

論文 強制加振試験によるコンクリート開水路の損傷評価

五十嵐 亜季*1・内藤 英樹*2・土田 恭平*3・鈴木 基行*4

要旨: コンクリート開水路の点検は、一般に、放水時に合わせて目視点検や打音検査などが行われている。このため、通水時でも健全性を点検できる簡便な手法が求められる。本研究では、動電式加振器により側壁の水平および鉛直方向の縦振動を励起し、共振周波数の低下に着目して損傷評価を試みた。供試体を用いた基礎検討では、載荷による曲げひび割れや表面のはつりに対して、損傷評価が可能であった。さらに、コンクリート開水路の現場試験を実施し、側壁の背面に土砂がある場合でも共振周波数が測定できることや、対象開水路は水位付近の表面に劣化が見られるが、内部まで劣化が進展していないことが示された。

キーワード: 水路, 損傷同定, 強制加振試験, 共振周波数

1. はじめに

我が国の社会基盤構造物の多くが老朽化を迎える段階にあり、定期点検による劣化・損傷の早期発見と早期対策の重要性が認識されている。しかし、水中構造物や地中構造物などは、直接目視による点検が容易ではない。コンクリート水路は、河川、農業、工業において重要な役割を担っており、これらの総延長は膨大であるが、一般に、水路の放水時にのみ側壁や底版の目視点検などが行われている。水路の機能上、放水が頻繁に行われることは少なく、著しい劣化・損傷が確認されてから大規模な補修工事が必要となることも少なくない。

水路の点検手法について、緒方ら^{1),2)}および森田ら³⁾は、凍結融解作用による側壁表面の外観変状を整理し、超音波試験との対応を検討している。この他にも、コンクリート表面の品質評価試験⁴⁾や各種振動試験法など、水路側壁の損傷評価手法が幾つか考えられるが、通水時に水位下部の健全性を点検することは容易でない。以上の社会的背景や点検技術の現状と課題を踏まえると、特に、通水時において側壁上端から容易に実施できる非破壊検査手法の構築が望まれる。

これに対して、著者ら^{5),6)}は、加振器を用いた床版や擁壁の非破壊試験法を検討してきた。提案手法は、図-1に示すように、側壁に調和振動を加えることによって加振方向の縦振動を励起し、共振周波数(剛性)の低下に着目して損傷を評価する。ここでは、図中(a)に示す側壁前面から水平加振する方法を側部加振、図中(b)に示す上端から鉛直加振する方法を頂部加振と定義した。図中(a),(b)は振動が及ぶ範囲(検査範囲)が異なるため、頂部加振は側部加振よりも損傷に対する共振周波数の変化が小さい。しかし、図中(b)の頂部加振は、通水時でも側壁上端から容易に実施できることが大きな利点である。

本研究は、側壁背面に土砂が存在する鉄筋コンクリート製の開水路の側壁の点検に対して、図-1の提案手法の適用性を検討するものであり、2体の供試体を用いて、それぞれ載荷試験とはつり試験によって段階的な損傷を与え、共振周波数との関係を整理した。さらに、実際のコンクリート開水路の現場試験を行い、提案手法の実用可能性を検討した。

2. 水路供試体の載荷試験

2.1 実験概要

(1) 供試体諸元

載荷試験および後述のはつり試験に用いた水路供試体の概略図を図-2に示す。供試体側壁は、後述する現場試験で対象とした開水路を模擬した1/2スケールとし、側壁高さ1150mmと側壁厚さ200mmである。供試体高さ、幅、奥行はそれぞれ1450mm, 1400mm, 800mmとした。側壁の軸方向鉄筋はD10を115mm間隔、横方向

