

鮎の瀬大橋の振動特性と地震応答特性

九州産業大学工学部

住友建設株式会社

熊本県農政部農地建設課

コーアツ工業株式会社

水田洋司

正会員

○

瓜生正樹

永木卓美

山田顕彦

1. 序論

鮎の瀬大橋は、熊本県上益城郡矢部町に建設された橋長390mのPC斜張橋で、1999年8月に完成した橋梁¹⁾である。構造は、Y型橋脚を有するラーメン桁橋と高さ70mのA形主塔を有するPC斜張橋とから構成され、「剛」と「柔」との複合という特異な形式が採用されている。その結果、構造形式が、著しく非対称となり、動的挙動は、従来の斜張橋やラーメン橋の橋梁とは異なる特異な挙動を呈することが予想された。よって、振動特性の把握と耐震設計時に得られた固有振動数、減衰定数等の振動定数の検証を目的に実証振動実験²⁾を実施した。当論文は、その実験結果から解析のモデル化、地震応答特性について検討し、また、兵庫県南部地震で得られた地震波³⁾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結果について述べるものである。なお、実証振動実験の詳細については、第9回のPCシンポジウム⁴⁾にて発表済みであり、ここでは割愛する。表-1に鮎の瀬大橋の諸元、図-1に一般図を示す。

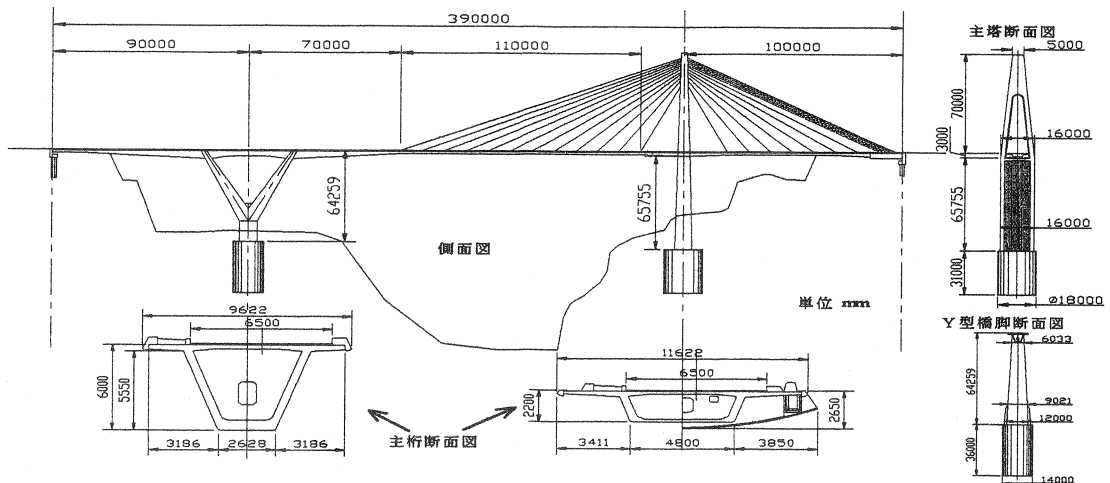


図-1 一般図

2. 振動実験

実証振動実験は、常時微動の計測、大型起振機(独法)土木研究所所有の2不平衡重錘並列配置同期反転方式118KN起振機)によるスイープ試験、自由振動実験を実施し、橋軸方向、鉛直方向と面外水平方向の3方向について計測した。表-2に固有振動数と減衰定数についての実験結果を示す。固有振動数については、常時微動の測定結果と起振機実験との結果が良く一致していることがわかる。減衰定数につ

表-1 諸元

所在地	熊本県上益城郡矢部町大字管
橋種	プレストレストコンクリート道路橋
橋格	1等橋 (TL-20)
道路規模	3種4級
橋長	390.0m
支間	(右岸)89.25m+200.00m+99.25m(左岸)
有効幅員	8.00m(車道6.50m,歩道1.50m)
主塔	70.00m(橋面から塔頂まで)
構造形式	Y型ラーメン桁橋を有する2径間連続斜張橋
主桁形式	1室PC箱桁
斜材形式	ファン形2面吊り
総重量	322165KN

