

# 低温对铅芯橡胶支座性能及桥梁隔震效果影响探讨

资道铭 韦亮陆 梁煜 莫曲浪

(柳州东方工程橡胶制品有限公司 广西柳州 545005)

**摘要:**2008年发生在四川的汶川大地震,极大推动了减隔震技术在中国的发展。在国内,用于桥梁减隔震设计技术的各类减隔震装置也纷纷面世。其中,铅芯隔震橡胶支座是其中应用最广泛的隔震装置之一。由于中国地域广阔,各地方的环境、气候差异非常大,其最低温度从 $0^{\circ}\text{C}$ 到 $-40^{\circ}\text{C}$ 均不一样,铅芯橡胶支座的低温性能怎么样,是否适合在中国各个地区使用,是本文要探讨的内容。

**关键词:**地震 铅芯隔震橡胶支座 低温 隔震

## 1 前言

2008年发生在我国四川的5.12汶川大地震,对震区大量的建筑、桥梁结构造成了毁灭性的破坏,也给灾区人们带来了巨大的灾难<sup>[1]-[2]</sup>。但这次地震对我国桥梁抗震技术的发展却起到了很大的推动作用,经过这次地震,我国各界均对结构的抗震技术进行了新的思考。汶川地震发生后几个月,交通部颁布了新的桥梁抗震规范<sup>[3]</sup>,与旧版桥梁抗震规范<sup>[4]</sup>相比,增加了减隔震设计的相关内容,使这种新的桥梁抗震思路与方法在国内应用有了法律依据,极大促进了我国公路桥梁的减隔震技术的发展。

减隔震技术是指通过采用减隔震装置来延长桥梁结构的自振周期,额外消耗地震能量,减少桥墩顶部的地震位移反应,同时减小了上部结构的加速度反应,以保证桥梁的安全。

随着人们对减隔震技术的认识,国内出现了多种用于桥梁减隔震设计的产品类型,而铅芯隔震橡胶支座是最早被使用并且应用得最广泛的隔震产品。

但由于中国地域广阔,各地方的环境、气候差异非常大,其最低温度从 $0^{\circ}\text{C}$ 到 $-40^{\circ}\text{C}$ 均不一样。因为隔震装置的水平性能会影响桥梁的隔震效果,铅芯橡胶支座的性能随着温度的变化,其水平性能会怎么样变化,其性能的变化对桥梁隔震效果有多大的影响,这种影响使其是否适合在

极低温地区使用,或在不同地区使用时需要注意什么,是个值得研究与探讨的课题。

## 2 低温对铅芯隔震橡胶支座性能的研究

### 2.1 铅芯隔震橡胶支座的结构

铅芯橡胶支座由橡胶层、钢板等迭层粘结再灌入铅芯棒组合而成(结构如图1)。钢板提高支座竖向刚度,使之能有效地支承桥梁上部结构和建筑物结构;橡胶层赋予支座高弹性变形及复位和承载的功能;铅金属有一种叫做“再结晶”的性能,铅芯棒在支座发生剪切变形时会被挤压变形、剪断,而后又会慢慢结晶起来,这个过程中便会消耗能量,从而吸收能量,增大支座的阻尼。因此,铅芯隔震橡胶支座既具有较高的承载性,又具有较大的阻尼,大水平位移能力和复位功能。

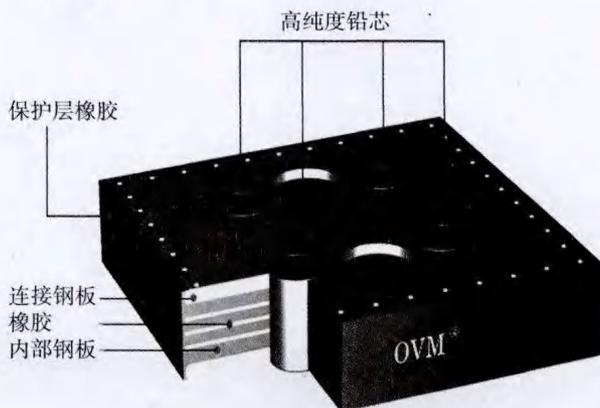


图1 铅芯隔震橡胶支座(LRB)结构

铅芯震橡胶支座由叠层橡胶支座加铅棒后水平力学性能变化的原理如图2,影响其水平性能的材料主要是支座的橡胶体及铅芯棒。温度变化对铅芯隔震橡胶支座水平性能的影响也主要体现在对橡胶及金属铅的影响。

