

# 論文 強制加振試験による RC 部材の曲げひび割れの検知

内藤 英樹<sup>\*1</sup>・長谷川 俊<sup>\*2</sup>・上田 博之<sup>\*3</sup>・鈴木 基行<sup>\*4</sup>

**要旨**：RC 部材の強制加振試験において、加振方向の局所的な縦振動のみを励起する試験方法(局所振動試験)を提示し、静的および動的载荷によって曲げひび割れが生じた RC 供試体の損傷位置同定を試みた。本実験の範囲では、部材長さと同断面高さの比が 5~6 程度以上のはりおよび柱供試体に対して局所振動試験が適用可能であり、加振器周りの共振周波数の低下に着目して RC 部材の健全箇所とひび割れ箇所を示すことができた。さらに、今後の実構造物への応用可能性を推し量るため、健全なコンクリート擁壁の現場試験を行い、背面土がある条件でも、壁厚から算定される共振周波数の理論値と実測値が概ね整合することを確認した。

**キーワード**：強制加振試験, 加振器, ひび割れ, 共振周波数, 損傷同定

## 1. はじめに

現行の耐震設計規準<sup>1)</sup>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。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おいて、簡便な振動試験の活用が期待されている<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>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 に示すように、加振器によって部材厚さ方向の局所的な縦振動を励起し、加振器周りの検査範囲(振動が及ぶ範囲)の共振周波数を測定する(以下、局所振動試験)。さらに、共振周波数(剛性)の評価に基づいて、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ことができる。

本研究では、特に、地震を受けたコンクリート構造物の点検を目的とした基礎的検討として、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局所振動試験を行い、曲げひび割れの位置同定を試みた。さらに、今後の実構造物への応用可能性を量るため、健全なコンク

リート擁壁の前面から局所振動試験を実施し、実験結果の妥当性を検討した。

## 2. はり供試体の検討

### 2.1 载荷実験

著者らが過去に行った曲げ载荷試験後の 8 体のはり供試体<sup>4)</sup>を対象とする。荷重-変位関係や供試体の損傷状況などの詳細は参考文献 4) に示しているため、以下では概要のみを示す。実験パラメータと供試体の概略図をそれぞれ表-1 と図-2 に示す。8 体の供試体は断面高さと同荷重方法をパラメータとしており、いずれも曲げ破壊になるように十分なスターラップを配筋した。供試体寸法は、はり長さ 1800 mm, 断面幅 200 mm を共通とし、断面高さを変化させた。

はりの曲げ载荷試験は、図-2 に示すように支点間距離を 1400 mm とした。3 点载荷では、スパン中央に鋼製ピンを介して鉛直荷重を加えた。4 点载荷では、载荷治具を介して鉛直荷重を加え、図-2 に示すようにモーメント一定区間を 280 mm とした。引張鉄筋の降伏による降伏変位 $\delta_y$ を基準として、片押しによって $6\delta_y$ の変形まで载荷した。

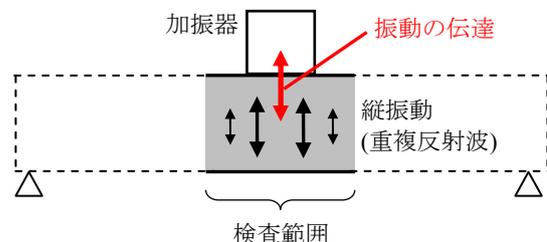


図-1 局所振動試験の概略図<sup>3)</sup>

\*1 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)

\*2 (株) 安藤・間 名古屋支店 土木部 修士(工) (正会員)

\*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻

\*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 はり供試体の実験パラメータ<sup>4)</sup>

