  方向および  $z$  方向の基準化振動変位 (固有ベクトル) の解析結果をそれぞれの理論値 [3] とともに示す。解析結果と理論値の間にはほぼ完全な一致が見られる。

以上の解析結果と理論値の比較から、解析コードは基本的な妥当性を有すると判断する。

\* 新潟大学工学部建設学科 助手

\* Research Assoc., Dept. of Civil Eng. and Arch., Fac. of Eng., Niigata Univ.

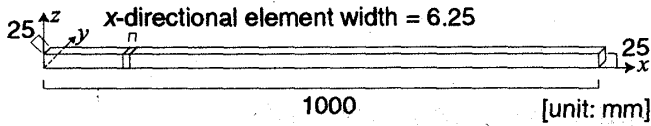


Fig. 1: Shape of the object analyzed to validate the code.

Tab. 1: Properties of the material.

ヤング率  $E = 2.43 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ , Poisson 比  $\sigma = 0.177$ , 密度  $\rho = 2.27 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ , 損失係数  $\eta = 0$ , 支持条件: 固定支持 ( $x = 0$ ), 自由支持 ( $x = 1\text{m}$ ), 要素分割:  $160 \times 1 \times 1$  ( $x \times y \times z$ )

Tab. 2: Comparison of eigenfrequencies  $\nu_n$  [Hz] obtained by theory and by analysis.

$n$	Longitudinal			Flexural		
	1	2	3	1	2	3
$\nu_n$ (Theory)	818	2454	4090	13.2	82.8	232
$\nu_n$ (Analysis)	818	2455	4091	13.7	85.6	239

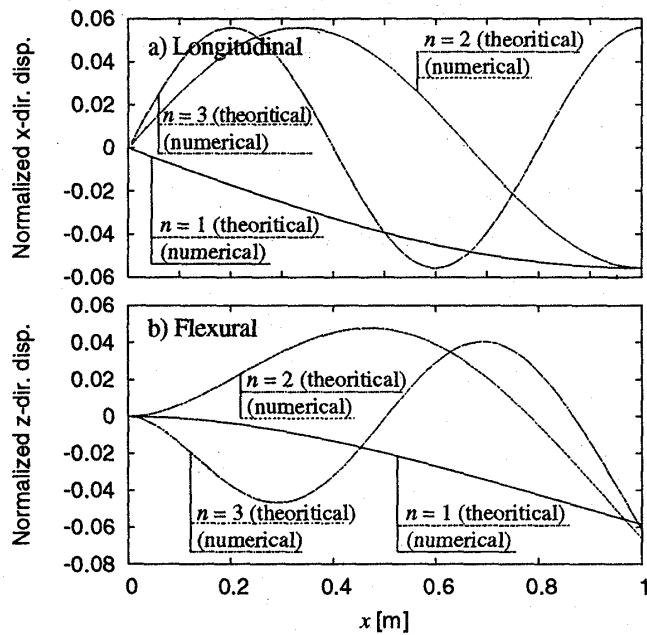


Fig. 2: Eigenmodes at each eigenfrequency of a) longitudinal vibration and b) flexural vibration.

#### 4 模擬試験体の解析

既往の実験研究 [1] で用いられた鉄筋コンクリート (RC) 模擬試験体を解析対象としてモデル化した。格子分割, 加振点位置, および物性値はそれぞれ Fig. 3 および Tab. 3 のとおりとした。

##### 4.1 鉄筋の有無の比較

既往研究 [1] においては RC 構造物の欠陥部検出が目標であることから, 実験においても鉄筋を配筋された試験体を使用している。しかしながら, 加振応答への鉄筋の影響, および試験体のモデル化における鉄筋の考慮の必要性の有無は明らかではない。そこでコンクリートの

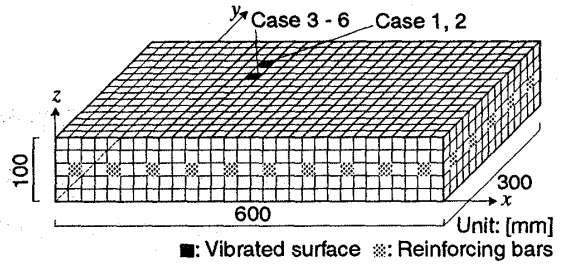


Fig. 3: Dimensions and computational grid of the test bodies for FEM analysis.

