

論文 振動試験に基づくコンクリート部材の損傷同定に関する基礎的検討

内藤 英樹^{*1}・大竹 雄介^{*2}・齋藤 知廣^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨: 調和応答解析と強制振動試験によって、コンクリート部材の損傷同定手法を検討した。はりの左右に対して損傷が非対称に導入された場合に、共振時の振動モードの節が損傷側に移動することを示し、共振曲線(周波数応答関数)に表れる反共振周波数(ある箇所において振動が最も励起されない周波数)に着目して、1次共振から2次共振に移行する節の位置が推定できることを示した。損傷を与えたりと平板の調和応答解析により、健全時からの反共振周波数の変化量に着目して、コンクリート部材の損傷位置が同定できる可能性が示された。そして、コンクリートはり供試体の強制振動試験と解析結果との整合性を確認した。

キーワード: 反共振周波数, 強制振動試験, 起振機, 損傷同定, 調和応答解析

1. はじめに

我が国の社会基盤構造物は一斉老朽化を迎える段階にあり、莫大な数に及ぶ既設構造物に対して、合理的な維持管理手法を確立することが急務である。劣化の初期段階において、部材の中の最劣化箇所を簡便に同定することができれば、点検・調査の精度向上と大幅な労力の軽減が図れる。

振動試験は、様々な諸元の部材や構造に対して実施が容易であり、既設構造物の一斉点検や定期点検への適用が期待されている。しかし、コンクリート部材においては、経年劣化による軽微な損傷が部材や構造の固有振動数や減衰定数などに及ぼす影響は小さく^{1),2)}、これらを指標とした損傷同定は難しいと考えられる。近年では、解析的検討によって、局所的な部材の振動モードに着目した損傷同定手法³⁾も提示されているが、加速度計などを用いて振動モードを精緻に測定することは容易ではないと考えられる。

著者ら⁴⁾も、共振時の振動モードの節が損傷側に移動することに着目して、損傷同定手法を提示した。しかし、その後の検討において、加速度が零となる振動モードの節を正確に実測することができなかつた。そこで、本研究では、振動モードの節(ある周波数において最も振動が励起されない箇所)と反共振点(ある箇所において最も振動が励起されない周波数)との関係に着目し、計測が容易な共振曲線(周波数応答関数)に表れる反共振周波数^{5),6)}を指標として、コンクリート部材の損傷同定を試みる。なお、これに先立つ検討として、著者ら⁷⁾は、重さ 26 kg, 加振力 500 N の起振機を用いた強制振動試験により、スパン 10 m 程度のコンクリート道路橋の共振曲線や反共振周波数が実測できることを確認している。

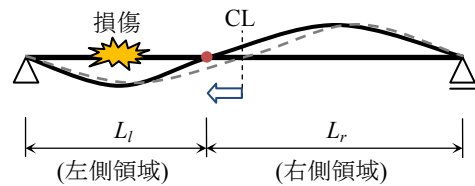


図-1 単純ばりの損傷による節の移動

そこで、本研究では、反共振周波数に着目したコンクリート部材の損傷同定手法を検討するため、FEM によるはりと平板の調和応答解析を行った。さらに、亀裂を導入したコンクリートはり供試体の振動試験を行い、解析結果との整合性を検討した。

2. 損傷と振動モードの関係

2.1 振動モードの節

簡単なモデルとして、図-1 に示す単純ばりの 2 次の共振を考える。曲げ 2 次のモードのときに、節を単純支持条件と見なせば、はりの右側と左側の領域について、それぞれの振動方程式の解が得られる。

$$f_{2nd} = \frac{\pi}{2L_l^2} \sqrt{\frac{EI_l}{\rho A}} = \frac{\pi}{2L_r^2} \sqrt{\frac{EI_r}{\rho A}} \quad (1)$$

ここで、 f_{2nd} は 2 次の共振周波数、 EI ははりの曲げ剛性、 ρ は密度、 A は断面積、 L は左右の支点から節までの距離である。また、下添え字の l と r は、それぞれ図-1 の左側領域と右側領域を表す。式 (1) において、損傷の影響は、曲げ剛性 EI の低下によって考慮している。

