

支座滑板磨损对多塔斜拉桥抗震性能影响研究

罗乐根¹, 张迅¹, 张精岳²

(1. 黄茅海跨海通道管理中心, 广东 珠海 519000; 2. 中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司, 北京市 100088)

摘要:为研究支座滑板磨损对多塔斜拉桥结构抗震性能的影响。开展某服役桥梁更换下的支座的滑板磨损性能试验, 研究支座滑板在服役全过程中不同磨损阶段的摩擦系数。并以黄茅海大桥为工程背景, 建立空间三维有限元模型, 对比分析支座滑板不同磨损程度下桥梁结构的地震响应。研究表明: 支座滑板在服役过程中经历正常状态、硅脂耗尽、外露滑板磨损殆尽、不锈钢镜面磨损4个过程, 且摩擦系数由0.01逐渐增大至0.156, 桥梁向固结体系转变, 墩底弯矩增大11.4%, 影响桥梁结构的抗震性能。

关键词:斜拉桥; 试验研究; 支座耐久性; 滑板磨损

中图分类号: U441+.3

文献标志码: A

进入21世纪以来, 中国桥梁发展成就巨大, 建成了一大批创造世界纪录的桥梁^[1], 苏通大桥、西堠门大桥、港珠澳大桥^[2]、北盘江大桥、南沙大桥等相继建成通车, 以及正在筹建的深中通道、张皋过江通道、莲花山跨江通道等超大跨桥梁工程, 将中国桥梁由大国推向强国, 实现了跨越式发展。截至2020年底, 中国公路桥梁数量已超出88万座, 桥梁总数量居世界前列。通过对100座桥梁运营期事故发生时间进行统计分析, 大于50年的桥梁不到15%, 平均寿命29.36年; 预测截止到2024年, 30年桥龄的桥梁数量将达到17.9万座, 未来桥梁工程将由新建向管养靠拢。

在桥梁结构部件中, 支座作为桥梁的“关节”, 其可以有效传递桥梁上部结构的竖向荷载、水平荷载^[3], 并可以适应主梁自由变形和转动。而滑板作为支座的“核心关键”部件, 可以有效减小支座在滑动、转动等运动过程中的摩阻力^[4], 且可避免钢件与钢件直接接触的磨损。但由于滑板的抗压强度(设计面压45 MPa)约为钢构件强度(Q355B钢材屈服强度355 MPa)的12.7%, 即其力学性能远小于钢构件。因此, 滑板作为支座的核心薄弱部件, 其性能显著影响着支座的力学性能和耐久性。王常峰等^[5]研究了活动支座摩擦作用对连续梁桥弹塑性地震反应的影响, 提出了考虑活动支座摩擦力影响桥梁整体分析模型; 闫贵平等^[6]研究了盆式支座对桥梁动力特性的影响; 朱文俊^[7]采用有

限元模拟、原型试验等方法, 开展了盆式支座在地震作用下的力学性能研究。目前, 针对支座滑板磨损后的力学性能研究及对多塔斜拉桥结构的抗震性能影响研究相对较少。

该文通过开展盆式支座不同工况的摩擦性能试验, 模拟滑板在桥梁支座服役全过程中的磨损状态, 确定不同磨损阶段的摩擦系数。并以黄茅海大桥为工程背景, 研究支座滑板磨损对在役桥梁结构抗震性能的影响。

1 支座滑板磨损性能试验

1.1 试验样品

试验样品为某桥梁上已服役25年更换下的GPZ-6000-e100盆式支座(图1), 其设计竖向承载力6000 kN, 滑动位移为±100 mm, 上座板平面尺寸1200 mm×1500 mm×50 mm, 下座板平面尺寸1100 mm×1100 mm×50 mm。滑板为聚四氟乙烯材料(PTFE)(图2), 其承载面压较低(设计面压30 MPa), 且耐磨损性能较差, 在支座使用时需在其表面设置储油坑, 并涂抹5201硅脂, 以提高其耐磨性能。