いては、概ね0.5%~1.2%の値が得られ、固有振動数と同様に常時微動の計測結果と起振機実験の結果とがよく一致している。しかし、設計時に設定された値3.0%~5.0%より、小さめの結果が得られた。また、ねじり振動については、常時微動で0.5Hzから2.0Hzまで、0.02Hz間隔で橋面両端の波形記録が逆位相となる場合を調べたが、ねじりの存在は確認できなかった。

表-2 実験結果

振動の種類	常時微動		起振機試験		解析値	
	振動数 (Hz)	減衰定数	振動数 (Hz)	減衰定数	振動数 (Hz)	
鉛直	1次	0.60	0.012	0.58	0.50	
	2次	0.65		0.63	0.57	
	3次	1.17	0.005	1.15	1.04	
	4次	1.39		1.39	1.23	
	5次	1.82	0.005	1.90	1.54	
面外水平	1次			0.64		
	2次	0.67	0.013	0.68	0.60	
	3次	0.77	0.011	0.78	0.73	
	4次	1.10	0.007	1.12	1.07	
	5次			1.68	0.008	1.45
	6次	1.86	0.005	1.86		
橋軸	1次			0.68		
	2次			0.80		
	3次			0.96		
	4次			1.06		

3. 固有値解析

完成系の解析モデルを図-2に示すように設定し、3次元立体解析による固有値解析 (TDAPⅢ) を行い、実測値と解析値との比較を行った。解析モデルについては、3次元梁要素を用いたものであるが、桁、主塔、橋脚については、梁要素として何ら問題はないが、ケーブルについても同様に張力を受ける3次元梁要素として剛性と質量を評価している。従って、圧縮力にも抵抗する形でモデル化されているが、ケーブルには引張力(598KN~2254KN)が作用されており、微小振動ではケーブルに圧縮力が作用することはないと考えられる。支点の拘束条件は、節点1, 81は、鉛直方向 (Y方向)、面外水平方向 (Z方向)、X軸回り回転、Y軸回り回転を拘束し、節点122, 234については、全方向、全軸回り回転を拘束している。

図-3は、解析で得られた固有モードに実測値をプロットしたものであり、解析値と実測値がよく一致している。表-2で、実験値と解析値の固有振動数を比較してみると、固有振動数は、実験値の方が、解析値よりも全体的に高い値を示している。この原因としては、実験時と解析時の微妙な構造系の差違によるものと考えられる。つまり、解析モデルは橋面工 (舗装、歩道、地覆、高欄) の質量を考慮しているのに対し、実験時には橋面工の施工途中で地覆のみ施工完了の状態であった。構造系の質量が軽くなると固有振動数は高くなり、剛性が増すと高くなるため、実験値では解析値より高めの振動数が得られたものと推定される。よって、完成系のモデル化は、妥当と考えられ、以下の地震応答解析を進める。