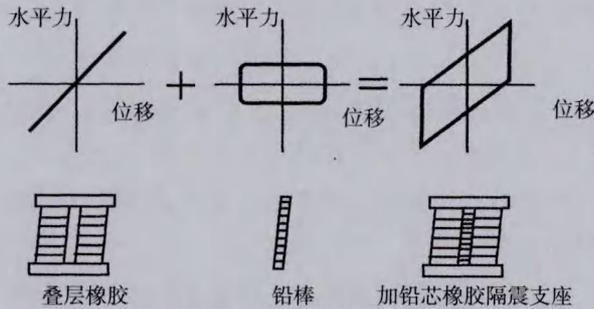


图2 加铅芯叠层橡胶隔震支座的力学叠加原理

## 2.2 低温对铅芯隔震橡胶支座性能影响的研究

### (1) 低温对橡胶材料的影响研究

对橡胶的低温性能要求可以从两方面考虑,一是橡胶的低温脆性,二是橡胶在低温下的结晶。低温脆性外在表象是橡胶在低温情况下的冲击脆断,而低温结晶外在表象是橡胶模量的改变。铅芯隔震橡胶支座一般使用的是天然橡胶,众所周知,天然橡胶的低温脆性可达到 $-50^{\circ}\text{C}$ 以下,本文不再赘述;而低温对天然橡胶模量的影响,是本文要研究的。

根据标准<sup>[5]</sup>,我们对铅芯橡胶支座所用胶料在 $40^{\circ}\text{C}$ 、 $23^{\circ}\text{C}$ 、 $0^{\circ}\text{C}$ 、 $-10^{\circ}\text{C}$ 、 $-25^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ 的弹性模量进行测试,测试结果见图3,橡胶在 $-40^{\circ}\text{C}$ 时与 $23^{\circ}\text{C}$ 时的模量值变化最大值为+24%。

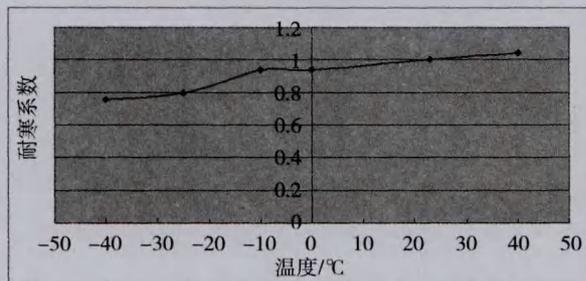


图3 铅芯橡胶支座胶料模量随温度变化图

### (2) 低温对铅芯橡胶支座的影响研究

由于影响铅芯橡胶支座水平性能的只有橡胶与铅棒两种材料,橡胶变化已经测出,铅的温度性能我们不再单独检测,而是直接对支座进行不

同温度检测,图4~图7列出了支座在 $23^{\circ}\text{C}$ 、 $40^{\circ}\text{C}$ 、 $-25^{\circ}\text{C}$ 、 $-40^{\circ}\text{C}$ 温度试验滞回曲线。表1中列出了支座在不同温度情况下的水平力学性能值。

