

# 平塘大桥特殊支座设计与试验研究

唐志<sup>1</sup>,马白虎<sup>2</sup>,杜滨<sup>1</sup>,徐向东<sup>1</sup>,夏俊勇<sup>3</sup>

(1.贵州省交通规划勘察设计研究院股份有限公司,贵州 贵阳 550081;2.贵州省公路开发有限责任公司,贵州 贵阳 550081;  
3.株洲时代新材料科技股份有限公司,湖南 株洲 412000)

**摘要:**平塘特大桥16#墩支座竖向承载力为10 000 kN,其纵桥向水平承载力达12 000 kN,为竖向承载力的120%,且支座转角需达到0.05 rad的技术参数需求,远远超过了常规公路支座10%~40%的水平力要求。针对具体工程情况,设计了具有超大水平承载力的新型支座。首先建立支座有限元模型分析支座的力学性能,并对支座性能和支座材料耐久性进行测试研究,结果表明:新型支座未发生明显应力集中现象,纵向转角对各构件应力的影响程度大于横向转角,支座采用弧面转动套结构设计可以保证水平力传递均为面 and 面传递;缩比支座各试验结果满足相应规范要求,支座能够满足极限工况下的强度要求,不会发生应力破坏;采用S-Lide 耐磨滑块和高耐久性防腐体系设计可以大大提高支座耐滑性与防腐性。

**关键词:**球形支座;超大水平承载力;弧面转动套;S-Lide 耐磨滑块;试验

**中图分类号:**U443.36

**文献标志码:**A

## 0 引言

近年来,中国桥梁建设向超大跨、高难度、高技术方向发展。西南地区地形复杂、环境恶劣,多塔、超高墩、超高承载力的桥梁结构不断涌现,这类桥梁对支座的要求程度远远高于普通跨径桥梁,往往要求具有超高承载力和大变位的性能,因此需要根据桥梁结构体系对支座的特殊要求进行专门设计。国内外学者纷纷展开了对大跨桥梁支座的研究。吴桂西<sup>[1]</sup>基于摩擦自锁原理提出了一种便于更换的新型球形支座(这种支座在更换时不需要像传统支座一样中断交通),通过理论研究、有限元计算和试验相结合,探究了新型球形支座的力学性能;李小鹏<sup>[2]</sup>将板簧的自恢复能力和软钢的塑性耗能能力运用于传统球形支座上,得到了一种具有耗能功能的新型球形支座,并基于Abaqus软件对该新型支座的力学性能进行了研究;孙新阳等<sup>[3]</sup>基于Haringx理论和橡胶支座的线性假定,提出了橡胶支座在达到临界状态下的新型理论计算模型,并结

合振动台试验,对这种计算模型进行了对比验证,结果表明这种新型模型可以解决当前分析计算过程中误差较大的问题;张颖周<sup>[4]</sup>利用金属材料不容易老化的特性,给出了板式橡胶支座的新型支座,即采用金属材料代替橡胶材料,并结合振动台试验对该新型支座的力学性能进行了研究;吴倩芸等<sup>[5]</sup>基于Perform-3D软件和铅芯橡胶支座的剪切试验,对某小高层隔震结构在不同地震强度下进行弹塑性分析,结果表明硬化效应会提高地震响应。此外,测力球型支座应用前景较好<sup>[6]</sup>,已有研究表明采用新型支座有利于铁路桥梁支座病害防治<sup>[7-8]</sup>,新型球型钢支座<sup>[9]</sup>、双曲面球型支座<sup>[10]</sup>对铁路桥梁修建提供了技术支撑。

平塘大桥是一座山区超高墩大跨三塔斜拉桥,对中塔支座有特殊要求(水平承载力和变位大),目前市场上的支座不能满足桥梁结构设计要求。为了解决平塘大桥中塔支座问题,设计了一款新型特殊的球形支座,本文通过有限元计算和试验测试,以验证该新型特殊球形支座的力学性能及耐久性问题,为桥梁特殊支座设计提供参考。

收稿日期:2022-09-10(修改稿)

基金项目:贵州省重大科技专项计划项目(编号:黔科合重大专项字[2016]3013)

作者简介:唐志,男,硕士,正高级工程师.E-mail:105301248@qq.com

1 超高水平力特殊球形支座设计

1.1 平塘大桥球形支座参数

平(塘)罗(甸)高速公路平塘大桥位于贵州省平塘县,设计桥梁宽度为30.2 m,主桥为(249.5+550+550+249.5) m三塔叠合梁斜拉桥,其中索塔采用钻石形空间塔,16#塔高332 m,从塔底到塔顶高336 m,这一高度为目前亚洲第一高,也是目前世界同类型桥梁的第一高塔,桥型布置如图1所示。图2为支座

