

# 論文 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

近 栄一郎\*1・内藤 英樹\*2・五十嵐 亜季\*3・鈴木 基行\*4

**要旨**：加振器まわりの局所的な共振を励起することによって、RC 部材の剛性評価と内部ひび割れを同定する手法(局所振動試験)を提示した。せん断破壊および曲げ破壊型の RC はり供試体をそれぞれ作製し、ひび割れの方向やひび割れ幅などが局所振動試験の剛性評価に及ぼす影響を検討した。提案技術は、せん断ひび割れの発生箇所において局所的な共振周波数が低下し、また、曲げひび割れについても塑性率 3 以上の塑性変形に対して損傷位置同定の適用性が確認できた。さらに、供試体の上下面のいずれからでも同じ測定結果が得られることを確認した。

**キーワード**：カルバート、せん断破壊、振動試験、損傷同定

## 1. はじめに

兵庫県南部地震ではカルバート構造の隔壁や中柱にせん断破壊が生じた事例が報告されている<sup>1)</sup>。カルバート、橋台、擁壁、水路などの構造物は、背面が土に覆われているため、背面側のひび割れを目視によって直接点検することができない。また、カルバートや床版などの壁や版構造では、部材側面からせん断ひび割れや曲げひび割れなどの分布性状を確認することができない。このため、これらの構造物に地震や過度な土圧が作用した場合に壁前面にひび割れが生じて、部材内部のひび割れ性状を推定することや、構造物の安全性への影響および対策の緊急性を判断することは容易ではない。このような様々な目視困難箇所の損傷事例に対して、非破壊試験の活用が期待されている。

特に、せん断破壊は脆性的に耐力を失い、構造物の安全性を大きく低下させる要因になるため、点検技術の開発が望まれる。RC 壁部材のせん断ひび割れの点検を目的とした永田ら<sup>2,3)</sup>の研究では、壁前面からの衝撃振動試験によって、部材損傷と固有振動数の低下<sup>2)</sup>および振動モードの変化<sup>3)</sup>を検討している。この他にも振動特性

の変化に着目した構造物の損傷同定は従来から検討されているが、既往の手法では部材全体を振動させるものが多い。構造物や部材全体を振動させる方法は測定が容易であるが、振動が及ぶ範囲の平均剛性を評価するために軽微な損傷の検知が難しいことや、損傷位置の同定ができないこと、あるいは健全時の振動特性を推定する場合に部材の支持条件が大きく影響するなどの課題がある。

これに対して著者ら<sup>4,5)</sup>は、図-1 に示すように、加振器を用いて RC 部材の局所的な共振を励起する測定方法(以下、局所振動試験)を検討している。局所振動試験は、重複反射波の定常振動に基づいて検査範囲の平均剛性を評価する。ひび割れ方向によって剛性低下が異なるため、図-1 (a) に示す曲げひび割れに対する損傷同定の感度と、図-1 (b) のせん断ひび割れに対する感度の違いから、壁前面からの局所振動試験によって部材内部のひび割れ性状の推定が可能になると考えた。

本研究はその基礎検討として、せん断破壊および曲げ破壊が先行する RC はり供試体をそれぞれ作製し、静的載荷試験と局所振動試験を行うことによって、ひび割れ性状と振動試験結果との対応を整理する。

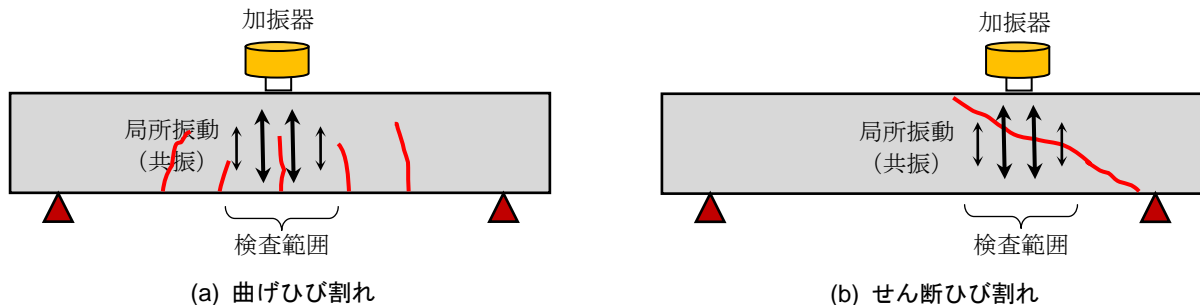


図-1 局所振動試験の概略図

\*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 (正会員)  
 \*3 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (学生会員)  
 \*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 教授 (正会員)

