

预制节段混凝土桥梁设计与施工应用研究

陆元春、李坚、黄锦源、顾强、朱鸿蕾

摘要 以嘉浏公路浏阳河桥为例,介绍了预制节段混凝土桥梁的设计方法和施工方法,分析了该桥型的技术经济效益。

关键词 预制节段梁 设计 施工

一、前言

桥梁结构的预制节段砼整体拼装施工方法是将梁体纵桥向划分为若干个节段,在工厂或工场预制后进行组拼,再通过施加预应力成为整体桥梁。由于在施工工艺、施工周期、工程造价、施工其间对环境影响等方面均有一定的优势,该施工方法在工程建设中已越来越受到重视。

早在20世纪60年代,国外在桥梁工程中已有该施工方法的实例,近年来,随着架桥设备及预应力技术的不断完善,该施工方法得到了普遍推广,但在国内施工实例很少。

目前国内的市政工程建设正步入高峰期,城市中高架道路桥梁、城市轨道交通桥梁建设越来越多,工程环境的要求对施工时的制约条件越来越严格,快速施工的必要性越来越大,尤其在交通繁忙的市中心区施工,要求对交通影响最小,对桥梁构件的质量要求更高,工程本身要求降低劳动力成本。这些因素为预制节段砼整体拼装施工方法的应用和发展起到了推动作用。因为预制节段砼整体拼装施工方法具有如下优点:

1. 对环境影响小,并适宜桥下有特殊要求的桥梁施工;
2. 节段重量较轻、尺寸较小,运输方便,拼装成桥施工速度快;
3. 砼的外观及内在质量容易控制;
4. 适合高强度砼及体外预应力技术的应用,可减小梁体断面尺寸、提高材料使用效率,降低工程造价。

鉴于该施工方法具有许多优点和良好的发展

前景,我院成立课题组,开展了专题研究,并在嘉浏公路二期工程新浏河桥的主桥工程,采用了预制节段砼整体拼装设计与施工方法,作为课题研究的应用。

二、新浏河桥工程

嘉浏公路是连接上海市嘉定县至江苏省浏河镇的高速公路,二期工程全长约16km。近期为双向四车道加两侧紧急停车带,远期为六车道加两侧紧急停车带。新浏河为上海市与江苏省的界河,河宽约90m,五级航道。

桥梁跨河主跨采用3跨42m简支梁。上下行桥梁宽度分别为16.00m及18.8m(按远期六车道加两侧紧急停车带宽度要求布置,并在下行桥一侧设置人行道)。

桥梁结构工程设计荷载:汽车-超20级;挂车-120。

上下行桥桥梁横断面均为双箱单室断面。设计按预制节段砼整体拼装施工方法的相应要求进行。

三、预制节段梁的设计及计算

(一)设计规范与准则

预制节段混凝土桥梁的设计,与整体梁的设计略有不同。由于结构是由离散节段通过预应力形成整体,节段与节段之间连接较弱,梁的受力行为与整体梁有一定的差异,表现为梁的极限抗弯抗剪承载能力、结构的整体刚度、受力截面的应力分布等等。国内对节段梁的结构行为有一定的研究成果,但尚未形成指导设计的规范性文献。作为

本科研应用的新浏河桥的节段梁设计,主要参照国外相关文献“节段式混凝土桥梁设计与施工指南”(美国州际公路和运输工作者协会 1998 出版,下文简称“指南”)结合我国交通部的公路桥梁设计规范(下文简称“规范”)进行设计。

(二)新浏河桥箱梁设计

1. 材料

- 1) 混凝土采用 C60;
- 2) 钢筋采用 II 级钢筋;
- 3) 预应力材料:2000MPa 级高强度钢绞线及 HVM 锚固体系;

2. 箱梁截面尺寸的拟定及节段的划分。

1) 截面尺寸,如图 1 所示。

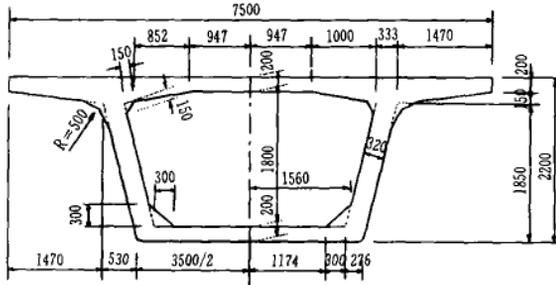


图 1 箱梁截面尺寸

2) 节段构造。分端块、转向块及标准块三种类型。端块设置端横梁,为预应力索锚固端,并设置支座构造。转向块设置体外预应力钢索转向构造,如图 2 所示。



a. 端块构造 b. 转向块构造

图 2 节段构造

3) 节段长度取值,考虑以下几个方面因素:

