

(109) 下部工からの逸散減衰による 斜張橋の減衰特性

建設省土木研究所 正員 川島一彦

〃 〇正員 運上茂樹

〃 正員 吾田洋一

1. まえがき

既往の斜張橋の実橋振動実験結果によれば、固有振動数及び固有振動モード形は、通常用いられる線形骨組モデルを用いた固有値解析によりかなりよい精度で推定することが可能であるが、地震応答に大きな影響を及ぼす減衰特性については、設計上仮定される値よりも小さな値が得られる場合が多く未解明な点が多い。本論では、減衰特性に影響を与える1つの因子と考えられる下部工からの逸散減衰が斜張橋の減衰特性に及ぼす影響を解析的に検討した結果を報告する。

2. 解析条件

解析対象橋は、図一1に示す橋長380mの2径間連続斜張橋とし、2次元多質点フレームモデルにおいて、主塔基礎からのみエネルギーが逸散するものと仮定した。モデルとした実基礎は、断面26m×22m、根入れ25mのケーソン基礎であるが、簡単のため、これが地盤と接する表面積が等しくなるような剛円盤（半径 $a=30\text{m}$ ）としてモデル化した。地盤は等方等質半無限弾性体を仮定し、山原¹⁾による次式で表されるスウェー及びロッキングの地盤ばね係数及び減衰係数を用いてモデル化した。

$$\begin{aligned} K_x &= 8Ga/(2-\nu), & C_x &= \pi Ga^2/V_s \\ K_r &= 8Ga^3/3(1-\nu), & C_r &= \pi/4 \cdot \sqrt{2(1-\nu)/(1-2\nu)} \cdot Ga^4/V_s \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 K_x , C_x , K_r , C_r は、それぞれ、スウェー及びロッキングのばね係数及び減衰係数を示し、 G , ν , V_s , a は、それぞれ、地盤のせん断弾性係数、ポアソン比、せん断波速度、及び剛円盤の半径を示す。

解析は、橋軸方向に着目し、複素固有値解析法²⁾により各モードの複素固有値から固有周期及び減衰定数を算出した。ただし、固有値として相異なる2実根が得られる減衰定数が1を越える過減衰振動の場合には求めていない。一方、このように下部工のみに減衰が作用する場合の全体系の減衰定数は、実固有値解析結果を用いて1サイクル中のエネルギー損失により近似的に次式で求められる。

$$h_j = (C_x \cdot u_{jx}^2 + C_r \cdot u_{jr}^2) / (2\omega_j \cdot M_j) \quad (2)$$

ここで、 ω_j , M_j , u_{jx} , u_{jr} は、それぞれ j 次の固有円振動数、一般化質量、地盤ばねを取り付けた節点31の x 方向及び z 回転方向の固有振動モード値を示す。なお、一般化質量 M_j は節点 i の質量 m_i 及び固有モード値 u_{ji} を用いて次式で表される。

$$M_j = \sum m_i \cdot u_{ji}^2 \quad (3)$$

モデルとした実橋の地盤条件 ($V_s=150\text{m}$, $\nu=0.45$, $\gamma=1.86\text{t/m}^3$) を中心として表一1に示す解析ケースについて計算を行った。ここで、乗数 α は、減衰係数の変化に伴う減衰定数の変化を見るために考慮したものであり、式(1)の C_x 及び C_r に α を乗じるものとした。

3. 解析結果

表一2は、地盤のせん断波速度 V_s が 150m/sec 及び 300m/sec の場合についての固有値解析結果を示したものである。これによれば、解析モデルの1次周期は、2.83秒となり、2次が鉛直方向、5次及び8次 ($V_s=150\text{m/sec}$)、5次及び12次 ($V_s=300\text{m/sec}$) が橋軸方向の有効質量が大きくなっている。せん断波速度

V_s が300(m/sec)の場合には、150(m/sec)の場合に比較して地盤ばね係数が4倍大きくなるが、橋軸方向振動周期のみが短くなっている。2次、5次、8次($V_s=150$ m/sec)、12次($V_s=300$ m/sec)の固有振動モードを示すと図-2のようになる。実固有値解析結果と複素固有値解析結果を比較してみるとアンダーラインを引いた橋軸方向振動モードの場合に差異が生じているが、これは減衰の存在によるものである。減衰定数は、橋軸方向振動モードの場合に得られ、複素固有値解析結果によれば、 $V_s=150$ (m/sec)の場合に5次で0.175、8次で0.744、 $V_s=300$ (m/sec)の場合に5次で0.034、12次で0.83となる。