表-1 供試体諸元

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	引張鉄筋比 (%)	せん断補強鉄筋比 (%)	曲げせん断耐力比	破壊モード
S 供試体	2400	600	300	3.9	1.45	0.04	0.93	せん断破壊
F 供試体					1.45	0.42	1.95	曲げ破壊

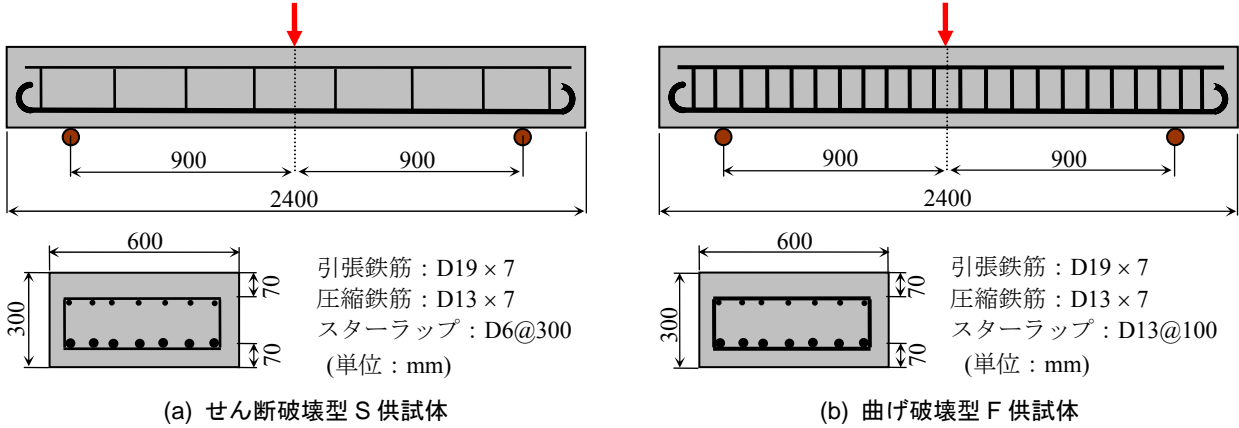


図-2 供試体概略図

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

供試体諸元を表-1 に示す。せん断ひび割れと曲げひび割れに対して図-1 の局所振動試験の適用性を検討するため、本実験ではせん断破壊が先行する S 供試体と曲げ破壊が先行する F 供試体の 2 体を作製した。供試体概略図を図-2 に示す。供試体寸法はいずれも部材長さ 2400 mm、断面高さ 300 mm、断面幅 600 mm とした。

鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を表-2 に示す。コンクリート標準示方書<sup>6)</sup> に準じて算定した S 供試体と F 供試体の曲げせん断耐力比は、それぞれ 0.93 と 1.95 である。

2.2 静的載荷試験

載荷条件を図-2 に示す。はりのスパンは 1800 mm とし、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 3.9 である。変位計はスパン中央の供試体下面に 2 個配置し、これらの平均値として鉛直変位を測定した。

スパン中央の引張鉄筋にひずみゲージを貼付した。曲げ破壊型 F 供試体では、引張鉄筋のひずみ値と表-2 の材料試験結果との対応から、実験時の降伏変位  $\delta_y$  を定めた。載荷パターンは、降伏変位  $\delta_y$  を基準とした整数倍の変位に対して  $6\delta_y$  まで片押し載荷を行った。各載荷ステップにおいて除荷をして、荷重が零のときに目視によるひび割れ観察と局所振動試験を行った。

せん断破壊型 S 供試体では、引張鉄筋が降伏する前にせん断破壊によって荷重が低下したため、荷重低下と同時に除荷をした。

表-2 材料試験の結果

		降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )
鉄筋	D6	415	193000	549
	D13	381	194000	535
	D19	394	192000	571

	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> )
コンクリート	31.3	24800	29900	2290

