

强震区异形拱桥结构体系选型与受力性能研究

秘志辉

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:为解决强震区异形拱桥复杂的结构受力问题,选取实际工程作为研究对象,设计了多跨连拱、多跨刚构连拱、刚构与拱梁组合3种结构体系,采用有限元软件建立三维精细化模型,系统分析恒载、活载、温度变化及地震荷载作用下各结构体系的内力分布特征,并展开对比研究。通过对比不同结构体系在拱肋、主梁等关键截面的受力状态,揭示结构形式对异形拱桥受力性能的影响。研究表明,在不考虑减隔震措施的情况下,多跨连拱与多跨刚构连拱结构体系应对静力荷载与地震荷载的响应性能更优;强震区的地震荷载效应远大于静力荷载效应,必须采用减隔震措施,以保证结构受力合理,抗震性能是决定结构体系的关键因素;在刚构与拱梁组合体系中,由于拱梁分离,通过增设减隔震支座,可有效改善强震区多跨异形拱桥的结构抗震性能,分析表明,地震内力响应得到大幅降低,抗震性能优异,该体系在强震区可作为推荐方案。

关键词: 异形拱桥;强震区;受力性能;结构体系;减隔震

中图分类号: U448

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0174-05

Research on Structural System Selection and Force Performance of Special-shaped Arch Bridges in Strong Earthquake Zones

MI Zhihui

[Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China]

Abstract: To address the complex structural force problems of the special-shaped arch bridges in the strong earthquake zone, by selecting the actual project as the research object, three structural systems of multi-span continuous arch, multi-span rigid-frame continuous arch, and rigid-frame and arch-girder combination are designed. A refined three-dimensional finite element model is established using finite element software to systematically analyze and compare the internal force distribution of each structural system under dead load, live load, temperature change and earthquake load. By comparing the force states of key sections such as arch ribs and girders in different structural systems, the influence of structural type on the force performance of special-shaped arch bridges is revealed. The results show that without seismic isolation and reduction measures, the multi-span continuous arch and multi-span rigid-frame continuous arch structural systems present better response performance under static and seismic loads. In strong earthquake zones, the effect of seismic load is much greater than that of static loads, so seismic isolation and reduction measures must be adopted to ensure the reasonable forces of structures. Seismic performance is the key factor determining the structural system. In the rigid-frame and arch-girder composite system, the arch and beam are separated. Adding seismic isolation bearings can effectively improve the seismic performance of multi-span special-shaped arch bridges in strong earthquake zones. The analysis shows that the seismic internal force response is greatly reduced with excellent seismic performance, so this system can be recommended for strong earthquake zones.

Keywords: special-shaped arch bridges; strong earthquake zones; force performance; structural system; seismic mitigation and absorption

0 引言

异形拱桥是相对于传统对称拱桥而言,通过对拱肋线形、截面形式、结构布置的创新设计,突破常规对称布局,形成具有独特造型与力学特性的一种

拱桥类型。它主要包括异型偏态拱桥^[1]、提篮拱^[2]、蝴蝶拱^[3]、空间异形曲面拱^[4]等形式。与传统拱桥相比,异形拱桥不仅具备拱结构受力合理、跨越能力强、材料利用率高的优势,还凭借新颖、灵动的造型设计,实现结构功能与美学价值的有机统一,成为提升城市形象、彰显地域文化的标志性建筑。例如,中国重庆市菜园坝大桥和天津市大沽桥、英国盖茨黑

收稿日期: 2026-03-05

作者简介: 秘志辉(1978—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁工程设计与管理工作。

德千禧桥、澳大利亚悉尼海港大桥等,均通过异形拱结构设计,实现交通功能与艺术价值的融合,成为全球知名城市地标。

国内外学者针对异形拱桥开展了大量研究,取得了诸多成果,构建了一定的理论体系,积累了丰富的实践经验。国外研究起步较早,早期研究聚焦异形拱桥的结构受力机理分析,通过理论推导与模型试验,初步揭示其在静力荷载下的力学特性。随着有限元技术的发展,精细化数值模拟方法被广泛应用于各类异形拱桥的受力分析与设计优化中,同时注重美学与力学的有机融合,形成了较为完善的设计体系。国内研究起步相对较晚,但依托大量的工程实践,研究在异形拱桥的结构创新^[5]、受力性能分析^[6-8]、施工技术^[9]等方面取得了突破性进展。学者针对不同类型的异形拱桥,开展了大量的理论研究、数值模拟与模型试验^[10],为工程实践提供了重要的理论支撑。

