

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.09.038

# 双曲面球型减隔震支座设计参数分析研究

王振南

(天津城建设计院有限公司, 天津市 300122)

**摘要:** 双曲面球型减隔震支座是我国研发的一种新型减隔震装置,正在被广泛应用于高烈度区大跨径连续梁桥的抗震设计中。该支座滑动球面的摩擦系数 $\mu$ 、球心距 $H$ 和固定支座的水平极限承载力 $F_u$ 是影响其抗震性能的3个重要参数。通过对这3个参数进行深入研究,得到桥梁抗震性能与3个设计参数的变化规律,可为采用双曲面球型减隔震支座进行抗震设计的桥梁提供指导。

**关键词:** 大跨径连续梁桥;双曲面球型减隔震支座;滑动球面的摩擦系数;球心距;水平极限承载力

**中图分类号:** U443.36

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2023)09-0162-04

## 0 引言

与传统桥梁延性抗震体系相比,桥梁减隔震体系一般是通过在桥梁上、下部连接部位设置支座等耗能装置,控制结构的变形和耗能主要集中在耗能装置上,以保护上部结构、桥墩和基础不受损伤。这种体系的突出优点是避免出现延性抗震体系中桥墩结构进入塑性变形后的结构损伤,可以通过适当的参数选择与设计确保减隔震装置的变形性能,既能保证连接部位的可靠传力与支承作用,也可避免结构主体发生严重损伤<sup>[1]</sup>。

双曲面球型减隔震支座是我国研发的一种新型减隔震装置,被广泛地应用到高烈度区大跨径连续梁桥的减隔震设计中<sup>[2]</sup>。该支座滑动球面的摩擦系数 $\mu$ 、两个球面的球心距 $H$ 和固定支座的水平极限承载力 $F_u$ 是影响其抗震性能的3个重要参数<sup>[3-5]</sup>。

本文通过对某大跨径连续梁桥进行大量支座参数分析,对上述3个参数进行深入研究,得到桥梁抗震性能与3个设计参数的变化规律,为采用双曲面球型减隔震支座进行抗震设计的桥梁提供指导。

## 1 设计参数分析

### 1.1 分析模型

本文主要研究支座滑动球面的摩擦系数 $\mu$ 、两个球面的球心距 $H$ 和固定支座的水平极限承载力 $F_u$ 对桥梁抗震性能的影响。因此,为了排除墩高、基础

布置、桩-土相互作用等其他非研究因素的干扰,本文分析模型选取一联65 m+85 m+65 m预应力混凝土变截面连续箱梁结构,其各墩位处的墩柱截面形式、墩高、基础布置和桩-土相互作用等因素均相同。桥宽13.3 m,采用单箱双室断面,梁高3.4~5.3 m,悬臂2.5 m。墩柱采用矩形墙式墩,截面尺寸为2 m(纵向) $\times$ 8 m(横向),承台采用切角型承台,承台厚2.0 m,下设7根直径1.8 m的钻孔灌注摩擦桩。每个墩位处横向均设置两个双曲面球型减隔震支座,支座间距6.0 m。中墩单个支座的竖向承载力为24 000 kN,边墩单个支座的竖向承载力为7 000 kN。

### 1.2 地震作用

桥梁抗震设防烈度为7度,II类场地地震动峰值加速度为0.15g,抗震设防分组为第三组。工程场地类别为IV类。

该桥采用的E1、E2地震动加速度反应谱控制参数依据文献[6]选取。

得到的E1、E2地震动水平设计加速度反应谱曲线如图1所示。

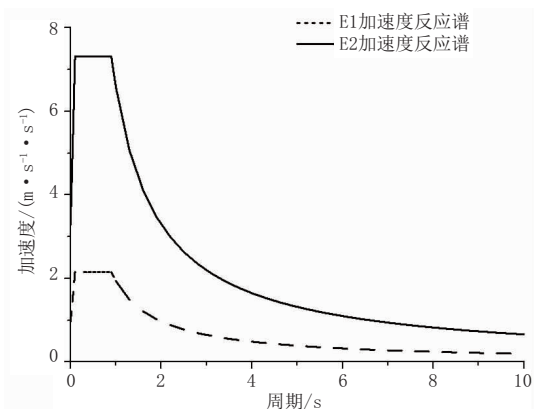


图1 E1、E2地震动水平设计加速度反应谱

收稿日期: 2022-12-12

作者简介: 王振南(1987—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计与研究工作。

采用纽约州立大学布法罗分校(the State University of New York at Buffalo)工程地震实验室(Engineering Seismology Laboratory)开发的 RSCTH (Response Spectrum Compatible Time Histories)程序,生成 E1、E2 地震动各一条加速度时程曲线,如图 2 所示。

