

基于各向异性摩擦摆支座的大跨度混凝土混合连续梁减震性能研究

周杰峰¹, 郭子鹏¹, 许勇^{1,2}, 王华胜¹, 蔡仕强¹

(1. 山东轨道交通勘察设计院有限公司, 山东 济南 250100; 2. 济南市轨道交通全生命周期状态监测及健康评估重点实验室, 山东 济南 250100)

摘要: 以京杭运河特大桥三跨混合连续梁桥为工程背景, 采用有限元方法建立全桥精细化数值模型, 针对桥梁在地震作用下的动力响应展开研究。通过设置无减隔震措施与各向异性摩擦摆支座2种对比方案, 系统分析不同工况下桥梁结构的动力特性与地震反应差异, 从纵桥向与横桥向双维度揭示各向异性摩擦摆支座的减震控制效果。研究表明, 各向异性摩擦摆支座能够有效调节桥梁自振特性, 显著减小关键截面内力与墩顶位移, 提升结构整体抗震性能。该减震措施兼具技术可行性与经济合理性, 能够在强震作用下保障桥梁受力安全并维持使用功能, 可为同类大跨度混凝土混合连续梁桥的抗震设计与减隔震优化提供理论依据和工程参考。

关键词: 大跨连续梁桥; 抗震性能; 减隔震; 摩擦摆支座

中图分类号: U443; TU997

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)07-0047-05

Study on Seismic Mitigation Performance of Long-Span Concrete Composite Continuous Beam Bridge Based on Anisotropic Friction Pendulum Bearings

ZHOU Jiefeng¹, GUO Zipeng¹, XU Yong^{1,2}, WANG Huasheng¹, CAI Shiqiang¹

(1. Shandong Rail Transit Survey and Design Institute Co., Ltd., Jinan 250100, China; 2. Jinan Key Laboratory of Full Life-Cycle Condition Monitoring and Health Assessment for Rail Transit, Jinan 250100, China)

Abstract: Based on the three-span composite continuous beam bridge of the Beijing-Hangzhou Grand Canal Bridge, a refined full-bridge numerical model is established by a finite element method to study the dynamic response of the bridge under the action of earthquake. By comparing two schemes of one without seismic isolation measures and the other with anisotropic friction pendulum bearings, the dynamic properties and seismic response difference of bridge structures under the different working conditions are systematically analyzed, and the seismic control effect of anisotropic friction pendulum bearings is revealed from the two dimensions of longitudinal and transverse bridge directions. The research result shows that the anisotropic friction pendulum bearings can effectively adjust the natural vibration characteristics of the bridge, remarkably reduce the internal forces of critical sections and the displacement of pier tops, and enhance the overall seismic performance of the structure. The proposed seismic control measure has the technical feasibility and economic rationality, can guarantee the stress safety and maintain the using function of the bridge under the effect of a strong earthquake, and can provide a theoretical basis and engineering reference for the seismic design and isolation optimization of similar long-span concrete composite continuous beam bridges.

Keywords: long-span continuous beam bridge; seismic performance; seismic isolation and reduction; friction pendulum bearing

1 工程概况

京杭运河特大桥韩庄段跨越Ⅱ级规划通航, 主

桥采用85 m+180 m+85 m, 3孔一联的混合梁连续梁, 为尽可能降低主梁梁高, 在主跨跨中引入61.5 m钢箱梁。主梁支点梁高降至10 m, 降低了结构总高度, 边主跨比从常规的0.55降至0.47。钢筋混凝土结合段长4.5 m, 吊装段长度57 m, 结合段在陆地全节段预制, 通过运河运至桥位, 然后利用桥面吊机整体吊

收稿日期: 2026-03-13

作者简介: 周杰峰(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事桥梁设计与研究工作。

装。详见图1。

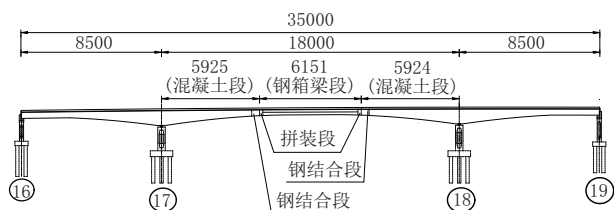


图1 桥型布置图(单位:cm)

