

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.04.026

城市快速路与轨道交通合建高架桥桥墩设计研究

聂立力, 周迅, 熊伟

(中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430010)

摘要: 为节省用地和减少工期,某机场快速路工程采用城轨共建的双层高架桥结构型式,下部结构采用Y形桥墩。城市快速路与轨道交通合建高架桥是一种节省空间、提高效率、美化环境的新型桥梁结构,但也面临着复杂的受力和抗震问题。为满足公路规范和铁路规范的要求,对下横梁及桥墩采用容许应力法和极限状态法双重控制设计。在抗震设计中,考虑轨道梁无缝线路长钢轨约束的影响以及加入基础和后继结构的影响,计算结果更准确合理。计算结果表明桥梁的静动力性能均能满足规范要求,为该类桥梁的设计施工提供依据。

关键词: 双层高架; Y形桥墩; 结构型式比选; 结构设计原则; 抗震

中图分类号: U488.25

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)04-0107-04

0 引言

随着城市化进程的加快,城乡建设用地面临着日益紧张的局面。交通建设属于永久性用地,尤其在平原地区,受到了严格的用地指标限制^[1]。因此,在多个交通工程项目同时进行,如何节约用地成为了评价工程效益的重要指标之一。当城际铁路与轨道交通共同建设时,采用合并建造双层高架桥梁的方式可以有效减少土地占用^[2]。双层高架桥梁具有节省空间、线形灵活等特点,可适应复杂多变的山区地形和环境^[3]。但是,双层高架桥梁也存在着上部结构荷载大、结构建筑高度高等问题,导致其横向抗震性能较差^[4]。因此,在设计中需着重关注其抗震性能,必须充分考虑轨道梁无缝线路长钢轨约束和基础及后继结构的影响,以提高计算精度和合理性。本文以某机场快速路工程城轨共建高架桥为例,分析了采用该方式的可靠性和安全性,并为类似项目提供了参考意见。

1 桥梁结构概述

某机场快速路工程全长约 18.8 km,总体布置采用“高架快速路+轨道交通+地面辅道”建设形式,城市快速路与轨道城际线共建。

车道规模:高架上层标准段城市快速路双向 6 车道,高架下层双线城轨,地面辅道采用四幅路形

式,双向 6 快 2 慢。断面图见图 1。

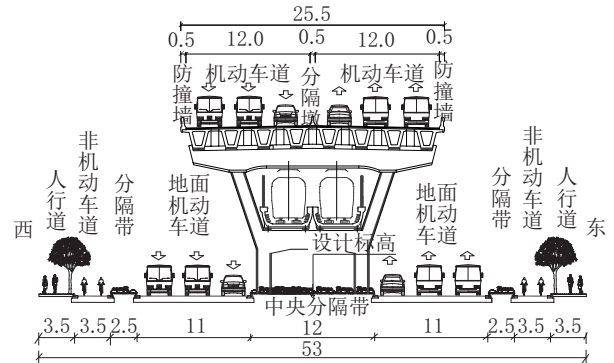


图 1 工程断面图(单位:m)

主线桥墩柱采用市政高架与轨道一体化结构形式,根据一般路段和车站位置轨道限界需要,有 Y 形墩和 H 形墩两种外形。标段段桥墩一般构造见图 2。

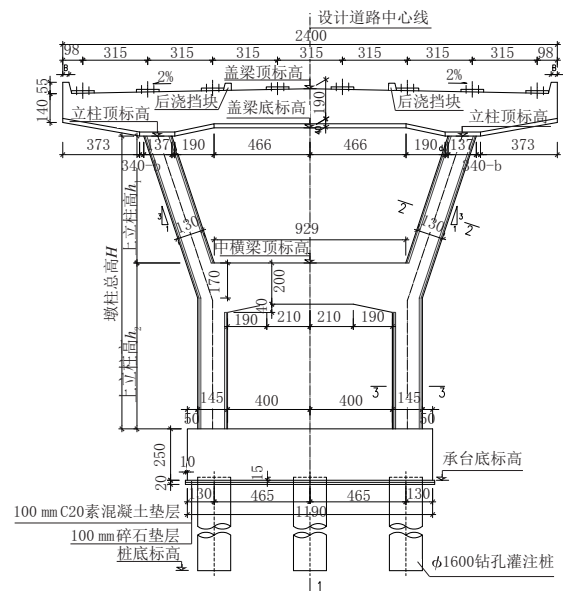


图 2 标段段桥墩一般构造图(单位:cm)

