

論文 合成構造における鋼コンクリート付着状態の非破壊評価

神宮 裕作*1・内藤 英樹*2・鈴木 基行*3

要旨: 非破壊試験による合成構造の内部損傷評価手法を構築するため、加振器を用いた強制加振試験（共振法）の適用性を検討した。本実験では、RC および SRC はり供試体の静的載荷試験での段階的な載荷ステップごとに強制加振試験を行い、振動試験データと曲げひび割れおよび鉄骨とコンクリートの付着状態との関係を整理した。その結果、加振器を用いてはり供試体の局所的な共振を励起することができ、共振周波数の低下に着目して、外観変状には表れない SRC 構造内部の鉄骨とコンクリートの付着損失の範囲を同定できる可能性が示唆された。

キーワード: 合成構造, 振動試験, 付着, 損傷同定

1. はじめに

合成構造は、鋼とコンクリートが相互に拘束することによって高い耐荷性能と変形性能を同時に可能とする。このため、施工の合理化と併せて、従来から様々な場面に合成構造が活用されてきた。近年、構造物の維持管理の重要性を踏まえて、複合構造標準施工方書¹⁾では維持管理編が新たに制定された。しかし、既存の非破壊試験法の多くは表面付近の変状を捉えるものが多く²⁾、SRC 構造などのコンクリート内部に鉄骨が埋め込まれる構造形式では、構造物内部のひび割れや鋼コンクリートの付着状態などを点検・調査することが容易でない。合成構造の設計では、鋼コンクリートの完全付着を前提とする構造計算もあり³⁾、供用中の合成構造の健全性を評価するためには、構造物内部の鋼コンクリートの付着状態を推定できる非破壊試験法の開発が望まれる。

内藤ら⁴⁾、杉山ら⁵⁾は、図-1 の加振器を用いた構造物の非破壊評価を検討している。図-1 (a) の全体振動試験では部材全体の平均剛性を評価するが、局所的な損傷を捉えることや損傷位置の同定は難しい。一方、図-1 (b) の局所振動試験は、部材の局所的な共振を励起し、限られた範囲の平均剛性を評価する。鋼コンクリートの付着損失によって構造物内部に薄い空隙が生じるならば、鋼コンクリート付着面に直交するように加振し、共振周波数の低下によって付着損失が推定できると考えた。

そこで、本研究は基礎検討として SRC 構造に着目し、鉄骨とコンクリートの付着損失の推定を試みるため、曲げ破壊型の RC および SRC はり供試体を作製した。そして、これらの静的載荷試験の段階的な荷重ステップごとに強制加振試験を行い、振動試験データと曲げひび割れおよび鋼コンクリート付着状態との関係を整理する。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

RC および SRC 供試体の諸元一覧と概略図を表-1 と図-2 に示す。供試体寸法は部材長さ 2800 mm、断面高さ 400 mm、断面幅 400 mm とした。鉄筋とコンクリートの材料試験結果を表-2 に示す。本実験では曲げ破壊が先行するように、複合構造標準施工方書³⁾を参照して供試体諸元を決定した。鉄骨端部の定着は取っていない。

載荷条件を図-2 に示す。供試体をスパン 2200 mm で単純支持し、スパン中央に鋼製ピンを介して鉛直荷重を加えた。せん断スパン比は 3.14 である。スパン中央の供試体下面に変位計を配置して荷重-変位関係を測定した。SRC 断面のひずみゲージの貼付位置を図-3 に示す。圧縮鉄筋、圧縮フランジ、ウェブ、引張フランジ、引張鉄筋の軸方向ひずみを測定した。図-2 の x 軸に沿って、スパン中央から ±200 mm 間隔の断面ごとに図-3 のひずみゲージ 5 枚を貼付し、鉄骨とコンクリートの付着に