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

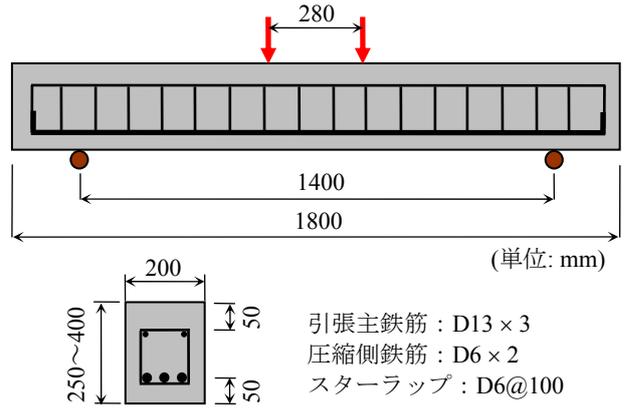
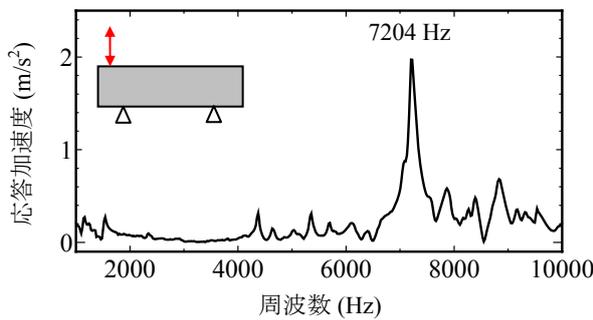
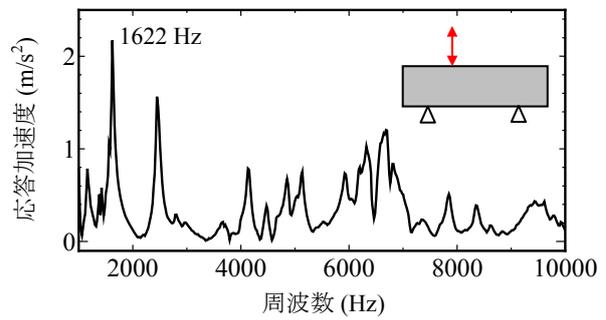


図-2 はり供試体の概略図<sup>4)</sup>



(a) 左側端部から 100 mm 位置の測定結果



(b) 左側端部から 750 mm 位置の測定結果

図-3 局所縦振動による共振曲線 (S250)

## 2.2 局所振動試験

はり供試体に生じた曲げひび割れの同定を目的として、図-1の局所振動試験を行った。将来的には、地震時に橋台や擁壁などの背面側(裏込土による土圧)から生じる曲げひび割れの点検を目的としているため、本実験でもひび割れが直接見えない供試体上面(断面の圧縮側)から加振と応答測定を行った。

6δ<sub>y</sub>の荷終了後にはり供試体を実験室内の床面に直置きし、特別な固定はしていない。測定位置は、はり左側端部から 100 mm 間隔を基本として、スパン中央の荷点付近は 50 mm 間隔とした。加振器の振動テーブル(質量: 130 g)の加速度振幅を 5 m/s<sup>2</sup>として、調和振動の周波数を 1000~10000 Hz まで3分間で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供試体の共振曲線(周波数-応答加速度関係)を得た。

実験結果の一例として、S250 供試体の共振曲線とひび割れ図をそれぞれ図-3と図-4に示す。図-3(a)は支点よりも外側の測定箇所での共振曲線であり、応答加速度のピーク値として 7204 Hz の共振周波数が得られた。なお、鉄筋の影響を無視した式(1)の理論式に、テストピース(φ100 mm × 200 mm)の共鳴振動試験より得た動弾性係数 31800 N/mm<sup>2</sup>、密度 2300 kg/m<sup>3</sup>、断面高さ 250 mm を代入すると、理論値は 7437 Hz となった。

$$f = \frac{1}{T} = \frac{V}{2L} \quad (1)$$

$$V = \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (2)$$

ここで、 $f$ は縦振動による1次の共振周波数、 $T$ は縦波が距離  $L$  を往復する時間、 $L$ は断面高さ、 $V$ は縦波速度、 $E_d$ はコンクリートの動弾性係数、 $\rho$ はコンクリートの密度である。