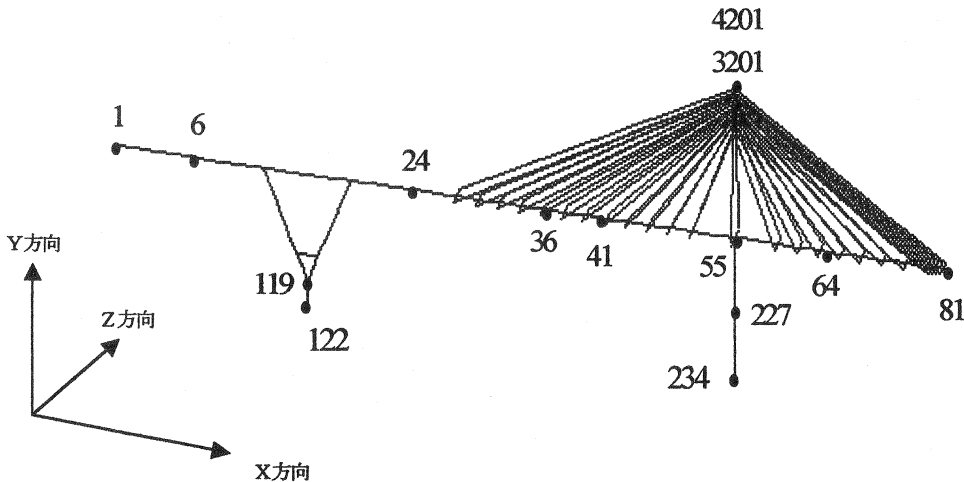
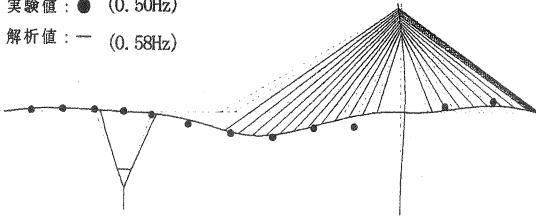
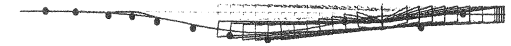


図-2 解析モデル

実験値：● (0.50Hz)
解析値：— (0.58Hz)



(a) 鉛直1次振動モード



実験値：● (0.60Hz)
解析値：— (0.64Hz)

(b) 面外水平1次モード

図-3 振動モード

4. 地震応答解析

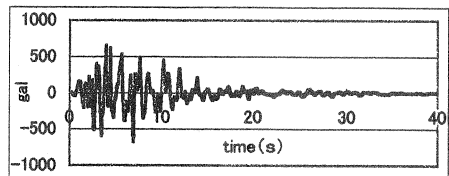
4-1. 地震波

入力する地震波には、兵庫県南部地震でJR西日本鷹取駅構内地盤上(Ⅱ種地盤)で記録されたものを用いた。この地震波は、Ⅱ種地盤の応答スペクトルに一致するように振幅調整されたものである。橋軸方向には、図-4(a)に示すJR西日本鷹取駅構内地盤上E-W波を入力した。鉛直方向には、標準波形であるJR西日本鷹取駅構内地盤上N-S波の最大振幅の半分となるように振幅調整された波形(図-4(b)のU-D波)を入力した。面外水平方向には、図-4(c)のN-S波を入力した。また、三方向同時入力した時の応答についても計算している。表-3には、入力地震波の最大加速度とスペクトル解析で得られた卓越振動数を示している。

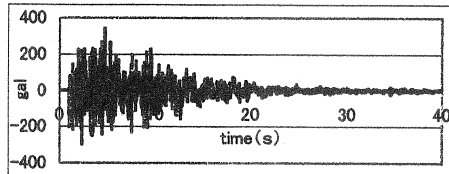
4-2. 解析結果

(1) 橋軸方向加振

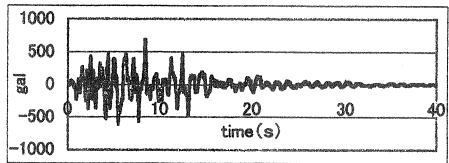
表-4に各方向における各節点の最大応答値を示した。橋軸方向(X方向)、鉛直方向(Y方向)の応答変位及び加速度が卓越し、断面力は、軸力、面内曲げモーメント(Z軸曲げ)が卓越している。面外方向(Z軸曲げ)については、変位、加速度ともほとんど応答しておらず、ねじりの発生も認められなかった。Y型ラーメン桁橋、斜張橋の主桁では、100cm前後の変位量で、橋軸(X方向)、鉛直(Y方向)の両方向で生じ、加速度についても400gal以上の高い応答値が両方向に発生する。Y型ラーメン桁橋部と斜張橋部の変位と加速度は、同等の値を示



