

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyh.2024.04.029

# 独柱墩箱梁桥抗倾覆验算及加固设计研究

马奔

(中路高科交通检测检验认证有限公司,北京市 100088)

**摘要:**近些年,我国桥梁上部结构倾覆事故多发,给人民生命和财产安全造成了较大损失。其中,独柱墩桥梁为易出现倾覆事故的典型结构之一。结合《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)及《公路危旧桥梁排查和改造技术要求》(交办公路函[2021]321号)对桥梁抗倾覆评估验算提出的新要求,对某高速公路独柱墩现浇箱梁桥的抗倾覆能力进行验算评估,同时按照现行车辆荷载标准对桥梁加固前、后墩顶、墩底、墩身控制截面的承载能力极限状态进行验算。根据验算结果和桥梁结构特点,采用桥墩新增钢盖梁和横向增加支座、桥台处梁端新增抗拔销的加固方式,从而提高桥梁抗倾覆能力。目前桥梁加固施工已完成,运营状况良好。

**关键词:**独柱墩;抗倾覆验算;钢盖梁;加固设计

**中图分类号:** U448.21+3

**文献标志码:** B

**文章编号:** 1009-7716(2024)04-0122-05

## 0 引言

独柱墩桥梁由于造型优美、构造简单,在相当长的时间段内成为立交桥梁匝道部分常用的结构型式,并被广泛使用。随着经济的快速发展,桥梁重载车辆增多,经常出现重载车队偏载行驶或停放,对独柱墩桥梁的运营具有较大安全隐患。

交通部于2018年修订并颁布《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)<sup>[1]</sup>(以下简称《公预规》),增加了独柱墩抗倾覆验算的相关要求。并于2021年又发布了《公路危旧桥梁排查和改造技术要求》(交办公路函[2021]321号)<sup>[2]</sup>,对公路独柱墩桥梁排查、结构验算、专项检查和安全评估提出了新的要求。

## 1 桥梁抗倾覆验算理论依据

根据《公预规》中4.1.8条,桥梁上部结构倾覆存在2个特征状态:在特征状态1,箱梁的单向受压支座开始脱离受压;在特征状态2,箱梁的抗扭支承全部失效<sup>[1]</sup>。典型破坏过程如图1所示。

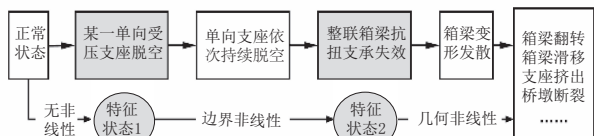


图1 典型破坏过程

收稿日期: 2023-05-05

通信作者: 马奔(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁加固设计、检测、咨询工作。

整体式截面简支梁和连续梁的作用效应应符合下式要求<sup>[1]</sup>:

$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qf}$$

上部结构稳定效应设计值:

$$\sum S_{bk,i} = \sum R_{Gki} \cdot l_i$$

上部结构失稳效应设计值:

$$\sum S_{sk,i} = \sum R_{Qki} \cdot l_i$$

式中: $k_{qf}$ 为横向抗倾覆稳定性系数,取 $k_{qf}=2.5$ ;  $l_i$ 为第*i*个桥墩处失效支座与有效支座的支座中心间距; $R_{Gki}$ 为在永久作用下,第*i*个桥墩处失效支座的支反力,按标准值组合取值; $R_{Qki}$ 为在可变作用下,第*i*个桥墩处失效支座的支反力,按标准值组合取值,汽车荷载按各失效支座对应的最不利布置形式取值,考虑冲击系数<sup>[1]</sup>。

由以上公式可知,桥梁抗倾覆验算通过结构自高效应来抵抗偏载车辆作用下产生的扭矩,其结果与支座间距 $l_i$ 和失效支座反力有关。计算时,永久作用和最不利可变作用下的支座反力一般不会改变。因此,只有增加既有桥梁支点间距,才可以有效提高抗倾覆稳定性系数。

## 2 独柱墩弯箱梁桥抗倾覆分析

### 2.1 工程概况

某高速公路互通匝道桥建成于2006年,上部结构为12跨连续箱梁桥,分两联布置:(25+5×30+25)m+(25+3×30+25)m。墩台处均采用2个盆式支座,支