左側端部から 750 mm の位置では、図-4に示すように斜め方向のひび割れが見られた。この箇所の共振周波数は、図-3(b)に示すように 1622 Hz に低下した。RC 床版を対象とした参考文献<sup>3)</sup>でも、ひび割れや空隙によってコンクリートの剛性が低下するため、共振周波数が低下することを報告した。RC はり供試体の曲げひび割れを対象とした本実験でも、RC 床版と同様の理由によって、共振周波数が低下したものと考えられる。

8体のはり供試体の実験結果を図-4に示す。図には、測定時のひび割れ状況も併せて示す。図の縦軸は、両側支点よりも外側に位置する健全部の測定結果を基準として共振周波数の変化率を示した。図-1の試験方法は、スレンダーな部材に対しては局所振動が励起しやすいため、断面高さが小さい S250, S300, D250, D300 供試体では、ひび割れが発生している範囲において著しい共振周

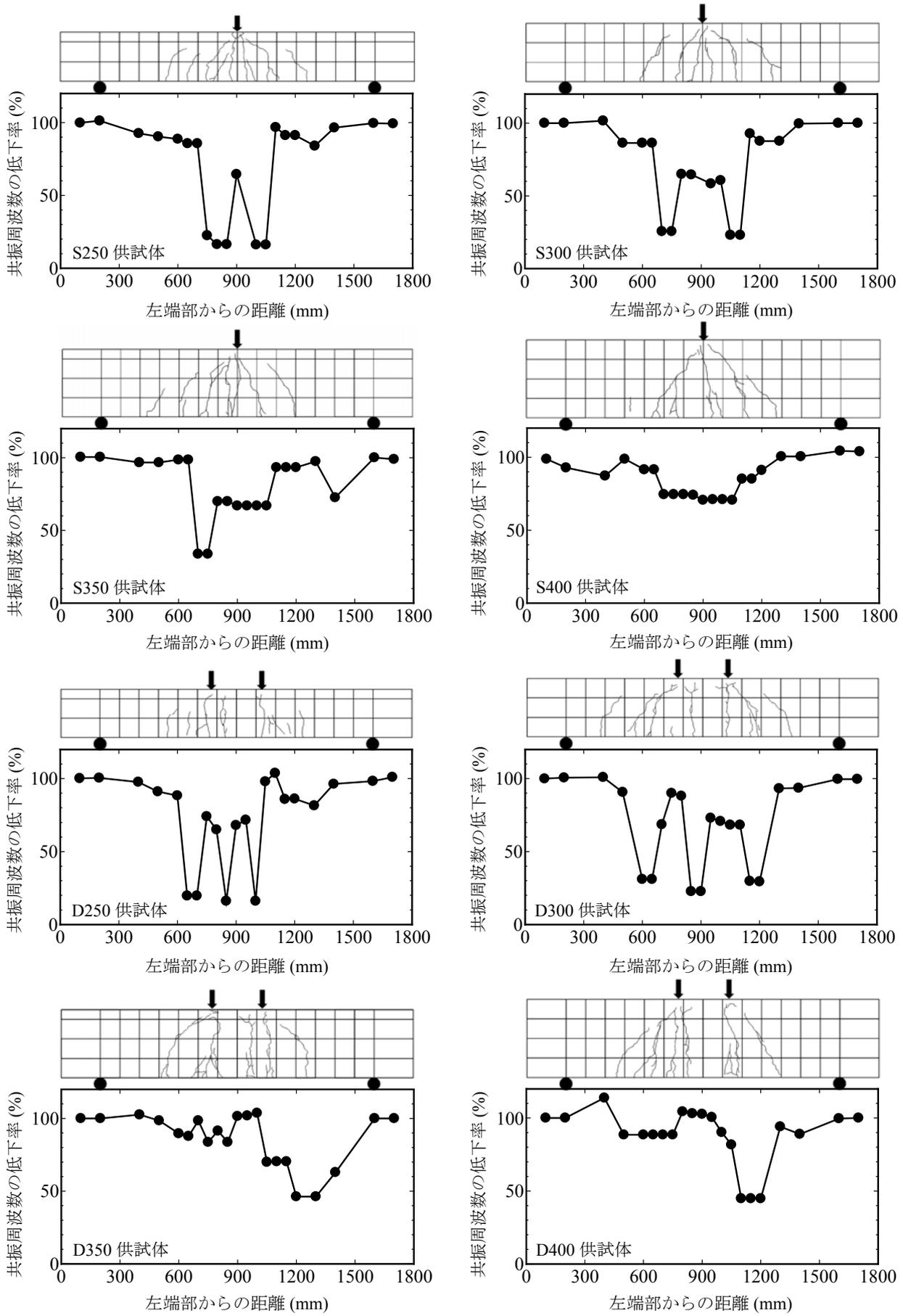


図-4 局所振動試験による共振周波数の分布とひび割れ状況

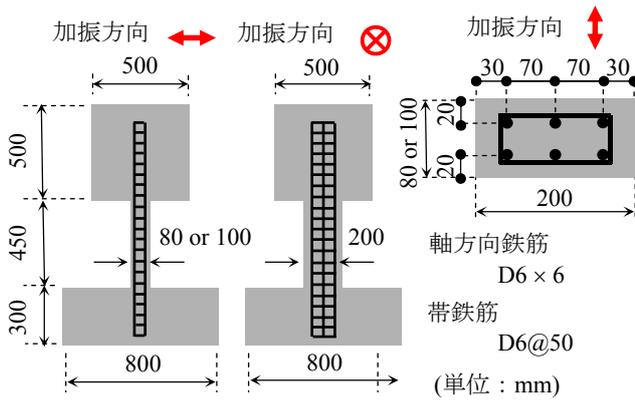


図-5 柱供試体の概略図

波数の低下が確認できた。しかし、断面高さが大きい S350, S400, D350, D400 供試体では、共振周波数が左右非対称の分布を示しており、ひび割れ箇所を妥当に同定できなかった。断面高さが大きいマッシュな供試体では、やはり端部まで含めた供試体全体の振動が励起されたと推察される。ひび割れ箇所においても供試体全体の平均剛性を評価するため、共振周波数の低下が小さく、ひび割れ位置を同定できなかったと考えられる。