收稿日期: 2023-03-04

作者简介: 聂立力(1983—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

Y形墩下部直立,在桥墩横梁以上向两侧外伸,斜率为1:3。桥墩外侧之间距离为10.9 m。35 m以下跨径墩柱下立柱横向尺寸为1.45 m,大跨位置下柱横向加宽至1.95 m,上柱横向尺寸均为1.3 m厚,纵向尺寸根据墩柱高度及桥跨布置有2.0、2.2、2.5、2.8 m四种类型。进出轨道车站位置采用H形墩,除大跨及道岔梁位置外,H形墩立柱横向尺寸均为1.45 m,纵向根据墩高尺寸予以加大。上盖梁为预应力结构形式,截面高度1.90(2.2) m,下横梁为预应力结构形式,高度2.0(2.5、2.8) m,见图3、图4。大跨位置下立柱和下横梁尺寸予以加大。

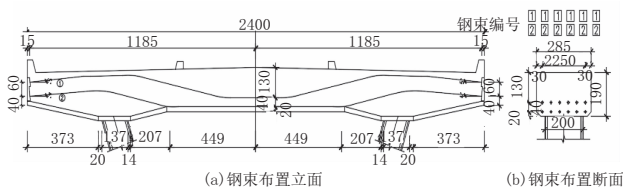


图3 上盖梁钢束布置图(单位:cm)

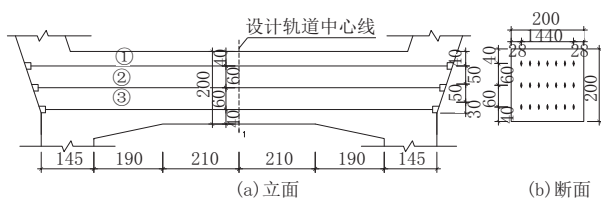


图4 下横梁钢束布置图(单位:cm)

桥墩基础采用 $\phi 1.5$ m和 $\phi 1.6$ m群桩基础,承台下设6根或8根或10根或12根钻孔灌注桩,承台厚度为2.5 m或2.8 m。

2 结构形式比选分析

常用双层高架结构形式有现浇梁和预制梁两种,其中采用现浇梁需要先搭支架施工上层梁,再拆除支架,搭设下层支架现浇下层梁,工序繁多,工期长,投入较大,而采用预制结构,梁场集中预制,同步架体施工,在工期、施工投入及节约造价等方面有较大的优势。因此该工程采用预制结构,上层采用常规预制小箱梁,下层采用预制槽型轨道梁,上层通过常规架桥机架设,下层轨道梁通过调整桥墩净空保障下层特制架桥机架设下层轨道梁空间。下部结构有Y形和H形桥墩的型式,其中Y形占地较小,型式也较美观,因此标准段采用Y形^[5]。

3 结构设计原则

一体化结构设计原则及标准如下。

(1)一体化桥墩上立柱、上层高架桥墩立柱及桩基

按公路极限状态设计,进行承载能力极限状态和正常使用极限状态计算,同时满足城市及公路桥梁相关规范及相关构造规定和工艺要求。

(2)一体化桥墩下横梁

一体化桥墩下横梁主要承受轨道梁荷载,可按铁路规范和轨道交通规范,采用容许应力法进行结构设计。

(3)一体化桥墩下立柱及基础

高架道路与轨道交通共用的下立柱及基础,按现行公路桥涵设计规范的极限状态设计方法进行结构设计,并采用铁路容许应力法进行校核。

4 静力分析结果

4.1 上层盖梁计算

桥墩盖梁计算采用MIDAS Civil进行内力计算分析,其中预应力盖梁按A类预应力混凝土构件设计。在作用(或荷载)短期效应组合下,拉应力不超过规范限值。建模时为方便活载加载考虑上构横梁部分,活载以纵向计算活载反力反算为车辆荷载,在横梁上进行影响线加载。通过弹性连接模拟支座,恒载根据纵向计算反力加载在支座部位的横梁上。承载能力极限状态和正常使用极限状态受力见图5至图8。

