

预制拼装桥墩轻型化设计

李福鼎

[上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092]

摘要:以工厂预制、现场拼装的装配式桥梁构件为对象,介绍了装配式构件在标准化设计方面的发展,提出了装配式构件设计轻型化的思路,并从截面空心化、模块化和参数化等方面对桥墩轻型化设计进行了详细论述和分析。桥墩轻型化后更能适应标准化设计、工厂化生产、装配化施工的要求,在经济性、适应性、便宜性等方面有较大优势。

关键词:全预制装配桥梁;装配式构件;轻型化;模块化

中图分类号: U443.22

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)02-0069-05

0 引言

全预制拼装桥梁是一种将桥梁上下部结构的主要构件在工厂预制、现场拼装的桥梁。此类桥梁的主要特点是大量采用了装配式构件,构件在预制厂完成,减少了现场作业量,是一种更环保、少干扰、更安全、高质量和低消耗^[1]的桥梁建造方式,特别适应于城市桥梁建设,目前国内一些城市正在进行试点和推广。

目前,国内装配式建筑发展的整体要求是“标准化设计、工厂化制造、装配化施工、信息化管理、智能化应用”^[8]。因此,对于全预制拼装桥梁来说重要的一个环节就是标准化设计,而桥梁标准化设计可分为二个层面,一个是总体设计层面,包含规范规程和标准的统一、路线断面和桥梁横断面的标准化、以及梁高和跨径的标准化和模数化等方面;另一个层面就是装配式桥梁构件设计层面,包含桥梁各部位的构件,如上部节段箱梁、组合梁、小箱梁;下部节段桥墩、盖梁;附属防撞栏杆、人行道板等。本文主要涉及构件标准化设计层面,以预制装配式桥墩为对象,探讨其在轻型化、模块化设计方面的应用。

1 装配式构件

装配式桥梁构件既是全预制拼装桥梁的主要组成部分,也是影响桥梁结构外观、质量和耐久性等方面的关键部分,同时也是影响桥梁工程造价、施工措施、施工难度等方面的制约因素。桥梁构件

工厂预制后需要运输至现场再进行安装,构件重量和尺寸受运输和安装条件所限,而为了施工速度和质量又需要构件尽量大,减少现场工作量,这两方面的需求相互矛盾,因此需要抛开传统现浇设计理念,不能简单的将构件从现场浇筑变为工厂浇筑,而是要遵循构件预制的理念,对构件进行轻型化、模块化设计,使之更能便于制造、运输和安装。

2 预制拼装桥墩轻型化设计

桥墩轻型化的主要目的是降低重量、减小构件轮廓尺寸,方便构件预制、运输和安装,可通过以下二种方式实现:(1)截面空心化,将实心断面优化为空心断面,较小截面面积,降低自重;(2)节段模块化,将节段纵向切分为二个或多个节段,降低单个构件重量和尺寸;两种方式可单独也可组合采用,组合采用时轻型化效果更为明显。

2.1 截面空心化

实心断面空心化,面积减少,自重降低,但同时内部空腔的施工增加了施工难度和费用,因此需要对空心断面在工程造价、施工便宜性和结构受力等方面进行分析,判断截面空心化的可行性和经济性。

(1)工程造价

通过测算不同空心率、墩高、墩宽和墩厚下的桥梁造价,分析截面空心化的经济性,给出合理的可截面空心化桥墩构造尺寸。

分析空心截面墩柱造价组成,其与实心截面柱造价的差异主要是材料费用、运输费用、吊装费用和安装费用。在测算桥墩造价时,参考上海某预制拼装桥墩项目,构件运输和安装经济技术指标如下:(1)运输费考虑40 km运距,按258.5元/m³计;(2)立柱拼

收稿日期:2020-07-19

作者简介:李福鼎(1983—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计工作。

装费按 350 元 /m³ 计;(3)构件吊装费按 200 元 /m³ 计;(4)混凝土和钢筋综合单价为 800 元 /m³ 和 6 000 元 /t。

以矩形桥墩为例,截面宽 3 m、厚度为 2 m,空心墩壁厚 0.4 m,墩高 5~15 m 时,桥墩的空心率、造价增减量以及造价增减量相对于实心截面造价比例等数据见表 1。

