

動電式加振器のコンクリート構造物地震時損傷評価への応用

鈴木 基行・内藤 英樹

1. はじめに

現行のコンクリート構造物の耐震設計規準では、レベル2地震動に対して部材降伏後の塑性変形を許容するため、地震後にひび割れなどの損傷が残留することは少なくない¹⁾。このような構造物は、余震に対する安全性や長期耐久性の観点から、地震後早期に点検して損傷状況を把握し、迅速に補修・補強を行うことが望ましい。しかし、橋台や擁壁の背面側や、コンクリート表面が厚く塗装されている場合、あるいは鋼板や炭素繊維シートで補強されている場合など、構造物のひび割れ状況を観察できない箇所もある。

このような目視困難箇所の点検に対して、簡便な振動試験の活用が期待されている²⁾。しかし、部材や構造物の全体を揺らす固有振動数の測定のみでは、局所的なひび割れの影響が小さく、損傷位置を同定することは難しい。特に、前記のような目視困難箇所に対して損傷を検知できることは、構造物の健全性評価および補修・補強方法の選定に極めて有用である。

著者ら³⁾は、これまでに動電式加振器を用いたRC床版の点検手法を提示してきた。参考文献3)の手法は、図-1(a)、(b)に示すように、加振方向の縦振動を励起して振動が及ぶ範囲の共振周波数を測定する。さらに、共振周波数(剛性)の低下に着目して、コンクリート内部のひび割れや空隙などの損傷を検知するものである。

本研究では、地震を受けたコンクリート構造物の点検への適用を想定して、その基礎的検討として、曲げひび割れが生じたRCはり供試体と柱供試体に対して図-1の全体振動試験と局所振動試験を行い、曲げひび割れの損傷同定を試みた。

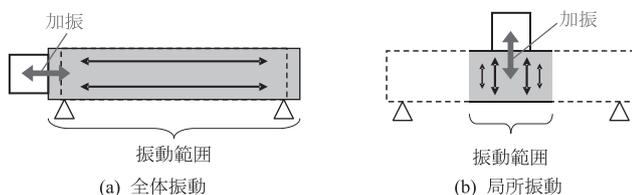


図-1 縦振動による強制加振試験の概略図

2. はり供試体の検討

(1) 実験概要

供試体諸元を表-1に示す。せん断スパン比をパラメータとするため、断面高さを250~400mmまで変化させた。供試体の概略図を図-2に示す。引張鉄筋比は0.54~0.95%であり、曲げ破壊するようにスターラップを配筋した。鉄筋はSD345を使用し、コンクリートの圧縮強度は31.8N/mm²であった。

表-1 RCはり供試体の諸元一覧

供試体名	部材長さ (mm)	断面幅 (mm)	断面高さ (mm)	せん断スパン比	载荷形式
S250	1800	200	250	3.5	3点曲げ
D250				2.8	4点曲げ
S300			300	2.8	3点曲げ
D300				2.2	4点曲げ
S350			350	2.3	3点曲げ
D350				1.9	4点曲げ
S400			400	2.0	3点曲げ
D400				1.6	4点曲げ

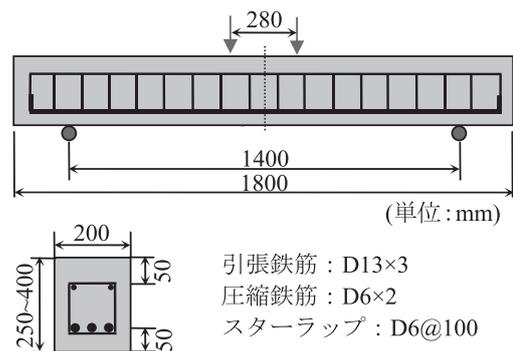


図-2 RCはり供試体の概略図

载荷条件を図-2に示す。载荷方法は3点载荷および4点载荷とした。3点载荷ではスパン中央に鉛直荷重を加え、4点载荷ではモーメント一定区間を280mmとした。スパン中央の変位を測定し、引張主鉄筋に貼付したひずみゲージの値から実験時の降伏変位 δ_y を定めた。载荷パターンは、降伏変位 δ_y を基準として、 $6\delta_y$ まで整数倍に载荷と除荷を繰り返した。各载荷ス

