

RC 構造欠陥検出のための局部振動実験のシミュレーション

Simulation of local vibration experiment for defect detection of RC structures

○北見工業大学 学生会員 李 昕宇
 北見工業大学 正会員 シェリフ ハスキウン
 北見工業大学 フェロー 大島 俊之

北見工業大学 正会員 山崎 智之
 北見工業大学 正会員 三上 修一

1. はじめ

日本において、戦後の国土復興とその後の高度経済成長長期に、非常に多くの社会基盤施設を作ってきた。これらの多くの社会基盤施設は建設後数十年を経過しており、今後性能限界を超えた構造物が増加すると予想される。しかし、現在の財政状況等から考えると性能限界を超えているすべての構造物を造り換えることは困難である。そのため構造物を長寿命化する適切な維持・補修が必要であり、損傷度の把握、健全度の判定方法の確立が必要である。現在一般的に行われている目視点検によってすべての構造物の損傷度判定をすることは非常に困難である。構造物の性能評価方法の一つとして、構造物の振動計測結果を基に構造物の設計、施工、維持管理に関する有用な情報得るための振動モニタリングが挙げられる。

本研究は積層圧電アクチュエータを用いた局部振動実験を行い、その計測結果を用いた RC 構造部材の損傷度判定を行うことを目的としている。本論文では上記目的のため、数値シミュレーションを行い、実験結果との比較を通して RC 構造部材の損傷の有無、損傷の位置を特定する解析を行った。また、実験手法を確立するためシミュレーションを通して加振方法などの検討を行う。

2. 損傷検出解析の理論説明

関数 $G_i(f)$ は周波数 f におけるチャンネル数 i で測定された加速度応答波形をスペクトル解析した時のパワースペクトルの大きさを示す。そして、健全状態と損傷状態のパワースペクトルの差(絶対値)で損傷による変化の大きさを定義する。

$$D_i(f) = |G_i(f) - G_i^*(f)|$$

$G_i(f)$ は健全状態、 $G_i^*(f)$ は損傷状態における構造物のパワースペクトルの大きさを表す。パワースペクトルがそれぞれの測定位置で f_1 から f_m までの周波数で計算されるとき、損傷による変化を表わすマトリクス[D]は以下のように定式化することができる。

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \dots & D_1(f_j) & \dots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \dots & D_2(f_j) & \dots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \dots & D_n(f_j) & \dots & D_n(f_m) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \dots & D_n(f_j) & \dots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \quad \text{Total_Change}(TC) = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^m D_1(f) \\ \sum_{j=1}^m D_2(f) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m D_n(f) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m D_n(f) \end{array} \right\}$$

n は測定点の数(チャンネル数)を表し、 m はスペクトル解析における周波数の数を表す。マトリクス[D]における列の要素は同じ周波数における異なった測定チャンネルのパワースペクトルを表す。各チャンネルのパワース

ペクトルの合計 Total_Change (TC) は、損傷の有無や大きさを表わす指標となる。以上のことより、マトリクス[D]の合計から損傷を数値化できる。しかし、パワースペクトルの合計(TC)は局部的損傷としては小さい値であるため、損傷位置を決定するために統計的意思決定手順を使用した。この手順は、それぞれの周波数で最大のパワースペクトル(マトリクス[D]の各々の列の最大値)を選択して、他のチャンネルのパワースペクトルを全て取り除く(0 とする)。例えば、マトリクス[D]では $D_3(f_1)$ が最初の列の最大値であるならば $M_3(f_1) = D_3(f_1)$ とし、この列の他の要素は 0 とする。同様に、マトリクス[D]の他の列に適用し、各々の周波数における最大パワースペクトルを選択してマトリクス[M]を次式のように定義する。

次に、マトリクス[C]はマトリクス[M]において損傷を受けた場所を 1、損傷を受けていない場所を 0 とする。例えば、マトリクス[C]として上記の表現で示せば $M_3(f_1)$ 、 $M_2(f_2)$ 、 \dots の位置(チャンネル)に対応して 1 の値を置いた。マトリクス[M]の行から最大パワースペクトルの合計が計算できる。

$$[M] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2(f_2) & 0 & \dots & 0 \\ M_3(f_1) & 0 & 0 & \dots & M_3(f_m) \\ 0 & 0 & M_4(f_3) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad SM = \begin{bmatrix} \sum_f M_1(f) \\ \sum_f M_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f M_n(f) \end{bmatrix} \quad SC = \begin{bmatrix} \sum_f C_1(f) \\ \sum_f C_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f C_n(f) \end{bmatrix}$$