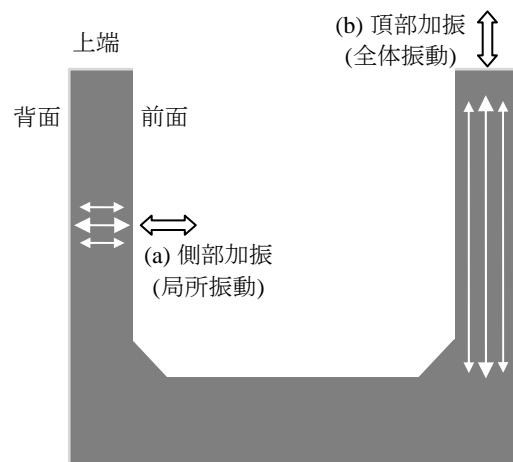


図-1 提案手法の概略図

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (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 博(工) (正会員)

*3 東北電力 土木建築部 修(工)

*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)

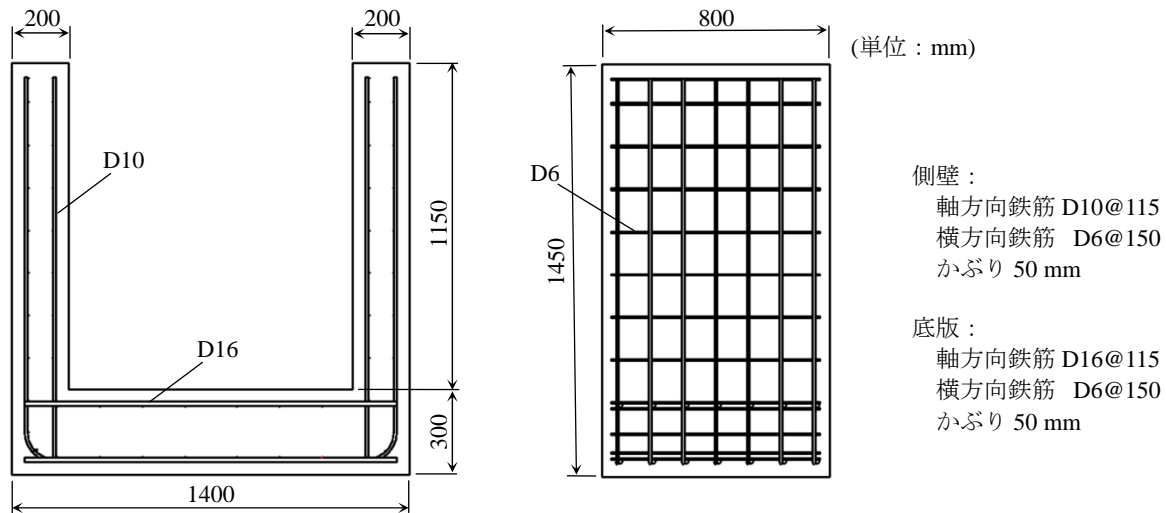


図-2 供試体概略図

表-1 コンクリートの材料試験の結果

圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)	動弾性係数 (N/mm ²)	密度 (kg/m ³)
41.4	3.46	29400	34900	2320

表-2 鉄筋の材料試験の結果

	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
D6	289	521	141000
D10	404	524	197000
D16	393	582	164000

鉄筋は D6 を 150 mm 間隔で配置した。かぶりは 50 mm である。載荷時に底版の損傷が大きくなるように、底版厚さ 300 mm とし、軸方向鉄筋は D16 を使用した。

コンクリートおよび鉄筋の材料試験の結果をそれぞれ表-1 および表-2 に示す。

(2) 載荷試験および振動試験

地震時土圧が作用した場合を想定して、載荷によって側壁基部に曲げひび割れを生じさせた。載荷試験の概略図を図-3 に示す。水路供試体を横置きにして片側側壁の背面側から荷重を加えた。載荷位置は基部から 900 mm 位置とした。

載荷による損傷と共振周波数との関係を整理するため、載荷ステップは降伏荷重 P_y を基準として、 $1/4P_y$, $1/2P_y$, $3/4P_y$, $P_y (= \delta)$, 2δ , 3δ とし、載荷ステップごとに荷重を保持した状態で振動試験を行った。なお、降伏荷重 P_y までは計算値を基に荷重制御し、降伏変位 δ は側壁基部の軸方向鉄筋のひずみゲージから判断した。