布置方式,平塘大桥16#塔固定型支座各向设计位移为0;横向型支座顺桥向设计位移为0,横桥向支座设计位移为±40 mm。竖向承载力为10 000 kN,其纵桥向水平承载力达12 000 kN,为竖向承载力的120%,且支座转角需达到0.05 rad,远远超过了常规公路支座10%~40%的水平力。同时,常规支座结构发生转动时水平承载是线接触,水平应力集中对支座影响不明显,但该支座水平力很大,线接触方式对支座结构受力极为不利。限于篇幅,本文以横向型支座为例,阐述16#塔墩处支座的设计和试验验证。

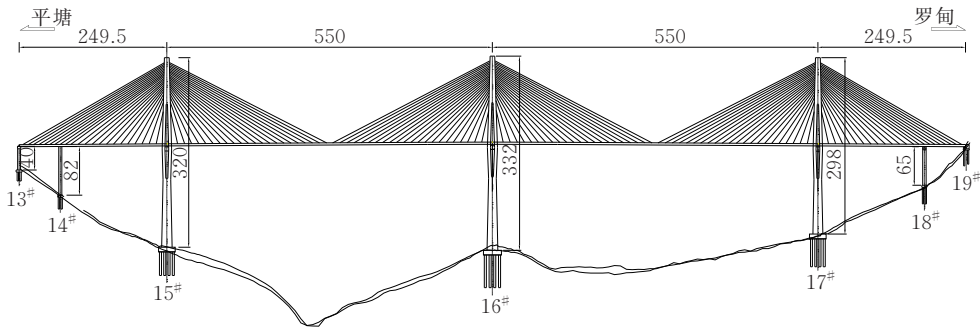


图1 平塘大桥桥型布置图(单位:m)

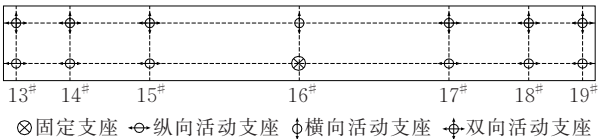


图2 支座布置示意图

1.2 平塘大桥特殊球形支座特点

为满足平塘大桥支座的特殊要求,有必要对超高水平承载力横向型支座进行特殊结构设计,支座构造示意如图3所示。

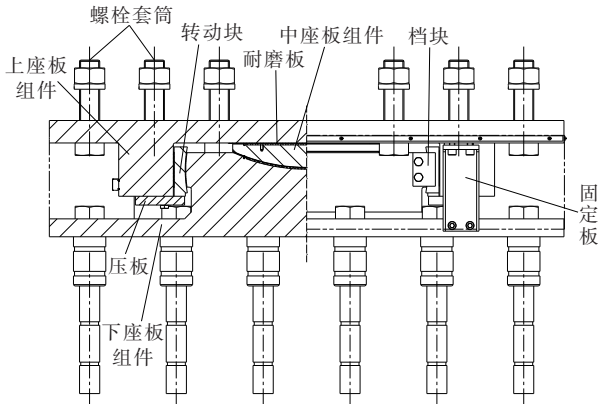


图3 特殊支座设计构造示意图

相较于传统球形支座,此支座优点有:

(1) 横向型支座采用弧面和弧面配合承载水平

力,设计了转动套结构,支座转动发生在转动块弧面处,支座滑动发生在转动块平面处,实现转动面和滑动面分离,避免出现常规支座转动后水平应力集中情况,并且保证水平力传递均为面 and 面传递,受力更加均匀。

(2) 转动块下部设置了弧形面,以保证支座横桥向转动,选取合适的设计弧面半径和球冠衬板半径,通过上座板配合滑动补偿,实现支座顺桥向和横桥向转动功能。

(3) 支座采用新型摩擦材料S-Lide板,大大降低了支座摩擦系数和线磨耗率,延长了支座使用寿命。

(4) 支座采用新型高耐久性防腐涂装体系,其使用寿命为20~33年,可减少支座防腐维护成本,与传统防腐体系相比有较大优势,延长了支座使用寿命。

2 支座主体结构有限元计算

2.1 有限元模型

基于Abaqus软件对该特殊球形支座进行有限元计算,球形钢支座分为8个部分,均采用C3D8R单元模拟。上座板、中座板、下座板、平面耐磨板、球面耐磨板、挡块、转动块、耐磨条、加载用承载板的单元个