表 1 空心墩造价增减表

编号	墩高 /m	空心率 /%	材料费增减 /元	安装费增减 /元	运输费增减 /元	吊装费增减 /元	造价增减 /元	造价增减比例 /%
1	5	18	5 843	-1 848	-1 365	-2 640	-9	0
2	6	22	5 745	-2 772	-2 047	-3 960	-3 034	-4
3	7	25	5 646	-3 696	-2 730	-5 280	-6 059	-7
4	8	28	5 548	-4 620	-3 412	-6 600	-9 084	-9
5	9	29	5 449	-5 544	-4 095	-7 920	-12 109	-11
6	10	31	5 351	-6 468	-4 777	-9 240	-15 134	-13
7	11	32	5 252	-7 392	-5 460	-10 560	-18 159	-14
8	12	33	5 154	-8 316	-6 142	-11 880	-21 184	-15
9	13	34	5 055	-9 240	-6 824	-13 200	-24 209	-16
10	14	35	4 957	-10 164	-7 507	-14 520	-27 234	-16
11	15	35	4 858	-11 088	-8 189	-15 840	-30 259	-17

由上表可知:(1)截面空心化导致主要材料费增加,运输、安装费用减小;(2)桥墩空心率随墩高增加逐渐增大;(3)造价增减比例随墩高或空心率增大而增大。进一步分析不同墩厚和不同桥墩高度情况下,

当空心率达到 20%左右时,空心墩造价与实心墩相当,如图 1 所示。

装配式桥墩立柱尺寸由上部结构形式、墩高、结构受力等因素确定,尺寸差异较大。从工程造价角度,经过截面尺寸参数和墩高参数的分析,确定截面空心化合理构造尺寸,部分参数分析部分结果图 2 和图 3 所示。

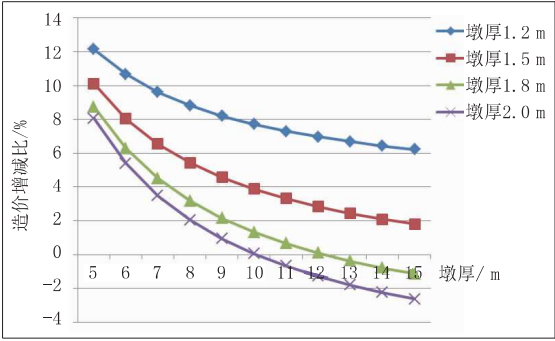


图 2 桥墩造价增减比例随墩高变化曲线 (B=1.5 m)

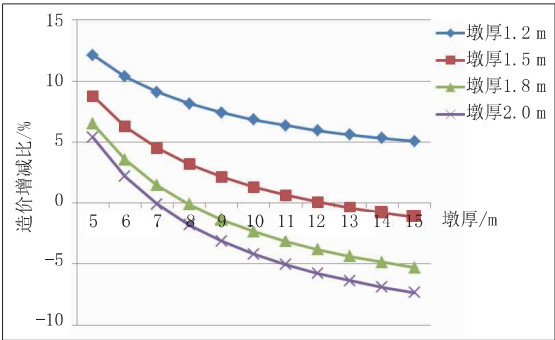
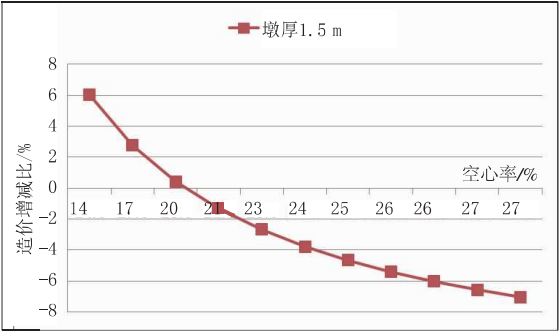
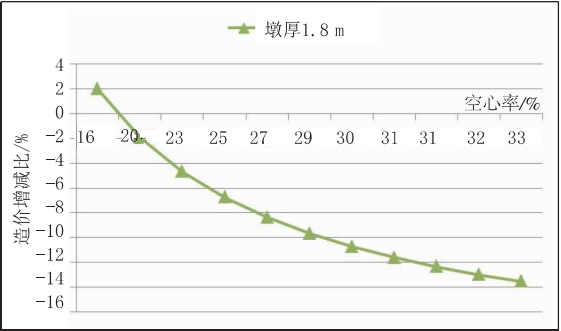


