

# 铅芯橡胶支座用于龙江大桥引桥 隔震效果分析

梁振有<sup>1</sup> 资道铭<sup>2</sup> 梁莹莹<sup>2</sup> 陈伟亮<sup>2</sup> 黄光宇<sup>2</sup>

(1 中交公路规划设计院路桥技术有限公司 北京 100088

2 柳州东方工程橡胶制品有限公司 广西柳州 545005)

**摘要:**减隔震设计逐渐成为结构抗震设计的重要方法,本文以云南省龙江大桥保山岸引桥为例,对使用了铅芯隔震橡胶支座的减震方案与传统的抗震方案进行了分析比较。验证了在高震区使用铅芯橡胶支座对桥梁进行减隔震设计,与传统的硬性抵抗方式相比,在经受大震时,墩柱所受到的剪力和弯矩值可以大幅降低。

**关键词:**地震 铅芯橡胶支座 减隔震

## 1 工程简介

龙江大桥为中国云南保山至缅甸密支那公路保山至腾冲段高速公路中的一座特大型桥梁。龙江大桥属双塔单跨钢桁架悬索桥,该桥位于高震区,地震基本烈度为VIII度,地质条件复杂,是高地震烈度下典型的山区高墩、大跨径桥梁,地震对桥梁的主桥及引桥影响均需专门研究,本文仅对保山岸引桥的抗震设计作效果分析。

保山岸引桥是龙江大桥往保山方向的引桥,全长200m,由跨径40m的5跨连续混凝土箱梁组成,桥型图如图1所示。保山岸为阶梯地形,各墩高差大,其结构形式对抗震不利。因此采用以延长桥梁的自振周期,增加桥梁结构的附加阻尼,从而降低桥梁的地震力的减隔震设计<sup>[1][2][3]</sup>方式对其进行抗震分析,并与传统抗震设计方式进行效果对比分析。

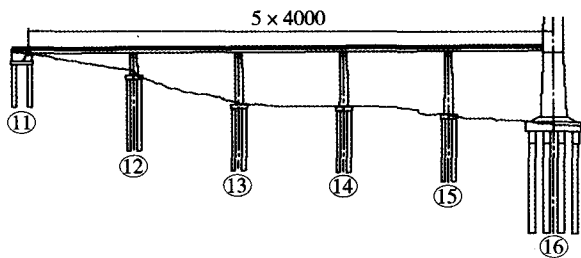


图1 保山岸引桥桥型图

## 2 有限元建模

采用有限元程序Ansys对该大桥进行抗震计

算,采用空间梁单元beam188模拟预应力混凝土连续梁桥的主梁和桥墩;二期恒载采用集中质量单元mass21模拟;主梁与边墩之间的联结用combine39单元来模拟。桥梁结构有限元计算模型简图如图2所示,单元模型图见图3。对于非隔震结构,墩与梁之间考虑盆式支座,采用铰接,而桥台处考虑滑动支座,采用摩擦单元,顺桥向则是用非线性摩擦滑移单元Combine39来模拟滑移支座。单元的起滑力为:

$$f = \mu F_N \quad (1)$$

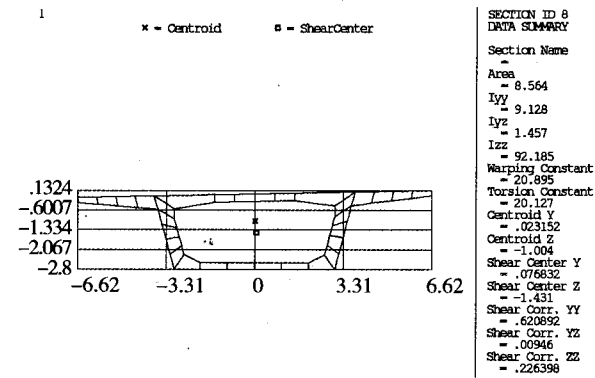
式中, $\mu$ 为摩擦系数, $F_N$ 为桥梁自重作用下支座的反力;

