

異種材料間の境界面剥離の推定に対する共振法の適用性検討

東北大学 学生会員 ○夏目 泰輔
東北大学 正会員 内藤 英樹

1. はじめに

近年、コンクリートと異種材料の組み合わせによる複合材料や複合構造が多く使用されている。しかしこれらは、コンクリートと異種材料間の境界面剥離によって耐荷力を失うものが多い。そのため、境界面剥離の発生メカニズムやポストピーク域での破壊進展過程を明らかにすることは、材料の最適設計、構造物の高性能化や経年劣化の防止などに繋がると考えられる。異種材料間の境界面剥離の数値シミュレーション¹⁾が数多く行われており、非破壊試験との組み合わせも検討されている。しかし、主な非破壊検査手法(e.g. レーダー、超音波、インパクトエコー)は構造物の表面付近の変状を捉えることはできるが、複合材料の内部に分散する異種材料間の境界面剥離の評価には課題が残されている。

一方、Naito ら²⁾は加振器を用いて構造物の局所的な定常振動(共振)を励起することにより、構造内部の損傷状態を推定する非破壊試験法を検討している。本研究は、この手法を用いて境界面剥離の非破壊評価を試みる。具体的には、ガラス玉とモルタルを充填した円柱供試体を作製し、段階的に載荷して境界面剥離を生じさせた。そして、載荷段階ごとの共振周波数を測定し、荷重レベルと共振周波数の関係を整理した。

2. 複合材料の剛性評価

直径 100 mm、高さ 200 mm の円柱試験体をそれぞれ 3 体ずつ作製した。本実験では基準供試体とガラス玉供試体を対象とした。健全供試体はモルタルのみで作製した。ガラス玉供試体は、型枠内に 25 mm のガラス玉(108 個)を詰め込み、その隙間をモルタルで充填した。ガラス玉の配置は最密充填状態である。モルタルの配合は水： $W=280$ (kg/m³)、早強セメント： $C=467$ (kg/m³)、細骨材： $S=1,401$ (kg/m³) とし、AE 減衰剤は使用しなかった。材料試験結果より、モルタルの音速 3,388 m/s、質量密度 2,030 kg/m³、動弾性係数 23,300 MPa であった。ガラス玉の質量密度は 2,470 kg/m³ である。ガラス玉の音速と動弾性係数の推定値は、それぞれ 5,397 m/s と 71,300 MPa である。

上記の 6 体の円柱供試体に対して、写真-1 に示すように、供試体上面から強制加振試験を行った。加振器の基本設定は、周波数帯域 2,000-15,000 Hz に渡ってパワースペクトル密度 0.5 (m/s²)²/Hz を一定にした。加速度波形の振幅(RMS)は 81 m/s² である。供試体上面に加速度センサを接触させて 5 秒程度の応答に基づいて共振曲線を測定した。

測定結果を図-1 に示す。本研究では、最大振幅に対応する周波数を共振周波数と定義した。健全供試体の共振周波数が 8,720 Hz であった。これに対して、ガラス玉供試体は 10,760 Hz まで共振周波数が上昇した。ガラスのヤング率がモルタルよりも高いため、共振周波数が上昇したと考えられる。

3. 異種材料間の境界面剥離の推定

定常振動に基づく共振周波数の測定手法により、荷重に伴うガラス玉供試体の内部損傷(境界面剥離)の評価を試みる。上記の 2 種類の供試体に対して静的載荷試験を行った。最大荷重までの 20 kN 毎、およびポストピーク域での変位 0.1 mm 毎を基本として、載荷ステップごとに供試体を載荷試験機から取り出して、図-1 の強制加振試験を行った。

キーワード 複合材料, 非破壊試験, 損傷同定, 共振周波数, 振動

連絡先 〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 TEL:022-795-7449 FAX: 022-795-7448