図-1 の左側領域に損傷が存在する場合を考える。式 (1) の EI_l が右側領域の EI_r よりも低下するため、 $L_l < L_r$

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 (株)大林組 修(工) (正会員)

*3 宮城県

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

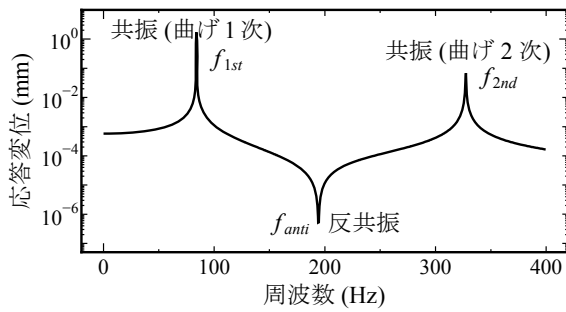


図-2 調和応答解析によるはりの共振曲線

となる。このことから、2 次の共振時において、振動モードの節が損傷側に移動することが示された。

なお、著者ら⁴⁾は、はりと平板を対象とした FEM 解析により、節の位置と部材の剛性分布の関係を整理している。この解析的検討では、より高次の振動モードの節を特定することができれば、剛性分布の細分化が可能になることを示している。

2.2 反共振周波数

反共振とは、異なる固有モード同士の位相が反転する際に生じる振動の不動点であり、構造の任意点の応答が極小となる状態を意味する⁸⁾。図-1 に示す曲げ 2 次モードを例にすると、はり中央の節より左側に起振機を配置して加振した場合には、左側領域の任意点にて反共振点が得られる。同様に、はり中央の節より右側に起振機を配置して加振した場合には、右側領域の任意点にて反共振点が得られる。単純ばりの調和応答解析によって、ある応答測定点において図-2 の共振曲線を得た。共振曲線の応答値を対数表記すると、共振点(極大点)と反共振点(極小点)を容易に見出すことができる。掃引周波数を増加させた強制振動試験(周波数スイープ試験)を考えたとき、図-2 の 1 次の共振周波数 f_{1st} 、反共振周波数 f_{anti} 、2 次の共振周波数 f_{2nd} に対応するはりの振動モードは図-3 のように示される。1 次モードから 2 次モードに移行する際に、節は反共振周波数 f_{anti} のときにこの応答測定点を通る。はりの長さ方向に複数の応答測定点を設けることにより、各点の反共振周波数に着目して、1 次モードから 2 次モードに移行する節の位置を推定することができる。ここで、図-3 より、反共振周波数の前後において応答測定点の位相が反転するため、共振点と同様に、反共振点でも位相が $\pm 90^\circ$ となる⁸⁾。

共振点は、応答測定点に依存しない固有の振動特性であるのに対して、反共振点は応答測定点によって変化するため、位置情報を含む指標である。例えば、支点付近の反共振周波数は 1 次の共振周波数に近く、スパン中央付近にある節に向かって反共振周波数は 2 次の共振周波数に漸近する。

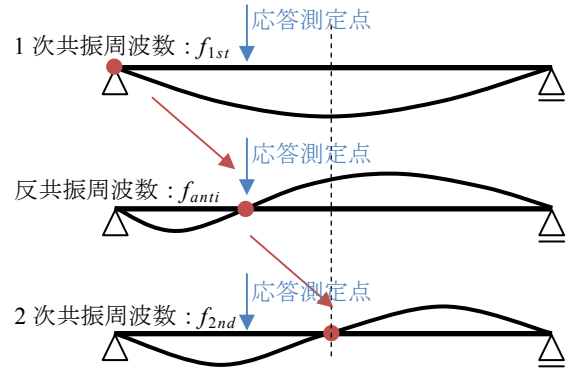


図-3 周波数と振動モードの節の位置

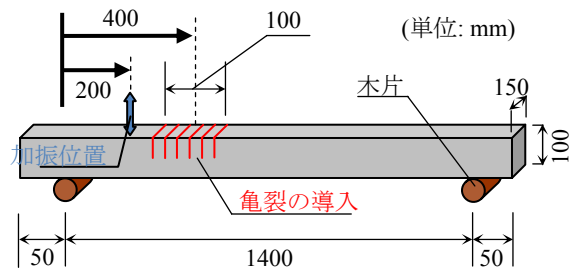


図-4 コンクリートはりの概略図

以降では、はりや平板部材を対象として、反共振周波数による節の位置の評価と損傷同定を試みる。

3. FEM による調和応答解析

3.1 はり部材

(1) 解析概要

後述するコンクリートはり供試体と同様に、断面幅 150mm、断面高さ 100mm、部材長さ 1,500mm の単純ばりを仮定する。支間長は 1,400mm であり、鉄筋は配置していない。