混凝土箱梁根部梁高10 m,边跨跨中梁高4.091 m,中跨与钢结构相接断面高度为3.898 m。箱梁顶板厚度为0.3 m,底板厚0.373~1.100 m。腹板厚度根据受力差异分区设计,从根部到跨中依次采用80 cm、65 cm 2种厚度;边跨现浇段为主梁整体压重考虑,腹板厚度为85 cm;中跨钢混结合段部位腹板厚度局部加厚至110 cm。混凝土主梁顶板宽12.75 m,箱底宽7.0 m,翼缘悬臂长2.875 m。主桥混凝土梁体采用全预应力混凝土设计体系,配置纵、横、竖3向预应力筋,保障预应力施加效果与结构长期耐久性。

钢筋混凝土结合段是连接钢箱梁与混凝土箱梁的关键部位,设计核心为实现刚度与传力的平顺过渡,本桥结合段实际长度4.5 m,需可靠传递轴力、弯矩、扭矩与剪力等各类荷载,同时具备足够的承载安全储备、良好的刚度过渡特性以及优异的耐久性和抗疲劳性能。

钢筋混凝土结合段除在顶板锚固T16、T17钢束外,还在梁体内布置专用结合段预应力钢束,均采用19 ϕ^{s} 15.2(15-19)钢束,以保证连接的可靠性。

大跨度连续梁桥若未采取减隔震技术措施,其结构自振周期较短,在强地震作用下易发生共振效应,导致结构严重破坏。通过对震后大跨度连续梁桥破坏案例的调研分析,发现桥墩结构的损伤破坏与梁体过大的水平位移,是此类桥梁在地震中发生破坏的主要形式^[1-5]。本文以具体大跨连续梁桥为例,开展桥梁基于各向异性摩擦摆支座减隔震方面的研究。

2 抗震分析参数

本次研究的桥梁所在区域反应谱特征周期为0.45 s,地震动峰值加速度为0.10g,对应全国地震烈度区划为Ⅶ度。依据《公路工程地质勘察规范》(JTG C20—2011)第7.10.1条,路线通过区属强震区。根据地质报告,本线路土体可不考虑地震砂土液化和软土震陷问题。地震场区安评报告提供了桥梁抗震计算的地震动参数,见表1。E2地震水准对应时

程波见图2。在时程分析中,对两设防水准分别输入3条地震动加速度,根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020),应取3组计算结果的最大值。

表1 京杭运河特大桥地震动参数

地震设防	超越概率	衰减系数	平均峰值加速度/ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	特征周期/s
E1	50年10%	1.0	101	0.55
E2	100年4%	1.0	153	0.75

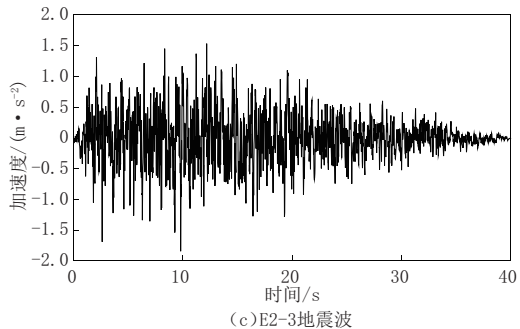
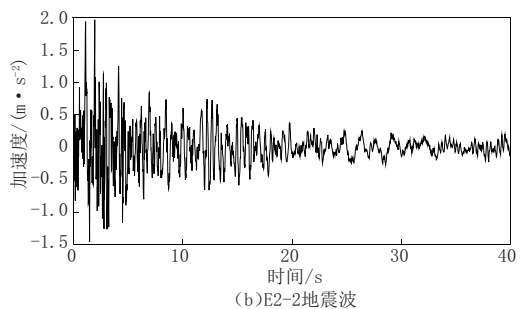
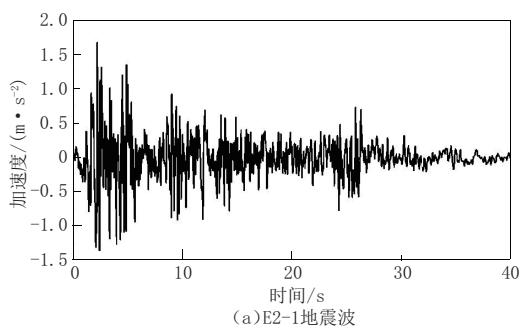