1.2 试验设备

为研究盆式支座滑板服役全过程中的磨损性能, 利用支座动态试验机对盆式支座开展摩擦系数力学性

收稿日期: 2021-03-12(修改稿)

基金项目: 交通运输行业重点科技项目(编号: 2020-MS1-004); 广东省交通集团科技项目(编号: 2020-2-1); 中交集团院士专项(编号: YSZX-03-2021-02-B)

作者简介: 罗乐根, 男, 大学本科, 工程师, E-mail: 563553064@qq.com



图1 盆式支座

能试验。该测试系统长12 m,宽7.6 m,高9.78 m,支座加载测试空间为2.5 m×2.5 m×1.5 m。并配备了竖向、水平、转角3个方向的作动器。其中,竖向作动器可提供静压30 000 kN、静拉6 000 kN的载荷,竖向行程±600 mm;水平作动器最大拉压动载3 000 kN,且可实现峰值速度为0.7 m/s的动态性能加载测试;转角作动器可提供静态拉压1 500 kN载荷,作动器行程±300 mm,额定转角弧度0.06 rad,可实现试件厚度为200~600 mm的转角试验。



图2 聚四氟乙烯滑板

1.3 试验方法

依据JT/T 391—2019《公路桥梁盆式支座》附录C支座摩擦系数试验方法,对支座竖向施加设计荷载6 000 kN,水平位移采用正弦波加载,加载幅值±20 mm,加载频率0.01 Hz。

根据经验,支座服役中滑板经历以下阶段:① 正常状态(硅脂充足)→② 硅脂耗尽(干磨初期)→③ 外露滑板磨损殆尽(不锈钢镜面与支座球冠钢件对磨初期)→④ 不锈钢镜面磨损。为了分析支座滑板在服役全过程不同阶段的摩阻力,对该旧支座分别采取以下措施:① 正常状态,滑板表面涂硅脂润滑;② 硅脂耗尽,采用抹布将滑板表面硅脂擦净,并采用酒精擦拭滑板表面;③ 外露滑板磨损殆尽,取出支座滑板,支座不锈钢镜面与球冠钢件对磨;④ 不锈钢镜面磨损,开展≥100圈的摩擦试验。具体加载工况见表1。

1.4 试验结果

图3为支座摩擦系数加载试验照片。图4(a)为不同摩擦系数试验工况得到的滞回曲线;图4(b)为不

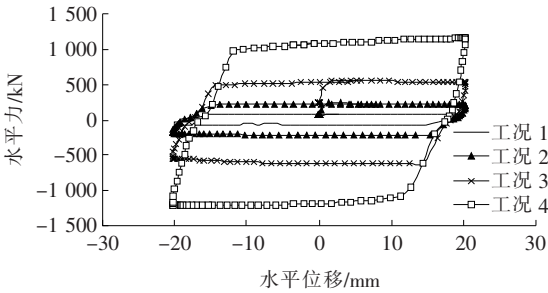
同工况的摩擦系数(摩擦系数为滞回曲线位移为0 mm时对应的最大、最小水平力的均值与支座竖向力之比)。

表1 支座减隔震性能试验加载工况

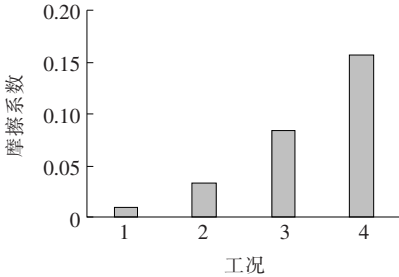
工况	模拟状态	竖向荷载/kN	加载幅值/mm	频率/Hz	循环次数/次
1	正常状态	6 000	±20	0.01	3
2	硅脂耗尽	6 000	±20	0.01	3
3	外露滑板磨损殆尽	6 000	±20	0.01	3
4	不锈钢镜面磨损	6 000	±20	0.01	100