随着异形拱桥应用范围的不断扩大,高烈度地区、深水复杂地质条件下的异形拱桥建设案例日益增多,随之而来的结构设计、受力分析、施工控制等相关技术难题也越发突出,成为异形拱桥现实应用的关键瓶颈。本文的研究对象——临沂市南京路沂河大桥,处于强震区且跨越断裂带,地质条件十分复杂。本文通过对多种结构体系的受力性能分析与对比研究,为异形拱桥在强震区的结构体系选择与工程设计提供理论依据与技术参考。

1 工程背景

本文选取临沂市南京路沂河大桥作为研究对象,主桥为组合体系,由中跨下承式异形拱桥、边跨预应力混凝土连续梁和V形墩组成,跨径布置为50 m+150 m+150 m+50 m,桥面宽度为44.1 m(见图1)。

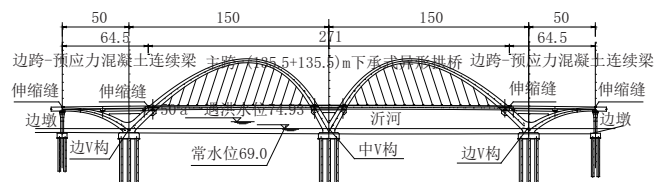


图1 总体布置图(单位:m)

拱肋为变截面钢箱拱,宽度为2.5 m,高度为3~5.5 m,形状为偏态抛物线,分2幅设置于机动车道外侧,吊杆间距为7 m。主梁为钢混组合梁,由2道钢箱主纵梁、标准间距为3.5 m的工形横梁、3道工形小纵梁和混凝土桥面板组成。主梁和拱肋采用固结体

系,通过拱梁结合段形成共同受力的整体结构。系杆分2组,每组采用直径 $\phi 15.2$ 钢绞线,7束组成1根,共37根,分别设置于2道钢箱主纵梁处。边跨主梁采用单箱7室的预应力连续箱梁。

中墩和次中墩为V形墩,每个V形墩由2个斜腿和系梁组成。系梁通过设置预应力来平衡拉力。边墩采用常规的分幅独柱墩结构。钢箱主梁结构通过支座支承于V形墩顶部。所有基础均采用桩基础,并按照嵌岩桩的要求设计。

2 多跨连续异形拱桥结构体系

拱桥的受力特点:在竖向荷载的作用下,拱脚处不仅会产生竖向力,还会有较大的水平推力。拱脚处存在水平推力,是拱式体系的主要受力特性之一。为确保拱正常工作,必须确保拱的推力体系安全、可靠、受力平衡。拱脚推力的结构处理,是拱桥结构设计创新面临的核心问题。本项目组在方案设计阶段,就对多跨连拱体系、自平衡多跨刚构连拱体系、刚构与拱梁组合体系3种结构体系开展研究。

2.1 多跨连拱体系

多跨连拱体系是边拱、中拱采用连续拱肋,拱梁分离,通过张拉边拱两端的系杆来平衡拱脚水平推力的连拱体系(见图2)。



图2 多跨连拱体系

中跨、边跨的连续拱肋与中墩、次边墩的承台固结,并支承于边墩顶部,桥面处横向2片拱之间采用强大的横梁固结连接。拱梁分离,中跨横梁悬吊于拱肋上,边跨横梁简支于立柱上。在拱与桥面的交接处,主梁支承在拱肋间的横梁上,并设置伸缩缝,主梁纵向刚度不参与全桥温度变形的受力分配。该体系类似“横梁体系”的拱桥,在恒载作用下,拱肋的水平推力完全由柔性系杆承担,主梁不参与分担。

本项目在设计多跨连拱结构体系时,通过调整边中跨拱肋矢跨比和主梁重量来调整次边墩的水平推力,在边拱两端张拉系杆,以平衡恒载作用下的拱肋推力。次边墩、中墩需要具有一定的纵向抗推刚度,当某一孔在运营阶段受到温度变化、活载等作用时,拱脚将发生一定的位移,引发连拱效应。中跨主梁因倾斜吊杆力的作用而承受轴向压力,边跨主梁无轴向压力,只承受竖向弯曲。该方案的缺点是梁拱分离,主梁不参与整体刚度的构成,结构的整体刚