座间距为 1.0 m。桥梁全宽 8.5 m,桥面净宽 7.5 m,两侧设有 0.5 m 防撞护栏。下部结构为重力式 U 形桥台,1 号~4 号、6 号~11 号墩为矩形薄壁墩 (2.2 × 1.3 m),5 号墩为墩梁固结单柱式钢管混凝土圆形墩。桥梁位于半径 R=4 000 m 的圆曲线内。设计荷载为汽车-超 20 级。

### 2.2 桥梁计算分析模型

桥梁模型基于空间杆系有限元理论,采用 MIDAS Civil 2021 软件建立全桥模型,上下部结构均采用梁单元模拟,不考虑箱梁横坡,支座顶部与主梁节点为刚性连接,支座顶部与底部间采用弹性连接里的刚性模拟,支座下部采用一般支撑模拟,约束方向按实际支座滑动方向模拟。各桥墩横向均垂直于路线方向。由于该桥两联计算分析思路相同,现以第二联为例进行说明。桥梁第二联结构有限元模型如图 2 所示。

混凝土自重取 25 kN/m<sup>3</sup>,考虑到混凝土内钢筋自重,混凝土自重系数取 -1.04。二期恒载按照实际

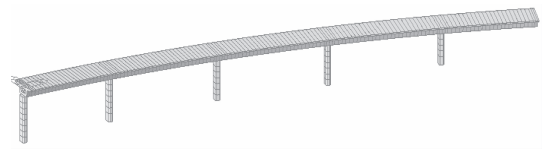


图 2 桥梁第二联结构有限元模型

情况施加(8 cm 混凝土调平层+10 cm 沥青铺装),采用梁单元均布荷载模拟,按 33 kN/m 计;混凝土护栏自重按 10 kN/m 计,考虑横向偏心。

### 2.3 抗倾覆稳定计算分析

汽车荷载按现行公路-I 级<sup>[3]</sup>荷载计算,考虑冲击系数。对于多车道考虑横向折减系数,车辆荷载横向布置考虑外偏和内偏两种工况,其中外偏加载为最不利状态。在车辆荷载外偏加载下得出特征状态 1 下各支座最大反力,如图 3 所示。验算结果见表 1。

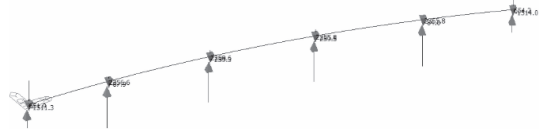


图 3 各支座最不利工况下的反力(单位:kN)

表 1 第二联加固前抗倾覆验算结果

项目	支座节点编号(支座编号)							
	1(7-1)	2(8-1)	3(9-1)	4(10-1)	5(11-1)	6(12-1)		
$l_i / m$	1	1	1	1	1	1		
$R_{Gki}$ (永久作用标准值效应)	747	2 741	2 722	2 721	2 744	745		
支座竖向力 /kN	失效支座对应最不利汽车荷载的标准值效应	$R_{Qki,1}$	-1 613	-819	-499	-472	-457	-17
		$R_{Qki,2}$	-438	-2 020	-929	-495	-378	-423
		$R_{Qki,3}$	-430	-846	-2 129	-934	-478	-15
		$R_{Qki,4}$	-19	-472	-941	-2 129	-839	-430
		$R_{Qki,5}$	-422	-385	-488	-936	-2 020	-439
		$R_{Qki,6}$	-21	-451	-479	-492	-824	-1 613
特征状态 1 验算	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,1}$	-1 511	1 595	2 023	2 061	2 104	721	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,2}$	134	-88	1 421	2 029	2 215	153	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,3}$	145	1 557	-259	1 413	2 074	723	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,4}$	721	2 080	1 405	-260	1 570	142	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,5}$	156	2 202	2 039	1 410	-84	130	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,6}$	718	2 109	2 050	2 033	1 590	-1 514	
验算结论	状态 1 不满足							

