

(137) 免震橋における入力位相差による影響の検討

○石川島播磨重工(株) 機器振動部 正会員 田中 元章
 石川島播磨重工(株) 機器振動部 桜井 朋樹

1. 目的

連続高架橋を免震化する場合、その設計において地震波の伝播特性を考慮した入力位相差の影響を検討する必要性が指摘されている。ここで入力位相差とは地震波がその伝播速度に対応した時間差をもって各橋脚基礎に入射する場合の時間差のことである。入力位相差が著しい場合、各橋脚に同一地震波が同時入力する前提の設計では把握しきれないような部材断面力の集中や免震装置に大きな相対変位が発生する可能性がある。

そこで、この可能性について検討するためフレームモデルとバネとで橋及び地盤をモデル化し、橋脚基礎部に位相差を考慮した地震波を入力して、入力位相差による応答への影響の検討を行った。

また非免震橋においてもこの影響について検討し、各々の結果の比較により入力位相差の影響について特に免震橋で問題となる点を明らかにすることを目的とした。

なお本解析は、橋梁上部構造と橋台との連結部の設計に影響を与える橋軸方向の地震応答について行った。

2. 解析モデル

本解析では地震波が各橋脚下端部に到達する時間の差を各橋脚下端部の入力波にそれぞれ与えることによって入力位相差を考慮した。伝播速度としてせん断波速度 V_s をとり、位相差が最も大きくなる場合である水平入射とした。また加振方向は、橋軸方向とした。

対象モデルは、ガイドライン(*)の試設計モデル(橋長210mの6径間連続橋)を基本とし位相差入力の解析上、対称条件が成り立たないため全長モデル(図1、表1、表2)を用いた。

また他の諸定数はガイドラインのモデルの値を踏襲した。

表1 モデルの節点座標および節点重量

節点No	X座標(m)	Z座標(m)	重量(tf)	節点No	X座標(m)	Z座標(m)	重量(tf)
1	-105.0	0.0	180.338	34	0.0	-0.826	104.652
2	-87.5	0.0	360.675	35	0.0	-2.0	0.0
3	-70.0	0.0	303.675	36	0.0	-8.5	203.125
4	-52.5	0.0	330.675	37	0.0	-15.0	0.0
5	-35.0	0.0	360.675	38	0.0	-16.377	357.604
6	-17.5	0.0	360.675	39	0.0	-17.5	0.0
7	0.0	0.0	360.675	40	35.0	0.0	0.0
8	17.5	0.0	360.675	41	35.0	-0.826	104.652
9	35.0	0.0	360.675	42	35.0	-2.0	0.0
10	52.5	0.0	360.675	43	35.0	-8.5	203.125
11	70.0	0.0	360.675	44	35.0	-15.0	0.0
12	87.5	0.0	360.675	45	35.0	-16.377	357.604
13	105.0	0.0	180.338	46	35.0	-17.5	0.0
14	-105.0	0.0	0.0	47	70.0	0.0	0.0
15	-105.0	-1.276	175.316	48	70.0	-0.826	104.652
16	-105.0	-4.5	0.0	49	70.0	-2.0	0.0
17	-105.0	-5.039	134.895	50	70.0	-8.5	203.125
18	-105.0	-5.5	0.0	51	70.0	-15.0	0.0
19	-70.0	0.0	0.0	52	70.0	-16.377	357.604
20	-70.0	-0.826	104.652	53	70.0	-17.5	0.0
21	-70.0	-2.0	0.0	54	105.0	0.0	0.0
22	-70.0	-8.5	203.125	55	105.0	-1.276	175.316
23	-70.0	-15.0	0.0	56	105.0	-4.5	0.0
24	-70.0	-16.377	357.604	57	105.0	-5.039	134.895
25	-70.0	-17.5	0.0	58	105.0	-5.5	0.0
26	-35.0	0.0	0.0	59	-105.0	-5.5	∞
27	-35.0	-0.826	104.652	60	-70.0	-17.5	∞
28	-35.0	-2.0	0.0	61	-35.0	-17.5	∞
29	-35.0	-8.5	203.125	62	0.0	-17.5	∞
30	-35.0	-15.0	0.0	63	35.0	-17.5	∞
31	-35.0	-16.377	357.604	64	70.0	-17.5	∞
32	-35.0	-17.5	0.0	65	105.0	-5.5	∞
33	0.0	0.0	0.0				

