

RC 構造欠陥検出のための局部振動実験及び数値シミュレーション

Experiment and numerical simulation of local excitation method 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 三上 修一

北見工業大学 正会員 山崎 智之
北見工業大学 フェロー 大島 俊之

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代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、局部振動実験と数値シミュレーションを行い、実験結果と数値解析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、数値シミュレーションを通して実験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番号 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式(1)に定義する。

$$D_i(f) = |G_i(f) - G_i^*(f)| \dots \dots \dots (1)$$

$G_i(f)$ 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(チャンネル)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 $D_i(f)$ は式(2)でマトリクス[D]定式化することができる。

$$D = \begin{bmatrix} D_1(f_1) & D_1(f_2) & \dots & D_1(f_j) & \dots & D_1(f_m) \\ D_2(f_1) & D_2(f_2) & \dots & D_2(f_j) & \dots & D_2(f_m) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ D_i(f_1) & D_i(f_2) & \dots & D_i(f_j) & \dots & D_i(f_m) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ D_n(f_1) & D_n(f_2) & \dots & D_n(f_j) & \dots & D_n(f_m) \end{bmatrix} \dots \dots (2) \quad TC = \left\{ \begin{matrix} \sum_{j=1}^m D_1(f) \\ \sum_{j=1}^m D_2(f) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m D_i(f) \\ \vdots \\ \sum_{j=1}^m D_n(f) \end{matrix} \right\} \dots \dots (3)$$

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を式(3)の Total_Change(TC)とし、この Total_Change が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 $M_3(f_1)$ 、 $M_2(f_2)$ ・・・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。

$$[M] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_2(f_2) & \dots & 0 \\ M_3(f_1) & 0 & \dots & M_3(f_m) \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \Rightarrow [C] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

{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。

$$SM = \left\{ \begin{matrix} \sum_f M_1(f) \\ \sum_f M_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f M_n(f) \end{matrix} \right\} \quad SC = \left\{ \begin{matrix} \sum_f c_1(f) \\ \sum_f c_2(f) \\ \vdots \\ \sum_f c_n(f) \end{matrix} \right\}$$

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

3. RC 供試体で行った局部振動実験

(1) 供試体概要

実験を行った RC 供試体は図1に示すような長さ 1500mm、高さ 200mm、幅 100mm の梁である。供試体の高さ 50mm と 150mm、幅 50mm (中央) の所に異径鉄筋(D13)が長さ方向に二本配置されている。また高さ方向にも 100mm 間隔で同じ鉄筋を配置している。アクチュエータと加速度計は図1に示すような供試体上面の中央部に 187.5mm 間隔で設置している。

(2) 損傷の設定

損傷は3段階の損傷を設定した。損傷1: コンクリートだけの損傷で底面から高さ 40mm、幅 5mm 程度のスリットを入れた。損傷2: 損傷1からさらに上方(底面からの高さ100mm まで)コンクリートにスリットを入れた。ただし、鉄筋はそのままとした。損傷3: 下側の鉄筋を切断した。

(3) 加振方法

積層圧電アクチュエータを用いて 100Hz から 800Hz までの周波数が直線的に連続で変化する sin 波によりスイープ加振と sin 波加振により二種類の振動実験を行った。

加振初期荷重: 300N

スイープ加振(100Hz~800Hz)

加振時間: 20 秒、サンプリング周波数: 8000Hz

各 sin 波加振(100Hz、200Hz、・・・800Hz)