以上より、本実験の条件では、供試体の形状比(はり長さ/断面高さ)が5~6程度以上の諸元であれば、図-1の局所振動が励起しやすく、共振周波数の低下に着目して、RC部材の健全箇所とひび割れ箇所を示すことができると考えられる。

### 3. 柱供試体の検討

#### 3.1 供試体概要

動的繰返し载荷によるコンクリートの曲げひび割れに対して、提案技術の適用可能性を検討する。柱断面の高さを変えた2種類の供試体をそれぞれ3体ずつ作製して、3つの波形による振動台実験を行う。

供試体の概略図を図-5に示す。柱長さ450mmと断面幅200mmを共通として、断面高さ80mmと100mmの供試体をそれぞれH80とH100と呼ぶ。軸方向鉄筋は

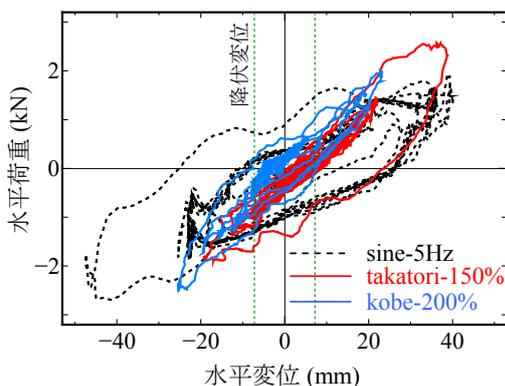


図-6 H80 供試体の荷重-変位履歴曲線

表-2 柱供試体のコンクリートの物性

圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	動弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	密度 (kg/m <sup>3</sup> )
30.5	24200	33000	2400

