

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.030

# 基于拉索减震支座的高墩桥梁抗震设计策略

陈攀<sup>1</sup>,贺金海<sup>2</sup>

[1.上海公路桥梁(集团)有限公司,上海市 200433; 2.同济大学,上海市 200092]

**摘要:**近年来,随着我国桥梁工程的高速发展,桥梁交通网络不断完善,更多的高墩桥梁被应用于实际工程中。以某实际工程中的高墩桥梁为例,提出了基于拉索减震支座的抗震设计策略,对比研究了常规体系、采用摩擦摆支座的减隔震设计方案,分析了不同方案在E2水平地震作用下的桥梁结构响应。分析结果表明:高墩桥梁中采用拉索减震支座、摩擦摆支座都能有效地降低结构地震内力响应。摩擦摆支座与常规体系都可能导致较大的墩梁相对位移;拉索减震支座可有效控制墩梁相对位移,有利于防止落梁灾害的发生,是一种合理有效的抗震设防策略。研究内容可为高墩桥梁抗震设计提供有益参考。

**关键词:**拉索减震支座;高墩;抗震设计

**中图分类号:** U442.5+5

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2023)04-0111-04

## 0 引言

近几十年内,全世界发生过多处破坏力巨大的地震,我国处于亚欧地震带和环太平洋地震带之间,大地震活动频繁,如1999年集集地震(M7.6)、2008年汶川地震(M8.0)、2010年玉树地震(M7.1)和2021年青海玛多地震(M7.4)。这些大地震具有巨大的破坏力,造成了巨大的生命财产损失。地震中桥梁结构容易发生破坏甚至倒塌,高墩桥梁在地震下更为脆弱。如汶川地震中,墩高较大的庙子坪大桥发生了主梁落梁、墩身开裂的情况,以及伸缩缝的碰撞破坏<sup>[1]</sup>。采用双柱式高墩的百花大桥发生了墩底塑性破坏、上部结构落梁<sup>[2]</sup>。由于地形、路线等要求,高墩连续梁桥有着广泛的应用,其往往是交通网络的咽喉,对保障高墩桥梁的抗震能力具有重要的意义。

然而,高墩桥梁属于非规则桥梁,我国抗震设计规范中明确指出,规范仅适用于墩高不超过40m的桥梁。对于墩高超过40m、墩身第一阶振型有效质量低于60%、结构进入弹塑性工作范围的桥梁需要进行专门的研究<sup>[3]</sup>。因此,高墩桥梁的地震响应具有其特殊性,抗震设计中缺乏规范指导,传统的延性设计与减隔震设计是否适用具有不确定性。本文对高墩桥梁抗震设防体系进行了探讨,提出了基于减隔震的抗震设计策略,并结合实际工程进行了研究,以保障这一类桥梁的抗震能力,为相关工程建设提供有益参考。

收稿日期:2022-06-14

作者简介:陈攀(1978—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计与研究工作。

## 1 高墩桥梁设防体系

抗震设计规范指出,桥梁结构抗震体系是指用于承担地震作用的各种桥梁结构体系的总称,主要功能为承担水平向和竖向地震作用。为避免桥梁结构在地震作用下出现整体破坏和倒塌,以保证交通生命线不至中断,抗震设计规范提出,桥梁抗震体系应具传力途径可靠,位移约束体系明确、可靠,可有效地控制地震位移,而且应具有明确的、合理与可靠的能量耗散部位,应具有避免因部分结构构件的破坏而导致结构倒塌的能力<sup>[4]</sup>。桥梁典型的抗震设防体系有延性体系与减隔震体系,延性设计一般需要墩柱形成塑性铰以耗散地震能量。然而研究表明,对于高墩桥梁,除了墩底塑性铰外,还可能在墩身中上部形成第二个塑性铰区域<sup>[4]</sup>。这样造成了结构耗能部位不明确,而且震后修复困难。因此不宜采用延性设计。减隔震具体可以分为减震与隔震。减震主要是能量耗散,一般减隔震装置具有减震与隔震的双重作用。对于减隔震体系,墩柱可以基本保持弹性阶段,结构塑性耗能集中在桥梁支座,具有震后易恢复的优点。因此,高墩桥梁采用减隔震设计是一个合理的选择,但是由于高墩桥梁的结构周期较长,应当注意过大的支座位移,以避免落梁灾害。