加振時間: 3.5 秒、サンプリング周波数: 8000Hz

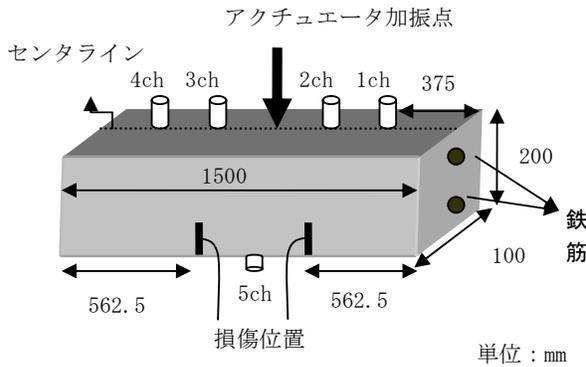


図1 RC 供試体の概要と主な寸法および損傷位置

(4) 実験データの解析結果

一例として、sin 波加振周波数 600Hz における、CH5 の各状態のパワースペクトル比較を図2に示す。また、スイープ加振における、CH5 の健全状態と損傷状態1(D0 と D1) のパワースペクトル比較を図3に示す。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各状態のパワースペクトルの変化の合計 (TC) を図4に示す。Damage_Indicator (DI) 損傷検出解析による各チャンネルにおける各状態のパワースペクトル大きさ変化の合計 (DI) を図5に示す。

sin 波局部振動加振により、損傷が大きくなるにつれてピークの振幅はほぼ大きくなる傾向がある。また、スイープ波局部振動加振により、損傷によって構造物の卓越振動数は減少していることがわかった。Total_Change (TC) 損傷検出解析と Damage_Indicator (DI) 損傷検出解析により、CH2、CH3

と CH5 の TC と DI は大きいので、CH2、CH3 と CH5 の間に損傷があるという判断になる。実際の損傷位置 (CH2 と CH3 の下側、CH5 の両側) とほぼ一致している。

以上により、スイープ波と sin 波局部振動加振により構造物の振動特性、及び各波形の形状変化を捉えることで RC 構造物の損傷有無の判定と損傷位置の把握ができると考えられる。

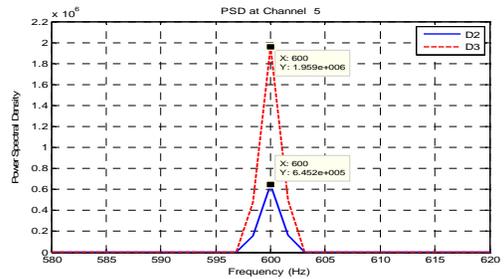
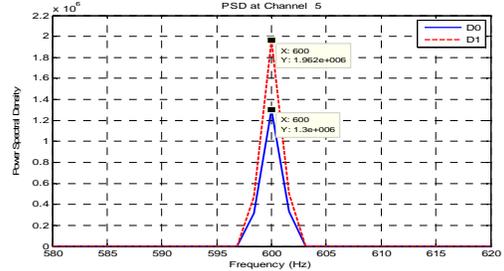


図2 CH5 の各状態の PSD 比較 (sin 波 600Hz で加振する場合)

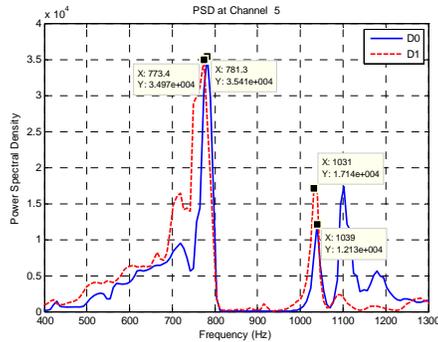


図3 CH5 の健全状態と損傷状態1の PSD 比較 (スイープ加振)

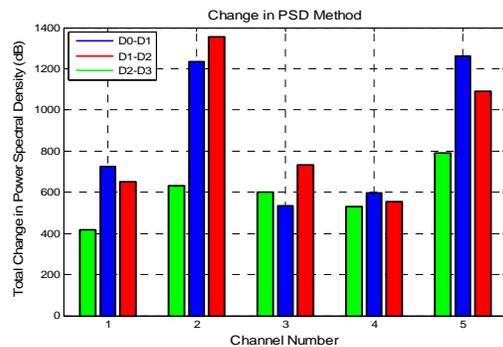


図4 損傷D1~D3の Total_Change (TC) (各状態のパワースペクトルの差)