トップの除荷後に、振動試験および目視によるひび割れ観察を行った。

本研究では、図-1 (a) のはり端部から長さ方向に水平加振する全体振動と、図-1 (b) の上面から断面高さ方向に加振する局所振動の2つの加振方法を検討した。いずれも重さ 9.5 kg (可動部は 130 g) の動電式加振器を厚さ 1 mm の両面テープで供試体表面に接触させ、調和振動を加えた。全体振動試験では、加速度振幅 5 m/s^2 (一定)、掃引周波数 500 ~ 2500 Hz を基本として、3分間で直線的に周波数を上昇させた。また、局所振動試験では、加速度振幅 5 m/s^2 、掃引周波数は 1000 ~ 10000 Hz を基本として、測定時間は 3分間とした。このとき、加振点付近に貼付した加速度センサによって共振曲線を得た。

(2) 実験結果

(a) 曲げ載荷試験

荷重-変位関係の一例を図-3に示す。いずれの供試体でも、スパン中央のひび割れが $1\delta_y \sim 3\delta_y$ にかけて大きく開口する傾向が示された。各供試体の $1\delta_y$ の載荷ではスパン中央のひび割れ幅は 0.1 mm 以下であり、目視での発見は容易ではなかった。 $2\delta_y$ 以降はスパン中央のひび割れが上縁付近まで達している。ひ

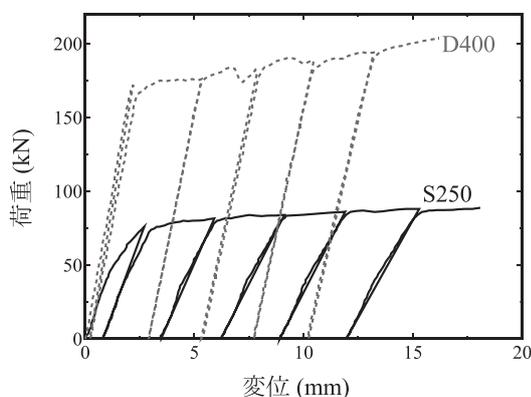
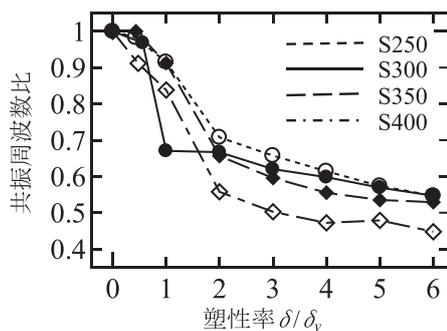


図-3 荷重-変位関係 (S250, D400)



(a) 3点載荷 (S シリーズ)

び割れが発生する区間は 800 ~ 1000 mm 程度であり、供試体ごとの大きな差異はなかった。3点載荷では斜め方向のひび割れの割合が多く、4点載荷ではモーメント一定区間において鉛直ひび割れが発生した。

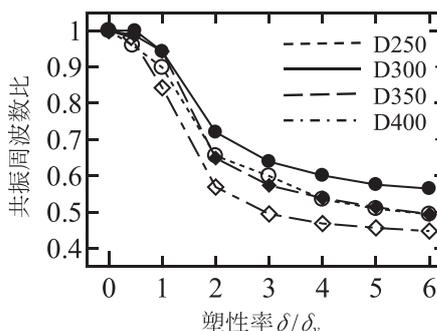
(b) 全体振動試験

載荷に伴う共振周波数の変化を図-4に示す。横軸に各載荷ステップの変位を降伏変位 δ_y で除した塑性率、縦軸に健全時を基準とした共振周波数の変化(以下、共振周波数比)を示した。これらの実験結果より、せん断スパン比が小さい(断面高さの大きい)供試体であるほど、共振周波数の低下が大きくなる傾向が示された。ひび割れの方法が異なる3点載荷と4点載荷については、共振周波数の低下傾向に明確な差異は見られなかった。図-4より、引張鉄筋が降伏する $2\delta_y$ 以降の載荷において共振周波数が大きく低下しており、部材塑性率や損傷程度などが推定可能になると考えられる。