橋軸方向に対しては2つのモードが卓越しており(以下これを橋軸方向振動1次及び2次という)、この2つのモードに対して、固有周期及び減衰定数に与えるせん断波速度の影響を示したのが図-3である。図-2に示したようにせん断波速度が変化すると固有振動モードも変化し単純には比較できないが、せん断波速度が大きくなるにつれて固有周期は、1次については $V_s=150$ (m/sec)以下で大きな変化を示している。減衰定数については、1次は減少傾向を有しているが2次は逆に大きくなる傾向を有している。減衰定数についても $V_s=150$ (m/sec)以下で大きく変化している。なお、ここで $V_s=50$ (m/sec)の場合には1次のみが卓越しており2次は得られなかった。

図-4(a)及び(b)は、基礎のモデルとした剛円盤の半径を変化させた場合の固有周期及び減衰定数の変化を示したものである。ここで、半径40m及び50mの2次振動については減衰定数が1を越える過減衰振動のため示していない。これによれば、半径が大きくなるにつれて固有周期は短くなり、特に、半径30m以下での変化が大きい。減衰定数については、1次振動は半径が20m~30mで最大値をとるような変化を示し、減衰定数を最も大きくする半径があると考えられる。一方、2次はほぼ直線的な増加傾向を示している。

図-5(a)及び(b)は、減衰係数の変化に伴う固有周期及び減衰定数の変化を示したものである。ここで、同様に2次振動の減衰定数が1を越える場合は示していない。また、同時に減衰定数の近似算定式(2)の結果も示している。これによれば、固有周期は、 $V_s=150$ (m/sec)の1次については減衰係数が大きくなるほど実固有値解析結果よりも短くなり、2次については逆に長くなる傾向を有している。 $V_s=300$ (m/sec)については、 $V_s=150$ (m/sec)と同様の傾向を示すが、その変化の度合は少ない。減衰定数は、1次については、 $V_s=150$ (m/sec)の場合に α が0.75~1.0で、 $V_s=300$ (m/sec)の場合に α が1.5程度で最も大きな減衰定数となるが、 α がさらに大きくなっても減衰定数は大きくならず、逆に小さくなる傾向を有している。2次については、ほぼ直線的に増加している。なお、近似式(2)による結果は2次はよく一致しているが、1次については α が0.75以上でその差が大きくなっており、近似式の適用限界を示しているものと考えられる。

5. 結論

以上の解析結果をまとめると以下のようなになる。

- 1) 減衰定数は、地盤剛性、円盤の半径(基礎の形状規模)により大きく影響を受ける。
- 2) 本解析では基礎のスウェイとロッキングに対してのみ逸散減衰を仮定しているため、減衰定数は、表-2に示したように橋軸方向の振動モードに対してのみ得られ、 $V_s=150$ (m/sec)の場合には5次で0.175、8次で0.744、 $V_s=300$ (m/sec)の場合には5次で0.034、12次で0.830とかなり大きな減衰定数を有している。
- 3) 減衰定数の近似算定式(2)を提示した。本式は、減衰係数が大きい場合に正解との差が大きくなるが、適用限界を明確にした上で用いることができると考えられる。

【参考文献】1)山原浩：環境保全のための防振設計、彰国社 2)Foss,K.A.: Co-Ordinates Which Uncouple the Equations of Motion of Damped Linear Dynamic Systems, J.Appl.mech.,26,1959

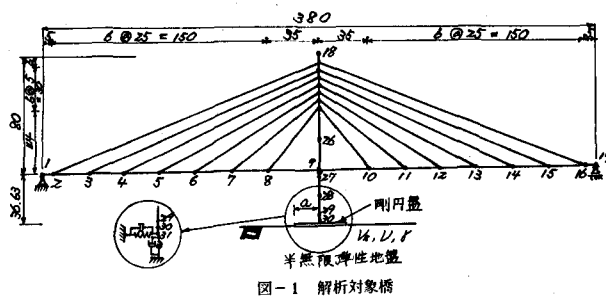


図-1 解析対象橋

表-1 解析ケース

ケース	せん断波速度Vs(m/sec)	円盤の半径a(m)	乗数 α
1~8	50,100,150,200,250,300,350,400	30	1.0
9~13	150	10,20,30,40,50	
14~22	150	30	0.0,0.25,0.5,0.75,1.1,1.25,1.5,1.75,2
23~31	300		