表2 モデルの部材剛性

部材No	断面2次モーメント I (cm ⁴)	水平/本定数 K _H (tf/m)	部材長さ l (m)	断面2次モーメント I (m ⁴)	水平/本定数 K _H (tf/m)	回転/本定数 K _R (tf・m/rad)
1,2	6.37		6.40		1.450×10 ⁶	
2,3	6.37		40.41	∞		
3,4	6.37		40.42	∞		
4,5	6.37		42.43	1.297		
5,6	6.37		44.44	1.297		
6,7	6.37		44.45	∞		
7,8	6.37		47.46	∞		
8,9	6.37		48.47	∞		
9,10	6.37		48.48	∞		
10,11	6.37		48.49	∞		
11,12	6.37		48.50	∞		
12,13	6.37		48.51	1.297		
13,14	6.37		50.52	1.297		
14,15	0.305	7.34×10 ⁶	50.53	∞		
15,16	0.305		52.54	∞	7.34×10 ⁶	
16,17	∞		54.55	∞		
17,18	∞		55.56	∞	0.205	
18,19	∞	1.450×10 ⁶	55.57	∞	0.205	
19,20	∞		57.58	∞		
20,21	∞		59.59	∞		
21,22	1.297		61.60	1.34×10 ⁶		1.01×10 ⁶
22,23	1.297		63.61	1.40×10 ⁶		2.26×10 ⁶
23,24	∞		65.62	1.40×10 ⁶		2.26×10 ⁶
24,25	∞		67.63	∞		2.26×10 ⁶
25,26	∞	1.450×10 ⁶	69.64	∞		2.26×10 ⁶
26,27	∞		71.65	∞		2.26×10 ⁶
27,28	∞		73.66	1.34×10 ⁶		1.01×10 ⁶
28,29	1.297		75.67	∞		
29,30	1.297		77.68	∞		
30,31	∞		79.69	∞		
31,32	∞		81.70	∞		
32,33	∞	1.450×10 ⁶	83.71	∞		
33,34	∞		85.72	∞		
34,35	∞		87.73	∞		
35,36	∞		89.74	1.297		
36,37	1.297		91.75	∞		
37,38	∞		93.76	∞		
38,39	∞		95.77	∞		

* (財) 国土開発技術センター「道路橋の免震設計法ガイドライン」

(案) 平成元年3月

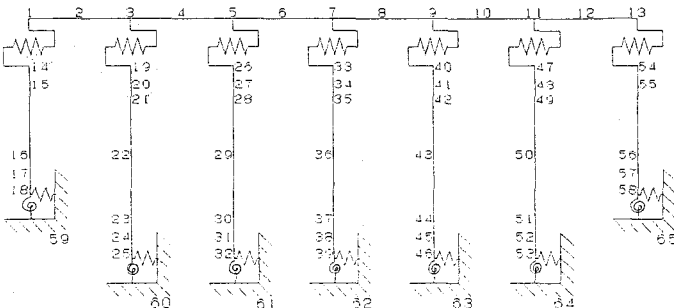


図1 骨組構造モデル

免震装置の剛性については、ガイドライン設計で用いるスケルトンカーブ（図2）の直線の勾配 K_B をとり、線形とした。免震装置の減衰定数は0.2としてモデル化した。