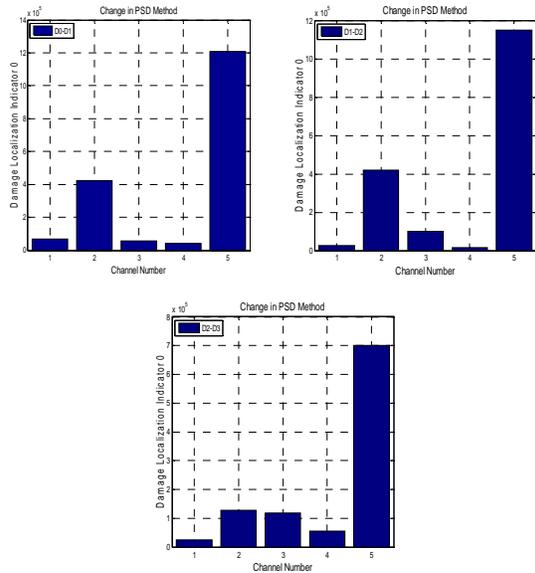


図5 損傷D1～D3のDamage_Indicator (DI)
(各状態のパワースペクトルの差)

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、局部振動実験の数値シミュレーションを行った。

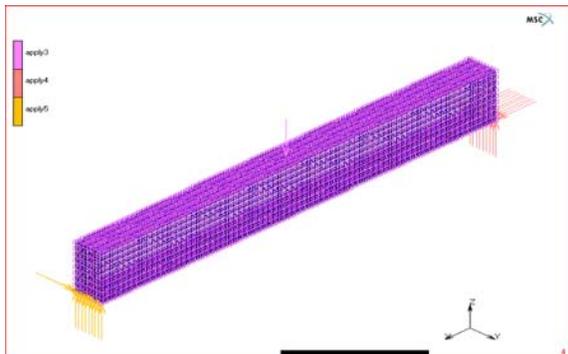
(1) 解析モデル

汎用構造解析プログラムであるMARCを用いて実験のRC供試体をモデル化した健全状態モデルと損傷状態モデルを図6に示す。モデルの材料定数を表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	コンクリート	鉄筋
要素分割	9600	412
幾何特性	立方体	弾性はり
ヤング率 E [N/cm ²]	2×10 ⁶	2×10 ⁷
質量密度 ρ [Kg/cm ³]	250×10 ⁻⁶	786×10 ⁻⁶
ポアソン比	0.2	0.3
減衰率	0.03	0.01

健全状態D0



損傷状態D1～D3 (損傷位置)



図6 解析要素モデル

(2) 固有値解析

モデルの固有値解析による一部モードの固有振動数を表2に示す。モード24とモード30の固有振動数はRC供試体実験のスイープ波加振における供試体の卓越振動数に近いことから、このモデル化は実験に近いと考えられる。また、モード19と20付近の振動数が損傷によって変化が生じやすいと考えられるので、600Hzで加振することにより損傷が検出しやすいと考えられる。

(3) 動的応答解析

1) アクチュエータによる入力加振のモデル化

図7に示すような入力波形で振動させる。加振周波数は600Hz、入力時間0.25秒、時間ステップ0.000033秒、加振初期荷重P=300N、入力位置は実験のアクチュエータと同じ位置である。計算結果の出力位置は実験の加速度計位置と同じである。(図1参照)

2) 計算方法: Newmark β法

表2 固有振動数 (Hz)

	ダメージ番号			
	D0	D1	D2	D3
mode1	20	19	18	18
mode16	446	444	436	415
mode17	498	480	449	431
mode18	521	519	512	477
mode19	580	549	517	488
mode20	633	626	605	571
mode21	639	627	615	608
mode22	662	647	623	608
mode23	739	721	703	684
mode24	791	772	740	731
mode25	805	800	786	748
mode26	905	893	845	801
mode27	933	909	858	833
mode28	949	923	909	866
mode29	953	938	918	888
mode30	1084	1039	1023	986