Tab. 3: Computational parameters and properties of the material.

要素分割:  $30 \times 15 \times 5$  ( $x \times y \times z$ ),  $z$  方向加振力  $f_z = 1 \text{N/m}^2$ . コンクリート物性値:  $E = 2.43 \times 10^{10} \text{N/m}^2$ ,  $\sigma = 0.177$ ,  $\rho = 2.27 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ,  $\eta = 0.005$ . 鉄物性値:  $E = 2.1 \times 10^{11} \text{N/m}^2$ ,  $\sigma = 0.28$ ,  $\rho = 7.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ ,  $\eta = 0.0001$

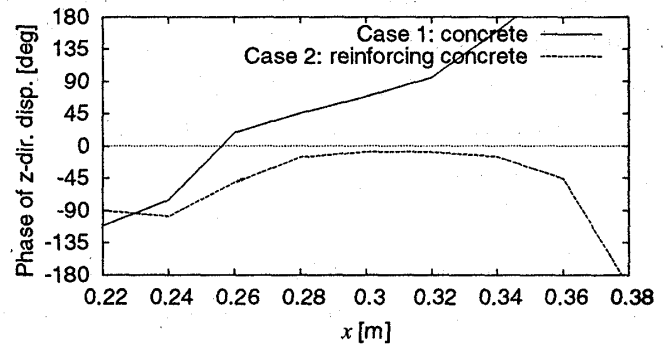


Fig. 4: Comparison of phase of  $z$ -directional vibration displacement on the upper surface of the body between the cases with and without reinforcing bars at the frequency  $f = 20.3 \text{kHz}$ .

みの試験体モデル (Case 1), および格子状配筋を模した要素を含む試験体モデル (Case 2; 配筋は Fig. 3 参照) の両者の解析結果の比較を行う。両ケース共に欠陥部を有しないとする。

Fig. 4 は両試験体上表面  $y$  軸方向中央部の  $z$  方向振動変位の位相を示す。既往の RC 試験体を用いた同条件での実験では図示範囲内で概ね  $30^\circ$  の位相差である [1] が, コンクリートのみの試験体モデルでは  $300^\circ$  近い位相差となっている。鉄筋を考慮した Case 2 でも実験より大きな位相差を示すものの, 概ね  $90^\circ$  以内となっている。従って本手法による加振応答性予測においては鉄筋の考慮が不可欠といえる。

##### 4.2 欠陥部周辺の加振応答性

欠陥部のモデル化 試験体モデル表面に直線状 3 種, クランク状 1 種の模擬ひび割れ欠陥部を導入して解析を行った (Case 3-Case 6; Fig. 5a)。試験体モデルの加振位置, 要素分割および各物性値は Tab. 3, Fig. 3 に示すとおりである。欠陥部は Fig. 5b に示すようにひび割れ部

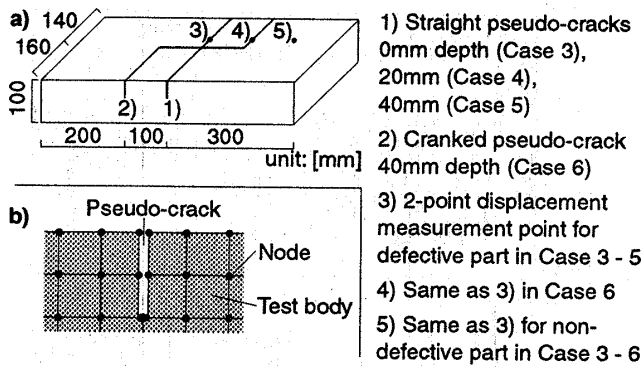


Fig. 5: a) Pseudo-cracks on the RC test bodies and measurement points, b) analytical modeling of pseudo-crack.