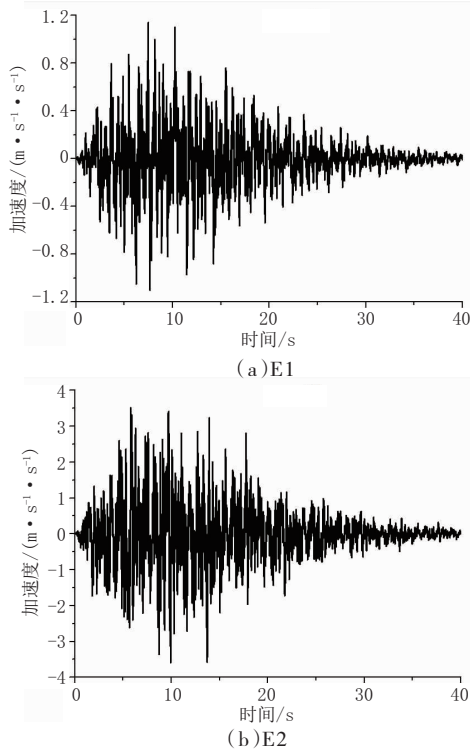


图 2 E1、E2 地震动水平设计加速度时程

### 1.3 有限元模型建立

使用大型有限元软件 Midas Civil 2021, 建立该桥有限元计算模型。桥梁跨径布置为 65 m+85 m+65 m 三跨预应力混凝土变截面连续箱梁。桥梁有限元计算模型均以顺桥向为 X 轴,横桥向为 Y 轴,竖向为 Z 轴。主梁、桥墩和承台均离散为空间梁单元,承台底部采用 6×6 的土弹簧模拟桩-土相互作用。桥墩高度均为 10.4 m。Midas Civil 有限元计算模型如图 3 所示。

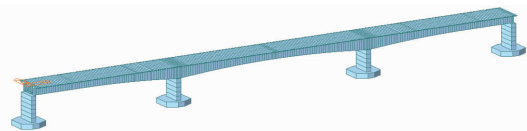


图 3 Midas Civil 有限元计算模型

### 1.4 摩擦系数 $\mu$ 和球心距 $H$ 参数分析

双曲面球型减隔震支座滑动球面的摩擦系数  $\mu$ <sup>[7]</sup> 分别取 0.02、0.03、0.04 和 0.05, 两个球面的球心距  $H$  分别取 3.0 m、4.0 m、5.0 m 和 6.0 m, 将两个参数进行组合,共得到 16 组不同的支座设计参数。分别提取各组支座设计参数下 E2 顺桥向和横桥向地震作用下中墩结构的最大剪力、弯矩,以及支座位移等