对于隔震结构考虑墩与梁之间纵桥向和横桥向隔震,采用combine39单元来模拟铅芯隔震橡胶支座。

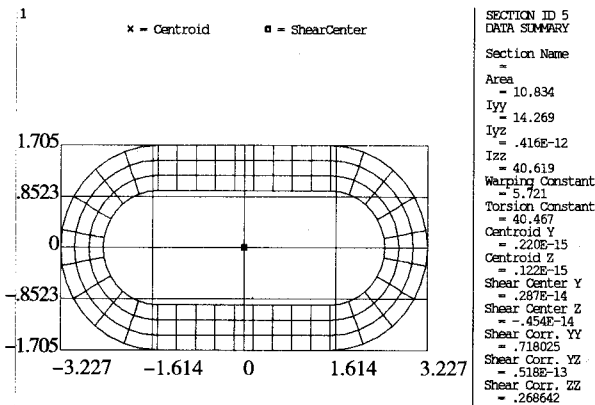
分析中边界条件为桥墩根部完全固定,考虑的荷载包括桥梁自重以及水平和竖向地震作用。二期恒载包括8cm厚现浇混凝土和10cm厚沥青混凝土桥面铺装及护栏自重,采用集中质量加在柱顶。



图2 保山岸引桥有限元模型



桥截面有限元模型图

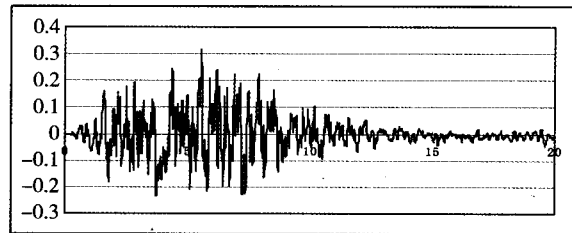


墩截面有限元模型样式图

图3 单元模型图

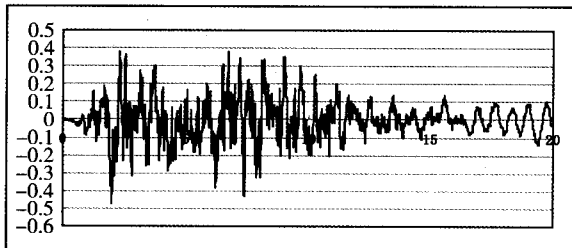
### 3 分析采用的地震波

在进行该桥梁的地震时程响应计算时，依据公路工程抗震设计规范规定<sup>[4]</sup>，应采用多条地震波进行计算分析，该桥场地类别基本上为Ⅱ类场地上，为便于比较，现选用三组地震波进行分析，本分析中采用的地震波加速度时程图如图4、5所示。