2.3 局所振動試験

本実験で使用した動電式加振器と試験装置類を写真-1 に示す。加振器の仕様は、最大加振力 50 N、質量 1.8 kg である。図-1 の局所振動試験は、着目する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、構造物表面の加振点近傍において応答加速度を測定する。試験方法の詳細や、入力(周波数ごとの加振力)と応答の関係などは、参考文献 5) に示した。また、模擬空隙を含む RC 床版供試体の基礎検討<sup>7)</sup> より、図-1 の検査範囲は、加振器まわりに部材厚さと同程度の範囲と考えており、この範囲の損傷によって剛性(共振周波数)が低下する。

S 供試体では、せん断ひび割れによって荷重が低下したと同時に除荷をして、荷重が零に達したときに局所振動試験を行った。曲げ破壊型 F 供試体では、 $1\delta_y$ ,  $2\delta_y$ , ...,  $6\delta_y$  の各載荷ステップの除荷後に局所振動試験を行った。

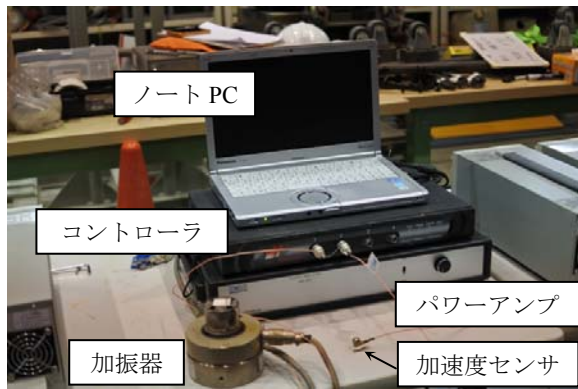
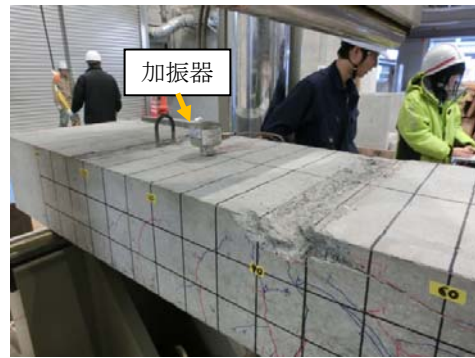


写真-1 振動試験装置

局所振動試験は、写真-2 に示すように、供試体の上面および下面の両方に対して行った。供試体軸方向の100 mm 間隔ごとに、それぞれ断面幅中央位置において局所振動試験を行った。加振条件は、周波数帯域 1000~8000 Hz を基本として、パワースペクトル密度 (PSD) を  $1.0 (\text{m/s}^2)^2/\text{Hz}$  に一定制御したホワイトノイズを与えた。加速度時刻歴波形の振幅の実効値 (RMS) は  $82 \text{ m/s}^2$  である。加振器は厚さ 1 mm の両面テープを介して供試体表面に接触させ、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応答を測定した。



(a) 供試体上面からの測定



(b) 供試体下面からの測定

写真-2 局所振動試験の状況

### 3. 静的載荷試験の結果

S 供試体と F 供試体の荷重-変位関係を図-3 に示す。F 供試体は降伏後の  $3\delta_y$  の載荷時においてコンクリートの圧壊が生じたが、 $6\delta_y$  まで載荷を継続した。これに対して S 供試体では、降伏荷重の 90% 程度の段階でせん断ひび割れが生じて荷重が低下した。

ひび割れ状況を図-4 と図-5 に示す。また、クラックスケールによる最大ひび割れ幅を表-3 に示す。ひび割れ図は、各載荷ステップの除荷後の目視に基づいて作成した。図-4 のせん断破壊型 S 供試体は、荷重低下後直ちに除荷したため変形の小さい段階にとどまった。スパン中央から右側において斜め方向のせん断ひび割れが生じており、供試体側面で観察される最大ひび割れ幅は 1.3 mm であった。スパン中央から左側の範囲でも斜め方向の軽微なひび割れが見られ、また、供試体下面では水平方向のひび割れが 1 本のみ観察された。供試体下面のひび割れ幅は 0.1 mm であった。このことから、RC 壁構造がせん断破壊した場合には、壁前面からは軽微な水平ひび割れが 1 本しか観察されない可能性が示唆される。

曲げ破壊型 F 供試体では、 $2\delta_y$  までは鉛直方向の曲げひび割れが観察された。降伏後は引張鉄筋に残留ひずみが生じるため、 $3\delta_y$  までに最大ひび割れ幅が 2.0 mm に達し、斜め方向のひび割れも発生した。さらに  $4\delta_y$  以降は 5.0 mm までひび割れ幅が増加した。