地震响应结果进行分析,并分析摩擦系数  $\mu$  和球心距  $H$  对桥梁抗震性能的影响。

提取 16 组支座设计参数下 E2 顺桥向和横桥向地震作用下中墩结构的最大剪力、弯矩,以及支座位移等地震响应,如图 4、图 5、图 6 所示。

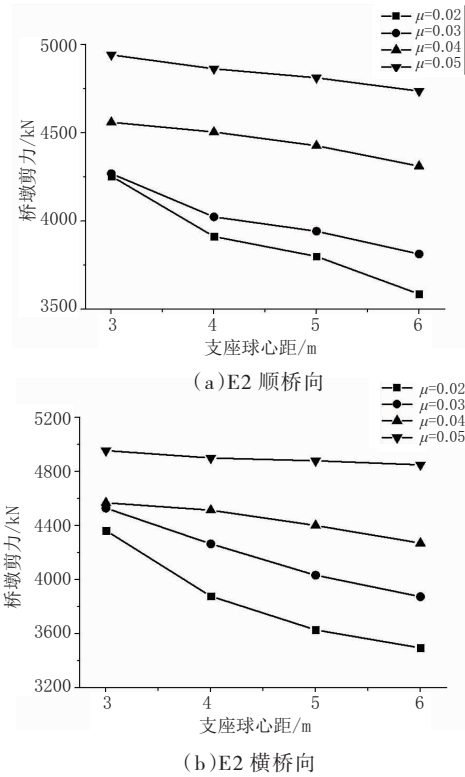


图 4 不同支座设计参数 E2 地震下桥墩剪力

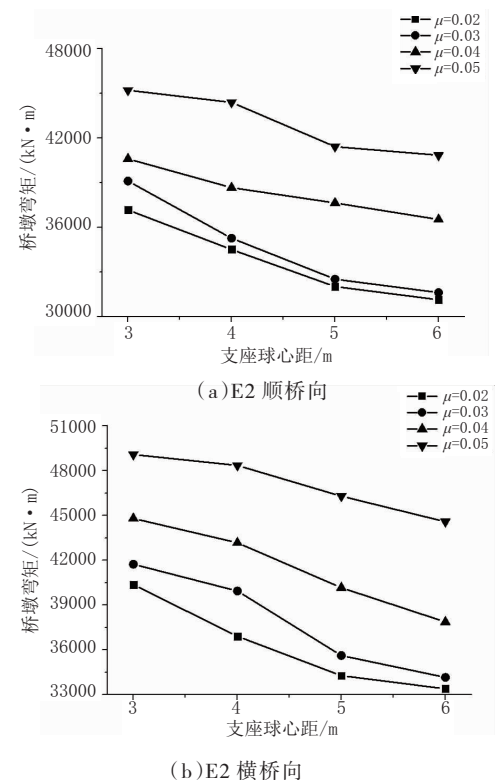


图 5 不同支座设计参数 E2 地震下桥墩弯矩

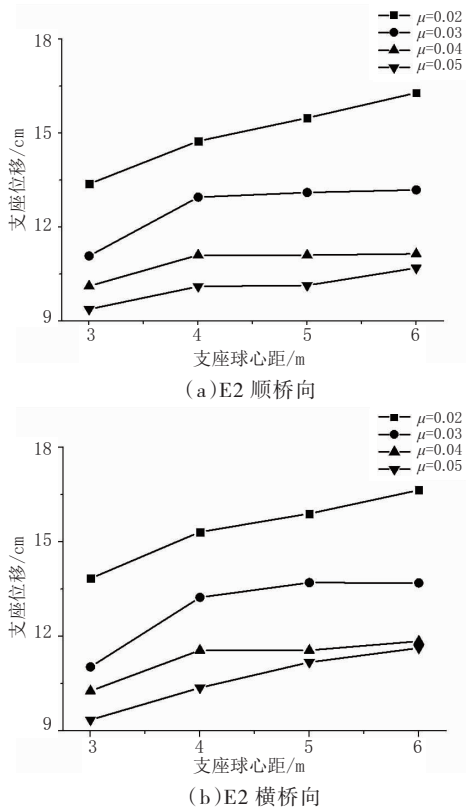


图6 不同支座设计参数E2地震下支座位移

通过图4、图5、图6分析可得:

(1) 支座滑动球面的摩擦系数 $\mu$ 一定时,随着支座球心距 $H$ 的增大,桥墩剪力和弯矩减小,而支座位移增大。

(2) 支座球心距 $H$ 一定时,随着支座滑动球面摩擦系数 $\mu$ 的增大,桥墩剪力和弯矩增大,而支座位移逐渐减小。

(3) 桥梁下部结构内力和支座位移的变化规律,根本原因在于支座参数的变化带来支座性能的变化。支座滑动球面摩擦系数 $\mu$ 的增大和支座球心距 $H$ 的减小,带来支座滑动时的水平荷载变大和支座滑动后刚度的增加,进而引起地震下桥梁结构内力的增加和位移的减小;反之,支座滑动球面摩擦系数 $\mu$ 的减小和支座球心距 $H$ 的增大,带来支座滑动时的水平荷载变小和支座滑动后刚度的减小,进而引起地震下桥梁结构内力的减小和位移的增大。桥梁工程师可以根据桥梁特点和抗震设计难点(控制内力和控制位移)等,合理选择支座设计参数,实现预期桥梁抗震性能。

