

斜張形式水管橋の非線形動的挙動

竹内 貴司¹ ・ 川口 周作² ・ 大塚 久哲³ ・ 水田 洋司⁴

¹ 正会員 工修 新日本製鐵㈱ 水道施設部 (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

² 正会員 新日本製鐵㈱ 水道施設部 (同 上)

³ フェロー 工博 九州大学大学院 工学研究科 教授 (〒812-0053 福岡市東区箱崎 6-10-1)

⁴ 正会員 工博 九州産業大学 工学部 土木工学科 教授 (〒813-0004 福岡市東区松香台 2-3-1)

兵庫県南部地震後、水道施設耐震基準が改定され、兵庫県南部地震相当の大きな地震動を考慮することになったが、大きな地震動に対する水管橋の動的挙動についてはほとんど報告されておらず、動的解析の適用方法、評価方法については十分に検討されていないのが実態である。

本論文では、兵庫県南部地震以前に設計・施工された2つの斜張形式水管橋の振動実験によって求められた固有振動特性(振動数と振動モード)と減衰定数の結果と、その結果を踏まえて行った非線形動的解析の結果について報告するものである。

Key Words : Aqueduct, Non-linear Dynamic analysis, Lifeline, Dynamic Characteristics, Damping Ratio

1. はじめに

平成9年に改訂された水道施設耐震工法指針・解説¹⁾(以下、水道耐震指針)は、平成8年に改訂された道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編²⁾(以下、道示Ⅴ)と同様に、斜張橋のように地震時の挙動が複雑な形式の水管橋については、動的解析により照査を行なうように規定されている。

しかし、水管橋の動的解析事例はほとんどなく、大地震に対する動的挙動について不明な点が多い。そこで、著者らは、水管橋の三角トラス形式、ランガー形式水管橋の非線形動的挙動の検討を行ってきた³⁾。

本稿では、引き続き検討を進めている2つの斜張形式水管橋の振動実験結果、その結果を踏まえた非線形動的解析結果および今後の設計上の課題について報告する。

2. 水管橋の振動実験

水管橋の振動特性に関する報告^{4), 5)}は少なく、水管橋の耐震設計に必要な減衰定数は、道路橋示方書に掲載されている値を用いているのが現状である。

しかしながら、水管橋は道路橋と比較し、①死荷重(鋼重 700~900kgf/m 程度)が軽い、②水管橋の主桁間隔が狭い(2~3m程度)、③橋軸直角方向(面外)の剛性が低い、等の構造特性の違いがあるため、道路橋

とは振動特性が異なるものと思われる。そのため、実際の斜張形式水管橋の振動実験を行い、振動特性を把握することとした。振動実験を行った水管橋を図-1、2に示す。A水管橋は、スパン80mの4弦ワーレントラス補剛斜張橋である。B水管橋は、スパン 46.8m+66.3mの2径間4弦ワーレントラス補剛斜張橋である。

振動実験は、常時微動、歩行による強制振動(40gal程度)、および屈伸、跳躍による加振(10~60gal)後の自由振動の観測を行った。測定された加速度波形の例を図-3に示す。検出された常時微動、自由振動の速度波形から、高速フーリエ変換法(FFT)、または最大エントロピー法(MEM)により固有振動数を求めた。

A水管橋においては、上部工の面内鉛直、面外水平振動数がほぼ同じで、1次がそれぞれ 1.71、1.64Hz、2次がそれぞれ 4.15Hz、3.91Hzである。橋台の橋軸方向振動数は上部工の最低次数とほぼ同じ値(1.76Hz)が得られた。橋台鉛直方向振動数は、0.46Hz と小さな振動数が得られた。これは、橋台を支えている基礎の振動数と考えられる。

B水管橋においては、1次と2次の振動数がそれぞれ、1.00Hz、1.31Hz の面内鉛直振動、3次が 1.77Hz の面外水平、4次が 2.10Hz の橋軸水平振動が得られた。橋台、橋脚の橋軸方向振動数は、上部工と同じ 2.10Hz が得られ、鉛直方向振動数は、0.41Hz が得られた。