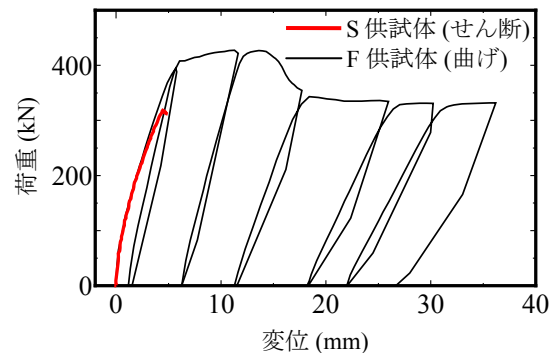


図-3 荷重-変位関係

### 4. 局所振動試験の結果

#### 4.1 健全時の共振周波数

載荷前の健全状態での測定結果の一例として、S 供試体のスパン中央から右側 500 mm 位置で得られた上面および下面測定の共振曲線を図-6 に示す。2 つの共振周波数は良好に対応しており、6600 Hz 程度となった。

簡便な近似計算として、鉄筋の拘束効果や波動伝搬範囲、支持条件などを無視して、棒の縦振動を考える。このとき、共振周波数は次式で与えられる<sup>8)</sup>。

$$f = \frac{c}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho} \cdot \frac{1-\nu}{(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (1)$$

ここで、 $f$  は 1 次の共振周波数、 $c$  は縦波伝搬速度、 $L$  は部材厚さ、 $E_d$  は動弾性係数、 $\rho$  は密度、 $\nu$  はポアソン比

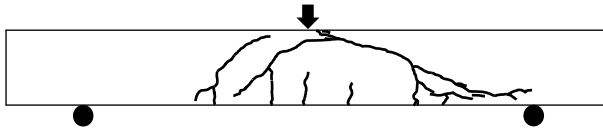


図-4 せん断破壊型 S 供試体のひび割れ図

表-3 最大ひび割れ幅

供試体名		側面	下面
S 供試体 (せん断破壊)		1.3	0.1
F 供試体 (曲げ破壊)	$1\delta_y$	0.2	0.2
	$2\delta_y$	1.2	1.2
	$3\delta_y$	2.0	2.0
	$4\delta_y$	5.0	4.0
	$5\delta_y$	5.0	4.0
	$6\delta_y$	5.0	4.0

(単位 : mm)

である。

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、ポアソン比に 1/6 を仮定すると、式(1)の算定値は 6300 Hz となる。図-6 の実測値 (6617 Hz) との比較により、式(1)を用いても共振周波数の概算値が簡便に算定できることが示唆された。

#### 4.2 せん断ひび割れと共振周波数の関係

S 供試体のせん断破壊後に局所振動試験を行った。測定結果の一例として、スパン中央から右側 500 mm 位置で得られた共振曲線を図-7 に示す。図-6 の健全時の測定結果と比較すると、せん断破壊後は共振周波数が 1800 Hz 程度まで大きく低下した。図-1 に示した局所振動試験の加振方向に対して、せん断ひび割れが横断するため、ひび割れを含む局所的な共振周波数 (剛性) が低下すると考えられる。なお、図-7 では下面測定の実答振幅が上面測定よりも大きいことが示された。本研究は共振周波数に着目しているため実答振幅の検討は行っていないが、測定点からひび割れまでの距離が近い場合には実答振幅が大きくなると考えられる。今後の検討によって、深さ方向のひび割れ位置に関する情報を得られる可能性が示唆された。

せん断破壊後に各測定箇所得られた共振周波数の分布を図-8 に示す。図-4 に示したひび割れ図より、せん断破壊はスパン中央から右側の範囲で生じており、左側の損傷は軽微であった。図-8 の共振周波数が低下する範囲はせん断破壊が生じた領域と良好に対応した。また、上面および下面測定の結果も良好に対応しており、背面側にひび割れが生じている場合でも前面からの測定によって内部ひび割れの検知が可能になると期待される。なお、スパン中央付近については、上面測定のみ共振周