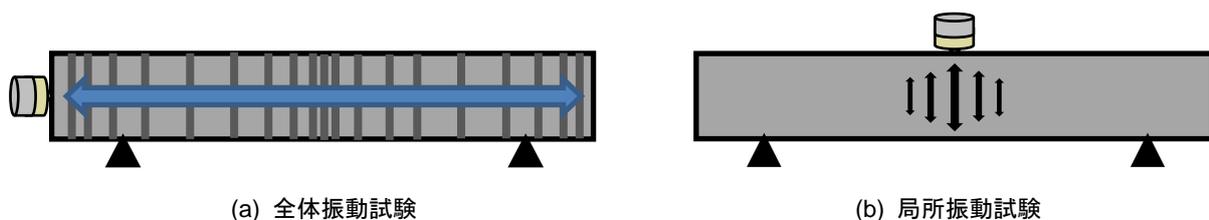


図-1 共振法による強制加振試験の概略図

*1 東北大学 工学部建築・社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻准教授 博(工) (正会員)

*3 東北大学 名誉教授 工博 (正会員)

表-1 供試体諸元一覧

	部材長さ (mm)	断面寸法 (mm×mm)	スパン (mm)	有効高さ (mm)	H形鋼 $h \times b \times t_w \times t_f$ (mm)	軸方向鉄筋	スターラップ (mm)	鋼材比 (%)	鉄骨鉄筋比	曲げせん断耐力比
RC	2800	400×400	2200	350	なし	D16×10本 +側方4本	D10@150	2.0	0	1.95
SRC	2800	400×400	2200	350	200×200×8×12	D13×8本	D10@150	5.2	6.1	2.45

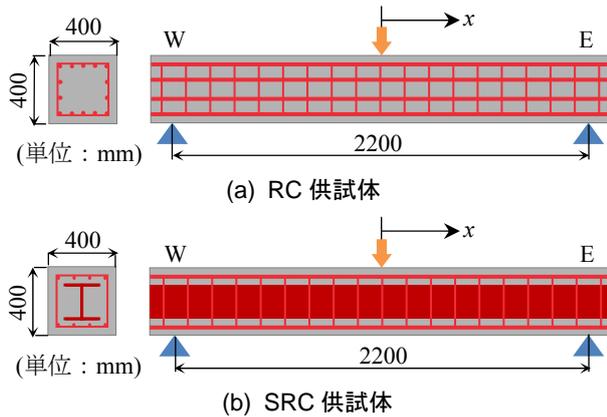


図-2 供試体概略図

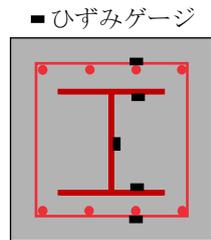


図-3 ひずみゲージの貼付位置

よる断面の平面保持を検討した。同様に、RC 供試体でも圧縮鉄筋と引張鉄筋にひずみゲージを貼付した。

荷重パターンは、降伏荷重の計算値 P_y に対して 0.25, 0.50, 0.75 P_y の荷重を保持して、ひび割れ図の作成と強制加振試験を行った。その後、スパン中央の引張鉄筋に貼付したひずみゲージ値と表-2 の材料試験結果との対応から、実験時の降伏変位 δ_y を定めた。なお、SRC 供試体では引張フランジよりも引張鉄筋の降伏が先行した。降伏以降の荷重ステップは、降伏変位 δ_y を基準とした整数倍の変位に対して $6\delta_y$ まで片押し荷重した。1 δ_y 荷重では荷重を保持したが、安全上の配慮から、2 δ_y 以降は荷重を除荷してひび割れ図の作成と強制加振試験を行った。

2.2 強制加振試験

本実験で使用した加振器は、周波数帯域 100~20,000 Hz, 最大加振力 50 N, 質量 1.8 kg である⁵⁾。図-1 の強制加振試験では、指定の周波数帯域にわたって加振器の加速度振幅を一定に制御し、加振点近傍の供試体の応答加速度を測定する。試験方法の詳細や、入力(周波数ご

表-2 材料試験の結果

		降伏強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)
鉄筋	D10	402	196000	576
	D13	373	193000	567
	D16	378	195000	562

	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)
コンクリート	37.2	29200	31900	2290

