

预制节段混凝土桥梁的设计与工程实践

陆元春 李 坚

(上海市城市建设设计研究院 上海 200011)

摘要: 本文论述了预制节段逐跨拼装桥梁的发展、施工特点及节段梁的预制方法等。并结合上海市新浏河大桥工程重点介绍了预制节段梁的设计特点, 采用架桥机实现逐孔拼装的施工方法、预应力新材料新工艺的应用, 以及预制节段梁主要试验成果分析。

关键词: 预制节段桥梁 设计施工特点 新浏河大桥 试验研究 工程实践

1. 采用预制节段逐跨拼装法施工桥梁的发展

从20世纪70年开始, 预制节段桥梁施工法为人们接受并逐步得到推广应用, 欧美则是这类预应力混凝土桥梁结构应用的先导。法国著名的预应力结构专家Jean Muller及其领导的国际公司, 早期在美国成功地建成了Long Key Bridge (长礁桥 $101 \times 36\text{m}$)、Seven Mile Bridge (七英里桥, $266 \times 41\text{m}$) 等采用预制节段逐跨拼装施工的长大桥梁。2000年该公司又建成了耗资10亿美元, 全长55km的泰国Bang Na高速公路高架桥梁工程, 它是当今世界采用逐跨拼装施工技术建成的最长桥梁。

上述工程反映了这类桥梁的发展和技术的进步。例如Bang Na高速公路主线高架桥梁的设计更符合建筑美学的要求, 该桥桥面宽达27m, 平均跨径42m, 采用连续梁结构。箱梁支承在造型优美的H形桥墩上(图1), 施工时架桥机利用H形墩的上部空间走行导梁, 并以中横梁作为导梁支点。设计与施工巧妙的做到使箱梁节段、H形桥墩与架桥机导梁构造三者形成一个完整的体系, 很有特色。跨径42m的箱梁, 梁高2.6m, 较扁平; 腹板的斜度大, 顶板横向跨度约17m, 除在顶板布置了横向预应力束外, 还在箱梁内中部设置人字形斜撑杆。节段接头采用干拼法。22根纵向预应力束中除2根为体内束外, 余均用体外束。该桥的设计构思能给我们提供有益的启示。

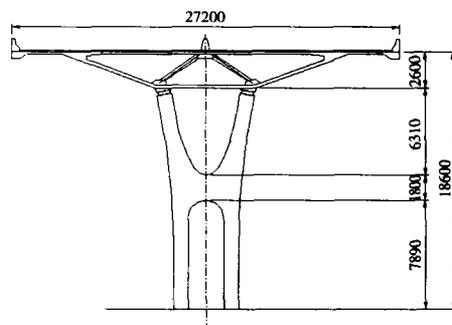


图1 Bang Na高速公路主线桥墩与上部结构

我国最早采用预制节段逐跨拼装施工法建成的桥梁是福州洪塘大桥滩孔 $31 \times 40\text{m}$ 的预应力混凝土连续箱梁桥, 该桥建成于1990年。设计采用无粘结预应力体外束, 施工中用万能杆件拼装架桥机和下导梁实现逐跨拼装成桥。

2001年建成的上海新浏河大桥, 主桥 $3 \times 42\text{m}$ 预应力混凝土简支箱梁, 是我国首次采用专用架桥机(DP450型架桥机)实现逐跨拼装施工的高速公路桥梁。目前即将动工的上海沪闵高架路二期工程, 桥宽25.5m, 6车道, 主跨为35m的多跨预应力连续梁结构, 也是采用预制节段逐跨拼装法施工。

2. 预制节段混凝土桥梁工法的特点

2.1 预制节段拼装式桥梁从施工方法上可分为二类

1) 逐跨施工法 - 一般用于直线桥, 跨径在 $35\text{m} \sim 50\text{m}$;

2) 平衡施工法 - 可用于直线桥或曲线桥梁, 跨径一般在 $35\text{m} \sim 100\text{m}$;