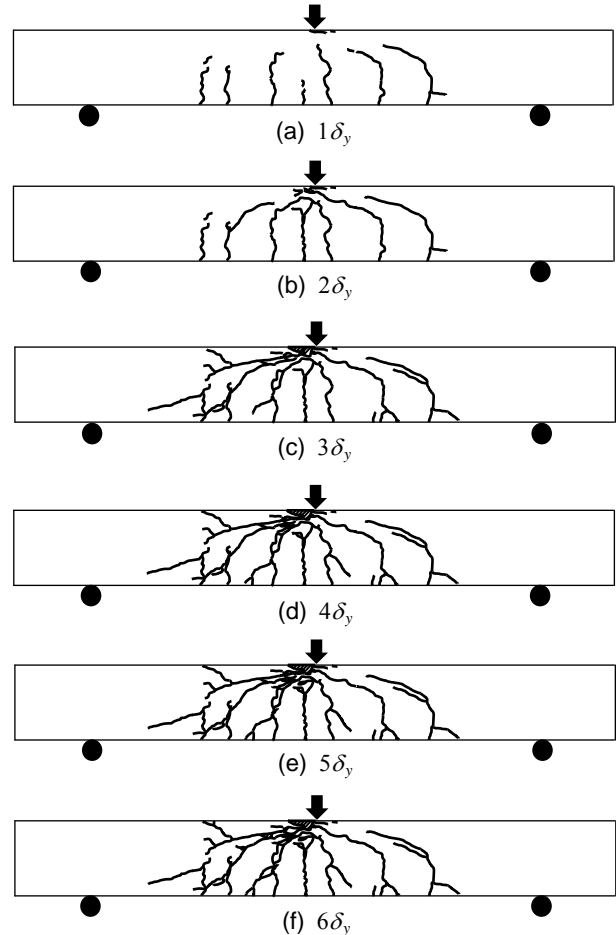


図-5 曲げ破壊型 F 供試体のひび割れ図

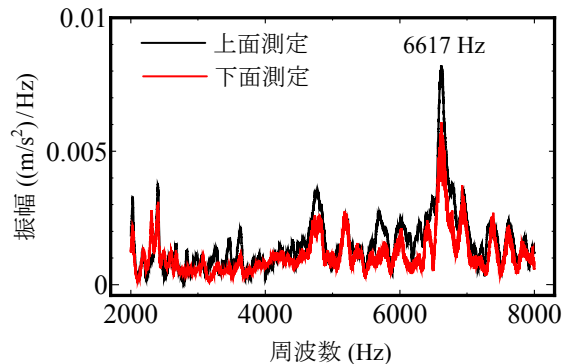


図-6 健全時の共振曲線 (S 供試体)

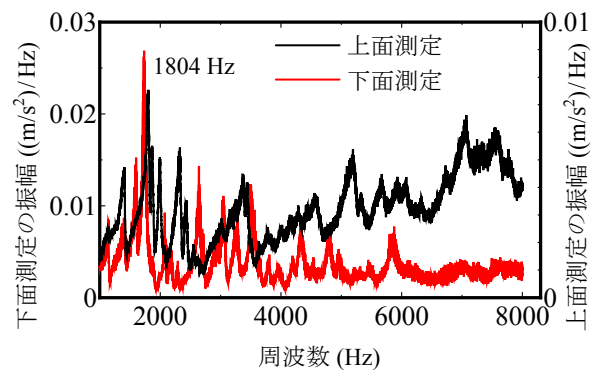


図-7 せん断破壊後の共振曲線 (S 供試体)



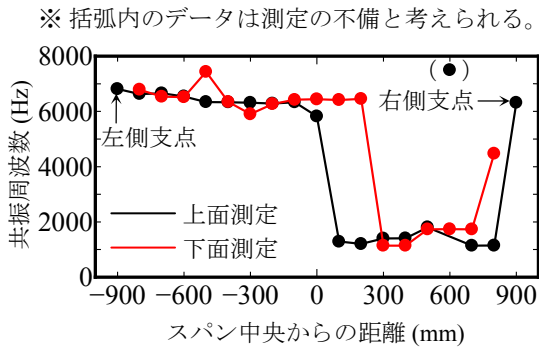


図-8 共振周波数の分布 (S 供試体)

