

西安理工大学

工程硕士学位论文

英文题目 Research on the Manufacturing Technology and
Construction Process of Prestressed Concrete
Continuous Box Girder

论文主题词 桥梁；预应力混凝土；连续箱梁。

论文类型（选） 1 应用基础 2 应用研究✓ 3 技术攻关
4 设计开发 5 规划管理 6 其他

独创性声明

本人所呈交的学位论文是在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本文的研究工作和成果的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任

论文作者签名： 徐晓群 2009年10月20日

学位论文使用授权声明

本人 徐晓群 在导师的指导下创作完成学位论文的知识产权归西安理工大学所有，本人今后在使用或发表该论文涉及的研究内容时，会注明西安理工大学。本人作为学位论文著作权拥有者，同意授权西安理工大学拥有学位论文的部分使用权（在以下“□”中标明，同意的划“√”，不同意的划“×”），即：本人提交的印刷版和电子版学位论文，

- ☐ 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存；
- ☐ 学校可以将学位论文的全部内容编入公开的数据库进行检索；
- ☐ 学校可以将学位论文的摘要编入公开的数据库进行检索；
- ☐ 学校可以将公开的学位论文或解密后的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所及校园网上供校内师生阅读、浏览。

本人学位论文全部或部分内容的公布（包括刊登）授权西安理工大学研究生学院办理。

（保密的学位论文在解密后，适用本授权说明）

论文作者签名： 徐晓群 导师签名： 马俊 2009年10月20日

预应力混凝土连续箱梁制造技术及施工工艺研究

学科名称：环境工程

研究生：徐晓辉

签名：徐晓辉

导师姓名：马斌 教授

签名：马斌

马斌 高工

摘要

随着我国高速公路建设的迅速发展，桥梁建设进入了前所未有的高潮时期，大跨度预应力混凝土桥型以其独特的优势被广泛采用。革新预应力连续箱梁的施工工艺、规范程序、分析技术要点对同类型梁桥的设计、施工、材料及设备创新和发展有实际意义。

本文以宝鸡市龚刘渭河大桥为研究对象，取得的主要研究结论如下：

(1) 首先，综述了预应力混凝土连续箱梁的发展，介绍了箱梁混凝土出现的裂缝，并对裂缝的形成进行了分析；对箱梁施工中的新技术、新材料、新设备进行了介绍。

(2) 对制梁台座、底模、外膜、内膜施工工艺进行了革新研究，将底模与台座设计成一体；外模采用定型钢模板；内模采用拼装式施工，保证内外侧模板整体刚度与稳定性。

(3) 对钢筋的加工、检验和力学试验的规程进行研究，提出钢筋除锈、调直、弯曲成型、焊接、钢筋绑扎的程序和技术要点。

(4) 对混凝土的施工工艺进行了革新研究。总结出连续箱梁采用单箱单室型，斜向分段、水平分层混凝土浇筑的方法。

(5) 预应力成孔采用预埋波纹管成孔工艺，内穿塑胶管的方法。采用双孔锚下张拉并且压力表与张拉千斤顶配套使用的方法。采用活塞式压浆泵，压浆后布设钢筋网并且浇筑封锚混凝土。

(6) 应用龙门式起重机配合双导梁穿行式架桥机进行架梁。强调了施工中的技术要点和工艺过程。

论文研究的结论和成果对同类工程的施工有参考价值。

关键词：梁桥；预应力混凝土；连续箱梁。

Title: RESEARCH ON THE MANUFACTURING TECHNOLOGY AND CONSTRUCTION PROCESS OF PRESTRESSED CONCRETE CONTINUOUS BOX GIRDER

Major: Environmental Engineering (Project management)

Name:

Signature: Xu Xiaohui

Supervisor:

Signature: Ma Bin

Abstract

With the rapid development of highways in our country, bridge construction has come in the upsurge period hitherto unknown, the long span prestressed concrete bridge is used widely for its advantage. Because the span of the bridge becomes longer and longer, the request of designing, construction, material and equipments should be elevated.

This paper takes the Gong Liu Weihe bridge of Baoji city as an example, and the content as follow:

(1)First of all, this thesis reviews the development of prestressed concrete continuous box girder,secondly introduces different properties cracks , then analysis formation of cracks;thirdly illustrates mang new technology、new materials、new equipments of box girder construction.

(2)The pedestal of beam fabrication、bottom-mould、external form、internal form are reformed. Because project need,the pedestal of beam fabrication and bottom-mould are designed as a whole. External form with set shaped steel formwork to ensure whole stiffness and stability of lateral template;internal form are constructed with assembling type method.

(3)The processing、test and conventional experiment of steel are researched. Then derusting、straightening、bending、molding、welding、steel bars colligation are putting forward.

(4)The construction technics of concrete are reformed.The continuous box girder with single box single room in this engineering. If concrete is constructed,the box girder concrete placement using oblique segmentation and horizontal slice method.

(5)Prestressed construction.Prestressed pore-forming using embedded corrugated pipe technology and internal break plastic tubing method. prestressed stretching construction using double-pore and under anchor method,also pressure gauge and lifting wire should corollary use. The process of grouting using piston type mudjack,then setted reinforced bar fabric and pouring anchor seal concrete.

(6)Two portal cranes which is the type of 60tons and double guide beam bridge machine are selected to girder erection. The technique point of construction and technics process are emphasized.

The conclusion and achievements of the paper researches have a reference value for construction of similar engineering

Keywords: girder bridge; prestressed concrete; continuous box girder

目 录

1 绪论.....	1
1.1 预应力混凝土连续梁桥的发展状况.....	1
1.1.1 预应力混凝土桥梁的产生.....	1
1.1.2 预应力混凝土连续梁桥的发展.....	2
1.1.3 我国有代表性的预应力混凝土连续梁桥.....	4
1.1.4 国内桥梁设计规范的发展.....	4
1.2 预应力混凝土梁桥常用施工方法.....	5
1.2.1 就地浇筑法.....	5
1.2.2 预制安装法.....	6
1.2.3 悬臂施工法.....	6
1.2.4 顶推施工法.....	6
1.2.5 移动模架法.....	7
1.3 新技术、新材料、新设备的开发应用.....	7
1.4 预应力混凝土梁桥工程中出现的主要问题及形成原因.....	8
1.4.1 主要问题.....	8
1.4.2 形成原因.....	8
1.5 本文研究的内容.....	9
1.6 本文的难点.....	9
2 箱梁制造工艺技术研究.....	10
2.1 箱梁制造工艺及流程.....	10
2.2 预应力预制箱梁模板.....	11
2.2.1 预制底座的制作.....	11
2.2.2 箱梁模板施工.....	11
2.2.3 立模注意事项.....	16
2.2.4 小结.....	16
2.3 钢筋加工.....	17
2.3.1 钢筋进场的检验.....	17
2.3.2 钢筋加工.....	17
2.3.3 在台座模架上绑扎底板和腹板钢筋.....	18
2.3.4 拼装、绑扎顶板钢筋.....	20
2.3.5 箱梁钢筋制作中需要注意的问题:.....	21

2.3.6 小结	21
2.4 混凝土施工	21
2.4.1 混凝土的拌制及运输	21
2.4.2 混凝土浇筑与振捣	22
2.4.3 混凝土的养护	23
2.4.4 混凝土质量控制注意事项	24
2.4.5 拆模	25
2.4.6 箱梁的常见问题、原因及解决方法	25
2.4.7 混凝土表面缺陷的修补	28
2.4.8 小结	29
2.5 预应力施工	30
2.5.1 制孔	30
2.5.2 钢绞线的加工	31
2.5.3 预应力连续箱梁的张拉	31
2.5.4 端头钢绞线切割	33
2.5.5 箱梁压浆	34
2.5.6 预应力施工中的常见问题及处理措施	35
2.5.7 各种保证措施	37
2.5.8 小结	39
3 架梁施工研究	40
3.1 起重机械	40
3.1.1 起重机械的种类和特点	40
3.1.2 构件吊装的技术参数计算	43
3.1.3 起重设备选择	44
3.2 构件的吊装工艺	44
3.2.1 构件绑扎	44
3.2.2 构件的起吊	45
3.3 小结	45
4 龚刘渭河大桥预应力混凝土连续箱梁制造技术及施工工艺实证分析	46
4.1 工程施工设施配置	46
4.2 梁场的选定与布置	46
4.3 箱梁制造工艺	50
4.4 预应力预制箱梁模板	50
4.5 钢筋加工	51

4.6 混凝土施工	52
4.7 预应力施工	52
4.8 架梁施工	55
5 结论与展望.....	56
5.1 结论	56
5.2 展望	57
致 谢	58
参考文献.....	59
附 录.....	61

1 绪论

随着我国经济的快速发展和加大基础建设,实施交通运输基础设施大战略,涌现大量的高速公路、高速铁路桥梁。桥梁施工技术特别是多跨径的连续梁施工技术发展,极大的提高我国桥梁建设整体水平和发展速度。预应力混凝土连续箱梁由于具有整体刚度大、施工质量容易保证、养护成本低等优点,已广泛应用于普通公路桥梁、跨江大桥引桥、跨海大桥、城市高架桥和高速铁路桥梁中。桥梁施工方法的研究,优化施工方法,标准化施工,规范化管理,对降低施工成本,提高我国桥梁的整体施工水平,为大型桥梁施工向机械化、自动化和标准化的方向迈进有着十分重要的意义。

1.1 预应力混凝土连续梁桥的发展状况

1.1.1 预应力混凝土桥梁的产生

预应力混凝土连续梁桥是预应力桥梁中的一种,它具有整体性能好、结构刚度大、变形小、抗震性能好,特别是主梁变形挠曲线平缓,桥面伸缩缝少,行车舒适等优点。加上这种桥型的设计施工均较成熟,施工质量和施工工期能得到控制,成桥后养护工作量小。上述种种因素使得这种桥型在公路、城市和铁路桥梁工程中得到广泛采用^[1-5]。预应力混凝土连续梁桥的发展显然与预应力混凝土的发展密切相关,预应力混凝土的每一次技术进步都会促进预应力混凝土桥梁的发展,下面将简单介绍预应力混凝土及预应力混凝土桥梁的发展状况:

早在 1861 年人们就提出对混凝土施加预压应力的设想,并开始了各种尝试和研究工作。然而,直至本世纪 20 年代前,大多数的尝试与研究都遭到了失败。主要原因是材料强度不高,所施加的预压应力又因混凝土的收缩、徐变影响而消失殆尽。在前六十余年的历程中,预应力混凝土处在萌芽阶段,人们在失败的教训中对它有了更深一步的了解,而且发现了在混凝土中建立可靠预应力的一些关键问题,如:必须提高材料强度,保证所施加的预应力在各种客观因素导致的损失后,尚能保持一定的永存预应力;必须研究高强材料的物理力学特征,特别是混凝土的收缩、徐变特性;必须研究可取的预应力施工工艺、锚固体系^[2]。

上个世纪 20 年代开始至第二次世界大战前,预应力混凝土的研究进入了一个崭新的阶段,并开始尝试付诸于工程实践;

1920 年,法国工程师弗莱西奈(Freyssinet)提出了混凝土振捣工艺,提高了混凝土材料的强度。

1928 年,法国工程师弗莱西奈与美国的狄尔(Dill)由于确定了混凝土徐变的影响,在结构中建立了永存预应力。

1939 年,德国狄辛格(Dischinger)发展了混凝土收缩、徐变的数学分析法。同年,

弗莱西奈提出了圆锥形锚具(F式锚具)及张拉体系,首先建立了后张法预应力混凝土的施工工艺,他为后张法预应力混凝土桥梁的发展奠定了基础,F式锚具至今仍是应用最广泛的一种有效锚固体系。

预应力混凝土桥梁的发展在第二次世界大战以前尚处在萌芽阶段,但正在逐步向成熟阶段过渡。第二次世界大战以后,联邦德国、法国等西欧国家因遭受战争破坏,大量桥梁急待修复,而当时战后钢材奇缺,客观上为预应力混凝土桥的发展提供了非常有利的环境。而在非洲、拉丁美洲一些第三世界国家亦为避免从国外输入昂贵的钢材,也常优先考虑预应力混凝土桥梁方案。可以说强大的时代需求促进了材料强度不断提高,材料工艺不断改进,预应力技术迅速发展,从而也促进了预应力混凝土桥梁的发展。

预应力混凝土桥梁一旦跃上桥梁建设的历史舞台,就显示出它强大的竞争能力,从50年代突破了100m的跨径记录,经过五十余年的迅猛发展,不断创造新的纪录。而在实际的工程实践中,在400m以下的跨径范围内,预应力混凝土桥梁已常为优胜的方案^[2]。

我国的预应力混凝土桥梁在50年代才刚开始研究,第一片预应力混凝土在丰台桥梁厂研究试制,并于1956年首先在东陇海线新沂河铁路桥上建成了跨度为23.9m的预应力混凝土简支梁,迈出了重要的一步,使中国桥梁界初步具备了高强度钢丝,预应力锚具,管道灌浆,张拉千斤顶等有关材料、设备和施工工艺,其后预应力混凝土梁式桥也有了长足的进步,第一座20m跨度的京周公路桥也同时建成。50年代预应力混凝土还仅应用于小跨简支梁桥,最大跨径仅为32m。1984年建成了主跨111m的湖北沙洋汉江桥和广东顺德容奇桥(3孔90m),前者用挂篮悬浇施工,后者则用5000kN浮吊预制组拼而成,开创了八十年代预应力混凝土连续梁桥的先河。随后,1985年又建成了哈尔滨松花江大桥(7孔90m),1986年又建成了主跨达120m的湖南常德沉水桥。1988年,广东省同时建成了采用节段预制悬臂拼装施工的七孔110m江门外海桥和主跨达180m的预应力混凝土连续钢构桥——番禺洛溪桥。

预应力混凝土桥梁不但已在跨径上跻身于过去为钢桥所霸占的大跨径范畴,而且在建桥数量上已遥遥领先。在预应力混凝土桥梁发展较早的一些欧洲国家,如联邦德国、法国、瑞士、比利时等国的预应力混凝土桥梁的建桥总面积(以桥面面积计),早已上升到75~80%。我国近几十年来,在公路桥梁的中等与大跨径桥梁方面,其建桥总数也已上升到80%以上。

1.1.2 预应力混凝土连续梁桥的发展

在50年代前,预应力混凝土连续梁虽是常被采用的一种体系,但跨径均在百米以下。当时主要采用满堂支架施工,费工费时,限制了它的发展。50年代后,预应力混凝土桥梁应用悬臂施工方法后,加速了它的发展步伐。结构的悬臂体系和悬臂施工方法相结合产生了T型钢构,在60年代,跨径100~200m范围内。早期有典型意义的桥梁便是联邦德国1953年建造的胡尔姆斯桥和1954年建成的科布伦茨(Koblenz)桥。然而,这种结构,

由于中间带铰,并对混凝土徐变、收缩变形估计不足,又因温度影响等因素使结构在铰处形成明显折线变形状态,对行车不利。因此,对行车条件有利的连续梁获得了新的发展。对中跨预应力混凝土连续梁,在20世纪60年代初期,逐跨架设法与顶推法的应用,对大跨预应力混凝土连续梁,各种更完善的悬臂施工方法的应用,使连续梁废弃了昂贵的满堂的施工方法而代之以经济有效的高度机械化施工方法,从而使连续梁方案获得新的竞争力,逐步在40~200m范围内占主要地位。如1962年在委内瑞拉的卡尼罗河上,用顶推法修建的6跨连续箱梁桥就是顶推法的代表作,主跨为96m^[2]。

无论是城市桥梁、高架道路、山谷高架栈桥,还是跨越宽阔河流的大桥,预应力混凝土连续梁都发挥了它的优势,它是一种被广泛应用的桥型^[6, 7, 8, 9, 10]。其中突出的桥例,如联邦德国科赫塔尔(Kochertal)桥,桥墩高183m的高架多跨连续梁桥,跨径布置为81+7×138+slm,桥面宽31m。仅用8.6m宽单箱截面,箱外挑出长悬臂,每隔7.66m有一斜撑支承悬臂桥面板。另一个典型的桥例为英国的奥韦尔(Orwell)桥,总长1286m,主跨为190m的18跨连续梁(46+5×59+72+106+190+106+72+6×59+46m)。它说明了连续梁的连续长跨已超过1000m,它对行车非常有利。在20世纪70年代至80年代间,对二百余座主跨大于100m的预应力混凝土梁式桥作过统计,连续梁占总数的50%^[4]。

在中等跨径范围,预应力混凝土连续梁更是千姿百态。无论在桥跨布置、梁、墩截面形式或是在体系上(吸取其它结构的优点)不断改进桥型布置,例如:V形墩的连续梁体系、双薄壁墩连续梁体系。

连续梁的横截面形式在小跨径的城市高架桥中,为求最小建筑高度,常选用板式或肋板式截面,而在中、大跨径主要采用箱式截面。但总的发展趋势是尽可能加长悬臂桥面板而选用单箱截面,以达到快速施工的目的。在这种单箱截面的结构中,往往采用三向预应力工艺。

箱形截面能适应各种使用条件,特别适合于预应力混凝土连续梁桥、变宽度桥。因为嵌固在箱梁上的悬臂板,其长度可以较大幅度变化,并且腹板间距也能放大;箱梁有较大的抗扭刚度,因此,箱梁能在独柱支墩上建成弯斜桥;箱梁容许有最大细长度;应力值较低,重心轴不偏一边,同T形梁相比徐变变形较小。