## 2 工程实例分析

### 2.1 项目概况

本桥为预制混凝土大箱梁桥,跨径布置为41m+50m+41m,两端边界联分别为一单跨简支梁,计算

联跨径布置如图 1 所示。桥梁截面处采用现浇大箱梁,梁高 2 m,墩高范围为 32.4 ~ 34.4 m,桥宽约 16 m,每个承台下布置有 8 根钻孔灌注桩。

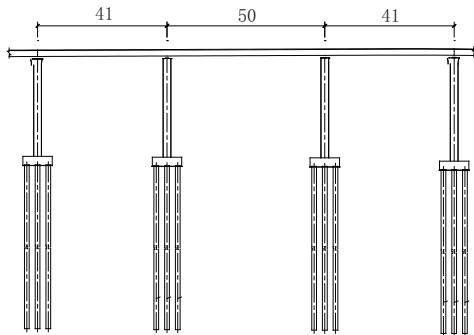


图 1 跨径布置图(单位:m)

桥址所在场地基本烈度为 7 度,设计基本地震加速度值为  $0.14g$ ,特征周期为  $0.5\text{ s}$ 。根据地震动参数得到 E2 水平的设计反应谱,并以此生成 7 条 E2 水平地震动加速度时程曲线,编号记为 E2-1 ~ E2-7。将人工生成的地震动拟合反应谱函数,并与设计反应谱对比如图 2 所示。

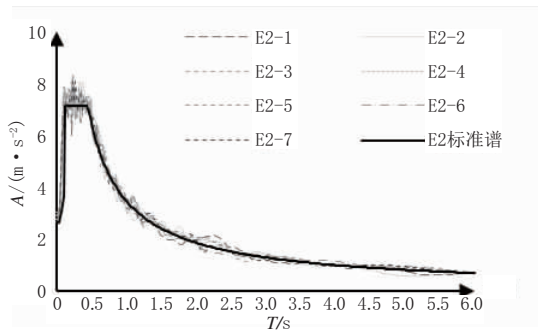


图 2 人工地震反应谱与设计谱对比

其中,E2-1 的地震动加速度时程曲线如图 3 所示。

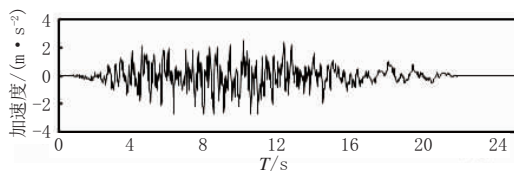


图 3 E2-1 加速度时程曲线

## 2.2 基于减隔震的设计策略

高墩桥梁的减隔震设计中,一般主要利用的是减隔震装置的减震效果,减隔震装置为水平柔性装置,地震作用下支座位移较大,高墩桥梁由于结构自身长周期的特点,支座位移过大问题尤为突出,存在较大的落梁风险,应采用具有明确、可靠的位移约束体系的支撑体系。位移约束体系一般有分离式和整体式。分离式一般存在构造设计困难、影响结构美观的问题。整体式主要有拉索球钢支座、拉索摩擦摆支座等。

拉索减震球钢支座是组合型创新支座。工程实

践中,球钢支座由于其稳定的受力性能而得到广泛应用。利用球钢支座的这一特点,结合高强、柔性的钢丝绳,从而实现在桥梁结构遭遇地震时,固定或者单向型球钢支座的抗剪销钉剪断,支座发生滑动,结构体系变为减隔震体系,减小结构地震内力响应,并通过拉索装置限制墩梁位移<sup>[5]</sup>。拉索减震支座的力学本构如图 4 所示。

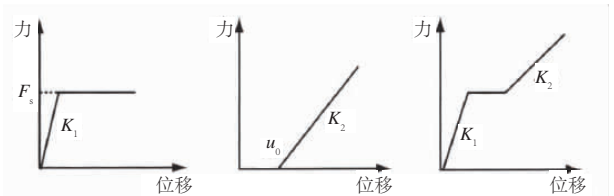


图 4 拉索减震支座本构

本文对比研究了 3 种不同的抗震设防策略,分别为:

(1)全桥采用普通的固定支座、滑动支座,地震作用下不考虑支座固定约束方向的剪切滑动,即采用常规体系进行抗震设计,表 1 中记为体系①。

(2)全桥采用摩擦摆支座进行抗震设计,所有支座都采用摩擦摆支座,所采用的摩擦摆支座的摩擦系数为  $0.02$ ,曲率半径为  $5\text{ m}$ ,表 1 中记为体系②。