数分别为 2 684 个、2 174 个、30 960 个、616 个、1 552 个、1 920 个、24 044 个、1 008 个、1 224 个。

为方便后续支座主体有限元计算,表 1 为支座所用材料及材料性能。

表 1 球形钢支座金属材料力学特性

材料名	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应 力/MPa	零件名
ZG270-500	210.00	0.300	270	上/下座板
Q345B	210.00	0.300	345	中座板/挡块/转动板
耐磨板	0.85	0.400	400	平面/球面耐磨板
SF-1B	2.40	0.350	140	耐磨条
40Cr	211.00	0.277	500	锚固螺栓

## 2.2 工况设置

为检验设计的特殊球形支座是否具有承载能力大、变位(位移和转角)大和螺栓抗剪能力高等特点,设置表 2 所示的 4 种工况。

表 2 计算工况

工况编号	竖向荷载/kN	纵向荷载/kN	备注
1	10 000	12 000	—
2	10 000	12 000	纵桥向转角±0.05 rad
3	10 000	12 000	横桥向转角±0.05 rad
4	10 000	12 000	锚固螺栓强度校核

## 2.3 钢支座应力分析结果

不同工况下支座各构件应力结果见表 3。

表 3 各构件应力结果

构件 名称	不同工况下各构件应力/MPa				屈服强 度/MPa	是否满 足要求
	1	2	3	4		
上座板	104.80	131.90	150.90	—	345	是
中座板	52.57	84.61	79.90	—	345	是
下座板	194.30	258.10	255.60	—	345	是
转动块	210.50	317.30	285.10	—	345	是
挡块	14.64	262.30	17.04	—	345	是
平面耐磨板	28.15	37.00	26.23	—	400	是
球面耐磨板	27.96	49.53	52.68	—	140	是
耐磨条	33.36	40.15	84.18	—	280	是
锚固螺栓	—	—	—	319.1	500	是

限于篇幅,此处仅给出转动块在工况 1 下的应力云图,如图 4 所示。

由表 3 可得:

(1) 工况 2、3 下各构件应力整体上大于工况 1,说明支座转角对各构件应力的影响不容忽视;除上座板、耐磨条和球面耐磨板外,其他构件在工况 2 下

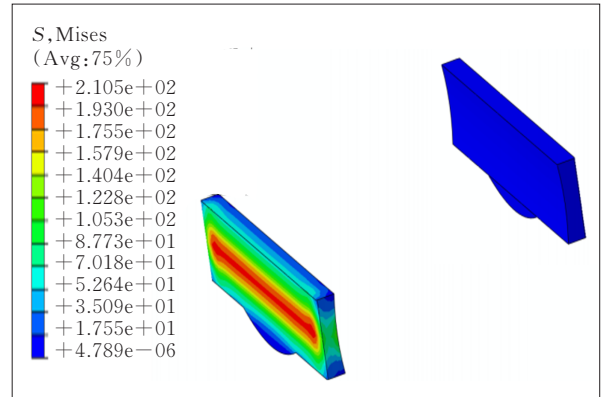


图 4 工况 1 下转动块应力云图(单位:MPa)

的应力要大于工况 3 下的应力,说明纵向转角对各构件应力的影响程度要大于横向转角。

(2) 在 3 个计算工况下,转动块应力最大,下座板次之,上座板再次之,应力均超高 100 MPa,说明此 3 个构件容易产生应力疲劳破坏,需加强设计;工况 4 下锚固螺栓应力强度小于屈服强度,故满足强度要求。

综上所述,新型支座未发生明显应力集中现象,设计方案能够满足极限工况下的强度要求,相关数据可为新型球形支座结构设计提供参考。

## 3 支座性能试验

平塘特大桥新型球形支座,由于正常支座试验条件无法满足,采用 1:10 进行缩尺试验验证,缩尺样品采用和正常支座等强度同应力设计方式进行设计。试验采用原材料进厂检验和部件出厂检验合格的缩尺支座作为试验样本,依据相关规范规定,进行支座竖向承载力试验、水平承载力试验、摩擦系数试验、转动力矩试验,试验结果见表 4。

表 4 试验结果

试验项目	试验方法	技术要求	试验数据	结论
竖向承载力	TB/T 3320—2013	竖向变形 ≤2.00 mm	1.49 mm	合格
水平承载力	TB/T 3320—2013	卸载后,支座变形不能恢复的产品为不合格	支座变形能够恢复	合格
摩擦系数	TB/T 3320—2013	摩擦系数≤0.03	0.012	合格
转动力矩	GB/T 17955—2009	转动力矩 ≤7 924 N·m	5 600 N·m	合格