箱梁截面有单箱单室、单箱双室(或多室),早期为矩形箱,逐渐发展成斜腰板的梯形箱。箱梁桥可以是变高度,也可以是等高度。从美观上看,有较大主孔和边孔的三跨箱梁桥,用变高度箱梁是较美观的;多跨桥(三跨以上)用等高箱梁具有较好的外观效果。

随着交通量的快速增长,车速提高,人们出行希望有快速、舒适的交通条件,预应力混凝土连续箱梁桥能适应这一需要。它具有桥面接缝少、梁高小、刚度大、整体性强,外形美观,便于养护等优点。

由于连续箱梁在构造、施工和使用上的优点,近年来建成的预应力混凝土连续箱梁桥较多^[11]。其发展趋势为:减轻结构自重,采用高标号混凝土;随着建筑材料和预应力技术发展,其跨径增大,其跨越能力可从20m直到300m之间,葡萄牙已建成250m的连续

箱梁桥,超过这一跨径,也是不太经济的。大跨径连续箱梁要采用大吨位支座,如南京二桥北汉桥 165m 变截面连续箱梁,盆式橡胶支座吨位达 6500kN。这种样大吨位支座性能如何,将来如何更换等一系列问题有待研究^[12, 13]。我国公路桥梁在 100m 以上多采用预应力混凝土连续刚构桥。中等跨径的预应力连续箱梁,如跨径 40~80m;一般用于特大型桥梁引桥、高速公路和城市道路的跨线桥以及通航净空要求不太高的跨河桥。

1.1.3 我国有代表性的预应力混凝土连续梁桥

预应力混凝土连续梁桥是预应力桥梁中的一种,它具有整体性能好、结构刚度大、变形小、抗震性能好,特别是主梁变形挠曲线平缓,桥面伸缩缝少,行车舒适等优点。加上这种桥型的设计施工均较成熟,施工质量和施工工期能得到控制,成桥后养护工作量小。预应力混凝土连续梁的适用范围一般在 150 m 以内,上述种种因素使得这种桥型在公路、城市和铁路桥梁工程中得到广泛采用。

随着结构材料、设计水平及施工技术的提高,在工程实践上,各类桥梁的跨度记录不断刷新,建桥综合技术已经达到国际先进水平。目前,我国已建成的有代表性的大跨径公路和城市预应力混凝土连续梁桥如表 1-1 所示^[14]。

表 1-1 我国已建成的大跨径预应力混凝土连续梁桥

Table 1-1 The chinese long-span prestressed concrete continuous girder bridge builded

序 号	桥 名	主 桥 跨 径/m	桥 址	建 成 年 份
1	六库怒江大桥	85+154+85	云南	1995
2	黄浦江奉浦大桥	85+125×3+85	上海	1995
3	常德沅水大桥	84+120×3+84	湖南	1986
4	东明黄河公路大桥	75+120×7+75	山东	1993
5	风陵渡黄河大桥	84×5+87+114×7+87	山西	1994
6	沙洋汉江大桥	63+111×6+63	湖北	1985
7	珠江三桥	80+110+80	广东	1983
8	宣城汉江公路大桥	55+100×4+55	湖北	1990
9	松花江大桥	59+90×7+59	黑龙江	1986
10	吴淞大桥	55+90+55	上海	1993

这些桥梁受力整体性好、刚度大、活载作用下竖向变形小、行车平顺、安全舒适,充分表现出预应力混凝土连续梁桥的强大生命力和广阔的应用前景^[15]。

1.1.4 国内桥梁设计规范的发展

1) 1978 年交通部颁布了我国第一部《公路预应力混凝土桥梁设计规范》,该规范按

单一系数极限状态设计理论编制,比以往采用的破坏阶段理论规范前进了一步^[16]。

2) 1985 年交通部颁布了《公路桥涵设计规范》,其中《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》^[17](JTJ023-85)将单一系数改成多系数,以塑性理论为基础作强度极限计算,以弹塑性或弹性理论为基础作正常使用极限计算。

85 规范原则上是参照 1978 年 CEBFIP 的《国际标准规范》即:《Model Code for Concrete Structures》编制的。

3) JTJ023-85 规范允许桥梁构件按部分预应力混凝土(PPC)设计^[17]。

A 类构件在短期荷载作用下载面受拉边缘允许出现拉应力,但拉应力值不超过规范中的规定限值,如有些箱梁的顶板横向预应力是按 A 类构件设计的。

B 类构件在短期荷载作用下,截面受拉边缘允许出现裂缝,即拉应力值超过规范中的规定限值,目前在大跨径预应力箱梁桥设计中未见采用。

PPC 构件具有节约钢材、降低造价、能减少由预应力引起的反拱度、改善结构受力性能等优点,已在一般公路桥梁和城市桥梁工程中逐步推广应用。

4) 2004 年交通部颁布了目前在用的最新公路桥涵规范,其中《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTGD62-2004)^[18]采用了以概率理论为基础的极限状态设计方法。虽然这和 JTJ023-85 的桥规采用的都是极限状态设计法,但两者的性质是不同的。原 85 规范的立足点是把影响结构可靠性的各种因素视为确定性的量,设计的安全系数主要依据经验来确定,所以可称为“经验极限状态设计法”。本次修订的规范“以公路桥梁可靠度”为基础,把影响结构可靠性的各主要因素均视为不确定的随机性变量,以实际的调查、实测、试验及统计分析为基础,运用统计数学方法探讨原规范隐含的可靠度,确定适合于当前我国公路桥涵设计总体水平的失效概率,再从总体失效概率出发,通过优化分析或直接从各基本变量的概率分布中求得设计所需要的各相关参数,即“概率极限状态设计法”。这与以前的规范相比,有了很大的进步,更加具有科学性、合理性和实用性。

新颁规范很多方面都有很大的改进,比如“作用”与“荷载”的区分,各种构件的承载力计算方法及内容的改进,预应力损失的计算,构件耐久性的规定,持久状况与短暂状况的改进,《公路桥涵设计通用规范》(JTGD60-2004)^[19]中关于车辆活载也由集中荷载改为均布荷载加集中力的形式等。

1.2 预应力混凝土梁桥常用施工方法

预应力混凝土连续梁桥施工方法甚多,根据桥梁构件的制作地点不同,桥梁的施工方法有:就地浇筑法、预制安装法;以桥梁结构的形成方式而言,桥梁的施工方法有:以桥墩为起点的悬臂施工法和转体施工法;以桥轴一端为起点的逐孔施工法、顶推施工法,其中也可包括提升与浮运施工法;以横桥向为准的横移法施工^[20]。以下分别进行介绍。

1.2.1 就地浇筑法

就地浇筑法又叫满堂支架法,是在桥位处搭设支架,在支架上浇筑桥体混凝土,达到强度后拆除模板支架的一种最常规的连续箱梁现浇施工方法,该施工方法多适用于桥墩较低的中小跨径桥梁中,跨径多为10~30m。就地浇筑施工,无需预制场地,桥梁整体性好,对机具和起吊设备的要求不高等特点;由于需要人工多、支架搭设繁多、因此存在施工工期长,搭设支架影响排洪、通航,施工质量易受季节性气候影响而不易控制等缺点^[21-23]。

1.2.2 预制安装法

预制安装法一般将梁段沿横向分片或纵向分段在预制工厂或在运输方便的桥址附近设置预制场进行梁的预制工作,产品合格后运输到桥头,安装就位的施工方法。预制安装法施工生产流程可以达到自动化、机械化,构件质量好,施工进度快,有效利用劳动力,并由此而降低了工程造价;节省支架和模板,但结构的用钢量略为增大,吊装设备的要求比较高,混凝土收缩,徐变引起的变形大^[21-23]。

1.2.3 悬臂施工法

悬臂施工法是以桥墩为中心向两岸对称、逐节悬臂接长的施工方法。悬臂施工法一般分为悬臂浇注和悬臂拼装两种情况,悬臂浇筑是在桥墩两侧对称逐段就地浇筑混凝土,待混凝土达到一定强度后,张拉预应力筋,移动机具、模板继续施工^[24, 25, 26]。悬臂拼装法则是将预制节段块件,从桥墩两侧依次对称安装节段,张拉预应力筋,使悬臂不断接长,直至合拢^[27]。

悬臂施工法适用于梁的上翼缘承受拉应力的桥梁形式,如悬臂梁、连续刚构、拱桥及斜拉桥。连续梁桥悬臂施工桥跨间不需搭设支架,施工不影响桥下通航或行车;多孔桥跨结构可同时施工,施工进度快;桥梁跨越能力高,可应用于通航河流及跨线立交大跨径桥梁及跨线立交大跨径变截面桥梁施工;挂篮设备可重复使用,具有工程造价低的特点^[21-23]。

1.2.4 顶推施工法

预应力混凝土连续梁采用顶推法施工在世界各地颇为盛行^[27]。顶推法施工的原理是在沿桥纵轴方向的台后设置预制场地,分节段预制,并用纵向预应力钢筋将预制节段与施工完成的梁体联成整体,然后通过水平千斤顶推力,将梁体向前顶推出预制场地,之后继续在预制场进行下一节段梁的预制,循环操作直至施工完成。顶推施工时,梁的受力状态变化很大,施工阶段梁的受力状态与运营时期的受力状态差别较大,梁截面设计和布索时要同时满足施与运营的要求。因此工艺要求较苛刻,施工时多采用加设临时墩、设置前导梁和其他措施,用以减小施工内力。顶推法多用在中等跨径等截面桥梁,施工节段的长度一般10~20m,总长也在500~600m为宜;主梁分段预制,连续作业,结构整体性好,

由于不需要大型起重设备^[21-23]。

1.2.5 移动模架法

移动模架法是从桥梁一端开始,利用移动模架提供一个可以在桥位逐跨现浇混凝土制梁平台设备,当一跨施工完后将移动模架纵移至下一跨,这样逐孔施工,周期循环,直到全部完成施工方法。

常用的移动模架可分为移动悬吊模架和活动模架两种。

移动悬吊模架的型式很多,各有差异,基本结构包括三部分:承重梁、从承重梁伸出的肋骨状的模梁和支主梁的移动支承。承重梁通常采用钢梁,长度大于两倍跨径,是承受施工设备自重,模板系统重量和现浇混凝土重量的主要构件,承重梁的后段通过可移式支承落在已完成的梁段上,它将重量传给桥墩(或直接座落在墩顶),承重梁的前端支承在桥墩上,工作状态呈单悬臂梁。承重梁除起承重作用外,在一孔梁施工完成后,作为导梁与悬吊模架一起纵移至下一施工孔,承重梁的移位以及内部运输由数组千斤顶或起重机完成,并通过中心控制室操作。活动模架的构造型式较多,其中的一种构造型式由承重梁、导梁、台车和桥墩托架等构件组成。在混凝土箱形梁的两侧各设置一根承重梁,支撑模板和承受施工重量,承重梁的长度要大于桥梁跨径,浇注混凝土时承重梁支承在桥墩托架上。导梁主要用于运送承重梁和活动模架,因此需要有大于两倍桥梁跨径的长度,当一跨梁施工完成后进行脱模卸架,由前方台车(在导梁上移动)和后方台车(在已完成的梁上移动),沿纵向将承重梁和活动模架运送至下一跨,承重梁就位后导梁再向前移动^[27]。

移动模架工厂化施工,标准化作业,梁体整体性好,施工周期短;施工不影响桥下的通车、通航要求等的优点。移动模架工法适用于跨径在 20~60m 的简支或者连续梁,施工多在 8 跨以上,桥长达到一定规模是(一般大于 800m)较其他工法具有明显的经济效益。移动模架的成本较高,一次性投资较大,设备的运输、拼装和拆除较困难,多次周转使用,方可获得较好的经济效益^[21-23]。

1.3 新技术、新材料、新设备的开发应用

自七十年代后期以来,我国桥梁结构分析专用软件和 CAD 技术得到大力开发和应用。其中包括采用有限元法编制的桥梁通用综合程序以及许多桥梁专用程序,实现设计、计算、绘图一体化,大大提高了计算精度和速度,特别适用于大量重复计算、局部应力分析、设计方案优化。大跨径预应力混凝土桥梁的结构分析软件开发和推广应用,适应了我国桥梁建设高速发展的需要。

计算机技术已被广泛应用于大跨径预应力混凝土连续梁桥的施工控制。使得成桥后的线型平顺,符合桥梁的纵向设计标高,桥梁结构的受力状态能与设计计算一致。

高强度预应力钢材、高标号混凝土和大吨位预应力锚固体系的研制开发和应用,促进

了大跨径预应力混凝土连续梁桥的发展^[13, 28, 29]。

在八十年代后期,国内开始生产 1860MPa 的低松弛预应力钢绞线,加上与其配套的大吨位预应力锚具和张拉设备的研制成功,C50 与 C60 混凝土的应用,使得预应力连续梁桥结构轻型化,跨越能力得到很大提高。在这以前,我国大量采用 1600MPa Φ 5 的高强度碳素钢丝和与其配套的钢质锥形锚(即 F 式锚具)。这种锚具的张拉吨位小,使用时的控制张拉力仅 565kN,每张拉 10kN 预应力需要的布束面积约为 $0.255\text{cm}^2/\text{kN}$;若采用 Φ 15.212 型锚具,张拉 10kN 预应力所需的布束面积约 $0.096\text{cm}^2/\text{kN}$;采用 Φ 15.222 型的锚具时,张拉 10kN 预应力所需的布束面积约为 $0.067\text{cm}^2/\text{kN}$ 。三者的比例为 1:0.38:0.26,由此可以看到,采用大吨位预应力锚具体系后,使得预应力箱梁布束范围内的顶板、腹板和底板尺寸,设计时由原来的布束控制改为受力控制和按构造要求控制,这样大大减小了箱梁断面的尺寸,减轻了上部结构的自重。

箱梁混凝土及钢绞线的用量能够大大减少,从而使得预应力结构设计更趋合理、经济。若采用以往的钢质锥形锚具,预应力混凝土连续梁的跨越能力大多在 100m 左右。随着 1860MPa 钢绞线和大吨位预应力锚固体体系的应用,建桥施工技术的发展,目前我国连续梁桥的最大跨径已达 165m,连续刚构桥的最大跨径达到 270m^[1],从而使得我国预应力混凝土梁桥的设计、施工技术进入世界先进行列^[30, 31]。

1.4 预应力混凝土梁桥工程中出现的主要问题及形成原因

1.4.1 主要问题

在预应力混凝土连续梁桥,特别是大跨径连续梁桥的施工或使用过程中,部分桥梁有时会出现这样或那样的问题,其主要问题是箱梁混凝土出现了不同性质的裂缝。在已建成的连续梁桥中,某些桥梁上部结构曾出现的部分裂缝,主要有箱梁顶板和底板的纵向裂缝、箱梁腹板的斜向裂缝,特别是靠近边跨现浇箱梁端部范围的两侧腹板,出现近 45° 的斜向裂缝。其性质大部分为受力裂缝,并且宽度较大。所以,为了保证这些桥梁的安全性和正常使用,以及结构的耐久性,我们可以借鉴已有的研究成果从中吸取教训,以提高对这类问题的认识和重视,为今后从事预应力混凝土桥梁的设计、施工、管理和监理工作采取相应的对策。

1.4.2 形成原因

(1) 目前,我国大跨径预应力混凝土连续梁桥的设计,大多是按照全预应力结构设计的,即在理论上要求结构不出现拉应力。针对预应力混凝土连续箱梁结构而言,裂缝形成的原因,主要有以下几方面:

- 1) 在主桥总体设计中,跨径比例、箱梁截面尺寸的拟定不合理。
- 2) 结构设计抗弯剪能力不足。

3) 对由预应力钢束引起的附加力估计不足。

4) 对温度应力重视不够。

5) 施工质量不好,其中包括混凝土浇筑与养生、施工顺序与施工精度、预应力钢束的保护层厚度达不到设计要求、支架与模板变形过大、预应力张拉力不足、灌浆不及时或其他质量问题等。

6) 材料质量如混凝土的水泥及骨料品种、材料级配及计量误差等问题。

(2) 预应力混凝土桥梁工程中产生的裂缝,由于各种因素的相互影响,十分复杂。一般应对设计、施工及材料质量等方面着手调查分析,看问题发生在哪一个环节上,并根据结构裂缝的位置、方向、缝宽、裂缝长度与深度、裂缝间距等现象作为依据,进行分析。

(3) 混凝土主拉应力斜裂缝问题。预应力混凝土结构同普通钢筋混凝土结构一样,在受弯构件正截面强度有足够保证的情况下,仍有可能沿斜截面破坏。在斜截面破坏前,总会先出现由弯矩和剪力引起的主拉应力斜裂缝。

1.5 本文研究的内容

箱梁的制造工艺及技术研究;预应力预制箱梁台座及模板研究;钢筋加工工艺研究;混凝土施工工艺研究;预应力施工工艺研究;架梁施工研究。

本文通过对宝鸡市龚刘渭河大桥的设计与施工过程的分析,主要介绍了 30m 预应力混凝土连续箱梁的制造工艺及其技术。对连续箱梁预制的关键技术:钢筋骨架预绑扎、梁体混凝土的施工控制技术、预应力施工技术、箱梁场内移动技术等进行了研究,对宝鸡市龚刘渭河大桥的建设以及提高箱梁的预制质量和预制速度提供了技术保证。

1.6 本文的难点

(1) 单从设计上看基本都是满足要求的,但往往由于设计者缺乏施工方面的经验,而忽略了施工上的难度和可操作性。这样产生的后果就是施工后的桥梁强度与设计的预期强度相差较多,没有完全达到目的,这就要求设计人员掌握更多的施工方面的技术,清楚地了解所用材料的物理、化学指标,在各道工序转序前应达到什么标准等。