加振位置と損傷位置を図-4 のように設定した。ただし、右側領域の反共振周波数を得る際には、加振位置を右側支点から左に 200mm とした。損傷の範囲は 100mm とし、20mm 間隔に 6 本の亀裂を等間隔に導入した。亀裂深さは 1~4cm まで 1cm ごとに変化させた。なお、本検討は、周波数特性に着目した損傷同定手法を構築することを目的としており、亀裂の導入や後述する平板部材の剛性低下は、実際のコンクリート部材の損傷状況を模擬したものではない。コンクリート部材の剛性低下は、劣化要因や進展程度に大きく依存するため、本手法を構築した上で、今後は様々な劣化要因に対して基礎的データを実験的に収集する必要がある。

汎用 FEM プログラム MARC を用いて、調和応答解析

表-1 コンクリートはりの振動試験と振動解析

		共振周波数 (Hz)		反共振変化量* (Hz)	
		1次	2次		
健全時	実験	85	295	---	
	解析	84	328	---	
損傷 深さ	1cm	実験	80	275	-39
		解析	83	322	-8
	2cm	実験	77	267	-45
		解析	81	310	-24
	3cm	実験	77	266	-54
		解析	77	294	-46
	4cm	実験	75	265	-63
		解析	71	277	-71

※ スパン中央より右側 5cm での応答値

を行った。はり部材を4節点平面応力要素(1,500要素)によってモデル化し、亀裂部分は隣り合う要素の節点を分離した⁹⁾。コンクリートのヤング係数は30,800N/mm²、密度2,300kg/m³、ポアソン比0.167を仮定した。

(2) 解析結果

解析結果の一例として、健全時の共振曲線を図-2に示す。1次と2次の共振点の間に、反共振点が表れた。調和応答解析によって得られる共振周波数を表-1に示す。健全時の1次と2次の共振周波数は、それぞれ84Hzと328Hzになる。支点より5cmごとの各応答測定点において共振曲線から反共振周波数を得た。反共振周波数の分布を図-5(a)に示す。健全時には構造系が対称であるため、反共振周波数の分布も左右対称となった。前記のように、反共振周波数の分布は節の移動を示しており、図-5(a)の健全時の解析結果では、支点付近の反共振周波数は1次の共振周波数に近く、スパン中央の節に向かって反共振周波数は2次の共振周波数に漸近した。

次に、亀裂を導入したときの反共振周波数の分布を図-5(b)に示す。損傷がはりの左側領域に存在することにより、反共振周波数の分布が非対称となった。健全時の振動が完全に対称であれば、解析的には、反共振周波数の分布の非対称性から損傷同定が可能になる。しかし、実際の部材や構造において、支点条件を含めて完全な対称系は成立しないと考え、以降では、健全時からの反共振周波数の変化量(以下、反共振変化量)を指標として、コンクリート部材の損傷同定を試みる。

図-5(a),(b)の差によって得られる反共振変化量の分布を図-6に示す。図-6より、スパン中央付近において、左右の反共振変化量に大きな差異が表れた。はりに亀裂を導入することによって曲げ2次の共振時の節が左側に移動するため、損傷のない側(右側領域)の各応答測

