

## 水管橋の動的振動特性に関する実験的研究

竹田 周平<sup>1</sup>・林 友弥<sup>2</sup>・北浦 勝<sup>3</sup>・池本 敏和<sup>4</sup>・宮島 昌克<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 後期課程 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

<sup>2</sup>学生会員 金沢大学大学院 自然科学研究科 前期課程 ( 同上 )

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 金沢大学大学院 自然科学研究科 教授 ( 同上 )

<sup>4</sup>正会員 工博 金沢大学大学院 自然科学研究科 助手 ( 同上 )

<sup>5</sup>正会員 工博 金沢大学大学院 自然科学研究科 教授 ( 同上 )

### 1. はじめに

近年我が国では、今世紀前半に発生する確率が高いと言われている東海・東南海・南海地域でのプレート型巨大地震や兵庫県南部地震のような大都市直下型地震の再来を感じさせるように、2004年新潟県中越地震をはじめ各地で地震活動が活発化している。

このような状況の中、土木構造物の耐震診断や耐震補強など地震防災に対する関心が高まりつつある。これらの土木構造物の中で、道路橋や鉄道橋は耐震化整備が進められているが、水道施設はこれらに比べて耐震化整備が十分進められているとはいえない状況にある。

水道施設のなかでも重要構造物である水管橋の耐震基準<sup>1)</sup>は、大地震時の動的挙動に関する既往の研究事例<sup>2)</sup>が少ないことから、道路橋示方書・同解説に準じたものとなっている。しかしながら水管橋は、道路橋と比較して

幅員が狭いこと、橋軸直角方向の剛性が小さいこと、自重が軽いこと、鋼材による溶接接合構造であることなど、構造特性に大きな違いが見られることから、水管橋独自の地震への配慮が必要となってくる。

本研究は、これまでに振動実験の事例が少ない三角形トラス形式水管橋に着目し、実橋による常時微動観測や自由振動及び強制振動による振動実験や数値解析を通じて、水管橋の振動特性および応答解析に必要な基礎的データを収集することを目的とした。

### 2. 対象となる水管橋の概要

本研究で対象とした水管橋は、支間長 $L=35.1\text{m}$ の単径間の逆三角形ワーレントラス補剛形式である。上部構造の断面図を図-1、水管橋の側面図を図-2に示す。図-1より上部構造の上弦材間隔は $B=2.5\text{m}$ で、上下弦

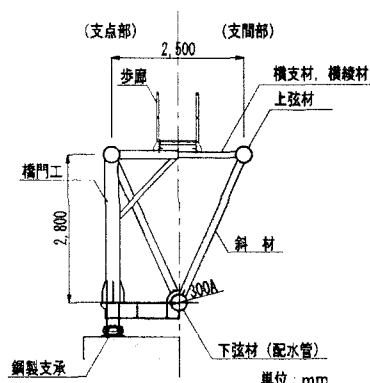


図-1 上部構造の断面図

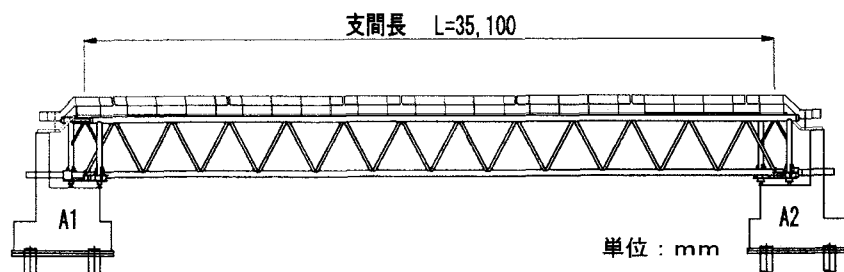


図-2 水管橋の側面図

材の間隔は  $H=2.8\text{m}$  である。これらの上下弦材の径はともに  $\phi 318.5\text{mm}$  (厚さ  $t=10.3\text{mm}$ ) である。なお点検用として全区間にわたり歩廊が設置されている。

上部構造の材質は、上下弦材、斜材、横支材、横綾材、橋門工ともにステンレス鋼で、支承は鋼製支承(高力黄銅支承板支承)による固定可動型構造である。下部構造はA1、A2橋台ともに逆T式橋台で、場所打杭基礎 ( $\phi 1000\text{mm}$ ,  $L=49.0\text{m}$ ) により支持されている。