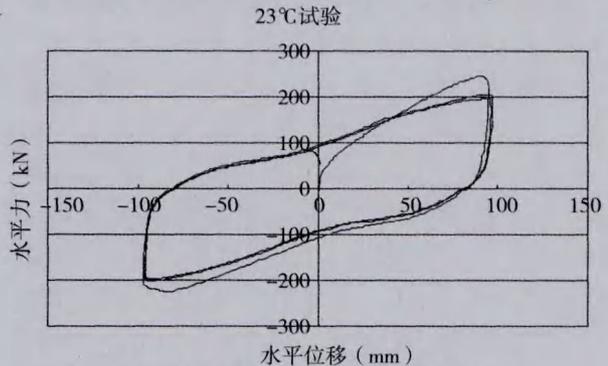


图4 铅芯橡胶支座 $23^{\circ}\text{C}$ 试验滞回线

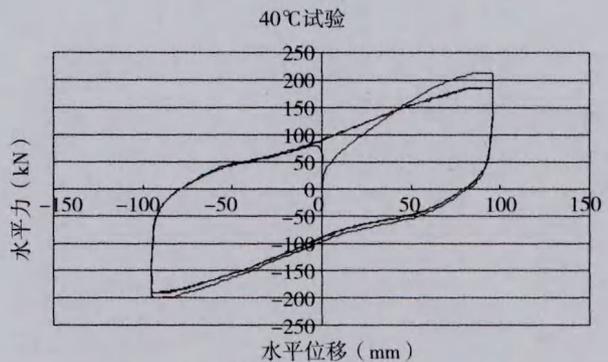


图5 铅芯橡胶支座 $40^{\circ}\text{C}$ 试验滞回线

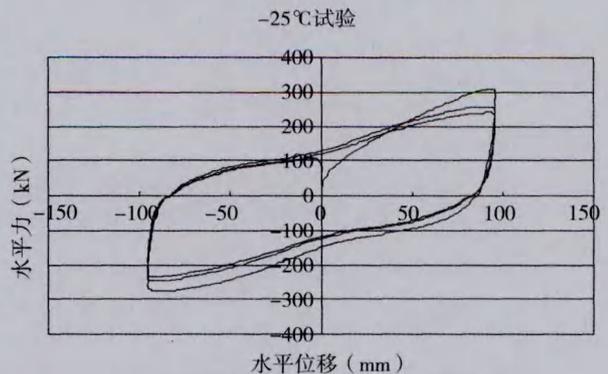


图6 铅芯橡胶支座 $-25^{\circ}\text{C}$ 试验滞回线

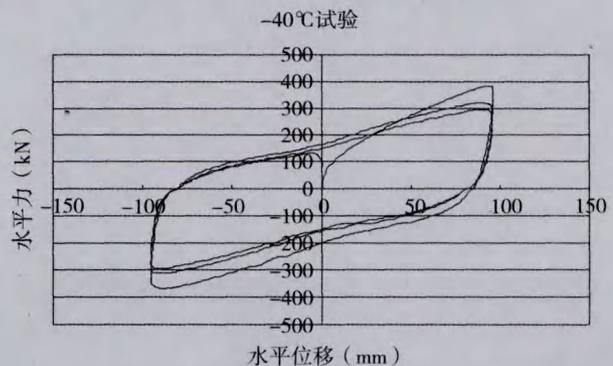


图7 铅芯橡胶支座 $-40^{\circ}\text{C}$ 试验滞回线

表1 铅芯橡胶支座不同温度水平性能值

水平性能	温度/℃					
	23	40	0	-10	-25	-40
二次刚度k <sub>2</sub> (kN/mm)	1.14	1.05	1.16	1.28	1.36	1.59
等效刚度k <sub>v</sub> (kN/mm)	1.95	1.86	2.04	2.32	2.38	2.81
铅屈服力Q (kN)	91	89	100	117	120	155
阻尼	0.3	0.29	0.28	0.32	0.32	0.33

图8中列出了支座二次刚度、水平等效刚度、铅芯屈服力及支座阻尼比随着温度改变的变化率。由图可以看出,与23℃试验值相比,温度从40℃时到-40℃,支座水平性能还是有一定变化的,但整体表现可控。其中阻尼值变化在10%以内,而铅芯屈服力在-25℃以下温度时,变化明显增加,说明极低温对铅芯材料的力学性能是有一定影响的,而支座的二次刚度与等效刚度,由于是与铅芯棒共同作用表现的力学现象,与纯橡胶受温度变化影响不大有些不同,其值由-25℃增加22%、19%,到-40℃增加44%、39%。

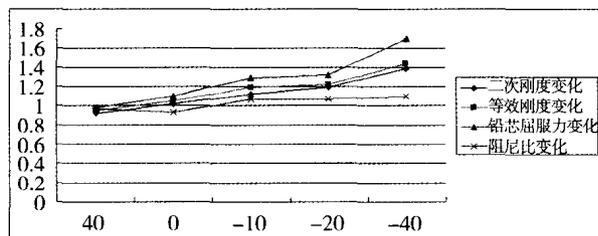


图8 支座二次刚度、水平等效刚度、铅芯屈服力及支座阻尼比随温度变化图

## 2.3 小结

(1) 铅芯隔震橡胶支座所用的天然橡胶耐

低温性能较好,在-40℃还未发生结晶;

(2) 温度-25℃以下对铅的性能影响较大,-40℃情况下铅芯屈服强度增加达到70%;

(3) 由于铅芯橡胶支座所用的橡胶耐低温性能较好,与铅芯棒组合后的隔震支座整体耐低温性能表现还比较理想,与23℃时相比较,在-25℃及-40℃,二次刚度分别增加22%、44%,等效刚度增加19%、39%。当然,这种增加,还需相应分析其对桥梁隔震效果的影响。