(a) JR西日本鷹取駅構内地盤上E-W波



(b) JR西日本鷹取駅構内地盤上U-D波



(c) JR西日本鷹取駅構内地盤上N-S波

図-4 入力地震波

表-3 地震波

入力方向	地震波形	時間間隔(s)	最大加速度(gal)	主な卓越振動数 (Hz)		
橋軸	JR西日本鷹取駅構内地盤上E-W波	0.01	673	0.64	0.93	1.12
鉛直	JR西日本鷹取駅構内地盤上U-D波	0.01	343	0.44	0.54	0.93
面外水平	JR西日本鷹取駅構内地盤上N-S波	0.01	687	0.64	0.93	0.98

すが、面内曲げモーメント (Z軸曲げ) については、剛性の高いラーメン橋の方が斜張橋部の約3倍程のモーメントが発生する。ラーメン桁橋部と斜張橋部との結合点 (節点 24) では、橋軸方向 (X方向) に 842gal の加速度が生じ、面内方向に 6137KN・mの曲げモーメント (Z軸曲) が発生する。この値は、ラーメン橋部の 18%程高めの値であるが、剛構造と柔構造との結合点に大きな負担は生じないと考えられる。橋脚部については、Y橋脚、斜張橋橋脚とも面外方向 (Y方向) への変位、加速度の応答は小さく、橋軸方向 (X方向) が支配的である。面内方向曲げモーメント (Z軸曲げ) については、主桁部に比べ、2~5倍の応答値が発生する。主塔については、頂部で橋軸方向に 276cmの変位が発生し、1800gal 以上の加速度が発生する。

(2) 鉛直方向加振

橋軸方向加振時と同様に橋軸方向 (X方向)、鉛直方向 (Y方向) の変位、加速度が卓越し、断面力についても軸力、面内曲げモーメント (Z軸曲) が卓越する。しかし、変位量としては、橋軸方向加振時よりもX方向については、1/10、Y方向については、1/2~1/3程の低い値が得られている。加速度についても、X方向で1/3~1/9、Y方向で1/2~1/3と言う結果である。よって、橋軸方向、鉛直方向の加振では、橋軸方向