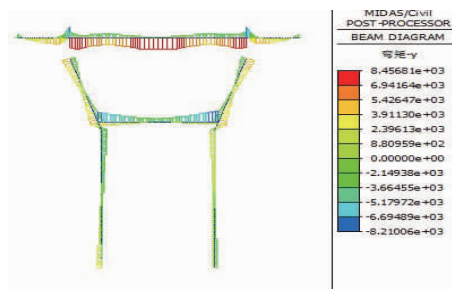


图5 承载能力极限状态弯矩包络图

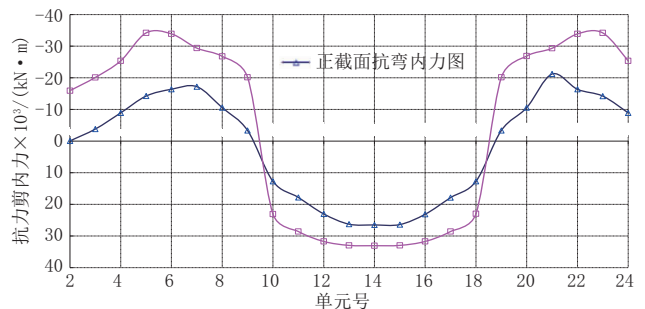


图6 承载能力极限状态正截面抗弯承载力验算结果图
计算时共分6个施工阶段,分别为:

- (1)桥墩施工;
- (2)盖梁施工,钢束一次张拉;
- (3)架设上部结构梁;
- (4)钢束二次张拉;

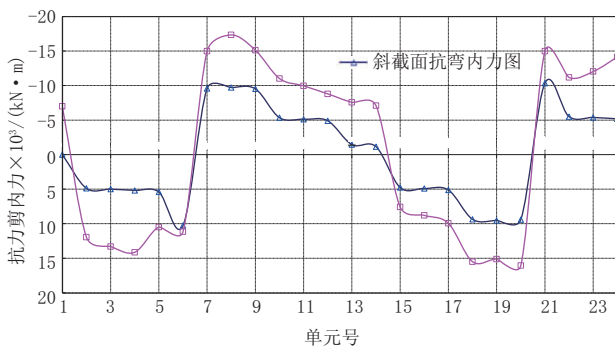


图7 承载能力极限状态斜截面抗弯承载力验算结果图

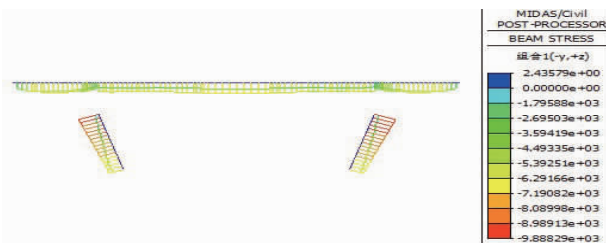


图8 正常使用极限状态短暂效应组合下上缘应力包络图

(5)桥面系施工;

(6)成桥后 10 a 收缩徐变。

施工阶段最大压应力为 -6.94 MPa,最大拉应力 0.23 MPa,均满足规范要求,拉应力仅在墩顶出现;考虑到弯矩折减后可忽略。根据使用阶段正截面抗裂验算结果可知:长期荷载组合效应下未出现拉应力;短期荷载组合效应下未出现拉应力,正截面抗裂验算满足规范要求,混凝土构件可以满足规范 A 类预应力混凝土构件的设计要求。可见在短期荷载作用下,主梁最大竖向位移出现在悬臂端,减去桥墩的竖向位移之后,最大位移值为 0.8 cm。根据 JTG D62—2004 第 6.5.3 条规定:采用 C50 混凝土时,挠度长期增长系数为 1.425,故 $0.8 \times 1.425 = 1.14$ cm $<$ $462/300 = 1.54$ cm,刚度满足规范要求。