振動試験は、図-3 に示すように、側壁上端から側壁

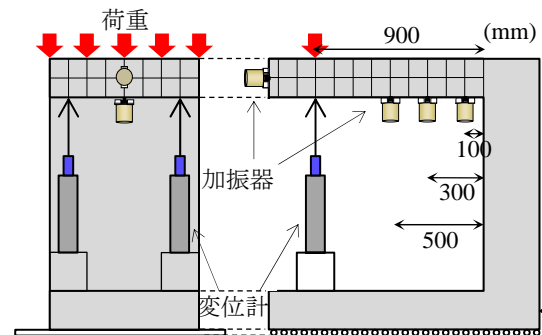


図-3 載荷試験および振動試験の概略図

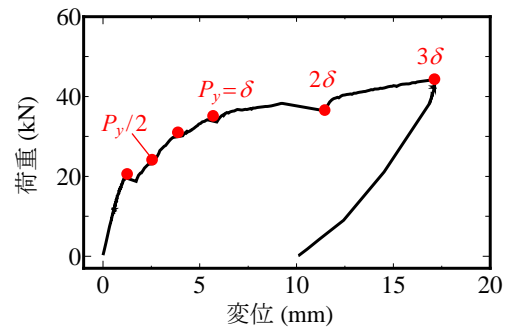


図-4 荷重-変位関係

高さ方向に加振する頂部加振と、側壁前面から側壁厚さ方向に加振する側部加振を行った。頂部加振は 1 点で測定し、側部加振は基部から 100, 300, 500 mm の位置でそれぞれ測定した。厚さ 1 mm の両面テープを介して、質量 9.5 kg (可動部 130 g) の加振器を供試体に接触させた。加振器の最大加速度振幅 1 m/s^2 を一定に制御して、頂部加振は 200~3000 Hz、側部加振は 500~15000 Hz を基本に、18 秒間で直線的に周波数を上昇させた。このとき、加振点付近に圧電式加速度センサを貼付し、共振曲線 (周波数-加速度振幅) を得た。それぞれの周波数における応答倍率の最大を示す周波数を共振周波数とした。

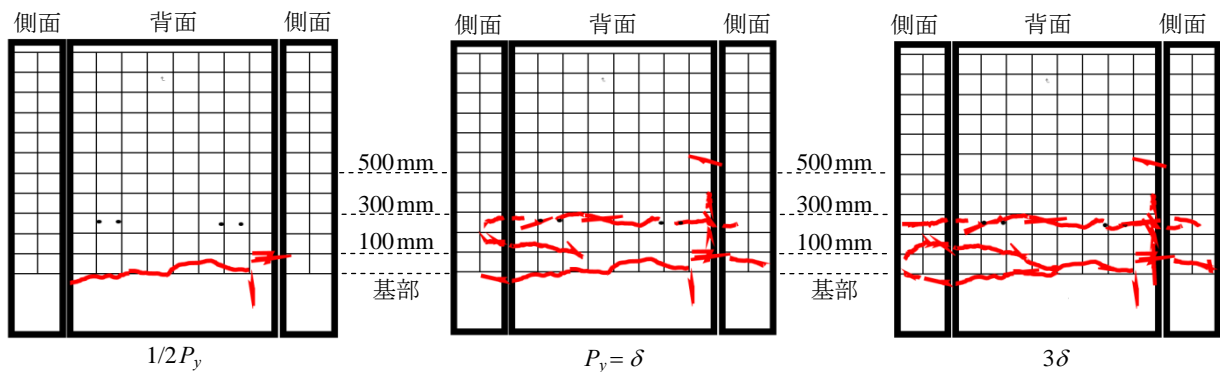
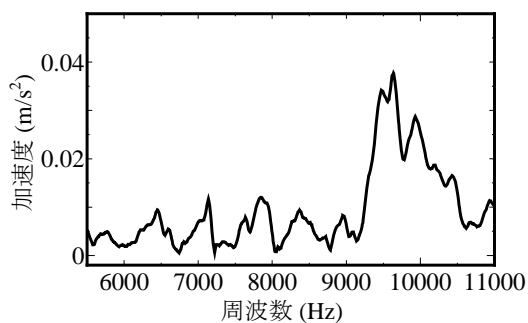
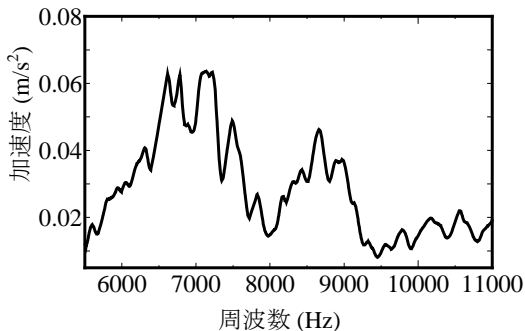