度较小。

2.2 自平衡多跨刚构连拱体系

自平衡多跨刚构连拱体系是边跨采用刚构、中跨采用拱桥,形成连续拱肋,并在拱肋两端张拉系杆的连拱结构体系(见图 3)。

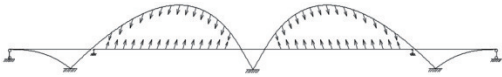


图 3 自平衡多跨刚构连拱体系

边跨拱肋与边跨主梁、中跨拱肋(桥面以下)之间固结形成刚构,桥面处横向 2 片拱之间采用强大的横梁固结连接。中跨主梁通过吊杆,悬吊于拱肋上;中墩侧主梁与中跨拱肋、中墩 V 构之间固结;边跨侧主梁支承于边墩 V 构横梁或外伸牛腿上,并设置伸缩缝,以释放中跨主梁因温度变化产生的伸缩变形。在主桥 2 边跨端横梁之间布置强大的水平拉索,以平衡拱肋的水平推力。

2.3 刚构与拱梁组合体系

针对强震区的结构受力特点,本文提出一种由中跨下承式系杆拱桥、边跨连续梁与流线形 V 构组成的组合体系(见图 4)。



图 4 刚构与拱梁组合体系

中跨为 2 跨连续下承式系杆拱桥,拱梁固结,在中墩处,支承于中墩 V 构墩顶,在边跨侧,支承于边 V 构中跨侧墩顶。

边跨为 2 跨预应力混凝土连续梁,分别支承于边墩墩顶、边 V 构边跨侧墩顶和中跨侧墩顶。边 V 构边跨侧及中跨侧流线形的斜腿墩柱与墩顶水平系梁形成刚构,横桥向 2 个 V 构之间不设横梁。中跨拱桥和边跨连续梁在边 V 构中跨侧墩顶处设置伸缩缝。

中 V 构结构体系恒载作用下不承受水平推力,边 V 构可通过调整边跨连续梁和中跨下承式系杆拱桥的支反力来实现平衡。中 V 构、边 V 构的斜腿中心线均为边中跨拱轴线的延伸,在斜腿顶部设置预应力混凝土系梁,以平衡 V 构斜腿间的水平推力。

3 不同结构体系的静力性能

拱桥受力与系杆张拉力及吊杆索力直接相关。为对比 3 种结构体系在恒载作用下的静力特性,本文遵循同样的原则进行调索,主要原则如下:一是在恒载作用下,系杆张拉力完全抵消拱脚的水平推力,拱脚水平反力接近于零;二是各结构体系采用同一

种调索方法,遵循相同的原则进行合理成桥状态的拟定;三是在主跨尺寸、材料、荷载保持一致的情况下,可适当调整边跨结构,使结构整体受力更为合理,即各结构体系均处于合理的状态下。

3.1 拱肋内力对比

拱肋内力对比主要从拱顶、中拱脚、边拱脚和边跨拱脚 4 个方面展开。在体系三中,拱脚的对比,实际是 V 形墩墩底截面的对比。各体系拱肋轴力的对比情况如表 1 所示,各体系拱肋弯矩对比情况如表 2 所示。

表 1 各体系拱肋轴力对比						单位:kN
结构体系	荷载 工况	拱肋轴力				
		拱顶	中拱脚	边拱脚	边跨拱脚	
体系一: 多跨连拱体系	恒载	-19 008	-38 248	-42 871	-32 083	
	汽车	-2 090	-3 783	-4 656	-1 007	
	升温	-890	-369	-669	604	
体系二: 自平衡多跨刚 构连拱体系	恒载	-18 597	-40 365	-45 197	-37 435	
	汽车	-2 087	-3 898	-5 028	-2 679	
	升温	-1170	1 637	311	2 146	
体系三: 刚构与拱梁组 合体系	恒载	-19 341	-43 320	-69 738	-61 084	
	汽车	-2 160	-3 551	-4 652	-3 243	
	升温	65	202	-683	460	