图2 E2水准地震动时程曲线

根据《公路桥梁抗震设计规范》(JTG/T 2231-01—2020),水平向地震采用纵桥向和横桥向分别输入,A类桥梁应考虑竖向地震输入。其中纵桥向输入为:1×纵向地震波+0.67×竖向地震波;横桥向输入为:1×横向地震波+0.67×竖向地震波。

3 动力特性及地震响应分析

3.1 有限元动力模型

采用Sap2000软件,建立京杭运河特大桥主桥的计算模型,以空间梁单元模拟主梁和墩柱。桩土作用采用土弹簧模型模拟,并考虑相邻联桥梁的影响。

桥梁二期恒载根据实际分布情况,等效为均布荷载均匀施加于主梁单元上,保证模型荷载与实际工程一致。该桥模型中边界条件详见表2,表中的0表示自由,1表示主从或固结,S表示弹簧约束^[6],其中17#墩为固定墩。

表2 京杭运河特大桥主桥模型边界及连接条件

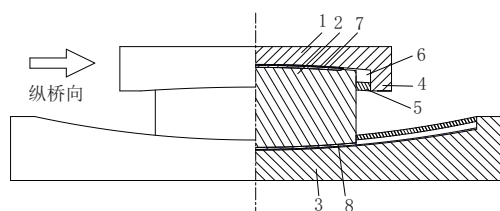
方案	位置	自由度					
		X	Y	Z	Θ_x	Θ_y	Θ_z
方案一	主梁与固定墩	1	1	1	1	0	1
	主梁与活动墩	0	1	1	1	0	1
	承台底	s	s	s	s	s	s
方案二	主梁与固定墩	0	0	1	1	0	1
	主梁与活动墩	0	0	1	1	0	1
	承台底	s	s	s	s	s	s

为明确不同支座方案对桥梁整体抗震性能的作用规律,对计算有限元模型开展时程分析,确立2种对比分析方案。

方案一:固定墩处采用固定盆式支座,其余墩柱采用盆式活动支座,分析中假设墩柱在地震作用下保持弹性工作状态,仅发生弹性变形。

方案二:每个桥墩处采用各向异性摩擦摆式支座,分析中假设墩柱在地震作用下保持弹性工作状态,仅发生弹性变形。

各向异性摩擦摆减隔震支座作为传统摩擦摆支座的改进型装置,具备显著的性能优势。其核心设计特点为:支座上座板与下座板的双曲面凹槽长度和曲率半径,可根据桥梁纵向、横向的不同隔震需求灵活设计,实现桥梁纵、横桥向基于性能的个性化减隔震设计,使桥梁减隔震设计更具安全性、可靠性、经济性与适用性。通过上座板与下座板在纵桥向和横桥向的力与位移协同作用,实现支座的减隔震功能与自复位能力,有效适应地震作用的多维性,支座位视图详见图3。



注:1—上座板、2—中间滑块、3—下座板、4—长边挡块、5—短边挡块、6—双曲面凹槽、7—上耐磨板、8—下耐磨板。

图3 各向异性摩擦摆支座正视图

3.1.1 正常使用功能

在非地震的正常使用工况下,固定型各向异性摩擦摆支座的纵、横桥向均由剪力键装置约束,仅满足梁体的转动变形需求;纵向活动型支座的横桥向

由剪力键装置约束,可满足梁体纵桥向的温度伸缩滑移与各方向转动需求^[7];多向活动型支座无水平向限位约束,既可满足梁体水平向任意方向的滑移,又能适应梁体的转动变形。