表-4 最大応答値

項目	節点 方向	Yラーメン主桁		斜張橋主桁				Y橋脚	斜張脚	主塔			
		06	24	36	41	55	64	119	227	3201	4201		
橋軸方向加振	応答変位	X変位(cm)	144	131	152	145	129	147	37	98	276	276	
		Y変位(cm)	180	90	101	160	4	36	3	3	7	7	
		Z変位(cm)	4.10E-10	8.81E-11	1.64E-10	3.54E-10	1.07E-10	1.23E-09	2.18E-11	3.85E-11	1.13E-02	1.13E-02	
	応答加速度	X加速度(gal)	444	842	890	409	406	841	568	534	1885	1895	
		Y加速度(gal)	839	850	618	574	55	488	108	74	94	94	
		Z加速度(gal)	4.52E-10	4.98E-10	4.79E-10	6.19E-10	1.38E-10	4.90E-10	-	-	-	-	
	断面力	軸力(KN)	3151	2503	1826	2520	2369	1791	8847	1402	26	26	
		ねじり(KN・m)	1.38E-09	7.35E-09	4.46E-09	5.70E-09	9.24E-09	6.66E-09	2.72E-09	4.90E-08	1	1	
		Y軸曲(KN・m)	1.23E-08	1.11E-08	2.58E-08	2.83E-08	1.21E-08	1.48E-08	3.36E-08	2.79E-08	0.181	0.204	
		Z軸曲(KN・m)	5196	6137	2375	3427	4301	1945	10834	27097	39	39	
	鉛直方向加振	応答変位	X変位(cm)	13	14	14	18	8	10	4	5	38	38
			Y変位(cm)	43	38	108	63	15	49	3	12	34	34
Z変位(cm)			2.78E-11	1.03E-10	9.63E-11	7.84E-11	2.23E-11	4.23E-11	5.00E-12	7.29E-12	8.01E-02	8.01E-02	
応答加速度		X加速度(gal)	158	162	154	117	54	73	-	-	-	-	
		Y加速度(gal)	303	230	244	279	220	292	-	-	-	-	
		Z加速度(gal)	4.14E-11	8.03E-11	7.43E-11	9.07E-11	3.63E-11	1.09E-10	-	-	-	-	
断面力		軸力(KN)	971	585	459	473	371	200	2536	4609	94	94	
		ねじり(KN・m)	5.04E-10	1.60E-09	3.20E-09	2.93E-09	6.48E-09	5.01E-09	9.90E-10	4.90E-09	0.112	0.098	
		Y軸曲(KN・m)	1.28E-09	2.02E-09	2.23E-09	3.38E-09	4.90E-09	2.68E-09	3.37E-09	1.98E-08	4.555	4.309	
		Z軸曲(KN・m)	2221	1741	1282	1446	3640	1059	1346	2809	2	2	
面外水平方向加振		応答変位	X変位(cm)	7.87E-10	8.87E-10	8.18E-10	7.74E-10	6.87E-10	6.15E-10	4.38E-11	1.27E-10	7.58E+00	6.74E+00
			Y変位(cm)	5.08E-10	1.41E-09	1.53E-10	1.01E-12	6.43E-12	5.53E-10	3.28E-12	3.95E-12	16.9	16.2
	Z変位(cm)		88	146	191	168	108	123	34	55	250	250	
	応答加速度	X加速度(gal)	2.28E-10	3.53E-10	2.78E-10	3.04E-10	1.49E-10	2.36E-10	-	-	-	-	
		Y加速度(gal)	3.41E-10	4.92E-10	4.81E-10	4.44E-10	5.12E-11	5.48E-10	-	-	-	-	
		Z加速度(gal)	773	891	612	409	541	1300	600	522	1879	1801	
	断面力	軸力(KN)	3E-09	1E-09	3E-09	4E-09	3E-08	4E-09	7E-09	3E-07	137	190	
		ねじり(KN・m)	6255	3168	1499	1613	2369	890	4145	12330	30	30	
		Y軸曲(KN・m)	5898	8218	9555	77	25990	14316	21151	110740	266	266	
		Z軸曲(KN・m)	4	2E-08	4E-09	5E-09	2E-08	6E-09	4E-09	1E-09	2	2	
	3方向同時加振	応答変位	X変位(cm)	144	131	152	145	129	147	37	98	276	276
			Y変位(cm)	180	90	108	160	15	49	3	12	34	34
Z変位(cm)			8.80E+01	1.46E+02	1.91E+02	1.68E+02	1.08E+02	1.23E+02	3.40E+01	5.59E+01	250	250	
応答加速度		X加速度(gal)	501	807	770	462	418	664	-	-	-	-	
		Y加速度(gal)	1001	646	786	751	224	590	-	-	-	-	
		Z加速度(gal)	786	687	618	429	537	1301	-	-	-	-	
断面力		軸力(KN)	3E+03	3E+03	2E+03	3E+03	2E+03	2E+03	7E+03	5E+03	137	190	
		ねじり(KN・m)	6255	3168	1499	1613	2369	890	4145	12330	30	30	
		Y軸曲(KN・m)	5898	8218	9555	77	25990	14316	21151	110740	266	266	
		Z軸曲(KN・m)	5196	6E+03	2E+03	3E+03	4E+03	2E+03	1E+04	3E+04	39	39	