表 2 各体系拱肋弯矩对比						单位:kN·m
结构体系	荷载 工况	拱肋弯矩				
		拱顶	中拱脚	边拱脚	边跨拱脚	
体系一: 多跨连拱体系	恒载	1 738	-65 772	-102 847	-38 657	
	汽车	2 660	-34 238	-39 403	-22 577	
	升温	-5 134	34 748	26 205	-6 697	
体系二: 自平衡多跨刚 构连拱体系	恒载	3 675	33 585	-74 569	-48 227	
	汽车	2 649	-23 580	-19 666	-20 375	
	升温	-6 380	-23 352	12 849	-13 746	
体系三: 刚构与拱梁组 合体系	恒载	1 201	51 679	82 890	77 997	
	汽车	2 492	-20 809	-38 789	-17 946	
	升温	123	-4 693	11 214	-2 083	

拱肋是拱桥主要的受力构件,其受力状态直接影响全桥结构的受力合理性。从分析结果可知,3 种体系的拱肋受力特征如下。

(1)在恒载作用下,相较于其他 2 种体系,体系三在边拱脚处的轴力最大,量值相差达到 50% 以上,这主要是系杆预应力引起的轴力增量所致。3 种体系在拱顶和中拱脚处的轴力基本相当;体系一在边拱脚处的轴力比体系二略小,主要是为调整边拱受力,边跨主梁采用了钢结构。

(2)在恒载作用下,弯矩较大值出现在拱脚处。整体而言,体系二的弯矩较小,体系一在中跨边拱脚

处的弯矩最大,且明显大于其他 2 种体系;体系三在边跨拱脚处的弯矩明显大于其他 2 种体系。

(3)在汽车荷载作用下,3 种体系在主拱范围内的轴力相当,差异主要出现在边拱拱脚处,体系三在该处的轴力最大。

(4)在汽车荷载作用下,弯矩较大值同样出现在拱脚处,且体系二在各拱脚处的分布更加均匀,对比 3 种结构体系,其弯矩较小。体系一在中拱脚和边拱脚处的弯矩均明显大于体系二;体系三在边拱脚处的弯矩与体系一相当。

(5)在整体升温工况下,3 种体系受力差异较大,体系三上下部分离,整体刚度较小,温度效应最小,其各位置的轴力与弯矩量值均较小。体系一和体系二均为连续拱肋,整体刚度大,温度效应更为明显,其中体系二增设了 V 构刚架区,温度效应最为明显。

3.2 主梁内力对比

主梁内力对比不考虑主梁钢束的影响,仅对比主跨主梁、梁端及跨中位置的内力。主梁轴力对比情况如表 3 所示,主梁弯矩对比情况如表 4 所示。

表 3 主梁轴力对比 单位:kN

结构体系	荷载工况	主梁轴力			
		边梁端	跨中	中梁端	中 V 构顶段
体系一:多跨连拱体系	恒载	-16	-10 221	-21 596	-21 543
	汽车	-18	-1 437	-2 537	-2 556
	升温	5	-198	-275	-331
体系二:自平衡多跨刚构连拱体系	恒载	-17	-9 388	-20 392	-14 296
	汽车	-22	-1 302	-2 373	-3 573
	升温	17	-656	-863	-9 058
体系三:刚构与拱梁组合体系	恒载	-249	-10 165	-21 368	-48 898
	汽车	5 501	4 377	3 142	268
	升温	-3 040	-3 067	-3 075	-3 141

表 4 主梁弯矩对比 单位:kN·m

结构体系	荷载工况	主梁弯矩			
		边梁端	跨中	中梁端	中 V 构顶段
体系一:多跨连拱体系	恒载	16 190	3 231	-7 537	-20 683
	汽车	11 609	16 161	-11 400	-14 595
	升温	-3 389	-13 247	12 525	14 000
体系二:自平衡多跨刚构连拱体系	恒载	2 082	6 805	-21 088	-26 234
	汽车	3 023	16 135	-17 968	-19 950
	升温	-2 501	-16 253	23 670	3 356
体系三:刚构与拱梁组合体系	恒载	11 532	-3 584	3 834	-38 696
	汽车	5 860	15 744	-12 433	-21 394
	升温	-2 168	229	1 152	-466