实践表明: 节段拼装式桥梁施工的关键取

决于预制节段混凝土的浇筑质量。

2.2 采用逐跨施工法的节段拼装式桥梁从结构和施工上可分为二类

第一类结构 - 施工时在特制的导梁上组拼全跨的预制节段, 该导梁俗称下行式导梁。预应力钢束基本上采用体外束, 节段与节段间采用干接缝, 设置复式剪力键以承受剪力。这类结构构造简单, 布束方便, 施工速度快。国外在城市高架道路结构中应用较多, 例如泰国 Bang Na 高速公路主线高架桥连续箱梁的施工。该类结构的体外预应力防腐技术十分关键, 应加以重视。

第二类结构 - 采用上行式架桥机吊装预制节段, 逐孔拼装施工, 预应力钢束可采用体内束与部分体外束混合配置方法, 复式剪力键承受剪力, 节段之间用环氧树脂粘接剂胶拼。例如上海市嘉浏高速公路新浏河大桥就是属于这类。

2.3 节段梁预制方法

一般分为长线法和短线法二类。

长线法是将桥梁按整跨或半跨分成若干节段, 在台座上连续啮合浇制。长线法的台座构造较简单, 节段间的制作误差可按需要调整, 避免误差积累。但该法需要较大的预制场地。长线法多用于变截面连续梁桥, 也可用于等截面的节段梁。

短线法一般用于中等跨径的等截面桥梁结构。该法利用已浇制好的梁段作为下一节段的端模板, 固定的封头板作为浇制梁段另一端的模板。外模与内模均采用能调节的钢模板, 底模安装在轨道小车上, 也有用安装在小底盘内的千斤顶作竖向调整以取得节段之间的几何形状。

短线法的制梁台座规模相对较小, 可集中预制、循环作业, 便于管理。但节段制作精度要求高, 以确保拼装架设后的桥梁线形。

节段梁划分的原则应综合考虑桥梁跨径大小与横断面形状, 架桥机的总吊装能力和性

能, 节段预制工艺、运输和工期等因素。节段梁的长度一般在 2.0 ~ 4m, 墩顶段与标准梁段不一定等长。节段梁的重量一般宜控制在 40t ~ 100t 左右。

2.4 预制节段拼装式桥梁的主要优点

- 1) 采用工厂化生产, 构件外观与内在质量容易控制;
- 2) 桥梁下部结构基础与预制节段梁可同步施工;
- 3) 空中作业, 避免采用满堂支架施工, 使施工期间对地面交通的影响减至最小;
- 4) 节段重量较轻, 尺寸小, 运输方便, 架设速度快;
- 5) 施工期间对环境的影响小。

现代桥梁工程的经济性是由结构形式、材料用量指标、施工工期、施工费用、施工质量以及施工期间对环境和交通的影响等各种因素综合确定的。所以, 节段拼装施工法对于多跨预应力混凝土桥梁, 尤其用于高架道路桥、轻轨高架桥这类桥梁较长, 投资较大的工程具有相当的竞争力。

3、新浏河大桥工程预制节段梁的设计特点

新浏河大桥位于嘉浏高速公路上海市与江苏省的界河上, 河宽约 90m, 属五级航道。原设计上部结构采用主跨 3 × 42m 的简支 T 梁, 上下行桥梁的宽度分别为 16m 和 18.8m (注: 一侧布置人行道), 设计荷载汽车 - 超 20 级、挂车 - 120。由于该桥下部结构桩基已施工完毕, 为配合预制节段桥梁研究课题, 主桥按预制节段逐跨施工法进行了变更设计, 将 T 梁改成单室箱梁, 全桥横断面共布置 4 组箱梁。