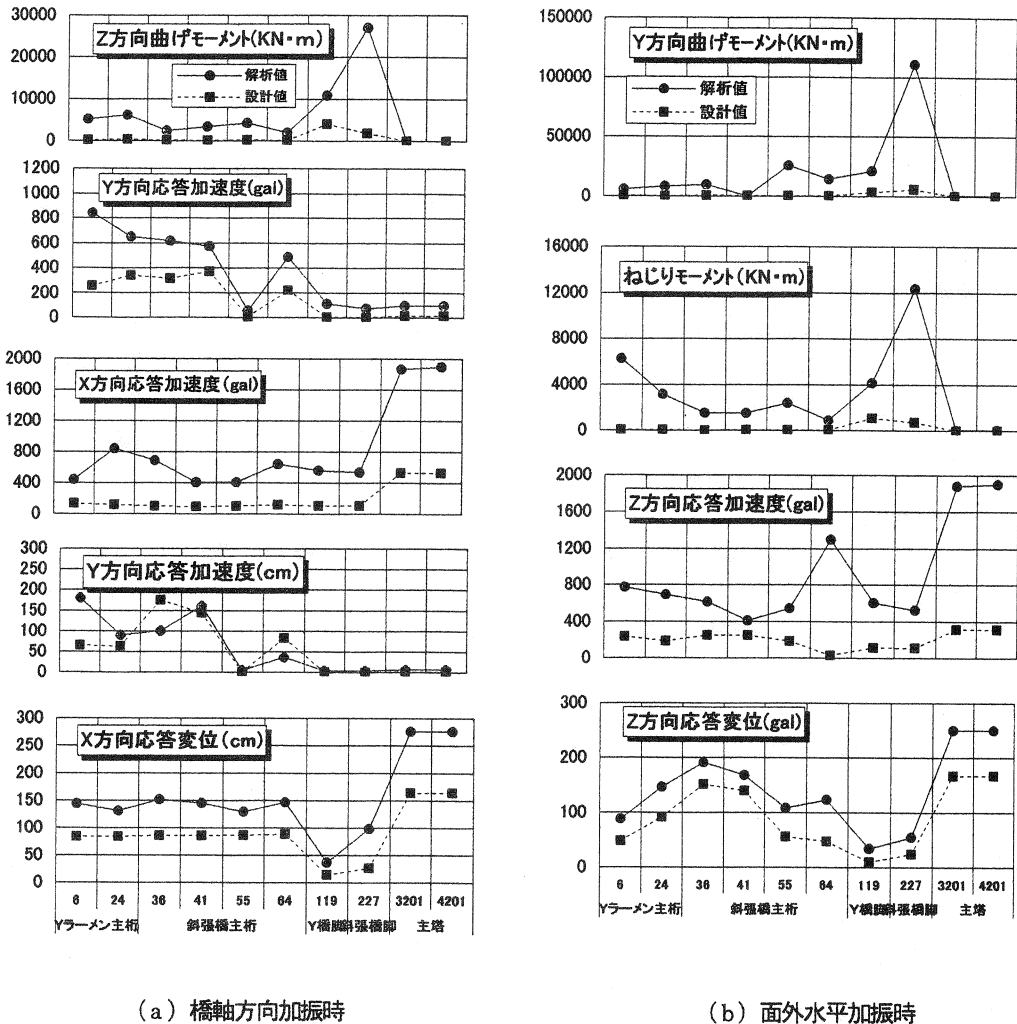


図-5 設計値と解析値との比較

(X方向)、鉛直方向(Y方向)の応答が卓越し、面外方向(Z方向)の応答は得られないという結果が得られた。これは、橋脚高さが高く、特に斜張橋については、スレンダーな構造をしているため、橋軸、鉛直の加振に対して、X方向、Y方向に過敏に連成する結果と考えられる。

(3) 面外水平方向加振

面外方向(Z方向)の変位、および加速度が卓越し、断面力では、ねじりモーメント、面外曲げモーメント(Y軸曲げ)が卓越する。変位量としては、主桁部で88~191cm、橋脚部で34~108cm、斜張橋頂部では250cmもの変位が発生している。加速度では、主桁部で409galから最大で1300galの応答値である。断面力では、特に橋脚部で面外曲げモーメント(Y軸曲げ)が大きくなり、橋軸方向加振時の面内曲げモーメントに比べ、Y橋脚部で約2倍、斜張橋部で約4倍という結果が得られている。