表-3 柱供試体の鉄筋の物性

降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	伸び (%)
440	540	167000	8.2

表-4 入力波形と最大応答塑性率

	入力波形	入力加速度の最大振幅 (gal)	最大応答塑性率	
H80	sine	5 Hz の sine 波	1137	6.8
	takatori	原波形の 1.5 倍	999	5.6
	kobe	原波形の 2.0 倍	1636	3.6
H100	sine	4 Hz の sine 波	444	4.5
	takatori	原波形の 2.0 倍	1332	5.0
	kobe	原波形の 1.5 倍	1127	6.1

D6を6本使用しており、曲げ破壊型となるように帯鉄筋を十分に配筋している。テストピースを用いたコンクリートと鉄筋の材料試験結果をそれぞれ表-2と表-3に示す。表-2のコンクリートの動弾性係数は共振振動試験(縦振動)によって測定した。

#### 3.2 動的载荷実験

供試体のフーチングを振動台に固定し、水平1成分の動的载荷を行った。入力は、sine波および2種類の地震観測波である。入力波の概要を表-4に示す。地震波は、1995年兵庫県南部地震のJR鷹取観測波東西成分(以下、takatori)および神戸海洋気象観測波南北成分(以下、kobe)であり、時間軸を25%に圧縮した。本実験では、柱の応答変位が降伏変位を上回るように、原波形に対して加速度を増幅させている。

振動台実験によるH80およびH100供試体の荷重-変位関係の履歴曲線をそれぞれ図-6および図-7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

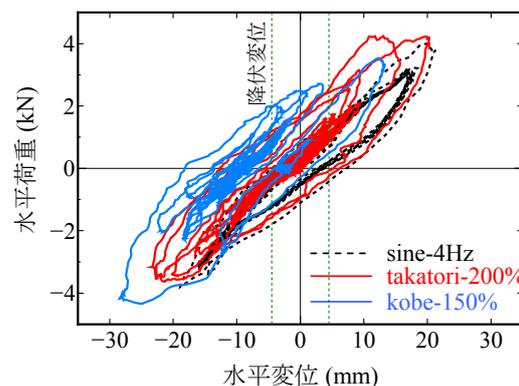


図-7 H100 供試体の荷重-変位履歴曲線

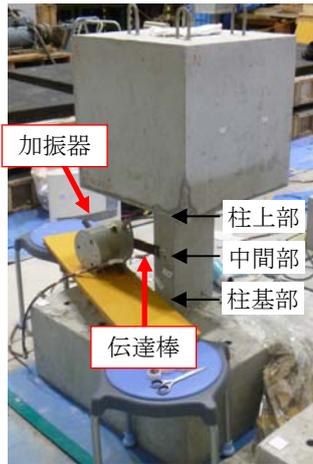


写真-1 柱供試体の局所振動試験

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、各供試体の最大応答変位は、表-4 に示すように降伏変位の 3.6~6.8 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。

### 3.3 局所振動試験

表-4 の振動台実験が終了した後に局所振動試験を行った。写真-1 に示すように伝達棒(質量 380 g の鋼板)を介して柱の水平方向に調和振動を加えた。ここで使用した測定機器の掃引周波数の上限が 10000 Hz であるため、H80 と H100 供試体のいずれも断面幅方向(200 mm)に加振して共振周波数を測定し、曲げひび割れの同定を試みた。伝達棒先端の加速度振幅を  $5 \text{ m/s}^2$  で一定とし、周波数を 5000~10000 Hz まで 3 分間で直線的に上昇させた。このとき、加振点付近の柱表面に貼付した加速度センサによって供試体の共振曲線を得た。測定は、柱上部(柱と錘の接合部)、中間部、柱基部の 3 か所で行った。