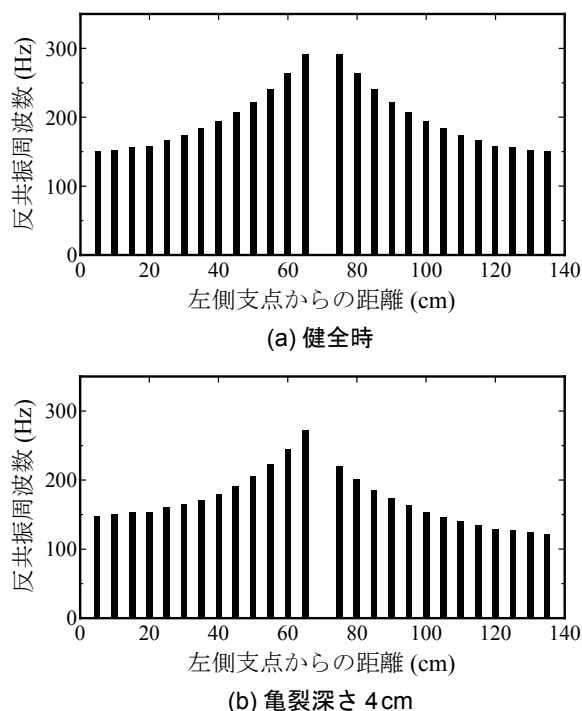


図-5 調和応答解析によるはりの反共振周波数

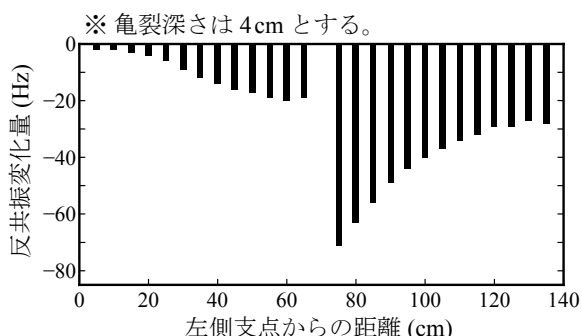
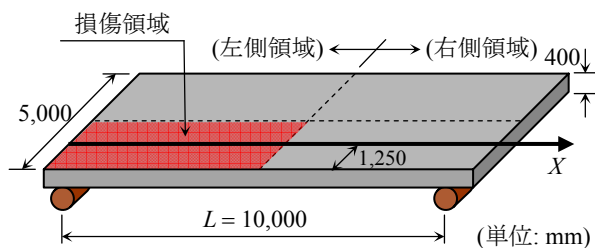


図-6 調和応答解析によるはりの反共振変化量

定点では、周波数が小さい段階で節が通過するようになり、反共振変化量が大きく低下する。すなわち、提案手法は、曲げ2次の共振点の前に表れる反共振周波数を指標として、損傷による構造系の非対称性を評価するものである。

亀裂深さを1~4cmに変化させたとき、スパン中央から右側に5cm(左側支点より75cm)の反共振変化量を表-1に示す。解析結果は、亀裂深さの増加に伴って反共振変化量が大きくなったが、いずれの亀裂深さでも図-6と同様の分布形状となった。また、別途行った加振位置を変化させた解析では、各応答測定点での反共振周波数はわずかに変化した。後述する損傷位置の同定精度に及ぼす影響は小さかった。

以上より、曲げ2次の共振点の前に表れる反共振変化量の分布に着目すれば、損傷がない側の反共振変化量が



※加振位置は $X=L/4$ あるいは $X=3L/4$ とした。

図-7 コンクリート平板の解析モデル

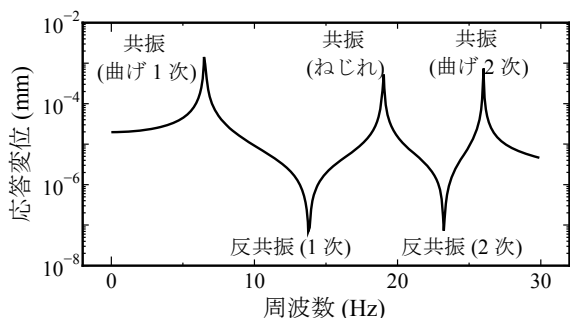


図-8 調和応答解析による平板の共振曲線

大きく低下することから、スパンの左右いずれかの損傷位置を同定できる可能性が示唆された。

3.2 平板部材

(1) 解析概要

前記の検討では、はり部材を対象として調和応答解析を行った。一方、断面幅が大きい平板部材では、曲げ1次と曲げ2次の振動モードの間に、ねじれモードが含まれる。以降は、ねじれモードが存在する平板部材を対象として、反共振変化量と損傷位置との関係を整理する。

図-7の解析対象は、コンクリート床版橋を想定して、スパン10m、幅員5m、厚さ400mmとした。解析は、汎用FEMプログラムMARCを使用し、4節点シェル要素(5,000要素)によってモデル化した。本解析では、鉄筋は考慮していない。

