

## アーチ形式水管橋の振動実験と地震応答特性

㈱千代田コンサルタント 正会員○金子英孝 九州産業大学 正会員 水田洋司  
九州産業大学大学院 学生員 矢野智雄 新日本製鐵㈱ 正会員 竹内貴司

**1. 序論：** 水管橋の代表的な形式であるランガー橋形式の水管橋(スパン 75.5m)の振動実験を実施し、それから得られる振動特性を利用して水管橋のモデル化について考え、地震応答解析を行った。振動実験では、常時微動、自由振動、強制振動の加速度波形を計測し、固有振動数や減衰定数、固有モードを求めた。次に、この橋のモデル化の妥当性について固有値解析を通して検証し、実験値と解析値との比較検討を行った。最後に、兵庫県南部地震の地震波を作用させて地震応答解析を行い、耐震性能について検討した。

**2. 振動実験：** 振動実験で得られた固有振動数、減衰定数の結果を表-1 に示している。振動振幅の違いにより固有振動数や減衰定数に違いが見られるかを検討するために、常時微動と人力加震による自由振動を計測した。常時微動は無载荷・無風状態の微小振動を、自由振動は水管橋の下横材を成人男性 2 人(体重 60kgf,65kgf)が跳躍により加震(最大 140gal 程度)した後の自由振動を計測した。また、水管橋には点検用の歩廊が設けてあり、この歩廊を人が歩行した時の卓越振動数は、成人男性 1 人(体重 65kgf)が通常歩行(約 0.60 秒/歩)した時の強制振動から検出した。減衰定数は、常時微動ではハーフパワー法、自由振動では計測した自由振動波形の振幅比を用いて算出した。

振動モードは共振時の自由振動波形の振幅比から算出し、図-1 に示している。最低次振動は鉛直逆対称 1 次振動モード、2次は面外水平対称 1 次振動モード、3次は鉛直対称 1 次振動モードとなっている。鉛直振動次数の逆転は、アーチ橋特有の性質であり、水管橋でも同様のことが確認された。人力加震によって得られた自由振動の最大加速度は、鉛直方向加震で 140gal 程度、面外水平方向加震で 15gal 程度であった。なお、面外水平方向の振動は、人が橋軸直角方向に瞬時に移動することにより発生させた。

**3. 固有値解析：** 解析モデルは三次元骨組み構造モデルとし、水管内が満水状態であることを前提としている。歩廊は、部材の接合状況から、2 段ある歩廊の手すりのうち、最上段の手すりを考慮せず、中段の手すりまでの断面 2 次モーメントおよび断面面積から、剛性を評価した。なお、解析に用いたソフトは TDAP III(アーク情報システム製)である。

表-2 に解析結果を、図-2～図-4 にモード図を示している。表-2 中の刺激係数、有効質量比は、X(橋軸方向)、Y(鉛直方向)、Z(面外水平方向)の各方向に地震力を入力した場合の値である。

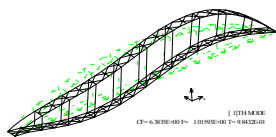


図-2 1次モード

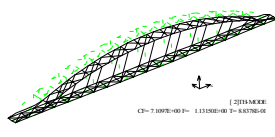


図-3 2次モード

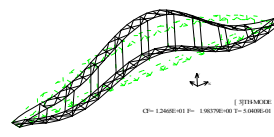


図-4 3次モード

表-1 固有振動数および減衰定数

方向	常時微動		自由振動		強制振動 歩行時の卓越 振動数(Hz)
	振動数 (Hz)	減衰定数	振動数 (Hz)	減衰定数	
鉛直振動	1.01	0.007	1.00	0.007	1.69
	1.53	0.006	1.54	0.006	2.49
	2.34	0.003	—	—	8.65
	2.50	0.003	2.49	—	
	2.83	0.002	—	—	
	3.96	0.001	—	—	
面外水平 振動	4.69	0.002	4.69	—	
	1.28	0.006	1.27	—	2.35
	2.34	0.003	2.34	0.005	8.68
	2.83	0.004	—	—	
	3.97	0.002	3.91	0.002	
橋軸 振動	4.82	0.002	—	—	
	1.01	—	—	—	2.27
	2.34	0.003	—	—	8.63
	7.50	0.001	—	—	

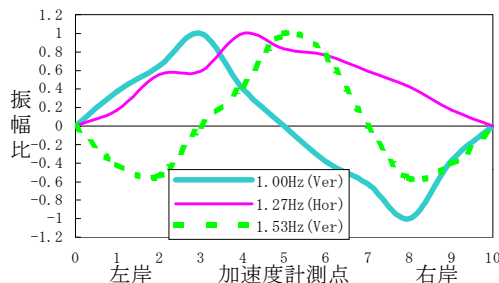


図-1 自由振動から得られた固有モード

表-2 固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	刺激係数 (上段)		
		有効質量比(%) (下段)		
		X	Y	Z
1	1.02	0.0291	-0.0001	0.0000
		2	0	0
2	1.13	0.0000	0.0000	-0.1307
		2	0	34