3.1 设计规范与准则

预制节段混凝土桥梁是将分开的节段通过预应力钢束形成整体。预应力配束方式可分为体外束或体内束与体外束混合配置二种形式。

预制节段梁与常规整体梁的设计存在差

异。现浇箱梁为体内有粘结预应力结构，钢束布置在梁体内，以得到较大的偏心矩和钢束极限应力，从而使结构在极限状态下具有较高的使用效率。

预制节段桥梁，由于节段之间的接缝存在，又没有普通钢筋通过，这样直接影响箱梁整体结构的力学性能。裂缝的存在削弱了结构的刚度，其荷载-位移呈非线性关系。这些最终反映在梁的极限抗弯承载能力、抗剪承载力，结构的整体刚度和受力截面的应力分布等均与整体梁不同。

由于我国目前尚无预制节段混凝土桥梁设计规范，新浏河大桥设计主要参照美国《预制节段桥梁设计与施工指南》（美国州际和运输工作者协会出版1998版）（注：下文简称“指南”），并结合我国交通部现行公路桥梁设计规范（注：下文简称“公路桥规”）进行设计。

3.2 材料和预应力新技术

1) 混凝土：C60；

2) 预应力技术：在该工程中首次采用国内最新研制的2000MPa高强度低松弛钢绞线及其配套的HVM锚固体系；YDC2500N-100内卡式千斤顶；部分箱梁的体内束采用了真空压浆工艺。

3) 普通钢筋采用Ⅱ级钢。

3.3 梁体构造

1) 截面尺寸与节段划分

箱梁截面尺寸为图2所示。

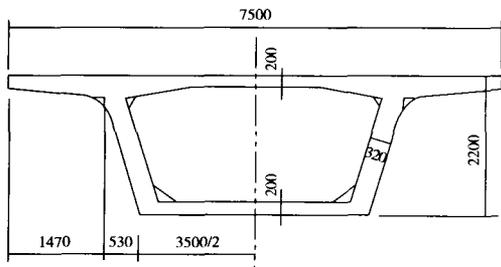


图2 上海新浏河大桥箱梁截面

该工程箱梁节段构造分端块、转向块和标准块三种类型（图3）。端块设置端横梁，作为

预应力束锚固端，梁底部设置支座构造。转向块设有体外束转向构造。

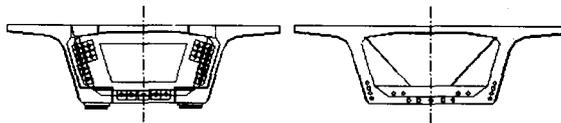


图3 端块及转向块构造

2) 新浏河大桥主桥箱梁节段划分考虑的因素

- A、架桥机支腿的内净距和吊杆内侧净距；
- B、节段的吊重；
- C、每孔箱梁节段长度较均匀。

42m箱梁节段划分见图4。端块节段长2.7m，标准节段与转向块节段为3.33m，每孔梁共分成13个节段，每块节段重量为350kN~400kN。

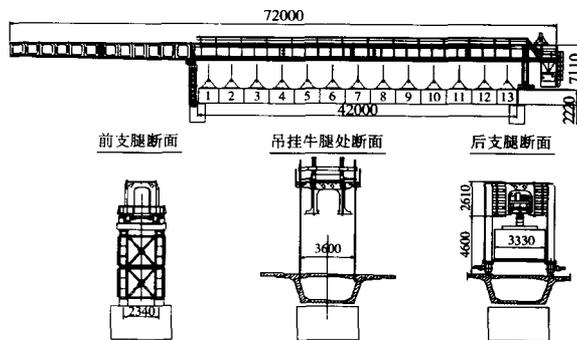


图4 节段划分图

3.4 承载能力极限状态的抗力折减系数

“公路桥规”中承载能力极限状态方程式为：

$$Sd (\gamma_g G, \gamma_q \Sigma Q) \leq \gamma_b R_d (R_c / \gamma_c, R_s / \gamma_s)$$