4.2 下层横梁计算

下层横梁作为城轨铁路梁的承重结构,按照 A 类预应力混凝土构件进行设计。经验算横梁强度、应力及刚度宽度皆能满足公路及铁路规范要求。计算内容与上盖梁计算内容类似,在此不赘述。

4.3 桥墩计算

永久荷载:自重 + 二期 + 预应力 + 收缩徐变 + 沉降。

基本可变荷载:汽车活载 + 列车活载 + 汽车冲击力 + 列车冲击力 + 离心力 + 长钢轨纵向力。

其他可变荷载:汽车制动力、列车制动力、列车横向摇摆力、温度效应、支座摩阻力、风力。

偶然荷载:断轨力、汽车撞墩力、地震作用。

无缝线路长钢轨的纵向力包括伸缩力、挠曲力和断轨力,该次静力计算不考虑偶然荷载的组合,故不考虑断轨力作用。

根据规范要求,挠曲力与伸缩力不同时组合,制动力(牵引力)不与伸缩力组合,制动力(牵引力)不与挠曲力组合。由于本项目线位平曲线半径最小为 $4\ 000$ m,铁路产生离心力均较小可忽略不计。制动力按活载的 15% 计。

桥墩墩身按《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)第 5.2 条手算进行复核。对桥墩墩身截面按《铁路桥涵钢筋混凝土和预应力混凝土结构设计规范》(TB10002.3—2005)进行复核算。

对于桥墩计算长度系数,根据以往工程经验及相关资料,为简化计算,全部按 1.5 取值。

在 4.1 条盖梁计算的模型基础上,补充一些荷载进行桥墩验算。其中上部结构横向风力、列车摇摆力以集中荷载方式加载,上层高架制动力以均布荷载加载于箱梁横梁半幅,下层轨道梁制动力、钢轨纵向力、顺桥向温度力以集中荷载加载,上层顺桥向温度力、桥墩纵横向风力以均布荷载加载。选取最不利桥墩 Pm231# 进行计算,计算结果见表 1,从表 1 中可以看出桥墩承载力和裂缝宽度满足规范要求。

表 1 Pm231# 墩验算结果

墩高/m	截面尺寸/m	方向	内力/kN	抗力/kN	裂缝宽度/mm
21.917	1.45 × 2.2	顺桥向	42 997	66 466	0.157
		横桥向	27 578	44 979	0.137

Pm231# 墩高 21.917 m,下立柱高度 15.521 m,桥墩底截面为 1.45 m \times 2.2 m。其中桥墩墩底顺桥向最大组合内力为 $42\ 997$ kN,抗力为 $66\ 466$ kN,安全系数 1.54,最大裂缝宽度 0.157 mm $<$ 0.2 mm;桥墩墩底横桥向最大组合内力为 $27\ 578$ kN,抗力为 $44\ 979$ kN,安全系数 1.63,最大裂缝宽度 0.137 mm $<$ 0.2 mm。

5 抗震分析

抗震分析中,采用在承台底设置 6 个自由度弹簧刚度模拟桩-土相互作用。为了模拟轨道系统无缝钢轨与下层轨道梁之间的耦合效应,扣件的力学性能对桥梁结构的影响,采用弹簧-质量系统来模拟无缝钢轨和后继结构的影响^[6],即在建模计算中建立出相邻的 2 联桥跨结构,在边跨端采用弹簧 K