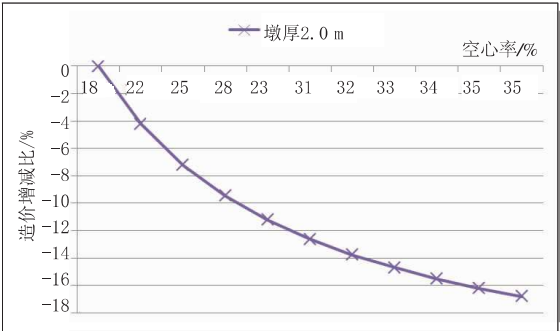
图 3 桥墩造价增减比例随墩高变化曲线 (B=1.8 m)



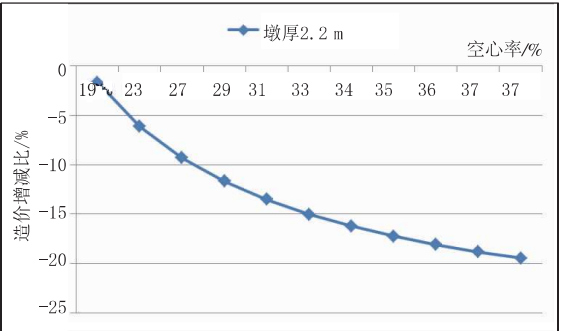
(a)空心墩造价增减比例随空心率变化曲线图(墩厚 1.5 m)



(b)空心墩造价增减比例随空心率变化曲线图(墩厚 1.8 m)



(c)空心墩造价增减比例随空心率变化曲线图(墩厚 2.0 m)



(d)空心墩造价增减比例随空心率变化曲线图(墩厚 2.2 m)

图 1 空心墩造价增减比例随空心率变化曲线

由图 2 可知,桥墩宽度 $B=1.5\text{ m}$ 时,截面空心化无明显经济优势,图 3 可知,桥墩宽度 $B=1.8\text{ m}$,墩厚 1.8 m 且墩高大于 8 m 时,截面空心化具有一定经济性,因此,当截面尺寸小于 $1.8\text{ m}\times 1.8\text{ m}$ 时采用实心墩是合适的,超过此尺寸可以考虑空心截面,不同截面空心化最小尺寸分析结果见表 2。

表 2 桥墩空心化截面尺寸

桥墩宽度 /m	是否空心墩	空心化最小尺寸		
		墩厚 /m	墩高 /m	空心率 /%
<1.8	否			
1.8	是	1.8	10	22
2.0	是	1.8	10	23
2.2	是	1.8	8	22
2.5	是	1.5	8	20
2.8	是	1.5	8	21
3.0	是	1.5	7	20
>3.0	是	1.5	7	

表 2 所列出的桥墩空心化最小尺寸仅仅考虑了工程造价,实际工程中需要综合施工便宜性、结构受力等因素确定空心化构造。

(2)空心墩预制

桥墩空心化后,内部空心腔室施工是桥墩预制的重点和难点。目前,空心腔室施工常采用高速离心法和模板浇筑法。高速离心法适用于圆形或矩形等小尺寸空心腔室,其适用性有限;模板浇筑法可适用于任意形式的空心腔室,适应性较广,也是运用最多的施工方式,浇筑时的模板常采用钢模、木模、充气橡胶囊或预埋 PVC 管,如图 4 所示。

