

鉄筋コンクリート梁の多段階曲げ載荷実験による損傷の進展と固有振動数の変化の関係

愛媛大学 学生会員 ○小林 巧

愛媛大学 フェロー 森 伸一郎

1. はじめに

コンクリート橋の損傷評価のための振動測定の有効性を明らかにすることを目的として、鉄筋コンクリート梁(以下、RC 梁)の多段階曲げ載荷実験とハンマー打撃振動測定を行った。本論文では、載荷による力学的損傷の進展と単純梁の1次曲げモードの固有振動数の変化の関係を明らかにした。

2. 実験の対象と方法

図-1にRC梁試験体の正面図と断面図及び実験方法を示す。RC梁は幅64cm、高さ35cmの矩形断面で下端が70cmに拡幅されている。RC梁の長さは5.5m、4点曲げ試験の際の単純梁としての支間長は5.0mである。このRC梁では、D19の主筋を断面上側に6本、下側に10本、D10のせん断補強筋を30cm間隔で配置した。コンクリートの配合強度は 61 N/mm^2 で、梁の計算終局曲げ耐力に相当する荷重は236kNである。

段階的載荷による影響を受けたRC梁の卓越振動数の変化を調べる目的のため、多段階載荷を採用した。10kNずつ荷重を増加させ荷重とたわみを計測し、各段階の最大荷重を30, 60, 90, 120, 150kNとして、最大荷重で一定時間荷重を保持してクラック観察を行い、その後0kNまで除荷して上載載荷器具を取り除いて、振動計を設置してハンマー打撃による振動実験を行うという一連の手順を繰り返し実施した。試験最大荷重の150kNは、計算終局荷重 P_u の70%程度に相当する。載荷は4点載荷とし、載荷点間隔は50cm、載荷速度は10kN/minである。

振動実験では、振動計をRC梁試験体の中心軸上に設置し、ハンマー打撃による梁の振動を測定した。支点間の1/4, 1/2, 3/4地点を木槌で、25秒間隔で各2回ずつ打撃した。振動計は3成分の感震器とAD変換器が内蔵された0.5~20Hzで平坦な利得の動コイル型速度計GEODAS (ANET社製) 2台を用いた。サンプリング周波数は200Hz、データ長は60秒である。20秒間のデータを抽出しスペクトル解析を行った。

3. 多段階載荷実験の結果と考察

図-2に荷重たわみ履歴を示す。最大30kNの載荷除荷では線形で残留たわみはなく、50kNで非線形となり、最大60kNの除荷後に残留たわみが現れ始めた。荷重の増加に伴い塑性化の進行、除荷後の残留たわみの増大、除荷時剛性の低下が確認できる。

図-3に最大荷重150kN載荷後の可視クラックの進展状況を示す。可視クラックは60kN載荷時に発生し始め、支間長の1/4から3/4の区間でクラックが発生した。

要約すれば、最大荷重の増加とともにクラックの増加や残留たわみの増大という損傷の進展が見られ、載荷・除荷時剛性の低下という損傷に起因する特性変化が確認できる。

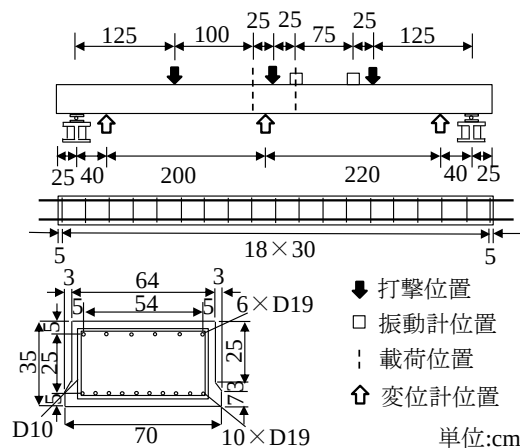


図-1 RC梁試験体の正面図と断面図及び実験方法

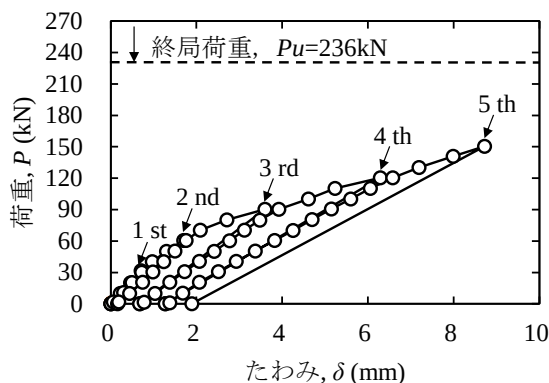


図-2 荷重たわみ履歴

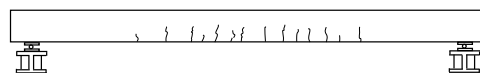


図-3 150kN載荷後の可視クラック進展状況

キーワード 鉄筋コンクリート, 単純梁, 多段階載荷, 固有振動数, クラック, 残留たわみ
連絡先 〒790-8577 愛媛県松山市文京町3 愛媛大学 森 伸一郎 email mori@ehime-u.ac.jp

4. 多段階荷重履歴後の振動実験の結果と考察

図-4 に処女載荷前と最大荷重 150 kN 載荷後に行った打撃振動試験による梁中央付近における鉛直成分の速度の時刻歴とフーリエスペクトルを示す。時刻歴で 20 波分の時間は処女載荷前の 0.860 秒が 150 kN 載荷後には 0.910 秒となり、1 波あたり 0.0430 秒から 0.0455 秒へと長周期化した。スペクトルでの鋭い明瞭なピークの 1 次卓越振動数は、処女載荷前の 23.3 Hz が載荷とともに低下し、150 kN 載荷後には 22.1 Hz となった。