值来准确模拟钢轨的约束作用^[7]。

选取跨路口第37联及其相邻两联(第36、38联)建立模型见图9,跨径布置为(3×30+35+50+35+2×30)m(桥墩 Pm247~Pm255)。

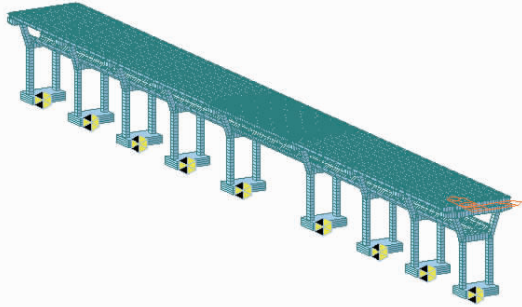


图9 抗震分析有限元模型

根据本项目地震安评结果,E1地震动峰值加速度按照0.029g取值,E2地震动峰值加速度按照0.149g取值。E1、E2水准地震时,均按反应谱输入。其中E1水准,桥墩应处于弹性阶段;E2水准保证桥墩不产生灾害性破坏损伤,对桥墩进行最大容许位移,最大容许剪力验算。

(1)E1水准作用下:桥墩墩底最大组合内力为14 780 kN,抗力为39 004.5 kN,安全系数2.64,墩底最大弯矩8 266 kN·m,初始屈服弯矩18 416 kN·m,桥墩处于弹性,桥墩满足E1条件下抗震设防要求。

(2)E2作用下桥墩的位移验算与塑性铰转动能力验算:选取第251#桥墩进行验算,桥墩截面弯矩曲率曲线见图10。

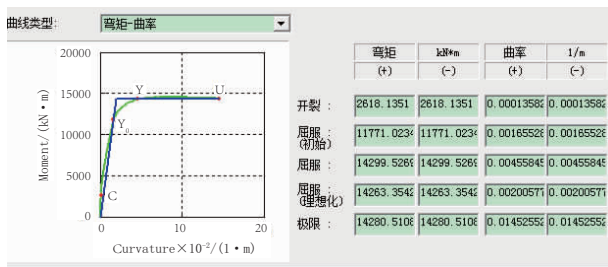


图10 E2作用下251#桥墩轴弯矩曲率曲线

由图10的弯矩曲率曲线可知:

$$\phi_y = 0.0046 \quad \phi_u = 0.0145$$

$$L_p = 0.08H + 0.022f_y d_s = 0.08 \times 159 + 0.022 \times 400 \times 3.2 = 155.4 \geq 0.044f_y d_s = 56.3 \text{ cm}$$

$$L_p = 2/3 \times b = 2/3 \times 170 = 113.3 \text{ cm} = 1.133 \text{ m}$$

塑性铰区域最大容许转角:

$$\theta_u = \frac{L_p(\psi_u - \psi_y)}{K} = 1.133 \times (0.0164 - 0.0053) / 2 = 0.006$$

(3)墩顶位移的验算

251号墩墩底容许位移:

$$\Delta_u = \frac{1}{3} H^2 \psi_y + \left(H - \frac{L_p}{2} \right) \theta_u = \frac{1}{3} \times 1590 \times 1590 \times 0.0046 + (15.9 - 1.133/2) \times 0.0145 = 0.47 \text{ m}$$

$$\Delta_d = 0.078 < \Delta_u, \text{故满足设计规范。}$$

251号墩墩顶位移与容许位移比较见表2,从表中可以看出墩顶位移满足设计规范。

表2 墩顶位移比较

墩号	方向	墩顶位移 Δ_d /m	容许位移 Δ_u /m	$\Delta_d < \Delta_u$	是否通过 验算
251	顺桥向	0.078	0.47	是	是
	横桥向	0.056	0.113	是	是

(4)塑性铰区域塑性转动能力的验算:

251号墩塑性铰转动能力的验算:

在E2作用下,潜在塑性铰区域塑性转角: $\theta_p = 0.00287 \leq \theta_u = 0.006$ 。

(5)能力保护构件验算:顺桥向塑性铰剪力为2 288.6 kN,抗力为7 935.5 kN;横桥向塑性铰剪力为1 865.4 kN,抗力为4 788.4 kN。

由以上分析结果可得到结论:

(1)在E1水准地震作用下,桥墩处于弹性状态,桥墩满足E1条件下抗震设防要求;

(2)在E2作用下,墩顶位于小于墩顶容许位移,满足抗震规范要求;