また本水管橋の地盤種別はⅢ種地盤である。

### 3. 振動実験

#### (1) 振動実験の概要

振動実験は、常時微動観測、自由振動及び強制振動の3つにより行った。常時微動観測では、無荷重、無風状態で水管橋の加速度波形を5分間記録した。このときの加

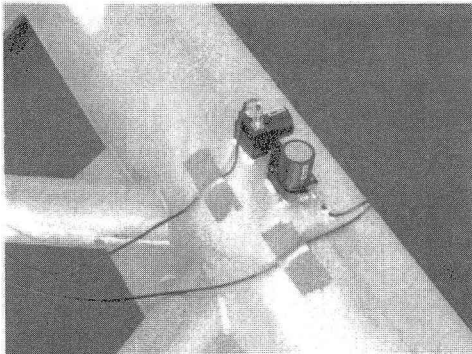


写真-1 加速度計設置状況

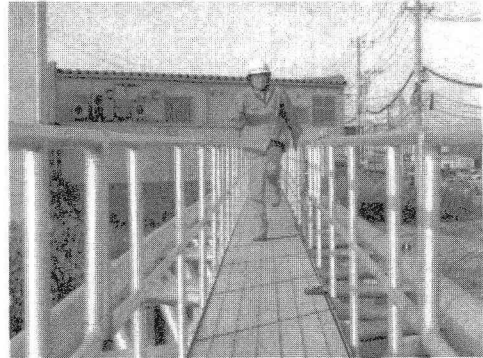


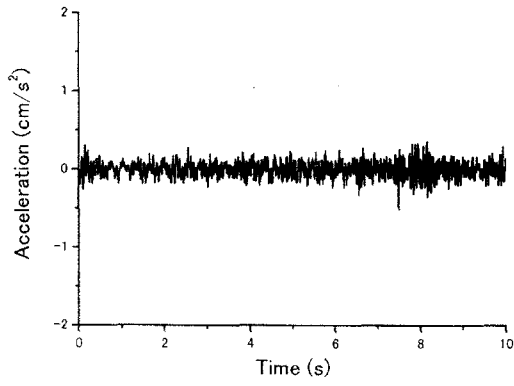
写真-2 強制振動状況



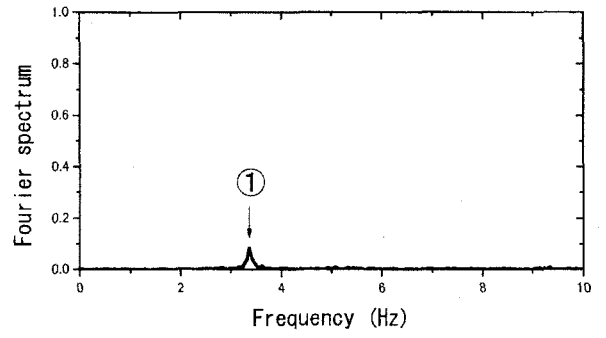
写真-3 計測機器

表-1 振動実験結果

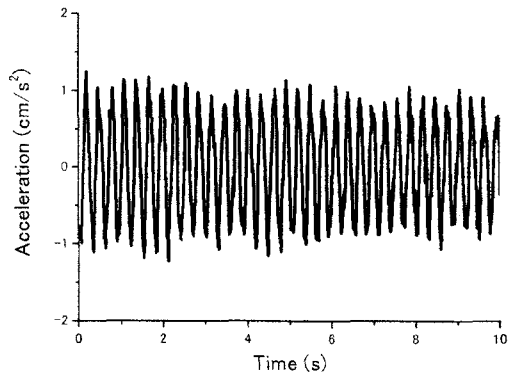
	管軸方向 (X 方向)		鉛直方向 (F 方向)		水平方向 (Z 方向)	
	1次	2次	1次	2次	1次	2次
常時微動観測(Hz)	(3.45)	-	5.20	-	3.37	9.09
自由振動 (Hz)	-	-	5.17	-	-	-
強制振動 (Hz)	3.36	-	5.16	-	3.24	9.03



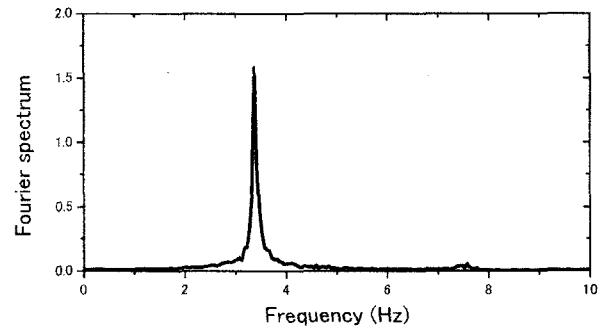
(1) 管軸方向 (L/2)