(c) 局所振動試験

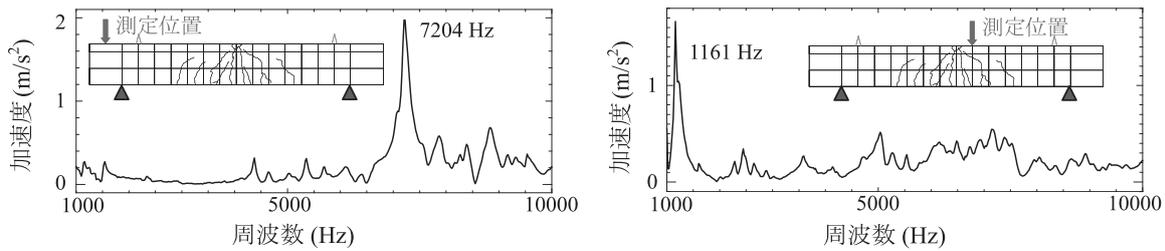
局所振動試験によって得られた共振曲線の一例として、S250 供試体の実験結果を図-5に示す。図-5に示すように、左端から 100 mm 位置での局所振動試験では、7204 Hz に明確な応答加速度のピークが表れており、健全時の理論値 7033 Hz と同等であることから、この箇所(支点より外側)には損傷がないと判断された。また、スパン中央付近である左端から 1000 mm 位置での局所振動試験では、1161 Hz において応答加速度のピークが表れた。理論値よりも共振周波数が大きく低下しており、曲げひび割れによる剛性低下を検知したものと考えられる。

図-6にS250 供試体とD400 供試体の共振周波数の分布を示す。3点載荷のS250 供試体では斜めひび割れの割合が多く、4点載荷のD400 供試体ではモーメント一定区間において鉛直ひび割れが発生した。S250 供試体では、目視によって確認された損傷範囲(ひび割れ区間)において共振周波数が低下しており、

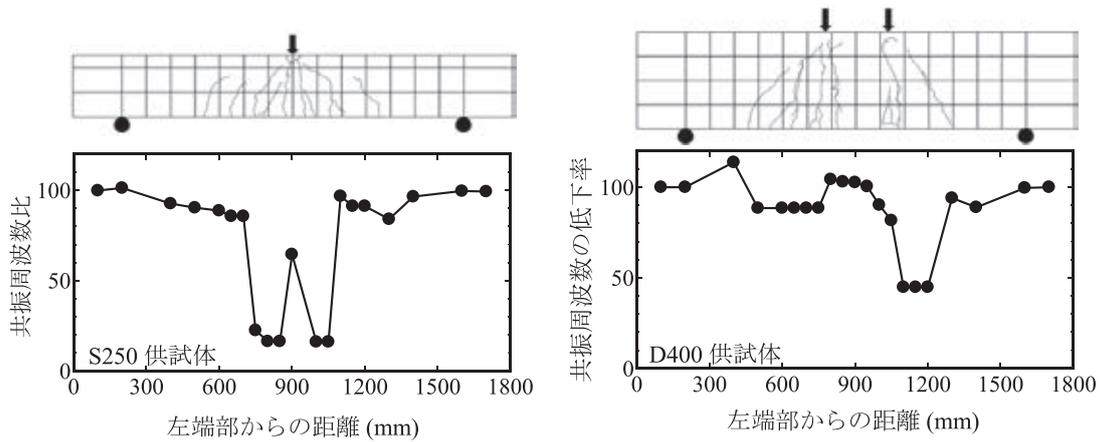


(b) 4点載荷 (D シリーズ)

図-4 RC はり供試体の全体振動試験の結果

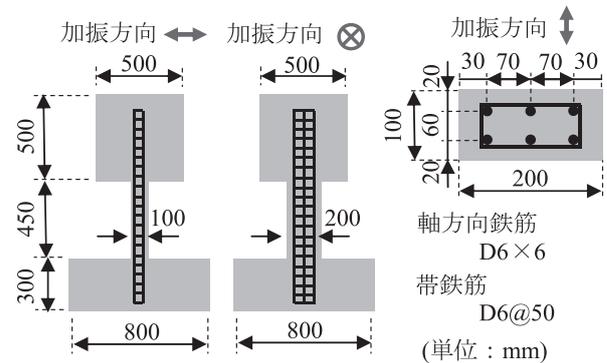


図一5 RCはり供試体の局所振動試験 (S250 供試体)