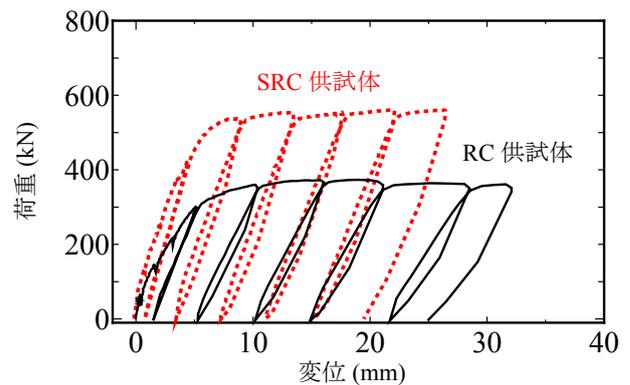


図-4 荷重-変位関係

との加振力)と応答の関係などは、参考文献5)に示した。

図-1 (a) に示す全体振動試験では、正弦波の周波数を増加させるスイープ加振とした。加振条件の基本設定は、加速度振幅を 1 m/s^2 に一定制御し、300~1000 Hz まで18秒間で直線的に周波数を上昇させた。厚さ 0.8 mm の両面テープを介して加振器を供試体端部に接触させて軸方向に加振し、加振点近傍に圧電式加速度センサを両面テープで貼付して、供試体の周波数応答を測定した。

図-1 (b) の局所振動試験では、ホワイトノイズを用いたランダム加振とし、x 軸に沿ってスパン中央から $\pm 100 \text{ mm}$ 間隔ごとに供試体上面から鉛直方向に加振した。これまでの RC 供試体の基礎検討により、図-1 (b) の剛性評価の範囲は加振器まわりに部材厚さと同程度と考えており、この範囲の損傷によって共振周波数が低下する^{4),5)}。