- ① 架桥机支腿内净宽及吊杆内侧净距
- ② 节段吊重
- ③ 一孔梁节段长度均匀

箱梁筒支跨长 42m,节段划分详见图 3:

端块节段长度为 2.7m,其它节段长度为 3.33m,节段重量为 350~400kN,一孔梁分成 13 个节段。

3. “指南”中相应要求:

1) 全断面尺寸:不应小于为限制活载加冲击

挠度(跨度的 1/1000 所需的尺寸,该挠度计算使用毛截面惯性矩和割线弹性模量)所需的要求。

设计计算活载最大挠度为 19mm(1/2200L)。



图 3 节段划分图

2) 顶板厚度及横向预应力要求:顶板厚度不小于腹板间距的 1/30;腹板间距如大于 4500mm,应设置横向预应力,且顶板厚度应大于 230mm。

3) 最小腹板厚度:腹板中无后张预应力筋的应大于 200mm;腹板中只有纵向(或竖向)后张法筋的不应小于 300mm 并不小于预应力管道直径的 2.5 倍;腹板中有纵向及竖向后张法筋的不应小于 380mm。

4) 顶板悬臂长度:不宜大于腹板间距的 0.45 倍;

4. 承载能力极限状态的抗力折减系数

1) 承载能力极限状态以方程式按“规范”内容可表示为:

$$S_d(\gamma_g G; \gamma_q \sum Q) \leq \gamma_b R_d(R_c/\gamma_c; R_s/\gamma_s)$$

$$\text{或 } S_d(\gamma_g G; \gamma_q \sum Q) \leq \gamma_R R_d(R_c; R_s)$$

其中 S_d, R_d —荷载效应函数及结构抗力函数

G, γ_g —永久荷载及其安全系数

Q, γ_q —可变荷载及其安全系数

R_c, R_s —混凝土及钢筋强度设计采用值

$\gamma_b, \gamma_c, \gamma_s$ —构件工作条件及材料安全系数

γ_R —抗力折减系数

按“规范”要求,抗力折减系数 γ_R 抗弯为 0.80,抗剪为 0.76;

2) 承载能力极限状态以方程式按“指南”内容可表示为:

$$\eta \sum Y_i O_i \leq \phi R_d(R_c; R_s)$$

其中 η —关于延性、超静定性和营运重要性的系数

Y_i, O_i —荷载系数及荷载效应

ϕ —抗力折减系数

按“指南”要求,根据不同的接缝类型及预应力体系的粘接度取用不同的抗力折减系数,如表 1:

设计中,承载能力极限状态不同截面抗力折减系数如表 2

不同接缝类型抗力折减系数 表 1

预应力粘接	接缝类型	抗弯	抗剪
全粘接预应力筋	A 类接缝	0.95	0.85
	B 类接缝	0.90	0.70
非粘接或部分粘接预应力筋	A 类接缝	0.90	0.80
	B 类接缝	0.85	0.65

节段间采用湿混凝土或环氧树脂接缝为 A 类接缝,节段间采用干接缝为 B 类接缝

不同截面抗力折减系数 表 2

	支点	1/8 跨	1/4 跨	跨中
抗弯折减系数	—	—	0.52	0.64
抗剪折减系数	0.56	0.43	—	—

5. 分析截面承载力和应力计算时有效宽度参照“指南”及规范相应条款进行设计控制。

6. 预应力

预应力钢束采用体内束及体外束混合体系,体内束采用曲线形(腹板)、直线形(底板),体外束采用折线形,均为梁端双向张拉。体内束共布置 13 束 12-φ15.20(腹板 8 束,底板 5 束),体外束共布置 4 束 12-φ15.20。

1) 正常使用极限状态设计的预应力度受弯构件控制截面预应力度表达为:

$$\lambda = M_0 / M$$

式中: M_0 —消压弯矩(使截面使用荷载作用下的受拉缘应力抵消到零时的弯矩)

M —使用荷载作用下的变矩

“规范”要求:A 类接缝不小于 1.1;B 类接缝不小于 1.2。

“指南”要求:A 类接缝不小于 1.0,如接缝有辅助粘接筋,可小于 1.0(按混凝土强度及辅助连接钢筋控制预应力度);B 类接缝按不小于 0.7MPa 的压应力控制预应力度。

本设计按“规范”要求进行设计。不同截面预应力度如表 3。

2) 预应力筋应力控制

预应力筋应力控制按“规范”要求。

不同截面预应力度 表 3

	支点	1/8 跨	1/4 跨	跨中
预应力度 λ	—	—	1.35	1.13

“规范要求”:张拉控制应力 σ_k 小于或等于 $0.75R_y^b$;使用荷载下钢绞线 σ_y 小于或等于 $0.65R_y^b$ (组合 I)、 $0.70R_y^b$ (组合 I、II)。