(2) 施工中的箱梁处于软土地基环境中,如何进行地基处理,以保证工后沉降在设计允许范围内,这将是箱梁施工成败的关键所在。

2 箱梁制造工艺技术研究

随着大型公路桥梁建设的飞速发展，公路桥箱梁设计水平和制造技术不断提高。本章就针对箱梁的部分制造工艺进行了重点研究，包括了预应力预制箱梁台座及模板的研究、钢筋加工等数个方面。

2.1 箱梁制造工艺及流程

箱梁施工工艺流程，见图 2-1 所示。

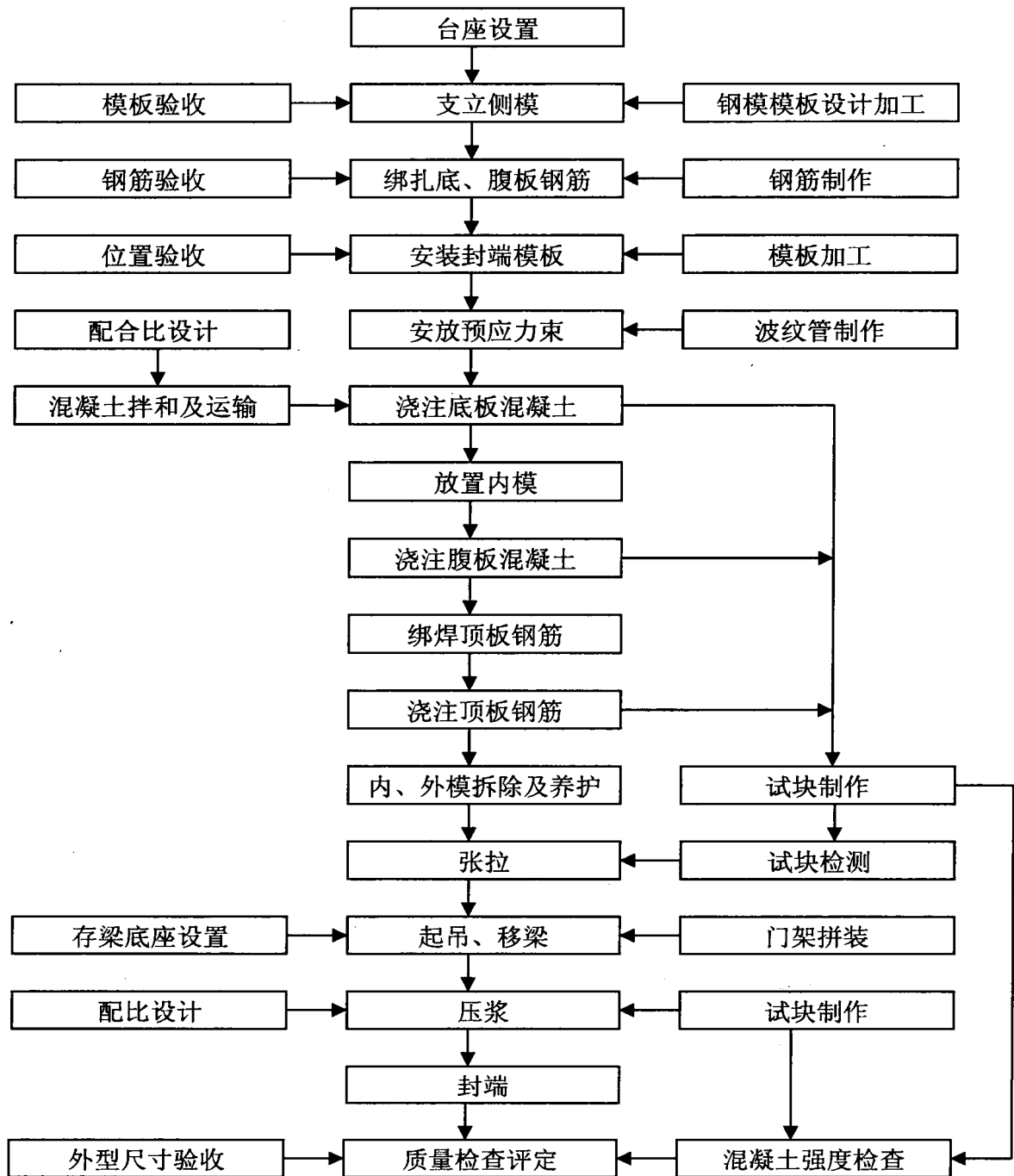


图 2-1 箱梁的制造工艺及流程

Fig.2-1 The flow of the box manufacturing process and process

2.2 预应力预制箱梁模板

2.2.1 预制底座的制作

在模板施工之前,必须准备张拉预制底座的制作。

根据桥位所在的位置和特有的地形情况,确定预制场地设置位置。对场地范围内原地地面整平或地势较低的一端用土回填平整并压实,再制作预制场地。张拉预制底座要坚固、无沉降,并必须考虑利于排水,以防止由于排水不畅造成地基下沉。场地处理如下:

1)做好预制箱梁场地原地面处理工作,对原地基承载力进行验算。

2)用 20 cm 5%的灰土进行处理。

3)为防止张拉时两端基础集中受力影响,在底座基础两端各长 3.0 m、宽 1.5 m,反开挖 40 cm,用 C25 混凝土浇注,在顶部用 $\Phi 10, 10 \times 10$ cm 的钢筋网片铺设一层作为加固处理。

4)预制施工场地进行硬化处理。

5)根据定做箱梁钢模,做一层 25 m(长) $\times$ 0.995 m $\times$ (宽) $\times$ 0.3 m(高)箱梁张拉预制底座。

6)箱梁预制底座顶面铺 10 mm 厚的钢板。

7)在大梁底模两端各 80 cm 处预留 25 cm 宽槽口,作为大梁出坑穿钢丝绳起吊位置。

2.2.2 箱梁模板施工

预制箱梁模板由台座、内模、外模和端模组成。

模板布置的原则:尽量采用整块大模板、通用尺寸,以便于重复利用。同时,在设计模板拼装方案时,要尽量减少拼缝的长度。模板的拼缝也宜对称、上下在一条直线上。另外,为保证梁与梁、梁与柱节点尺寸准确,接头光滑、垂直,要求在节点处次梁模不入主梁模,梁模不入柱模,且梁模须从两端节点起往中部拼装,调整后需用的木模板设在中部。

(1) 模板制造及安装要求

模板应具有足够的强度、刚度和稳定性,确保箱梁在施工过程中,各部位尺寸及预埋件位置的准确,并在多次反复使用下不产生影响梁体外形的变形。接缝严密不漏浆,制作与安装方便。模板的支撑必须支承在可靠的基础上,做好基底的防水和排水措施,模板及支撑的弹性压缩和下沉量必须满足规范要求。后张梁应根据设计要求及制梁的实际情况设置拱度。

根据桥梁工程质量检验评定标准规定,模板安装允许偏差如下:

1) 全长: ± 10 mm;

2) 高度: ± 5 mm;

3) 顶板及底板厚度: +10mm, 0mm;

4) 腹板厚度: +10mm, -5mm;

- 5) 腹板中心偏离设计位置: 10mm;
- 6) 底板平整度 (每 m): 2mm;
- 7) 相邻模板错台: 2mm;
- 8) 模板表面平整度 (每 m): 3mm;
- 9) 模板接缝处缝隙: $\leq 1\text{mm}$;
- 10) 底板反拱度: $\pm 2\text{mm}$;
- 11) 端模预留孔道偏离设计位置: $\leq 3\text{mm}$ 。

(2) 制梁台座与底模

箱梁的设计重量比较大时, 需要进行张拉施工。因此为满足工程施工需要, 箱梁底模的刚度应足够大且满足受力均匀的要求, 我们将底模与台座设计成一体。用钢筋混凝土修建固定台座面的尺寸与梁底部的尺寸相匹配, 台座出露的棱角用三角铁包边防止在使用过程中掉角, 台座上应预留两侧边模的对拉孔和移梁丝绳, 台座顶面和两侧面必须平整光滑, 以保证侧模的安装就位和箱梁底的平整度, 台座基底必须有足够的承载力, 并且台座间的地面用混凝土硬化, 避免在施工过程中渗水到台座基底, 引起台座下沉, 开裂, 见图 2-2。



图 2-2 台座断口图片

Fig.2-2 The picture of Fracture pedestal

首先对地基进行压实处理, 浇筑 10cm 厚 C25 素混凝土垫层, 基础埋深 0.2m, 宽 1.2m。在素混凝土垫层上浇筑 40cm 高、99cm 宽的底座混凝土, 混凝土强度等级为 C25, 底座混凝土在浇筑前, 先采用 $\Phi 12$ 钢筋焊接成骨架, 每隔 1m 设桩位一个, 精确测量标高, 标高可按挠曲线方程计算 $y \times 10^4 = 20(x+15) - 2/3(x+15)^2$ (原点在跨中), 在骨架顶部两边应预埋等边角钢 L5, 待底座混凝土达到设计强度后, 在混凝土表面铺设 $\delta=10\text{mm}$ 厚钢板作为底模, 并与两侧预埋的角钢焊接, 形成制梁台座。在距离端头 1.5m 处, 设置宽 40cm 的活动断口, 以便在此处兜底吊梁。由于箱梁在施加预应力时会产生向上拱度, 形成两端为支点的简支梁。因此, 我们在底座两端各 2.0m 范围内进行加强处理。此处基础埋深为

50cm，宽度为 2.0m，设置钢筋网片（ $\Phi 12$ 150mm $\times$ 150mm）一片。浇筑台座混凝土时，顶部每隔 1m 设 $\Phi 50$ 侧模下拉杆管道，两端部各 50cm 范围内按设计要求设置三角垫层。

（3）外模

在箱梁预制过程中，为保证外侧模板整体刚度与稳定性，外模采用定型钢模板。

箱梁侧模承受灌注混凝土的侧向压力和上翼缘混凝土的竖向压力以及施工荷载。为保证混凝土的密实，还须在侧模上设置振动器。为保证梁体混凝土外侧的平顺和光滑，采用刚度较大的整体侧模。侧模由面板（面板厚度 5mm）、面板加劲槽钢、面板加劲立带、侧模支腿（支腿槽钢规格为 100 $\times$ 48 $\times$ 6，间距 80cm 一道）、调节支撑和调节拉杆组成。模板加劲立带的设置确保了侧模双向受力的刚度，面板加劲槽钢（槽钢规格为 80 $\times$ 48 $\times$ 6，间距 30cm 一道）的采用，节约了钢材的用量，还增加了侧模的纵向刚度；侧模立腿的使用，改变了侧模上翼缘的悬挑受力为简支受力的受力方式。考虑到侧模刚度大，侧模立腿受力不匀，为保证在上翼缘混凝土灌注时侧模不发生变形，增设立腿调节支撑、 $\Phi 40$ 螺杆和调节拉杆，见图 2-3。



图 2-3 侧模立腿图

Fig.2-3 The picture of the Side-mode Li-leg

通过调节支撑来保证侧模立腿的支撑高度及水平，通过调节拉杆来对侧模预施荷载压力，来保证侧模在混凝土灌注施工时的双向受力稳定。

1) 外侧模板的分块和安装

为减少模板拼装时间，全梁设置 3m 一节的整体模板，端模板与中隔板两侧模板为 2m 一节的整体模板，全梁设置数块侧模。侧模的拼装与拆除由现场两台 5t 龙门吊配合，安装时将各块侧模依次就位，采用调节支撑来调节支腿高度，使模板支腿铅垂。每块模板之间采用螺栓连接。然后用对拉杆将两侧模板拉紧，模板与台座接缝处用海绵胶带密封，梁端头采用定型端模封堵。拆除时先拆除对拉杆，然后将各块模板间的螺栓松掉，最后将侧模立腿的调节支撑松掉，模板向外略倾斜，使模板脱离梁体混凝土面，采用龙门吊吊离

台座，见图 2-4。

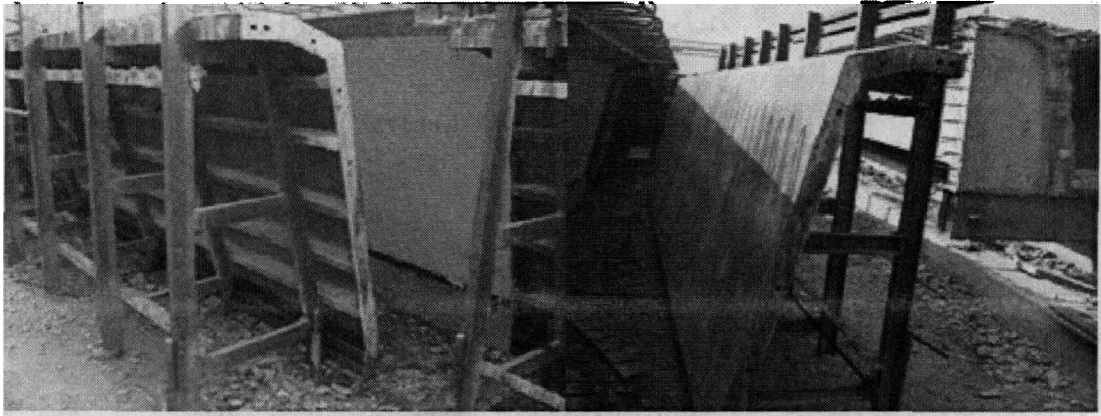


图 2-4 外模拆除图

Fig.2-4 The picture of the removing Outside the mold

2) 外模特点:

①侧模采用整体连接的方式，施工方便快捷，减少侧模之间的连接工作量，缩短了立模、拆模工序的作业时间。

②外侧模调节支撑的使用，使立模、拆模更加方便，模板垂直度、高度等调节更加快速，并且精确度高。

③侧模面两端刨光，使模板之间的接缝均小于 1mm，并且用海绵胶带密封，使箱梁表面基本上没有漏浆、接缝及错台，箱梁表面质量好，见图 2-5。

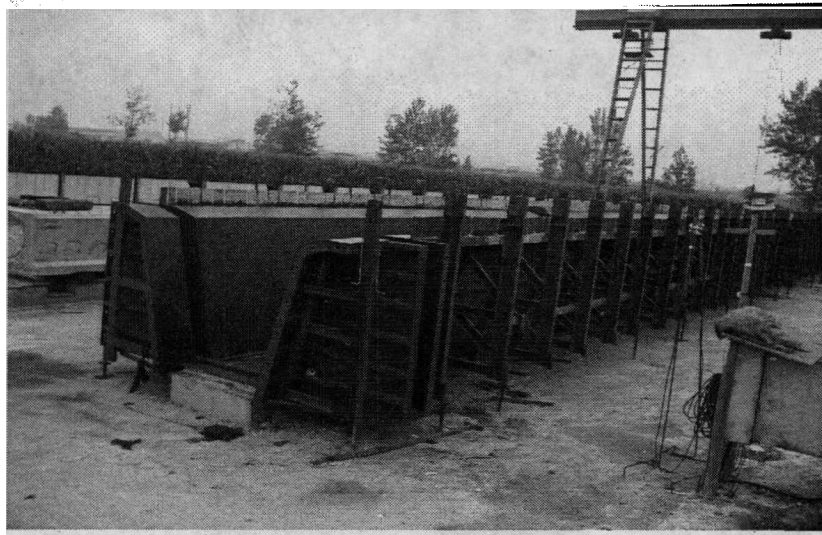


图 2-5 外模外观图

Fig.2-5 The picture of the Outside mode appearance

(4) 内模

箱梁的中间段箱室净高 1.31m，上宽 1.38m，下宽 0.7 m，梁端箱室净高 1.21m，上宽 1.20m，下宽 0.5 m，梁端 4.4m 段为变截面段。箱室截面尺寸变化大，再加上中间与两端设置隔板。因此给内模制造和安装带来很大困难，现场内模采用拼装式工具内模，便于拼装与拆除，较好的解决了这一问题，见图 2-6。

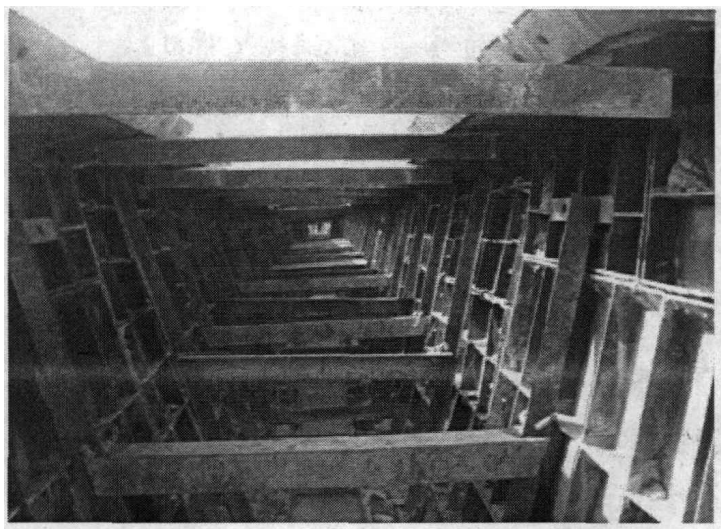


图 2-6 内模内部拼装图

Fig.2-6 The picture of the internal model assembly map

拼装式工具内模法: 采用 $L70 \times 70 \times 5$ 和 $L80 \times 80 \times 6$ 的等边角钢及节点板拼成环形骨架, 间距 1.5m, 以螺旋支撑杆或等边角钢组成稳定的不变体系, 以防变形。面板采用 150×30 与 150×15 两种工具式钢模板拼装, 在环形钢结构骨架上形成整体内模, 内模外观图见图 2-7。

