模擬空隙を与えたコンクリート供試体の周波数応答解析

東北大学　学生会員　○小林滉季　　東北大学　学生会員　杉山涼亮
東北大学　　正会員　内藤英樹

1. はじめに

著者らは動電式加振器を用いた振動試験に着目し，コンクリート構造物の損傷評価に取り組んできた[1)~4)]．この手法は，正弦波の周波数を徐々に上昇させながら加振器周りの振動を励起させ，共振周波数(剛性)の低下により内部損傷の検知が可能となる．平板やはりなどの重複反射が卓越する構造条件では，健全状態の共振周波数を次式(1)で近似的に算出できる．

$$f_0 = c/\lambda \quad (1)$$

ここで，f_0は共振周波数，cは見かけの弾性波伝播速度，λは共振波長であり部材厚さの2倍を与える．

これまでは振動試験による実験的検討を中心に取り組んできたが，解析による評価は不十分であった．そのため，式(1)からの共振周波数の低下と損傷状態との関係が整理されていなかった．そこで本研究では，共振周波数に着目した損傷同定の基礎的検討として，(i)周波数応答解析と振動試験結果との整合性を検討する．また，(ii) 模擬損傷の大きさと共振周波数の相関式（以下，損傷評価式）を提案し，実験と解析の両面から妥当性を確認する．

2. 周波数応答解析

周波数応答解析は，正弦波の入力に対する定常応答を求める線形動解析手法である．指定した周波数範囲に対して，ある周波数刻みで解析を行う．振動試験を再現するため，入力手段は，強制運動（加速度）で与える．使用した解析ソフトはFemap with NX Nastranで，4面体2次固体要素を使用する．加速度を入力した節点に隣接する節点の応答加速度を評価した．

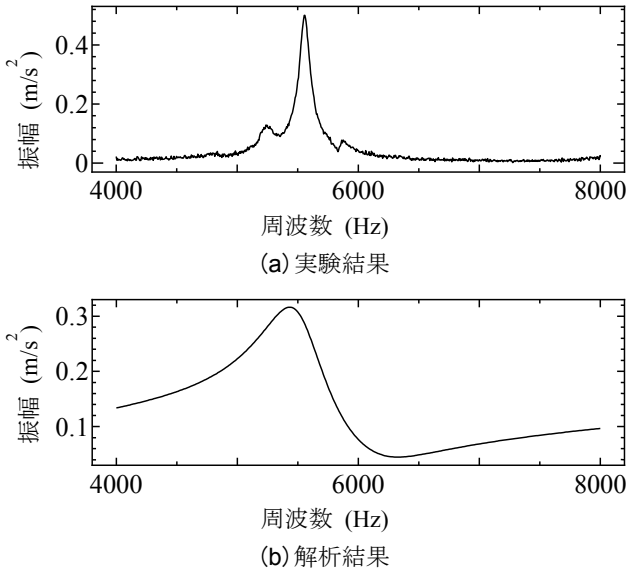
表－1に示す計98体の既往の供試体を解析対象とする[1)~4)]．鉄筋は無視して，コンクリートのポアソン比は0.20で統一した．

実験結果と解析結果の比較の一例として，角柱供試体の共振曲線を**図－1**に示す．共振曲線中のピークに対応する周波数が実験と解析で概ね対応している．続いて，計98体(測点数100)の供試体について，実験と解析による共振周波数の比較を**図－2**に示す．相関係数は0.98となり，良好に対応した．以上より，振動試験と周波数応答解析の結果の整合性を確認できた．これまでの著者らの検討では，0.1～0.2mm程度のひび割れ幅になると，空隙としてモデル化できることを確認している．FEMの周波数応答解析は様々な部材形状や構造条件，空隙パターンなどに対して汎用性があり，共振周波数を指標とした損傷同定への活用が期待される．

表－1　供試体概要

形式	個数	寸法 (mm)	弾性係数(GPa)	密 度 (kg/m^3)	損　傷　種　類
角柱[1),2)]	8	150×150×250	30.8	2300	厚さ10 mmの正方形発泡スチロールを高さ1/2または1/4の位置に埋設
	48	100×100×400	36.6	2360	厚さ0.1 mmまたは0.3 mmのアルミ板により供試体中央に切欠きを導入
円柱	13	φ100×200	33.5	2320	厚さ1 mmの円形テフロンシートを高さ1/2の位置に1枚，または高さ1/3と2/3の位置に2枚埋設
RCはり[2)]	6	150×250×3000	38.8	2360	厚さ10 mm，幅100 mmの発泡スチロールを主鉄筋位置に埋設
RC床版[3)]	12	1800×1800×220 舗装厚さ:75	33.6	2340	厚さ10 mmの正方形発泡スチロールを圧縮鉄筋の位置に埋設　※12体中6体はアスファルト舗装有り
平板	10	796×796×180	32.9	2320	厚さ5 mmのポリエチレンシートを高さ1/3の位置に埋設
開水路[4)]	1	側壁高さ:790 全長:6000	32.3	2330	厚さ105 mm，幅400 mmまたは800 mmの発泡スチロールを側壁中央部に埋設

キーワード：周波数応答解析，振動試験，損傷同定
連絡先：〒980－8579　宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6－6－06　　TEL：022－795－7449