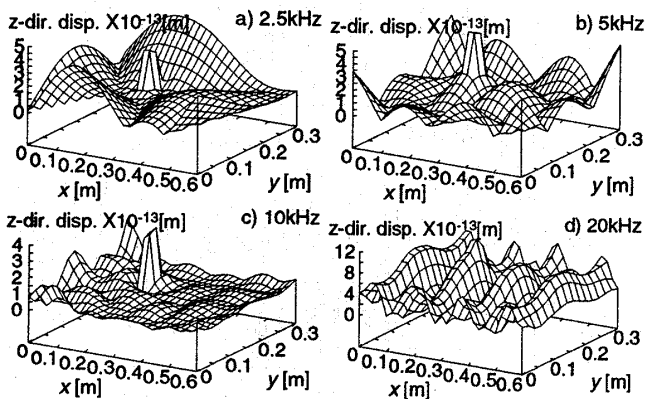


Fig. 6: Amplitude of z-directional vibration displacements of the upper surface of the test body without crack (Case 3) at  $f = 2.5k, 5k, 10k$  and  $20kHz$ .

の両側隣接要素面上に同一座標で異なる節点を与え、独立に振動する節点としてモデル化した。

**試験体表面の振動変位絶対値** Fig. 6, 7にそれぞれCase 3 (ひび割れ無し), Case 5 (直線状ひび割れ深さ 40mm)での試験体モデル表面におけるz方向振動変位絶対値を示す。周波数は2.5k, 5k, 10kおよび20kHzである。いずれのケースでも加振点位置で極大値が見られる。またFig. 7aにおいてひび割れに対応した位置( $x = 0.3m$ )に振動変位の僅かな不連続が認められるが、5kHz以上においては両者ともに試験体表面のモード形状が卓越しており、ひび割れによるモード形状の明瞭な変化は認められない。以上は既往の実験研究 [1] において試験体表面の複雑な振動姿態から推測された振動変位分布に対する固有モードの影響を確認する結果となっており、実験結果と同様に振動変位絶対値による欠陥部判定は困難と結論づけられる。

**振動変位実部** 前項の問題に対し既往研究 [1] では、表面振動変位の位相差の低周波域からの積算により、欠陥部近辺における高周波域での数千度の位相差を検出する

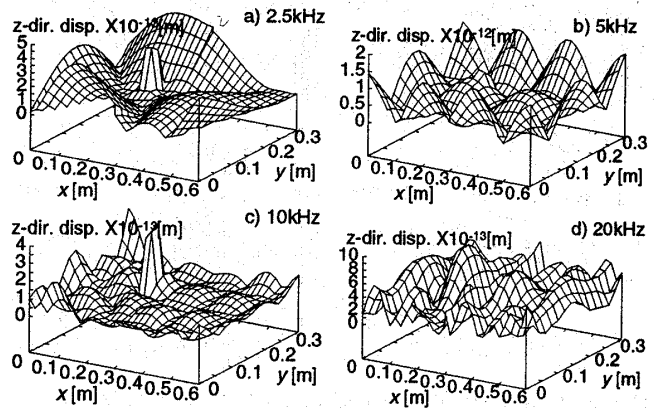


Fig. 7: Amplitude of z-directional vibration displacements of the upper surface of the test body with 40mm-depth straight crack (Case 5) at  $f = 2.5k, 5k, 10k$  and  $20kHz$ .