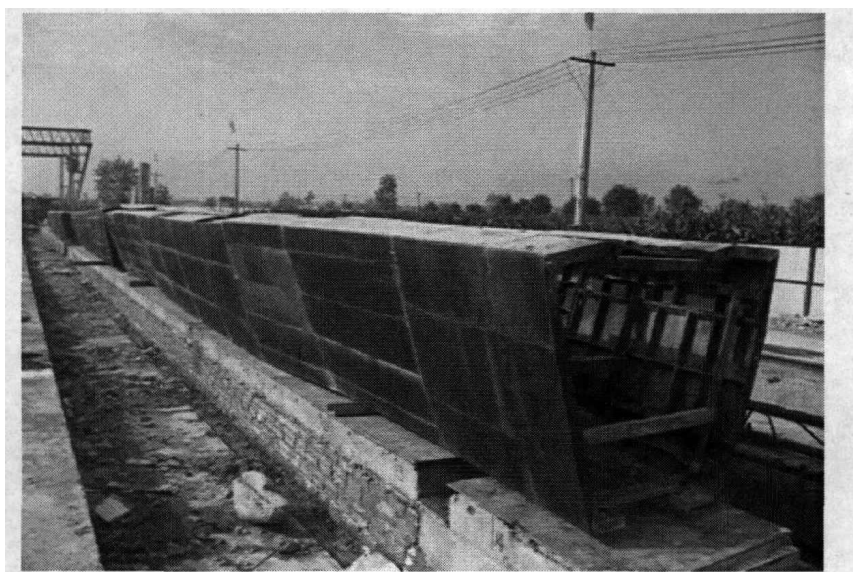


图 2-7 内模外观图

Fig.2-7 The picture of the internal model appearance

拼装式工具内模安装使用方法:

因为骨架节点板事先焊在面板上, 因此内模拼装采用边铺设面板边拼装骨架, 骨架与面板是定尺加工的, 面板与骨架的位置是固定不变的, 因此各面板与骨架角钢事先编上号, 这样拼装起来, 就不会拼错, 侧模、梁体钢筋、端模安装完后, 将内模整体吊装至制梁台位安装。

内模在台座上安装对位: 内模在中横板处断开, 分两段依次吊装。由两台 5t 龙门吊抬吊内模至制梁台位上, 门吊初步对准台位, 内模缓缓下落, 当内模快要到位时, 吊钩停

止下落,检查纵向及横向位置,纵向以一端的端模为基准,对角进行调整,以保证精确对位。在底板钢筋和腹板钢筋上焊定位筋,以确保内模与外模的相对位置不变,模板在分块上,考虑箱内施工的劳动强度和结构形式,把转角处模板分块减小,平、侧面模板分块的原则是,单块重量不超过 25kg,分块尺寸统一,可以互换,可使制造加工快而且方便,钢结构用料少,便于梁体换型,拼装式内模施工时可在台座外拼装成整体后吊运至制梁台位整体安装,这样做占用台座的工序时间短,容易维修。缺点是投入劳动力多,工人的劳动强度大,箱梁内室表面接缝多,混凝土表面不太平整,不太光滑。

(5) 箱梁模板安装顺序

待钢筋绑扎完毕,经监理检查认可后,即可进行模板安装作业。

箱梁的立模顺序为:检查、维修底模→绑扎梁体钢筋→安装侧模→涂膜模剂→安装端模→穿制孔波纹管→吊装内模并与端模连接→绑扎顶模钢筋→浇筑混凝土。

模板的拆卸程序为:拆卸外模上拉杆→拆端模→拆内模→拆外模。

2.2.3 立模注意事项

1) 模板应清理干净,脱模剂应涂刷均匀(脱模剂配比:机油与柴油重量比为 3:2),不能漏刷或多涂。

2) 模板的接缝处加密封条,其错台不大于 1mm,要严密不漏浆。

3) 安装底模时在底模上准确标出中隔板、端隔板以及梁体端线的位置并调整底模的反拱度。

4) 安装外模时,要保证箱梁底板、腹板的位置准确及倾斜度符合要求,吊装底板及腹板钢筋。

5) 安装端模及穿制孔波纹管。

6) 内模安装前涂刷脱模剂,内模安装时,用慢速卷扬机将龙骨梁延着支撑墩顶面拖入箱梁内,开动千斤顶将内模板撑开,用螺栓或者销钉固定支撑墩与龙骨梁,调整模板的平整和平顺锁定各千斤顶,将内膜与端模板螺栓连接,完成内模安装。内模安装后,整体吊装桥面板钢筋骨架。

2.2.4 小结

模板是混凝土成型质量的前提。模板必须有足够的强度、刚度和稳定性,保证施工中不走模、变形。本节中以 30m 预制箱梁宝鸡龚刘渭河大桥为载体,介绍了模板的制作和安装。以及立模过程中各个注意事项。在箱梁模板的施工过程中,对制梁台座、底模、外模、内膜施工工艺进行了革新研究,将底模与台座设计成一体;外模采用定型钢模板;内模采用拼装式施工,保证内外侧模板整体刚度与稳定性。

2.3 钢筋加工

箱梁钢筋具有规格多、数量大等特点。为满足施工需要,加快进度,梁体钢筋直接在台座上绑扎成型。其制作流程如下:

钢筋进场检验——>钢筋加工——>在台座模架上绑扎底板和腹板钢筋——>拆除模架支设箱梁外模——>绑扎端头钢筋网片——>吊装内模——>绑扎顶板钢筋——>浇筑混凝土。

2.3.1 钢筋进场的检验

钢筋质量对工程质量至关重要,为保证结构安全和耐久性,必须确保用于工程的钢筋质量符合国家标准。钢筋进场时应提供产品合格证和出厂检验报告;进场后必须抽样复试,合格后方可使用。

对进场的钢筋应按要求进行检验,其检验项目主要包括:

- (1) 检查钢筋的出厂质量证明书或试验报告单;
- (2) 仔细查对钢筋上的标牌,进场钢材应按批号及直径分批验收,验收内容包括对标牌、外观进行初验,并按规定抽取试样进行屈服强度、抗拉强度、伸长率和冷弯性能等试验,合格后方可使用;
- (3) 对钢筋进行外观检查,其检查要求为:
 - 1) 钢筋表面不得有结疤、裂缝和褶皱;
 - 2) 钢筋表面的凸块不得超过螺纹的高度;
 - 3) 钢筋外形尺寸应符合技术标准的要求。
- (4) 不同规格的钢筋在工地发生混料情况后,应立即检查并进行清理,重新分类堆放;已发出去的混料钢筋应立即追查,并采取防止事故的措施;
- (5) 对钢筋进行取样,并送实验室做力学常规试验。

2.3.2 钢筋加工

(1) 加工区面积

箱梁钢筋加工区面积符合工程现场运作,主要用于钢筋原材的存放、钢筋的加工及成型钢筋的放置。

(2) 钢筋的存放

对进场钢筋应按批号及直径分类存放,钢筋与地面之间要放置枕木,防止钢筋与地面直接接触,上面要盖塑料布,以避免钢筋被锈蚀。

(3) 钢筋的加工

钢筋加工包括整直、除锈去污、按照设计图下料弯曲成型。下料应用优化法以减少废料,接头以对焊为宜。

1) 钢筋除锈

箱梁属于预应力混凝土构件，而在预应力构件中，受力作用主要依靠预应力钢筋与混凝土之间的粘结能力，因此对箱梁钢筋的防锈和除锈要求应该更为严格。箱梁钢筋表面的油污、锈迹全部要清除干净，凡带有氧化锈皮或蜂窝状锈迹的钢筋一律不得使用。在焊接前，焊点处的水锈也要清除干净。

2) 钢筋调直

钢筋应该是平直的，无局部弯折，成盘的钢筋和弯曲的钢筋均应调直。因为弯曲不直的钢筋在箱梁混凝土中不能与混凝土共同工作而导致混凝土出现裂缝，以至产生不应有的破坏。如果用未经调直的钢筋来断料，断料钢筋的长度不可能准确，从而影响到钢筋的成型、绑扎安装等一系列工序的准确性，因此钢筋调直是钢筋加工必不可少的工序。

3) 按施工图纸要求对所需钢筋进行弯曲成型

箱梁钢筋弯曲成型主要采用机械弯曲成型。主要为 90° 和 180° 弯曲，例如顶板 $\Phi 16$ 的箍筋末端应作 180° 弯钩，其弯弧内直径不应小于钢筋直径的 2.5 倍，弯钩的弯后平直部分长度不应小于钢筋直径的 3 倍。对已弯曲成型好了的钢筋必须轻抬轻放，避免产生变形；应在指定的堆放地点，按编号分隔整齐堆入；特别应当注意的是，要与箱梁钢筋班联系好，按名称、部位及钢筋编号、需用顺序堆放，防止先用的被压在下面，使用时因翻垛而造成钢筋变形，影响箱梁质量。

4) 钢筋焊接

钢筋焊接全部采用闪光对焊，进行对焊时，先将焊接的两钢筋头打磨干净，平放在操作台上，对齐通电。焊接好后搬运到堆放场存放。加工钢筋的偏差值不得超过表 2-1 所示：

表 2-1 钢筋加工允许偏差表

Table 2-1 The Steel processing to allow deviation

项目	允许偏差 (mm)
受力钢筋顺长度方向加工后的全长	± 10
弯起钢筋各部分尺寸	± 20
箍筋、螺旋筋各部分尺寸	± 5

2.3.3 在台座模架上绑扎底板和腹板钢筋

为了保证钢筋绑扎的精度，加快速度，梁体钢筋的底、腹板筋在台座模架上进行绑扎。箱梁钢筋绑扎，要严格控制预留钢筋的外露尺寸和位置，防止安装焊接的位置有误或搭接长度不足。

底腹板钢筋绑扎模架由横向骨架以及纵向连接筋组成。在连接钢筋上用圆钢焊成八字型凹槽限位筋，且凹槽限位筋位置误差不大于 5mm，模架见图 2-9。

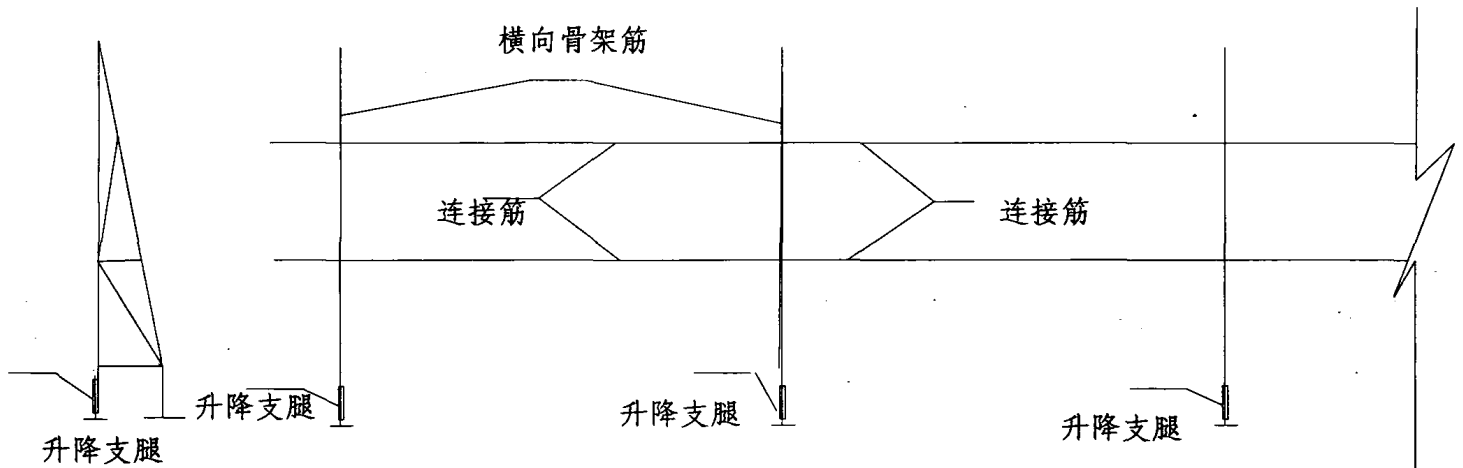


图 2-9 模架图

Fig 2-9 The picture of the moldbase

箱梁骨架的拼装顺序为：放置箱梁外侧钢筋支架→放置腹板箍筋→拼装、绑扎腹板钢筋→拼装、绑扎底板钢筋→放置箱梁外模→吊装箱梁内模→拼装、绑扎顶板钢筋。

1) 放置箱梁外侧钢筋模架

放置钢筋模架时应注意按图纸设计要求，控制好两侧支架之间的距离及高度，并将其位置固定好，防止拼装箱梁骨架时模架产生位置偏移。安装模架时应注意限位筋与台座上的钢筋位置线重合，从而保证底腹板筋位置正确，见图 2-10。

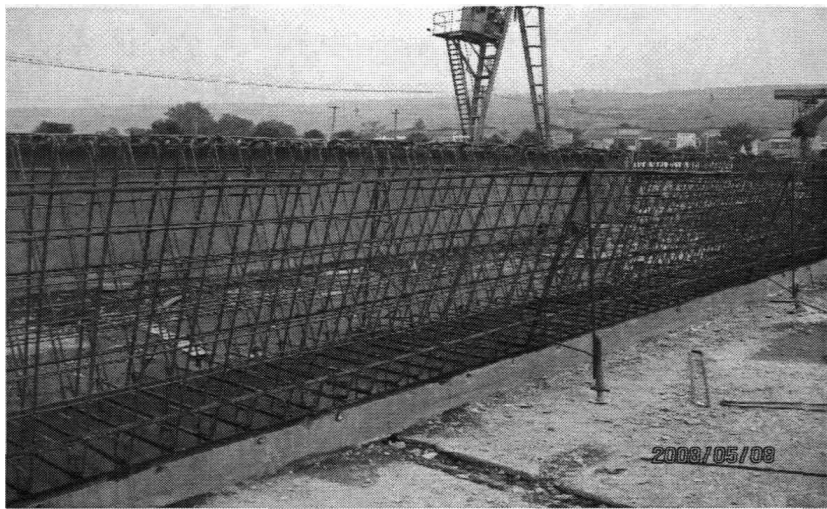


图 2-10 模架立体图

Fig.2-10 The picture of the Stereogram moldbase

2) 放置底板腹板钢筋骨架

腹板的箍筋间距为 10cm，中间普通区间距为 20 cm；腹板筋与底板箍筋事先焊成骨架，只需按模架上的限位筋位置放置即可。

3) 拼装、绑扎底板腹板钢筋

在钢筋的交叉点处应用铁丝按十字线绑扎结实，箍筋要与主筋或水平筋保持垂直，绑

扎时应确保围紧其主筋。箍筋转角与主筋的交点均要绑扎，主筋与箍筋非转角部分交点可用梅花式交错绑扎。在波纹管处的钢筋绑扎应特别注意：先在立好的腹板筋上定出波纹管的位置曲线和锚垫板张拉孔的位置，然后焊上定位钢筋，穿上波纹管后固定牢固。绑扎好的箱梁骨架要有足够的刚度和稳定性。钢筋绑扎见图 2-11。

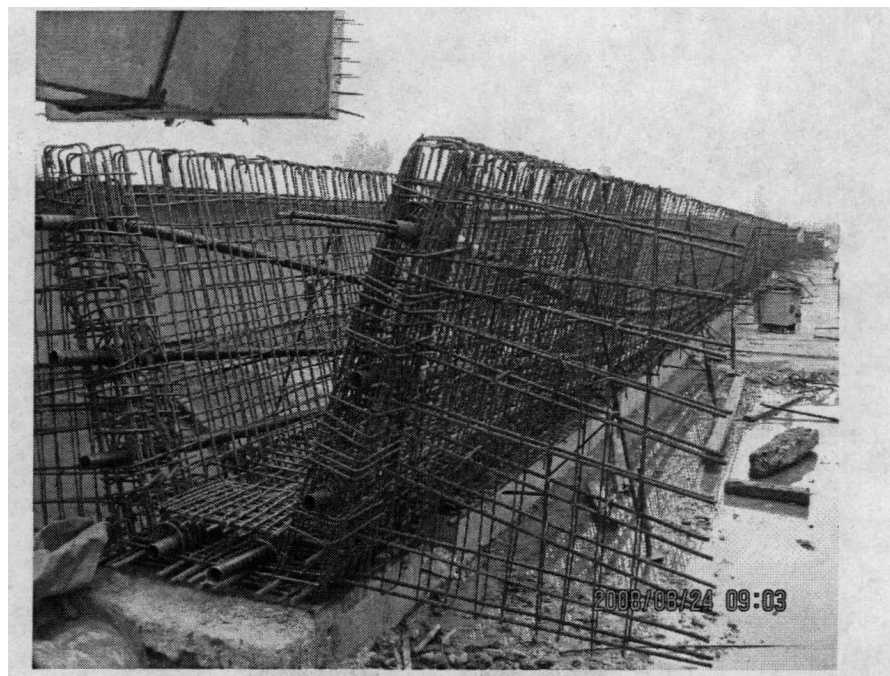


图 2-11 钢筋绑扎图

Fig.2-11 The picture of Steel banding

4) 放置箱梁外模

待底腹板钢筋绑扎完成后，方可拆除两侧钢筋模架。安装箱梁外模时应轻吊轻放，防止对钢筋骨架造成破坏，外模内壁应紧贴钢筋骨架，中间设置垫块，使保护层厚度达到设计要求。两端外模也应紧贴钢筋端头，防止形成素混凝土，引起开裂。