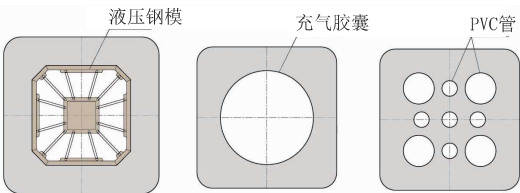


图 4 立柱空腔模板示意图

对于模板浇筑法,应根据预制构件的构造特点选择合理的模板形式来克服拆模困难和模板利用率低的问题。对于整体式预制桥墩,应充分考虑内膜拆除的便宜性,而空气胶囊拆模方便,预埋 PVC 管无需拆模,都是较为合理的内膜方案;对于分段预制桥墩,内膜采用钢膜较为合适,这是由于分段预制的节段两端或单端是开口的,拆模非常方便,采用组合式液压钢模可以充分发挥其刚度大,浇筑质量好、拆模方便、施工效率高等特点。

(3)结构受力

桥墩空心化后,截面面积减小,轴压应力增大,

但抗弯惯性矩减小导致弯矩产生的拉应力增加,因此,桥墩空心对结构的承载力和抗裂性能的影响需深入分析。以一联宽 10 m , $3\times 35\text{ m}$ 连续箱梁桥的下部结构为例,假定截面外轮廓尺寸 $3\text{ m}\times 2\text{ m}$ 、墩高 12 m 和主筋数量均不变,分析空心墩和实心墩受力差异以及不同空心率对结构受力的影响,结果详见表 3。

表 3 空心墩截面承载力和抗裂性能

壁厚 /cm	轴力 /kN		抗力 /内力	弯矩 /(kN·m)		抗力 /内力	裂缝宽度 /mm
	内力	抗力		内力	抗力		
0	19 297	51 583	2.67	33 065	88 382	2.67	0.16
35	17 995	36 829	2.05	31 661	64 797	2.05	0.07
40	18 147	39 927	2.20	31 825	70 018	2.20	0.08
45	18 291	42 721	2.34	31 980	74 693	2.34	0.09
50	18 426	45 364	2.46	32 126	79 093	2.46	0.10
60	18 670	48 481	2.60	32 389	84 104	2.60	0.11
70	18 879	50 226	2.66	32 614	86 768	2.66	0.12

由表 3 可知,(1)空心墩和实心墩相比,截面承载力能力下降,但截面裂缝宽度减小;(2)随着空心截面壁厚增加,截面承载力提高,截面裂缝宽度增加,截面裂缝宽度增大的速度比承载力大。综上所述,桥墩空心化后对截面承载力是不利的,对抗裂性是有利的,但总的影响十分有限。

2.2 节段模块化

受运输和吊装条件的限制,大尺寸和大吨位预制桥墩需纵向节段切分、化整为零,满足预制拼装要求。切分后的节段还应进行模块化和参数化设计,以适应设计标准化和施工装配化的要求。图 5 所示为一种模块化设计桥墩分段示意图,共包含墩底基准段、标准段和墩顶标准段和节段间连接四大部分。

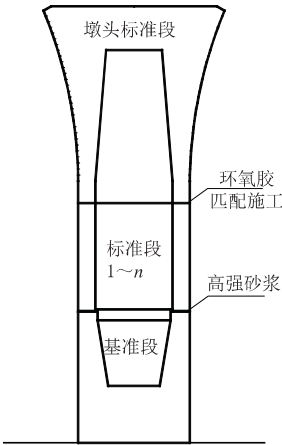


图 5 一种模块化设计桥墩示意图

(1)墩底基准段:该节段是桥墩的基准节段,可与承台一同现浇施工,主要功能是调节墩高,并将节

段缝远离墩底塑性铰区域,提高桥墩的抗震性能。

(2)标准段:该节段是桥墩的标准节段,标准节段划分应兼顾运输吊装能力和全桥桥墩适用性,既要单个节段轻型化,也要考虑节段的通用性。

(3)墩顶标准段:该节段是桥墩的墩顶节段,满足墩顶造型和承受上部结构荷载的要求,其高度和构件尺寸应标准化,适用于各种墩高的桥墩。该节段也可与标准段合并减少节段数量。