注:支座竖向力以向上为负,向下为正。

由于该桥设计时规范中无上部抗倾覆验算要求,再加上现行规范中车辆荷载的集中力大于原设计规范,从表 1 可以看出:该桥在作用基本组合下,内侧支座分别在最不利工况下均处于受拉状态(实际为脱压状态),不满足特征状态 1 验算要求。因此,需要采取措施改变支座受力状态。

同时,根据《公路危旧桥梁排查和改造技术要求》<sup>[3]</sup>中附录 C:公路独柱墩桥梁检查验算的要求,需

按照现行车辆荷载标准对桥梁墩顶(固结墩)、墩底、墩身控制截面的承载能力极限状态进行验算。当某个支座存在脱压状态后,整联结构的支反力会重分布,对于支座脱空的桥墩会存在一个较大的竖向偏心压力,在该压力下可能导致桥墩先于上部结构倾覆发生破坏,因此需要对脱压支座脱压后各桥墩的承载能力进行验算。通过建立上、下部结构整体有限元模型进行分析,支座脱空采用删除脱空处支座节

点的方式模拟。经计算,该桥的桥墩承载力满足现行规范要求。

### 3 加固改造设计

#### 3.1 加固设计思路

独柱墩桥梁抗倾覆加固设计思路如下:

(1)通过增加横向桥向支承数量,将原支座位间距较小的双点支撑调整为横向四点支撑,原支座承担桥梁恒载,4个支座共同承担车辆活载,从而达到既不改变原结构受力体系,又能提高横向抗倾覆的目的。

(2)综合考虑独柱墩桥梁抗倾覆验算结果及桥梁实际运营状况,改造方案既要满足抗倾覆稳定性,又要保证技术可行、安全可靠,力求施工方便快捷,同时将提升改造施工对交通运营的影响降至最低。

(3)设计方案须考虑桥梁空间布局及周边环境,不侵占桥下净空和建筑限界。改造后,桥梁美观、与周围环境相协调。

#### 3.2 加固改造方案

由于该桥墩、台处均采用2个盆式支座,支座间距均为1.0 m,梁底和墩台顶已无空间调整支座间距,因此需横向增设支点。

由于梁底横向宽度不足,无法放置支点,因此箱梁加宽采用植筋并现浇横梁的方式。现浇横梁为细石高强无收缩灌浆料浇筑。该灌浆料属于特种混凝土,具备成熟的技术和工艺,广泛应用于结构加固补强领域。且该材料采用标准袋装成品,现场采用人工配合小型机械,运输、储存、施工均较方便,能更好地保证施工质量。桥墩横向增加支点有以下两种方案:

(1)混凝土拼宽墩柱。由于该桥桥墩下均有承台,桥墩横向增加支点可采用横向拼宽原有墩柱的形式。首先对原墩柱表面凿毛并植筋、绑扎钢筋、支模板拼宽浇筑墩柱,在拼宽桥墩上增设新支座。该方案增加自重较大,植筋数量较多,施工繁琐,工期较长。

(2)墩顶增设钢盖梁。由于各墩柱截面相同,桥墩可采用墩顶增设钢盖梁的形式。首先对原墩柱表面凿毛、钻孔、植入高强螺栓,同时在工厂分两半标准化制作钢盖梁。现场安装两半钢盖梁,在墩柱与盖梁的间隙灌浆。待灌浆料达到设计强度再次复拧螺栓,然后进行塞焊处理。之后在钢盖梁两侧新增板式橡胶支座,同时在箱梁两侧新增混凝土横梁。最后对钢构件表面进行防腐涂装。该方案增加自重小,工期短,施工效率高,对后期养护要求高。

由于该桥墩高在7~10.5 m之间,若采用混凝土

拼宽墩柱,结构自重增加较大。同时,该项目对工期要求严格,综合考虑后采用墩顶增设钢盖梁的方案。该方案钢盖梁与原墩柱间有5 cm空隙,钢盖梁与混凝土墩柱结合面采用高强螺栓和细石高强无收缩灌浆料灌注,钢盖梁采用Q355C钢板,在工厂分两半制作,两半结构现场采用焊接。钢盖梁两侧放置四氟滑板橡胶支座,新增支点距原支座间距1.5 m,如图4所示。

