

DOI: 10.16799/j.cnki.esdqyfh.240952

双层桥梁门式墩设计分析

邓宜峰

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘要: 随着城市建设用地日趋紧张及城市交通发展的需要,近年来双层桥梁逐渐增多,但双层桥梁门式墩结构受力复杂,与常规下部结构有所不同,需要对其受力特点进行深入分析。基于国内某工程实例,结合有限元计算对该双层桥梁门式墩结构进行受力分析,列举了立柱内力中各荷载占比,从立柱计算长度、下层桥梁支座间距、上层立柱偏心等几个方面阐述了双层桥梁门式墩设计要点,最终确定了截面尺寸,并得出了若干结论,以供国内类似工程的设计参考。

关键词: 双层桥梁;门式墩;设计分析;立柱计算长度;桥梁支座间距;立柱偏心

中图分类号: U443.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)06-0174-04

Design and Analysis of Portal Piers for Double-deck Bridge

DENG Yifeng

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: With the increasing scarcity of urban construction land and the demands of urban transportation development, the double-deck bridges have gradually become more prevalent in recent years. However, the force-bearing structures of the portal pier of double-deck bridges are complex and differ from the conventional substructures. It is necessary to carry out the in-depth analysis. Based on a domestic engineering example, the force-bearing analysis of the double-deck bridge portal pier structure is conducted by combining the finite element calculations. The proportion of various loads in the internal forces of the columns is listed. The design essentials of the double-deck bridge portal pier are elaborated from several aspects such as the calculated length of the columns, the spacing between the lower-deck bridge supports, and the eccentricity of the upper-deck columns. Finally, the section dimensions are determined and several conclusions are obtained for reference in the design of similar projects in China.

Keywords: double-deck bridge; portal piers; design and analysis; calculated length of column; spacing between bridge supports; column eccentricity

1 工程概况

某工程采用双层桥梁结构形式,上部结构采用预应力混凝土连续梁,下部结构采用门式框架墩(在下层桥梁以下设置横梁),上部结构与下部结构之间通过支座连接,基础采用承台、钻孔灌注桩基础。

选取该工程某墩进行分析,该墩上部结构形式为上层3×45 m预应力混凝土连续梁,下层2×45 m预应力混凝土连续梁;门墩间距27.6 m,上层柱高14 m,下层柱高13 m,上层桥宽36.9 m,包括7.65 m+6 m人行道及单向6车道;下层桥宽24 m,包括4 m人行道及单向4车道。设计基准期为100 a,汽车荷载为城-B

级,双层门式墩构造示意图如图1所示。

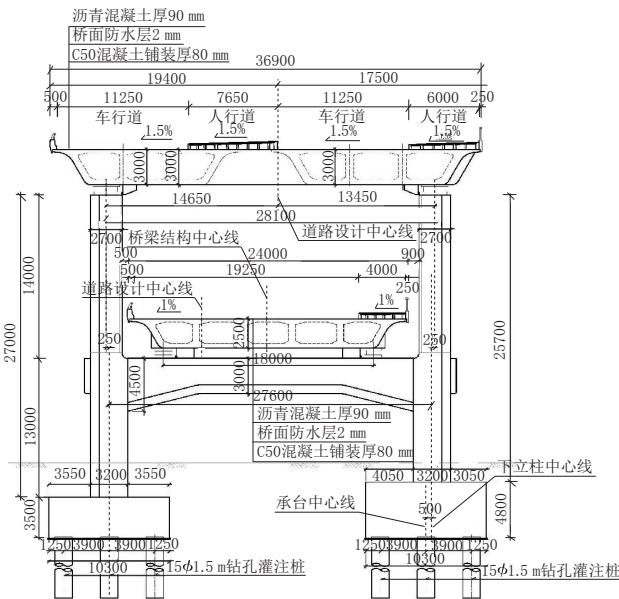


图1 双层门式墩构造示意图(单位:mm)

收稿日期: 2024-09-18

作者简介: 邓宜峰(1993-),男,工学硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

2 桥墩计算

2.1 模型建立

采用 MIDAS Civil 有限元分析软件建立梁单元模型,计算荷载包括上部结构恒载、汽车荷载、人群荷载、温度效应、收缩徐变、风荷载、下部结构自重等。横向计算考虑了汽车荷载、人群荷载在满载及最不利偏载下墩柱的轴力及弯矩,并叠加风荷载;纵向计算时,考虑了风荷载、温度力、制动力及支座摩阻力。采用全桩模型及 m 法来模拟桩基础的作用,模型如图 2 所示。