(4)节段间连接:各个节段间可采用灌浆套筒、钢棒或是预应力钢绞线等连接形式,节段间主筋连接数量可根据桥墩受力自下往上逐级优化,提高桥墩经济性。

桥墩模块化设计后,各节段上下端至少有一端是开口,十分便于空心桥墩的预制和拆模。此外,各节段长度、构造尺寸、重量、主筋数量也可以参数化设计,提高设计效率。

3 工程案例

某立交工程上部结构采用预制节段箱梁,下部结构采用预制拼装独柱花瓶墩,墩高 3~23 m,根据受力,桥墩断面尺寸为 2.6 m×1.7 m 和 2.6 m×2.0 m,如图 6 和图 7 所示。

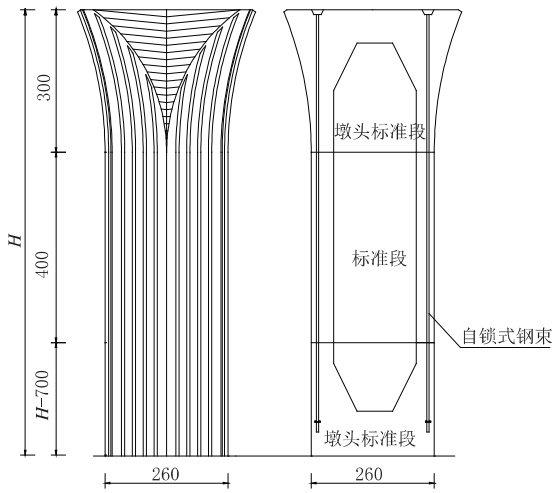


图 6 桥墩立面图(单位:cm)

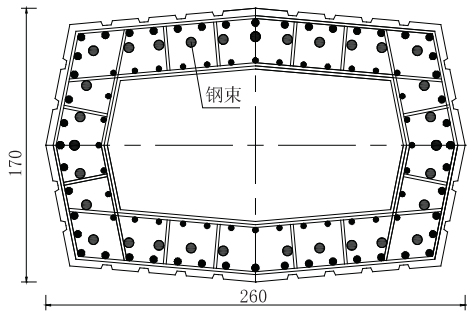


图 7 断面配筋示意图(单位:cm)

预制桥墩采用模块化和参数化设计,根据花瓶墩墩顶弧线的高度,确定墩顶标准段模块高 3 m,墩

底基准段模块高 1~2.5 m,标准段模块分别高 2 m、4 m、8 m 三个种类。墩底基准段采用现浇,其余各节段间采用自锁式预应力钢绞线连接^[9]。

选取截面 3 m×1.7 m,壁厚 35 cm 桥墩进行空心墩和实心墩的对比,对比的结果见表 4。

表 4 空心 and 实心模块对比表

编号	模块类型	节段长 /m	空心率 /%	实心墩自重 /t	空心墩自重 /t	造价增减比例 /%
1	墩顶标准段	3	24.2	33.2	25	-4
2		2	39.5	22.1	13	-22
3	标准段	4	39.5	44.2	27	-22
4		8	39.5	88.4	53	-22
5	墩底基准段	2	15.5	22.1	19	2

通过以上对比,相比于实心墩,空心墩的自重降低 15.5~39.5%,墩顶段和标准段工程造价降低 4~22%,墩底基准段价格略有增加。

控制单个节段重量不大于 55 t,各墩高桥墩节段模块组合参数见表 5。

表 5 桥墩节段模块组合参数表

编号	墩高 /m	节段数	模块或模块组合(模块编号)			
			节段一	节段二	节段三	节段四
1	4~6	2	5	1		
2	6~8	2	5	1+2		
3	8~10	2	5	1+3		
4	10~12	3	5	2+3	1	
5	12~14	3	5	4	1	
6	14~16	3	5	4	1+2	
7	16~18	3	5	4	1+3	
8	18~20	4	5	4	2+3	1
9	20~22	4	5	4	4	1
10	22~24	4	5	4	4	1+2