图3 支座摩擦系数试验照片



(a) 滞回曲线



(b) 摩擦系数

图4 不同工况摩擦系数试验结果

从图4可知:支座滑板表面涂硅脂润滑时(工况1)测得的摩擦系数为0.010,满足规范指标要求(≤ 0.03);而当将滑板表面的硅脂擦除干净后(工况2),测得滑板干磨的摩擦系数为0.033,表面在缺少硅脂润滑后,滑板的摩擦系数增大,且已超出规范 ≤ 0.03 的要求;而当将滑板取走后,球冠钢件与上座板的不锈钢件对

磨(工况 3)摩擦系数为 0.084,其为支座正常状态下摩擦系数的 8.4 倍,已远超规范要求值;而当球冠与上座板的不锈钢继续对磨时(工况 4),其摩擦系数继续增大,最终稳定在 0.156。

综上所述,当支座滑板表面的硅脂耗尽后,其摩擦系数逐渐增大,导致支座摩阻力增大,加速滑板表面的磨损;同时,支座摩擦系数的增大,也改变了桥梁原约束体系,降低桥梁的抗震性能,增加桥梁地震中倒塌风险。

2 工程概况

黄茅海大桥主桥采用(100+280+720+720+

280+100) m 双索面三塔斜拉桥,桥型布置图见图 5,为独柱塔双索面三塔斜拉桥,高跨比为 0.25,边中跨比为 0.53。主梁采用分离式箱梁,分离式箱梁是由两个钢箱梁及横向连接箱组成,钢箱梁高 4 m,桥面处拉索横向间距 46.9 m。主塔高度 248.70 m,截面形式为椭圆和圆形,中塔塔截面尺寸由塔顶的 $D11.0$ m (D 为圆形直径)圆形变化至塔身的 $D8.5$ m 正圆,再变化到桥面处 10.0 m(横桥向)、15.0 m(纵桥向)圆端形截面,最后变化至塔底的 $D20.0$ m 圆形截面,竖向变化采用三段相切接顺的圆弧渐变。该项目所处场地桥梁抗震设防烈度 7 度,设计基本地震动峰值加速度为 $0.15g$ 。

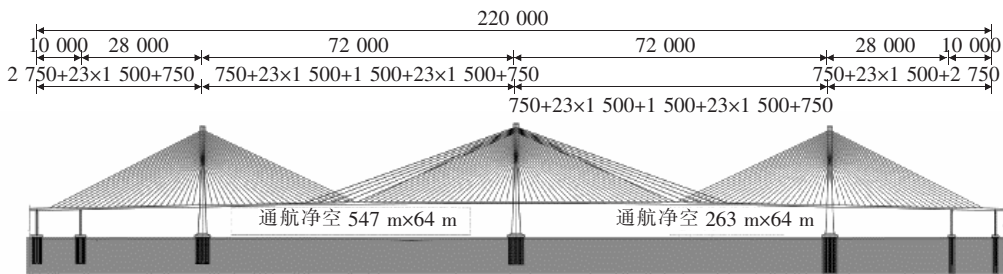


图 5 主桥结构体系示意图(单位:cm)

3 有限元模拟及支座参数

3.1 有限元模型

采用 Sap2000 Nonlinear 有限元分析软件建立全桥的三维有限元模型,进行抗震性能分析,在三维模型建立过程中着重于结构的刚度、质量以及边界条件的模拟。有限元模型以纵桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖直方向为 Z 轴。模型中主塔、主梁和桥墩均离散为空间梁单元,其中主桥主梁采用双梁式力学模型,并通过主从约束同拉索形成“鱼骨梁”模型;拉索采用桁架单元模拟,在主塔($M3$ 、 $M4$ 、 $M5$)位置未设置竖向支座,过渡墩($M1$ 、 $M7$)、辅助墩($M2$ 、 $M6$)位置设置摩擦摆支座,摩擦摆支座约束采用 Plastic(wen)双折线单元;对二期恒载采用质量单元分布在主梁节点上进行模拟;桩基础约束采用“ m ”法进行弹簧约束。空间三维有限元模型见图 6。