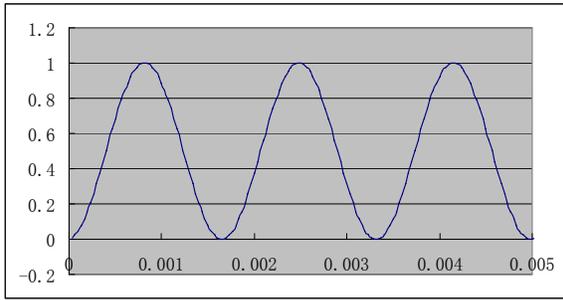


図7 動的応答解析の入力波形 (加振周波数600Hz)

4) 動的応答解析結果

一例として、図8に加振周波数は600Hzで計算したCH5の健全状態と各損傷状態のパワースペクトルを示す。

加振周波数600Hzの場合のTotal_Change (TC) 解析により得られた各チャンネルにおける各状態のパワースペクトル変化の合計 (TC) を図9に示す。

加振周波数600Hzの場合のDamage_Indicator (DI) 解析により得られた各チャンネルにおける各状態の比較を図10に示す。

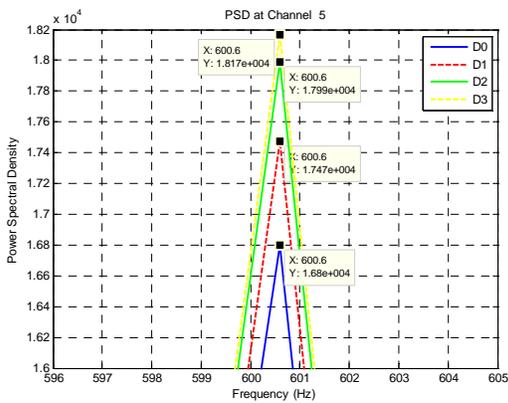


図8 CH5の健全状態と各損傷状態のPSD (加振周波数600Hz)

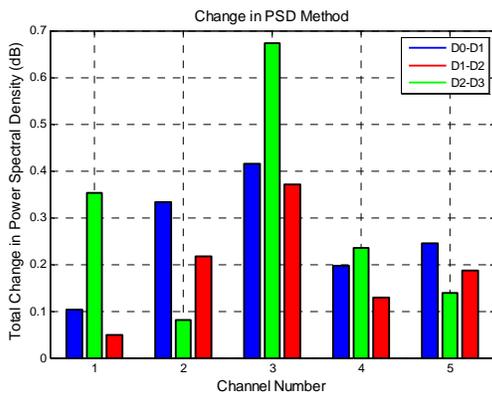


図9 Total_Change (TC) (加振周波数600Hz)

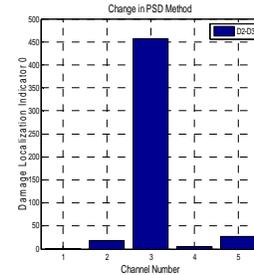
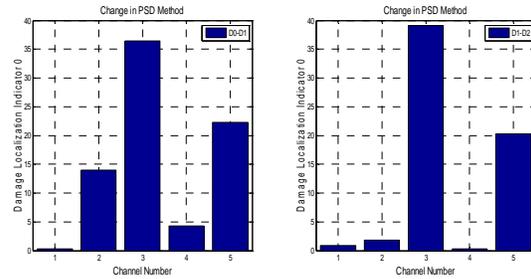


図10 Damage_Indicator (DI) (加振周波数600Hz)

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ピーク値が大きくなっ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CH2、CH3、CH5におけるパワースペクトルの変化が大きくみられた。このことからCH2、CH3とCH5の間に損傷があると考えられる。今回の数値シミュレーションによって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。

実験結果と数値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と損傷位置の特定が可能であった。数値シミュレーションを通して、より良い実験加振周波数を確立することができると思われる。しかし、損傷位置のより精確な特定にはさらに検討する必要がある。

今後、数値シミュレーションを通してより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、それに対して供試体を用いて実験を行い検証したいと思う。

謝辞：本研究は、科学研究費補助金(平成20年度研究代表者大島俊之)を受けて実施したものである。ここに記して深く感謝申し上げます。

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., 2002.