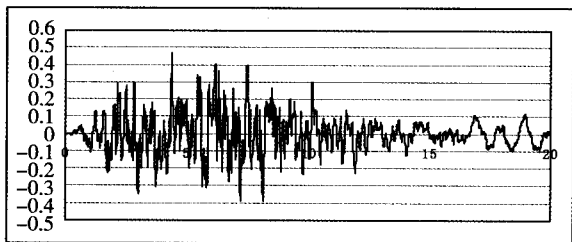


地震波c

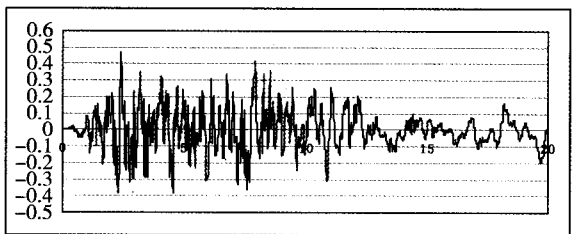
图4 E1地震作用地震波加速度时程图



地震波a

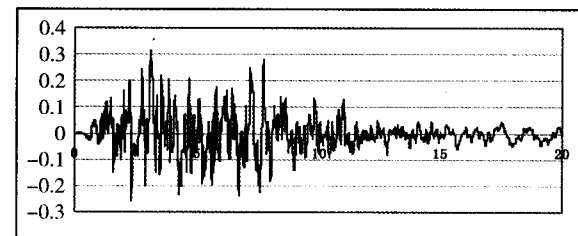


地震波b

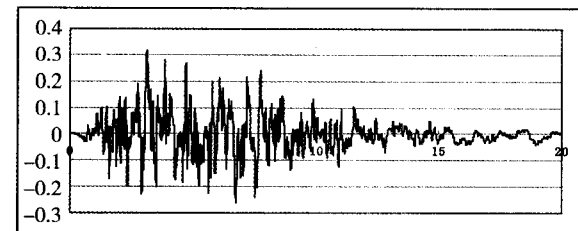


地震波c

图5 E2地震作用地震波加速度时程图



地震波a



地震波b

### 4 隔震支座参数

依据桥梁对支座长期使用的承载力及位移等要求，参考柳州东方工程橡胶制品有限公司设计的规格系列，对隔震支座的规格进行了选取，并引用了其水平参数。

保山岸引桥11号桥台及16号索塔处每个箱梁底部各采用2个铅芯隔震橡胶支座J4Q770×770×180，其剪切屈服力 $Q_y=323\text{kN}$ ，一次刚度 $K_1=23.1\text{kN/mm}$ ，屈服后的二次刚度 $K_2=3.6\text{kN/mm}$ ，竖直刚度 $K=2303\text{kN/mm}$ 。

其余桥墩每个箱梁底部各采用2个铅芯隔震橡胶支座J4Q1070×1070×191，其剪切屈服力 $Q_y=601\text{kN}$ ，一次刚度 $K_1=45\text{kN/mm}$ ，屈服后的二次刚度 $K_2=6.9\text{kN/mm}$ ，竖直刚度 $K=4313\text{kN/mm}$ 。

分析中采用如图6所示的双直线模型。

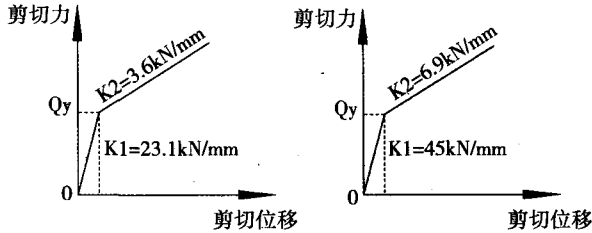


图6 隔震支座的剪切力—剪切位移

### 5 自振特性分析

采用子空间叠代法求解保山岸引桥动力特性，按照设计规范<sup>[4]</sup>规定，结构分析中对应于振型的有效质量总和（即振型参与质量）要占总质量的90%以上，故为了保证计算精度，满足振型在各个方向的轴线参与质量之和达到要求，对该桥梁共计算了50阶振动频率和振型。由于一般情况下结构前几阶自振频率和振型起控制作用，限于篇幅，只给出了该桥梁非隔震和隔震的前10阶振动频率和时间，振动频率和振动周期计算结果列于表1。

表1 保山岸引桥计算单元的自振周期

振型阶次	非隔震		隔震	
	频率 (Hz)	时间 (S)	频率 (Hz)	时间 (S)
1	1.25	0.8	0.87	1.15
2	1.38	0.73	0.91	1.1
3	2.64	0.38	1.29	0.78
4	3.44	0.29	3.08	0.33
5	5.65	0.18	3.35	0.3
6	6.27	0.16	3.75	0.27
7	7.23	0.14	3.94	0.25
8	7.36	0.14	4.07	0.25
9	7.41	0.14	4.66	0.22
10	8.0	0.13	4.88	0.21