## 3 低温对铅芯隔震橡胶支座用于桥梁隔震效果影响的分析探讨

针对铅芯隔震橡胶支座随温度降低而性能出现的变化,本文对支座产生变化后的性能参数分别输入实桥隔震体系,以分析温度变化后桥梁隔震效果有何变化。由前文可知,在+40℃、0℃、-10℃情况下,铅芯隔震橡胶支座的性能变化比较小,分析时我们不再考虑,只做23℃与-25℃、-40℃的比较,以了解支座用于低温地区的边际条件或注意事项。

### 3.1 工程简介

分析计算模型取整桥为研究对象,结构为3×20m+3×20m两联连续箱梁,箱梁为单箱双室截面。桥面宽10.5m,墩高最高10m,最矮3m,采用直径为1.5m双柱圆形墩,桩基采用单柱桩D160,桥梁立面图如图9、图10所示。

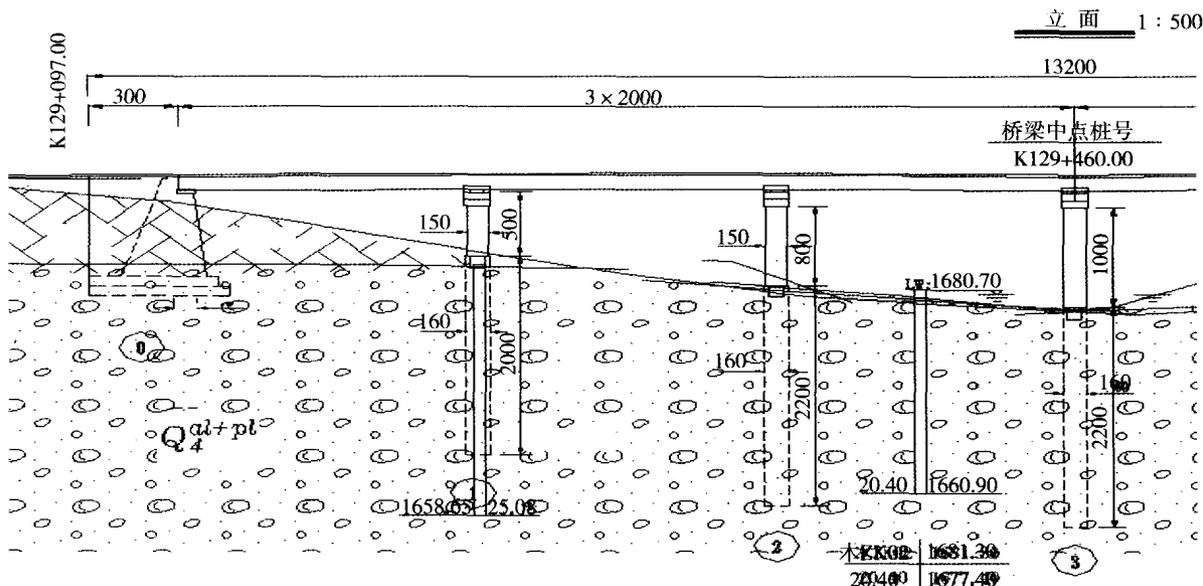


图9 0#~3#墩台桥梁立面图

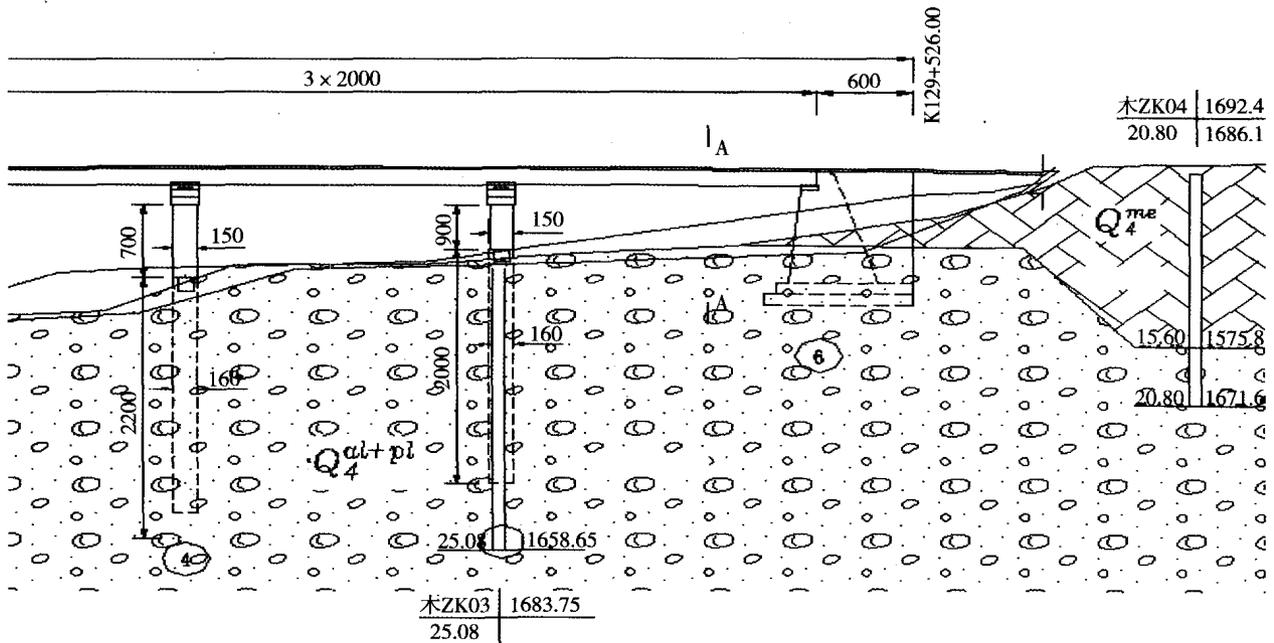


图10 4#~6#墩台桥梁立面图

所选的特征桥址所在地抗震设防烈度为8度,基本加速度峰值为 $0.2g$ ,场地类型为II类场地土,根据《抗震细则》的9.3.6条规定,混凝土梁桥、拱桥的阻尼比不宜大于 $0.05$ ,因此在这里取阻尼比为 $0.05$ 。

本桥抗震设防类别为B类,场地卓越周期 $T_g=0.35s$ ,按抗震规范6.1.3,本桥属于非规则桥梁。

依据空间梁格杆系理论,采用Midas/Civil 2012软件进行计算分析,对结构模型进行非线性时程分析计算,边界条件两台位置采用支座底固结,其他各墩采用墩底固结。

建立全桥模型如图11所示:



图11 全桥模型