図-5 ひび割れ図



(a) 載荷前 (健全)



(b) 3δ 載荷時

図-6 側部加振の共振曲線 (載荷試験)

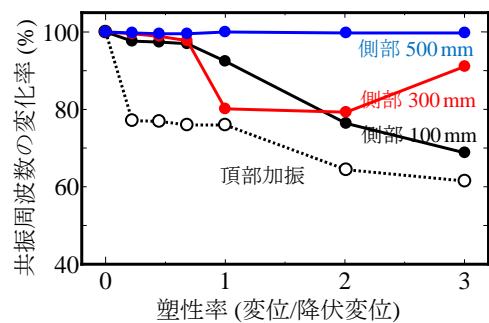


図-7 共振周波数の変化 (載荷試験)

$$f = \frac{v}{2L} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad (1)$$

ここで、 f は共振周波数、 v は縦波伝搬速度、 L は振動長さ、 E_d は動弾性係数、 ρ は密度である。式(1)を近似的な算定式と考えて、鉄筋の影響を無視して、コンクリートの動弾性係数と密度を代入した算定値は 9688 Hz であった。図-1 (a) の側壁の局所振動に対して拘束のない棒部材の算定式を用いても、結果として、実測値 9616 Hz と良好に対応した。なお、基部から 300 mm と 500 mm 位置での測定値も、それぞれ 9346 Hz と 9246 Hz であり、算定値と良好に対応した。

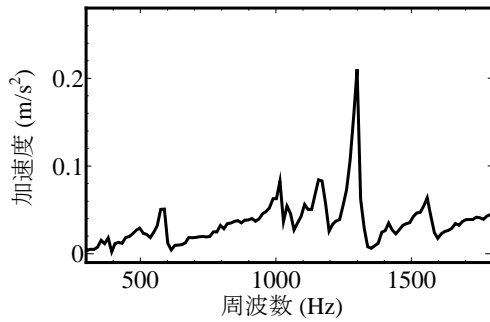
図-6 (b) は 3δ 載荷時の共振曲線であり、載荷によって共振周波数が低下した。3 測点 (基部から 100, 300, 500 mm) について、載荷ステップごとの共振周波数の変化を図-7 に示す。図の横軸は降伏変位 δ を基準とした変形量 (塑性率)、縦軸は健全時の共振周波数を基準とした変化率である。図-5 に示したように、ひび割れが目視観察された基部から 100 mm と 300 mm 位置では共振周波数が低下した。特に、2δ~3δ の載荷では 100 mm 位置の共振周波数が大きく低下し、300 mm 位置の共振周波数が回復することから、基部のひび割れが大きくなり、対して 300 mm 位置のひび割れが閉じたものと推察された。

一方、図-5 ではひび割れが観察されなかった 500 mm 位置では、健全時から 3δ まで共振周波数が変化せずに健全と判断された。このことから、加振器を用いた側部加