3.1.2 地震情况下的减隔震功能

当地震超过设定烈度时,地震力达到剪力键装置的设计力,支座剪力键装置被剪断,全部支座发生可水平滑动。该类支座通过结构自重沿滑动曲面的切线方向的分力提供回复力,帮助上部结构回到原来的位置。支座的侧向滞回曲线的基本形状如图4所示^[8-9]。支座的侧向力 F 等于回复力与摩擦力之和^[10]:

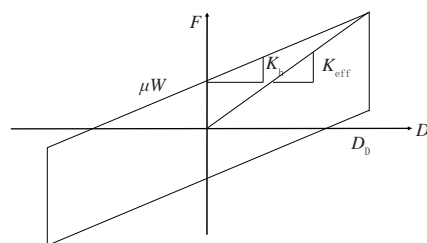


图4 各向异性摩擦摆减隔震支座侧向滞回曲线

$$F = \frac{W}{H} D + \mu W (\text{sgn} \dot{D})$$

式中: W 为上部结构的竖向恒载反力; D 为支座侧向位移; H 为滑动球面与转动球面之间的球心距; μ 为滑动球面的摩擦系数。

当地震超过设定烈度时,地震力达到剪力键装置的设计力,支座剪力键被剪断,所有支座发生水平滑动,侧向滞回曲线的控制参数有:

(1)屈服力:

$$F_y = \mu W$$

(2)初始刚度:

$$K = \frac{F_y}{x_y} = \frac{\mu W}{x_y}$$

式中: μ 为滑动摩擦系数; x_y 为屈服位移,一般取0.002~0.005 m,本次研究取0.025^[11-14]。

3.2 动力特性分析

基于建立的京杭运河特大桥主桥动力空间计算模型,对2种方案进行结构动力特性分析,主要周期与振型特征见表3。

对比2种方案的结构动力特性可知,采用各向异性摩擦摆支座与传统盆式支座的桥梁结构自振特性存在显著差异^[15-17]。采用各向异性摩擦摆支座后,桥梁基本自振周期为传统盆式支座方案的1.8倍。结构自振周期的合理延长,可有效避开地震动的卓越周期,降低结构共振效应。同时,2种方案的结构

表3 两种支座方案桥梁自振周期及振型特征

阶数	方案1 周期 /s	方案2 周期 /s	方案1 振型描述	方案2 振型描述
1	1.831	3.291	主梁一致纵飘	一阶反对称侧弯
2	1.555	3.253	主梁对称一阶侧弯	一阶对称侧弯
3	1.385	3.201	主梁竖向对称一阶弯曲	纵飘
4	1.067	3.079	主梁水平反对称一阶弯曲	二阶对称侧弯
5	0.890	1.465	主梁水平对称二阶侧弯	一阶对称竖弯

振型特征差异明显,传统盆式支座方案的桥梁振型以竖向弯曲和纵向飘移为主,而采用各向异性摩擦摆支座的桥梁振型以横向弯曲为主,振型特征的改变使桥梁结构在地震作用下的受力分布更合理,体现了各向异性摩擦摆支座良好的抗震性能优化效果。振型详见图5、图6。