### 6 时程分析结果比较

对于传统抗震设计计算，在地震作用下，摩擦滑移支座已经开始滑动，结构变为非线性

结构，理论上反应谱法只适合于计算线性结构。为了提高计算精度，对于非隔震状态下桥梁的地震反应计算也通过地震波时程分析法进行计算。

而对于减隔震设计，在地震作用下，铅芯隔震橡胶支座延长了结构的自振周期，地震造成的位移反应主要集中在支座上，同时由于支座进入非线性状态而耗能，从而减少了桥墩的地震反应，反应谱法只适合于计算线性结构，因此隔震状态下桥梁的地震反应计算也只能用时程分析法。

计算横桥向和顺桥向的桥梁结构的地震响应，由于E1作用下减隔震的效果不明显，因此考虑到篇幅仅将E2地震作用下的计算结果列出见表2~4。

表2 墩顶的位移响应 (m)

项目墩编号	地震波a	地震波b	地震波c	地震波a	地震波b	地震波c	
	非隔震			隔震			
顺桥向	12号墩	0.125	0.122	0.116	0.012	0.011	0.010
	13号墩	0.132	0.129	0.122	0.092	0.087	0.094
	14号墩	0.132	0.129	0.122	0.101	0.097	0.104
	15号墩	0.133	0.130	0.123	0.145	0.138	0.120
横桥向	12号墩	0.026	0.028	0.030	0.005	0.006	0.005
	13号墩	0.051	0.054	0.073	0.034	0.042	0.035
	14号墩	0.097	0.096	0.116	0.042	0.051	0.044
	15号墩	0.149	0.144	0.149	0.061	0.068	0.056

表3 桥墩底部剪力对比

墩编号	项目	地震波a	地震波b	地震波c	地震波a	地震波b	地震波c
		顺桥向			横桥向		
12号墩	非隔震	39785	38562.9	36526.3	26700.2	30754.4	30392.4
	隔震	4300.8	3971.3	4359.4	3360	3845.3	3356.7
	剪力隔震率	0.89	0.90	0.88	0.87	0.88	0.89
13号墩	非隔震	4450.7	4464.7	4272.9	4085.1	4759.7	5606.2
	隔震	3357.8	3146.6	3348.5	3877	4398.7	3945.8
	剪力隔震率	0.25	0.30	0.22	0.05	0.08	0.3
14号墩	非隔震	3824.4	4591.1	3529.3	7197.9	7834.3	8264.2
	隔震	3346.1	3082.7	3131.5	4210	4224.4	4087.1
	剪力隔震率	0.13	0.33	0.11	0.42	0.46	0.51
15号墩	非隔震	3304.7	4274.9	3041.7	8492.8	8857.8	9473.5
	隔震	2666.5	2820.2	2607.3	3936.6	3673.7	3804
	剪力隔震率	0.19	0.34	0.14	0.54	0.59	0.6

(下转第40页)

表1 试件张拉情况表

上游		下游	
序 张拉力号 (kN)	穿管情况	序 张拉力号 (kN)	穿管情况
1# 90	通过	1# 80	通过
2#	距上锚面57cm位置约有2cm的突起,待处理	2# 85	通过
3# 98	通过	3# 90	通过
4# 89	通过	4# 90	通过
5#	距上锚面70cm位置约有2cm的突起,待处理	5# 95	通过
6# 92	通过	6# 88	通过
7# 95	通过	7# 85	通过
8# 90	通过	8# 89	通过
9# 93	通过	9# 88	通过
10# 95	通过	10# 86	通过
11# 98	通过	11# 85	通过
12# 95	通过	12# 87	通过
13# 99	通过	13#	距上锚面97cm位置,预埋管存在折角,待处理
14# 88	通过	14# 90	通过
15# 86	通过	15# 88	通过
16# 95	通过	16# 87	通过
17# 87	通过	17# 89	通过
18# 79	通过	18# 85	通过
19# 70	通过	19# 87	通过