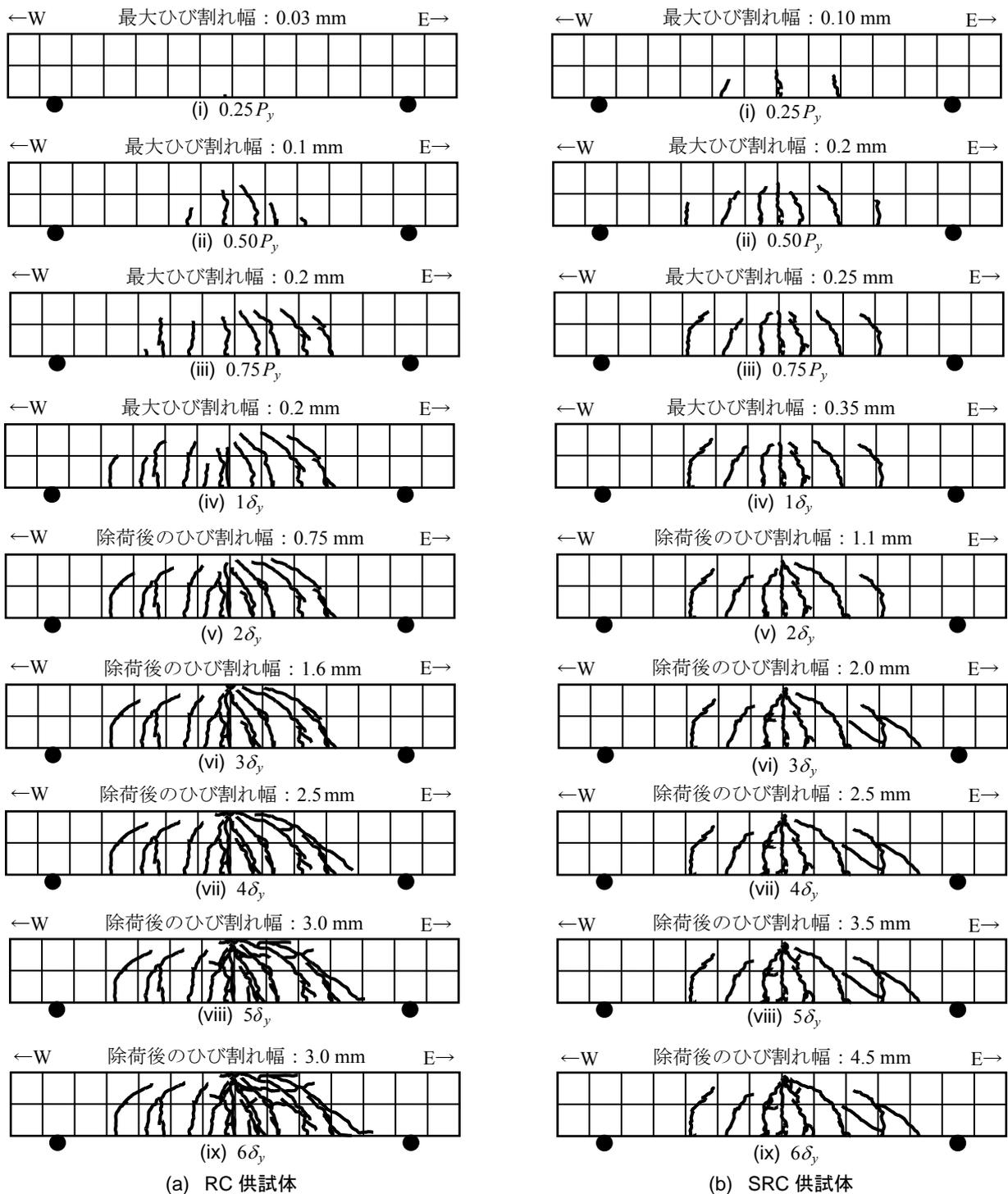


図-5 ひび割れ図

加振条件の基本設定は、周波数帯域 1000~5000 Hz にわたってパワースペクトル密度を $2.0 \text{ (m/s}^2\text{)}^2/\text{Hz}$ に制御した。このとき、加速度時刻歴波形の振幅の実効値 (RMS) は 79 m/s^2 である。加振点近傍に圧電式加速度センサを両面テープで貼付し、供試体の周波数応答を測定した。

3. 载荷試験の結果

3.1 荷重-変位関係

荷重-変位関係とひび割れ図を図-4 と図-5 に示す。

図-5 には、目視とクラックスケールによるひび割れ幅も併せて示した。荷重-変位関係より、いずれも曲げ破壊を呈しており、実験終了まで大きな荷重低下はなかった。ひび割れ図を参照すると、いずれもスパン中央から E 側に斜め方向のひび割れが生じていた。また、SRC 供試体では引張鉄筋量が少ないため、RC 供試体と比較してひび割れ本数が少なく、ひび割れ幅は大きかった。