4 优化分析

采用方案一时,E2水准地震作用下,下部结构的能力需求比相对较低,纵桥向墩底截面的能力需求比最小为1.15,横桥向墩底截面的能力需求比最小

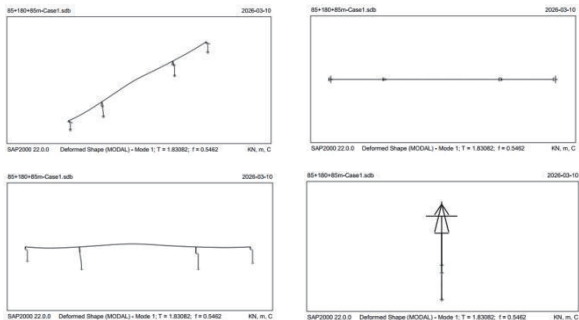


图5 方案一1阶振型图

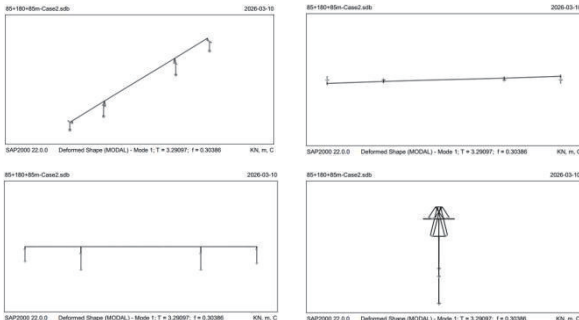


图6 方案二1阶振型图

为1.60。经过优化后,E2水准地震作用下,桥墩截面在纵向地震作用下的能力需求比为1.98~3.92;桥墩截面在横向地震作用下的能力需求比为3.99~4.50。详见表4、表5。

表4 墩底截面地震响应验算(纵向地震作用下)

墩号	方案一				方案二			
	最不利轴力/ kN	地震弯矩/ (kN·m)	等效屈服/ 弯矩/(kN·m)	能力 需求比	最不利轴力/ kN	地震弯矩/ (kN·m)	等效屈服/ 弯矩/(kN·m)	能力 需求比
16#	8 871	25 881	55 490	2.14	9 582	19 099	55 960	2.93
17#	74 344	230 483	265 500	1.15	72 693	69 357	263 100	3.79
18#	74 602	33 430	265 900	7.95	72 910	67 157	263 500	3.92
19#	9 773	31 998	56 040	1.75	9 465	28 163	55 840	1.98

表5 墩底截面地震响应验算(横向地震作用下)

墩号	方案一				方案二			
	最不利轴力/ kN	地震弯矩 (kN·m)	等效屈服 弯矩/(kN·m)	能力 需求比	最不利轴力/ kN	地震弯矩 (kN·m)	等效屈服 弯矩/(kN·m)	能力 需求比
16#	9 817	69 810	132 400	1.90	9 274	29 214	131 600	4.50
17#	74 974	221 713	410 700	1.85	72 593	98 205	405 600	4.13
18#	75 148	212 150	411 100	1.94	72 779	99 929	406 100	4.06
19#	10 303	83 094	133 100	1.60	9 736	33 188	132 300	3.99

5 结 论

对比2种方案的动力特性和地震响应差异,各向异性摩擦摆支座用于大跨度连续混合梁的隔震效果显著。通过以上分析,对京杭运河特大桥进行了E1、E2地震作用下的非线性时程地震响应分析及抗震性能验算,主要结论为:

(1)若采用普通盆式支座约束体系,京杭运河大

桥桥墩关键截面E1、E2地震下承载能力满足要求,但截面安全系数较低,仅为1.15,强震区采用固定墩对体系抗震不利。

(2)本桥墩身较矮,桥墩轴向压力小,强震作用下易出现截面抗弯验算不满足。采用各向异性摩擦摆支座可有效降低地震响应,支座剪力销已被剪断,变为双向摩擦摆滑动约束体系,可降低桥墩、桩基截面内力响应,保障桥梁下部关键截面处于弹性状态,

从而保护了主体结构。

(3)减隔震支座与非减隔震支座对桥梁结构动力特性的影响差异显著。采用各向异性摩擦摆支座后,桥梁基本自振周期约为盆式支座方案的1.8倍,且结构振型特征发生明显改变。盆式支座方案振型主要为竖向弯曲和纵向振动,而各向异性摩擦摆支座方案振型以侧弯为主,合理延长的自振周期与优化的振型特征有效提升了桥梁的抗震性能。