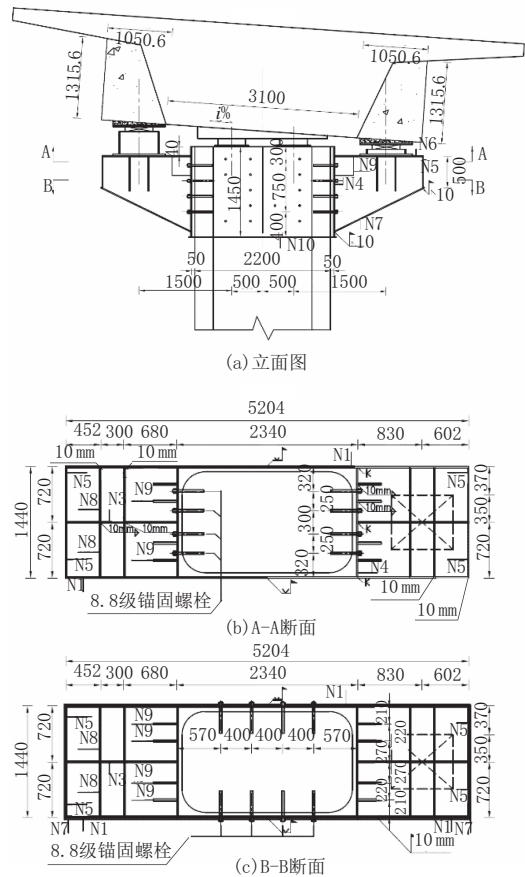


图4 桥墩横向新增支点设计方案(单位:mm)

#### 3.3 加固后抗倾覆验算

采用以上改造方案加固后,抗倾覆验算结果见表2。由表2可知,7号墩到11号墩横向新增支点后,原桥内侧支座均不会产生负反力,满足状态1要求,同时桥墩处不存在失稳效应。但由于桥台处未采取措施,支座仍然存在负反力。若要消除原支座存在的负反力,可采用调整原支座间距或在原支座两侧新增支座的方式。这两种方式均需要凿除既有桥台挡块,凿除工程量较大,对原结构损伤大,效率低。

综合以上考虑,由于桥台处抗倾覆稳定性满足规范要求,原桥台两侧设有环绕梁端的U形防落梁挡块。该挡块对防止梁体侧向倾覆具有积极作用,但实际计算中并不考虑挡块的作用。因此,针对桥台处

表2 第二联桥墩新增钢盖梁后抗倾覆验算结果

项目	支座节点编号(支座编号)							
	1(7-1)	2(8-1)	3(9-1)	4(10-1)	5(11-1)	6(12-1)		
$l_i$ /m	1	1	1	1	1	1		
$R_{Gki}$ (永久作用标准值效应)	747	2 741	2 722	2 721	2 744	745		
支座竖向力 /kN	失效支座对应最不利汽车荷载的标准值效应	$R_{Qki,1}$	-41	291	259	-30	126	-16
		$R_{Qki,2}$	13	-60	233	328	33	-153
		$R_{Qki,3}$	120	256	-79	70	109	-13
		$R_{Qki,4}$	-32	216	357	-100	132	-168
		$R_{Qki,5}$	67	39	146	430	-63	9
		$R_{Qki,6}$	-8	44	48	-16	79	-1 613
特征状态 1 验算	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,1}$	690	3 148	3 084	2 679	2 920	723	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,2}$	765	2 657	3 048	3 180	2 791	530	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,3}$	914	3 099	2 610	2 819	2 896	727	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,4}$	703	3 043	3 222	2 581	2 929	509	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,5}$	841	2 796	2 926	3 323	2 656	758	
	$1.0 R_{Gki} + 1.4 R_{Qki,6}$	736	2 802	2 788	2 699	2 855	-1 514	
验算结论		状态 1 不满足						
特征状态 2 验算	稳定效应 $\sum R_{Gki} l_i$ / (kN·m)	747	2 741	2 722	2 721	2 744	745	
	失稳效应 / (kN·m)	$\sum R_{Qki,1} l_i$	-41	291	259	-30	126	-16
		$\sum R_{Qki,2} l_i$	13	-60	233	328	33	-153
		$\sum R_{Qki,3} l_i$	120	256	-79	70	109	-13
		$\sum R_{Qki,4} l_i$	-32	216	357	-100	132	-168
		$\sum R_{Qki,5} l_i$	67	39	146	430	-63	9
$\sum R_{Qki,6} l_i$		-8	44	48	-16	79	-1 613	
稳定性系数 $\sum R_{Gki} l_i / \sum R_{Qki} l_i$	/	/	/	/	/	8.47		
验算结论		状态 2 满足						