限于篇幅,此处仅给出竖向承载力荷载-变形曲线图,如图 5 所示。

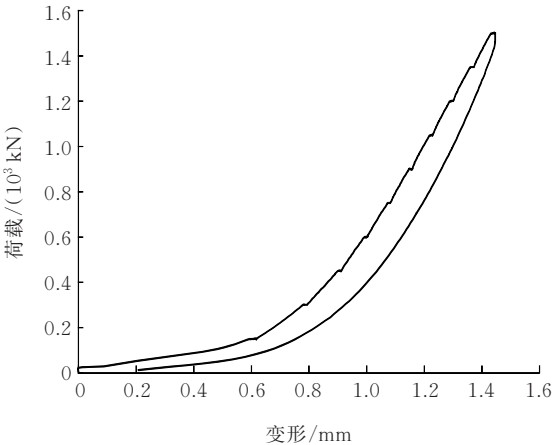


图5 竖向承载力荷载-变形曲线图

由表4、图5可知:缩尺支座各试验结果满足相关规范要求。试验后拆开支座观察,各部件无损坏,验证支座达到设计预期要求。

4 支座耐久性设计与研究

影响支座使用寿命的因素主要有两个:金属构件的锈蚀失效破坏和耐磨板的磨损。为提高支座耐久性,分别从耐磨性能和防腐涂装两方面对支座进行耐久性研究。

4.1 耐磨性研究

为满足与桥梁主体同寿命的耐久性要求,平塘大桥球形支座耐磨板采用 S-Lide 改性超高分子量聚乙烯耐磨板,适应于重载(尤其活载量大)、活载位移速率大、累计活载位移大的工作环境。S-Lide 改性超高分子量聚乙烯耐磨板性能优点主要有以下 3 个方面:

- (1) 机械性能良好。S-Lide 耐磨滑块各项性能指标不仅优于传统桥梁支座 PTFE 滑块,而且达到甚至超过意大利进口超高分子量聚乙烯耐磨滑块水平,完全满足《客运专线桥梁盆式橡胶支座暂行技术条件》(科技基[2005]101号)补充规定有关耐磨滑块使用技术要求,各滑块性能对比如表5所示。
- (2) 耐冲击性好。S-Lide 耐磨滑块具有异常突出的耐冲击性能,其常温冲击强度比尼龙(PA)和聚丙烯(PP)材料大 10 倍,也明显高于 PTFE 滑块和意大利进口超高分子量聚乙烯耐磨滑块冲击强度。
- (3) 摩擦磨损性能优良。S-Lide 耐磨滑块具有良好的自润滑特性,在有/无油脂润滑条件下其滑动摩擦系数均小于其他工程塑料滑动摩擦系数。在硅脂润

表5 耐磨滑块性能对比

性能指标	单位	S-Lide	进口材	PTFE	测试方法
		滑块	料滑块	滑块	
球压痕硬度	MPa	37.3	33.6	28.5	ISO 2039—1
拉伸强度	MPa	43.0	34.0	36.5	ISO 527—1
断裂伸长率	%	320.0	290.0	325.0	ISO 527—3
弹性模量	MPa	862.0	—	450.0	GB/T 1040—1992
压缩强度	MPa	34.5	32.6	29.7	GB/T 1041—2008
弯曲强度	MPa	18.0	15.0	13.3	GB/T 9341—2008
弯曲模量	MPa	762.0	685.0	395.0	
双缺口(21℃)	kJ/m <sup>2</sup>	NB	NB	15.0	ASTM D4020
冲击强度(−60℃)	kJ/m <sup>2</sup>	NB	NB	17.3	

注:NB表示未做试验。

滑下,S-Lide 耐磨滑块初始静摩擦系数仅为 0.003 5,50 km 长期磨耗过程中其滑动摩擦系数均相当小,最大磨耗可达 100 km。

4.2 耐腐蚀性研究

普通球形支座普遍采用的涂装体系是《铁路钢桥保护涂装及涂料供货技术条件》(TB/T 1527—2011)和《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722—2008)规定的涂装体系,以环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+脂肪族丙烯酸聚氨酯面漆涂装体系为主。但存在以下问题:① 环氧富锌底漆对基材的前处理要求特别高,如果前处理不到位,会极大地影响漆膜的附着力和阴极保护功能;② 锌铝喷涂对基材前处理要求高,喷射处理必须达到 Sa3 级,喷涂完后必须进行封闭处理;③ 锌铝喷涂时产生的废气污染周围环境,对操作者的身体健康影响很大,随着环保要求越来越严格,该工艺已逐渐被其他工艺替代。