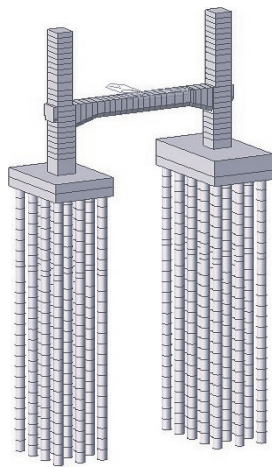


图 2 有限元模型

双层桥墩施工顺序为:(1)桩基、承台等施工;(2)下层立柱施工;(3)横梁施工,张拉第一批预应力;(4)上层立柱施工;(5)上部结构施工;(6)张拉第二批预应力;(7)二期铺装。

2.2 内力分析

双层桥墩在标准组合作用下横向弯矩图如图 3 所示。

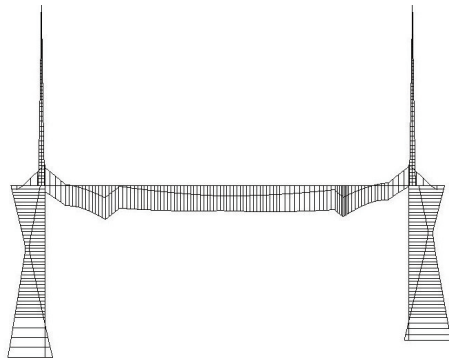


图 3 标准组合作用下横向弯矩图

由图 3 可知,该门式墩上层立柱内力较小,主要控制截面为横梁截面、下层立柱柱顶截面和柱底截面。横梁截面按照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)A 类预应力构件

进行验算,下层立柱柱顶、底截面按照偏心受压构件验算^[1]。设计要点在于确定立柱计算长度、下层桥梁支座间距、上下层立柱尺寸等。

3 主要控制截面影响因素

3.1 立柱计算长度

偏心受压构件计算长度的取值问题是截面验算的一个关键因素。不同设计人员对于桥墩的顺、横桥向计算长度采用的经验值往往不同。自由长度 l_0 的力学概念可从压杆稳定中计算临界压力的欧拉公式(式 1)中体现,规范基于 l_0 来考虑偏压构件的二阶放大效应也是从相同原理出发。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_0^2} = \frac{\pi^2 EI}{(\mu l)^2} \quad (1)$$

式中: EI 为结构刚度; l_0 表示压杆屈曲时挠曲线上弯矩零点之间的距离^[2-3],即为构件的计算长度; l 为构件的实际长度; μ 为计算长度系数,即自由长度与实际长度比值。

因此,可通过计算桥梁下部结构的失稳临界力 P_{cr} 反推计算参数 l_0 (式 2),本文即采用此法反推双层桥墩计算长度。

$$l_0 = \sqrt{\pi^2 EI / P_{cr}} \quad (2)$$

本文采用 MIDAS Civil 有限元分析软件对双层桥梁门式墩进行一阶失稳模态分析,在桥墩墩顶施加单位力,单位力作用下计算得到的一阶临界失稳系数即为 P_{cr} 。由于双层桥墩受力与单层桥墩不同,上下层立柱轴力不等,类似于《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)附录 E.0.3 条单阶柱的概念^[4]。采用 3 种方案进行对比分析,分别为在上层柱顶、下层柱顶处施加 1 kN 竖向单位力,在上、下层柱顶分别施加 0.6、0.4 kN 竖向力(此桥墩上下层立柱轴力大小之比),加载示意图如图 4 所示。

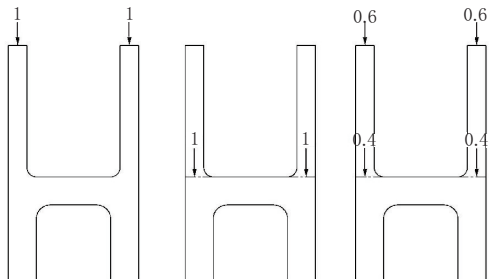


图 4 失稳分析加载示意图

按照上层柱高 14 m,下层柱高 13 m,桥墩尺寸按上层立柱 2.7 m×3.2 m、下层立柱 3.2 m×3.2 m 进行计算,顺、横桥向计算结果汇总于表 1 至表 3。

表 1 3 种方案桥墩顺桥向失稳临界力计算对比

顺桥向	方案 1	方案 2	方案 3
P_{cr}/kN	9.80×10^5	4.22×10^6	1.48×10^6
I/m^4	8.74	8.74	8.74
$E_c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	3.25×10^7	3.25×10^7	3.25×10^7
l_0/m	53.5	25.8	43.5
l/m	27	13	27
μ	1.98	1.98	1.61