注:1.支座竖向力以向上为负,向下为正。  
2.“/”表示不存在失稳效应。

支座存在负反力的情况,采用梁底增设抗拉拔措施来被动抵抗最不利工况下的支座负反力。

抗拉拔装置由钢构件组成,将梁端与桥台采用铰销连接,目的在于不约束主梁纵横向的变形,仅约束其相对竖向位移,抵消箱梁端部局部翘曲导致的支座负反力。抗拉拔装置如图5所示。

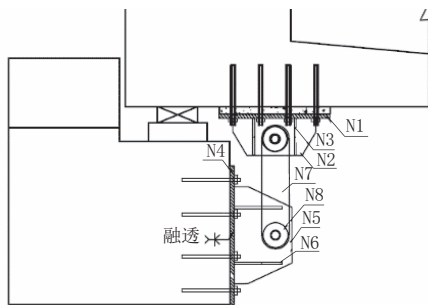


图5 抗拉拔装置示意图

### 3.4 钢盖梁局部验算

新增钢盖梁后,采用 MIDAS FEA 建立实体有限元模型对钢盖梁强度、刚度、局部稳定性进行验算。

### 3.4.1 强度验算

钢盖梁所用主要受力钢板厚度为 16~20 mm,在钢盖梁自重和新增支座最大竖向力作用下强度验算结果如图6所示。

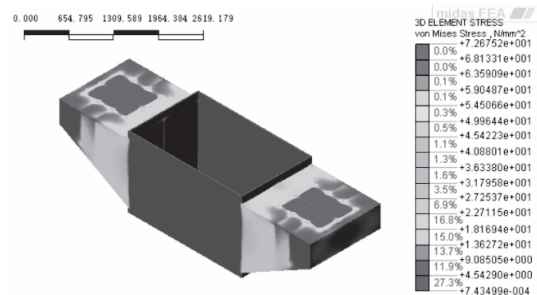


图6 钢盖梁应力分析云图(单位:MPa)

钢板的最大 Mises 等效应力值为 72.7 MPa,小于 Q355C 钢材抗拉设计值 270 MPa 的要求,小于对接焊缝抗剪强度设计值 170 MPa 的要求,同时小于角焊缝强度设计值 200 MPa 的要求。因此,钢盖梁强度验算满足规范要求。

### 3.4.2 刚度验算

相同工况下,钢盖梁挠度验算结果如图7所示。钢盖梁悬臂最大竖向挠度为0.37 mm。根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)<sup>[4]</sup>第4.2.3条:梁悬臂端部竖向挠度限值为 $l/300$ (即, $1432/300=4.77$  mm), $0.37$  mm $<4.77$  mm。因此,钢盖梁结构刚度满足规范要求。

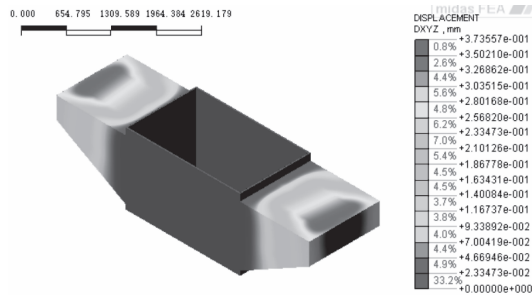


图7 钢盖梁挠度分析云图(单位:mm)

### 3.4.3 结构稳定性验算

在钢盖梁自重和新增支座最大竖向力作用下,钢盖梁局部屈曲荷载系数最小值为200,即在200倍的钢盖梁自重和新增支座最大竖向力作用下,钢盖梁底板才会发生局部屈曲失稳。其一阶屈曲挠度如图8所示,因此钢盖梁结构稳定性满足要求。