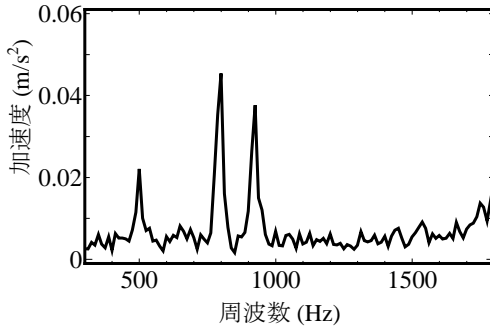
2.2 実験結果

載荷試験によって得られた荷重-変位関係を図-4 に示す。降伏変位 δ は 5.7 mm、降伏荷重 P_y は 35 kN であった。各載荷ステップにおいて側壁に生じたひび割れを図-5 に示す。1/2 P_y の載荷ステップでも側壁基部に曲げひび割れが目視によって確認できたが、降伏までひび割れは小さかった。降伏以降の載荷ステップでは、基部から 300 mm 位置のひび割れも顕著に見られ、載荷に伴って基部と 300 mm 位置のひび割れが大きくなった。

基部から 100 mm 位置の側部加振によって得られた共振曲線を図-6 に示す。図-6 (a) の健全時の実験結果より、側壁加振での共振周波数は 9616 Hz が得られた。両端自由の様な棒部材が縦振動する際の共振周波数は、式(1)の算定式によって得られる。



(a) 載荷前 (健全)



(b) 3δ 載荷時

図-8 頂部加振の共振曲線 (載荷試験)

振によって、側壁前面からの点検では見えない側壁内部や背面側のひび割れに対して、損傷位置を同定できる可能性が示唆された。

健全時の頂部加振による共振曲線を図-8 (a) に示す。共振周波数の実測値は 1299 Hz であった。式 (1) は振動長さ L の中央が不動点 (固定) である。側壁基部を固定と考えると、側壁高さの 2 倍を式 (1) の L に代入した。算定値は 842 Hz となり、実測値よりも低い値を示した。後述する現場試験でも同様の傾向が見られたため、今後、側壁基部の剛域のモデル化について再検討が必要である。

3δ 載荷時の共振曲線を図-8 (b) に示す。健全時の実測値 1299 Hz に対して、3δ 載荷時には 799 Hz まで共振周波数が低下した。側部加振と同様に、頂部加振でも載荷に伴って共振周波数が低下した。載荷に伴う共振周波数の変化を図-7 に併せて示す。図より、 $1/4P_y$ の段階で曲げひび割れによって共振周波数が低下し、さらに鉄筋降伏後にひび割れが大きくなったものと推察される。

図-7 より、頂部加振は側部加振よりも曲げひび割れに対して共振周波数の低下が大きかった。これは、曲げひび割れの方向によって、頂部加振が励起する側壁縦振動の剛性が大きく低下したと考えられる。

3. 水路供試体のはつり試験

3.1 実験概要

水路側壁の表面から生じる劣化・損傷を模擬して、図

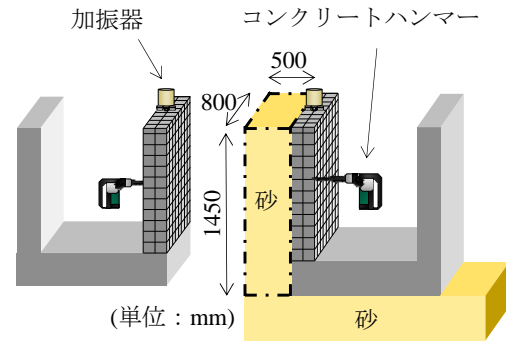
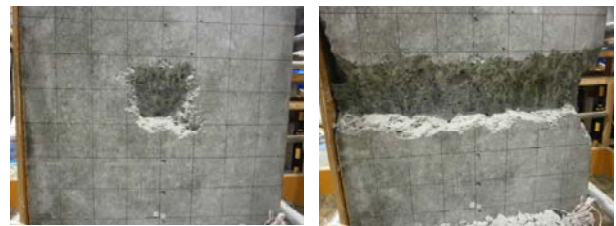