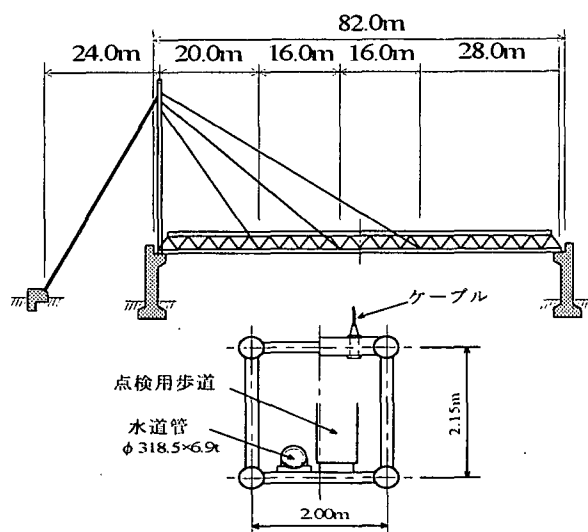


図-1 単径間斜張形式水管橋 (A水管橋)

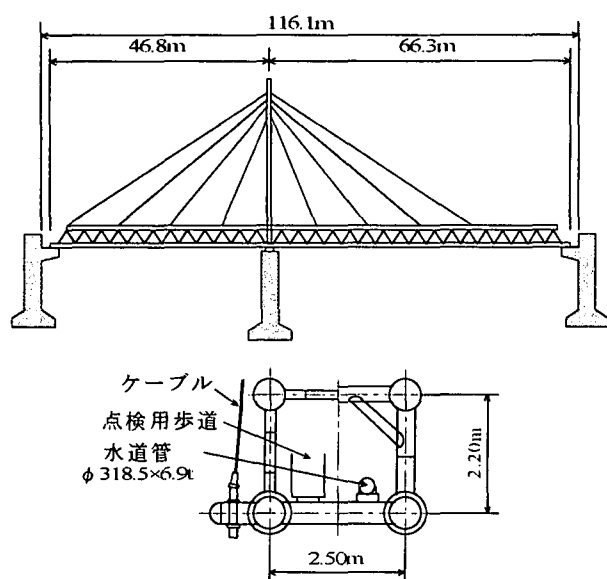


図-2 2径間連続斜張形式水管橋 (B水管橋)



図-3 強制振動による加速度波形

減衰定数は、共振振動後の自由振動波形の振幅比から求める方法と常時微動波形のFFTやMEMから得られるパワースペクトルにハーフパワー法を適用する2つの方法で求めた。A、B水管橋の減衰定数は、それぞれ0.008、0.007が得られた。また、両方法で得られた減衰定数がほぼ一致していることも確認した。これらの減衰定数は、道路橋で用いられている値の1/3～1/

4程度である。低減衰の理由は、水管橋が全て溶接構造でできており、減衰を促進させるような遊びの構造となっていないからと考えられる。

3. 解析モデル

表-1に解析に用いた諸元を示す。

表-1 解析諸元

	単径間斜張橋 (A水管橋)	二径間連続斜張橋 (B水管橋)
主桁構造 (鋼管構造)	3次元骨組 多質点系モデル バイリニアモデル	
主塔構造 (鋼製BOX)	3次元骨組 多質点系モデル バイリニアモデル	
下部構造	橋台:線形モデル アンカレッジ:線形モデル 杭基礎:バネ	橋台:線形モデル 橋脚:線形モデル 杭基礎:バネ
付属品	沓(固定・可動)、伸縮可撓管	
地盤	II種地盤 ($T_c=0.25$)	I種地盤 ($T_c=0.17$)
入力地震波 修正標準波形	JR 鷹取駅N-S, E-W (max:687gal)	JMA 神戸N-S, E-W (max:812gal)
数値積分	Newmark ($\beta=1/4$)、時間刻み0.002秒	
減衰定数	上部構造:0.002、下部構造:0.002 地盤:0.2	

上部構造と下部構造については実測結果を参考に減衰定数を採用し、地盤の減衰定数は道示Vの参考値を採用した。上部構造の復元力特性は完全弾塑性型のバイリニアモデルとした。

入力地震動は、兵庫県南部地震で観測された記録を用いた。架橋地点の地盤特性を反映させるために、A水管橋にはII種地盤のJR鷹取駅の地震記録(NS成分の最大加速度687gal、EW成分の最大加速度672gal)、B水管橋にはI種地盤のJMA神戸気象台の地震記録(NS成分の最大加速度818gal、EW成分の最大加速度617gal)を用いた。地震波は、橋軸方向または橋軸直角方向にそれぞれNS成分、またはEW成分の一波を入力した。すなわち、それぞれの水管橋に対して、4ケースの解析を行った。データ間隔は0.02秒、振動時間は20秒である。