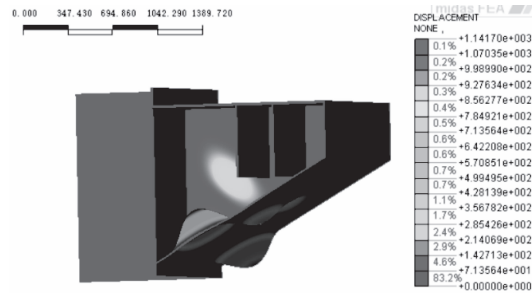


图8 钢盖梁一阶屈曲挠度云图(单位:mm)

### 3.5 其他验算

桥墩新增盖梁后,由于结构自重增加和支点距离改变,还需要对原桥墩和桩基承载能力进行验算。对加固后桥墩按偏心受压构件计算(见图9),桩基按摩擦桩计算单桩竖向承载力。根据计算结果,各桥墩、桩基在最不利工况下承载力均满足现行规范要求。

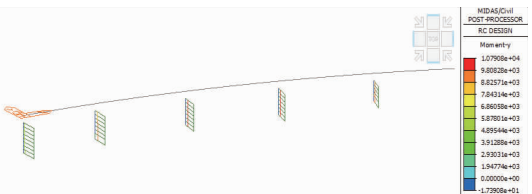


图9 桥墩横向承载力验算结果包络图(单位:kN·m)

根据《混凝土结构加固设计规范》(GB 50367—2013)<sup>[5]</sup>要求,除了以上验算外,还需要对钢盖梁锚栓抗剪强度、新增混凝土横梁抗剪承载力、钢构件锚固

基材混凝土抗剪强度、抗拔销锚栓抗拉承载力、抗拔销锚栓抗剪承载力、抗拔销钢拉杆抗拉承载力分别进行验算。通过以上验算,各项指标均能满足规范要求。

## 4 主要施工工艺流程

### 4.1 钢盖梁安装

工艺流程:工厂预制钢盖梁半结构→测量放线→墩柱混凝土表面凿毛→定位、钻孔→安装钢盖梁→安装高强螺杆→钢盖梁底部封底边→支座下钢板焊接→钢盖梁与墩柱间灌注灌浆料→钢板表面防腐处理。

安装钢盖梁前,首先在柱墩顶端原支座两侧设置两根工字钢做扁担梁,两工字钢之间采用槽钢焊接固定,工字钢顶部空隙用楔形方木楔入与梁底贴合,形成稳定结构。根据钢盖梁重量,在工字钢两端端头各安装1个3~5 t手拉葫芦(共4个),形成一个吊装扁担。钢盖梁半结构放置在靠近墩柱两侧的垫木上,通过手拉葫芦平移抱紧固定。之后焊接两半结构竖缝。然后安排作业人员同时拽动4个手拉葫芦手链条缓慢提升钢盖梁。钢盖梁到位后,对盖梁角度、位置进行微调,使盖梁对准锚栓孔位,然后植入锚栓,拧紧螺帽固定钢盖梁,现场安装如图10所示。



图10 钢盖梁安装现场

### 4.2 现浇混凝土横梁

工艺流程:测量放线→确定原箱梁横向预应力筋和新增横梁的位置并标记→腹板、翼板凿毛→定位、钻孔→腹板植筋和临时加固拉杆钻孔→整体清理杂物→安装底模→预埋支座上钢板和锚固筋、绑扎钢筋网→立侧模→模板加固→浇筑混凝土→养护→拆模→切断临时拉杆并做防腐处理。

### 4.3 增设抗拉拔装置

工艺流程:测量放线→混凝土表面凿毛→定位钻孔、清孔→注入植筋胶→植锚栓→抗拔装置底座安装→拉杆安装→表面防腐涂装。

$D=1.5\text{ m}$  钻孔桩基础。桥墩为盖梁柱式墩,桥墩基础为  $D=1.8$  钻孔桩基础。预应力小箱梁常见跨度为  $20\sim 40\text{ m}$ ,可单跨简支也可多跨简支变连续,因其经济性、安全性、适用性、美观等特点,在全国市政道路中得到广泛使用。见图 7、图 8。