図-9 気中および土槽中でののはつり試験



(a) 200 mm × 200 mm

(b) 800 mm × 200 mm

写真-1 はつり試験による側壁前面の損傷状況



写真-2 土槽の設置および振動試験状況

図-2 の水路供試体の側壁前面をコンクリートハンマーで粉砕した。はつり試験の概略図を図-9 に示す。はつり試験は、写真-1 (a) に示すように、はじめに側壁幅中央の基部から 500 mm 位置を中心として、高さ 200 mm、幅 200 mm の範囲を粉砕した。はつり深さは、軸方向鉄筋位置 (かぶり 50 mm) までとした。以降は、はつり深さ 50 mm とはつり高さ 200 mm を一定として、写真-1 (b) に示すように、はつり幅を 800 mm まで段階的に広げた。

本実験は、片側の側壁に対しては気中で行った。さらに、他方の側壁については、側壁背面に土砂が接触した状態で振動試験を行うため、図-9 に示すように側壁背面を土槽で囲った。写真-2 に示す土槽の中は、山砂を 6 層に分けて突き固めながら充填した。使用した山砂の質量は 922 kg であり、平均比重は 1.59 である。なお、この検討は砂の接触による振動の吸収や、共振曲線への影響を検討するものであり、土圧は検討していない。

はつりステップごとに、図-9 に示す頂部加振による振動試験を行った。前記の実験と同様に、加振器の最大

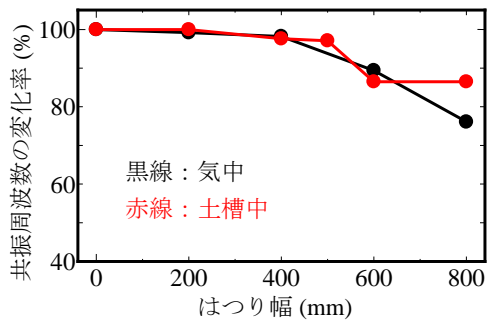


図-10 共振周波数の変化 (はつり試験)

加振度振幅 1 m/s^2 を一定とし、掃引周波数 $200 \sim 3000 \text{ Hz}$ を基本に、18秒間で直線的に周波数を上昇させた。

3.2 実験結果

損傷レベルと共振周波数の関係を図-10に示す。横軸ははつり幅(損傷面積)、縦軸は健全時の共振周波数(実測値: 1293 Hz)を基準とした変化率を示した。図-10より、気中と土槽中の実験結果に大きな差異はなかった。本実験では側壁鉛直方向の縦振動を励起しているため、背面土砂への波動逸散による減衰が生じなかったと考えられる。そして、はつり幅が供試体幅 800 mm の半分程度を超えると、表面からの損傷でも共振周波数が低下することが示された。

図-10に示した損傷レベルと共振周波数の関係は、はつり位置、損傷面積や深さなどの空間分布に大きく依存すると考えられる。今後も様々な損傷パターンによる基礎データの収集が必要である。なお、本実験の条件では、図-7と図-10の比較より、表面からのはつりによる損傷よりも、側壁内部に達する曲げひび割れの方が、頂部加振での共振周波数を大きく低下させる結果となった。共振周波数は縦振動の剛性を示すものであり、曲げひび割れによる断面積の低減が大きかったと考えられる。

4. 開水路の現場試験

4.1 実験概要

火力発電所の開水路の放水時に合わせて、現場試験を行った。水路幅 10 m 、側壁高さ 2.3 m 、側壁厚さ 400 mm 、底版厚さ 400 mm 、側壁基部のハンチ幅とハンチ高さはいずれも 300 mm である。実験時は放水されていたが、両側の側壁背面は土砂で覆われていた。対象水路は竣工後約 40 年が経過しており、目視点検では錆び汁やひび割れが見られ、幾つかの箇所では叩き点検によって浮きを確認された。