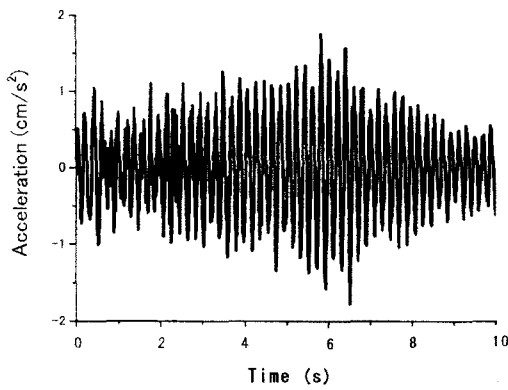
(1) 管軸方向フーリエスペクトル図 (L/2)



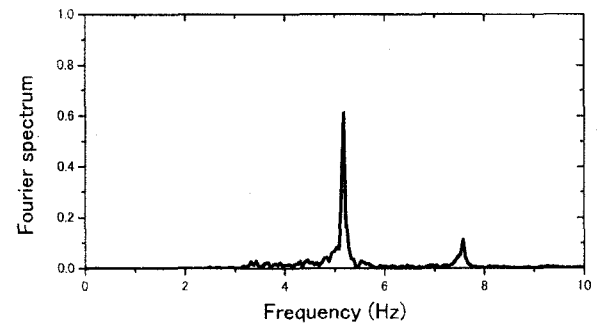
(2) 水平方向 (L/2)



(2) 水平方向フーリエスペクトル図 (L/2)



(3) 鉛直方向 (L/2)



(3) 鉛直方向フーリエスペクトル図 (L/2)

図-3 常時微動観測の結果

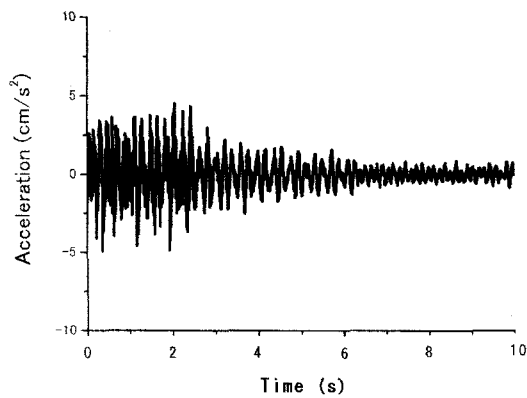


図-4 自由振動波形 (L/2)

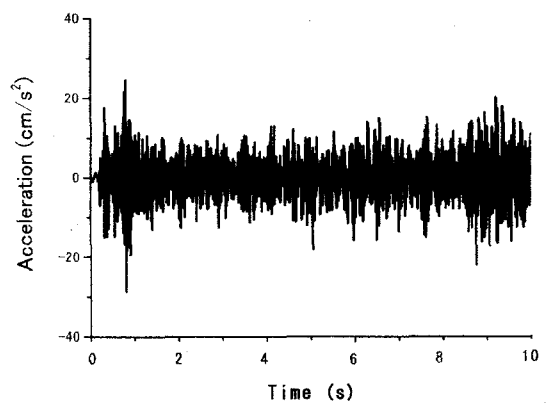


図-5 強制振動波形 (L/2)

速度計を設置する測点は、スパン  $L$  の  $L/4$ ,  $L/2$  (スパン中央),  $3L/4$  及び橋台上の4箇所であり、管軸方向・鉛直方向・水平方向の3方向について振動を計測した。またこれらの加速度計は、図-1 に示す上弦材の天端に計器が水平となるように設置した。設置状況を写真-1 に示す。

強制振動においては、人(体重:60kgf)が歩廊上を振動数 3~4Hz の歩調で歩行したときに生じる振動を計測すること、自由振動においては人がスパン中央で跳躍や屈伸することにより生じた振動を1分間計測した。強制振動の実験状況を写真-2 に示す。なおこれらの強制振動と自由振動での加速度計は、常時微動観測と同じ測点に設置した。