キーワード：水管橋、振動実験、固有値解析、地震応答解析  
連絡先：〒813-0004 福岡市東区松香台 2-3-1 Tel.092-673-5671

**4. 地震応答解析：** 地震波入力による応答特性を得るため、Newmark  $\beta$  法( $\beta = 0.25$ )を用いて時刻歴応答解析を行った。利用した解析ソフトは固有値解析で使用したTDAPⅢである。減衰はレーリー減衰と仮定し、減衰マトリックス作成時の係数決定には振動実験結果を利用した。解析に用いた地震波<sup>(1)</sup>は、兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台地盤上(I種地盤)で観測された地震波の振幅調整波である。N-S波(ACCmax;812gal)を面外水平方向に、E-W波(ACCmax;766gal)を橋軸方向に等倍で入力した。また、鉛直方向にはN-S波の1/2の振幅を持つように振幅調整されたU-D波(ACCmax;406gal)を入力した。なお、本水管橋(架設地はI種地盤)は左右対称なモデルのため、L/4点とL/2点に着目して解析を行い、材料非線形は考慮していない。地震波を各方向に個別入力した場合と、3方向同時入力した場合の最大応答について比較した。ただし、ここで用いている値は解析を行ったときの最大応答値であるため、同一時刻での比較ではない。

(1)変位：L/2点に最大値が発生している。面外水平方向加震により、面外水平方向に約60cmの変位が生じる。3方向同時加震では、それぞれ個別加震時の最大値が生じている(図-5)。

(2)加速度：L/4点で最大値が発生している。橋軸方向加震で、橋軸方向に最大軸力が生じている。3方向同時加震では、個別加震時の最大値が生じている(図-6)。

(3)モーメント：L/4点で最大値が発生し、橋軸方向加震時に鉛直方向に最大曲げモーメントが生じている。しかし、この値は降伏モーメントを越えていない(図-7)。

(4)軸力：軸力の大きさは、L/4点、L/2点で同じであり、橋軸方向加震時に最大値が生じている(図-8)。

(5)支点反力：橋軸・3方向加震時に、拘束支点の橋軸方向反力が設計値を越えている(図-9)。

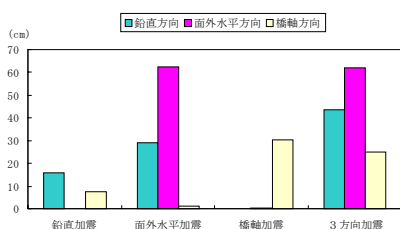


図-5 L/2点の変位

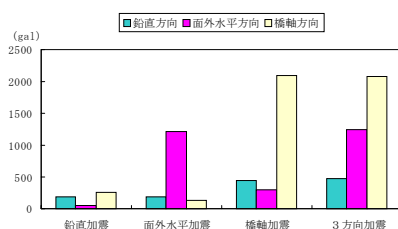


図-6 L/4点の加速度

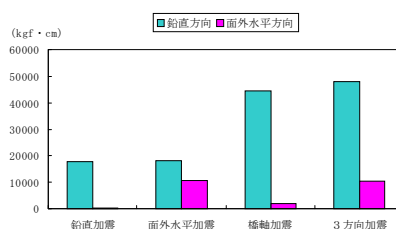


図-7 L/4点の曲げモーメント

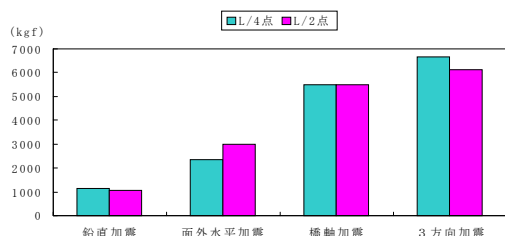


図-8 軸力

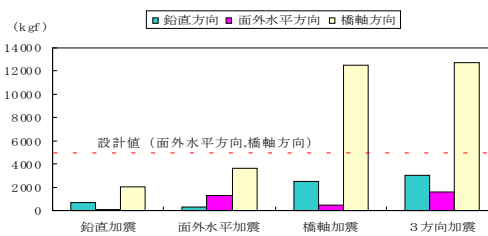


図-9 拘束支点の反力

**5. 結論：** 振動実験および弾性地震応答解析で得られた知見を、箇条書きにまとめて結論とする。

(1)固有モード形状から、アーチ効果が確認できた。(2)減衰定数は鉛直固有振動数1.00Hzで0.007、1.53Hzで0.006、面外水平固有振動数1.28Hzで0.006と小さい。(3)水管橋のように主構のみで構成される構造物の解析では、歩廊のような付属物の剛性が振動特性に及ぼす影響は大きい。(4)大きな応答加速度が発生しているのは、低減衰に起因していると考えられる<sup>(2)</sup>。(5)橋軸方向加震によって大きな軸力が生じ、拘束支点の橋軸方向反力は設計値を越えている。(6)本水管橋は旧示方書<sup>(3)</sup>に準拠して設計されているが、拘束支点の反力を除いて、タイプⅡの地震動にも十分耐えうる事が判った。

参考文献

(1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説(V.耐震設計編)，1996年12月。

(2) 竹内貴司他：三角トラス・ランガー形式水管橋の地震時動的挙動，構造工学論文集 Vol.46A，pp.997~1004，2000年3月。

(3) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1980年。