図-7に示すように、手前側の長辺から1.25m位置を通り、長辺と平行なX軸を仮定する。X軸は左側支点を原点とする。加振位置はX軸上として、図-7の左側領域の反共振周波数を得る際には $X=2.5$ mとし、右側領域の反共振周波数を得る際には $X=7.5$ mとした。応答測定点は、X軸上に左側支点から0.5m間隔に設定した。

材料特性は、コンクリートのヤング係数 $30,000 \text{ N/mm}^2$ 、密度 $2,300 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比 0.16 を仮定した。損傷は、図-7に示す平板の1/4領域に対して、コンクリートのヤング係数を半分に低減し、 $15,000 \text{ N/mm}^2$ とした。

(2) 解析結果

解析結果の一例として、健全時の共振曲線を図-8に

表-2 平板の共振周波数 (解析結果)

	共振周波数 (Hz)		
	1次モード (曲げ1次)	2次モード (ねじれ)	3次モード (曲げ2次)
健全時	6.5	19.0	26.0
損傷時	6.0	17.5	24.0

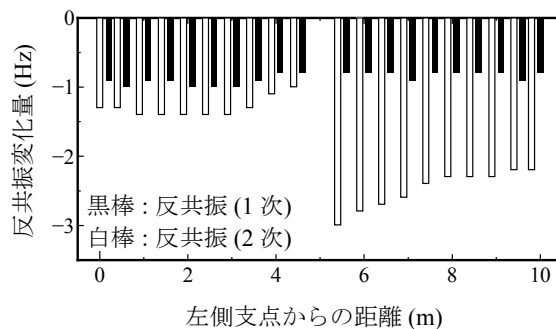


図-9 調和応答解析による平板の反共振変化量

示す。1次と2次の曲げ振動モードの間にねじれ振動が存在し、それぞれの共振点の間に反共振点が存在した。健全時と損傷時の共振周波数を表-2に示す。

はりの検討と同様に、損傷を導入した場合の健全時からの反共振変化量を図-9に示す。図-9より、ねじれモードを含むことによって、1次の反共振変化量の分布には、損傷による明確な非対称性は見出せなかった。一方、2次の反共振変化量(曲げ2次の共振点の前に表れる反共振点)では、図-6のはりの検討と同様に、損傷のない側において反共振変化量が大きく低下した。前記のはりの検討と同様に、曲げ2次の共振に移行する際に、損傷のない側では節が早期に通過するため、各応答測定点の反共振変化量が大きく低下する。このように、橋軸方向に限定した場合には、ねじれモードを含む平板の挙動であっても、曲げ2次の共振点の前に表れる反共振変化量の分布に着目すれば、損傷がない側の反共振変化量が大きく低下することから、スパンの左右いずれかの損傷位置を同定できる可能性が示唆された。