在建模时,各构件截面特性、连接方式及边界条件均按实际情况确定,较为真实地模拟实际结构的力学特点。

为了对比桥梁低温时隔震效果及其与传统抗震方法相比较,现采用以下4种工况进行分析。

(1) 支座布置为传统的抗震结构方式:支座采用抗震盆式支座,2#、4#墩均采用一固定盆

式支座,其余墩、台采用单向活动及双向活动盆式支座;

(2)  $23^{\circ}\text{C}$ 时铅芯橡胶支座用于桥梁隔震效果分析;

(3)  $-25^{\circ}\text{C}$ 时铅芯橡胶支座用于桥梁隔震效果分析;

(4)  $-40^{\circ}\text{C}$ 时铅芯橡胶支座用于桥梁隔震效果分析。

### 3.2 地震动输入

本桥E1、E2作用均可采用TH分析计算方法。

结合桥梁资料,根据抗震规范,该桥的抗震重要性系数 $C_i$ 对E1地震作用取 $0.5$ ,对E2地震作用取 $1.7$ , $C_s$ 场地系数取 $1$ , $C_d$ 阻尼调整系数取 $1$ ,A设计基本加速度峰值取 $0.2g$ ,因此,水平设计加速度反应谱最大值 $S_{\max}=2.25C_iC_sC_dA$ ,对E1为 $2.205\text{m/s}^2$ ,对E2为 $7.4925\text{m/s}^2$ 。对应计算得到地震波加速度峰值对E1为 $0.98\text{m/s}^2$ ,对E2为 $3.33\text{m/s}^2$ 。

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,应采用多条地震波进行计算分析,为便于比较,现选用三条实际记录的地震波,根据计算得到的加速度峰值对地震波进行调整后得到的地震波加速度时程曲线如图12和图13所示。