“指南”要求:张拉控制应力 σ_k 小于或等于 $0.80R_y^b$;使用荷载下钢绞线 σ_y 小于或等于 $0.74R_y^b$ 。

3) 预应力损失

按“规范”计算。

4) 体内束设计

体内钢束线型控制要求按“规范”。管道采用金属波纹管,管道灌浆部分梁采用真空辅助灌浆。

5) 体外束设计

体外束采用永久锚固式体外束。每束设 2 处偏转器,偏转器构造为混凝土块中预埋钢管并内衬四氟板。

体外钢束的应力根据活载作用下可能产生的振动应加以控制,按“指南”要求:不做振动分析束不设支承的最大长度为 7.6m;考虑活载的性质及体外束的作用,设计采用值略大于“指南”要求。

6. 接缝设计

接缝按环氧树脂密剪力键齿形式(无辅助粘结钢筋)进行设计,属 A 类接缝。

(三) 构造设计

1. 预制节段吊孔

每个预制节段,设四个吊点,采用顶板与腹板交界处设 φ70mm 圆孔。

2. 梁支承设计

为减小桥墩立柱尺寸,并保证节段梁预应力钢束两端张拉的要求,支座处梁底采用特殊钢结构构造加强,保证梁纵桥向相邻支座间距不大于 1000mm,且保证梁端有 800mm 预应力张拉空间。

3. 转向块及端横梁

每梁设两个端横梁节段及两个转向块节段。端横梁厚 1000mm,所有体内及体外束均锚固在端横梁上。转向块横梁厚 600mm,四束体外束通过转向块横梁上的转向构造改变束方向。

四、节段梁施工要点

(一)节段梁预制

节段梁预制采用现场长线密接浇筑法。按梁全长制作混凝土地坪(铺设钢板),作为预制节段梁底模板,侧模及内模均采用可行走钢模板(外模板设置附着式震动机)。节段梁 C60 砼采用现场拌和。

(二)拼装成桥

预制节段梁采用架桥机拼装成桥,具体步骤如下:

1. 架桥机就位,预制节段运输至现场;
2. 纵向喂节段,架桥机悬挂全部节段;
3. 调整节段每节位置,节段间涂粘合剂并临时固结;
4. 张拉纵向预应力钢束;
5. 架桥机过孔,下一孔梁安装。

(三)预应力工艺

预应力施加采用两端张拉方式,每束张拉力约 2300kN,由于梁与梁之间张拉空间较小,千斤顶采用内卡式(工具锚及限位板置于千斤顶内腔。)

为防止预应力筋的腐蚀,提高结构的安全度及耐久性,预应力管道采用了真空辅助灌浆工艺(在孔道处于接近真空的状态下,将浆体压入孔道,保证灌浆的密实度)。

五、节段梁的试验

(一)试验概况

为验证节段梁在拼装过程及设计荷载作用下的受力性能,对梁进行模型试验。结合经费及工期要求,试验采用的梁,试验完毕后仍作为工程梁使用。为模拟梁的实际受力状况,在现场以梁实际全长作为试验梁跨径。梁间不设粘合剂,预应力管道间不灌浆。预应力钢束张拉 9 根体内束(6 根腹板束、3 根底板束)、4 根体外束。

梁加载荷载采用预制的节段梁块,共分六级加载,作为荷载的预制节段块最多为 10 块。

(二)试验内容

1. 拼装过程中力学性能

1)梁体混凝土实测弹性模量

2)预应力钢束张拉控制力与有效预加力之间的关系

3)混凝土中有效预加应力值

4)梁体预加力后上拱度检测

2. 荷载作用下力学性能

1)各级试验荷载下,建立实测效应(应变与挠度)与跨中弯矩之间的关系曲线

2)卸载后残余挠度检测

(三)主要试验数据

1. 混凝土弹性模量

对三组共 9 块试件进行实测,实测弹性模量 $E_h = 3.97 \times 10^4 \sim 4.27 \times 10^4 \text{MPa}$,平均值为 $4.07 \times 10^4 \text{MPa}$ 。比规范值 $3.65 \times 10^4 \text{MPa}$ 高约 11.5%。

2. 各荷载工况下跨中断面上下缘应力

各荷载工况下跨中断面上下缘应力如表 4,应力正值为拉,应力负值为压。实测应力按布置在钢筋上的钢弦式钢筋计的相应数据。

表 4 实测跨中断面应力

工况	各工况上缘应力(MPa)			各工况下缘应力(Mpa)		
	实测	计算	相对差	实测	计算	相对差
箱梁自重		-6.96			11.58	
预应力	2.15	2.44	11.9%	-22.87	-20.44	-11.9%
一级加载	-1.70	-2.17	21.7%	3.10	3.42	9.4%
二级加载	-3.20	-3.95	19.0%	5.70	6.22	8.4%
三级加载	-3.50	-4.16	15.9%	6.00	6.55	8.4%
四级加载	-4.80	-5.57	13.8%	8.00	8.76	8.7%
五级加载	-5.60	-6.41	12.6%	9.30	10.09	7.8%
六级加载	-5.90	-6.94	15.0%	9.90	10.93	9.4%