{SM} は各チャンネルのパワースペクトルの最大変化の合計を示し、{SC} はマトリクス[C]の行の合計を示す。損傷による変化 Damage_Indicator (DI) は次式に示されるように {SM} と {SC} のスカラ積として定義される。

$$\text{Damage_Indicator}(DI) = \left\{ \begin{array}{l} SM(1) \times SC(1) \\ SM(2) \times SC(2) \\ \vdots \\ \vdots \\ SM(n) \times SC(n) \end{array} \right\}$$

3. 実際のRC 構造部材で行った実験

(1) 実験概要

加振方法：積層圧電アクチュエータを用いて 200Hz から 800Hz までの加振周波数帯を分割して、周波数が直線的に連続で変化する sin 波により加振(スイープ加振)により振動実験を行った。

実験を行った RC 部材は図1に示すような角柱の柱で、損傷は次に示す 3 段階の損傷とした(損傷位置は柱下部)。damage1：高さ 12cm まで、幅 42cm、および深さ 10cm のコンクリートブロックを取り外す。damage2：高さ 24cm まで、幅 42cm、および深さ 10cm のコンクリートブロックを取り外す。damage3：高さ 48cm まで、幅 42cm、および深さ 10cm のコンクリートブロックを取り外す。アクチュエータと加速度計の設置位置を図1に示す。

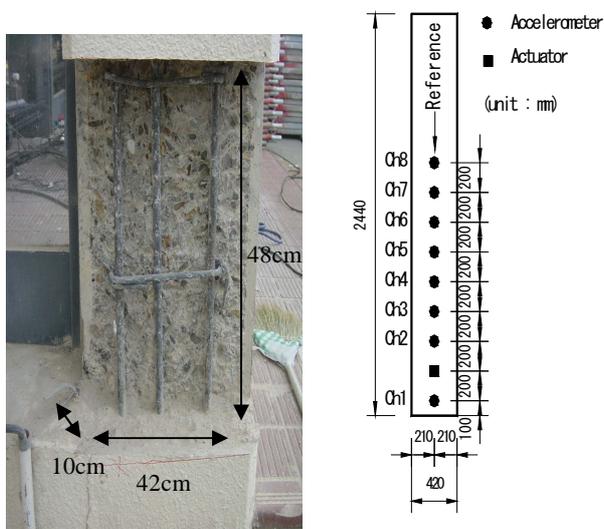


図1 柱部材の概要と主な寸法および damage 3 の写真

(2) 実験データの解析結果

一例として、加振周波数 200-300Hz における、CH6 の健全状態と各損傷状態(damage1-3)のパワースペクトル比較を図2に示す。また、パワースペクトルの Total_Change(TC) 損傷検出解析による各チャンネルにおける健全状態と各損傷状態のパワースペクトルの変化の合計(TC)を図3に示す。

スイープ波局部振動加振により、損傷が大きくなるにつれて構造物の卓越振動数は減少していることがわかった。また、Total_Change(TC) 損傷検出解析により、損傷が大きくなるにつれて TC(パワースペクトルの差の変化が大きくなっていることがわかった。Ch3 と Ch4 の TC は大きいので、Ch3 と Ch4 の近くに損傷があるという判断になるが、実際の損傷位置(Ch1 と Ch2)と一致していない。

以上より、スイープ波局部振動加振により構造物の振動特性、及び各波形の形状の変化を捉えることで RC 構造物の損傷の有無を判断できると考えられるが、損傷の位置を正確に把握するためには検討が更なる必要である。