表3にこのモデルの固有値を示す。橋軸方向1次モードは橋脚、上部構造すべてが同位相に変形するモードである。橋軸方向2次モードは逆対称モードである。

解析ケースとしては、表4に示すような免震装置および入力位相差の有無による4つのケース、さらに免震装置有での入力位相差の大きさによる2ケースをとった。

位相差の基準値として $V_s = 200 \text{ m/s}$ をとり、位相差の大きい場合として $1/2V_s$ 、 $1/4V_s$ をとった。

入力地震波を図3に示す。入力波は1978年宮城県沖地震での開北橋近傍の地盤で記録された波を振幅調整したものである。伝播方向は地盤部分の若い節点番号（No.59：左側）の方向から、橋軸方向に伝播するとした。

使用解析コードは、MSC/NASTRANを用い、直接積分法による時刻歴解析を行った。

表3 固有振動数

	固有振動数 (Hz)	
	橋軸方向1次モード	橋軸方向2次モード
免震装置無し	1.23	6.09
免震装置有り	0.57	2.78

表4 解析ケース

	免震装置無し	免震装置有り		
		V_s	$1/2V_s$	$1/4V_s$
位相差無し	CASE1	CASE3	—	—
位相差有り	CASE2	CASE4	CASE5	CASE6

$V_s = 200 \text{ m/s}$

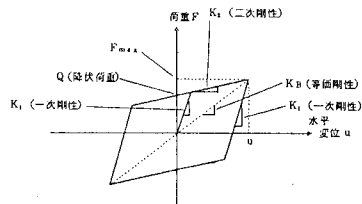
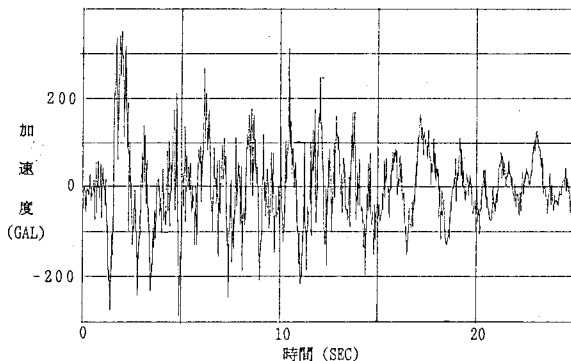


図2 免震装置の荷重と水平変位の関係



最大値 352 GAL (1.97 SEC)

図3 入力地震波（レベルー2）

3. 結果

図4～9に入力位相差による各応答値の変化を示す。

以下に各応答値の変化を概説する。

a. 免震装置の最大相対変位

図4に免震装置の最大相対変位を示す。

両端部では、入力位相差を考慮すると相対変位が増え、さらに位相差に付随して増えている。

中央部では入力位相差の考慮によって相対変位は減少するが、さらに位相差を大きくすると逆に増えている。

両端部の免震装置の相対変位が入力位相差の考慮によって増加する原因として以下が考えられる。

免震装置のばね定数に比べて橋脚のばね定数が剛であるので橋脚－免震装置系の水平ばね定数は、免震装置でほぼ定まる。

橋台に設置した免震装置の数が1橋脚に設置した免震装置の半数であるため両端部の免震装置のばね定数が小さいので、両端部の橋脚－免震装置系の水平ばね定数も小さくなり、入力位相差なしの場合、両端部の橋脚の地震荷重の負担割合は小さい。

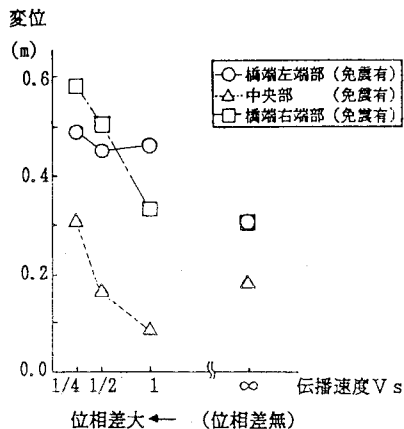


図4 免震装置の最大相対変位

入力位相差のある場合は位相差なしの場合と異なり各免震装置が受持つ地震荷重の方向、大きさに夫々相違があり、地震時初期から全免震装置が揃って地震荷重を負担しないので、位相差なしの場合では主体でなかった両端部の免震装置も地震荷重を受持つために、それらの相対変位が大きくなったと考えられる。