5) 吊装箱梁内模

吊装箱梁内模之前，应仔细检查箱梁腹板、底板以及两个端头的钢筋，查看钢筋之间间距是否合适，是否出现少筋、搭接长度不够、钢筋位置偏移等问题。如有问题，坚决不可放置内模，需改正后检查完毕方可放置内模。

2.3.4 拼装、绑扎顶板钢筋

钢筋安装有现场绑扎和骨架吊装两种方法。现场绑扎应按一定顺序，一般梁肋钢筋，先放箍筋，再装下排力筋，后装上排钢筋。柱的钢筋先立主筋，后扎箍筋。钢筋的交结点用铅丝绑扎，也可用点焊。骨架吊装是先将钢筋骨架焊接成型，用起重设备吊入模板，安装简单。钢筋安装必须按设计图纸进行，安装后经检验合格后方能浇筑混凝土。

钢筋在拼装、绑扎之前要严格检查钢筋种类是否符合设计要求；还要注意检查保护层是否符合要求，检查钢筋锈蚀情况，如果有就必须先除锈。顶板钢筋绑扎方法有很多，例如采用现场绑扎法，分为上下两层，两层面板之间需要用短钢筋焊接支撑，以防止浇筑混

凝土时面板钢筋遭受临时荷载时上层钢筋网被压下，与下层钢筋网接触。

在绑扎顶板钢筋时应注意筋与筋之间的间距。在下层钢筋与模板之间要设置与保护层厚度相等的垫块，垫块要与钢筋扎紧，并且互相错开，防止临时荷载时钢筋位置产生移动；注意检查梁主筋的焊接接头位置、搭接长度是否符合规范；根据不同类型结构，检查板底钢筋受力方向是否正确；绑扎过程中注意与其它专业工种的配合。

2.3.5 箱梁钢筋制作中需要注意的问题：

- 1) 箱梁腹板钢筋搭接处有时只绑扎一下，钢筋容易产生位移，个别搭接长度不够。
 - 2) 箱梁端口波纹管上的螺旋筋应该贴紧锚垫板，并且应该点焊在锚垫板上，否则张拉时，素混凝土容易产生开裂。
 - 3) 腹板箍筋或顶板钢筋绑扎未采用梅花绑法，绑扎不够规范。
 - 4) 中横隔板预埋钢板位置不易固定，出现移位现象。
- 所以为了保质保量的完成施工任务，在施工中应注意避免以上问题。

2.3.6 小结

钢筋应按钢筋型号、直径分别堆放。进场后依次抽样检验，合格品方能使用。钢筋进行加工时，首先必须对进场的钢筋进行检验，看看其规格是否有错误，并且进行力学常规试验，然后对钢筋进行除锈、调直、弯曲成型、焊接等工艺，使其达到工程建设中符合要求的材料。在钢筋绑扎过程中，保证钢筋绑扎的精度，注意调整合适的间距，加快进度，梁体钢筋的底、腹板筋具体的绑扎位置也要准确把握。箱梁钢筋绑扎，要严格控制预留钢筋的外露尺寸和位置，防止安装焊接的位置有误或搭接长度不足。通过本节的讲述，对钢筋加工方面的一些见解，希望可以解决工程中的相关问题。

2.4 混凝土施工

混凝土工程包括混凝土的制备、运输、浇筑和振捣、养护，混凝土强度检查，混凝土拆模及修补等过程。以下将针对混凝土施工的各部分进行重点研究。

2.4.1 混凝土的拌制及运输

1) 混凝土原材料

在混凝土原材料的选择上，要重点对碎石进行考察。碎石粒径过大会造成腹板下料困难，在波纹管下方易形成空洞；碎石粒径过小则混凝土强度增长会很慢，占用台座时间过长影响施工进度。混凝土使用的原材料包括：

①水泥；②中砂；③碎石；④水；⑤外加剂。

2) 混凝土配合比

考虑到箱梁混凝土体积比较大,浇筑时间长,尤其在高温季节,应避免先浇筑的混凝土已初凝,而后面的混凝土还在继续浇筑振捣。混凝土的初凝时间应大体与浇筑时间相等,为此本工程混凝土经试验优化选择的配合比,在试验室状态下初凝时间约为 6h 40min,终凝时间约为 7h 35min。混凝土的浇筑时间宜控制在 7h 以内。混凝土配合比设计强度为 C50,设计水胶比为 0.27,设计坍落度为 14~16cm,采用掺入粉煤灰和高效减水剂技术。

3) 混凝土的搅拌

混凝土的拌制由工地的拌制站负责,由拌和站集中拌和并准确控制水灰比以及用水量,为提高混凝土强度及增加混凝土和易性,应掺入外加剂。每小时生产混凝土 20m^3 ,全部由电脑自动计量供料。严格控制混凝土的搅拌时间,拌和时间不少于 2min,拌和物应均匀,颜色一致,不得有离析、泌水现象,所以应严格按照配合比施工,经常测试混凝土,坍落度一般控制在 12~16cm 为宜,坍落度太大,强度不易保证,并且很难消除表面气泡、砂线等缺陷;因钢筋密集,若坍落度太小很难保证振捣密实。混凝土的入模温度不大于 30°C 。

4) 混凝土的运输

混凝土应以最少的转运次数,最短的距离迅速地从拌制地点运往浇筑地点,混凝土运输时间不宜超过规范允许值。避免发生离析、泌水和灰浆流失现象,坍落度前后相差不得超过 30%。否则应进行二次拌制,二次搅拌时不得任意加水,确有必要时,可同时加水 and 水泥以保持其原水灰比不变。如果二次搅拌仍不符和要求,则不得使用。为此本工程配备 2 台 3m^3 混凝土运输车进行混凝土的运输。

2.4.2 混凝土浇筑与振捣

为了保证浇筑混凝土的整体性,防止在浇筑上层混凝土时破坏下层混凝土,需使次一层的浇筑能在先浇筑的一层混凝土初凝以前完成,同时整片箱梁混凝土的浇筑时间宜控制在 7h 以内。如果所预制箱梁主要集中在 7~9 月份,为了避免高温炎热,混凝土施工全部选择在夜间进行。

1) 混凝土的浇筑顺序

混凝土拌和好后,用混凝土运输罐车运到待浇梁处,混凝土入模采用场内龙门吊灰斗浇筑的方法。混凝土入模前要保证混凝土不发生离析现象。预制箱梁混凝土浇筑可采取连续浇筑,浇筑时采用斜向分段、水平分层的方法。每段长 15m 左右,由从梁的一端循序渐进到另一端,浇筑的顺序按照先底板、腹板再浇筑顶板。同断面浇筑顺序为底板、腹板、顶板分段循序推进。首先浇筑第一个 15m 的底板、腹板,完成后返回再浇筑顶板。依次类推浇筑第二个 15m,见图 2-12 所示。

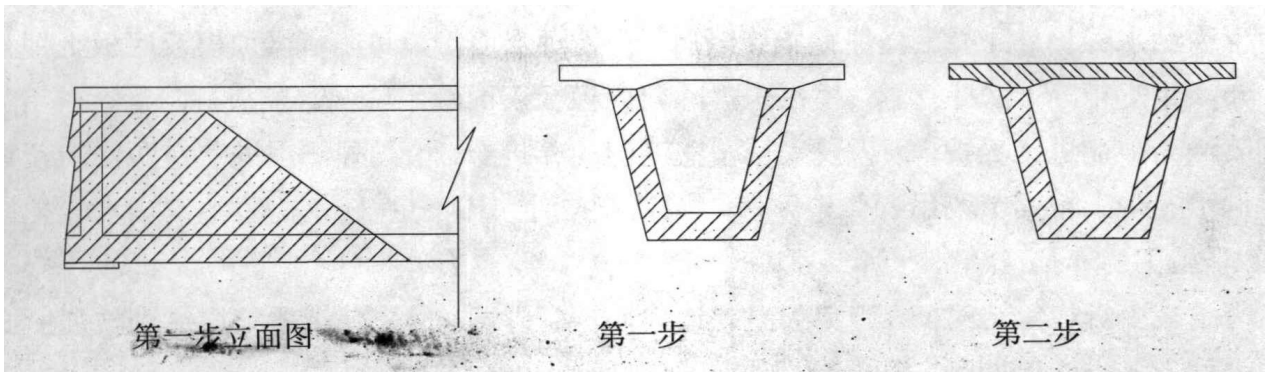


图 2-12 混凝土浇筑顺序
Fig. 2-12 Concrete pouring sequence

2) 混凝土的浇筑与振捣

底板浇筑：从腹板两侧处对称下灰浇筑底板，人工摊开，注意底板混凝土浇筑量要充满底板，且振捣到位又充分，确保与腹板混凝土结合面没有松散现象，安排混凝土收面人员随即收面，收面时要细心，不能使收面后混凝土面高于内模底板，以防拆除内模时造成困难。振捣以插入式振捣器为主。

腹板浇筑：混凝土均匀地倒入腹板中，在两侧腹板对称下料，同时振捣，以防振捣时内模向另一侧位移导致腹板混凝土厚度不均。混凝土的振捣为机械振捣，振捣采用 4 个插入式振动器，1 个负责底板，3 个负责腹板及顶板混凝土的振捣。底板用 30mm 插入式振动器，考虑到腹板本身很薄再加上钢筋和设置的三层波纹管，波纹管之间以及波纹管和钢筋、模板之间的缝隙很窄，这给混凝土浇筑时施工振捣带来一定困难，故腹板以 30mm 插入式振动器振捣为主，50mm 振动器为辅相互结合的方法。腹板混凝土下料时采用两侧各 50mm 振捣棒配合送料。50mm 振捣棒振捣波纹管以上部分，30mm 振捣棒振捣波纹管以下部分，振捣时间控制在 15~20s 为宜。振捣时要注意观察底板翻浆情况，根据底板翻浆情况适当调整振捣时间，以保证混凝土的密实。振捣时应避免振捣器碰撞波纹管和预埋件等。锚垫板后的螺旋筋部分由于钢筋比较密集，故要特别注意。如果振捣不到位，混凝土在施加预应力后容易开裂甚至塌陷。

顶板浇筑：腹板浇筑完成后，浇筑顶板混凝土，安排混凝土收面人员随即收面。混凝土浇筑完毕收浆前，要抹压一遍，收浆后再抹压 1~2 遍，以防收缩裂纹的产生，并在第二次收浆时对梁顶混凝土进行拉毛处理。顶板混凝土采用的插入式振捣棒和附着式振捣器进行振捣，插入式振动棒主要负责混凝土振捣密实，附着式振捣器主要负责混凝土振捣均匀并保证外观质量。

2.4.3 混凝土的养护

混凝土浇注完成初凝后，应及时进行养护，养护方法要适应施工季节的变化。

1) 一般情况下的养护

一般情况下采用洒水养护，使混凝土表面的潮湿状态保持在 7d 以上，夏天气温高时，

夜间也需洒水养护。混凝土浇注完毕终凝后,开始洒水养护,并在箱梁顶板及底板上覆盖养护布,并使养护布保持潮湿,模板未拆除前向模板表面洒水降温。模板拆除后,在箱梁内侧喷洒养护剂进行养护,顶板及底板覆盖潮湿的养护布,箱梁外侧用安装在两侧的喷头进行洒水养护。箱梁节段吊入修整区后,如果养护时间还不足 7 d,需要继续洒水养护。

2) 冬季施工的养护

为了减少拆模等待时间,避免因温差过大而产生裂缝,尽快使箱梁节段达到抗裂所必需的强度,冬季施工期间,箱梁节段采用蒸汽养护。

蒸汽养护实施前,先安装蒸养锅炉,埋设供气管线,安装蒸养罩。为了能同时兼顾冬季混凝土搅拌用水的加热,锅炉布置在混凝土生产区内;供气主管采用 $\Phi 100$ 的镀锌钢管埋置于地面以下,钢管还要裹上保温材料,在每个台座处均有 1 个露出地面的管接口,需要养护时,只需按要求接出即可;蒸养罩采用活动式的,可沿台座两侧移动。

蒸汽养护按静养、升温、恒温、降温 4 个阶段进行控制。

静养阶段:静养阶段为混凝土浇注完成后至供汽升温之前的一段时间。冬季严寒天气,应在中午浇注混凝土并及时盖好蓬布,充汽保温在 5°C 以上,静养时间为 3~4 h。

升温阶段:以静养气温为起点,供气温度速度按规范规定控制在 $15^{\circ}\text{C}/\text{h}$,不宜过快,升温过程应每隔 30 min 测试一次蒸汽温度和相对湿度(相对湿度不宜小于 90%),并做好原始记录。

恒温阶段:恒温温度不宜大于 50°C ,相对湿度不小于 95%,每隔 1 h 测试一次并做好原始记录,恒温养护时间根据构件脱模强度要求、混凝土配合比情况以及环境条件等通过试验确定。

降温阶段:降温速度按规范要求,以控制在 $10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 为宜。

在拆除蒸养罩时,不能立即将蒸养罩打开,避免因温差过大而造成混凝土表面出现收缩裂纹,应先将蒸养罩两端打开进行箱室内通风,使梁体表面温度缓慢地降至与自然温度的温差小于 15°C 后,拆除蒸养罩,并对箱梁表面及内腔进行覆盖。

混凝土养护时,对为预应力钢束留的孔道应加以保护,严禁将水和其他物质灌入孔道,以防止金属管生锈。

2.4.4 混凝土质量控制注意事项

1) 严格控制混凝土原材料质量,即水泥、砂、石、水、外加剂的各项指标均须符合规范要求,否则不准使用。

2) 混凝土原材料计量控制在误差允许范围内,随时测定骨料的含水率以便调整用水量和材料用量。

3) 严格控制水灰比,使坍落度控制在规定范围内。

4) 浇筑混凝土前需将模板内的污物洗、吹干净,但表面不得有积水。注意预留通气孔、泄水洞(外边缘)、吊梁孔、伸缩缝预留槽等。

5) 混凝土浇筑应连续施工, 避免间断时间过长, 拌和后超过 45min 以后的混凝土不得使用。在浇筑混凝土前对吊车、混凝土运输车、水泵、搅拌站等机械都要进行检查, 零部件要有备用的, 以便修理人员对突发机械、机具进行维修。

6) 混凝土浇筑时, 特别注意混凝土振捣工作尤其注意锚垫板和波纹管处, 以防止漏振或振捣不实, 造成外观缺陷, 或内部存在气泡、空洞, 影响混凝土的质量。同时不过振, 以免造成混凝土离析。

7) 筑混凝土过程中要经常抽拔波纹管内的钢绞线或硬塑料管, 以防堵管。

8) 混凝土浇筑时, 派专人负责检查模板的加固以及定位钢筋和压块固定情况, 防止内模上浮和偏位, 并检查是否有漏浆现象, 并及时采取措施处理。

9) 边梁浇筑混凝土时, 翼板的顶面尽量避免水泥浆溅在模板上, 影响混凝土的质量和美观。

10) 混凝土浇筑成型后及时养护, 暴露的混凝土覆盖养护, 保持湿润, 以促进混凝土强度的增长, 养护时间不少于 7d。

11) 加强混凝土试块的制作及管理, 保证准确真实反映相应结构混凝土的强度, 在浇筑混凝土时, 按规定要求数量、频率取样试块, 并养护到龄期, 检测其抗压强度, 作为梁体强度评定及张拉依据。

2.4.5 拆模

拆模时混凝土抗压体强度未达到 15~20MPa 时, 不得拆除模板。内模在拼装时应注意预留人孔模板, 当混凝土达到所规定的拆模强度时即可拆除内模, 内模拆除完成后将人孔处的钢筋进行补强焊接, 再进行混凝土补强; 拆外模时, 首先拆除端头模板及端头板模板, 然后松对拉螺杆和两边支撑, 拆除两边侧模, 因为模板属大面, 小厚度结构, 侧向刚度不大, 所以应注意拆除。

2.4.6 箱梁的常见问题、原因及解决方法

(1) 气孔

表现特征: 分散、单独, 小于 10mm 的气孔。

产生原因: 1) 骨料级配不合理, 粗集料过多, 细粒料偏少; 2) 骨料大小不当, 针片状颗粒含量较多; 3) 用水量较大, 水灰比较高的混凝土; 4) 振捣不充分; 5) 使用表面刷油的钢模板。

解决办法: 1) 把好材料关。严格控制骨料大小和针片颗粒含量, 备料时要认真筛选, 剔除不合格材料; 2) 选择合理级配, 使粗集料和细粒料比率适中; 3) 选择适当的水灰比; 4) 高度重视混凝土的振捣; 5) 确保模板坚硬, 涂抹适当厚度的脱模剂。

(2) 塑性开裂

表现特征：裂纹，通常不延续，多发生在顶面。

产生的原因：1) 温缩是混凝土开裂的重要原因；2) 早期干缩是混凝土产生裂纹的又一重要原因；3) 混凝土硬化之前沉降也会造成开裂；4) 基层不平整也会造成混凝土的开裂；5) 单位用水量过大，水泥用量过大都可能导致混凝土开裂。

解决办法：1) 严格控制水灰比，减少混凝土拌和物中的含水量；2) 选用适合的水泥，合格的沙石料并准确掌握配合比；3) 加强养护，混凝土收面后，可以采用喷雾养护，以增加空气湿度和补充混凝土过早蒸发的水份。在混凝土终凝后立即覆盖草袋（或沙、土工布）并充分洒水养护，以保证混凝土强度的正常增长，防止因失水过快而产生干缩裂纹。