3.2 断面のひずみ分布

SRC 断面のひずみ分布の一例として、スパン中央 ($x =$

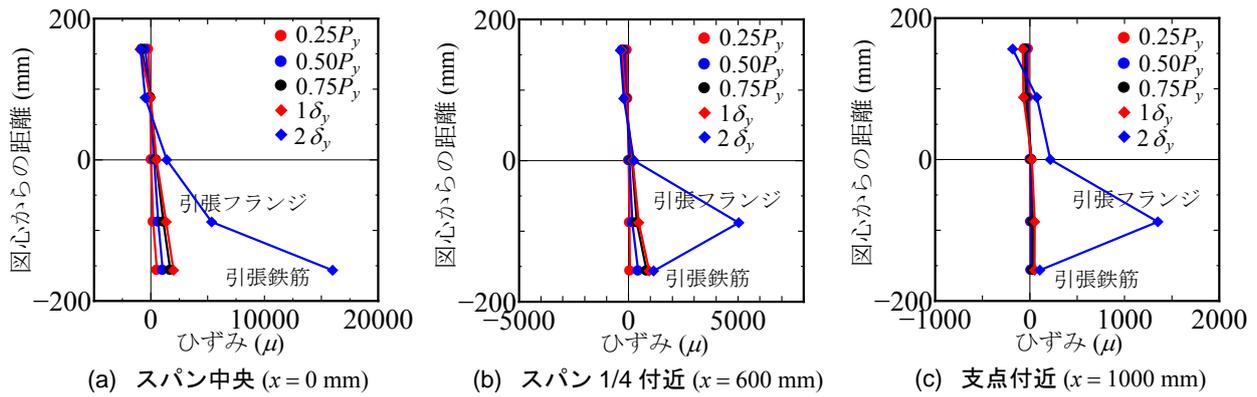


図-6 SRC断面のひずみ分布

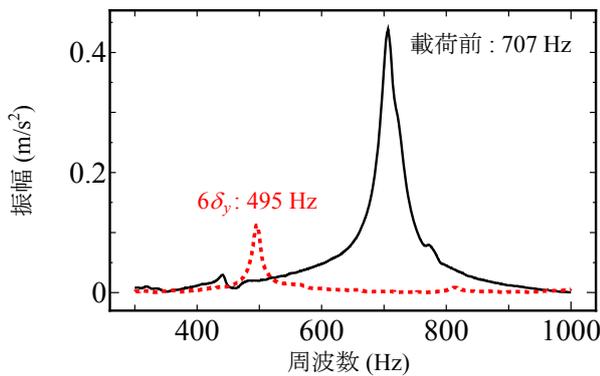


図-7 SRC 供試体の共振周波数 (全体振動)

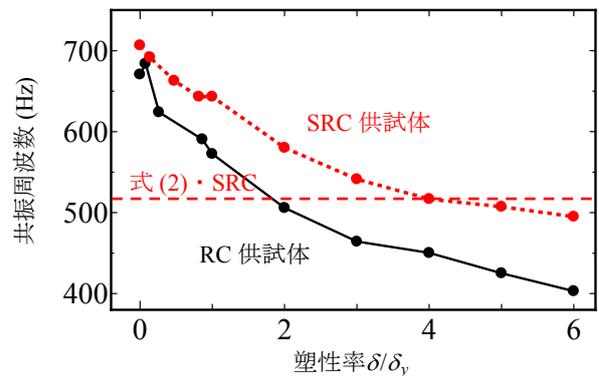


図-8 部材変形と共振周波数の関係 (全体振動)

0 mm), スパン 1/4 付近 ($x = 600$ mm), および支点付近 ($x = 1000$ mm) のひずみ分布を図-6 に示す。図-6 (a),(b) の $2\delta_y$ 荷重を参照すると、引張鉄筋はスパン中央のみで降伏を大きく上回った。引張フランジは、スパン中央からスパン 1/4 程度の範囲まで降伏しており、ひずみが 5000μ 程度の一定値を示した。また、図-6 (c) の支点付近でも引張フランジに 1500μ 程度のひずみが生じていた。図-6 (a),(b),(c) は平面保持が成り立っておらず、 $2\delta_y$ 荷重では、スパンのほぼ全域に渡って鉄骨のすべりが生じている可能性が示唆された。

なお、図-6 は供試体の E 側を示したが、W 側も同様の挙動であった。また、 $6\delta_y$ 荷重後の N 面と S 面の断面を観察すると、H 形鋼の突出はなかったが、H 形鋼に沿ったコンクリートのひび割れが見られた。

4. 強制加振試験の結果

4.1 全体振動

図-1 (a) の全体振動試験の一例として、SRC 供試体の共振曲線を図-7 に示す。荷重前の共振周波数は 707 Hz であったが、 $6\delta_y$ 荷重後には 495 Hz まで低下した。RC と SRC 供試体の実験結果を図-8 に示す。図の横軸はスパン中央の鉛直変位 δ を降伏変位 δ_y で除した塑性率 δ/δ_y を示した。RC および SRC 供試体のいずれも荷重によっ

て曲げひび割れが生じ、共振周波数が低下した。

健全状態に対する簡便な近似計算として、鋼材の拘束や支持条件などの影響を無視した棒の縦振動を考える。両端自由の 1 次元棒の共振周波数は次の理論式によって計算できる⁶⁾。

$$f_0 = \frac{c}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 f_0 は共振周波数、 c は見掛けの音速、 L は振動長さ、 E_d は動弾性係数、 ρ は密度である。本実験の振動長さは 2800 mm であり、動弾性係数と密度に表-2 のコンクリートの物性値を与えると、式 (1) の計算値は 666 Hz となった。図-7 より SRC 供試体の共振周波数の実測値は 707 Hz であり、図-8 の RC 供試体 (671 Hz) や式 (2) の計算値よりもやや高かった。SRC 断面の鋼材比は 5.2% であり、鋼材の影響によって見掛けの音速 c が速くなると推察された。