計測に用いた計器は、携帯用振動計(東京測器 SPC-35N)及びサーボ型速度計(東京測器 VSE-15D)である。これらの計器を写真-3 に示す。携帯用振動計は、A/D 変換部とノートパソコン部により構成されている。データをサンプリング周波数 200Hz で記録し、得られたデータをパソコンで波形処理を行って固有振動数を求めた。常時微動観測で得られた振動データについては、FFT を用いてフーリエスペクトルを求め、卓越振動数を読み取った。

## (2) 振動実験の結果

常時微動観測、自由振動及び強制振動による固有振動

数を表-1 に示す。また実験で得られた波形を図-3~5 に示す。表-1 は3段階に分かれており、上段は常時微動観測、中段は自由振動、下段は強制振動による結果である。ここでは、10Hz までの振動数を示した。また表-1 の自由振動における管軸方向については、実験で観測していないため表示していない。

また常時微動観測より得られた管軸方向の振動数については高振動成分が確認され、フーリエスペクトル図より他の方向に比較し明確な卓越振動数を得ることができなかった。表-1 で示した管軸方向の振動数 3.46Hz (図-3(1)の①) は、斜角によって水平方向の対称1次振動に連成して発生した振動成分であると考えられる。このため括弧で示した。

表-1 より固有振動数の最低次数として、水平方向で 3.37Hz が得られており、この振動は対称1次振動である。全体の2次振動としては管軸方向の 3.45Hz が、3次振動としては鉛直方向の 5.20Hz の対称1次振動が得られた。

強制振動による卓越振動数は、それぞれ 3.24Hz, 3.36Hz, 5.16Hz であり、常時微動観測による各方向の1次振動数とほぼ同じ値が得られている。また水平方向では、2次の振動数が得られており 9.03Hz であった。

## (3) 減衰定数の結果

減衰自由振動によって得られた波形成分より減衰定数

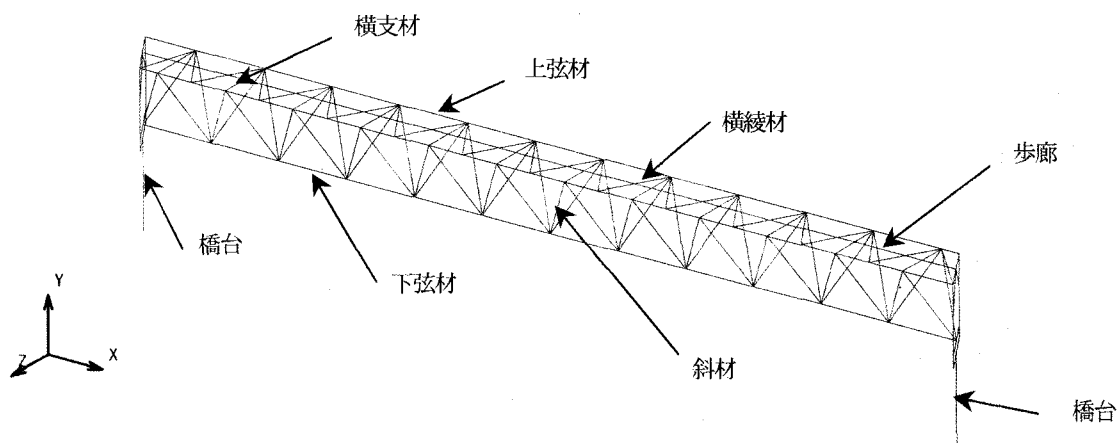


図-6 解析モデル

表-2 検討ケース

検討ケース	可動支承条件	下部剛性	基礎剛性
Case-1	可動(摩擦なし)	純断面	SRバネ
Case-2	固定	純断面	SRバネ
Case-3	固定	$EI=\infty$	剛結合

を求めた。減衰自由振動の波形を図4に示す。減衰自由振動より求めた減衰定数は  $h=0.006$  という値が得られ、道路橋の基準<sup>3)</sup>で示されている鋼構造の減衰定数 ( $h=0.02 \sim 0.03$ ) に比べて  $1/3 \sim 1/5$  程度と小さいものとなった。道路橋の基準<sup>3)</sup>で想定されている振幅よりもはるかに小さいことが減衰性能を発揮できない理由かもしれないことから、今後実験ケースを増やし更なる検討を行う必要