(3)全桥采用拉索减震支座进行抗震设计,其中所采用的拉索自由程为  $0.1\text{ m}$ ,表 1 中记为体系③。

本桥计算联共三跨,桥墩依次记为 P1 ~ P4,3 种体系各墩采用的支座类型见表 1。

表 1 桥墩支座类型

位置	体系		
	体系①	体系②	体系③
P1	纵向滑动支座	摩擦摆支座	拉索减震支座
P2	固定支座	摩擦摆支座	拉索减震支座
P3	纵向滑动支座	摩擦摆支座	拉索减震支座
P4	纵向滑动支座	摩擦摆支座	拉索减震支座

## 2.3 有限元分析模型

采用 SAP2000 有限元软件建立结构动力分析模型,并考虑边界联的影响,建立三联桥梁,主梁、墩柱、承台均采用空间梁单元模拟,桩土效应通过在承台底添加 6 个方向的弹簧模拟,弹簧刚度根据土层状况和承台底桩的布置来确定。支座与主梁和墩之间的连接通过在连接节点处采用 body 约束来模拟。固定支座和普通滑动支座采用线性连接单元模拟。摩擦摆支座采用程序中的双线性理想弹塑性弹簧单元模拟。拉索减震支座是由球钢支座和弹性索组合而成,采用程序中的双线性理想弹塑性弹簧单元和多线性弹性单元联合模拟。图 5 为 SAP2000 建

立的桥梁有限元模型。

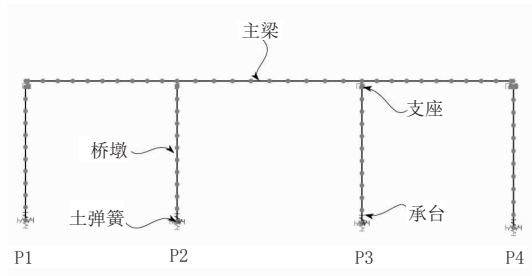


图5 有限元模型

## 2.4 地震响应分析

### 2.4.1 墩底弯矩响应

将人工生成的7条E2水平地震动时程波分别进行纵桥向和横桥向输入,桥梁结构响应取结构在7条地震动时程波下的平均值,其3种结构体系下的纵向和横向桥墩墩底最大弯矩响应和固定墩位置处2种减隔震支座的隔震率见表2、表3。

表2 纵向墩底最大弯矩 单位:kN·m

墩号	体系①	体系②	②隔震率	体系③	③隔震率
P1	34 974	35 557	—	47 130	—
P2	107 895	45 630	58%	46 870	57%
P3	43 168	45 315	—	45 940	—
P4	71 987	38 045	—	44 444	—

表3 横向墩底最大弯矩 单位:kN·m

墩号	体系①	体系②	②隔震率	体系③	③隔震率
P1	90 034	32 943	63%	46 730	48%
P2	107 761	41 014	62%	51 254	52%
P3	134 013	44 785	67%	60 234	55%
P4	149 996	40 523	73%	65 794	56%

不同体系下的桥墩墩底最大弯矩响应对比如图6、图7所示。

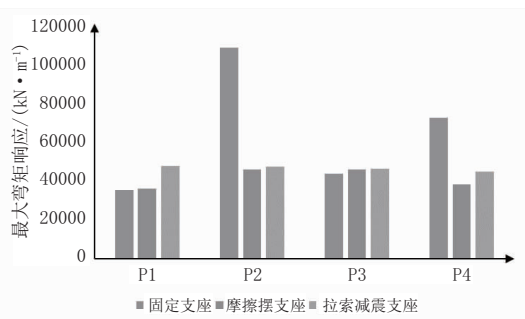


图6 纵向墩底最大弯矩响应对比

由图6可知,方案①的桥梁支座采用常规体系,即桥梁支座如正常运营阶段一样,设置固定支座与滑动支座,纵向地震作用下,固定墩P2墩底弯矩响应较大,地震下容易损伤。方案②和方案③,墩顶采用拉索减震支座或摩擦摆支座后,结构地震力分配更为均匀,墩底弯矩均处于相对较小水平,具有较好的减隔震效果。根据表2,方案②固定墩减隔震率为58%,

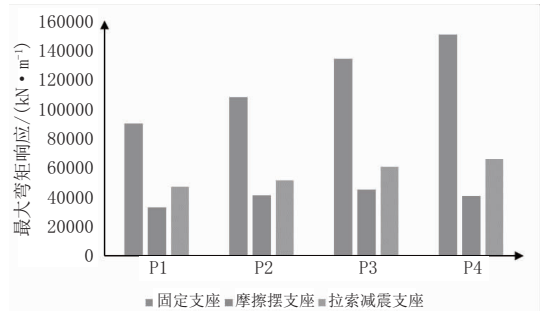


图7 横向墩底最大弯矩响应对比

方案③固定墩减隔震率为57%,减震效果相当。

由图7可知,横向地震作用下,方案①横向均为固定支座,墩底弯矩较大。方案②与方案③墩底响应均处于较下水平。由于方案③中拉索减震支座有效限制了支座位移,方案③略大于方案②。根据表3,方案②采用摩擦摆支座,减隔震率为62%~73%;方案③采用拉索减震支座,减隔震率为48%~56%,均具备较好的减隔震效果。