(4) 3方向同時加振

橋軸、鉛直、面外水平の各方向加振時の最大応答値が各部で発生している。

4-3. 設計値と解析値との比較

当設計は、平成7年の兵庫県南部地震発生以前に実施されており、モード解析による応答スペクトル法により、耐震の検討が行われている。その時採用された設計水平震度は、橋軸方向、鉛直方向の卓越モードに対し、橋軸方向で $k_1=0.11$ (1次モード)、 $k_2=0.13$ (2次モード)、鉛直方向で $k_3=0.13$ (3次モード)、 $k_4=0.17$ (5次モード) というものである。図-5に解析値と設計値との比較を示す。図は、橋軸方向、鉛直方向加振時については、卓越する傾向が同様であるため、応答値の大きい橋軸方向加振と面外水平加振について比較している。

(1) 橋軸方向加振

変位については、ほぼ同様な傾向を呈するが、橋軸方向 (X方向) の主塔頂部 (節点 3201, 4201)、鉛直方向 (Y方向) のラーメン橋支点 (節点 6) ・斜張橋主桁 (節点 36) でやや差がでている。加速度については、橋軸方向 (X方向) の主塔頂部 (節点 3201, 4201)、鉛直方向 (Y方向) のラーメン橋支点 (節点 6) で解析値に大きな値が発生している。断面力については、斜張橋橋脚部 (節点 227) において、解析値に大きな面内曲げモーメント (Z軸曲げ) が発生している。

(2) 面外水平加振

変位については、ほぼ同様な傾向が認められる。加速度については、斜張橋主桁 (節点 64)、主塔頂部 (節点 3201, 4201) において解析値に大きな値が発生している。断面力については、ラーメン橋支点 (節点 6) 斜張橋橋脚部 (節点 227) で解析値に大きな曲げモーメントが発生している。

5. 結論

鮎の瀬大橋の実橋振動試験結果および固有値解析と地震応答解析の結果から、以下のことが得られた。

- ①固有振動数は計測値の方が2%~12%程度大きい。
- ②実験値と解析値の固有モードはよく一致している。
- ③設計では上部工の各モードの減衰定数に3%~5%を用いてあるが、実験値では0.5%~1.3%と小さな値が得られた。
- ④①、②より、解析モデルは十分な精度で実橋をモデル化したものであると考えられ、数値シミュレーション結果は実橋の応答推定に十分役立つと考えられる。
- ⑤橋軸・鉛直方向加振では、橋軸方向 (X方向) ・鉛直方向 (Y方向) の応答が連成する傾向にあり、面外方向加振では、面外方向 (Z方向) のみの独立した応答である。
- ⑥橋軸・鉛直方向加振よりも面外方向加振に大きな断面力が発生する。
- ⑦橋軸・鉛直・面外水平の各方向加振による応答は、ラーメン橋と斜張橋との結合点 (節点 24) では大きな応答とはならず、また主桁部よりも各橋脚部の方により大きな断面力が発生する。
- ⑧兵庫県南部地震クラスの地震では、設計値に比べ、橋脚部、主塔部で大きな応答を示す。

参考文献

- 1) 熊本県上益城事務所、鮎の瀬大橋工事報告書、1999年8月
- 2) 水田、鮎の瀬大橋 振動実験報告書、1999年6月
- 3) 水田：吉村：内谷：崎元：永木：瓜生、鮎の瀬大橋の振動実験、構造工学論文集 Vol.46A、pp.461~468、2000年3月。
- 4) (社) 日本道路協会、道路橋示方書・同解説、pp75~80、1996年12月。
- 5) 松元、水田、永木、荒巻、鮎の瀬大橋の実橋振動実験、プレストレスト技術協会、第9回シンポジウム論文集、pp.773~776、1999年10月