（3）蜂窝麻面

表现特征：露石和粗糙表面。

产生原因：1) 混凝土一次下料过多，振捣不实或下料与振捣配合不好，因漏振造成蜂窝；2) 混凝土流动性差，造成混凝土不易到达边角等特殊部位；3) 混凝土水灰比偏大，在混凝土振捣完后，表面滞留较多的液态水，拆模后水分蒸发；4) 混凝土所含气体，在震动器振捣过程中被驱逐到混凝土和模板之间，或在气泡水膜张力作用下依附于模板表面，排除困难，而后形成气泡麻面；5) 箱梁腹板薄，钢筋密集且有多层波纹管通过，振捣棒有许多部位无法插入，尤其波纹管下面；6) 模板安装时接缝不严密，尤其侧模下部，造成漏浆所致。

解决办法：1) 检查水泥和沙子的配合比；2) 检查粗集料的级配；3) 充分拌和、精心浇筑、充分振捣；4) 模具拼装密封无缝，拼缝过大时宜采用密封条锁紧。

（4）箱梁拆模后在腹板与底板承托部位出现空洞、蜂窝、麻面

表现特征：露石和粗糙表面。

产生原因：1) 箱梁腹板较高，厚度较薄，在底板与腹板连接部位钢筋密，又布置有预应力筋使得腹板混凝土浇筑时不易振实，也有漏振情况，造成蜂窝；2) 浇筑混凝土时，若气温较高，混凝土塌落度小，模板湿水不够，局部钢筋太密，振捣困难，使混凝土出现蜂窝，不密实；3) 箱梁混凝土浇筑量大，若供料不及时，易造成混凝土振捣困难，出现松散或冷缝；4) 模板支撑不牢固，接缝不密贴，发生漏浆、跑模、使混凝土产生蜂窝、麻面；4) 施工人员操作不熟练，振捣范围分工不明确，未能严格做到对相临部位交叉振捣，从而发生漏振情况，使混凝土出现松散、蜂窝。

解决办法：1) 箱梁混凝土浇筑前做好合理组织分工，对操作人员进行技术交底，划分振捣范围，浇筑层次清除，相互重复振捣长度取 50cm 左右；2) 合理组织混凝土供料，现场须有临时备用搅拌设备，以便当混凝土因运输或其它原因带来供料中断时予以临时供料；3) 根据气温，合理调整混凝土塌落度和水灰比，当气温高，做好模板湿润工作；4) 对箱梁底板与腹板承托处及横隔板预留人孔处，重点进行监护，确保混凝土浇筑质量。

（5）失准（错台）

表现特征：凸出、成波形或其他种类与原设计不符的情况。

产生的原因：1) 模板安装不准确；2) 浇筑时，在荷载作用下或由于模板含水量发生变化而造成变形。

解决办法：1) 检测模板是否顺直；2) 检查是否有足够的模板固定夹具，模板加固是否稳定可靠；3) 检测浇筑频率和混凝土数量，避免超过模板设计的承载力；4) 混凝土拌和均匀，拌和好的混合物及时使用，均匀振捣；5) 模具拼装密封无缝，拼缝过大时宜采用密封条锁紧。

(6) 掉落（掉角）

表现特征：硬化的混凝土掉落。

产生的原因：1) 拆模过早。提前拆模时，施工中不小心而使模板与混凝土结构发生碰撞，极易产生掉落；2) 混凝土本身的强度过低，不能承受碰撞；3) 集料不符合要求，易碎；4) 模板表面粗糙，脱模剂涂抹不匀，混凝土与模板粘附在一起，拆模时造成脱皮。

解决办法：1) 检查混凝土强度是否达到拆模强度；2) 延长拆模时间，特别是在较冷的天气；3) 检查模板的设计，清理和涂抹脱模剂的情况。

(7) 露筋

表现特征：钢筋露出混凝土表面。

产生原因：1) 钢筋位置和保护层厚度不准确；2) 钢筋密集时，没有选配适当的石子承垫；3) 振捣棒撞击钢筋致使钢筋移位；4) 没有正确掌握拆模时间，过早拆模；5) 施工时踩踏钢筋过猛，致使保护层厚度不够。

解决方法：1) 浇筑混凝土前，认真检查钢筋位置及保护层厚度；2) 固定好垫块以保证混凝土保护层厚度；3) 严禁利用钢筋振动进行振捣；4) 正确掌握拆模时间；5) 施工时人员避免过于集中。

(8) 集料透露

表现特征：大小相近的深色斑点并呈粗集料状。

产生的原因：在模板面与粗骨料之间的接触处由于振捣而造成细集料及其结合水的离析。

解决办法：1) 模板加固要好，减少模板的晃动；2) 增加含沙率；3) 使用相同连续级配的集料；4) 使用插入式振捣器。

(9) 污染（变色）

表现特征：混凝土表面呈现与混合料组成材料无关的变色；混凝土表面呈奶黄色或棕色；有时露沙。

产生的原因：1) 受钢筋或绑扎接头污染；2) 受模板面上或脱模剂中的颜色或污物污染；3) 脱模剂的污染；4) 钢模板表面未清理干净，在钢模板表面有浮锈（呈黄色）时直接刷脱模剂。

解决办法：1) 确保模板上没有污染混凝土的物质；2) 确保脱模剂纯净，防止已涂脱模剂的模板受污染；3) 不要抹过多的脱模剂，在混凝土浇筑前一天抹脱模剂。

(10) 水波纹

表现特征：混凝土表面出现形成的水泥石颜色较深，形成的形状似水波纹状。

产生原因：主要是由于混凝土拌和过程中，水灰比未控制好，水量过大，引起坍落度过大，浇筑时经振捣后混凝土离析，水泥稀浆浮到混凝土的表面，水泥含量较多，终凝后在混凝土表面出现形成的水泥石颜色较深，形成的形状似水波纹状，此外混凝土分层浇筑时，由于振捣上层混凝土时振动棒没有深入到下层足够的深度，往往也会引起出现水波纹现象。

解决方法：1) 施工前必须做好施工配合比，确定好水灰比及砂、石含水量，混凝土拌和过程中必须严格控制坍落度，对坍落度不符合要求的混凝土必须倒掉重新拌和，严禁不合格的混凝土入模；2) 混凝土振捣时必须将振动棒透入到下层一定的深度，且振捣时必须控制每一棒的振捣时间，时间为 3~5s，振捣时间不能过长，过长将会引起混凝土的离析。

(11) 鱼鳞纹

表现特征：混凝土表面形成的形状似鱼鳞纹状。

产生原因：主要由于新拌和混凝土离析或放置时间过长造成泌水，形成水膜及水泥稀浆挤占骨料间空隙，并分散、包裹于骨料表面，水份迁移形成水膜痕迹及浅表层多孔低强度的硬化水泥石，低强度硬化水泥石在拆模时易与模板粘连、脱落，从而形成表面粗糙，色差等鱼鳞纹。当混凝土过振形成离析时，石料挤压形成一部分骨料少，一部分骨料多，外观颜色不一形成色差，骨料多的地方外观便形成鱼鳞纹。另外，当芯模反压固定及芯模底部未封闭，浇筑时芯模上浮，混凝土出现塑性变形并向下滑移，也将会出现在表面出现鱼鳞纹。

解决方法：1) 控制混凝土离析及放置时间过长，控制骨料的粒径及骨料级配，碎石应为 5~25mm 之间的连续级配，做理论配合比时应适当增加砂率，浇筑时应尽量不让混凝土等待时间过长，运输过程中应尽量减少翻运次数，这样便可控制混凝土的泌水；2) 对芯模要一次性的固定好，防止上浮；3) 分段浇筑后，封闭芯模底模，限制混凝土从芯模底板处上翻；4) 采用二次振捣，先用 50 型棒，间隔一定距离后，再用 30 型棒进行二次补振，振动棒振捣间距要均匀，时间要大致相等，不能间距时大时小，时间时长时短，这样便可控制混凝土不离析、不漏振、不过振。

2.4.7 混凝土表面缺陷的修补

(1) 调配颜色

多数修补工作的失败是由于未能使用同周围混凝土表面相同配合比的材料而造成的。即使是使用了与原混凝土相同的配合比，也很难保证修整部分的颜色与原混凝土颜色一致。为了弥补这一缺陷，通常修补所用的混合料有以下几种配比（具体最优的配比只有通过现场调试得出）：①白色波特兰水泥+粉煤灰+水；②白色波特兰水泥+粉煤灰+沙+水；

③白色波特兰水泥+普通水泥+沙+水；④白色波特兰水泥+沙+水；⑤普通水泥+沙+水。以上五种配合比为保证修补材料和原混凝土的结合都可以考虑加胶。

(2) 控制吸水

用水泥材料进行修补时，不能在干燥的混凝土表面上进行，这是因为干面会吸取用于修补的沙浆中的水份，从而降低新材料与原混凝土表面的粘结，也会降低修补材料的质量和耐久性。修整的表面首先要浸湿，最好的做法是充分湿润表面，在表面还有点潮湿的时候进行修补效果较佳。

(3) 打磨

对于漏浆造成的挂帘和模板安装不稳造成的失准（混凝土表面凸起），可以直接使用角磨机（金刚磨盘）在混凝土表面打磨。

(4) 气孔的修饰

1) 把需要修补的部分用水湿润。

2) 用钹刀将调好的沙浆压入气孔，同时刮掉多余的沙浆。

3) 注意养护，待修补的沙浆达到一定强度后，使用角磨机打磨一遍。对于要求较高的地方可用沙纸进行打磨。

(5) 破碎边角的修整

对于因意外碰撞或拆模不小心造成的边角破碎，在修补时应先把边角修整成四边形，洒水湿润后使用沙浆进行修补。在修补前应调试混合料的颜色，争取修补后的混凝土与原混凝土颜色一致。

(6) 蜂窝麻面的修饰

1) 把松散的混凝土清除，直到露出坚硬的混凝土。

2) 把四周修整成四方形，凿除的深度大致一样。

3) 把需要修补的部分洒水使其充分湿润。

4) 根据凿除的深度决定使用沙浆或细石混凝土，将沙浆（或细石混凝土）压入。

5) 洒水养护。

(7) 露筋的修整

将外露钢筋上的混凝土残渣和铁锈清理干净，用水湿润，再用 1:2 或 1:2.5 水泥砂浆抹压平整；如露筋较深，将薄弱混凝土剔除，冲刷干净湿润，用高一级的细石混凝土捣实，认真养护。

2.4.8 小结

本节对混凝土的施工工艺进行了革新研究。总结出连续箱梁采用单箱单室型，斜向分段、水平分层混凝土浇筑的方法。混凝土浇注完成初凝后，应及时进行养护，养护方法要适应根据施工季节的不同进行相应的变化。

混凝土是现代工程结构的主要材料，我国每年混凝土用量约 10 亿 m^3 ，钢筋用量约

2500 万吨，规模之大，耗资之巨，居世界前列。可以预见，钢筋混凝土仍将是我国在今后相当长时期内的一种重要的工程结构材料，物质是基础，材料的发展，必将对钢筋混凝土结构的设计方法、施工技术、试验技术以至维护管理起着决定性的作用。

混凝土施工是桥梁工程施工的一个非常重要的环节，对这一部分工程的操作流程管理、材料机械的选择配置以及安全质量的把握都对整个施工起着关键性影响，因此对于混凝土工程施工，我们应在未来的时间里不断研究与探索，使我们整个施工过程有一个更大的发展。

2.5 预应力施工

目前国内最长的预应力桥的梁长已达到 190m，面对这么大的跨度，如何降低张拉应力损失，成为实际施工中的技术难点。为了解决这个难题，我们在桥梁的施工中对传统的预应力筋张拉方法进行了改进，如通过采用塑料波纹管减少张拉过程的摩阻损失：通过两端同时对称张拉和超张拉减少应力损失，通过改善搅拌工艺和灌浆配合比，增加灌浆的密实性，从而有效地保护钢绞线和混凝土的共同作用，通过采用机械穿束解决了一束长达 200 多 m、净重达 2.8t 的钢绞线的穿束问题，并经过一系列的工程实践，不断地总结完善，最终形成了自己的一套施工工法。

2.5.1 制孔

后张法预应力混凝土结构的预应力钢筋都是在混凝土浇筑凝固之后才穿筋张拉和锚固的。在浇筑混凝土时需采取措施，按设计的钢筋位置，在构件内预先设置孔道，供日后穿筋之用。

制孔的方法可分为抽拔式和埋置式两大类。

抽拔式制孔是在构件内预定的钢筋位置设置一根在混凝土浇筑后可以抽拔出来，并具有一定刚性的管子。待浇筑的混凝土已经开始凝结，但尚未结硬之际，将此管子抽拔出来。这种制孔方法的优点是制孔的管子可以多次重复使用，比较经济；管道壁上没有“隔离层”，管道内压注的水泥浆与构件混凝土结合较好，水泥浆中多余的水分能渗排出去，在北方严寒地区不会发生冻裂构件的事故。缺点是不易形成多向弯曲、形状复杂的管道；管子长度和强度有限不易制作直径较大和长度较长的管道；如抽拔时间掌握不好会发生拔断、拔不出制孔用管或发生管道塌孔等质量事故；钢筋直接与较毛糙的混凝土管壁接触，管道摩阻力较大。当混凝土不够密实或管道较密实时易发生串浆事故。

直线形孔道通常用钢管来制孔。钢管放入模板前，在管子的外表面先涂刷润滑油剂，以减少混凝土的粘着影响，便于抽拔。浇注混凝土后要不时转动管子，以防管子被混凝土粘住，亦可使管道壁较为光洁，易于抽拔。

曲线形孔道需用柔性的制孔管子。目前国内常用的是一种含有多层帘子线网的厚壁橡胶圆管，管子的外径视配用锚定体系的不同，在 40-70mm 之间。使用时将它安放在规定的位置，用定位筋定位，并用铅丝适当固定（铅丝不能绞紧嵌入管壁）。为防止管道局部弯曲变形，常在管道孔内穿一直径 20mm 左右的钢筋，以增大它的刚度。亦有在管道两端设置阀门，预先在管子内充水，使胶带直径增大约 3mm，关闭阀门，将此胀粗了的管子入模。在抽拔前先开启阀门，使管内失压，管径回缩到原来的外径，与混凝土孔壁脱开，就易于抽拔了。但使用多次后的胶管弹性较差，不易胀缩，充水加压的效果就不明显了。

埋置式制孔是在构件内预定的钢筋位置设置一根空心的管道，使在浇筑混凝土时，在构建中形成一个孔道，便于以后穿筋。对有些锚定体系，如我国在五十年代曾经用过的考罗夫金式锚定体系就把预应力钢丝束和套筒同时放入，再浇混凝土。对集束式强大钢丝束锚定体系，这个管道又可根据需要做成矩形等截面形式，如莱昂哈特式锚定体系。这种制孔方法的优点是可以制作成任意形状的管道；由于它通常用薄铁皮制作，故管道的摩阻力亦小；封闭的管道断面不易发生漏浆或阻塞现象；管道的位置亦较正确。缺点是管道是一次性使用，成本较高，管道内水泥砂浆多余的水分不易排出，影响管道的密实性和抗冻性。在预应力钢筋外面涂上一层隔离油脂及塑料等材料，再把它们一并扎入骨架，浇筑混凝土。使钢筋不与混凝土粘结。张拉、锚定形成无粘结预应力钢筋体系。这些塑料套管等材料也是一次性使用，在本质上与埋置管是一样的。

2.5.2 钢绞线的加工

钢绞线下料前将场地整平，铺好木板。不得将钢绞线直接接触土地以免生锈，也不得在混凝土地面上生拉硬拽磨伤钢绞线。因此，钢绞线的表面应无裂纹、毛刺、机械损伤、氧化铁及油污等有损钢绞线性能的物质。

钢绞线下料长度按给定的长度下料，采用砂轮切割机切割。钢绞线盘弹力大，为防止在下料过程中钢绞线紊乱并弹出伤人，事先应制作一个简易铁笼，下料时将钢绞线盘放入铁笼内扣住，从盘卷中央逐步抽出绞线，确保安全。

穿束方法采用人工穿束，波纹管按设计长度连接后，将钢束放在平台上，用人工抬起，将钢束穿入波纹管内。为减小摩阻力，束前端装有特制钢套，可防散头，见图 3-15。

钢束穿好后仔细检查波纹管在穿束过程中是否有钢丝划破的小口，钢丝接口是否有松开现象，连接套管处是否有脱开等情况，如发生以上情况及时用塑料胶带缠裹严密，以防漏浆堵管。

2.5.3 预应力连续箱梁的张拉

(1) 预应力设备选用及标定

预应力设备中的压力表应与张拉千斤顶配套使用，不得混用，并要成套标定张拉机具在进场时应进行配套检查和校验，以确定张拉力与压力表读数之间的关系曲线。标定有效

期为 3 个月且不超过 200 次张拉作业, 拆修更换配件的张拉千斤顶必须重新校正。压力表应选用防震型, 表面最大读数应为张拉力的 1.5 至 2.0 倍, 精度不低于 1.0 级, 校验精度不得低于 $\pm 2\%$ 。检验时, 千斤顶活塞的运行方向应与实际张拉工作状态相一致。锚具为经检验合格的 OVM 型锚具 (锚垫板、锚环、夹片、弹簧筋), 表面无砂眼、裂纹和小坑现象, 尺寸不超标。

(2) 千斤顶的定位安装

- 1) 在工作锚上套上相应的限位板, 根据钢绞线直径大小确定限位尺寸。
- 2) 装上张拉千斤顶, 使之与高压油泵相连接。
- 3) 装上可重复使用的工具锚板。
- 4) 装上工具夹片 (夹片表面涂上退锚灵)。