1 次卓越振動数の振動モードは単純梁としての 1 次曲げモードであることは別途確認済みである。単純梁の 1 次曲げ固有振動数は、単純梁の理論式で求められる。

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

(f :1 次固有振動数(Hz), ω :1 次固有円振動数(rad/s), L :支間長(m), E :ヤング係数(N/m²), I :断面 2 次モーメント(m⁴), ρ :密度(kg/m³), A :断面積(m²))

式(1)に基づけば 1 次固有振動数の低下は、曲げ剛性 EI の低下と理解できるが、この剛性の低下は載荷による損傷の進展に伴うものであることを示唆している。

5. 損傷の進展と固有振動数の変化の関係

損傷としては可視クラックと残留たわみがある。図-5 に損傷指標としてのクラックの総延長（鉛直距離）と中央部の残留たわみに対する正規化 1 次固有振動数（処女載荷前の 1 次固有振動数 f_0 に対する第 i 段階載荷後の 1 次固有振動数 f_i の比、 f_i/f_0 ）の関係を示す。損傷が大きくなるほど固有振動数が低下することがわかる。ただし、低下割合は最大でも 5% 程度に過ぎない。一方、可視損傷が認められない第 1 段階（30kN）載荷後でも固有振動数に 1% の低下が認められることがわかる。

図-6 に正規化除荷時剛性（最大 30 kN 載荷時の除荷時剛性 K_0 に対する第 i 段階載荷後の除荷時剛性 K_i の比、 K_i/K_0 ）と正規化固有振動数の関係を示す。段階載荷による損傷の進行により梁の除荷時剛性が低下するが、それが正規化 1 次卓越振動数の低下とおおよそ線形の対応関係を示している。後者は 4 章で前述したように動的な（挙動を支配する）剛性低下と理解でき、約 95% への振動数低下は約 90% の曲げ剛性低下を意味するが、除荷時剛性の約 50% への低下に比べると低下割合は小さい。

6. 結 論

単純梁としての多段階曲げ載荷を受けた RC 梁にはクラックの進展や残留変位の増大という損傷の進展とともに固有振動数が低下する因果関係を定量的に示した。可視損傷が現れる前に固有振動数の低下することを示した。

謝 辞：本研究の一部は、（一財）港湾空港総合技術センターの平成 28 年度研究開発助成「打撃振動測定による PC 栈橋の損傷モニタリング技術の開発」（森 伸一郎）を受けて実施したものです。記して謝意を表します。

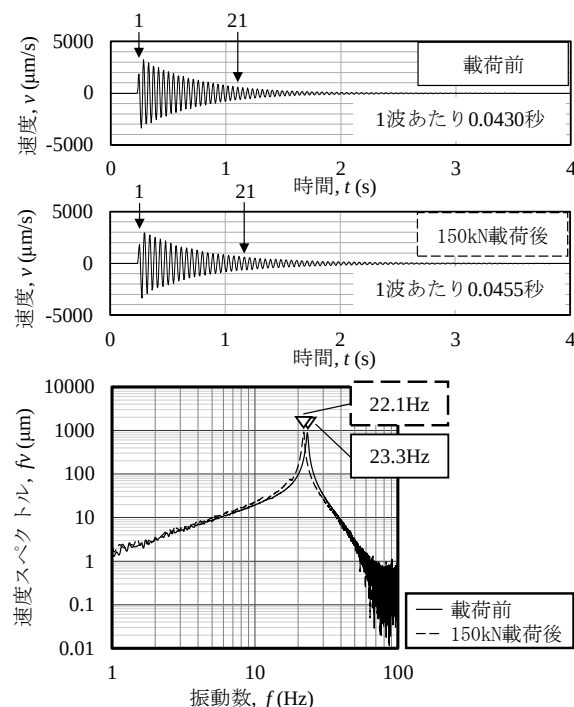


図-4 速度時刻歴とフーリエスペクトル

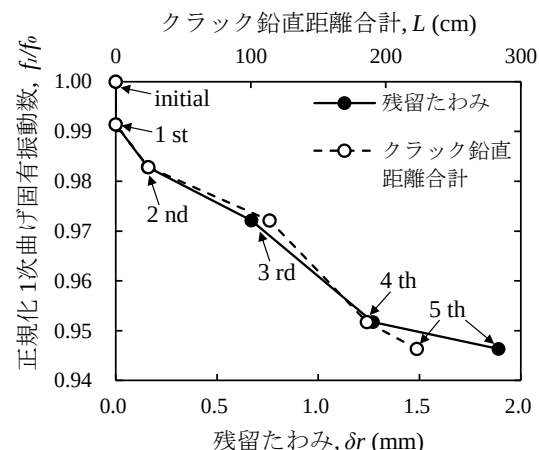


図-5 正規化 1 次曲げ固有振動数と力学的損傷の関係

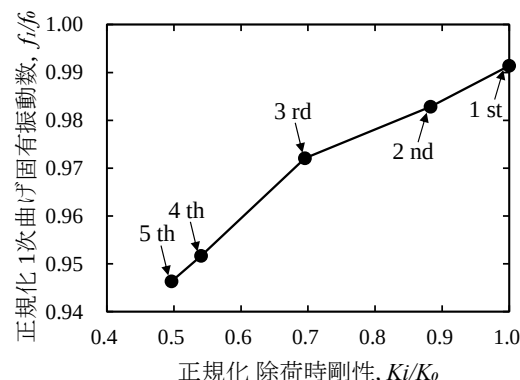


図-6 正規化した 1 次曲げ固有振動数と除荷時剛性の関係