b. 上部構造最大応答変位

図5 に上部構造の地盤に対する最大相対変位を示す。

免震装置が無い場合は入力位相差の考慮により変位は増加する。

免震装置が有る場合は入力位相差を考慮、増加させると両端部では前項と同様な傾向で変位が増加する。

免震装置のばね定数に比べ橋脚のばね定数が大きいため、上部構造最大応答変位は免震装置最大変位に支配される。したがって上部構造最大応答変位の入力位相差による依存性の傾向の理由は前項と同じである。

c. 上部構造最大応答加速度

図6 に上部構造最大応答加速度を示す。

免震装置の有無にかかわらず、位相差を考慮、増加させると加速度は減少している。免震装置が無い場合は、入力位相差によって各橋脚から上部構造への相異なる入力変位を同一になるように上部構造が拘束するために上部構造の応答加速度が低減する、いわゆる入力損失効果によると考えられる。

一方免震装置が有る場合には、免震装置の剛性が上部構造軸方向剛性に比べて非常に小さいために入力位相差による上部構造への相異なる入力変位が免震装置により吸収される、すなわち免震装置の振動絶縁効果により、上部構造の各節点でほぼ同じ応答加速度となっている。

d. 橋脚天端部構最大応答加速度

図7 に橋脚天端部最大応答加速度を示す。

免震装置の無い場合では入力位相差により応答加速度は大きく減少する。免震装置の有る場合では入力位相差の考慮、増加によって応答加速度はほとんど変わらない。

免震装置の有無でこのように天端部応答加速度が変化する理由は、以下のように考えられる。

免震装置無しで天端部加速度が入力位相差により低下するのは、天端と上部構造が水平方向に剛結されているので、前記c. で述べた入力損失効果によると考えられる。

免震装置有りの場合では、前記c. で述べた免震装置の振動絶縁効果により上部構造と橋脚との相互作用が除かれるため入力位相差による各天端の応答加速度の差がなくなると考えられる。

