

段階的損傷進展に伴う鉄筋コンクリート梁の AE 発生状況

愛媛大学 フェロー ○森 伸一郎

愛媛大学 学生会員 小林 巧

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。著者らは、力学的可視損傷の発現に先立ち、単純梁の 1 次曲げモードの固有振動数が低下することを明らかにした¹⁾。ここでは、損傷進展の際の AE 発生を測定することで、可視損傷が現れない段階での固有振動数の低下は RC 梁内部の損傷に起因することを明らかにした。

2. 実験の対象と方法

試験体の RC 梁は幅 64 cm、高さ 35 cm の矩形断面（下端は 70 cm に拡幅）であり、長さは 5.5 m、単純梁としての支間長は 5.0 m である。図-1 に RC 梁試験体および試験装置とセンサー配置を示す。コンクリート強度（2 週）は 59.9 N/mm^2 で、鉄筋は D10 のせん断補強筋を 30 cm 間隔で、D19 の主鉄筋を断面上側下側ともに 6 本を配置した。梁の計算終局曲げ耐力 M_u は 148 kNm で、 M_u 相当荷重 P_u は 156 kN である。

段階的載荷が各 RC 梁に与える影響とそれによる卓越振動数の変化を調べるため、多段階載荷と 1 段階の載荷徐荷ごとに載荷装置を外しハンマー打撃による振動測定を実施した。10 kN ずつ荷重を増加させ、それら載荷段階の荷重とたわみを計測し、各段階の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 0 kN まで除荷した後に載荷装置を外すという一連の手順を、20 kN ずつ段階最大荷重を更新して 6 サイクル繰り返した（20 kN のみ 2 サイクル）。試験最大荷重 $P_{\max}$ は 100 kN であり、 P_u の約 64 % に相当する荷重である。

アコースティックエミッション（AE）は、物質内部の破壊の発生や境界のずれに伴い射出される微小な弾性波であり、コンクリート内部のクラックやコンクリートと鉄筋の境界面でのクラックの 2 種が想定される。曲げモーメント一定区間を中心に AE 発生状況を測定するために、8 断面を設定し（図-1 参照）、各断面の 2 側面に各々 1 台ずつセンサー（全 16 台）を千鳥配置で設置した。これにより対象範囲の 3 次元位置標定が可能となり、その結果を軸方向鉛直断面に 2 次元表示できる。各荷重増加段階と除荷段階の全てで AE 測定を行った。

3. 実験結果

図-2 に荷重たわみ履歴を示す。荷重増加に伴って塑性化が進行し、除荷時剛性の低下と残留たわみの増加が確認できる。1 次卓越振動数は、載荷前に 23.2 Hz（初期値 f_0 ）であったものが、載荷段階を終えるたびに低下し、100 kN 載荷後は 21.4 Hz になった。図-3 に初期値 f_0 で各段階での 1 次卓越振動数 f_i を正規化した

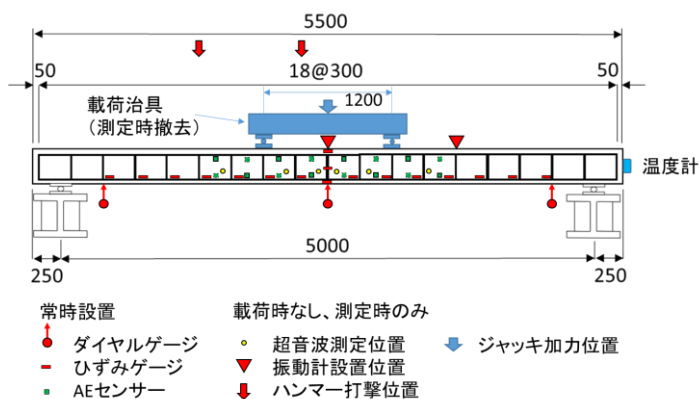


図-1 RC 梁試験体および試験装置とセンサー配置

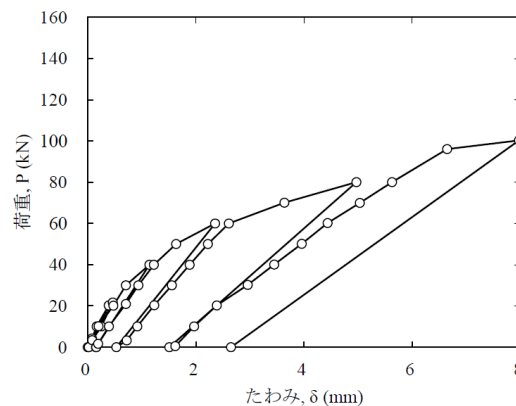


図-2 荷重たわみ履歴

キーワード 鉄筋コンクリート、単純梁、固有振動数、損傷、アコースティックエミッション（AE）
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

正規化 1 次卓越振動数 (f_i/f_0) と損傷指標としてのクラック総延長距離 D_{all} および残留たわみ δ_r との関係を示す。20 kN の履歴荷重後の時点ではクラックが発生せず残留たわみも極めて小さく可視損傷はないが、クラックが最初に生じたのは処女荷重 40 kN 時であり、それ以上でクラック延長と残留たわみが増加している。