为解决上述问题,平塘大桥支座根据工程应用的不同腐蚀环境,选用不同的防腐体系(表6)。

表6 高耐久性球形支座防腐体系

腐蚀环境	使用寿命/年	防腐体系
C2低腐蚀	20~33	低表面处理环氧底漆 50 μm
		环氧云铁中间漆 100 μm
		丙烯酸聚氨酯面漆 50 μm
C3中腐蚀	20~33	低表面处理环氧底漆 50 μm
		耐磨环氧中间漆 100 μm
		丙烯酸聚氨酯面漆 50 μm
C4高腐蚀	20~33	低表面处理环氧底漆 50 μm
		耐磨环氧中间漆 150 μm
		氟碳面漆 50 μm
C5严重腐蚀	20~33	低表面处理环氧漆 350 μm
		氟碳面漆 50 μm



为验证本文提出的高耐久性球形支座防腐体系的防腐效果,进行了C5严重腐蚀环境下高耐腐蚀防腐体系试验,结果如表7所示。

表7 C5高腐蚀环境防腐体系试验结果

试验项目	试验标准	试验结果	是否合格
循环盐雾试验	ASTM D5894	试验4 032 h,无泡无锈	是
耐酸性 (5% $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 168 h)	GB/T 9274—1988	无起泡、生锈和脱落现象	是
耐酸性 (20% $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 168 h)	GB/T 9274—1988	无起泡、生锈和脱落现象	是
耐酸性 (33% $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 168 h)	GB/T 9274—1988	无起泡、生锈和脱落现象	是
抗氯离子渗透性 (1个月)	JTJ 275—2000中 C.2	$\leq 5 \times 10^{-4}$ $\text{mg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{d})$	是

综上所述,高耐久性球形支座创新体系在不同腐蚀环境下采用了新型的防腐体系,经过优化设计的漆膜厚度、流水线涂装生产、三喷三烘工艺以及独特的涂层配方等创新性技术,相比传统防腐体系具有更高的耐久性,需要更少的维护保养工作,即可满足支座耐久性使用要求。

## 5 结论

以贵州省平塘大桥为工程背景,开发了一款特殊新型球形支座,并进行试验研究,主要结论如下:

(1) 针对新型球形支座水平承载力大及变位需求大的特点,支座采用了弧面转动套结构设计,保证水平力传递均为面 and 面传递,避免了常规支座转动后出现水平应力集中问题。

(2) 计算结果表明新型支座未发生明显应力集

中现象,纵向转角对各构件应力的影响程度大于横向转角,转动块、下座板、上座板的应力最大,均大于100 MPa,说明上述构件容易产生应力疲劳破坏,需加强设计。

(3) 采用1:10进行缩尺试验验证,缩尺样品采用和正常支座等强度同应力设计方式进行设计。支座竖向承载力试验、水平承载力试验、摩擦系数试验、转动扭矩试验结果均满足规范要求。

(4) 材料耐久性试验表明:采用S-Lide耐磨滑块适应于重载、位移量大和高速运动的工作环境,可大大提高支座使用寿命,高耐久性球形支座防腐体系相比传统防腐体系具有更高的耐久性。

## 参考文献:

- [1] 吴桂西.一种新型易于更换的球型钢支座[D].北京:北京交通大学,2018.
- [2] 李小鹏.一种新型球型钢支座减震性能研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [3] 孙新阳,杨维国,王萌.新型橡胶隔震支座临界行为理论模型研究[J].振动与冲击,2017,36(10):7-12,18.
- [4] 张颖周.新型桥梁支座力学性能试验研究[D].兰州:兰州交通大学,2018.
- [5] 吴倩芸,何文福,刘文光,等.铅芯橡胶隔震支座大变形硬化模型及隔震结构弹塑性分析研究[J].振动与冲击,2017,36(15):90-97.
- [6] 熊高波,仇继好,韦瑜.基于光纤光栅传感技术的测力球型支座的性能研究[J].预应力技术,2017(4):33-34,38.
- [7] 王海龙.铁路桥梁支座常见病害分析与改造方法研究[J].南方农机,2018,49(18):134,139.
- [8] 石秋君.既有铁路桥梁支座病害分析及改造方法[J].铁道建筑,2017,57(10):12-14,25.
- [9] 宋晓东,陈列,薛鹏,等.高纬度地区铁路桥梁新型球型钢支座设计与试验研究[J].铁道建筑,2018,58(2):32-35.
- [10] 魏标,刘义伟,蒋丽忠,等.地震作用下双曲面球型减隔震支座在铁路简支梁桥中的动力行为[J].土木工程学报,2019,52(6):110-118.