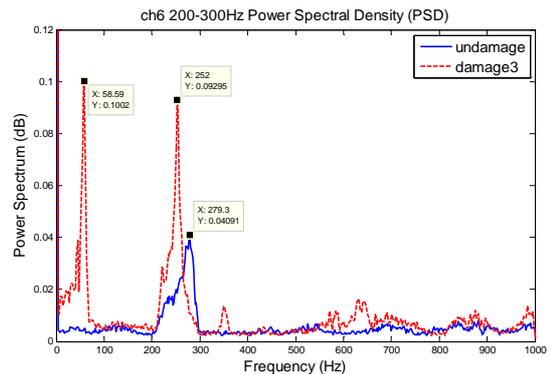
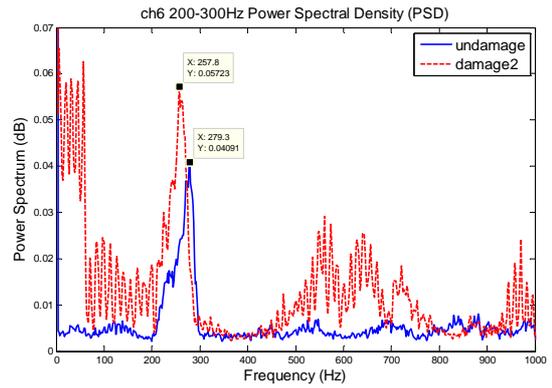
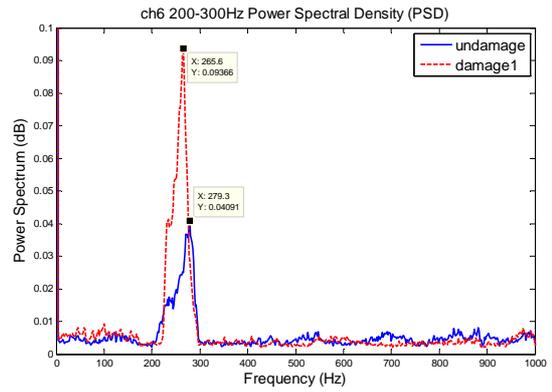


図2 ch6 の健全状態と各損傷状態の PSD

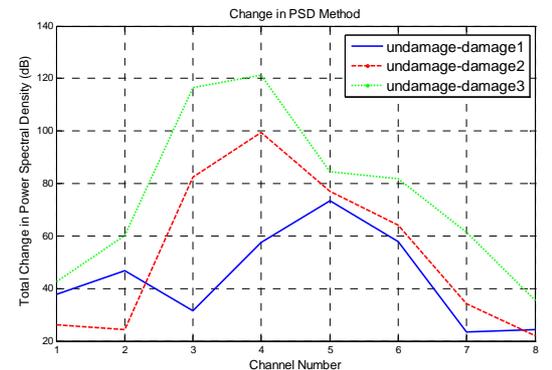


図3 損傷1-3の Total_Change (健全状態とのパワースペクトルの差)

4. 数値シミュレーションの概要

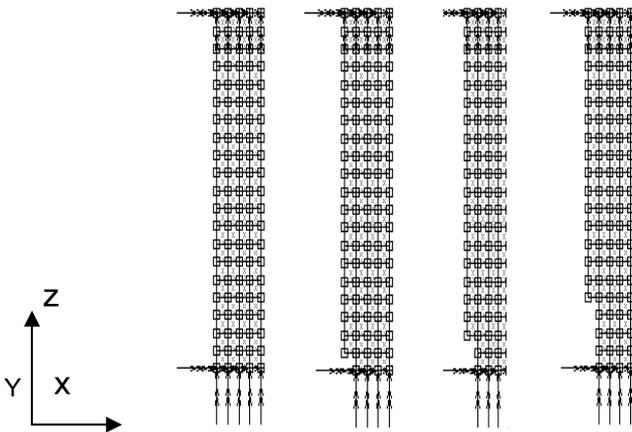
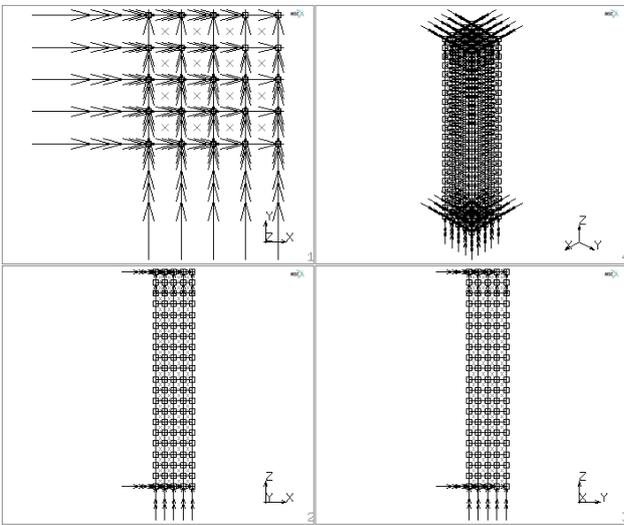
損傷の位置を正確に把握するために、加振方法などを検討する。局部振動実験のシミュレーションを行った。