図-1 (a) の全体振動試験では、曲げひび割れが加振方向に直交するため、図-5 および図-8 を参照する限りでは、 $0.50 \sim 0.75 P_y$ に相当するひび割れ幅 0.2 mm 程度のひび割れに対して共振周波数の低下が示唆された。また、図-8 の $6\delta_y$ 荷重後の RC と SRC 供試体では、共振周波数の差が 100 Hz 程度となり、荷重前の差より大きくなった。SRC 供試体では鉄骨の影響があることに加えて、図

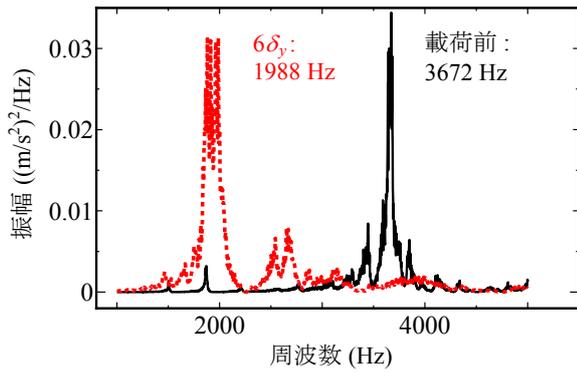


図-9 SRC 供試体の共振周波数 (局所振動)

—5 (b) のひび割れ図では RC 供試体よりもひび割れ本数が少ない。このため、SRC 供試体では RC 供試体ほど共振周波数の低下が大きくなかったと考えられる。

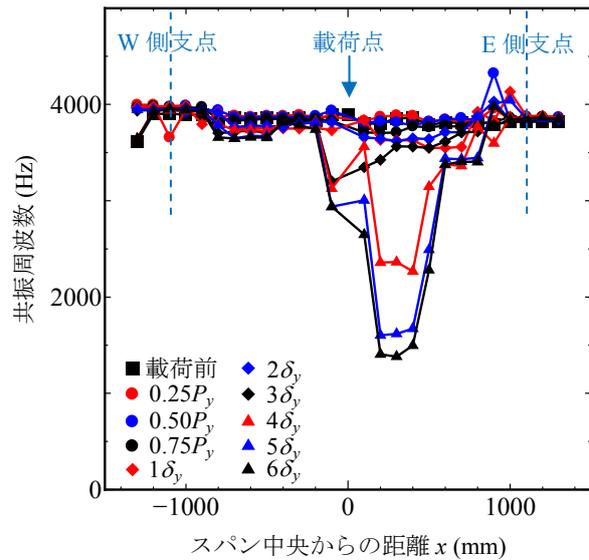
4.2 局所振動

図-1 (b) の局所振動試験の一例として、SRC 供試体の $x = 700 \text{ mm}$ での共振曲線を図-9 に示す。载荷前の共振周波数は 3672 Hz であったが、 $6\delta_y$ 载荷後には 1988 Hz まで低下した。なお、式 (1) による健全状態の計算値は 4665 Hz であり、周辺拘束や支点の影響等が含まれる局所振動試験では、1 次元棒の理論式は適用できないことが示された。このような局所振動に対して共振周波数を精度良く計算するためには、3 次元の波動解析や振動解析が必要と考えられる。