3.2 地震动输入

根据《工程场地地震安全性评价报告》,结合工程的结构特点和重要性,确定了抗震设防基本目标,以及桥址场地的地震动特性,确定了 100 年超越概率 4% ($E2$ 地震作用)对应 3% 阻尼比情况的地震动参数。

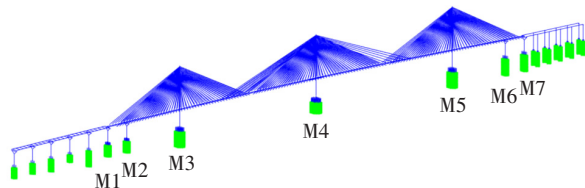


图 6 三维空间有限元模型

由于 $E2$ 水准下地震波分为水平向和竖向两个方向,每个方向有 3 条地震波,竖向波为水平波的 0.65 倍。下文中不同约束体系分析选取 3 条波中地震响应最大的第 2 条波,因此,仅列出 $E2$ 地震波中水平方向的第 2 条波形图,见图 7。

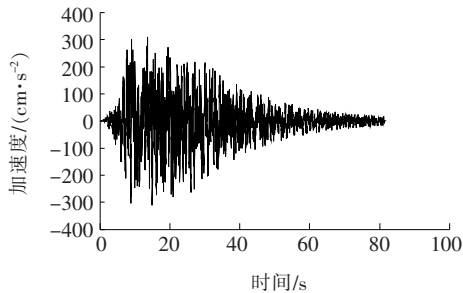


图 7 输入地震动时程曲线

3.3 支座参数

根据 GPZ-6000-e100 盆式支座试验结果,支座

滑板在桥梁服役过程中,表现为:① 正常状态(硅脂充足)→② 硅脂耗尽(干磨初期)→③ 外露滑板磨损殆尽→④ 不锈钢镜面磨损4个工作状态,由于黄茅海大桥采用的支座滑板未涂抹硅脂,则不考虑支座滑板带硅脂的状态。因此,为了系统研究支座滑板磨损对在役桥梁关键截面地震响应的影响,拟定了3个约束体系工况,其中支座选用实际应用摩擦摆支座,具体如表2所示。