実験結果の一例として、H100 供試体(takatori)の局所振動試験によって得られた共振曲線を図-8 に示す。図-8 (a) に示すように、柱上部では 9388 Hz の共振周波数が得られた。表-2 に示したコンクリートのテストピースの動弾性係数と密度を式(1)に代入した理論値は 9276 Hz であり、実測値と理論値は良好に整合した。一方、図-8 (c) に示した柱基部では共振周波数が 7104 Hz まで低下した。柱-フーチング接合部に生じた 1 本の水平ひび割れの影響によって共振周波数が低下したと考えられる。なお、図-8 (b) に示す中間部でも共振周波数が健全時の 90% 程度まで低下したが、これは柱基部のひび割れの影響を含んだものと推察される。

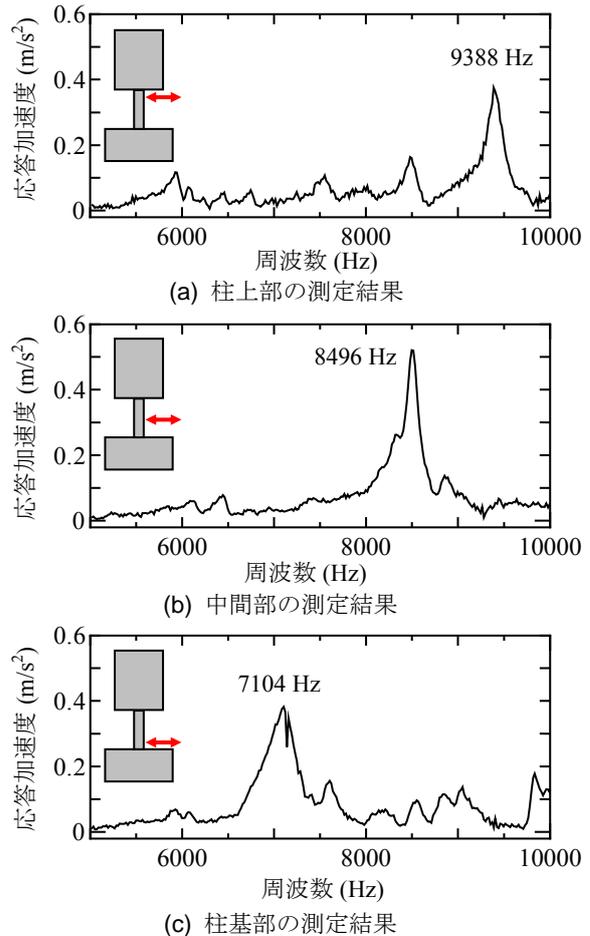


図-8 柱供試体の共振曲線 (H100)

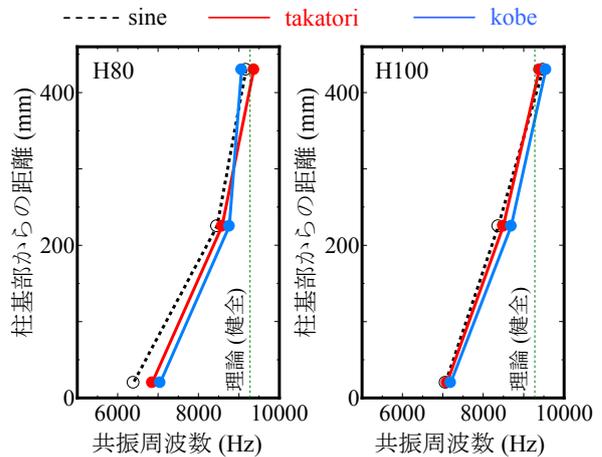


図-9 柱高さ方向の共振周波数の分布

6 体の柱供試体の柱上部、中間部、柱基部で測定した共振周波数の分布を図-9 に示す。いずれも柱基部の共振周波数が健全時の 75% 程度まで低下しており、地震波を入力した動的繰返し载荷によって生じた曲げひび割れを検知することができた。しかし、図-4 に示した RC はり供試体と比較すると、柱供試体ではひび割れによる共振周波数の低下率が小さい。柱供試体では、加振方向とひび割れの方向が平行しているため、加振方向に対す