### 1.5 支座水平极限承载力 $F_u$ 参数分析

采用双曲面球型减隔震支座的桥梁顺桥向受力特点为:(1)正常使用荷载或小震(E1地震)作用下,固定型的双曲面球型减隔震支座的环形套箍不发生

破坏,桥梁存在固定墩,由单个固定墩抵抗正常使用荷载与小震作用。(2)罕遇地震(E2地震)作用下,固定型的双曲面球型减隔震支座的环形套箍发生破坏,固定支座转换为活动支座,全桥设置双曲面球型减隔震支座的所有墩位一起抵抗罕遇地震作用。

合理设计支座水平极限承载力 $F_u$ ,是实现“小震作用下,由单个固定墩抵抗地震作用;罕遇地震作用下,全桥所有墩位一起抵抗罕遇地震作用”设计目标的关键<sup>[8]</sup>。

固定支座的水平极限承载力 $F_u$ 的设置,与正常使用荷载和小震(E1地震)作用下固定支座和固定墩承受的荷载紧密相关,因此本文通过对E1地震作用下固定支座和固定墩承受的荷载进行分析,得到固定支座的水平极限承载力 $F_u$ 的设置原则。

根据桥梁正常使用状态下的变形需求进行支座布置,如图7所示。根据E1地震计算结果,固定墩位顶支座承受最大水平荷载为3651 kN,占支座竖向承载力的3651/24000=15.2%,设置支座水平极限承载力 $F_u$ 分别占支座竖向承载力的16%、18%、20%、22%、24%、26%、28%和30%,提取E2地震作用下固定型双曲面球型减隔震支座发生体系转换(即环形套箍发生破坏)时的桥墩剪力和弯矩进行比较。比较结果如图8所示。

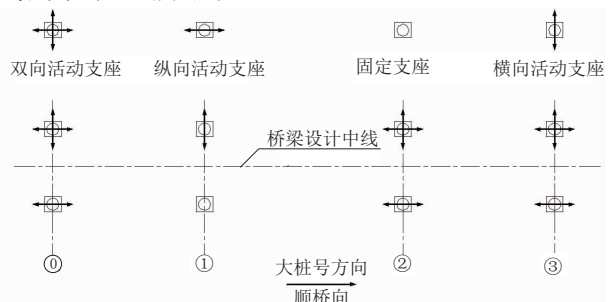


图7 桥梁支座布置示意图

通过图8分析可得:随着支座水平极限承载力 $F_u$ 的提高,其支座发生体系转换时的桥墩剪力和弯矩显著提高,参数 $F_u$ 对桥梁结构的抗震性能影响很大。

桥墩墩底截面箍筋布置如图9所示。

依据文献[6],计算得到桥墩抗剪能力为 $2.59 \times 10^4$  kN,大于图8中地震作用下桥墩所承受的剪力。因此,从桥墩抗剪角度,支座水平极限承载力与竖向承载力的比值取16%~30%均可。

桥墩截面尺寸为矩形2.0 m × 8.0 m,配置单排纵筋,间距为10 cm,纵筋直径拟选择28 mm和32 mm两种。

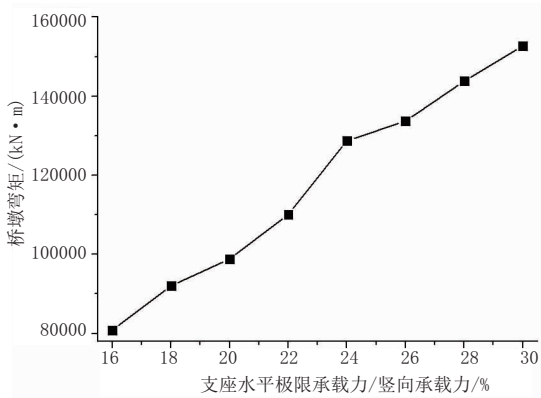
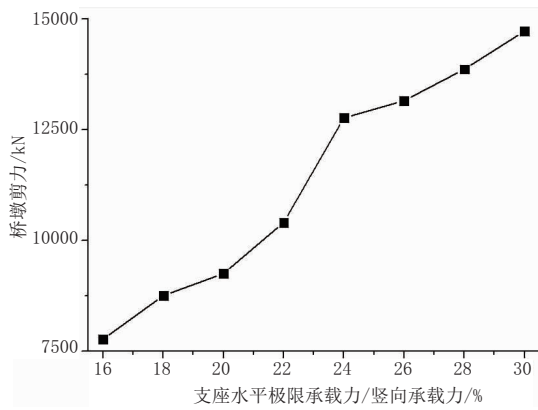