本実験では側壁に対して、図-11と写真-3に示す側部加振と頂部加振を行った。側部加振は、側壁基部から上部に $400, 900, 1500 \text{ mm}$ 位置で事前に叩き点検を行い、健全箇所と浮きを確認された劣化箇所について行った。供用時の水位は底版から約 $1 \sim 1.5 \text{ m}$ 程度である。さらに、

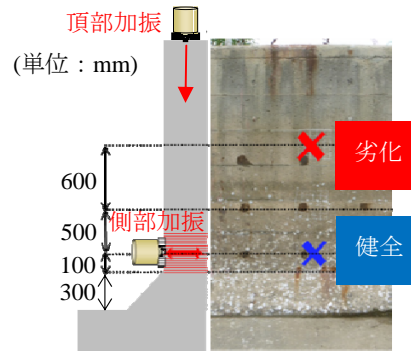


図-11 側部加振の測定位置



(a) 側部加振

(b) 頂部加振

写真-3 現場試験の状況

側部加振を行った側壁に対して頂部加振も行った。

加振器の最大加速度振幅を 3 m/s^2 に制御し、側部加振は $1000 \sim 6000 \text{ Hz}$ 、頂部加振は $100 \sim 2000 \text{ Hz}$ を基本として、18秒間で直線的に周波数を上昇させた。

4.2 実験結果

実験結果を図-12に示す。背面に土砂がある状態の水路側壁の現場試験でも、側部加振と頂部加振によってそれぞれの共振周波数が測定できた。本実験では、別途、超音波試験(表面法)による側壁表面の超音波伝搬速度も測定しており、健全箇所において 3876 m/s が得られた。これを式(1)の縦波伝搬速度 v に代入し、側壁厚さ 400 mm に対する側部加振の共振周波数の算定値 4845 Hz を得た。図-12に示される側部加振の実験結果は、 5000 Hz 程度を上限として、幾つかの箇所では共振周波数が大きく低下していた。これらの共振周波数が低下した箇所では、叩き点検でも表面の浮きを確認できた。

劣化判定の閾値を設定するためには、図-7や図-10に示すような様々な損傷パターンに対する基礎データの収集が必要である。なお、コンクリート標準示方書⁷⁾では凍害に対する耐久性の観点から、凍結融解試験におけるコンクリートの相対動弾性係数 70% を最小限界値としている。式(1)より、これに相当する共振周波数の変化率はおよそ 85% であることから、図-12では、試行的に共振周波数が理論値 (4845 Hz) の 85% を下回る箇所を赤字で示した。側部加振は側壁の前面と背面を往復する重複反射波によって共振周波数や剛性を評価するものであり、剛性分布の測定に基づいて側壁の劣化性状を