がある。

#### 4. 固有値解析

##### (1) 固有値解析の概要

固有値解析のモデル化においては、橋梁全体系を3次元骨組み構造とした。図6に解析モデルを示す。モデル

表-3 固有値解析結果

(a) Case-1 固有値結果

固有モード	振動数 Hz	有効質量比		
		X	Y	Z
1	3.27	0.000	0.000	0.120
2	4.12	0.012	0.066	0.000
3	6.12	0.003	0.000	0.016
4	6.70	0.453	0.004	0.000
5	7.54	0.004	0.000	0.016
6	7.98	0.445	0.000	0.006
7	8.28	0.001	0.000	0.819
8	10.70	0.005	0.001	0.000
9	11.72	0.048	0.003	0.000
10	12.44	0.011	0.000	0.001

(b) Case-2 固有値結果

固有モード	振動数 Hz	有効質量比		
		X	Y	Z
1	3.27	0.000	0.000	0.120
2	4.84	0.000	0.070	0.000
3	6.12	0.002	0.000	0.016
4	7.28	0.934	0.000	0.000
5	7.54	0.001	0.000	0.017
6	8.28	0.000	0.000	0.824
7	9.99	0.000	0.006	0.000
8	10.84	0.000	0.000	0.000
9	12.28	0.006	0.000	0.000
10	12.56	0.026	0.000	0.001

(c) Case-3 固有値結果

固有モード	振動数 Hz	有効質量比		
		X	Y	Z
1	3.36	0.000	0.000	0.758
2	5.37	0.000	0.712	0.000
3	6.20	0.004	0.006	0.004
4	10.15	0.000	0.000	0.000
5	12.05	0.358	0.000	0.003
6	12.33	0.058	0.000	0.002
7	16.87	0.134	0.000	0.070
8	18.18	0.299	0.000	0.053
9	18.58	0.116	0.000	0.001
10	23.51	0.000	0.006	0.000

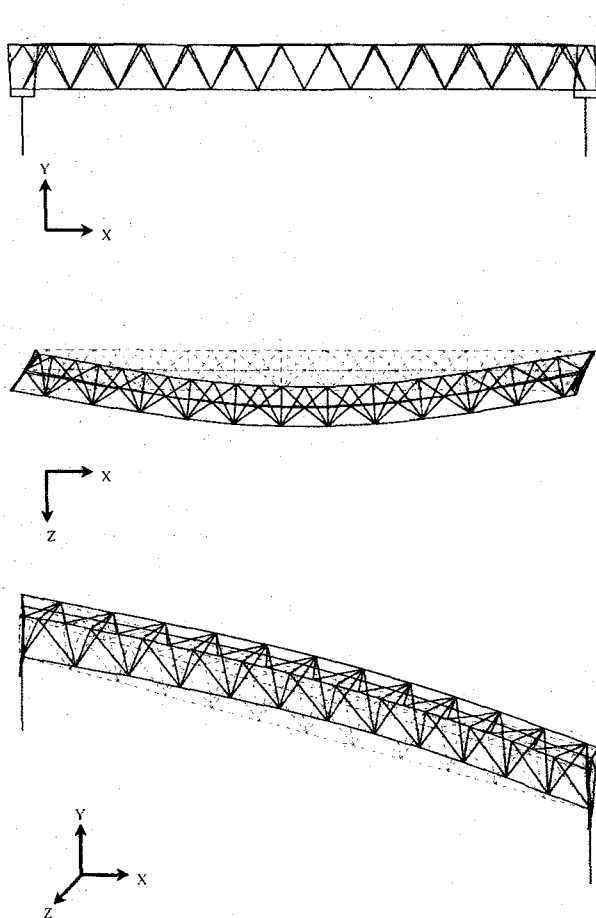


図-7 固有モード図 (水平1次モード)