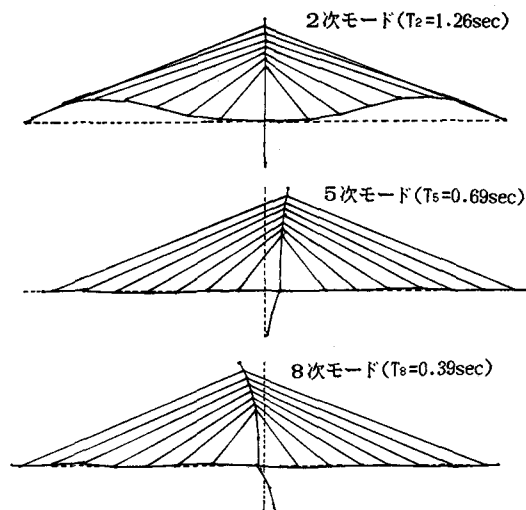


図-2(a) 固有振動モード (Vs=150m/sec)

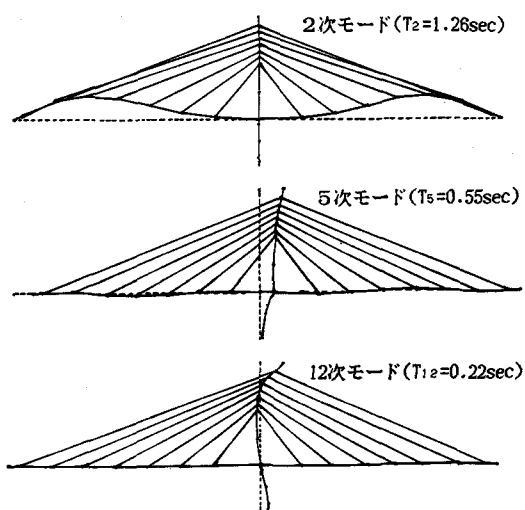


図-2(b) 固有振動モード (Vs=300m/sec)

表-2 固有値解析結果

せん断波速度 Vs (m/sec)	振動次数	実固有値解析				複素固有値解析	
		周期(sec)	有効質量比(%)		減衰定数(式(2))	周期(sec)	減衰定数
			上下方向	橋軸方向			
150	1	2.83	0.0	0.0	0.0	2.83	0.0
	2	1.26	30.4	0.0	0.0	1.26	0.0
	3	0.89	0.0	0.0	0.0	0.89	0.0
	4	0.71	3.7	0.0	0.0	0.71	0.0
	5	0.69	0.0	60.8	0.284	0.57	0.175
	6	0.49	0.0	0.1	0.001	0.49	0.000
	7	0.44	6.2	0.0	0.0	0.44	0.0
	8	0.39	0.0	39.1	0.736	0.41	0.744
300	1	2.83	0.0	0.0	0.0	2.83	0.0
	2	1.26	30.4	0.0	0.0	1.26	0.0
	3	0.89	0.0	0.0	0.0	0.89	0.0
	4	0.71	3.7	0.0	0.0	0.71	0.0
	5	0.55	0.0	33.0	0.047	0.54	0.034
	6	0.49	0.0	0.1	0.000	0.49	0.000
	7	0.44	6.2	0.0	0.0	0.44	0.0
	8	0.30	0.0	0.0	0.000	0.30	0.0
	9	0.28	0.1	0.0	0.0	0.28	0.0
	10	0.25	0.0	3.3	0.028	0.25	0.002
	11	0.23	0.1	0.0	0.0	0.23	0.0
	12	0.22	0.0	60.0	0.776	0.21	0.830