注:表中模块编号详见表 4。

当墩高大于 12 m 后,节段一和节段二主筋配置不变,优化节段三和节段四主筋配置,降低桥墩造价。

节段预制桥墩空心化和模块化后,各个节段模块相互组合,实现了 4~23 m 不同墩高的预制和拼装,单个节段重量均不大于 55 t,大大降低了节段运输、吊装要求和成本,也提高了施工的便宜性。

4 结 语

(1)桥梁结构大量采用预制装配式构件是桥梁建设的一个发展方向,构件设计应抛开传统现浇设计理念,不能简单的将构件从现场浇筑变为工厂浇筑,

而是要遵循构件预制的理念,对构件进行轻型化、模块化设计,使之更能便于制造、运输和安装。

(2)桥墩空心化应考虑工程造价、施工便宜性和结构受力等因素,判断其可实施性和经济性。当截面尺寸大于1.8 m,且墩高大于10 m时,截面空心化具有一定的经济优势。

(3)预制桥墩采用模块化和参数化设计,节段高度和自重灵活设置,可满足不同墩高、不同尺寸桥墩预制;主筋在不同模块间可差异化配置,提高了预制桥墩的经济性。

参考文献:

[1] 李国平.全预制混凝土桥梁技术概论[C]//第十八届全国桥梁学术会议论文集.北京:人民交通出版社,2008:119-123.
[2] 梅应华,胡可,陈亮,等.全体外预应力节段预制拼装箱梁桥震害

研究[J].桥梁建设,2017(6):54-59.
[3] 魏红一,肖 伟,王志强,等.采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J].同济大学学报:自然科学版,2016,44(7):1010-1016.
[4] 宋凯,张剑英.预制节段拼装桥墩研究进展[J].城市道桥与防洪,2014(6):282-285.
[5] 李朝晖.预制拼装桥墩造价分析[J].中国市政工程,2017(5):72-73.
[6] 刘安双,马振栋.预制节段拼装桥梁在城市轨道交通中的应用[J].公路交通技术,2014(5):77-80.
[7] 周良,闫兴非,李雪峰.桥梁全预制拼装技术的探索与实践[J].预应力技术,2014(6):15-17.
[8] 刘琼,李向民,许清风.预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J].施工技术,2014(12):9-13.
[9] 苏强,吴东明.桥墩拼装工法用新型预应力锚固体系的开发与应用[J].城市道桥与防洪,2019(4):93-96.
[10] 闫兴非,段洪亮,王志强,等.预应力筋类型对节段拼装桥墩抗震性能的影响[J].中国市政工程,2019(5):8-12.

(上接第64页)

6.3 施工过程中,主梁横向应力分布不均匀,需注意主梁剪力滞等效应的影响

根据计算结果表明,主梁施工的前5个梁段,由于结构宽跨比较大,主梁在挂篮、斜拉索作用下剪力滞、轴力滞效应更明显,主梁截面应力分布更不均匀。如果预应力布置不当,施工过程中主梁布索区可能会产生较大的拉应力,导致主梁开裂。建议前5个梁段布置足够多的预应力,优化预应力布置,拉索区域附件尽量布置足够的预应力,使主梁全截面趋于整体均匀受压。

7 结 语

(1)混凝土双边箱主梁形式的混凝土斜拉桥,采用后支点挂篮悬浇施工虽然国内实例较少,但在技术上是可行的。该桥现已建成通车,运营状况良好。

(2)采用后支点挂篮施工的混凝土斜拉桥,已浇梁段需承担待浇梁段和挂篮的全部重量,主梁施工阶段的受力更为不利,主梁钢束用量会有所增加。主梁横向应力分布更不均匀,剪力滞效应更明显。

(3)后支点挂篮施工可减少斜拉索索力调整次数,施工监控难度较低,且能有效节省施工工期。结合施工单位的施工机具选择不同的施工方案,可节约工程造价。

参考文献:

[1] 广东省交通规划设计研究院股份有限公司.均安水道特大桥局部计算分析报告[R].广州:广东省交通规划设计研究院股份有限公司,2016.6.
[2] 广东省交通规划设计研究院股份有限公司.均安水道特大桥总体计算分析报告[R].广州:广东省交通规划设计研究院股份有限公司,2016.6.