写真-2 コンクリート擁壁

るコンクリートの剛性低下が小さかったと考えられる。共振周波数(剛性)の低下要因として、ひび割れ本数、ひび割れ幅、ひび割れ角度などが挙げられるが、これらのひび割れ性状が共振周波数に及ぼす影響について、今後検討する必要がある。

#### 4. コンクリート擁壁の現場試験

##### 4.1 実験概要

著者らは、将来的に図-1の局所振動試験をコンクリート構造物の地震時損傷評価に応用することを目的としている。特に、地震を受けた橋台や擁壁などの点検において、前面からは見えない裏込土がある背面側のひび割れを検知できることを期待している。

そこで、今後の研究の発展性を推し量る試行として、コンクリート擁壁の現場試験を行った。ここでは、健全な構造物を対象として、背面土があるコンクリート壁の振動試験の可能性を検討した。対象構造物は、東北大学にある写真-2の擁壁であり、壁厚 200 mm、擁壁高さ 2100 mm、擁壁長さ(目地間距離)は 11 m である。

振動実験では、加振器の加速度振幅を  $1 \text{ m/s}^2$  で一定とし、周波数を 5000~15000 Hz まで 3 分間で直線的に上昇させた。なお、この現場試験の際には、0~30000 Hz まで加振できる測定機器を新たに導入した。

##### 4.2 実験結果

写真-2 に示すような背面に土圧が作用している状態で、擁壁の前面から局所振動試験を行った。測定位置は地面から 700 mm の高さとし、壁前面から厚さ方向に水平加振した。図-10 に示す共振曲線では明確な応答加速度のピークが表れており、背面に土圧が作用している状態でも、擁壁の前面から局所振動試験が可能であった。その結果、擁壁の共振周波数の実測値として 9527 Hz が得られた。本実験では、擁壁のコンクリート物性を把握していないが、健全なコンクリートの縦波速度 4000 m/s を仮定した場合には、式(1)による共振周波数の理論値は 10000 Hz となる。実測値と理論値が良好に整合してい

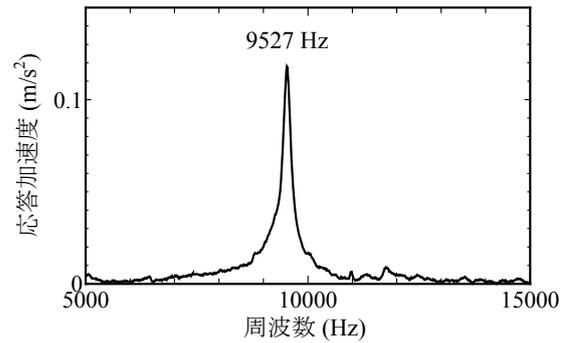


図-10 コンクリート擁壁の共振曲線

ることから、健全なコンクリート擁壁に対して振動試験の可能性を見出すことができた。今後は、供試体実験と併せて、損傷のある構造物に対しても振動試験を実施し、健全性評価の妥当性を検討する必要がある。

#### 5. まとめ

本研究によって得られた知見を以下に列挙する。

- 1) 動電式加振器を用いた RC 部材の強制加振試験において、加振器周りの局所的な縦振動のみを励起する試験方法(局所振動試験)を提案した。
- 2) はり供試体と柱供試体の検討では、部材長さや断面高さの比が 5~6 程度以上であれば、ひび割れ箇所の局所振動試験において共振周波数が低下することが示された。さらに、測定位置を変えた局所振動試験によって、供試体の健全箇所とひび割れ箇所を示すことができた。

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、目視困難箇所の点検に対する提案技術の有意性に期待している。本研究によって得られた知見は、限られた諸元や実験条件によるものであり、今後も基礎的研究を積み重ねるとともに、現場試験での応用可能性を検討する必要がある。

#### 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。
- 4) 渡辺孝和，長谷川俊，内藤英樹，鈴木基行：固有振動数の低下に着目した RC 部材の地震時損傷評価に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.901-906，2012。