図-4 に载荷の進行に伴う AE ヒット数を示す。増加荷重 10 kN の载荷、除荷、再载荷の各進行段階で整理している。図から読み取れるのは、(1)20 kN 载荷段階ではヒット数が 250 であり有意であること、(2)30 kN 载荷時の欠測を除けば、処女荷重では履歴最大荷重時のヒット数を上回ること、(3)再载荷時では履歴最大荷重時のヒット数を下回ること、(4)除荷時でもヒット数が有意にあり、除荷時ヒット数も最大履歴荷重が大きいほど多いことである。

図-5 に最大処女荷重 20, 40, 50 kN 载荷の際の標定された AE 位置の分布を示す。50 kN では、主に下側主筋の周辺で水平に連続して、また梁下面より 60 % 程度の高さで水平に断続的に集中して分布しており、これ以上の荷重では傾向が顕著になる。40, 50 kN 载荷時では、AE の発生領域・発生数とひびわれの領域・延長量は相関が高い。AE 発生はひびわれ発生より先行して起きており、AE 発生は内部破壊の指標であると考えられる。ひびわれが発生していない 20 kN 载荷時では 11 のイベントが位置標定され、その多くが主筋付近にある。40 kN 载荷時に生じるひびわれに先行して内部の微小破壊を感知していると考えられる。したがって、図-3 で示された可視損傷が発現する前の 20 kN 载荷後の固有振動数の低下は、不可視の内部微小損傷に起因すると解釈できた。

4. 結 論

(1) 多段階载荷試験で、RC 梁内部に標定された AE 位置は下側主筋の周辺と中立軸付近で水平に連続的または断続的に集中して分布した。AE の発生は、ひびわれの領域は相関が高く、先行して起きており、AE 発生は内部破壊の指標である。

(2) 可視損傷が発現する前の 20 kN 载荷後の固有振動数の低下は、不可視の内部微小損傷に起因すると解釈できた。

謝 辞：本研究は、(一財)港湾空港総合技術セン

ターの平成 28・29 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」(代表：森 伸一郎)を受けて実施したものです。また、AE 測定は京都大学大学院の塩谷智基先生と橋本勝文先生にご協力戴きました。記して謝意を表します。

参考文献

1) 小林 巧, 森 伸一郎: 鉄筋コンクリート梁の多段階曲げ载荷実験による損傷の進展と固有振動数の変化の関係, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM, 第 I 部門, 2017.9.

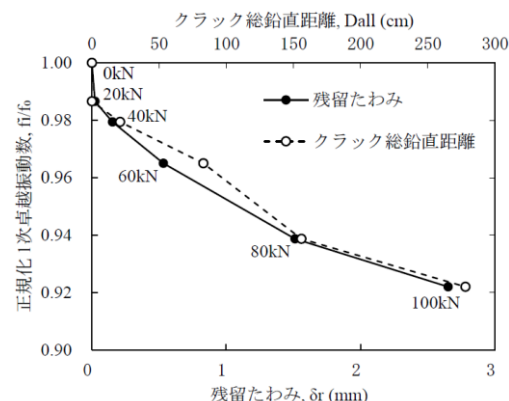


図-3 正規化 1 次卓越振動数 (f_i/f_0) と損傷指標としてのクラック総延長距離 D_{all} および残留たわみ δ_r との関係

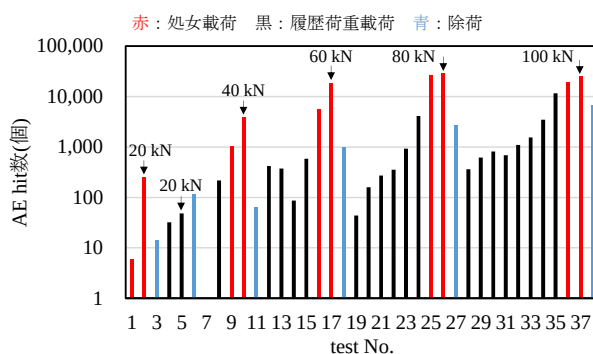


図-4 载荷の進行に伴う AE ヒット数

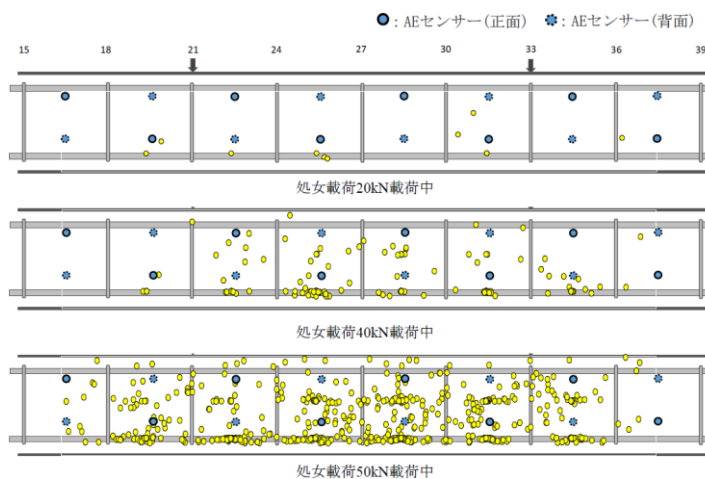


図-5 最大処女荷重 20, 40, 50 kN 载荷の際の標定された AE 位置の分布