从分析结果可以看到,3 种体系的主梁受力特征如下。

(1)在恒载作用下,主跨范围内的主梁轴力基本相同,其中微小的差异主要源于成桥索力的差异;主梁轴力分布差异较大处为中 V 构顶段,其中体系三的轴力最大,等于系杆索力,远大于其他体系在该处的轴力。

(2)在恒载作用下,主跨范围内的主梁弯矩主要与成桥索力相关,对比的意义不大。中 V 构区域的主梁受力较大,且呈现体系三>体系二>体系一的态势。

(3)在汽车荷载作用下,主梁轴力差异较为明显,体系一和体系二以受压为主,体系三则以受拉为主;体系一和体系二的轴压力相差不大。

(4)在汽车荷载作用下,主梁弯矩分布特征基本与恒载作用下的弯矩分布特征相同;各体系主梁弯矩在跨中处基本相当;体系一在边梁端无索区的弯矩较长,因此,无索区跨中处正弯矩较大;中 V 构区的主梁受力状态为体系三>体系二>体系一。

(5)在整体升温工况下,体系二主梁在中 V 构段与拱肋固结成刚架区,产生较大的轴向压力;体系一主梁分离,轴力基本为零;体系三主梁与拱肋为拱梁固结体系,在温度作用下会产生一定量值的轴力;体系一与体系二在跨中处和中梁端均会产生较大的弯矩,其量值与汽车荷载状态下相当。

4 不同结构体系的动力性能

4.1 动力性能分析

为研究不同结构体系对主桥地震响应的影响,本文为 3 种结构体系的布置方案建立动力计算模型,对三者的结构地震响应进行比较分析。3 种体系在各方向激励作用下的内力最大值如表 5 所示。

从分析结果可以看到,3 种体系的结构动力性能特征如下。

(1)通过对 3 种结构体系进行反应谱分析与对比,在 3 个方向的地震激励作用下,3 种结构体系均产生较大的轴力与弯矩,且量值显著大于恒载效应。

(2)在顺桥向加速度的作用下,轴力最大值均在边 V 构位置,顺桥向剪力和顺桥向弯矩最大值均位于中墩墩底。体系二与体系三的剪力和弯矩显著大于体系一。

(3)在横桥向加速度的作用下,轴力最大值均位于中墩墩底,呈现体系一>体系二>体系三的特征;横桥向剪力和横桥向弯矩最大值位于中墩或次中墩墩底,呈现体系三>体系二>体系一的特征。

表5 内力最大值

结构体系	输入方向	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)
体系一: 多跨连拱体系	顺桥向	10 905	23 393	402 084
		边V构底	中墩底	中墩底
	横桥向	16 781	34 458	412 746
		中墩底	中墩底	中墩底
	竖桥向	10 311	7 464	120 159
		次墩底	次墩底	次墩底
体系二: 自平衡多跨刚构连拱体系	顺桥向	18 218	34 828	582 333
		边V构底	中墩底	中墩底
	横桥向	14 543	34 903	450 812
		中墩底	次墩底	中墩底
	竖桥向	12 110	10 028	64 476
		次墩底	次墩底	次墩底
体系三: 刚构与拱梁组合体系	顺桥向	14 994	36 246	562 545
		边V构底	中墩底	中墩底
	横桥向	4 934	54 118	874 172
		中墩底	中墩底	中墩底
	竖桥向	14 470	10 168	157 520
		次墩底	次墩底	次墩底

(4)在竖桥向加速度的作用下,轴力、顺桥向剪力和顺桥向弯矩最大值均位于次中墩墩底;轴力和顺桥向剪力呈现体系三>体系二>体系一的特征;顺桥向弯矩呈现体系三>体系一>体系二的特征。