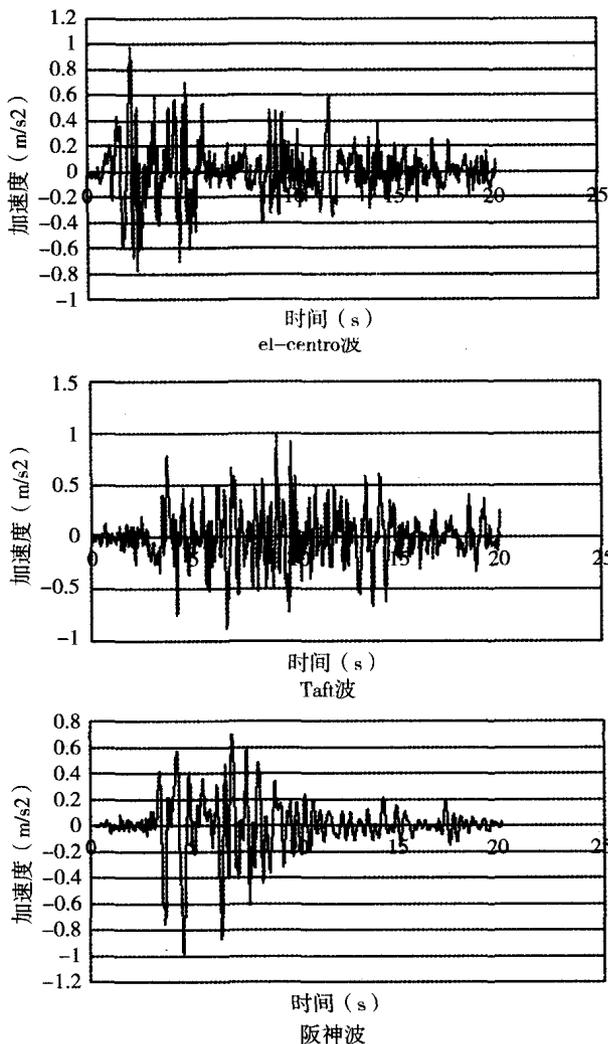


图12 E1地震各地震波加速度时程曲线

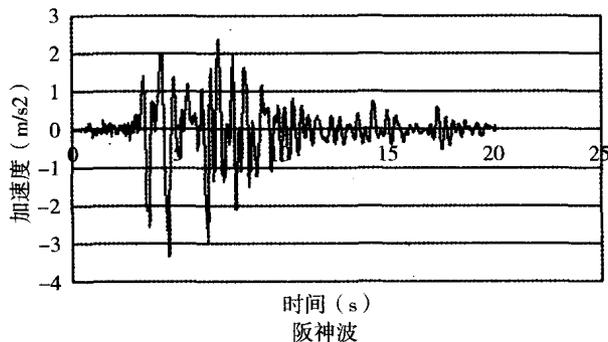
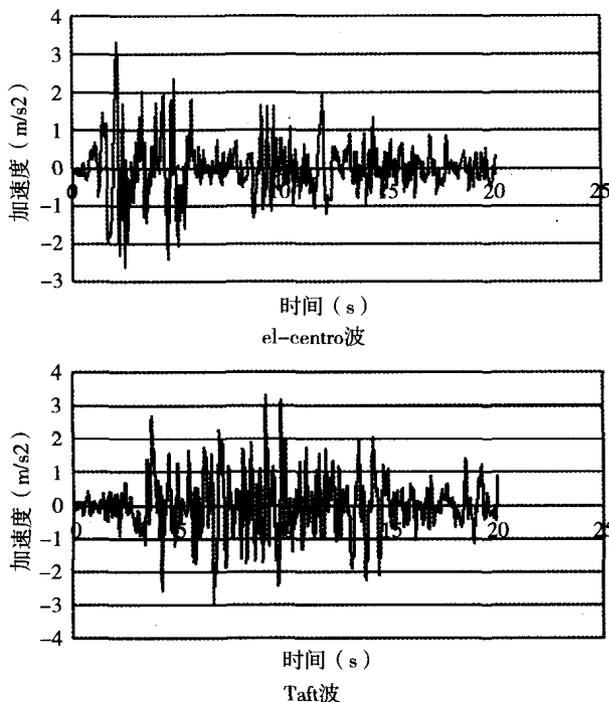


图13 E2地震各地震波加速度时程曲线

### 3.3 隔震方案及支座参数

在本文中，以下把未采取隔震装置的桥梁结构简称为“抗震结构”，而把采用隔震装置的结构简称为“隔震结构”。支座布置方案为：0#、6#台及3#墩（左右）均采用J4Q420×420×125，而1#、2#、4#、5#墩均采用J4Q720×720×137。在本报告中对应23℃、-25℃及-40℃不同温度情况，分别采取3种隔震方案，对上述不同抗震（隔震）结构的动力计算模型进行了相应的修改，对应不同温度的隔震结构分别简述为隔震一、隔震二、隔震三。支座在相应几种温度时水平性能见表2。