3. 各荷载工况下挠度

对四分点及跨中截面下缘两侧布置钢丝挠度计进行挠度实测,数据如表 5:

表 5 实测挠度

工况	各工况挠度(mm)				
	北 1/4 实测	南 1/4 实测	跨中实测	跨中计算	跨中相对差
预应力+自重			36.4	21.6*	68.5%*
一级加载	-6.4	-6.1	-9.3	-11.0	15.5%
二级加载	-12.8	-12.1	-18.1	-21.0	13.8%
三级加载	-13.2	-12.4	-18.4	-21.4	14.0%
四级加载	-18.7	-17.8	-26.4	-29.9	11.7%
五级加载	-23.2	-22.5	-2.7	-35.3	7.4%
六级加载	-25.5	-24.7	-36.8	-38.8	5.2%

* 计算值按整体梁计算

六、经济效益及社会效益分析

(一)经济效益分析

1. 主跨箱梁工程预算造价

新浏河大桥主跨箱梁工程预算造价 874 万元,平米预算造价为 1993 元/m²。其中架桥机按 1/4 购置总价摊销(约 265 元/m²)。

2. 与其它结构形式比较

对新浏河大桥主跨上部结构另拟二种结构方案:T 梁结构、水上吊车安装和满膛支架、现浇箱梁。三种方案预算造价比较如表 6 所示。

三种方案预算比较 表 6

上部结构方案	平方预算造价 (元/m ²)
预制节段、架桥机拼装	1994
T 梁结构、水上吊车安装	2093
满膛支架、现浇箱梁	2438

3. 陆上箱梁不同施工方法工程造价比较

对可能用于城市轻轨高架桥梁结构的标准箱梁结构(跨径 30m 左右、桥宽小于 10m)按“上海市市政预算定额(1993)”估算比较如表 7、8 所示。

(二)社会效益分析

预制节段拼装施工工艺,具有对环境影响小、对施工的地理位置要求低、施工工期短的特点。同时节段预制有利于工厂标准化制作,保证质量,提高劳动生产率,降低工程造价。特别适合于对环境要求极高的城市桥梁的施工。

预制节段混凝土、架桥机架设施

工方法箱梁工程造价估算表 表 7

分项内容	每平米造价 (元)	每平米造价 (元)	每平米造价 (元)
工厂预制节段	850	850	850
节段运输	150(10km)	180(20km)	205(30km)
架桥机架设	170(3km 摊销)	250(2km 摊销)	500(1km 摊销)
预应力	250	250	250
总计	1420	1530	1805

满膛支架现浇施工方法箱梁工程造价估算表 表 8

分项内容	每平米造价 (元)	每平米造价 (元)	每平米造价 (元)
支架	250(高 5m)	550(高 10m)	850(高 15m)
模板及商品砼	60	60	60
箱梁砼、钢筋	800	800	800
预应力	250	250	250
总计	1360	1660	1960

七、结语

预制节段砼桥梁是非常适用于城市中高架道路桥梁、轻轨桥梁的一种施工方法,相信随着桥梁建设的要求不断提高、施工设备的不断改进,材料性能及施工工艺的不断完善,在桥梁结构的建设中会越来越的得到应用,不断提高我国桥梁施工水平,特别是城市式桥梁的施工水平。

七、结束语

1. 碧云大桥采用新一代高性能 2000 级 HVM 锚具,整个主体结构的预应力建立得到保证。

2. 在施工中采用了较先进的千斤顶,不但节约材料,方便了施工,保证了张拉质量,同时对 HVM 系列产品的设计、开发和制造水平进行了又一次的实践认证。

3. 碧云大桥主体工程于 2001 年 12 月完工,其中预应力工程施工评为优良。

(上接第 20 页)

预应力筋的张拉伸长值偏差控制在±6%。锚固时夹片外口齐平,夹片间缝隙均匀,钢绞线内缩值≤6mm。孔道灌浆用水泥浆的水灰比应严格控制在 0.4~0.45,灌浆时冒出浓浆后方可封闭,灌浆压力一般在 0.5~0.7MPa,孔道灌浆应达到饱满密实;浆体强度不少于 40 号。每束钢绞线断丝或滑丝不得大于 1 丝且每个断面断丝之和不超过该断面钢丝总数的 1%。