表2 不同约束体系支座参数

工况	模拟阶段	曲率半径/m	摩擦系数
1	干磨初期	4.0	0.033
2	外露滑板磨损殆尽	4.0	0.084
3	不锈钢镜面磨损	4.0	0.156

4 支座滑板磨损对在役桥梁结构的性能影响

由于主塔位置未设置竖向支座,故主要针对过渡墩、辅助墩受支座滑板磨损的影响进行研究。

4.1 墩底内力

图8、9为不同工况的墩底纵向弯矩、横向弯矩。

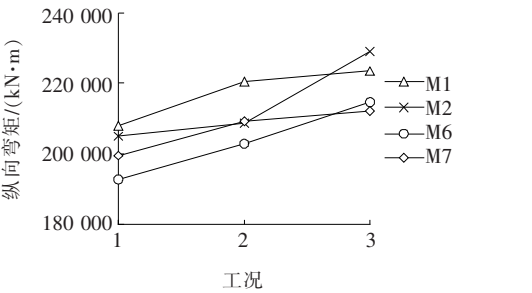


图8 不同工况墩底纵向弯矩

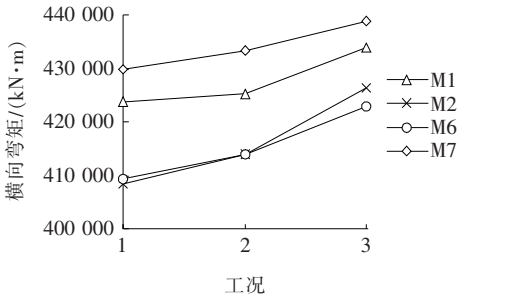


图9 不同工况墩底横向弯矩

从图8、9可知:3种工况的过渡墩、辅助墩的墩底弯矩逐渐增大。其中,工况1的M6墩底纵向弯矩

192 865 kN·m,横向弯矩 409 379 kN·m;工况2的M6墩底纵向弯矩 202 690 kN·m,横向弯矩 414 047 kN·m 工况3的M6墩底纵向弯矩 214 835 kN·m,横向弯矩 422 775 kN·m;与工况1相比,工况2的M6墩底纵向弯矩增大幅度达5.1%,M6墩底横向弯矩增大1.1%增幅相对较小;工况3的M6墩底纵向弯矩增大了11.4%,M6墩底横向弯矩增大了3.3%。由墩底的弯矩变化情况可知:随着支座滑板的逐渐磨损,墩底弯矩逐渐增大,即支座滑板磨损殆尽后,桥梁结构原约束体系发生改变,逐渐向固结体系转变,支座的耗能能力逐渐减弱,导致桥墩的地震响应逐渐增大,但增大幅度相对较小。

4.2 桩基内力

图10、11为不同工况的桩基纵向弯矩、横向弯矩。

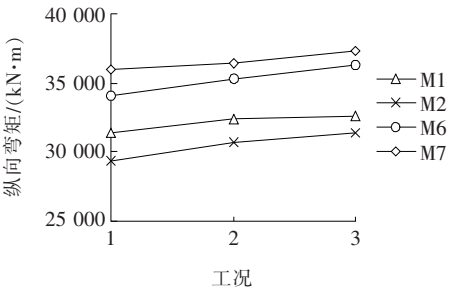


图10 不同工况桩基纵向弯矩

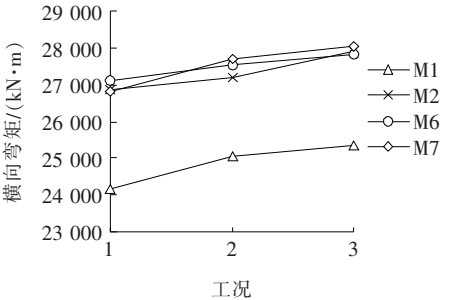


图11 不同工况桩基横向弯矩

从图10、11可知:不同工况对于桩基的弯矩影响较小,总体呈增大趋势,增幅在7%以内。其中,与工况1相比,工况2的M2桩基最不利纵向弯矩增大了4.8%,M1桩基最不利横向弯矩增大了3.6%,即在支座滑板磨损过程中,对于桩基最不利位置的弯矩增大较小,在5%以内。而工况3的M2桩基最不利纵向弯矩增大了6.9%,M1桩基最不利横向弯矩增大了4.9%。通过对不同工况作用下的桩基最不利位置的地震响应分析可知,支座滑板的磨损对于桩基地震响应的影响相对较小,总体在7%以内。

4.3 支座内力

图12、13为不同工况的支座纵向、横向剪力。从

图 12、13 可知:支座的纵向、横向剪力随着支座滑板磨损的加剧而逐渐增大。其中,工况 1 的 M2 支座纵向剪力为 708 kN,工况 3 的 M2 支座纵向剪力为 1 400 kN,纵向剪力增大了 97.8%;而工况 1 的 M6 支座横向剪力为 1 066 kN,工况 3 的 M6 支座横向剪力为 1 682 kN,横向剪力增大了 57.7%。