### 2.4.2 支座位移响应

震害调查可以发现,支座系统失效是导致桥梁损毁的重要因素,不同方案的最大支座位移见表4、表5。

表4 纵向支座最大位移 单位:m

位置	体系		
	体系①	体系②	体系③
P1	0.372	0.32	0.141
P2	0	0.199	0.116
P3	0.33	0.194	0.115
P4	0.353	0.262	0.120

表5 横向支座最大位移 单位:m

位置	体系		
	体系①	体系②	体系③
P1	0	0.243	0.122
P2	0	0.220	0.118
P3	0	0.230	0.119
P4	0	0.264	0.126

不同体系下支座最大位移响应对比如图8、图9所示。

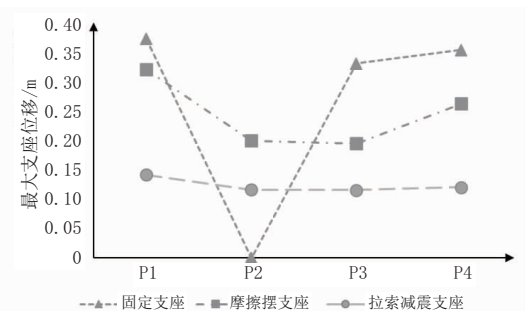


图8 纵向支座最大位移响应对比

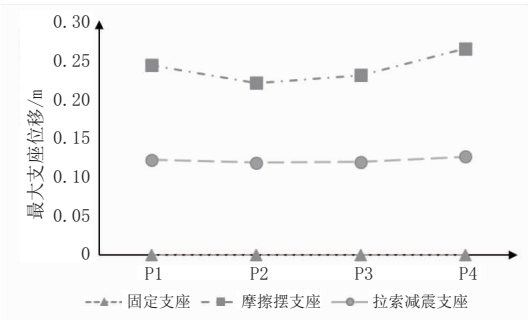


图9 横向支座最大位移响应对比

由表4、图8可知,纵向地震作用下,方案①虽然设置有固定支座,但是由于固定墩地震响应大,墩顶位移较大,导致滑动支座的位移显著增大,地震下容易发生落梁。对比两种减隔震方案,摩擦摆支座(方案②)位移显著大于拉索减震支座(方案③)。由表5、图9可知,横向地震作用下,常规体系中由于固定支座不发生位移,摩擦摆支座(方案②)位移显著大于拉索减震支座(方案③)。分析结果可知,过大的支座位移必然增加减隔震装置的造价,容易导致桥梁的不良碰撞,增加落梁风险。拉索减震支座体系有效控制了墩梁相对位移,是合理有效的抗震设防策略。

### 3 结语

高墩桥梁的地震响应具有其特殊性,抗震设计

中缺乏规范指导。本文简要讨论了高墩桥梁抗震设防体系,提出了基于拉索减震支座的抗震设计策略,并结合实际工程对不同的抗震设计策略进行了对比,结论如下:

(1)高墩桥梁中,纵向固定墩可能导致较大的墩底弯矩和支座滑动位移,应考虑合理的减隔震体系。

(2)高墩桥梁中,采用拉索减震支座与摩擦摆支座都具有较好的减隔震率,能有效地降低下部结构的内力响应,但是应注意摩擦摆支座位移过大的问题。

(3)高墩桥梁抗震设计中采用拉索减震支座的减隔震设计既能减小结构内力响应,又能降低落梁风险,是合理的抗震设防策略。

#### 参考文献:

[1] 陈永生.汶川地震公路震害调查——桥梁[M].北京:人民交通出版社,2012.  
 [2] 宋飞,李建中,管仲国.汶川地震百花大桥震害分析[J].振动与冲击,2015,34(8):121-128.  
 [3] JTG/T 2231-01-2020,公路桥梁抗震设计规范[S].  
 [4] 卢皓,管仲国,李建中.高阶振型对高墩桥梁抗震性能的影响及其识别[J].振动与冲击,2012,31(17):81-85,98.  
 [5] 杨浩林,田圣泽,庞于涛,等.采用拉索支座的桥梁振动台试验[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(2):192-197.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: [cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)