表 2 3 种方案桥墩上柱横桥向失稳临界力计算对比

横桥向	方案 1	方案 2	方案 3
P_{cr}/kN	1.57×10^6	1.01×10^7	2.59×10^6
I/m^4	5.25	5.25	5.25
$E_c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	3.25×10^7	3.25×10^7	3.25×10^7
l_0/m	32.7	12.9	25.5
l/m	14	14	14
μ	2.34	0.92	1.82

表 3 3 种方案桥墩下柱横桥向失稳临界力计算对比

横桥向	方案 1	方案 2	方案 3
P_{cr}/kN	9.57×10^6	1.01×10^7	1.03×10^7
I/m^4	8.74	8.74	8.74
$E_c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-2})$	3.25×10^7	3.25×10^7	3.25×10^7
l_0/m	17.1	16.6	25.5
l/m	13	13	13
μ	1.32	1.28	1.27

值得注意的是,门式墩的顺桥向自由长度计算表中方案 1、方案 2、方案 3 符合规范规定的标准边界条件,即一端固定一端自由,其长度系数 μ 值应为 2.0。方案 3 参照《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)附录 E.0.3 条进行计算,根据该条计算得计算长度系数 $\mu=1.69$,与表 1 中的计算结果相符。

横桥向由于横梁具有一定约束作用,计算长度系数小于 2.0,类比于《钢结构设计标准》(GB50017—2017)8.3.3 条需乘以折减系数,根据工程设计经验,该折减系数与横梁连接方式、横梁位置等因素有关。

由此,类似双层桥梁门式墩计算长度可参照方案 3 计算方法进行一阶失稳模态分析反推桥墩计算长度。

考虑到该项目双层门式墩数量较多,上下层立柱轴力大小比例不一,偏不利取立柱计算长度如表 4 所列。

3.2 下层桥梁支座间距

由 2.2 节可知,横梁截面及下层立柱柱顶截面为主要控制截面,该截面内力主要受下层桥梁恒载影响。下层桥梁恒载由支座传递到横梁,并产生横梁跨中正弯矩和下层立柱柱顶弯矩。不难发现,支座间距设置对控制截面内力有重要影响。

表 4 立柱计算长度设计取值

桥墩形式	双层		
约束条件	自由	自由 (上立柱)	刚接 (下立柱)
受力方向	纵向	横向	横向
计算长度系数 μ	2.0	2.5	1.5
H 说明	$H_{上}+H_{下}$	$H_{上}$	$H_{下}$
立柱计算长度	$\mu H, H$ 为立柱节间长度		

受门墩间距及张拉空间限制,此桥墩最大支座间距可达 18 m,本节分别计算了支座间距为 10、14、18 m 时恒载作用下(无预应力)的横梁弯矩并汇总于表 5。

表 5 不同支座间距下桥横梁弯矩计算对比 单位: $\text{kN}\cdot\text{m}$

支座间距/m	10	14	18
跨中正弯矩	85 189	60 147	40 756
梁端负弯矩	-111 181	-95 700	-75 237

由表 5 可知,支座间距为 14、18 m 时横梁跨中正弯矩为支座间距 10 m 时的 70.6%、47.8%。在上部结构横梁计算满足规范要求的前提下,增大支座间距可以大幅改善门式墩横梁及下层立柱受力,进而缩小结构尺寸并减少横梁预应力束及桥墩钢筋用量。此桥墩在满足上部结构横梁计算及钢束张拉空间的基础上,支座间距选用 18 m。

3.3 上层立柱尺寸优化及偏心

由 2.2 节可知,上层立柱弯矩很小,下层立柱为控制截面。综合考虑结构安全性及经济性,上层立柱横向尺寸可以适当减小并与下层立柱外对齐。由此,上下层立柱形心不在一条直线上,产生偏心弯矩,此偏心弯矩与下层恒载引起弯矩相反,可减小下层柱顶控制截面弯矩。

该工程上立柱尺寸选用 2.7 m $\times$ 3.2 m,下立柱选用 3.2 m $\times$ 3.2 m,经计算在基本组合作用下,下层柱顶控制截面弯矩为 49 630 kNm,若上下层立柱尺寸均为 3.2 m $\times$ 3.2 m 则下层柱顶弯矩为 58 220 kN/m,偏心弯矩使墩顶控制截面弯矩减小 15%。上层立柱尺寸优化及偏心可以有效提高双层桥梁门式墩结构的经济性。