表2 支座在不同温度时水平性能值

水平性能	支座型号					
	420×420×125			720×720×137		
	温度℃			温度℃		
	23	-25	-40	23	-25	-40
一次刚度(kN/mm)	8.26	9.85	11.51	22.82	27.22	31.82
二次刚度(kN/mm)	1.27	1.52	1.77	3.51	4.19	4.90
等效刚度(kN/mm)	2.12	2.59	3.05	5.50	6.71	7.93
铅屈服力(kN)	94	124	160	262	345	446
支座阻尼比	0.22	0.23	0.24	0.21	0.22	0.23

### 3.4 动力特性分析

连续梁的动力特性是研究连续梁动力行为的基础，其自振特性决定其动力响应的特性。本节首先采用图11计算模型，对该桥进行了动力特性分析，前5阶自振频率如表3所示：

抗震结构的基频为1.045Hz，结构前5阶振型特征主要表现为主梁纵飘和侧向弯曲振动。与抗震结构相比，三种温度情况下隔震结构的基频分别为0.736Hz，0.804Hz，0.864Hz，与抗震结构相比，基频均有不同程度的减小，可以减小地震响应。

表3 不同方案情况下结构自振频率及周期

序号	抗震结构 频率 (Hz)	隔震一 频率 (Hz)	隔震二 频率 (Hz)	隔震三 频率 (Hz)
1	1.045	0.736	0.804	0.864
2	1.229	0.752	0.826	0.892
3	3.234	0.762	0.838	0.906
4	3.350	0.769	0.848	0.920
5	5.954	0.785	0.866	0.939

## 3.5 结构地震响应分析

本文采用时程法计算时, 选用提供的3条地震波作用下结构地震响应的最大值, 计算结果均只考虑地震作用效应, 由于只作隔震效果比较, 未提取桩的受力。而且受篇幅所限, 本文只提取E2地震作用下的数据进行比较。

表4 支座水平反力

位置	抗震		隔震一		隔震二		隔震三	
	纵桥向kN	横桥向kN	纵桥向kN	横桥向kN	纵桥向kN	横桥向kN	纵桥向kN	横桥向kN
0#台顶	30	1436	193	187	243	251	315	287
1#墩顶	100	3279	514	512	646	687	834	804
2#墩顶	3500	2978	482	501	588	673	740	805
3#墩顶	30/30	1864/910	173/168	184/182	217/216	243/241	279/271	297/295
4#墩顶	4117	3212	479	504	616	672	767	811
5#墩顶	100	3823	512	513	664	684	845	808
6#台顶	30	2032	186	186	244	248	311	286

表5 梁位移

位置	抗震		隔震一		隔震二		隔震三	
	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm
0~3#墩	136	21	89	84	91	97	102	100
3~6#墩	111	21	84	85	92	96	99	99

表6 支座位移(剪切变形)

位置	抗震		隔震一		隔震二		隔震三	
	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm
0#台顶	136	0	89	85	90	97	102	86
1#墩顶	135	1	83	83	85	95	93	87
2#墩顶	0	1	74	80	71	91	74	87
3#墩顶	142/115	0/0	73/70	82/81	74/73	91/90	81/77	91/90
4#墩顶	0	1	73	80	77	91	80	89
5#墩顶	111	1	83	83	89	94	95	88
6#台顶	111	0	84	84	92	94	99	85

表7 墩顶位移

位置	抗震		隔震一		隔震二		隔震三	
	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm	纵桥向位移 mm	横桥向位移 mm
1#墩顶	2	4	5	1	7	2	9	2
2#墩顶	105	14	16	4	21	5	28	7
3#墩顶	19	26	22	5	29	7	39	9
4#墩顶	84	10	11	3	15	4	20	5
5#墩顶	1	2	2	0	2	1	3	1