可写成： $Sd (\gamma_g G, \gamma_q \Sigma Q) \leq \gamma_R R_d (R_c, R_s)$

式中 γ_R - 抗力折减系数， $\gamma_R = \gamma_b / \gamma_c$

Sd, R_d - 荷载效应函数及结构抗力函数；

$$\gamma_c = \gamma_s = 1.25$$

G, γ_s - 永久荷载（结构重力）及其安全系数；

Q, γ_q - 可变荷载与永久荷载中混凝土收缩、徐变的影响力、基础变位影响力及其安全系数；

R_c, R_s - 混凝土及预应力钢筋、非预应力

钢筋强度设计采用值;

γ_b 、 γ_c 、 γ_s - 构件工作条件系数、混凝土安全系数、钢筋安全系数。

“指南”中承载能力极限状态方程式为:

$$\eta \sum Y_i Q_i \leq \phi R_d (R_c, R_s)$$

式中 η - 关于延性、超静定性和营运性重要性系数;

Y_i 、 Q_i - 荷载系数、荷载效应;

ϕ - 抗力折减系数

按“公路桥规” - 抗力折减系数 r_n , 抗弯为0.80, 抗剪为0.76; 按“指南”根据不同的接缝类型和预应力体系的粘接方法, 采用不同的抗力折减系数如表1

表1 “指南”抗力折减系数

预应力粘接方法	接缝类型	抗弯折减系数	抗剪折减系数
全粘接预应力筋	A类	0.95	0.85
非粘接或部分粘接预应力筋	A类	0.90	0.85
	B类	0.85	0.85

表1中A类接缝指节段间采用现浇混凝土接缝或环氧树脂接缝, B类接缝为干接缝。

新浏河大桥箱梁承载能力极限状态下, 不同截面的抗力折减系数计算值如表2

表2 抗力折减系数计算值

	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	--	--

3.5 预应力设计

42m箱梁的预应力钢束采用体内束与体外束混合体系, 其中体内腹板束用曲线束, 底板为直线束; 体外束采用折线形束。体内束布置13束 $12\phi^{15.20}$ (腹板8束, 底板5束), 体外束布置4束 $12\phi^{15.20}$ 。所有预应力束均采用双向张拉。

1) 正常使用极限状态设计的预应力度入

“公路桥规”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的压力控制预应力度。

该工程按“公路桥规”设计时, 不同截面的预应力度如表3

表3 预应力度

	支点	1/8跨	1/4跨	跨中
预应力度入	--	--	1.35	1.13

2) 预应力钢束应力控制

“公路桥规”要求: 张拉控制应力 $6_k \leq 0.75R_y^b$; 使用荷载下钢绞线 $6_k \leq 0.65R_y^b$ (组合I) 或 $0.70R_y^b$ (组合II、III);

“指南”要求: 张拉控制应力 $6_k \leq 0.80RR_y^b$; 使用荷载下钢绞线 $6_k \leq 0.74RR_y^b$ 。

3) 预应力损失

按“公路桥规”计算。

4) 体内束设计

体内钢束线型设计按“公路桥规”, 采用金属波纹管成孔, 管道灌浆有一部箱梁采用真空灌浆, 以便同常规法对比。

5) 体外束设计

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内预埋预弯钢管, 内衬聚四氟乙烯(F4)。

按“指南”要求, 体外钢束的应力根据活载作用下钢束可能产生的振动加以控制,

其中不做振动分析的钢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, 该工程设计采用值略大于“指南”的要求。

6) 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, 支座处梁底采用加强的特殊钢结构构造, 保证梁段纵桥向相邻支座间距不大于1000mm, 且使梁端间留有800mm作为内卡式千斤顶张拉的作业空间。