なお、A、B水管橋は、旧水道耐震に基づいて設計されており、水平荷重は地震荷重($K_h=0.24$)より大きな風荷重が採用されている。A水管橋の風荷重を水平震度で表すと $K_h=0.35$ 相当になる。A水管橋は、雪荷重が考慮されており、積雪にも風荷重を受けることとして設計されている。この場合の風荷重は、水平震度相当で $K_h=0.69$ となる。同様にB水管橋の風荷重は $K_h=0.46$ および積雪を考慮した風荷重は $K_h=0.93$ となる。

表-2 解析結果(A水管橋)

		単径間斜張橋 (A水管橋)	
		橋軸方向入力	面外方向入力
固有振動数	解析値	1.591 Hz	1.441 Hz
	実測値	1.761 Hz	1.641 Hz
	モード	対称	対称
最大応答加速度		7,212 gal	8,142 gal
断面力	上弦材	弾性域	弾性域
	下弦材	弾性域	塑性域
	主塔	弾性域	弾性域
変位	橋台 (左岸側)	FIX	FIX
	橋台 (右岸側)	115mm >50mm ^{*1} =115mm ^{*2}	21mm <50mm ^{*1} <115mm ^{*2}
沓反力 (FIX側)	鉛直	5.4tf>2.5tf ^{*1}	44.5tf>2.5tf ^{*1}
	橋軸	53.5tf>6.0tf ^{*1}	480.6tf>6.0tf ^{*1}
	面外	0.5tf<15.3tf ^{*1}	68.0tf>15.3tf ^{*1}

表-3 解析結果(B水管橋)

		二径間連続斜張橋 (B水管橋)	
		橋軸方向入力	面外方向入力
固有振動数	解析値	2.10 Hz	1.66 Hz
	実測値	2.10 Hz	1.77 Hz
	モード	逆対称	逆対称
最大応答加速度		13,679 gal	9,730 gal
断面力	上弦材	弾性域	弾性域
	下弦材	弾性域	塑性域
	主塔	塑性域	塑性域
変位	橋台 (左岸側)	263mm >55mm ^{*1} >115mm ^{*2}	7mm <55mm ^{*1} <115mm ^{*2}
	橋脚	FIX	FIX
	橋台 (右岸側)	259mm >55mm ^{*1} >115mm ^{*2}	19mm <55mm ^{*1} <115mm ^{*2}
沓反力 (FIX側)	鉛直	9.0tf>2.4tf ^{*1}	25.8tf>2.4tf ^{*1}
	橋軸	199.5tf>23.0tf ^{*1}	384.3tf>23.0tf ^{*1}
	面外	5.0tf<25.3tf ^{*1}	80.7tf>25.3tf ^{*1}

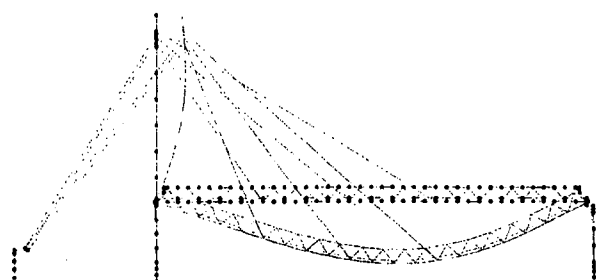


図-4 A水管橋の振動モード(橋軸方向)

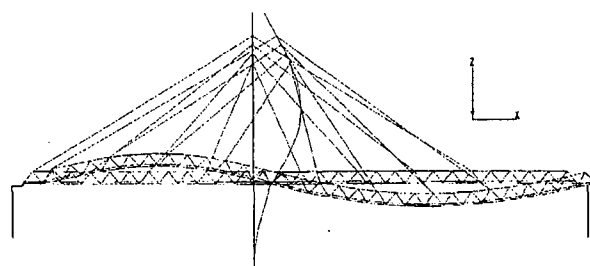


図-5 B水管橋の振動モード(橋軸方向)

4. 解析結果及び考察

解析結果を表-2、3に示す。なお、表中のアンダーラインは最大応答値、*1は沓の許容値、*2は伸縮可撓管の許容値を示している。

(1) 振動モード

橋軸方向の振動モードを図-4、5に示す。卓越振動モードは、A水管橋が対称、B水管橋が逆対称モードであった。なお、解析による固有振動数は、実験値と良く一致しており、解析モデルの妥当性を確認することができた。

(2) 応答加速度

A、B水管橋ともに最大応答加速度は、主塔の中間点で発生しており、応答倍率は8～18倍程度となった。応答加速度が大きくなった原因を推定するために、主塔部のみを取り上げ、解析実験を行なってみた。まず、