手法を提案している。しかしながらこの手法は計測データの周波数分析後に位相積算操作を要するため、現場での簡易かつ迅速な欠陥部検出にあたって負荷となる可能性がある。一方、前節の振動変位絶対値に関する考察から、振動変位絶対値と異なり空間的に滑らか(連続的微分可能)な挙動を示す振動変位実部のみを使用して欠陥部検出を行う手法が考えられる。

Fig. 8にはCase 5での試験体モデル表面におけるz方向振動変位実部を示す。周波数は2.5k, 5k, 10kおよび20kHzである。振動変位絶対値の場合と異なり、5kHz以上の周波数でひび割れ位置に対応した変位の不連続が明瞭に認められる。

ひび割れ深さをCase 5の半分としたCase 4(直線状ひび割れ深さ 20mm)での振動変位実部をFig. 9に示す。周波数は5kおよび20kHzである。ひび割れ位置に対応した変位の不連続が僅かに認められる。

Case 5より複雑なひび割れ形状としたCase 6(クランク状ひび割れ深さ 40mm)での振動変位実部をFig. 10に示す。周波数は5kおよび20kHzである。5kHzでは僅かな不連続が認められるに留まるが、20kHzにおいてはひび割れ形状に対応した不連続が明瞭に認められる。

**振動変位実部の空間差分値  $\xi_z$**  実測においては振動変位実部の測定法が問題となるが、技術的有効性の確認された2点同時受振計測法 [4] の利用を前提として、健全部および欠陥部におけるFig. 11のような近接2同時測定点間のz方向振動変位実部差分値の絶対値  $\xi_z$  の比較が考えられる。Case 4-6において、Fig. 5に示す算出点での  $\xi_z$  を125Hz-25kHzまで125Hz刻みで算出した結果をFig. 12に示す。概ね5kHz以上の周波数域において欠陥

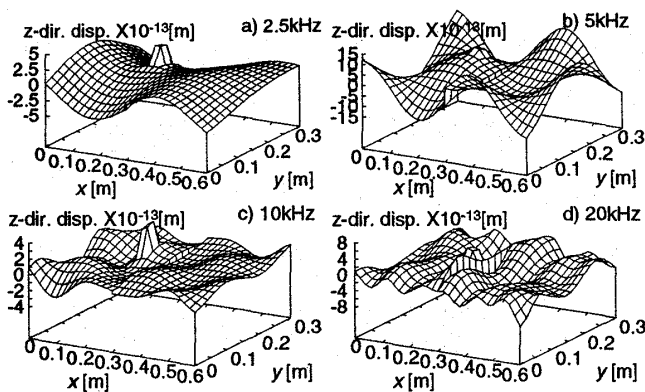


Fig. 8: Real part of z-directional vibration displacements of the upper surface of the test body with 40mm-depth straight crack (Case 5) at  $f = 2.5k, 5k, 10k$  and  $20kHz$ .

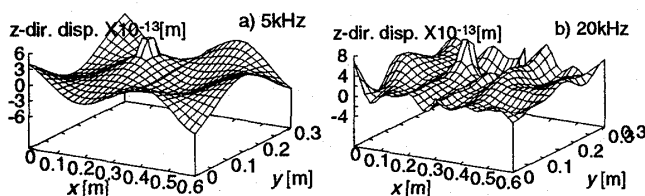


Fig. 9: Real part of z-directional vibration displacements of the upper surface of the test body with 20mm-depth straight crack (Case 4) at  $f = 5k$  and  $20kHz$ .

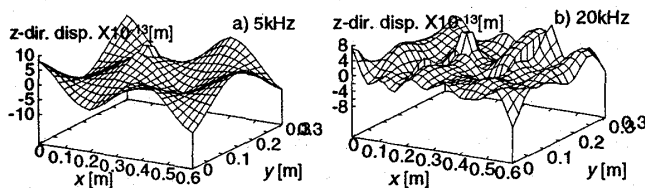


Fig. 10: Real part of z-directional vibration displacements of the upper surface of the test body with 40mm-depth hook-shaped crack (Case 6) at  $f = 5k$  and  $20kHz$ .

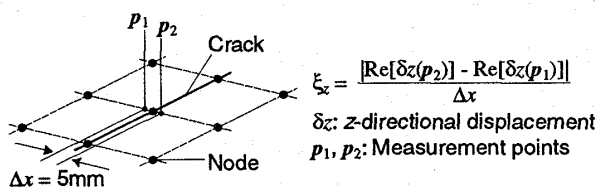


Fig. 11: Measuring scheme of the 2-point differential of the real part of vibration displacements.