3.6 接缝设计

接缝采用复式剪力键形式, 无辅助粘结钢筋, 环氧树脂胶拼工艺施工, 属A类接缝。

3.7 端横梁与转向块设计

每根箱梁设置2个端横梁节段和2个转向块

节段。端横梁厚1000mm,所有体内束和体外束均锚固在端横梁上。转向块横梁厚600mm,4束体外束通过转向块横梁上的偏转器构造改变预应力钢束的方向。

在预制节段桥梁设计中,应十分重视转向块的构造形式和配筋。根据国外对转向块的试验研究分析:作为常规设计时,转向块的拉力按照仅由受拉钢筋承受的原则进行。受拉钢筋按照围住转向块内通过的预应力筋的孔道配置,并形成环筋。同时要求将环筋与箱梁底板的纵向钢筋锚固紧。另外还需配置能围住转向块内所有预应力筋的闭合箍筋,这类闭合箍筋采用与环筋相同的直径与间距。

4. 节段梁施工要点

4.1 节段梁预制

新浏河大桥节段梁预制采用长线浇筑法。按梁全长制作混凝土地坪,上面铺设钢板,作为预制节段梁底的模板。侧模及内模均采用可行走的钢模板,其中外模板设有附着式震捣器。

节段梁C60混凝土采用现场拌和。

4.2 采用架桥机实现逐孔拼装施工

1) DP450型架桥机主要结构与特点

该架桥机主要结构由主梁、支腿(分前、后支腿和中支腿)、起吊天车、吊梁小车、滑道系统、控制系统、液压系统等组成。整机自重2300kN,最大吊挂重量4500kN。架桥机的主梁为单根钢箱梁,全长72m,其中前端24m为导梁。三个支腿中,前后支腿是架桥机工作时的支承,而中支腿是作为架桥机过孔时的临时支承。

3) 施工步骤

A、架桥机就位,将预制节段运至现场;

B、纵向逐块喂梁,一直到全部节段悬挂就位;

C、调整节段位置,节段间涂环氧树脂粘合剂并依次临时固结。两节段间的临时束采用4根高强螺杆,临时预压应力0.2MPa;

D、穿纵向预应力束并逐根进行张拉;

E、架桥机过孔,进行下-孔梁预制节段拼装工艺。

4.3 预应力工艺

纵向预应力束采用两端张拉式方,每束张拉力2300kN。由于两孔梁之间张拉空间较小,设计时采用YDC2500N-100内卡式千斤顶。该千斤顶将工作锚及限位板置于内腔,外形尺寸 $\phi 399\text{mm} \times 289\text{mm}$ 。

为防止预应力钢筋腐蚀,提高结构的安全度及耐久性,部分箱梁的预应管道采用了真空灌浆工艺,以提高孔道灌浆的密实度。

5. 预制节段梁试验研究

5.1 试验目的

为了验证节段梁在拼装过程中及设计荷载作用下的力学性能,对箱梁进行了模型试验。根据经费与工期要求,试验梁采用工程用梁。为模拟梁的实际受力状态,以箱梁设计全长作为试验梁的跨径。节段间采用干接缝,预应管道不灌浆。试验梁仅张拉9根体内束(6根腹板束,3根底板束)和4根体外束。

试验梁采用预制的节段梁块作为外荷载,共分6级加载工况,最大荷载为10个预制节段梁重。

5.2 试验内容

1) 拼装过程中的力学性能

A、梁体混凝土实测弹性模量;

B、预应力钢束张拉控制力与有效预应力;

C、梁体有效预应力值;

D、施加预应力后,梁的上拱度检测。

2) 荷载作用下的力学性能

A、各级试验荷载工况下,建立试验梁实测效应(应力与挠度值)与跨中弯矩之间的曲线关系;

B、卸载后残余挠度检测。

5.3 主要试验成果分析

1) 混凝土弹性模量

三组9块试件实测得的混凝土弹性模量 $E_h =$

$3.97 \times 10^4 \sim 4.27 \times 10^4 \text{MPa}$, 平均值为 $4.07 \times 10^4 \text{MPa}$ 。比规范值 $3.65 \times 10^4 \text{MPa}$ 约高 11.5%。