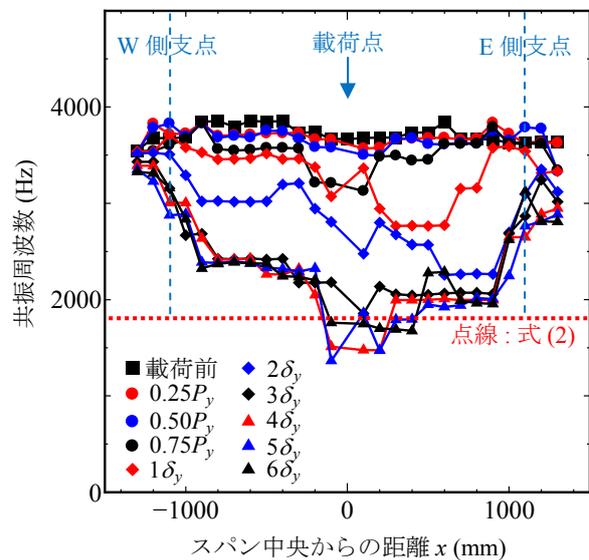
局所振動試験による RC と SRC 供試体の共振周波数の分布を図-10 に示す。図-10 (a) の RC 供試体では、 $3\delta_y$ 载荷以降にスパン中央よりも E 側にて共振周波数が大きく低下した。これは、図-5 (a) の斜めひび割れが多く発生した箇所とも対応した。スパン中央で共振周波数が低下する前の $2\delta_y$ 载荷のひび割れ幅は 0.75 mm であった。局所振動試験では、曲げひび割れが加振方向と直交しないため、ひび割れ幅 0.75 mm の曲げひび割れでも共振周波数が低下しなかったと考えられる。

図-10 (b) の SRC 供試体では、 $1\delta_y$ 载荷の段階でスパン中央より E 側にて共振周波数が低下した。このときのひび割れ幅は 0.35 mm であり、前記の RC 供試体での考察を踏まえると、このひび割れ幅では共振周波数は低下しない。このことから $1\delta_y$ 载荷の共振周波数の低下は、鉄骨とコンクリートの付着損失によるものと考えられた。なお、前記のひずみゲージの検討では、 $1\delta_y$ 载荷での鉄骨のすべりは見出せなかったが、図-10 (b) の局所振動試験による共振周波数は、これよりも早い段階で鉄骨とコンクリートの付着損失を捉えたものと考えられる。

さらに $2\delta_y$ 载荷では、スパンのほぼ全域に渡って共振周波数が低下した。図-6 の SRC 断面のひずみ分布でも、 $2\delta_y$ 载荷にはスパンのほぼ全域で鉄骨のすべりが生じて



(a) RC 供試体



(b) SRC 供試体

図-10 局所振動試験による共振周波数の分布

いと推察された。特に、図-5 (b) の支点付近のように、ひび割れ図では外観変状のない箇所でも、局所振動試験によって鉄骨とコンクリートの付着損失を捉えられる可能性が示唆された。今後、目視困難な構造物の点検・調査への活用が期待される。

5. 共振周波数の低下に着目した損傷状態の推定

5.1 損傷評価式

模擬空隙や切欠きなどを与えた角柱供試体^{4),7)}、はり供試体^{4),8)}、床版供試体⁹⁾の強制加振試験が報告されている。これらの既往の実験データを整理することによって、図-11 の関係が得られ、共振周波数の低下に着目して空隙長さの評価式 (2) を経験的に導出した。

$$\frac{f}{f_0} = 1 - \frac{D}{\lambda} \quad (2)$$

ここで、 f は共振周波数、 f_0 は健全状態の共振周波数である。 λ は共振波長であり、振動長さ L の2倍が与えられる。空隙長さ D は加振方向に投影した空隙面積の平方根として定義した。ただし、波長 λ を回折限界と考えて¹⁰⁾、 λ を上限とする辺で囲まれる空隙面積を与えた。

5.2 全体振動

図-5 (b) より、SRC 供試体の $2\delta_y$ 以降には、曲げひび割れがほぼ圧縮縁まで達していた。そこで、曲げひび割れを空隙に置き換えて、式(2)の計算値と実験値を比較する。式(2)に代入する波長 λ は5600 mm、空隙面積は400 mm (断面高さ) × 5600 mm (幅の回折限界) で与え、その平方根として空隙長さ D は1497 mmとなる。式(2)より、共振周波数比 f/f_0 の計算値は0.73となった。

計算値を図-8に併せて示した。結果として、 $3\delta_y$ 以降の実験値は計算値(518 Hz)と概ね対応することが示された。本実験のSRC 供試体では、図-5 (b) に示すようにひび割れ本数が少なく、 $3\delta_y$ 以降は最大ひび割れ幅が2.0 mm以上に及ぶため、曲げひび割れを空隙に置き換えた簡易な式(2)でも妥当な計算値を示したと考えられる。