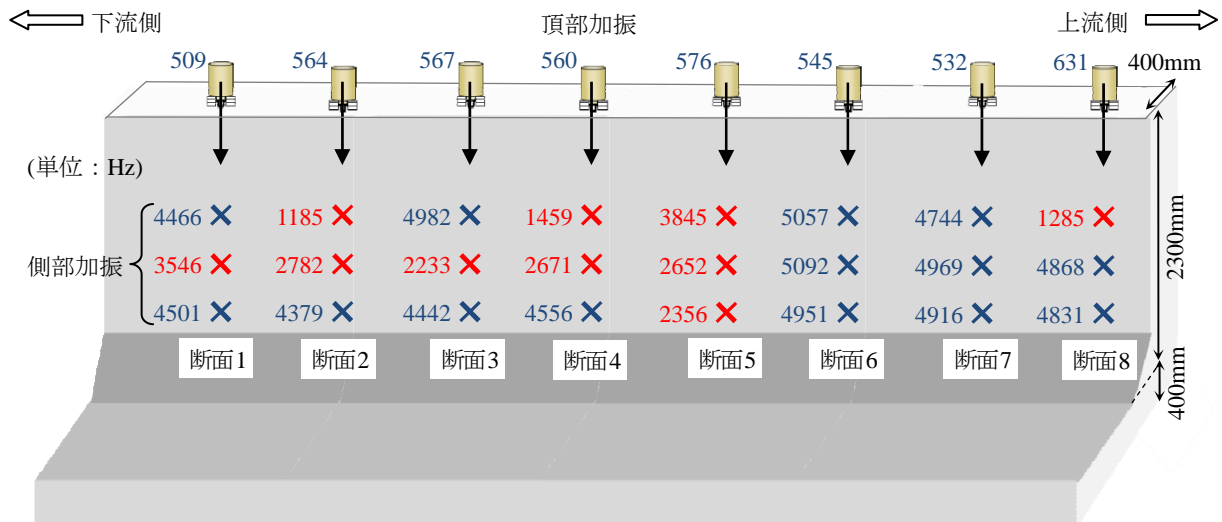


図-12 水路側壁の共振周波数の分布

示すことができる。

一方、頂部加振については、図-12のいずれの箇所でも共振周波数に大きな違いは見られなかった。側壁内部の詳細な調査は実施できなかったが、図-12を参照する限りでは、対象開水路は断面5から下流側において、水位付近(高さ約1~1.5m)に表面劣化が生じているが、側壁内部や背面までは劣化が進展していないと推察される。

5. まとめ

本研究では、動電式加振器を用いた水路側壁の振動試験方法を提示した。得られた知見を以下に挙げる。

- 1) 供試体を用いた基礎検討では、側壁の前面および上端から加振して得られる共振周波数の低下に着目して、曲げひび割れや表面の損傷が同定できる可能性が示唆された。
- 2) 背面に土砂がある開水路の現場試験でも、側壁の共振周波数が測定できた。さらに、共振周波数の分布に基づいて、側壁の劣化性状を示すことができた。

なお、上記の1),2)の結論は限られた供試体実験と、ひとつの現場試験の試行によって得られた。水路の劣化性状は多様であり、今後も広範な諸元と損傷パターンによる基礎データを収集するとともに、現場試験との整合性を確認する必要がある。

なお、提案手法は側壁前面から加振した場合には振動が及ぶ範囲(検査範囲)が狭いため、劣化が顕在化する前段階での早期発見と対策に繋がることが期待される。これに対して、側壁頂部から加振する方法は、側壁の広範囲を振動させるため、軽微な劣化・損傷が共振周波数に及ぼす影響は小さいと考えている。しかし、抜水が困難なために点検されていない水路が多数ある現状において、

通水時でも側壁頂部から点検できることは大きな利点である。今後は、構造物の要求性能と点検ニーズ、および測定精度を勘案して、側部加振(抜水時)と頂部加振(通水時)の2つを活用した点検手法を検討する。

参考文献

- 1) 緒方英彦, 鈴木哲也, 山崎大輔, 濱幸雄: 壁状構造物であるコンクリート製開水路の側壁内部の凍害劣化, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 833-838, 2010.7
- 2) 緒方英彦, 金田敏和, 石神暁郎, 周藤将司: 凍結融解作用による開水路側壁の内部変状に対する目視調査および超音波試験の考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 892-897, 2012.7
- 3) 森田匡隆, 周藤将司, 緒方英彦, 高田龍一: 凍結融解作用によるコンクリート開水路の表面変状の発生形態, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 911-916, 2011.7
- 4) 白根勇二, 舟橋政司, 松尾健二: 施工条件や養生条件がコンクリート表層部の品質に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 1313-1318, 2010.7
- 5) 内藤英樹, 斉木佑介, 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
- 6) 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知, コンクリート工学年次論文集, Vol. 36, No. 2, pp. 781-786, 2014.7
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2012.