なお、平板における橋軸直角方向の損傷位置の同定については、図-2や図-3に示す曲げ挙動の振動モードとは異なるため、今後、実験と併せて詳細に検討する予定である。

4. コンクリートはり供試体の振動試験

4.1 実験概要

基礎的検討として、コンクリートはり供試体の振動試験と、前記の解析結果との整合性を確認する。実験は前

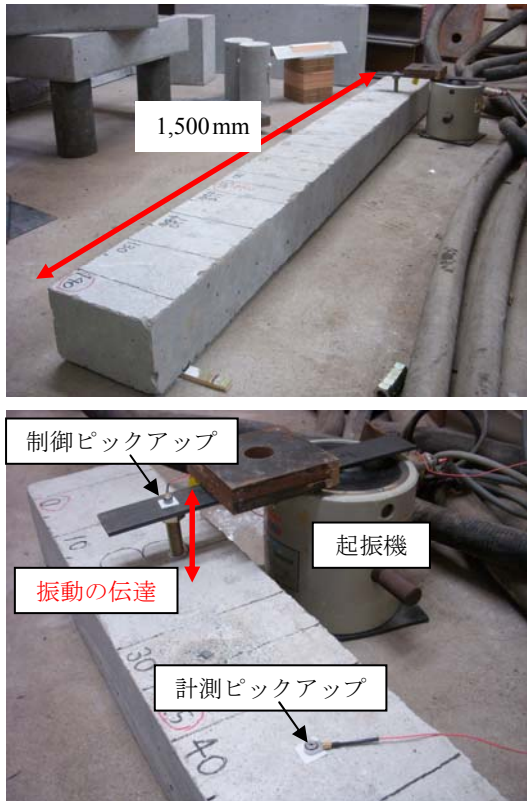


写真-1 コンクリートはり供試体の振動試験

記の解析概要と同じ条件で行った。供試体は無筋コンクリートとして、コンクリートのヤング係数は $30,800 \text{ N/mm}^2$ 、密度は $2,300 \text{ kg/m}^3$ 、ポアソン比は計測していない。損傷は、はり上面からコンクリートカッターによって亀裂を導入した。

実験ではより明確に共振曲線が得られることから、左側支点より 35 cm 位置を加振した。なお、加振位置によって反共振周波数の測定値に大きな差異がないことを実験と解析によって確認している。

強制振動試験は、電磁コイル式の起振機により、周波数を漸増させた強制外力(調和振動)を与える。本実験では参考文献7)の継続として新たに供試体を作製し、加振方法も見直した。参考文献7)では、はり供試体の上に起振機を配置して加振したが、本実験では起振機の質量(9.5 kg)の影響を除去するため、写真-1に示すように、起振機の振動テーブルから鋼板を介して、はり供試体上面に調和振動を伝達させた。供試体上面の鋼板の先端には、制御加速度ピックアップを貼付しており、入力加速度の振幅が一定になるように起振機を制御する。このとき、はり供試体の左側支点から 5 cm 間隔に応答測定点を設け、それぞれの位置で共振曲線を得た。制御加速度は 1.0 m/s^2 として、 $50 \sim 400 \text{ Hz}$ までの強制振動試験を2分間で行った。本実験で使用した機材の仕様などは、参考文献7)に示した。

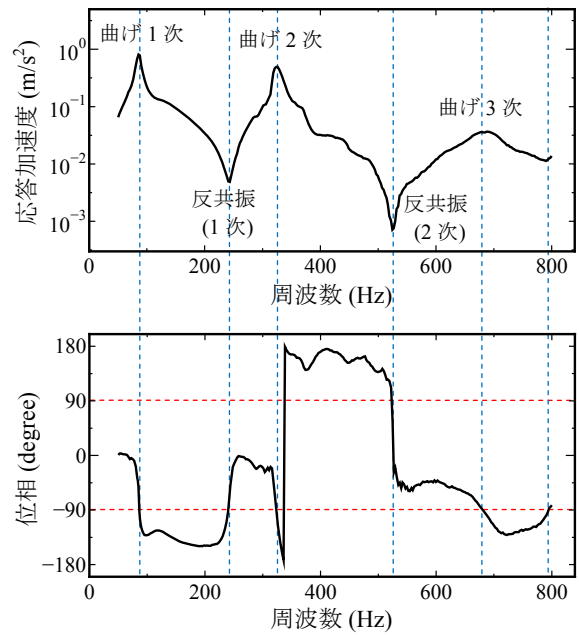


図-10 振動試験によるコンクリートはりの共振曲線

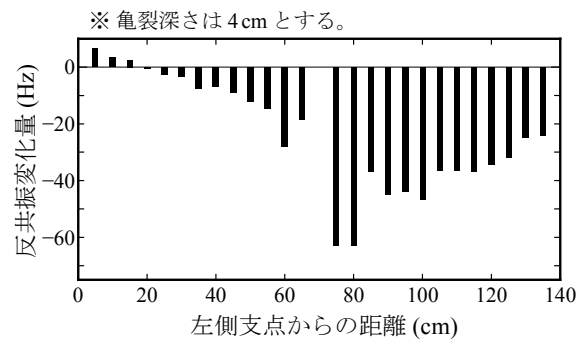


図-11 振動試験によるはりの反共振変化量

4.2 実験結果

強制振動試験によって得られた健全時の共振曲線の一例を図-10に示す。ここでは、3次の共振点まで示すため、掃引周波数は $50 \sim 800 \text{ Hz}$ としている。1~2次の共振周波数を表-1に併せて示す。表より、強制振動試験によって得られたはり供試体の共振周波数は、調和応答解析と概ね対応することを確認した。図-10に示した共振曲線では、共振点と反共振点を明確に得ることができた。いずれの共振点や反共振点も位相が -90° と対応する実験結果が得られた。