5.3 局所振動

SRC 供試体の鉄骨とコンクリートがスパン全域で付着損失したと仮定し、空隙に置き換える。式(2)に代入する波長 λ は800 mm、空隙面積は上面から見たフランジ面積として、200 mm (フランジ幅) × 800 mm (長さの回折限界) で与え、その平方根として空隙長さ D は400 mmとなる。式(2)の共振周波数比 f/f_0 の計算値は0.5である。

計算値を図-10に併せて示した。図-10の共振周波数は、スパンの広い範囲で2000 Hz程度まで低下しており、計算値1836 Hzと比較すると、スパンのほぼ全域にわたって鉄骨とコンクリートの付着損失が生じていることが推察された。

式(2)は簡易な経験式であるが、図-11のSRC 供試体の実験データと良好に対応することが示された。今後、数値解析を活用した手法に発展させれば、損傷評価のさらなる高度化が期待できる。

6. まとめ

本研究では、強制加振試験(共振法)を用いてSRCはり供試体の損傷同定を試みた。軸方向に加振する全体振動試験では、幅0.2 mm程度の曲げひび割れによって共振周波数の低下が生じた。さらに、はり上面から局所的な共振を励起することによって、外観変状には表れない供試体内部の鉄骨とコンクリートの付着損失を共振周波数の低下によって推定できる可能性が示唆された。

なお、上記は限られた実験条件によって得た知見である。今後も実験および解析的検討を継続し、広範な諸元や様々な損傷状態に対して、鋼とコンクリートの付着状

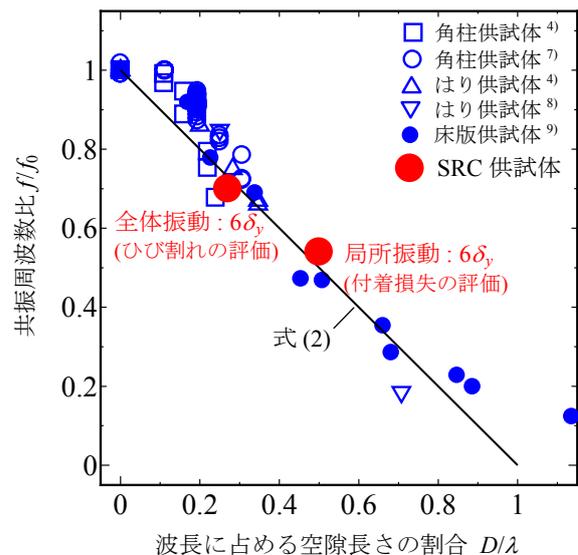


図-11 空隙長さと共振周波数の関係

態やひび割れ性状などの損傷状態を推定できる非破壊評価手法に発展させる。

参考文献

- 1) 土木学会：複合構造標準示方書 維持管理編，2016。
- 2) 魚本健人：コンクリート構造物の非破壊検査技術，オーム社，2008。
- 3) 土木学会：複合構造標準示方書 設計編，2016。
- 4) 内藤英樹，齊木佑介，鈴木基行，岩城一郎，子田康弘，加藤潔：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. 522-534，2011.10
- 5) 杉山涼亮，内藤英樹，山口恭平，早坂洋平，鈴木基行：ランダム加振による RC 床版の非破壊試験法，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol. 15，pp. 471-476，2015.10
- 6) 東山三樹夫：音の物理，音響入門シリーズ A-2，コロナ社，2010。
- 7) 林弘，内藤英樹，鈴木基行，齊木佑介，山洞晃一，古賀秀幸：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. 425-426，2009.9
- 8) 近栄一郎，内藤英樹，五十嵐亜季，鈴木基行：強制加振試験による RC カルバートの損傷同定に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 38，No. 2，pp. 967-972，2016.7
- 9) 土屋祐貴，小林珠祐，八嶋宏幸，内藤英樹，早坂洋平，光岡達也，鈴木基行：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. 809-810，2013.9
- 10) 青木貞雄：光学入門，共立出版，2015。