表8 桥墩关键截面的地震内力响应

位置	抗震				隔震一				隔震二				隔震三			
	纵桥向		横桥向		纵桥向		横桥向		纵桥向		横桥向		纵桥向		横桥向	
	M(kN*m)	Q(kN)														
1#墩顶	2083	372	5675	1965	2955	477	1513	504	3892	597	1973	649	5095	788	2439	810
2#墩顶	35569	3790	8353	1919	4282	472	2211	503	5487	571	2804	611	7402	776	3599	795
3#墩顶	4457	471	10342	1968	4058	380	2057	408	5281	499	2517	482	7186	676	3220	626
4#墩顶	36401	4353	7502	1939	3711	449	1971	496	4959	577	2508	616	6556	772	3224	803
5#墩顶	1022	252	4461	2364	2062	467	1056	524	2755	618	1376	673	3575	807	1697	832

### 3.6 小结

(1) 与传统的抗震结构相比,用铅芯隔震橡胶支座做隔震设计,在从+40℃到-40℃各种温度环境下,桥梁基频均有一定程度的减小,可以减小地震响应。

(2) 单从隔震体系看,在-40℃环境温度下,相对23℃温度条件下,隔震桥梁的受力会有所增大,但增加值仍在可接受范围内,而与传统抗震方法相比,使用铅芯隔震橡胶支座隔震设计,在各温度下,仍都具有非常良好效果,都可以大幅度减小地震力引起的上部梁结构对下部墩体结构作用力。在23℃、-25℃、-40℃温度环境,E2地震作用下,铅芯橡胶支座在顺桥向的最大隔震率分别为89%、86%和82%,横桥向的最大隔震率分别为80%、75%和68%(隔震率是指以下结构受力的比值:(非隔震结构-隔震结构)/非隔震结构)。在顺桥向布置活动支座的墩上,隔震后墩的受力反而会增大,那是由于这些墩在抗震结构中根本不承担什么地震力,使用隔震方式后,这些墩力值增大恰恰使墩底内力分布更加合理,减少内力分布集中于某一固定墩上,使地震力均匀分配到各个墩上。

(3) 在23℃、-25℃、-40℃温度环境,E2地震作用下,铅芯橡胶支座在顺桥向的最大位移(剪切变形)分别为89mm、90mm、102mm,横桥向分别为85mm、97mm、86mm;而纵桥向相应产生的支座最大反力为514kN、646kN、834kN,横桥向为512kN、687kN、804kN。

(4) 本分析中,是假定支座不会破坏,实际上,根据计算结果,抗震方式的固定支座在E2地震作用顺桥向受力达到了竖向承载力的91%,而横桥向达到了竖向承载力的71%,一些单向活动支座的横桥向受力也达到了竖向承载力的60%以上,支座早已经被破坏。虽然说支座破坏可能

对桥墩受力有些好处,但由于失去支撑,梁体也将发生很大的损坏甚至发生落梁。

### 4 结论

(1) 温度变化对铅芯隔震橡胶支座的水平性能是有一定影响的,在-25℃温度以后,支座性能变化率明显增大;

(2) 分析结果表明,使用传统的钢支座作抗震设计,支座所承受的水平力,远远超出传统抗震盆式支座所能承受的能力(水平力一般为竖向承载力的20%);即使专门针对水平力进行支座设计,一是支座本身结构不太合理,二是设计出的支座可以抵抗地震力,但其巨大的力也要传递到墩台结构,使墩台结构难以设计;

(3) 温度变化使铅芯隔震橡胶支座的性能发生变化,对桥梁隔震的效果也是有影响的。随着温度的降低,支座水平刚度会增大,隔震桥梁所受的地震力也会增大,并且地震力反应相对支座刚度增加还有放大效应;值得注意的是,温度降低,支座刚度增大后,E2地震下桥梁位移反应并没有减小;

(4) 在最低温-25℃地区,使用铅芯橡胶支座的隔震桥梁,温度影响效应不是较小,设计时可以不用再考虑温度的影响;而在-40℃的环境,使用铅芯橡胶支座进行隔震设计仍比传统抗震方法有巨大的优势,但动力反应增加达70%,所以设计时需考虑低温影响,做相应的动力分析,增加墩柱的抗弯、抗剪能力。

#### 参考文献

- [1] 陈乐生. 汶川地震公路震害与分类[J]. 西南公路, 2010.(2)
- [2] 庄卫林, 将劲松. 四川公路桥梁震后抢通、保通及恢复技术[J]. 西南公路, 2010.(2)
- [3] JTG/T B02-01-2008. 公路桥梁抗震设计细则. 北京:人民交通出版社, 2008
- [4] TJ004-89. 公路工程抗震设计规范. 北京:人民交通出版社, 1989
- [5] HG/T 3866-2008. 硫化橡胶压缩耐寒系数的测定. 化工出版社, 2008