(3) 预应力张拉程序

当梁体混凝土强度达到设计强度的 90% 后, 即可进行张拉。张拉时的强度要求以现场同条件养护混凝土试块的试压报告为准。

箱梁两侧腹板宜对称张拉, 张拉同束钢绞线应由两端对称同步进行, 且按设计规定的编号及张拉顺序张拉。

张拉程序为: $0 \rightarrow$ 初应力 $\rightarrow 10\% \sigma_{con}$ (持荷 2min 锚固)。张拉时的控制应力 (包括预应力损失在内), 其值根据设计图纸要求而定, 初应力取 $10\% \sigma_{con}$ 张拉控制采用张拉应力和伸长值双控, 以张拉应力控制为主, 以伸长值进行校核, 当实际伸长值与理论伸长值差超过 6% 时, 应停止张拉, 等查明原因并采取措施后再进行施工。

(4) 预应力理论和实际伸长量的计算

后张法预应力筋理论伸长值及预应力筋平均张拉力的计算如公式 (2-1)、(2-2) 所示, 伸长量计算表见表 2-2 所示:

$$\Delta L = \frac{P_p \cdot L}{A_p \cdot E_p} \quad (2-1)$$

式中: ΔL —— 预应力钢筋计算伸长值, m;

P_p —— 预应力钢筋平均张拉力, N;

L —— 预应力钢筋在孔道中的长度, m;

A_p —— 预应力钢筋的截面面积, mm^2 ;

E_p —— 预应力钢筋弹性模量, MPa。

$$\text{其中 } P_p = P \cdot \frac{[1 - e^{-(K \cdot X + \mu \theta)}]}{KX + \mu \theta} \quad (2-2)$$

式中: P —— 预应力钢材张拉端的张拉力, N;

X —— 从张拉端至计算截面积的孔道长度在构件纵轴上的投影长度, m;

θ —— 从张拉至计算截面曲线孔道部分切线的夹角之和, rad;

K ——孔道每 m 局部偏差对摩擦的影响系数, 见《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-2000);

μ ——预应力钢筋与孔道壁的摩擦系数, 见《公路桥涵施工技术规范》(JTJ041-2000)。

材料进场后, 经实验测得相关数据, 分别利用公式 (2-1)、(2-2) 计算得各钢绞线的伸长值。

表 2-2 伸长量计算表

Tab.2-2 The table of the elongation calculation

钢束号	P	K	X	μ	α	$\alpha/180 \times \pi$	$KX + \mu\theta$	$e^{-(K \cdot X + \mu\theta)}$	L	ΔL
1	195300	0.0015	14.8425	0.225	4	0.069813	0.03797171	0.962740174	29.685	0.207
2	195300	0.0015	14.8205	0.225	7	0.122713	0.04971969	0.951496106	29.641	0.206
3	195300	0.0015	14.788	0.225	15	0.261799	0.08108686	0.922113592	29.576	0.202
4	195300	0.0015	14.831	0.225	9	0.15708	0.05758942	0.944037474	29.662	0.205

(5) 实际伸长量的测量

伸长量应从初应力时开始量测。实际伸长值除张拉时量测的伸长值外, 还应加上初应力时的推算伸长量, 对于后张法混凝土结构在张拉过程中产生的弹性压缩量一般可省略。实际伸长值的量测采用量测千斤顶油缸行程数值的方法。

(6) 预应力张拉的其它要求

张拉钢绞线之前, 对梁体作全面检查, 如有缺陷修补完好且达到设计强度, 并将承压垫板及锚下管道扩大部分的残余灰浆铲除干净, 否则不得进行张拉。

多余钢绞线使用切割器在距锚具 30mm 以外的位置切割, 严禁采用氧气乙炔火焰进行切割。

张拉锚固后应及时灌浆, 一般在应 48h 内完成, 如因特殊情况不能及时灌浆, 则应采取相应的保护措施, 保证锚固装置及钢绞线不被锈蚀。

高压油泵有不正常情况时, 应立即停止作业并进行检查, 严禁在千斤顶工作时, 拆卸液压系统的部件和敲打千斤顶。

张拉钢绞线时, 必须两边同时给千斤顶主油缸徐徐充油张拉, 加载、卸载要平稳缓慢; 两端伸长基本保持一致, 同步张拉, 严禁一端张拉。张拉时, 应有专人负责及时填写张拉记录。

2.5.4 端头钢绞线切割

张拉完毕, 卸下千斤顶及工具锚后, 要检查工具锚处每根钢绞线的刻痕是否平齐, 若不平齐说明有滑束现象, 如遇有这种情况要对滑束进行补拉, 使其达到控制应力。

张拉施工完成后,切除外露的钢绞线(钢绞线外露量不小于 30mm),进行封锚。封锚采用无收缩水泥砂浆封锚,封锚时必须将锚下垫板及夹片、外露钢绞线全部包裹,封锚后应尽快压浆。清理锚下垫板上的灌浆孔,保证压浆通道畅通。

2.5.5 箱梁压浆

(1) 压浆配合比

水泥:膨胀剂:减水剂:水=1:0.10:0.011:0.35。水泥生产厂家是冀东水泥,水泥品种强度等级 P.O42.5R,外加剂生产厂家是关中化工。压浆前认真对排气孔、注浆孔等全面检查,并对压浆设备进行安装检查。

(2) 压浆设备

压浆机采用活塞式压浆泵,压浆泵要同水泥浆搅拌机相连接并不停搅拌,防止水泥浆凝固。压浆泵最大压力宜为 0.5~0.7MPa,每一个孔道应达到另一端饱满和出浆,并应达到排气孔排出与规定稠度相同的水泥浆为止。为保证管道中充满灰浆,将出浆口塞住,水泥浆稠度宜控制在 12~17s 之间,天气温度高时取上限,反之取下限。对需要封锚的锚具,压浆后应先将其周围用压力水冲洗干净,并对梁端混凝土凿毛,然后按设计布设钢筋网浇筑封锚砼。但要严格控制封锚后的梁体长度。对于外露的锚具,应用高标号砂浆抹上,防止锈蚀。压浆时,对曲线孔道和竖向孔道应从最低点的压浆孔压入,由最高点的排气孔排气和泌水。压浆顺序应先压注下层孔道。压浆应缓慢、均匀地进行,不得中断,并应将所有最高点的排气孔依次一一放开和关闭,使孔道内排气通畅,保证压浆密实,且不能漏压。较集中和邻近的孔道,宜尽量先连续压浆完成,不能连续压浆时,后压浆的孔道应在压浆前用压力水冲洗通畅。

(3) 水泥浆制备及质量控制

搅拌好的水泥浆要做到基本卸尽,在全部灰浆卸出之前不得投入未拌和的材料,更不能采取边出料边进料的方法,严格控制浆体配比。严格控制用水量,否则易造成管道顶端空隙。对未及时使用而降低了流动性浆体,严禁采用加水的办法来增加灰浆的流动性,配制时间过长的浆体不应再使用。水泥浆出料后应尽量马上泵送,否则应不停搅拌防止离析。压浆完成后,应及时拆卸并清洗管、阀、空气滤清器、灌浆泵、搅拌机所有沾有水泥浆的设备和附件。每条孔道一次灌注要连续完成,不得中途停压,不能一次连续一次灌满时,应立即用压力水冲洗干净,研究处理后再压浆。灌注完一条孔道换其它孔道时间内,继续启动灌浆泵,让浆体循环流动。

(4) 压浆质量控制要点

- 1) 质量控制要点:①孔道的密封性;②浆体配方控制;③现场施工质量管理控制。
- 2) 注意事项:
 - ①浆管应选用高强橡胶管,抗压能力大于 1Mpa,连接要牢固,不得脱管;
 - ②灰浆进入灌浆泵前应通过 1.2mm 的筛网进行过滤;

- ③搅拌后的水泥浆必须做流动度、泌水性试验，并制作浆体强度试块；
- ④压浆工作宜在灰浆流动性下降前进行（约 30~45min），孔道一次灌注要连续；
- ⑤中途换管道时间内，连续启动灌浆泵，让浆体循环流动；
- ⑥压浆孔数和位置必须作好记录，防止漏灌；
- ⑦储浆灌的储浆体积大于 1 倍所要灌注的一条预应力孔道体积；
- ⑧温度低于 5℃ 时不宜压浆，否则应采取加温保温措施。

（5）封锚

压浆后应先将其周围冲洗干净，并对梁端混凝土凿毛，然后布设钢筋网浇筑封锚混凝土，但要严格控制封锚后的梁体长度。对于外露的锚具，应用 C50 高标号砂浆抹上，防止锚具锈蚀，封锚前对锚圈与锚垫板之间的交接缝用聚氨酯防水涂料进行防水处理。封锚混凝土养护时，洒水并在其上覆盖塑料薄膜，保持混凝土表面湿润。在封锚混凝土养护结束后，采用聚氨酯防水涂料对封锚处新旧混凝土之间的交接缝进行防水处理。

2.5.6 预应力施工中的常见问题及处理措施

（1）锚垫板面与孔道轴线不垂直或锚垫板中心偏离孔道轴线

1) 现象：张拉过程中锚杯突然抖动或移动，张拉力下降。有时会发生锚杯与锚垫板不紧贴的现象。

2) 原因分析：锚垫板安装时没有仔细对中，垫板面与预应力索轴线不垂直。造成钢绞线或钢丝束内力不一，当张拉力增加到一定程度时，力线调整，会使锚杯突然发生滑动或抖动，拉力下降。

3) 预防措施：锚垫板安装应仔细对中，垫板面应与预应力索的力线垂直；锚垫板要可靠固定，确保在混凝土浇筑过程中不会移动。

4) 治理方法：另外加工一块楔形钢垫板，楔形垫板的坡度应能使其板面与预应力索的力线垂直。

（2）锚头下锚板处混凝土变形开裂

1) 现象：预应力张拉后，锚板下混凝土变形开裂。

2) 原因分析：通常锚板附近钢筋布置很密，浇筑混凝土时，振捣不密实，混凝土疏松或仅有砂浆，以致该处混凝土强度低；锚垫板下的钢筋布置不够、受压区面积不够、锚板或锚垫板设计厚度不够，受力后变形过大。

3) 预防措施：锚板、锚垫板必须在足够的厚度以保证其刚度。锚垫板下应布置足够的钢筋，以使钢筋混凝土足以承受因张拉预应力索而产生的压应力和主拉应力。浇筑混凝土时应特别注意在锚头区的混凝土质量，因在该处往往钢筋密集，混凝土的粗骨料不易进入而只有砂浆，会严重影响混凝土的强度。

4) 治理方法：将锚具取下，凿除锚下损坏部分，然后加筋用高强度混凝土修补，将锚下垫板加大加厚，使承压面扩大。

(3) 滑丝与断丝

1) 现象: 锚夹具在预应力张拉后, 夹片“咬不住”钢绞线或钢丝, 钢绞线或钢丝滑动, 达不到设计张拉值; 张拉钢绞线或钢丝时, 夹片将其“咬断”, 即齿痕较深, 在夹片处断丝。

2) 原因分析: 锚夹片硬度指标不合格, 硬度过低, 夹不住钢绞线或钢丝; 硬度过高则夹伤钢绞线或钢丝, 有时因锚夹片齿形和夹角不合理也可引起滑丝或断丝; 钢绞线或钢丝的质量不稳定, 硬度指标起伏较大, 或外径公差超限, 与夹片规格不相匹配。

3) 防治措施: 锚夹片的硬度除了检查出厂合格证外, 在现场应进行复验, 有条件的最好进行逐片复检; 钢绞线和钢丝的直径偏差、椭圆度、硬度指标应纳入检查内容。如偏差超限, 质量不稳定, 应考虑更换钢绞线或钢丝的产品供应单位; 滑丝断丝若不超过规范允许数量, 可不予处理, 若整束或大量滑丝和断丝, 应将锚头取下, 经检查并更换钢束重新张拉。

(4) 波纹管线形与设计偏差较大

1) 现象: 最终成型的预应力孔道与设计线形相差较大。

2) 原因分析: 浇筑混凝土时, 预应力波纹管没有按规定可靠固定。波纹管被踩压、移动、上浮等, 造成波纹管变形。

3) 预防措施: 要按设计线形准确放样, 并用 U 形钢筋按规定固定波纹管的空间位置, 再点焊牢固。曲线及接头处 U 形钢筋应加密; 浇筑混凝土时注意保护波纹管, 不得踩压, 不得将振动棒靠在波纹管上振捣; 应有防止波纹管在混凝土尚未凝固时上浮的措施。

(5) 波纹管漏浆堵管

1) 现象: 用通孔器检查波纹管时发现内有堵塞; 采用在混凝土未浇筑前波纹管内先置钢绞线后浇混凝土的, 发现先置的钢绞线拉不动。

2) 原因分析: 波纹管接头处脱开漏浆, 流入孔道; 波纹管破损漏浆或在施工中被踩、挤、压瘪; 波纹管有孔洞。

3) 防治措施: 使用波纹管必须具备足够的承压强度和刚度。有破损管材不得使用。波纹管连接应根据其号数, 选用配套的波纹套管。连接时两端波纹管必须拧至相碰为止, 然后用胶布或防水包布将接头缝隙封闭严密; 浇筑混凝土时应保护波纹管, 不得碰伤、挤压、踩踏。发现破损应立即修补; 施工时应防止电焊火花灼烧波纹管的管壁; 波纹管安装好后, 宜插入塑料管作为内衬, 以加强波纹管的刚度和顺直度, 防止波纹管变形, 碰瘪、损坏; 浇筑混凝土开始后, 在其初凝前, 应用通孔器检查并不时拉动疏通; 如采用预置预应力索的措施, 则应时时拉动预应钢绞线。认堵孔严重无法疏通的, 应设法查准堵孔的位置, 凿开该处混凝土疏通孔道。

(6) 张拉钢绞线延伸率偏差过大

1) 现象: 张拉力达到了设计要求, 但钢绞线延伸量与理论计算相差较大。

2) 原因分析: 钢绞线的实际弹性模量与设计采用值相差较大; 孔道实际线形与设计线形相差较大, 以致实际的预应力摩阻损失与设计计算值有较大差异; 或实际孔道摩阻参数与设计取值有较大出入也会产生延伸率偏差过大; 初应力采用值不合适或超张拉过多; 张拉过程中锚具滑丝或钢绞线内有断丝; 张拉设备未作标定或表具读数离散性过大。

3) 防治措施: 每批钢绞线均应复验, 并按实际弹性修正计算延伸值; 校正预应力孔道的线形; 按照钢绞线的长度和管道摩阻力确定合格的初应力值和超张拉值; 检查锚具和钢绞线有无滑丝或断丝; 校核测力系统和表具。

(7) 预应力损失过大

1) 现象: 预应力施加完毕后钢绞线松弛, 应力值达不到设计值。

2) 原因分析: 锚具滑丝或钢绞线内有断丝; 钢绞线的松弛率超限; 量测表具数值有误, 实际张拉值偏小; 锚具下混凝土局部破坏变形过大; 钢绞线与孔道间摩阻力过大。

3) 防治措施: 检查钢绞线的实际松弛率, 张拉时应采取张拉力和引伸量双控制。事先校正测力系统, 包括表具。锚具滑丝失效, 应予更换; 钢绞线断丝率超限, 应将其锚具、预应力筋更换; 锚具下混凝土破坏, 应将预应力释放后, 用环氧混凝土或高强度混凝土补强后重新张拉; 改进钢束孔道施工工艺, 使孔道线形符合设计要求, 必要时可使用减摩剂。

(8) 预应力孔道注浆不密实

1) 现象: 水泥浆从入口压入孔道后, 前方通气孔或观察孔不见有浆水流出; 有的是溢出的浆水稀薄。钻孔检查发现孔道中有空隙, 甚至没有灰浆。

2) 原因分析: 灌浆前孔道未用高压水冲洗, 灰浆进入管道后, 水分被大量吸附, 导致灰浆难以流动; 孔道中有局部堵塞或障碍物, 灰浆被中途堵住。灰浆在终端溢出后, 持续荷载继续加压时间不足; 灰浆配制不当。如所用的水泥泌水率高、水灰比大, 灰浆离析等。

3) 防治措施孔道在灌浆前应以高压水冲洗, 除去杂物、疏通和湿润整个管道; 配制高质量的浆液。选用的水泥可用强度等级不低于 42.5MPa 的普通硅酸盐水泥灰浆应具有良好的流动度并不易离析, 可掺入适量的减水剂和微膨胀剂, 但不得使用对管道和预应力有腐蚀作用的外掺剂, 掺量和配方应根据试验确定。

(9) 预应力孔道灌不进浆

1) 现象: 灰浆灌不进孔道, 压浆机压力却不断升高, 水泥灰浆喷溢但出浆口未见灰浆溢出。

2) 原因分析: 管道或排气孔受堵, 波纹管内径过小, 穿束后管内不通畅, 浆液通过困难; 孔道内落入杂物。

3) 防治措施: 用高压水多冲几次, 尽可能清除杂物。

2.5.7 各种保证措施

(1) 质量保证措施

1) 严格按设计图纸和现行施工验收规范组织施工, 具体操作严格按批准后的施工方案和预应力施工工法进行。

2) 认真做好自检, 互检等检验工作, 并及时进行隐蔽工程验收, 未经验收不得进行下一道工序的施工。

3) 张拉施工前, 应认真复核图纸与施工情况, 在现场同条件养护的混凝土试块的试压强度达到设计允许的张拉强度后, 方可进行张拉。

4) 严格按图纸要求进行施工。发现问题应及时上报有关单位, 经有关部门核定后继续施工。

5) 严格按照预应力施工工艺进行施工, 预应力连续箱梁和板的支撑应满足上部施工荷载所必需的强度和刚度要求, 尤其是底层支撑的基础应牢固, 以防止支撑的不均匀沉降。