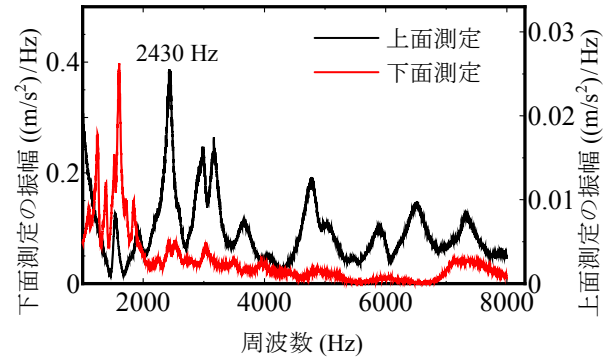


図-9 6 $\delta_y$  載荷後の共振曲線 (F 供試体)

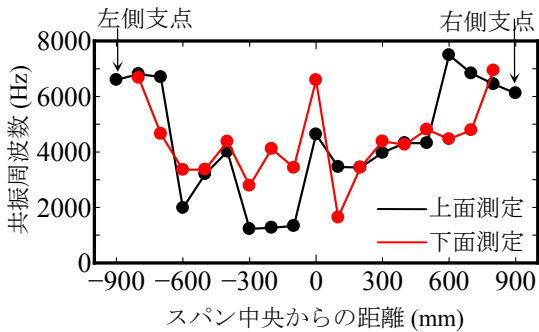


図-10 共振周波数の分布 (F 供試体, 3 $\delta_y$ )

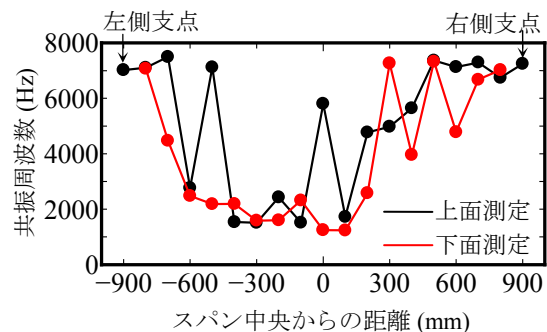


図-11 共振周波数の分布 (F 供試体, 6 $\delta_y$ )

波数の低下が見られた。上面測定は測定点とせん断ひび割れの距離が近いため、下面測定よりも感度良く損傷を捉えたものと推察されたが、応答振幅の検討と併せて今後の課題とする。

#### 4.3 曲げひび割れと共振周波数の関係

曲げひび割れが生じた F 供試体の測定結果の一例として、スパン中央から左側 200 mm 位置で得られた共振曲線を図-9 に示す。6 $\delta_y$  の載荷後には、曲げひび割れに対しても共振周波数が大きく低下しており、上面および下面測定ともに 2000 Hz 程度の共振周波数が得られた。図-5 のひび割れ図より、3 $\delta_y$  以降の載荷では斜め方向のひび割れも発生しており、さらに表-3 の最大ひび割れ幅も 2.0~5.0 mm に達している。このような損傷の進展によって、曲げ破壊型 F 供試体でも共振周波数が低下したものと考えられる。

3 $\delta_y$  および 6 $\delta_y$  の載荷ステップ後に各測定箇所でも得られた共振周波数の分布を図-10 および図-11 に示す。3 $\delta_y$  以降は両側の支点から載荷点に向かって対称に共振周波数が低下する傾向が示されており、図-5 のひび割れ性状とも良好に対応した。上面および下面測定の結果も概ね対応している。なお、測定データの幾つかは、ひび割れが生じている箇所でも 6000 Hz 程度の共振周波数が得られる場合があった。図-5 のひび割れ図を参照すると、F 供試体では複数の鉛直および斜め方向のひび割

れが検査範囲(振動が及ぶ範囲)に離散的に内在しているため、測定箇所によってはひび割れの影響が小さい剛性を評価する場合があると考えられる。これに対して図-8 の S 供試体では、連続したせん断ひび割れ面が検査範囲を横断するため、いずれの測定箇所でも局所振動試験によって剛性低下が捉えられたものと推察される。

S 供試体と F 供試体について、載荷点変位を降伏変位  $\delta_y$  で除した塑性率と、共振周波数との関係を図-12 に示す。図の縦軸は、100 mm 間隔で測定した共振周波数のうち最小値を示した。図より、F 供試体では降伏以降に残留ひび割れが生じ、斜めひび割れの増加に伴って共振周波数が低下すると考えられる。本実験の範囲では、共振周波数が最も低下する箇所においては、3 $\delta_y$  までに健全時の 20~30% 程度まで共振周波数が低下することが明らかになった。