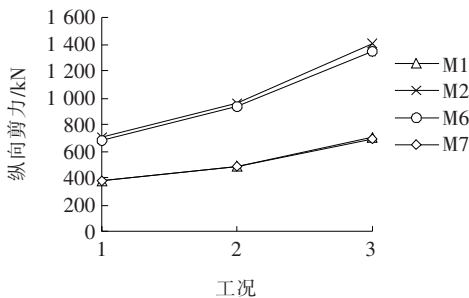


图 12 不同工况支座纵向剪力

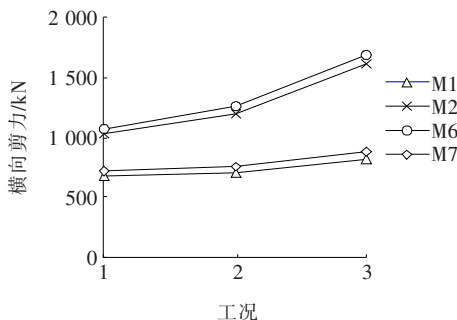


图 13 不同工况支座横向剪力

4.4 支座位移

图 14、15 为不同工况的支座纵向位移、横向位移。

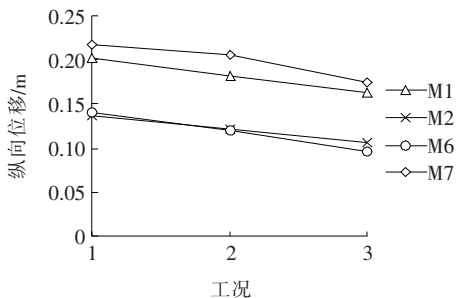


图 14 不同工况支座纵向位移

从图 14、15 可知:不同工况对于支座的纵向、横向位移影响较大,随着支座滑板磨损的加剧,支座的纵向位移和横向位移逐渐减小。其中,工况 2 的 M6 支座纵向位移比工况 1 减小约 13.7%,而工况 3 的 M6 支座纵向位移比工况 1 减小约 32.0%。对于支座横向位移,其基本规律与纵向位移相类似。通过对支座内力和位移的地震响应分析可知:随着支座磨损的加剧,

对于支座的位移量在逐渐减小,也间接反映出,支座滑板在损伤以后,桥梁原约束体系逐渐改变为固结体系,支座滑动类型由原来的活动支座逐渐变为固定支座。

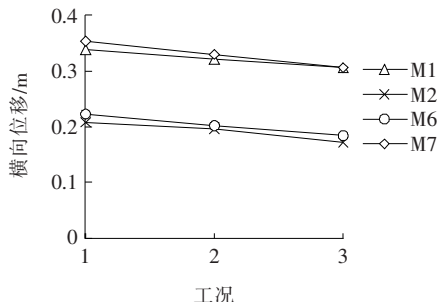


图 15 不同工况支座横向位移

4.5 梁端位移

图 16、17 为不同工况的梁端纵向、横向位移。从图 16、17 可知:其基本规律与支座位移相似,随着支座滑板磨损的不断加剧,梁端的纵向位移和横向位移逐渐减小,其中,工况 2 的 M1 梁端纵向位移比工况 1 减小约 11.6%,而工况 3 的 M7 梁端纵向位移比工况 1 减小约 21.4%。对于梁端横向位移,其基本规律与纵向位移相类似。

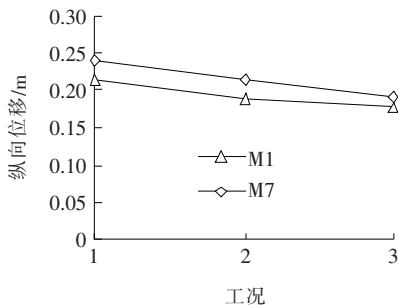


图 16 不同工况梁端纵向位移

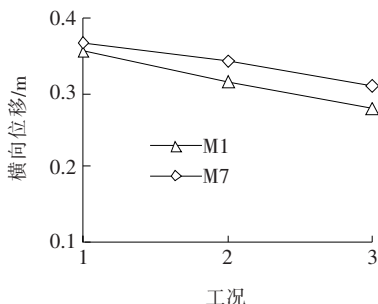


图 17 不同工况梁端横向位移

5 结论与建议

通过试验和有限元模拟研究了支座服役全寿命对