(3)在E2作用下,桥墩塑性铰区域最大剪力小于容许剪力,满足抗震要求。

6 结论

本文从对某机场路工程城轨共建高架桥梁桥墩建造型式、结构设计方法、抗震分析方法进行分析比较,得出以下结论:

(1)在城轨车站之外的一般高架桥区间段,采用一体式的Y形桥墩,在交通功能,节约用地、景观和环境的影响等各方面存在较大优势,是更加合理的结构型式。相比于传统的矩形或H形桥墩,Y形桥墩具有更好的空间利用率和美观性,可以减少对周围道路和建筑物的占用和遮挡。

(2)通过结构设计方法的对比分析,上层结构采用公路规范;下层结构采用公路规范设计方法为主,铁路规范进行校核,是较合适的设计方法。由于本项目中上层为城市快速路车行道,下层为城市轨道交通线路,在不同层次上承受不同类型和程度的荷载作用。因此,在保证安全性能和经济性能的前提下,选择适当的设计规范进行计算和检验是十分必要的。

(下转第121页)

表1 作用基本组合下花瓶墩主拉应力值一览表

序号	X/mm	Y/mm	Z/mm	数值/(N·mm ⁻²)
1	0	0	10 000	5.86
2	0	0	9 900	5.50
3	0	0	9 800	5.10
4	0	0	9 700	4.74
5	0	0	9 600	4.39
6	0	0	9 500	4.06
7	0	0	9 400	3.72
8	0	0	9 300	3.34
9	0	0	9 200	2.94
10	0	0	9 100	2.56
11	0	0	9 000	2.27
12	0	0	8 900	1.98
13	0	0	8 800	1.72
14	0	0	8 700	1.21
15	0	0	8 600	0.97
16	0	0	8 500	0.70
17	0	0	8 400	0.44
18	0	0	8 300	0.17
19	0	0	8 200	-0.01

6 结 语

本文对花瓶墩墩帽计算常用模型进行了比较,并与实体模型计算比较,得出如下结果。

(1)简单悬臂梁模型在计算双支座花瓶墩时与实际受力情况差别较大,其受力模式、配筋方式、配筋范围均与实际情况存在较大出入。

(2)规范规定的拉压杆模型与实体模型计算结果较为吻合,与实际受力模式一致。

参考文献:

- [1] JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].
- [2] 王海丰.桥梁薄壁花瓶墩墩顶裂缝分析[J].北方交通,2014(1):26-32.
- [3] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范(2015年版)[S].
- [4] 项海帆,等.高等桥梁结构理论(第二版)[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [5] 张勇.拉压杆理论在薄壁花瓶墩中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [6] SL 191—2008,水工混凝土结构设计规范[S].

(上接第 110 页)

(3)通过精细化的抗震分析,该类结构能满足规范要求。考虑到本项目所在地区为地震烈度 7 度区,并且高架桥梁为重要公共设施,在抗震设计中应采取更严格和细致的措施。本文采用有限元软件对该类结构进行了动力时程分析。研究表明,在考虑了土-桩相互作用、无缝钢轨和后继结构的影响等因素后,该类结构在不同工况下均能满足规范要求,并具有较好的抗震性能。

参考文献:

- [1] 杨敏.基于桥型适应性的公路桥梁桥型选择研究[D].西安:长安大

学,2013.

- [2] 韩丹.交通空间可再生能源规划策略研究[D].天津:天津大学,2018.
- [3] 陈敬一,杜修力,韩强,等.摇摆双层桥梁地震反应及抗倒塌能力分析[J].工程力学,2020,37(10):147-156.
- [4] 张洁,管仲国,李建中.双层高架桥梁框架墩抗震性能试验研究[J].工程力学,2017,34(2):120-128.
- [5] 赵毓成.高架车站结构形式分类及适用研究[J].中国市政工程,2012(4):96-99.
- [6] 韩鹏,王君杰,董正方.城市轨道交通高架桥梁抗震设计中的关键问题[J].震灾防御技术,2010,5(1):32-42.
- [7] 王君杰,朱敢平,元路宽,等.城市轨道交通结构抗震设计规范技术要点[J].地震工程与工程振动,2014(4):235-241.