(4)根据纵横向地震分析,各向异性摩擦摆支座可以有效降低墩柱所承受的最大内力和最大墩顶位移。E2地震作用下各桥墩墩底和桩基截面均处于弹性阶段,满足规范要求。

参考文献:

- [1] 蔡纪锋.大跨度长联矮墩连续梁桥抗震性能研究[J].公路与汽运,2019(3):109-113;147.
- [2] 李超,牟江亭,张宇,等.高速公路多联连续梁桥隔震研究[J].哈尔滨工程大学学报,2024,45(4):682-690.
- [3] 黄俊豪,黎璟,钱永久,等.多级设防水准下大跨连续梁桥减隔震方案优化研究[J].桥梁建设,2020,50(6):66-72.
- [4] 赵人达,贾毅,占玉林,等.强震区多跨长联连续梁桥减隔震设计[J].浙江大学学报(工学版),2018,52(5):886-895.
- [5] 刘琪,聂尚杰,徐林.大跨长联波形钢腹板连续梁桥的隔震设计

研究[J].中外公路,2019,39(3):119-124.

- [6] 赵世超.齐鲁黄河大桥约束体系及抗震计算[J].城市道桥与防洪,2020(11):38-41.
- [7] 尹臻.曲线桥地震反应特性及减震研究[D].上海:同济大学,2018.
- [8] JT/T 1062—2025 桥梁减隔震装置通用技术条件[S].
- [9] 刘聪,李建中.大跨度系杆拱桥减隔震支座参数分析[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2013,26(1):8-13.
- [10] 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.
- [11] 邵长江,肖正豪,漆启明,等.摩擦摆支座隔震铁路连续梁桥振动台试验研究[J].振动与冲击,2021,40(14):292-298;306.
- [12] 孟洋.不同墩柱形式的城市高架桥抗震性能研究[J].城市道桥与防洪,2023(12):75-80.
- [13] 张精岳,王志强,刘福康.摩擦摆支座磨损对长联大跨连续梁桥抗震性能的影响[J].中外公路,2022,42(5):145-150.
- [14] 欧进萍,武沛松,关新春.大位移摩擦摆底层和多层隔震韧性结构[J].防灾减灾工程学报,2021,41(4):657-676.
- [15] 刘正楠,陈兴冲,张永亮,等.FVD与FPB在大跨长联减隔震体系梁桥中的联合作用机理研究[J].地震工程学报,2019,41(3):619-625.
- [16] 夏修身,崔靛波,陈兴冲.超长联大跨连续梁桥摩擦摆支座隔震研究[J].工程力学,2015,32(增刊1):167-171.
- [17] 王志英,张常勇.大跨度连续钢桁梁桥摩擦摆支座减隔震设计分析[J].桥梁建设,2015,45(2):58-64.

(上接第42页)

- 木建筑与环境工程,2008,30(2):98-102.
- [9] 徐心硕.沥青冷补液及其冷补料性能研究[D].重庆:重庆交通大学,2023.
- [10] 陈栋.重载改性沥青在城市道路铺装修复中的应用[J].上海公路,2025(4):109-114.
- [11] 李眉俊.温拌胶粉改性沥青混合料路用性能及抗滑性能研究[J].国防交通工程与技术,2026,24(1):32-38.
- [12] 赵伟翔.100%钢渣沥青混合料路用性能研究[J].苏州科技大学

学报(工程技术版),2026,39(增刊1):31-36.

- [13] 王素娟.沥青路面抗车辙混合料水温稳定性试验研究[J].汽车周刊,2026(2):72-74.
- [14] 王伟,刘博,宋戈,等.沥青混合料受压结构力链组成特征分析[J].材料导报,2026,40(1):68-73.
- [15] 刘晓宇.PCF抗车辙剂改性沥青混合料路用性能及耐久性研究[J].粘接,2026,53(1):122-126.
- [16] JTG E20—2011 公路工程沥青及沥青混合料试验规程[S].