これに対して、S 供試体では降伏荷重の 90% 程度の段階でせん断破壊が生じており、同時に、共振周波数も 1000 Hz 程度まで低下した。地震後の RC 構造物の損傷調査では、曲げ破壊した場合には、降伏までの応答が安全性の問題になることは少なく、塑性変形が大きい事例に対して損傷程度や損傷箇所の同定が重要になる。一方、せん断破壊については脆性的に耐力を失うため、せん断ひび割れが小さい段階でも確実に損傷を検知する必要がある。図-12 のせん断ひび割れおよび曲げひび割れに対

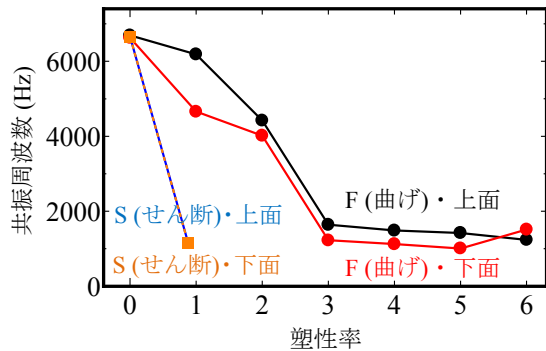


図-12 塑性率と共振周波数の関係

する部材の塑性変形と共振周波数の関係は、このような地震後の構造物の点検ニーズとも合致している。

特に、カルバート、擁壁、橋台などの背面が土に覆われて目視困難な構造物に対して、壁前面から点検・調査を実施して部材内部のひび割れ性状を推定できることは有用である。著者らは、これまでも実際の RC 水路の側壁<sup>9)</sup>や擁壁<sup>10)</sup>に対して局所振動試験の適用性を検討しており、背面土がある場合でも局所的な共振周波数の測定が可能であることを確認している。今後、カルバートなど、壁構造の点検への応用が期待される。

## 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) 加振器まわりの局所的な共振を励起することによって、RC 部材の剛性評価と内部ひび割れを同定する手法(局所振動試験)を提示した。供試体実験では、加振方向に対してせん断ひび割れが横断する場合に、共振周波数が大きく低下し、損傷位置の同定も可能であった。
- 2) 曲げひび割れに対しても、塑性率 3 以上の塑性変形に対しては、せん断ひび割れと同程度の共振周波数の低下が確認され、損傷位置の同定も可能であった。
- 3) 上記 1),2) は、供試体上面および下面のいずれからの測定でも同様の結果が得られることを確認した。

提案技術は、重大な損傷であるせん断破壊に対して損傷同定の感度が高く、一方、構造物の安全性に問題にならないような軽微な曲げひび割れに対しては感度が低い。しかし、曲げひび割れであっても大きな塑性変形に達した場合には、損傷を検知することができる。特に、提案技術はカルバートなどの背面が土に覆われて、さらに側面のひび割れ性状も目視できない構造物に対して、壁前面から点検・調査が可能になるなど、様々な目視困難箇

所の点検への応用が期待される。本研究は限られた供試体諸元と実験条件による基礎検討であるが、今後も広範な諸元や実験条件に対する基礎実験や、数値解析による評価、理論の強化などを検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 遠藤達巳, 竹内幹雄, 坂上明: 地中に埋設されるボックスカルバートの耐震性向上構造形式の提案, 免震・制震コロキウム講演論文集, Vol. 1, pp. 149-156, 1996.
- 2) 永田聖二, 宮川義範, 金澤健司, 松村卓郎: せん断ひび割れの進展に伴う RC 壁供試体の固有振動数低下の検出, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 1721-1726, 2011.7
- 3) 永田聖二, 宮川義範, 金澤健司: 面外繰返し変形を受ける RC 部材の損傷形態と振動特性変化の関係, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 787-792, 2014.7
- 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) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2012.
- 7) 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
- 8) 野口翔, 磯田俊郎, 後藤尚貴, 大津政康: 凍結融解劣化コンクリートの弾性波法による損傷度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No. 1, pp. 897-902, 2008.7
- 9) 五十嵐亜季, 内藤英樹, 土田恭平, 鈴木基行: 強制加振試験によるコンクリート開水路の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 2, pp. 793-798, 2015.7
- 10) 内藤英樹, 長谷川俊, 上田博之, 鈴木基行: 強制加振試験による RC 部材の曲げひび割れの検出, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 781-786, 2014.7