经过以上操作后,为保护锚头能顺利穿过而破坏螺牙,需要进一步的验证,因此加工一个空心钢构件,尺寸为:长550mm、外径 $\phi$ 200.8mm。利用人力进行牵引号,对1#-19#预埋管由下至上依次试穿。最终结果是只需依靠3个人的力量就能顺利通过。因此确信该方案是成功,同时省去了最后一个更换锚头的方案,节省了大量的时间和成本。

## 5 结论

对预埋管偏小这一难题提出了多种解决方案,并通过在南平桥的实际应用了解到,采用不同直径的试件牵引张拉能有效解决预埋管偏小而造成锚头无法穿过的问题。该方案既降低了成本又缩短了施工时间,是一个可行的方案。但在实际操作中要严格控制牵引张拉力,避免在实际操作中破坏了原有锚碇的结构。本次施工为今后碰到类似的问题提供了宝贵经验。

### 参考文献

- [1] 邓文英等. 金属工艺学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999
- [2] 李洪等. 机加工工艺手册[M]. 北京: 北京出版社, 1999
- [3] JT/T 395-1999. 悬索桥预制主缆丝股技术条件[S].

(上接第36页)

表4 桥墩底部弯矩对比

墩编号	项目	地震波			地震波		
		a	b	c	a	b	c
		顺桥向			横桥向		
12号墩	非隔震	543778	531711	502995	339544	377620	384075
	隔震	51369.1	49179	51234.8	49442.5	55694.7	48538
	弯矩隔震率	0.91	0.91	0.90	0.86	0.85	0.87
13号墩	非隔震	120440	114771	112447	119203	132967	171541
	隔震	79206.6	75306.3	82839	91136.8	106739	91620.8
	弯矩隔震率	0.34	0.34	0.26	0.24	0.2	0.47
14号墩	非隔震	108202	102983	97777.8	219884	219084	248036
	隔震	80357.1	78211.2	77899	99913.5	113943	102234
	弯矩隔震率	0.26	0.24	0.20	0.55	0.48	0.59
15号墩	非隔震	90241.9	91762.9	76418.3	272228	260554	280568
	隔震	80832	84388	73161.7	109210	120980	98286.8
	弯矩隔震率	0.11	0.08	0.04	0.6	0.54	0.65

其中减隔震率定义:

$$\text{减隔震率} = \frac{\text{非减隔震结果} - \text{减隔震结果}}{\text{非减隔震结果}} \times 100\%$$

## 7 结论

(1) 在E2地震作用下,采用传统抗震方式时,固定盆式支座由于变形能力不够,已经发生剪切破坏,与此同时桥墩底部内力分布极度不合

理,12号墩墩底内力偏大,与其他墩形成强烈的对比,这种状态严重影响桥梁的安全运行,甚至由于个别墩的破坏而导致桥梁倒塌。

(2) 在E2地震作用下,采用传统抗震方式时顺桥向和横桥向在桥墩底部都将产生巨大的弯矩,而使用了铅芯橡胶支座的隔震结构延长了桥梁的自震周期,同时大幅地减小了桥墩的剪力和弯矩,其中桥墩底部的剪力最大减少了90%,弯矩最大减少91%,取得了很好的隔震效果,保证了结构的安全。

### 参考文献

- [1] Yuan, Y., Aoki, T. and Yamamoto, Y. Experiment Study of the Dynamic Behavior of high-damping-rubber bearing isolator[C] //the First International conference on Advances in Experimental Structural Engineering. Nagoya, Japan 2005:505-511.
- [2] Nakashima, M., Kato, H. and Takaoka, E. Development of Real-time Pseudo Dynamic Testing[J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamic, 1992, 21: 79-92.
- [3] 朱文正, 刘建新. 铅芯橡胶支座对桥梁抗震性能的影响[J]. 长安大学学报(自然科学版). 2004年1月. 第24卷第1期
- [4] 重庆交通科研设计院. 公路桥梁抗震设计细则[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008