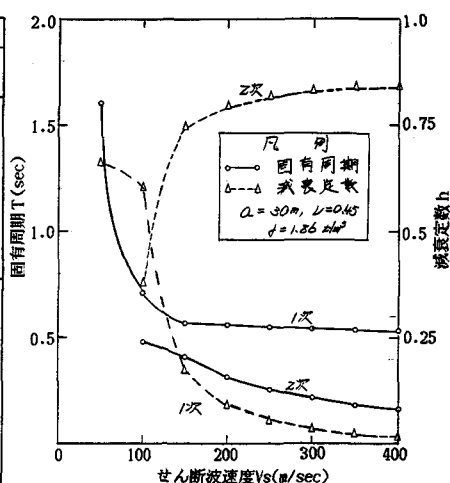


図-3 せん断波速度による影響

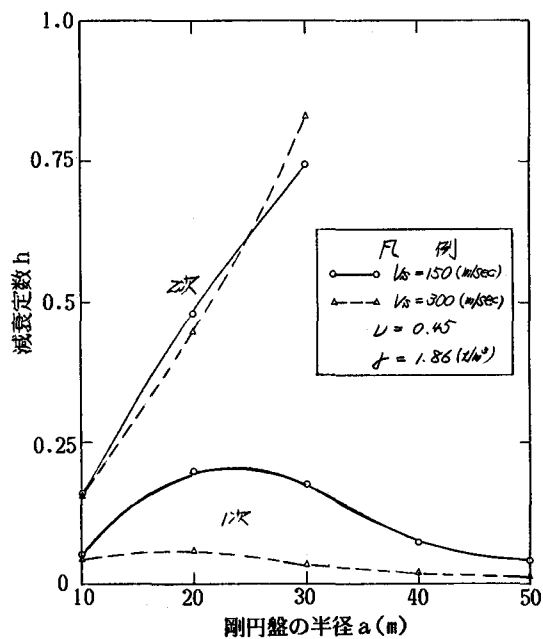
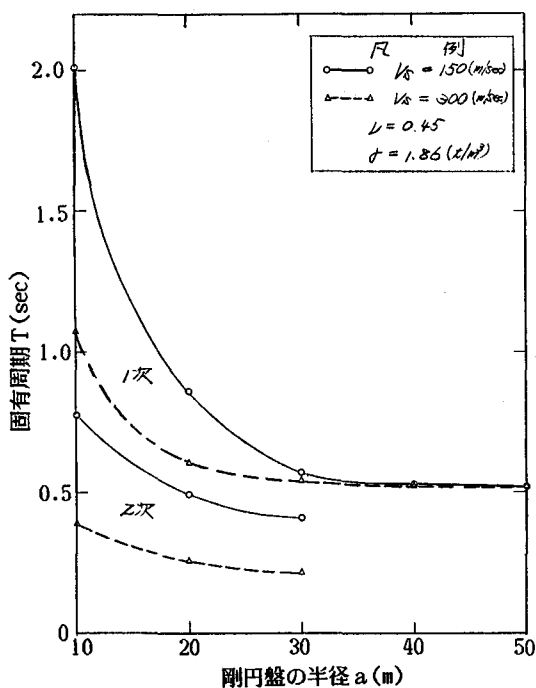


図-4 剛円盤の半径による影響

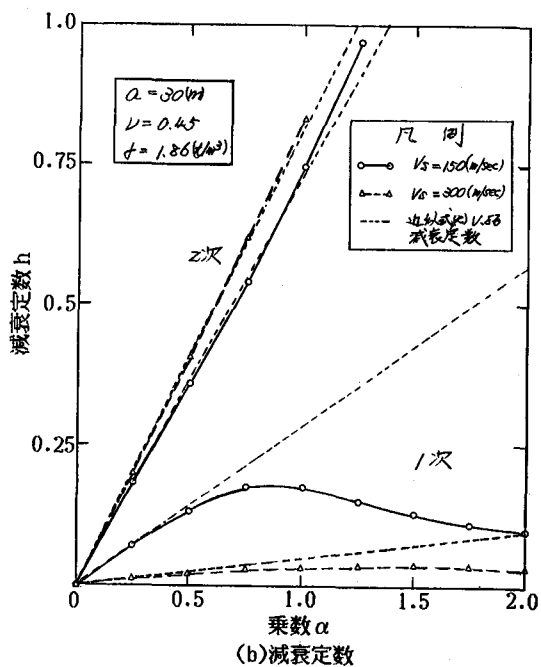
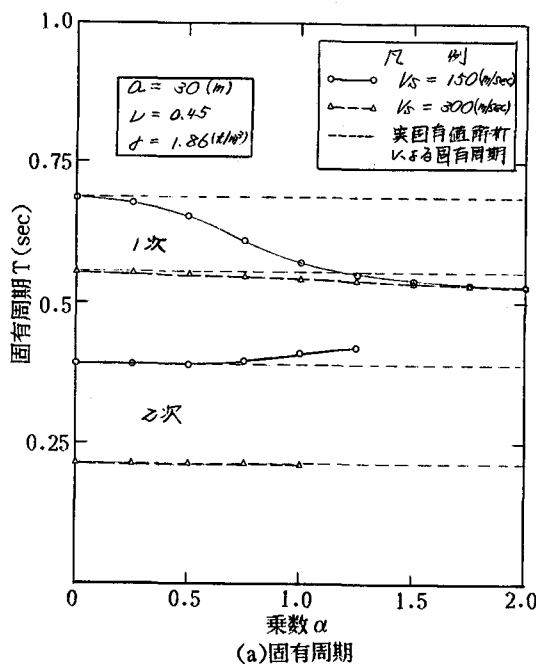


図-5 減衰係数の影響