4 计算分析

在确定主要控制截面影响因素后,更新有限元模型并提取标准组合下各控制截面内力,如表 6 至表 8 所列。

由表中数据可知,立柱轴力中恒载占比超 90%,立柱横桥向弯矩中恒载及温度占比较大,顺桥向弯

表 6 各单项荷载轴力效应占标准组合内力比值表

截面位置	恒载		活载		温度		风荷载		标准组合包络
	F_x /kN	占比/%	F_x /kN	占比/%	F_x /kN	占比/%	F_x /kN	占比/%	F_x /kN
上柱底	35 677	94	2 147	6	0	0	0	0	37 824
	34 755	94	2 142	6	0	0	0	0	36 897
下柱顶	60 325	94	3 636	6	111	0	384	1	64 457
	59 027	93	3 597	6	111	0	384	1	63 142
下柱底	63 653	94	3 636	5	111	0	384	1	67 785
	62 023	94	3 597	5	111	0	384	1	66 138

表 7 各单项荷载横桥向弯矩效应占标准组合内力比值表

截面位置	恒载		活载		温度		风荷载		标准组合包络
	M_y /(kN·m)	占比/%	M_y /(kN·m)	占比/%	M_y /(kN·m)	占比/%	M_y /(kN·m)	占比/%	M_y /(kN·m)
上柱底	0	0	0	0	0	0	3 444	100	3 444
	0	0	0	0	0	0	3 444	100	3 444
下柱顶	17 703	47	4 690	13	10 754	29	1 488	4	37 483
	21 194	54	4 713	12	7 693	20	2 230	6	39 311
下柱底	19 387	47	158	0	18 104	44	3 261	8	40 910
	22 710	49	478	1	18 279	39	5 060	11	46 527

表 8 各单项荷载顺桥向弯矩效应占标准组合内力比值表

截面位置	恒载		活载		温度		风荷载		标准组合包络
	M_z /(kN·m)	占比/%	M_z /(kN·m)	占比/%	M_z /(kN·m)	占比/%	M_z /(kN·m)	占比/%	M_z /(kN·m)
上柱底	0	0	8 932	87	0	0	1 372	13	10 304
	0	0	8 344	86	0	0	1 372	14	9 716
下柱顶	5	0	8 372	88	0	0	1 147	12	9 532
	5	0	8 905	87	0	0	1 321	13	10 239
下柱底	16	0	24 543	83	0	0	5 119	17	29 705
	15	0	24 115	82	0	0	5 107	17	29 262

矩中活载(即温度力、制动力及支座摩阻力)占比超 80%。

提取各控制截面内力后,根据规范对关键截面进行验算,确定上层柱截面尺寸为 2.7 m×3.2 m,下层柱截面尺寸为 3.2 m×3.2 m。横梁采用矩形变高截面,尺寸为 2.9 m×(3.0~4.5)m,采用预应力混凝土结构。

5 结 语

双层桥梁门式墩结构受力复杂,本文在国内既有研究成果的基础上^[5-9]对某工程双层桥梁门式墩进行设计分析,提供了主要设计成果供国内类似工程的设计参考,主要结论如下:

- (1)该双层桥梁门式墩计算主要控制截面为横梁截面、下层立柱柱顶截面和柱底截面;
- (2)对于桥梁下部结构,可以通过一阶失稳模态分析反推桥墩计算长度,对于双层桥梁需考虑上下柱的轴力比;
- (3)下层桥梁支座间距的增大及上层立柱偏心设置可以有效改善关键控制截面受力;

(4)该工程立柱轴力中恒载占比最大,立柱横桥向弯矩中恒载及温度占比较大,顺桥向弯矩中活载(即温度力、制动力及支座摩阻力)占比最大。可通过减小以上主要荷载优化结构设计,提高经济性。

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] 张先忠,赵进锋.桥梁下部结构的稳定性分析及其计算长度的实用计算方法[J].公路,2016,61(2):124-128.
[3] 董佳霖,黄亮,徐伟杰,等.梁式桥桥墩计算长度系数研究[J].浙江交通职业技术学院学报,2024,25(1):13-18;65.
[4] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
[5] 黄斌,夏云龙.双层桥梁门式墩设计分析[J].浙江交通职业技术学院学报,2016,17(4):1-5;57.
[6] 陈红梅,邓磊.双层连续梁桥的桥墩形式研究[J].公路,2018,63(6):138-141.
[7] 杨广安.市政双层交通桥梁结构体系选型[J].城市道桥与防洪,2021(6):85-89.
[8] 黄森华.常规双层公路桥总体设计、荷载取值及荷载组合分析[J].广东公路交通,2021(2):22-30.
[9] 周伟光.双层桥门式墩结构受力分析[J].交通科技与管理,2023,4(19):128-130.