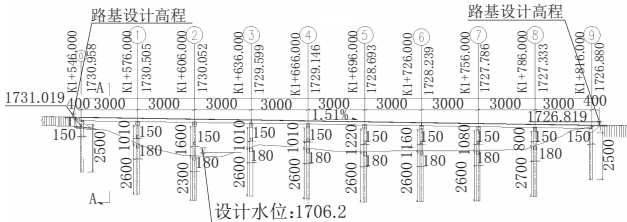


图 7 科二街连续梁方案总体布置图(单位:cm)

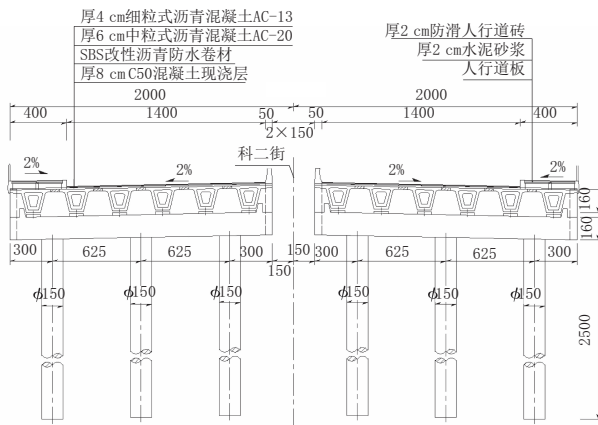


图 8 科二街连续梁方案横断面图(单位:cm)

方案特点:上部结构采用预制梁,避免了满堂支架现浇施工时需躲避汛期洪水影响,主梁在预制场内制作,质量可控,施工方便、快捷。预制小箱梁工艺成熟、技术先进、安全可靠、实用耐久、经济合理、施工工期较快。

由于该桥位于夹沟河之上,同时是榆中县生态圈的重要组成部分,对景观要求更高。经景观效果、方案特点、施工要求、经济等各方面比选,推荐方案一,即 13 孔钢筋混凝土拱桥为实施方案。

### 5 结 语

景观桥梁需要综合考虑桥梁所在位置的功能要求、景观要求、人文要求等各方面因素。功能要求体现了桥梁的不可替代性。景观及人文要求则体现了人与自然的和谐相处。因此,对于具体的桥梁项目需要结合当地文化特色和人文理念,充分发挥工程师的设计思维,以便做出符合逻辑的多样化设计。

#### 参考文献:

[1] 项海帆.桥梁概念设计[M].北京:人民交通出版社,2011.  
 [2] 滕家俊,沈平.现代桥梁建筑设计[M].北京:人民交通出版社,2008.  
 [3] 王应良,高宗余.欧美桥梁设计思想[M].北京:中国铁道出版社,2008.

(上接第 126 页)

### 5 结 论

本文依托独柱墩桥梁的抗倾覆评估及加固设计项目,依据《公预规》及“交办公路函〔2021〕321 号”文对桥梁抗倾覆评估验算提出的新要求,对独柱墩现浇箱梁桥的抗倾覆能力进行验算评估。同时按照现行车辆荷载标准对桥梁加固前、后,墩顶、墩底、墩身控制截面的承载能力极限状态进行验算。根据验算结果和桥梁结构特点对加固设计思路、加固方案比选、加固前后的验算、主要施工工艺流程做了详细介绍。

综上所述,验算时要考虑在现行车辆荷载下单个支座脱空导致的偏心压力是否会造成独柱墩先于

上部结构倾覆发生破坏。若桥墩承载力不足,应先加固桥墩再做抗倾覆加固。选择加固方案时要考虑桥梁实际状况、现场作业条件、工期要求、工程造价等因素。中间墩增设钢盖梁结合梁端增设抗拉拔装置是解决此类双支墩间距较小独柱墩桥梁抗倾覆问题的有效措施。该桥加固后,目前运营状态良好。

#### 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] 交办公路函〔2021〕321 号,公路危旧桥梁排查和改造技术要求[Z].  
 [3] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].  
 [4] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].  
 [5] GB 50367—2013,混凝土结构加固设计规范[S].