重量を10倍に増し道路橋並とすると、応答加速度は3,766gal、さらに減衰定数を10倍にし道示Vの参考値並とすると応答加速度は1,548galに減少することが分かった。このように、水管橋の特徴である軽い重量、小さな減衰定数が大きな応答の原因と思われる。

(3) 断面力

断面力は、両水管橋とも地震波を面外方向に入力した場合に、支承部に結合されている下弦材および綾材が塑性化している。B水管橋は、橋軸、橋軸直角のいずれの方向に地震波を入力しても主塔が塑性化している。主塔の塑性化部分は上記の最大応答加速度を発生している部分である。

(4) 応答変位

変位は、両水管橋とも地震波を橋軸方向に入力した場合に可動沓の許容変位を超えている。B水管橋は伸

縮可撓管の許容変位量も超えている。旧水道耐震指針で設計された水管橋の伸縮可撓管は、水管橋の温度伸縮を吸収する目的で設置されており、大きな地震動に対して、機能上の弱点となることが多い。

なお、今回の解析モデルでは可動沓は無限変位のローラーヒンジでモデル化されている。今後は沓部の遊間および落橋防止構造を考慮した解析モデルの検討を行い、通水機能を確保するための耐震補強上のポイントを見出していく必要がある。

(5) 沓反力

固定端である沓の反力は、ほとんどのケースにおいて旧設計基準で設計された許容値を大幅に越えている。特に、地震波を面外方向に入力した場合の橋軸方向の発生反力は、許容値の16倍～80倍と非常に大きな値となっている。この結果は、著者らが検討したランガー形式、トラス形式の水管橋³⁾にも同様な傾向が見られている。旧設計基準で設計された水管橋の耐震性の判断をする際の重要なポイントであると思われる。さらに、これらの部位の反力を低減させる対策を早急に講じる必要もあると思われる。

また、既設の耐震補強の観点からは、沓部の破壊を前提とした落橋防止構造の設置も必要であり、沓部の破壊機構と落橋防止構造の作用状況をチェックする検討も必要である。さらに、沓部に免震作用を持たせることにより、下弦材等の部材の塑性化が防止できるかについても合わせて検討していく必要がある。

5. 結 論

今回、2つの斜張形式水管橋の振動実験結果と、その結果を踏まえた上下部一体構造系の非線形動的解析を実施し、それらの結果を報告した。

本研究の成果をまとめると以下の通りである。

- ①斜張形式の水管橋の減衰定数は、今回の振動実験結果によれば0.007～0.008であり、道示Vの参考値の1/3～1/4程度であることが分かった。
- ②斜張形式水管橋の主塔の応答加速度倍率は8～18倍と非常に大きな値を示した。これは、水管橋が軽荷重、低減衰であることが影響していると考えられる。
- ③A、B水管橋ともに、地震波が面外方向に入力された場合に、固定沓付近の下弦材が塑性化している。固定沓の反力も旧設計基準の許容値(すなわち、静的解析結果)と大きく異なっている。沓部の破壊を前提とした耐震補強方法や免震沓の適用を考慮しながら、より詳細な動的挙動の検討が必要である。
- ⑤旧設計基準で設計された水管橋の伸縮可撓管は、地震時変位を許容できない場合が多い。今後、どのように既設水管橋の耐震補強をすべきかを検討していく必

要がある。

水管橋の非線形動的解析事例は少なく、動的特性については不明な点が多い。今後はさらに種々の形式の動的解析事例を増やしていき、工学的な知見を蓄積することによって、動的耐震設計法と静的耐震設計法(震度法、地震時保有水平耐力法)の適用範囲を明確にし、合理的な水管橋の耐震設計法を検討していきたい。

なお、本解析は(社)土木学会西部支部「中径間橋梁の耐震性向上に関する研究」委員会(委員長 九州大学大学院 大塚久哲 教授)の活動の一部として行なった。

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, 平成8年12月
- 2) (社)日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説, 1997年3月
- 3) 神崎、竹内、川口、大塚、水田、野中:水管橋の非線形動的解析、第2回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp169-174, 1998年12月
- 4) 小坪、鳥野、高西:福岡市における水管橋の耐震性について、九州橋梁・構造工学研究会分科会報告書, pp1-29, 1990年3月
- 5) 白地、水田、竹内、川口:振動計測で得られた水管橋の振動特性について、土木学会西部支部講演概要集, pp.144～145, 1999年3月