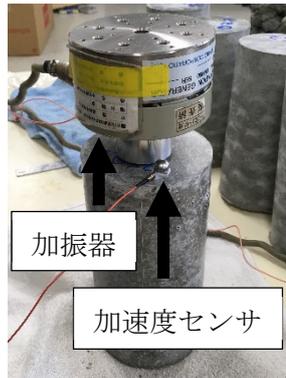


写真-1 測定の様子

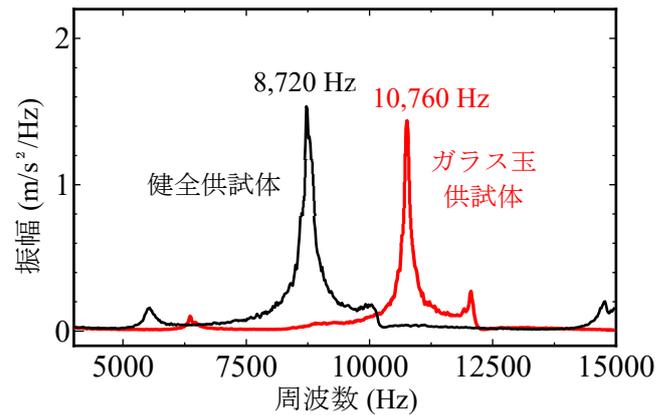


図-1 周波数応答曲線

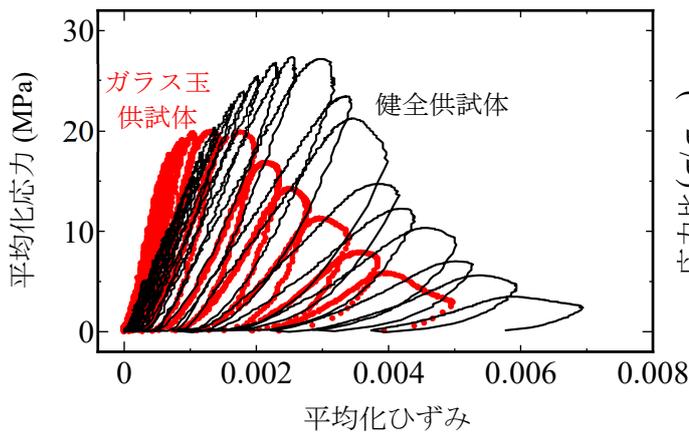


図-2 平均化応力-ひずみ曲線

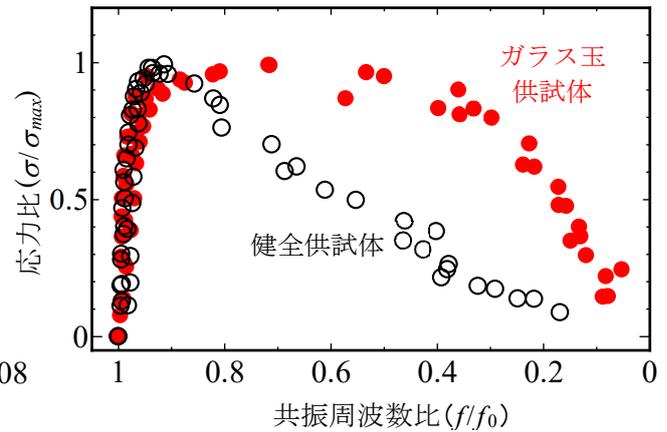


図-3 応力と共振周波数の関係

健全供試体及びガラス玉供試体の平均化応力-ひずみ曲線を図-2に示す。健全供試体の圧縮強度は28 MPa程度であった。ガラス玉供試体は、ガラスの剛性が付加されるために初期剛性が大きくなったが、圧縮強度は20 MPa程度に低下した。円柱供試体の平均化応力と共振周波数の関係を図-3に示す。グラフの縦軸は圧縮強度で除し、横軸は健全状態での共振周波数で正規化した。健全供試体は、最大荷重までに共振周波数の低下はほとんど見られず、最大荷重付近で共振周波数比0.95となった。その後、荷重低下とともに共振周波数比が概ね線形で低下した。これに対して、ガラス玉供試体では最大荷重付近で共振周波数が0.5程度まで顕著に低下した。ガラス玉とモルタルの付着強度は小さく、最大荷重までに多くのガラス玉周りで境界面剥離が生じたものと推察される。なお、載荷後に供試体を解体したところ、ガラス玉とモルタルの境界面剥離が生じており、破壊したガラス玉は見られなかった。

4. まとめ

荷重を加えた円柱供試体に対し、共振法により、モルタルとガラス玉の境界面剥離の推定を試みた。その結果、共振周波数の低下に着目して、境界面剥離の発生や進展を定量的に推定できる可能性が示唆された。今後、本手法と数値シミュレーションを活用して、複合材料および複合構造の点検・評価手法に発展させたい。

参考文献

- 1) Kim, H., Wagoner, M.P. and Buttlar, W.G., Simulation of fracture behavior in asphalt concrete using a heterogeneous cohesive zone discrete element model. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2009; 20(8): 552-63.
- 2) Naito, H. and Bolander, J.E., Damage detection method for RC members using local vibration testing. *Engineering Structures*. 2019; 178: 361-74.