図一6 局所振動試験による共振周波数の分布とひび割れ状況

振動試験によって背面のひび割れ範囲を推定できる可能性が示唆された。一方、4点曲げ载荷のD400供試体では、スパン中央から右側のみ損傷範囲と共振周波数の低下が対応したが、スパン中央から左側についてはひび割れを検知することができなかった。供試体のスレンダー比（部材長さ／断面高さ）が4.5程度以下のマッシブな形状に対しては、図一1 (b) の局所振動が励起できないものと考えている。



図一7 RC柱供試体の概略図

3. 柱供試体の検討

(1) 実験概要

供試体の概略図を図一7に示す。鉄筋はSD345を使用し、コンクリートの圧縮強度は30.5 N/mm²であった。本実験では同じ諸元の供試体を3体作製し、それぞれに異なる入力波形を与えた。供試体のフーチングを振動台に固定し、柱上部の錘の慣性力によって柱に水平力を作用させた。せん断破壊が先行しないように、柱断面には十分な帯鉄筋を配置した。

3体の供試体に対して、4 Hzの sine波と2つの地震波を入力した振動台実験を行った。入力は水平1成分とした。地震波は、1995年の兵庫県南部地震のJR鷹取駅・東西成分（以下、鷹取波）および神戸海洋気象台・南北成分（以下、JMA波）の観測波とし、時間軸を1/4に縮小した。柱基部の損傷を段階的に進展

させるため、降伏荷重の半分程度の応答から振動台の性能上限まで、1つの供試体に対して入力加速度を段階的に増加させて複数回加振した。その結果として、sine波の最大振幅は444 gal、鷹取波は1332 gal（元波形の200%）、JMA波は1127 gal（元波形の150%）まで加振した。

各载荷ステップ後にハンマーの打撃による衝撃振動試験を行った。着目する振動モードは、縦1次モード（柱の鉛直方向）である。応答加速度のサンプリング周波数は5000 Hzとし、フーリエ解析によって共振周波数を求めた。

さらに、振動台実験の終了後に、曲げひび割れが生じた柱に対して加振器を用いた図一1 (b) の局所振動試験を行い、ひび割れ箇所の同定を試みた。写真一

1に示すように、局所振動試験では伝達棒を介して柱の断面幅方向に水平加振した。伝達棒は厚さ1mmの両面テープを介して供試体表面に接触させた。伝達棒先端の加速度振幅 5 m/s^2 （一定）、掃引周波数 $5000\sim 10000\text{ Hz}$ を基本として、3分間で周波数を直線的に上昇させた。このとき、加振点付近に貼付した加速度センサによって共振曲線を得た。加振および応答測定は、柱上部（柱と錘の接合部）、中間部、柱基部の3箇所で行った。

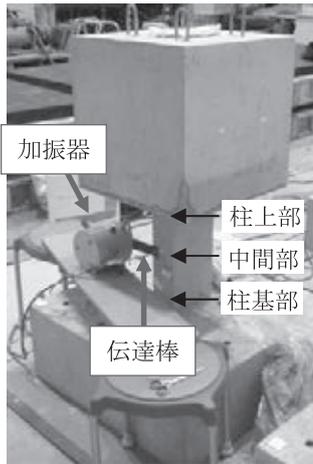


写真1 柱供試体の局所振動試験

(2) 実験結果

(a) 振動台実験

振動台実験による3体の供試体の荷重-変位関係を図8に示す。応答変位は、錘重心位置の水平変位とフーチングの水平変位の差を取った。水平荷重は、錘の質量と応答加速度を乗じて算定した。図中の降伏変位は解析によって算定しており、最大応答変位は降伏変位の4.5~6.1倍であった。

全ての供試体において、柱とフーチング接合部に水平方向のひび割れが1本のみ生じ、それ以外の区間には損傷が見られなかった。本実験では、振動台試験機の性能上、D6を軸方向鉄筋とした小型供試体を作製