4.2 体系三减隔震效果分析

为对比研究体系三的减隔震效果,上、下部结构之间的支承体系布置方案如下。

方案一:采用常规支承体系,即中V形墩处采用纵向固定支座,边V形墩处采用纵向滑动支座,横桥向均采用横向固定。对该方案采用反应谱方法进行分析,结果如图5所示。

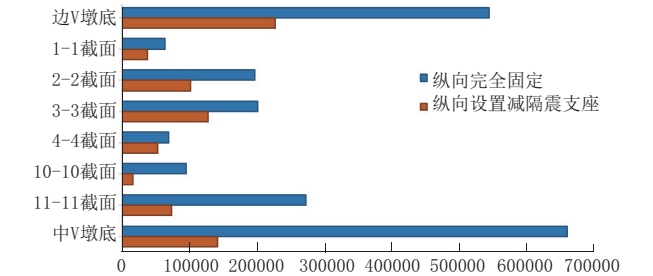


图5 E1地震作用下关键截面弯矩对比图(“纵向+竖向”输入)

方案二:在中V形墩和边V形墩顶部设置摩擦摆式减隔震支座,在支座水平限位装置剪坏后,通过摩擦摆式减隔震支座耗能并提供水平恢复力,有效控制墩梁间的相对位移。对该方案采用非线性时程方法进行分析,结果如图6所示。

通过以上分析可知,在E1地震作用下,当体系三采用普通支座并假定水平向约束力足够强时,主桥关键截面的地震内力响应较大。若采用摩擦摆式

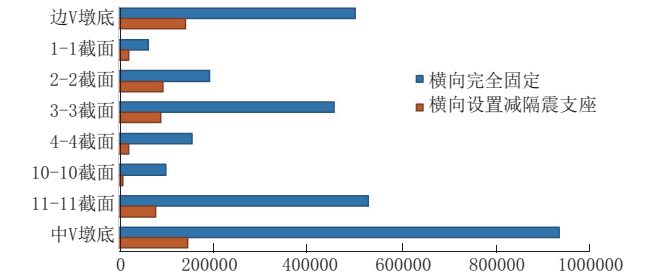


图6 E1地震作用下关键截面弯矩对比图(“横向+竖向”输入)

支座支承体系进行减隔震设计,则地震内力响应得到大幅度降低。

5 结 语

(1)在恒载和汽车荷载作用下,体系一和体系二因具有更强的整体刚度,相对而言,结构更优,但相应的,其对温度荷载更为敏感。在地震荷载作用下,体系三受力相对更大。在不考虑减隔震措施的情况下,体系一和体系二更具优势。

(2)在强震区,无论采用何种结构体系,地震荷载效应都远大于静力荷载效应,仅依靠结构自身的强度抵御地震荷载并不可行或不经济,必须采用减隔震措施,才能保证结构受力的合理性。因此,抗震性能的优劣将决定桥型方案的选择。

(3)体系三由于拱梁分离,可通过增设减隔震支座,有效改善强震区多跨异形拱桥的结构抗震性能,大幅减小基础规模。因此,体系三更具备优势,最终实施方案即为此方案。

参考文献:

[1] 孙兵,曲慧,赵佳男.鹅城大桥主桥曲杆受力和中墩支座反力分析研究[J].上海公路,2024(3):47-54.

[2] 张德明,陈亮,张朝阳,等.泉州金鲤大桥总体设计[J].世界桥梁,2025,53(2):8-14.

[3] 李学松.东湾大道沙涌桥设计构思[J].城市道桥与防洪,2023(11):80-83.

[4] 孙永超,韩宝良,杨冰,等.异型拱桥钢拱肋吊杆锚固区设计及优化研究[J].桥梁建设,2025,55(3):148-154.

[5] 郑爱华,赵彬,李科,等.成都新建五岔子大桥梁墩节点优化设计[J].城市道桥与防洪,2022(8):69-61.

[6] 林玉柱.异形拱桥的受力特点分析及施工控制研究[D].大连:大连理工大学,2016.

[7] 姜徐磊,李维华,郭小平,等.大跨度异形拱桥全桥受力行为及稳定性分析[J].广东土木与建筑,2022,29(6):73-76.

[8] 朱利明,申昆,王兴赞.活载作用下空间三索面斜吊杆异形拱桥吊杆可靠度研究[J].中外公路,2023,43(1):76-82.

[9] 黄华,蒲少杰,李小祥.超宽幅梁拱组合钢结构景观拱桥施工关键问题研究[J].城市道桥与防洪,2022(10):131-135.

[10] 韩强,刘芑汐,惠斌,等.空间异形拱桥振动台试验设计[J].地震工程与工程振动,2024,44(1):104-114.