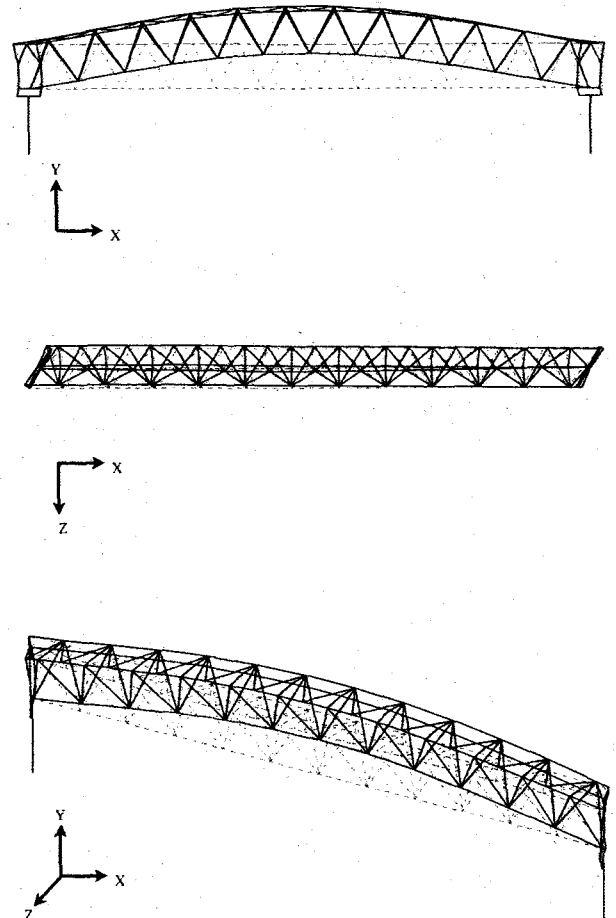


図-8 固有モード図 (鉛直1次モード)

化に当たっては、上下弦材、橋門工は梁要素、斜材、横支材、横綾材は軸力要素、可動支承部は水平バネ要素でモデル化した。また下部構造は梁要素、杭基礎はSRバネモデルとした。固有値解析はHouseholder法を用い、有効質量比が累計で100%となる30次まで求めた。また質量モデルは節点に集中質量として与え、全体座標系のXYZ方向に対して自由度を設定した。

解析ケースでは、今回の振動実験は常時微動や人力による自由振動や強制振動の比較的振幅の小さい振動を対象に実施されており、この振幅での振動特性は可動支承の境界条件や下部構造や基礎構造のモデル化が卓越振動数に与える影響が大きいことから、3つの検討ケースで数値解析を試みた。表-2に固有値解析における支承境界条件と下部工の剛性の検討ケースを示す。表-2に示す純断面とは、全断面有効の剛性を表している。なおこれらの数値解析においては、汎用プログラムDYNA2Eを使用した。

## (2) 固有値解析の結果

固有値解析の結果を表3に示す。また図-7, 8に代表的な固有モードを示す。図-7はCase-3の全体系1次モードである水平対称モードを、図-8はCase-3の全体系2次モードである鉛直対称モード図を示す。なおCase-1及びCase-2においても、図-7, 8のCase-3と同様な固有モードであった。

表3より鉛直方向(Y方向)の卓越振動数は、Case-1, 2, 3それぞれ4.12Hz, 4.84Hz, 5.37Hzであり、約30%程度の違いが確認された。これに対して水平方向(Z方向)の卓越振動数は、Case-1, 2, 3それぞれ3.27Hz, 3.27Hz, 3.36Hzであり、約3%程度の違いであった。これらの結果より、鉛直方向の振動数に大きな差が発生した要因は、可動支承の境界条件と下部工の剛性の違いによる影響と考えられる。

## (3) 振動実験と固有値解析の比較

振動実験の結果である表-1より、水平方向の卓越振動数は3.37~3.24Hz、鉛直方向の卓越振動数は5.20~5.16Hzであることが確認できる。これらの振動実験の結果と固有値解析の結果を比較すると、水平方向は概ね実験と解

析で近い値が得られているのに対し、鉛直方向ではCase-1では約26%、Case-2では約7%、Case-3では約3%となり、Case-3のみ実験値に近い結果を得ることが確認された。

## 5. まとめ

本研究では、逆三角形ワーレントラス形式水管橋に着目し、実橋による振動実験や数値解析を行った。対象とした橋梁は1橋であり、今後更なる検討の余地を残しているが、本振動実験や数値解析で得られた結果を以下に示す。

- ・ 常時微動観測、自由振動及び強制振動のような比較的微動による振動においても、水管橋の上部構造の振動特性を評価することが可能である。
- ・ 自由振動の結果、水管橋の減衰定数は一般的な鋼製の道路橋の減衰定数よりも小さいことが確認された。ただし1橋による振動実験により得られた結果であるため、今後更なる検討が必要である。
- ・ 水管橋の上部構造に着目した固有値解析では、下部構造や基礎構造の剛性、および支承の境界条件のモデル化が影響を及ぼすことが判った。

謝辞：本研究を行うにあたり金沢市企業局の今村担当課長及び鳴元主査に多大なる御協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 水管橋設計基準(耐震設計編) WSP064-97, 日本水道鋼管協会, 平成9年9月。
- 2) 水田洋司他: 水管橋の振動実験, 土木構造・材料論文集第15号, 1999.12.
- 3) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編, 平成14年3月。