2) 各荷载工况下箱梁跨中截面上下缘应力值

表4数据为各荷载工况时, 箱梁上缘应力值与下缘应力值, 即梁自重 + 预应力 + 加载工况 (i)。(注: 正值为拉应力, 负值为压应力)。

表4 各加载工况下箱梁应力值

加载 工况	上缘应力 (MPa)			下缘应力 (MPa)		
	实测值	计算值	差值	实测值	计算值	差值
箱梁自重		-6.96			11.58	
预应力	2.15	2.44	-0.29	-22.87	-20.44	-2.43
一级加载	-6.51	-6.69	0.18	-8.19	-5.44	-2.75
二级加载	-8.01	-8.47	0.46	-5.59	-2.64	-2.95
三级加载	-8.30	-8.68	0.38	-5.29	-2.31	-2.98
四级加载	-9.60	-10.09	0.49	-3.29	-0.1	-3.19
五级加载	-10.41	-10.93	0.52	-1.99	1.23	-3.22
六级加载	-10.71	-11.46	0.75	-1.39	2.07	-3.46

注: *计算值为按整体梁计算得出

3) 各荷载工况下的箱梁挠度值

表5为对L/4和跨中截面下缘两侧布置钢丝挠

度计所得的实测挠度值。

表5 各加载工况下箱梁挠度值

加载工况	挠度值 (mm)				
	北L/4实测值	南L/4实测值	跨中实测值	跨中计算值	跨中相差(%)
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	-32.7	-35.3	7.4
六级加载	-25.5	-24.7	-36.8	-38.8	5.2

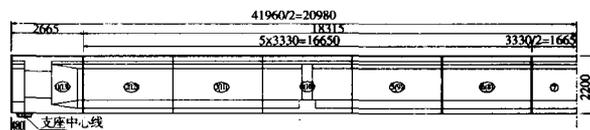


图5 采用DP450架桥机逐跨拼装施工

试验分析表明: 节段拼装梁的应力和挠度计算值与实测值基本上是吻合的。在各荷载工况下, 箱梁上缘应力实测值均为压应力, 但比计算值略小。而箱梁下缘应力实测值均为压应力, 比计算值大。跨中挠度实测值比计算值小。试验表明梁体结构是偏于安全的。

“OVM250拉索体系”荣获广西2005年度 科技进步二等奖

近日, 从广西壮族自治区科学技术厅传来喜讯: 由柳州欧维姆机械股份有限公司开发成功的“OVM250拉索体系”项目荣获广西2005年度科技进步二等奖。这是该项目被评为柳州市2004年度科技进步特等奖后获得的又一项荣誉。

OVM250拉索体系是用单根防腐钢绞线组成的群锚拉索, 是以光面或特殊涂层钢绞线为受力基材, 每根钢绞线在工厂内涂抹油脂后热挤一层高密度聚乙烯护套, 成盘运输到现场, 逐根架设锚固, 每组索外面设HDPE护套保护。由于是单根钢绞线成盘运输、架设, 因此带来了极大的方便。这种拉索至少设有三层保护层, 因此具有优良的防腐性能。

OVM250拉索体系的主要特征是: 各根钢绞线与钢不相互接触, 从而具有较高的疲劳性能; 逐根安装

张拉锚固, 安装简易; 具备从工厂到工地的不间断防护; 没有预制误差; 在结构使用过程中随时可对每根钢绞线进行监测; 各根钢绞线可分别拆除更换。

另外, OVM250钢绞线斜拉索可以显著降低检查、维护的费用, 因此按桥梁的建设、检查、维护、结构修复或更换等总的费用计算, 采用OVM250钢绞线拉索结构, 斜拉桥总的费用显著降低。

“OVM250拉索体系”既可以用于斜拉桥, 也可用于中、下承式拱桥系杆等索结构。该体系自研制成功以来已大量运用于国内外重要工程建设, 如安庆长江公路大桥、宜宾中坝大桥、越南德龙桥、五河口大桥、北京潮白河大桥等桥梁的斜拉索, 江西生米大桥、柳州龙屯立交桥等桥梁的系杆, 以及上海卢浦大桥的施工扣索等。