図－1 共振曲線(角柱供試体)

3. 損傷評価式

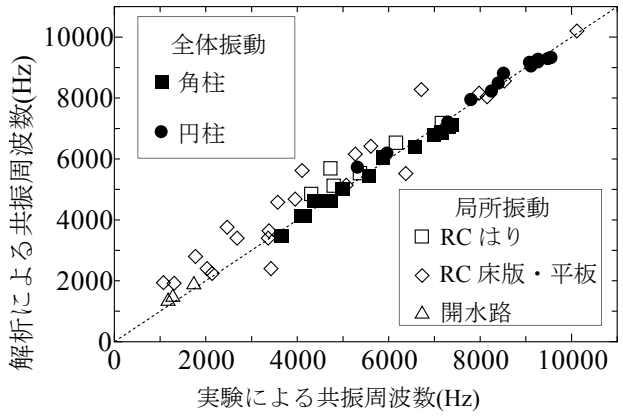
前記の式(1)は，平板やはりなどの重複反射が卓越する構造条件に対して妥当な解を与える．このような構造条件に限定すれば，内部に空隙がある場合も簡便な損傷評価式が導出できると考えた．波の回折限界を踏まえ，共振波長に対する損傷長さの比 D/λ と，健全状態を基準とした共振周波数比 f/f_0 との関係を**図－3(a)**に整理した．ただし，損傷長さ D は，損傷が正方形のときは一辺の長さであり，矩形の時は損傷面積の平方根で与えた．**図－3(a)**より，実験データは概ね直線式(2)に従うことが示された．

$$f/f_0 = 1 - D/\lambda \tag{2}$$

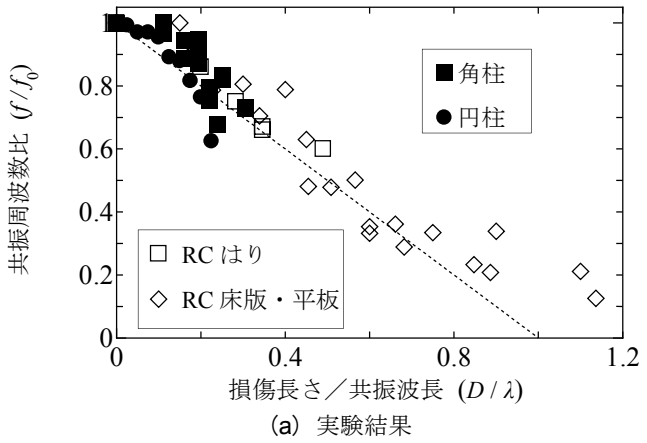
この直線が，今回提案する損傷評価式である．相関係数は–0.95 となり，非常に高い相関性を示した．周波数応答解析によるデータを用いた同様の検討結果を**図－3(b)**に示す．こちらも概ね損傷評価式に従い，相関係数は–0.94 と高い相関性を示した．以上により，実験と解析の両面から損傷評価式の妥当性を確認した．ただし，損傷評価式が適用できるのは弾性波が単純に往復するようなシンプルな形状に対してのみであり，特殊な形状を有する場合は，周波数応答解析による損傷評価が必要になると考えられる．

4. 結論

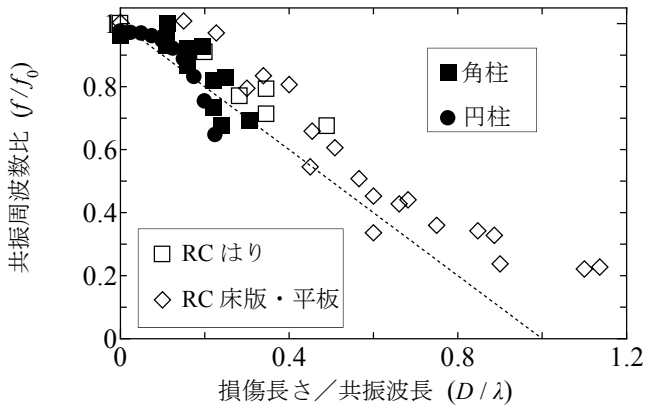
様々な供試体諸元と損傷パターンによる振動試験の再現解析を行い，周波数応答解析の有用性を確認した．さらに損傷の大きさと共振周波数に関する損傷評価式を提案し，実験と解析の両面から妥当性を確認した．



図－2 実験と解析による共振周波数の比較



(a) 実験結果



(b) 解析結果

図－3 D/λ と f/f_0 の関係

参考文献：1)林弘ほか：共鳴振動試験によるコンクリートのひび割れ深さの推定，土木学会第64回年次学術講演会，V-214, pp.425-426, 2009. 2)内藤英樹ほか：小型起振機を用いた強制加振試験に基づくコンクリート床版の非破壊試験法，土木学会論文集E2, Vol.67, No.4, pp. 522-534, 2011. 3)土屋祐貴ほか:強制加振試験に基づくRC床版供試体の健全性診断，土木学会第68回年次学術講演会，I-405, pp.809-810, 2013. 4)杉山涼亮ほか：振動試験に基づくコンクリート開水路の健全性評価，土木学会第71回年次学術講演会，V-572, pp.1143-1144，2016.