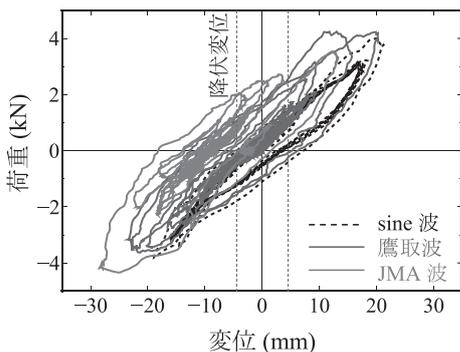


図8 柱供試体の荷重-変位履歴曲線

したため、柱基部の曲げひび割れが高さ方向に分散しなかったと考えられる。

(b) 全体振動試験

柱供試体の最大応答変位と衝撃振動試験による共振周波数との関係を図9に示す。図の横軸は各載荷ステップでの最大応答変位を降伏変位 δ_y で除した塑性率、縦軸は健全時を基準とした各載荷ステップ終了時の共振周波数比を示した。図9より、3つの入力波形の種類によらず、最大応答変位と共振周波数には概ね同様の関係が見られた。このことから、地震動の載荷履歴に依存しない地震時損傷評価の可能性が示唆された。全体振動（縦振動）では、いずれも $2\delta_y$ 以降に健全時の40~60%程度まで共振周波数が低下しており、その後は応答変位が増加しても共振周波数に大きな変化は見られなかった。

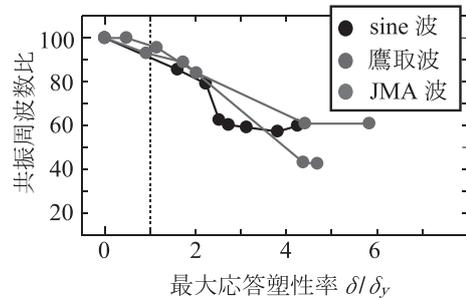


図9 RC柱供試体の全体振動試験の結果

(c) 局所振動試験

柱上部、中間部、柱基部のそれぞれで行った局所振動試験の結果を図10に示す。なお、健全な共振周波数の理論値は9276 Hzである。図10に示す柱上部の共振周波数は9471 Hzであり、理論値と良好に対応することが示された。そして、柱上部からひび割れが存在する柱基部に向かって共振周波数が直線的に低下する傾向が示された。中間部の測定結果は、柱基部

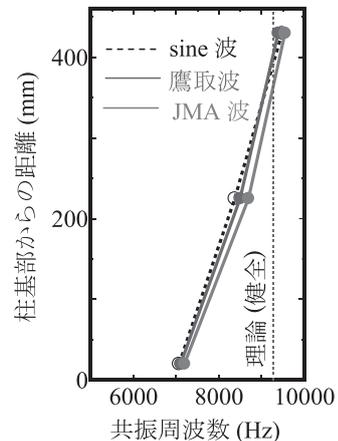


図10 柱高さ方向の共振周波数の分布

のひび割れの影響を含んだものと推察される。また、中間部や柱基部の共振周波数は、入力波形に依らずに概ね同様の値となった。これは、図-9の実験結果とも整合している。以上より、局所振動試験によって地震を受けたRC柱の損傷位置を同定できる可能性が示唆された。

4. おわりに

動電式加振器を用いて、RC部材の局所的な縦振動を励起する試験方法（局所振動試験）を提案した。はり供試体と柱供試体の検討では、部材長さと断面高さの比が4.5程度以上であれば、ひび割れ箇所を局所振動試験によって検知できる可能性が示唆された。

本研究は、コンクリート構造物の地震時損傷評価への応用を目指すものであり、特に、コンクリート表面に塗装が施された場合や、橋台・擁壁・カルバートにおいて背面側からひび割れが生じた場合など、目視では損傷が確認できない箇所の点検に対して有用であると考えている。今後、広範な諸元と様々な損傷パターンに対して基礎的データを収集することによって、動電式加振器を用いたコンクリート構造物の地震時損傷評価法の構築に繋げていく。

謝 辞

本研究は、日本建設機械施工協会による平成24年度および平成25年度の研究助成を受けて実施したものである。ここに記して、関係者各位に感謝の意を表します。

JCM A

《参考文献》

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書，V，耐震設計編，2012。
- 2) 平澤征夫，古澤誠司，伊藤和幸：RC高橋脚モデルの損傷過程と振動特性に関する実験的研究，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.75-84，1986。
- 3) 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。

【筆者紹介】

鈴木 基行（すずき もとゆき）
東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
教授

内藤 英樹（ないとう ひでき）
東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
准教授