(1) 解析モデル

汎用構造解析プログラムであるMARCを用いて実験のRC柱をモデル化したモデルと損傷モデルを図4に示す。柱の材料定数を表1に示す。損傷の大きさは実験と同様に設定した。

表1 材料定数

材料	鉄筋コンクリート
要素分割	4×4×20=320
幾何特性	ソリッド
ヤング率 (N/m ²)	2.5×10 ¹⁰
密度 (Kg/m ³)	250
ポアソン比	0.2



undamaged damage1 damage2 damage3

図4 解析要素モデル

例として、図4モデルの固有値解析による一部の固有振動数を表2に示す。

(2) 動的応答解析

1) input : (アクチュエータによる入力加振のモデル化)

入力 $f = \sin(2\pi \times w \times t) / \text{abs}(\sin(2\pi \times w \times t)) + 1$ の方形波にて振動させる。加振周波数 w は健全状態の固有振動数(200Hz付近)を使う。

一例として、加振周波数 w を206Hzにしたときの入力波形 $f = \sin(2\pi \times 206 \times t) / \text{abs}(\sin(2\pi \times 206 \times t)) + 1$ のグラフを図5に示す。入力時間1秒、時間ステップ=0.0005秒
初期荷重 $P=100N$ 、入力位置を図1に示す。

2) output :

データ収録時間1秒、解析時間ステップ=0.0005秒。計算結果の出力位置を図1に示す。

3) 計算方法 : Newmark β 法

表2 固有振動数

modeナンバー	ダメージ番号			
	UN	D1	D2	D3
1	63.1573	58.1536	57.7936	57.9155
2	63.1573	61.2027	60.6967	60.4071
3	125.409	119.922	116.433	113.389
4	151.688	144.893	145.126	142.729
5	151.688	148.185	147.565	147.765
6	206.108	199.953	197.65	194.49
7	251.667	239.86	237.088	244.775
8	261.473	255.404	253.765	249.853
9	261.473	257.55	257.224	257.982
10	379.634	361.732	364.962	375.517

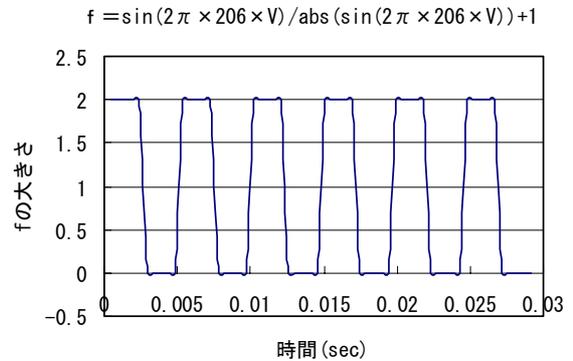


図5 動的解析の入力波形 (加振周波数206Hz)

4) 動的応答解析結果

図6に加振周波数は206Hzで計算したCh1の各状態の加速度応答波形のパワースペクトルを示す。

加振周波数206Hzの場合のDamage_Indicator解析により得られた健全状態と損傷1の各チャンネルにおけるパワースペクトル大きさ変化の合計 (DI) を図7に示す。

加振周波数206Hzの場合のTotal_Change解析により得られた各チャンネルにおける健全状態と各損傷状態のパワースペクトル変化の合計 (TC) を図8に示す。

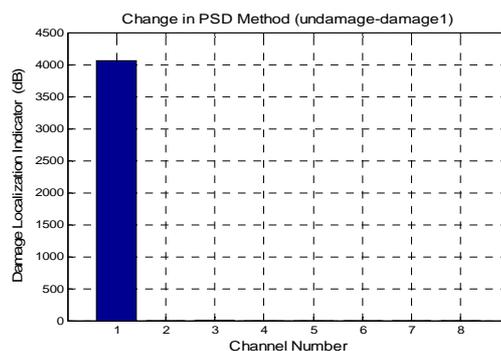
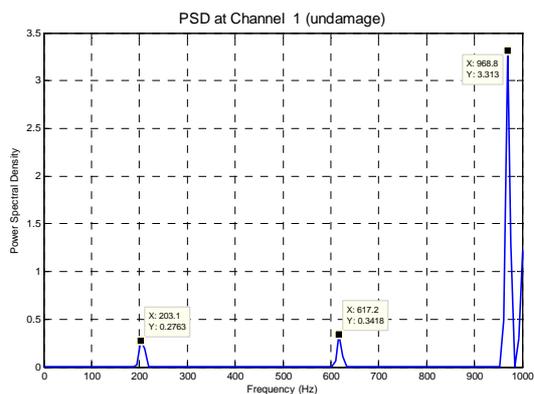