部を跨いだ2点間の $\xi_z$ の値は健全部の $10^1-10^2$ 倍となっており、欠陥部検出への適用性が期待される。

5 まとめ

コンクリート構造物の加振応答計測による欠陥部検出について、有限要素法による数値解析コードの構築および既往の実験研究で用いられた模擬試験体の解析を行った。その結果、既往実験で得られた振動変位振幅の複雑な振動形態は試験体の固有振動によるものであり、近接した2測定点間で得られる複素振動変位実部の差分値の

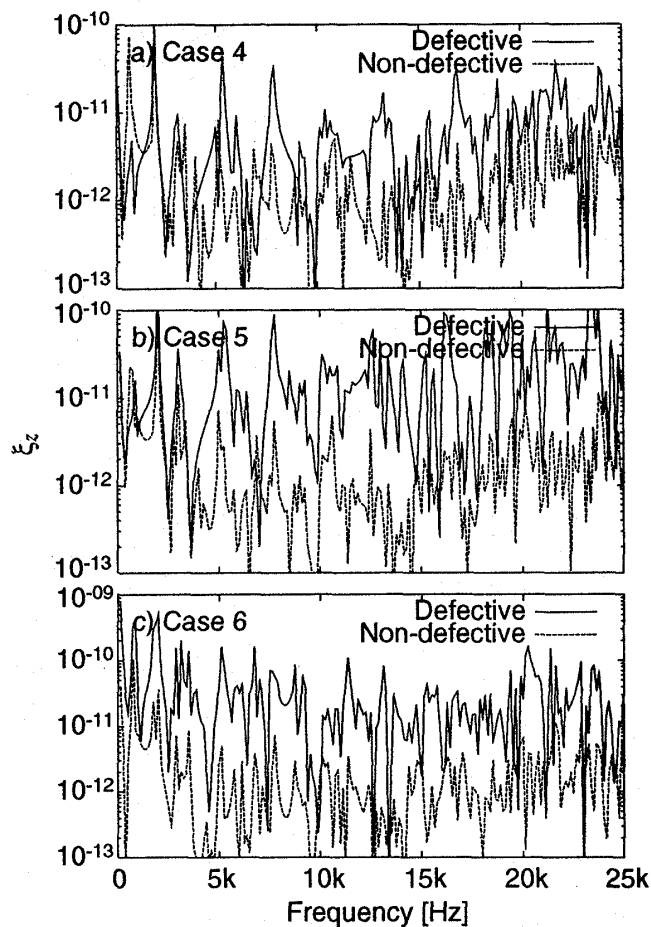


Fig. 12: Amplitude of 2-point differential of the real part of z-directional vibration displacements  $\xi_z$ .

比較が従来より簡易な欠陥検出に有望との結論を得た。今後は実測における雑音への耐性の検証、高効率解法の導入によるより細密な解析、無限要素の導入による開領域解析による検討が課題である。

謝辞

本研究は2001年度日本建築学会北陸支部奨励研究助成および財団法人内田エネルギー科学振興財団研究助成により行われた。また、平成13年度卒論生の浅野剛志君、本学岩瀬研究室の各位には多大な協力を頂いた。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 岩瀬昭雄, 真秀豊, 阿部司, 安岡博人. レーザー振動計を用いたコンクリート構造物の欠陥部周辺の振動応答の観測, 日本音響学会騒音・振動研究会資料 N-2001-05, 2001.
- [2] 加川幸雄. 有限要素法の基礎と応用シリーズ9有限要素法による振動・音響工学/基礎と応用, 培風館, 東京, 1981.
- [3] 伊藤毅. 音響工学原論 上巻, 第2章, コロナ社, 東京, 1955.
- [4] 小林弘樹, 岩瀬昭雄, 安岡博人. レーザー振動計によるコンクリート構造物の欠陥部の非破壊検査法について -移動型加振法による実用化の検討-, 日本音響学会騒音・振動研究会資料 N-2002-2, 2002.