图 8 不同支座水平极限承载力  $F_u$  对应的桥梁剪力、弯矩

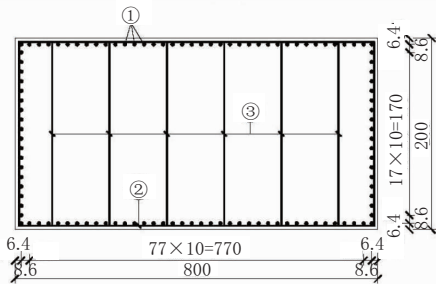


图 9 桥墩墩柱箍筋布置图(单位:cm;箍筋直径和布置:16 mm@100 mm)

对桥墩进行  $M-\varphi$  分析<sup>[9-10]</sup>得到,纵筋直径为 28 mm 时,桥墩截面抗弯能力为  $9.01 \times 10^4$  kN·m。此时支座水平极限承载力与竖向承载力的比值只能取 16%,桥墩截面纵筋配筋率为 0.8%;选择其他参数时,桥墩在支座未发生体系转换之前即进入塑性,不满足规范要求。纵筋直径为 32 mm 时,桥墩截面抗弯能力为  $1.05 \times 10^5$  kN·m。此时支座水平极限承载力

与竖向承载力的比值可以取 16%、18%、20%,桥墩在支座发生体系转换时未进入塑性,满足规范要求,桥墩截面纵筋配筋率为 1.0%。

综上所述,双曲面球型减隔震支座水平极限承载力  $F_u$  取值应合理。取值过高,带来下部结构工程造价偏高和受力过大,影响经济性和安全性。综合考虑桥梁经济性与抗震安全性,建议该支座水平极限承载力不宜取值过高,以满足支座发生体系转换时桥墩等下部结构不进入塑性且抗剪性能满足要求为基本原则。

## 2 结论

本文对双曲面球型减隔震支座的滑动球面摩擦系数  $\mu$ 、球心距  $H$  和固定支座的水平极限承载力  $F_u$  进行深入研究,得到桥梁抗震性能与上述 3 个支座设计参数的变化规律,并给出 3 个设计参数选取原则,为采用双曲面球型减隔震支座进行抗震设计的桥梁提供一定指导。

### 参考文献:

- [1] 叶爱君,管仲国.桥梁抗震[M].2版.北京:人民交通出版社,2011.
- [2] 彭天波,李建中,范立础.双曲面球型减隔震支座的开发及应用[J].同济大学学报(自然科学版),2007,35(2):176-180.
- [3] 刘洋.高烈度区长联大跨连续梁减、隔震设计研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [4] 张华,彭天波,李建中.双曲面球型减隔震支座参数对减隔震效果的影响[C]//建筑设计、施工及维修加固新技术研讨会论文集,兰州:中国公路学会桥梁和结构工程分会,2008:156-161.
- [5] 王剑.双曲面球型减隔震支座对桥梁抗震性能影响的研究[D].西安:长安大学,2014.
- [6] JTG/T 2231-01-2020,公路桥梁抗震设计规范[S].
- [7] 张永亮,刘聪聪,李晓钟,等.长联连续梁桥双曲面球型减隔震支座参数影响研究[J].桥梁建设,2022,52(1):94-100.
- [8] 陈杰.八度地震区铁路大跨度连续梁桥减隔震设计[J].铁道建筑,2022,62(1):83-86.
- [9] 赵永刚,韩文涛,史贵君.临河黄河特大桥抗震设计与研究[J].公路工程,2013,38(6):189-193.
- [10] 崔海军.地震激励桥梁基础减隔震支座性能研究[J].公路工程,2018,43(6):108-112.