図7 Damage_Indicator (DI)
(加振周波数206Hz、damage1)

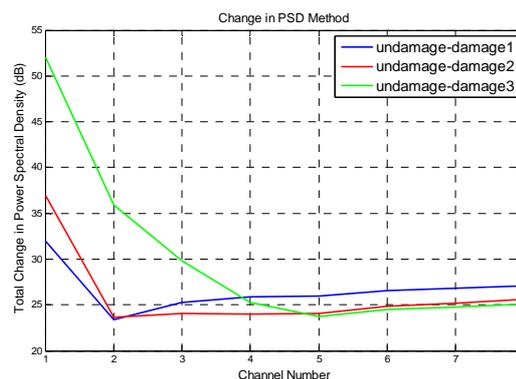
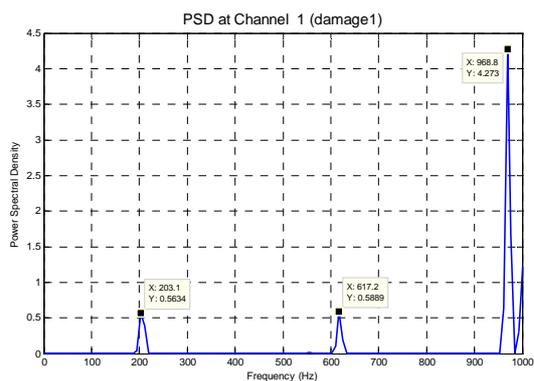


図8 Total_Change (TC)
(加振周波数206Hz)

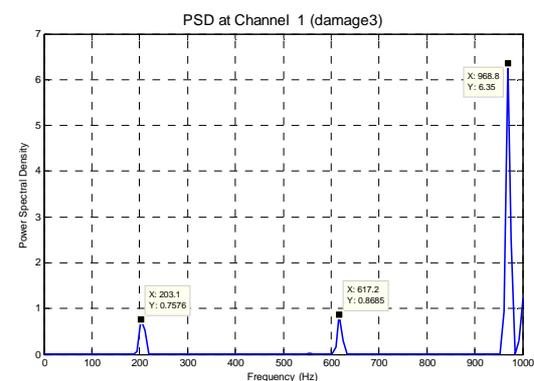
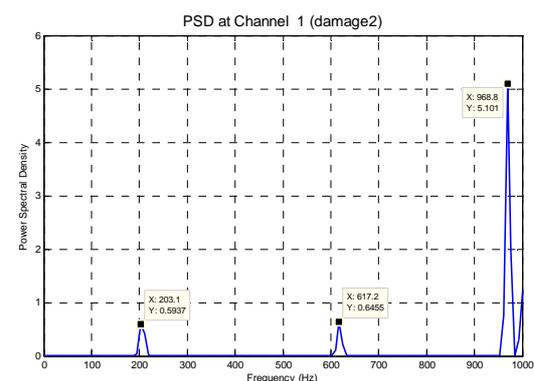


図6 各状態のパワースペクトル
(Ch1, 加振周波数206Hz)

5. 考察

局部振動実験の数値シミュレーションを通して、各損傷によるパワースペクトルの卓越振動数は変化していないが、スペクトルの大きさが変化していることがわかった。また、損傷検出解析により損傷位置近くにあるCh1におけるパワースペクトルの変化が一番多くみられた。このことからCh1の近くに損傷があると考えられる。今回のシミュレーションによる加振方法では損傷有無の判定と損傷位置の特定が可能であることが確認された。

実験結果とシミュレーション結果を比較すると、両者とも損傷有無の判定は可能であった。しかし、損傷位置の判定では実験結果からは明確な判定はできず、シミュレーションの結果では損傷位置を特定できる結果が得られた。これにより、実験データを検証し、より良い実験方法を確立することができると考えられる。

今後、実構造物により近いシミュレーションモデルを作成し、効果のある加振方法や計測位置の検証を行う予定である。また、小さな損傷の検出に対して検討し、供試体を用いて本実験を行っていきたいと思う。

参考文献

- 1) Oshima T., Yamazaki T., Onishi K. and Mikami S., Study on damage evaluation of joint in steel member by using local vibration excitation, (In Japanese), *Journal of Applied Mechanics JSCE*, Vol.5, pp.837-846, 2002.