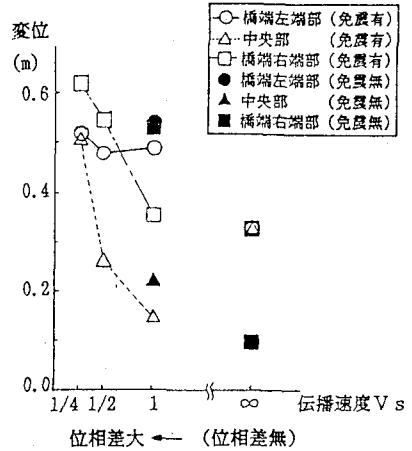


図5 上部構での地盤に対する最大相対変位

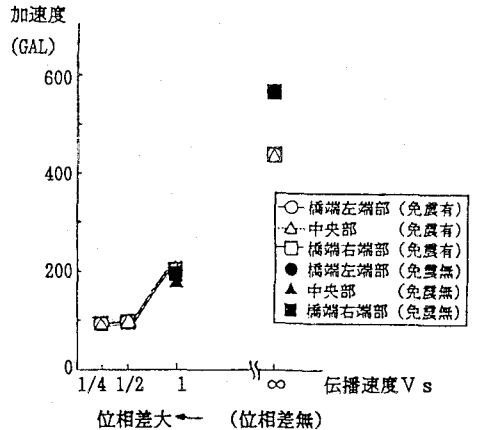


図6 上部構最大応答加速度

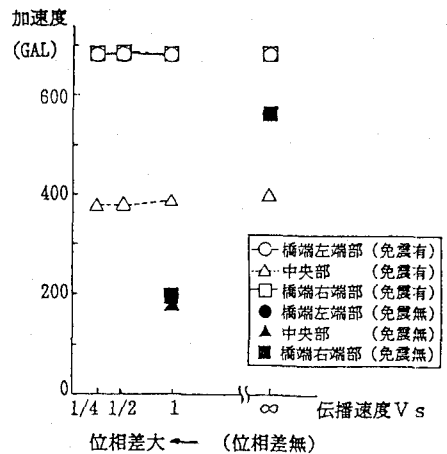


図7 橋脚天端部最大応答加速度

e. 橋脚付根部最大曲げモーメント、上部構造最大軸力

図8、9 に橋脚付根部最大曲げモーメント、上部構造最大軸力を示す。

免震装置が無い場合では入力位相差により断面力が増加する。

免震装置が有る場合では入力位相差の増加によって断面力が増加するが、無い場合ほどではない。また中央部の断面力が両端部に比べて大きくなる。

入力位相差により応答値が大きくなるのは、入力損失効果と考えられる。すなわち入力位相差が大きくなるほど各点での上部構造での応答変位の差も大きくなるので、これらを同一とするように拘束する力も大きくなり、そのため断面力が増加したと考えられる。

免震装置有りの場合でこの増加が小さいのは、免震装置の振動絶縁効果によると考えられる。

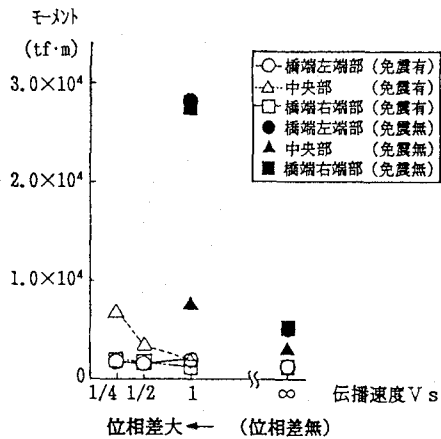


図8 橋脚付根部最大曲げモーメント

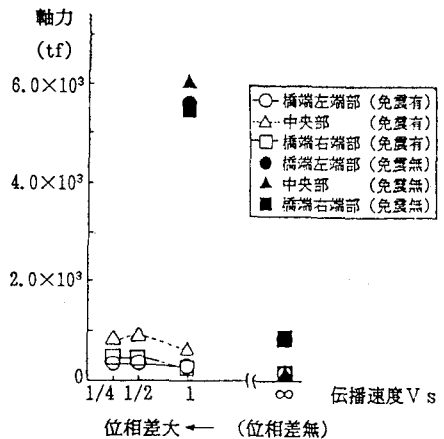


図9 上部構での橋軸方向最大軸力

4. 結言

(1) 免震化の効果

免震化により、入力位相差の有無に関わらず上部構造の応答加速度、上・下部構造の断面力が低下した。とくに入力位相差を考慮した場合、非免震の場合に生ずる上部構造の拘束効果による上・下部構造の断面力の増加も、免震化により減少した。

一方、入力位相差の有無に関わらず上部構造—地盤最大相対変位は増加するという免震化の影響が現れた。

(2) 設計への反映

ガイドラインに基づいて設計された免震橋においては、端部の免震装置の剛性が他の部分に比べ小さいため以下のような入力位相差による端部応答の増加があることが分かった。

a. 端部の免震装置の相対変位（上部構造と地盤の相対変位）が大きくなる。

b. 端部橋脚の曲げモーメントおよび両端部の上部構造軸力が増加する。

一方中央部の応答については入力位相差によっていったん減少するが、さらに位相差が増加すると逆に増大する傾向が大部分に認められた。

すなわち中央部の橋脚・免震装置の設計によっては、入力位相差により更に応答変位、応答加速度、断面力の減少を実現することができることで免震装置の効果を顕著に得られる可能性があることが分かった。

なお本報告は建設省土木研究所と民間28社との官民連帯共同研究「道路橋の免震構造システムの開発」の一環として行われたものである。