損傷時の一例として、亀裂深さ 4 cm での反共振変化量の分布を図-11に示す。図-6と図-11の比較より、実験結果は解析結果と良好に対応することが確認できた。このことから、解析結果と同様に、曲げ2次の共振点の前に表れる反共振変化量の分布に着目すれば、損傷がない側の反共振変化量が大きく低下することから、スパンの左右いずれかの損傷位置を同定できると考えられる。

スパン中央より右側に 5 cm (左側支点より 75 cm) での反共振変化量の実験結果を表-1 に示す。表より、亀裂深さが 3 cm と 4 cm になると、実験結果と解析結果が良好に対応した。表-1 より、亀裂深さが 3 cm のときには、1 次の共振周波数の健全時からの低下は 10 % 程度となる。一方、亀裂深さ 1 cm と 2 cm の場合には、実験結果の反共振変化量は大きく表れた。本実験の測定精度では、1 cm や 2 cm の小さな亀裂に対して、反共振周波数を精緻に測定することができなかつたと考えられる。

以上の基礎的検討により、亀裂深さが 3 cm 以上の場合には、実験結果と解析結果の整合性を確認することができ、反共振周波数を指標とした損傷位置同定の可能性が示された。

5. まとめ

本研究は、調和応答解析とコンクリートはり供試体の振動試験によって、損傷同定に対する反共振周波数の有用性を検討した。その結果、本実験の条件において反共振周波数を指標とした損傷同定の可能性が示唆された。本研究の目的は、様々な部材や構造に対して、劣化や損傷箇所を振動試験によって同定することである。本検討は、その基礎的検討として、反共振周波数に着目した損傷同定手法の概念を示したに過ぎず、さらなる手法の高度化に取り組む予定である。

また、本研究で示した実験や解析の条件は、実際の部材の損傷状況を模擬したものではない。コンクリート部材の剛性低下や周波数特性は、劣化要因や進展程度に大きく依存するため、今後、様々な環境促進試験や現場計測に対して提案手法を適用し、基礎的データを収集する必要がある。

参考文献

1) 西村昭, 藤井学, 宮本文穂, 加賀山泰一: 橋梁の損

傷評価における力学挙動の有効性, 土木学会論文集, No.380/I-7, pp.355-364, 1987.4

- 2) 宮本文穂, 森川英典, 山本昌孝: 既存コンクリート橋の損傷に対応する動的挙動の感度特性と損傷評価への適用, 土木学会論文集, No.442/V-16, pp.61-70, 1992.2
- 3) Jeong-Tae Kim, Yeon-Sun Ryu, Hyun-Man Cho and Norris Stubbs: Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method, *Engineering Structures*, ELSEVIER, Vol.25, pp.57-67, 2003.
- 4) 大竹雄介, 内藤英樹, 鈴木基行: 共振特性に着目した RC 部材の剛性分布の推定, 土木学会第 64 回年次学術講演会, V-165, pp.327-328, 2009.9
- 5) 稲田貴臣, 島村佳伸, 轟章, 小林英男: 反共振周波数変化に基づく CFRP 積層梁のはく離領域の判定, 日本機械学会論文集, A 編, Vol.67, No.664, pp.1929-1935, 2001.2
- 6) E. Douka, G. Bamnios and A. Trochidis: A method for determining the location and depth of cracks in double-cracked beams, *Applied Acoustics*, ELSEVIER, Vol.65, pp.997-1008, 2004.
- 7) 大竹雄介, 内藤英樹, 中野聡, 鈴木基行: 小型起振機を用いたコンクリート橋の強制振動試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1459-1464, 2010.7
- 8) Neville H. Fletcher and Thomas D. Rossing [著], 岸憲史, 久保田秀美, 吉川茂 [訳]: 楽器の物理学, Springer Japan, 2008.
- 9) 内藤英樹, 山洞晃一, 古賀秀幸, 鈴木基行: 初期ひび割れを有する繊維補強コンクリートの凍結融解試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1135-1140, 2009.7