6) 预应力筋张拉前, 不得拆除梁底模。

7) 张拉前应对待张拉梁的外观作必要的检查, 确认混凝土浇筑质量合格, 无蜂窝, 空洞。

8) 发现异常裂缝等后方可进行张拉; 如有异常, 应及时通知有关单位, 查明原因, 必要时调整张拉方案, 经批准后再进行张拉。

(2) 安全、环保施工措施

1) 严格执行安全操作规程进行施工, 施工前要预先进行交底, 每个区域施工前应对张拉操作人员进行安全教育。

2) 锚具、夹具应设专人妥善保管, 避免锈蚀、玷污、遭受机械损伤或散失。施工时在终张拉完成后对锚具进行防锈处理。

3) 张拉前仔细检查张拉平台的安全性, 并在张拉平台上搭设高度适当的安全挡板, 防止张拉中的意外事故伤及人身安全。

4) 施工操作人员必须配备安全防护用品, 进入施工现场, 必须戴安全帽, 高空作业时操作人员必须系安全带。

5) 从施加预应力至锚固后封端期间, 除非采取有效屏蔽措施, 否则操作人员不得在锚具正前方活动。

6) 张拉过程中, 测量伸长值或拆卸工具锚时, 操作人员应站在千斤顶侧面, 应禁止非预应力施工人员进入张拉区域。

7) 从开始张拉至孔道压浆完毕的过程中, 不得敲击锚具、钢绞线和碰撞张拉设备。张拉过程中发现张拉设备运转声音异常, 应立即停机检查维修。

8) 油压泵上的安全阀应调至最大工作油压下能自动打开的状态。油压表安装必须紧密满扣, 油泵与千斤顶之间采用的高压油管连同油路的各部接头均须完整紧密, 油路畅通, 在最大工作油压下保持 5min 以上不得漏油。若有损坏者应及时修理更换。

9) 特殊情况下, 在更换夹具时, 两端都应装上千斤顶, 采取其它措施放松预应力筋时, 应仔细做好施工现场的安全防护工作。

- 10) 压浆人员必须站在锚具两侧操作, 严禁正对锚具, 也不得踩踏高压油管。
- 11) 压浆时要对墩柱采取有效保护措施, 防止浆液喷洒在墩柱上。
- 12) 张拉设备使用前, 应对高压油泵、千斤顶进行空载试运行, 无异常情况方可正式使用。高压油管使用前应作耐压试验, 不合格的不能使用。
- 13) 电器设备由专人管理, 电闸箱应符合技术要求, 电源线在使用前应进行测试, 不得违章作业, 作业完毕后必须将总电源切断, 所有电器设备应遮盖。严格遵守施工现场的用电制度。

2.5.8 小结

世界上目前使用的预应力施工方法有: 先张法、后张法、体外预应力法、中张法和双预应力法等, 本节主要研究了预应力后张法的施工工艺: 在预应力成孔中采用预埋波纹管成孔工艺, 内穿塑胶管的方法, 并且波纹管要求顺直和足够的抗拉强度。钢绞线下料长度按给定的长度下料, 采用砂轮切割机切割。预应力张拉采用双孔锚下张拉并且压力表应与张拉千斤顶配套使用, 不得混用, 并要成套标定张拉机具在进场时应进行配套检查和校验。压浆的过程中, 压浆机采用活塞式压浆泵, 压浆后布设钢筋网浇筑封锚混凝土。

预应力后张法适用于现浇或预制大、中型构件, 在桥梁工程中得到广泛的应用, 其缺点是工序繁多, 工艺复杂, 且因管道压浆质量的不定性, 存在工程隐患。

目前, 原本认为的体内预应力筋因管道压浆而不会受到腐蚀的观念正日益受到挑战: 预应力孔道内 (特别是曲线段内) 往往由于压浆无法彻底填密而致使孔道内存在空洞; 密集的预应力孔道也往往导致混凝土灌注上的困难, 使混凝土易产生蜂窝现象, 这些都将对今后的预应力后张法施工提出新的挑战。

3 架梁施工研究

桥梁构件安装是一项复杂的高空作业，方法很多，但主要包括两方面的内容，一是将构件吊装到指定位置，二是将构件连接成整体。本章部分主要研究吊装施工。

3.1 起重机械

起重机械是构件吊装的主要施工设备，对构件安装起决定性的作用。常用起重机械包括自行式起重机、桅杆式起重机、塔式起重机。

3.1.1 起重机械的种类和特点

(1) 自行杆式起重机

1) 自行杆式起重机的种类及应用

自行杆式起重机具有自行走、全回转、机动性好等特点，起重臂可升降，起重参数可调以适应不同安装要求。根据行走机构特点分为轮胎式起重机、履带式起重机、汽车式起重机三种。自行杆式起重机多用于厂房安装和构件装卸。

2) 技术参数及其之间关系

自行杆式起重机吊装的技术参数包括起重量、起重高度、起重半径，如图 3-1 所示。三种参数之间存在一定关系。

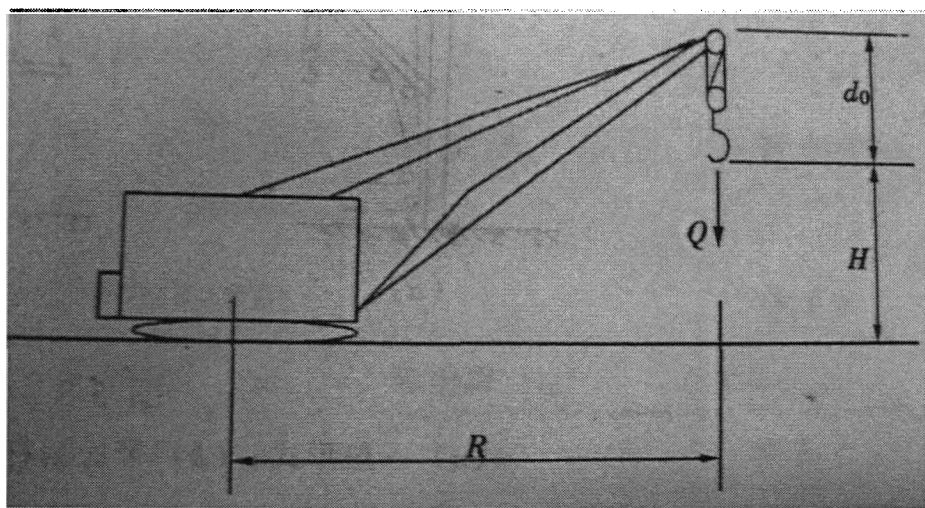


图 3-1 技术参数示意图

Fig.3-1 Schematic diagram of the technical parameters

起重量 Q : 在一定起重半径下，起重机能吊装的最大重量；

起重高度 H : 在一定起重半径下，起重机将构件吊起的最大高度，即从停机面到吊钩所能升到的最高点之间的距离；

起重半径 R : 起重机回转中心到吊钩之间的水平距离。

三个参数可分别在一定区间内变化，三参数都受起重臂长和起重臂仰角的制约。起重

臂长一定，仰角增大，起重半径减少，起重高度、起重量增大；仰角减小，起重半径增大，起重高度、起重量减少。

(2) 桅杆式起重机

桅杆式起重机需要现场设计、加工制作，若起重机结构的强度、刚度、稳定性很高，则起重高度和起重量可以很大，如有的金属格构式独角拔杆，起重高度可达 75m，起重量可达 100t 以上。桅杆式起重机的起重半径 R 、起重量 Q 、起重高度 H 的变化范围很小，有时是固定的。根据支撑结构特点，桅杆式起重机分为独脚拔杆、人字拔杆、悬臂拔杆等几种。桅杆式起重机一般在缺少起重机或起重机起重能力不足时采用。

(3) 塔式起重机

塔式起重机具有起重高度和工作幅度大、频率高等特点，多用于多层及高层建筑施工，按行走机构可分成轨道式、爬升式和附着式三种类型。爬升式起重机的爬升过程如图 3-2 所示。附着式起重机的锚固如图 3-3 所示，自升过程如图 3-4 所示。

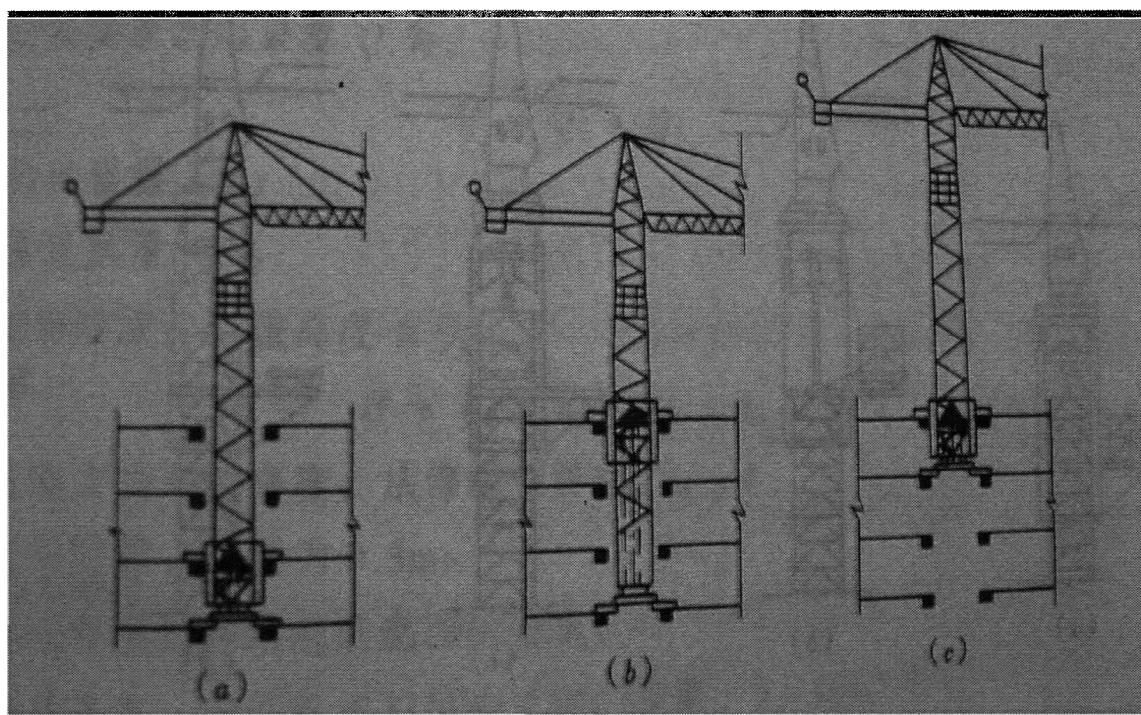


图 3-2 爬升式起重机爬升过程示意图

Fig.3-2 The picture of crane's climbing climb process

(a) 准备状态 (b) 提升套架 (c) 提升塔身

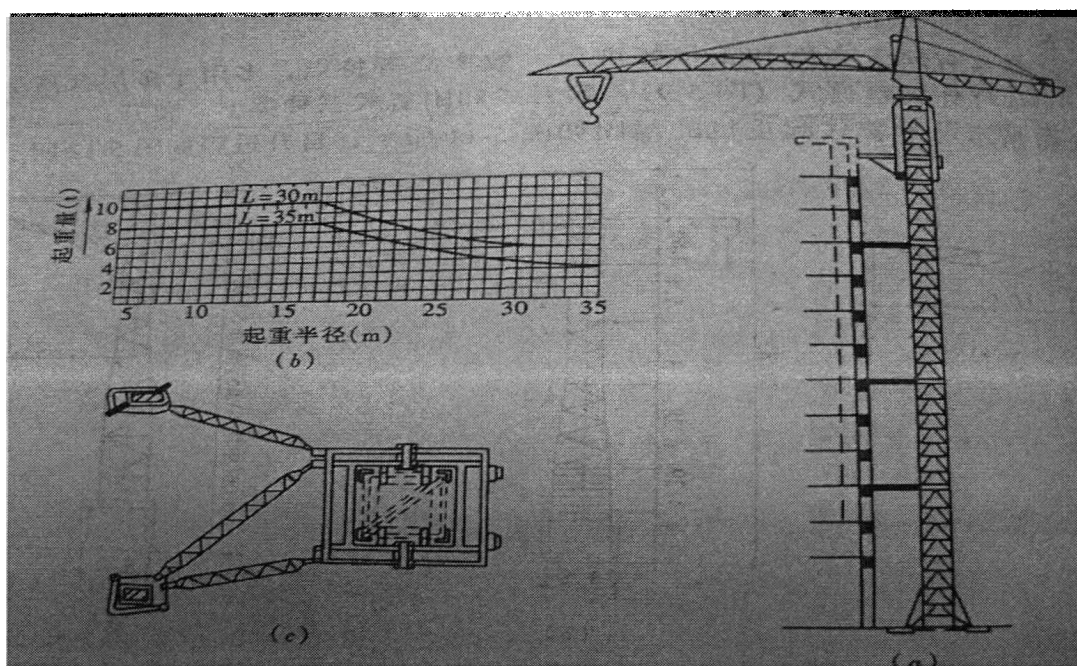


图 3-3 QT4-10 型塔式起重机
Fig.3-3 QT4-10-type tower crane
(a) 全貌图 (b) 性能曲线 (c) 锚固装置图

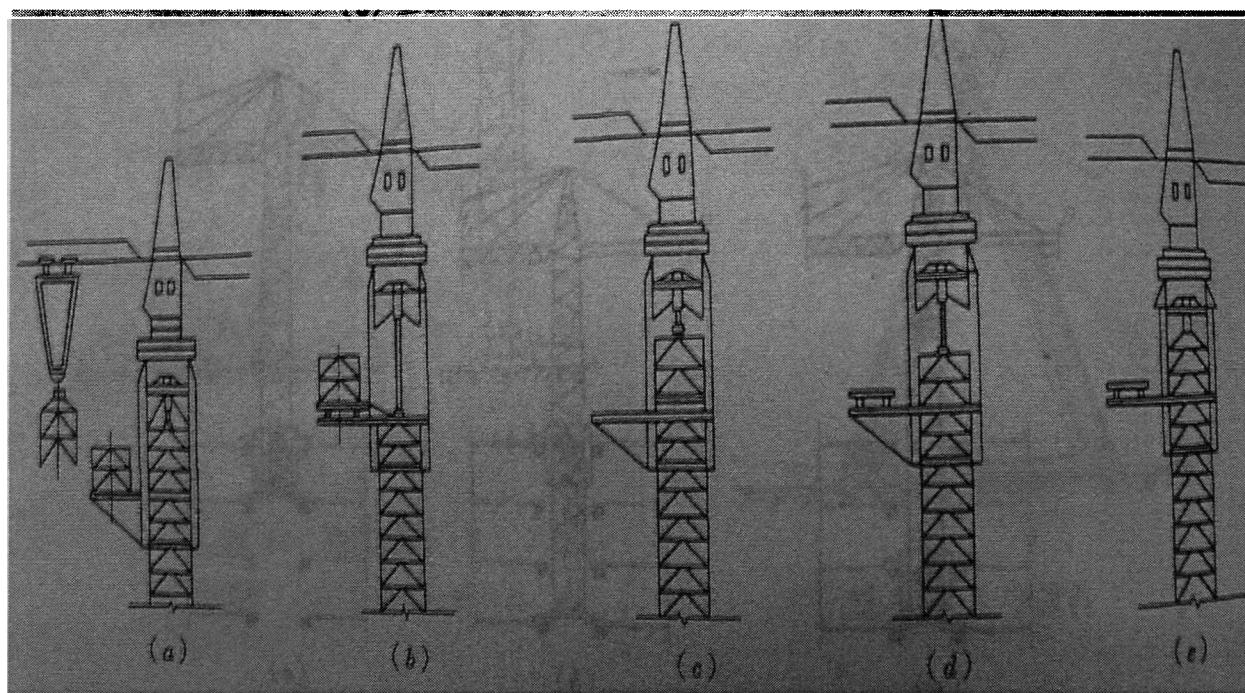


图 3-4 附着式塔式起重机的自升过程
Fig.3-4 The self process of attachment tower crane
(a) 准备状态 (b) 顶升塔顶 (c) 推入标准节 (d) 安装标准节 (e) 塔顶与塔身连成整体

塔式起重机的参数包括起重高度、起重力矩、工作幅度、起重重量，其中，起重力矩=工作幅度×起重重量。

3.1.2 构件吊装的技术参数计算

构件吊装的技术参数包括起重重量、起重高度、起重半径。

(1) 起重量和起重高度的计算

1) 构件安装要求的起重重量 Q 按公式 (3-1) 计算:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (3-1)$$

式中: Q_1 ——构件重量 (t)

Q_2 ——索具重量 (t)

2) 构件安装要求的起重高度 H 按 (3-2) 计算:

$$H = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 \quad (3-2)$$

式中: h_1 ——安装支座表面高度, 从停机面算起;

h_2 ——安装间隙, 一般为 0.3m;

h_3 ——绑扎点至构件吊起后底面的距离;

h_4 ——索具高度, 即绑扎点与吊钩之间的距离, $h > 1\text{m}$ 。

构件安装要求的起重高度 H 的计算可参照图 3-5。

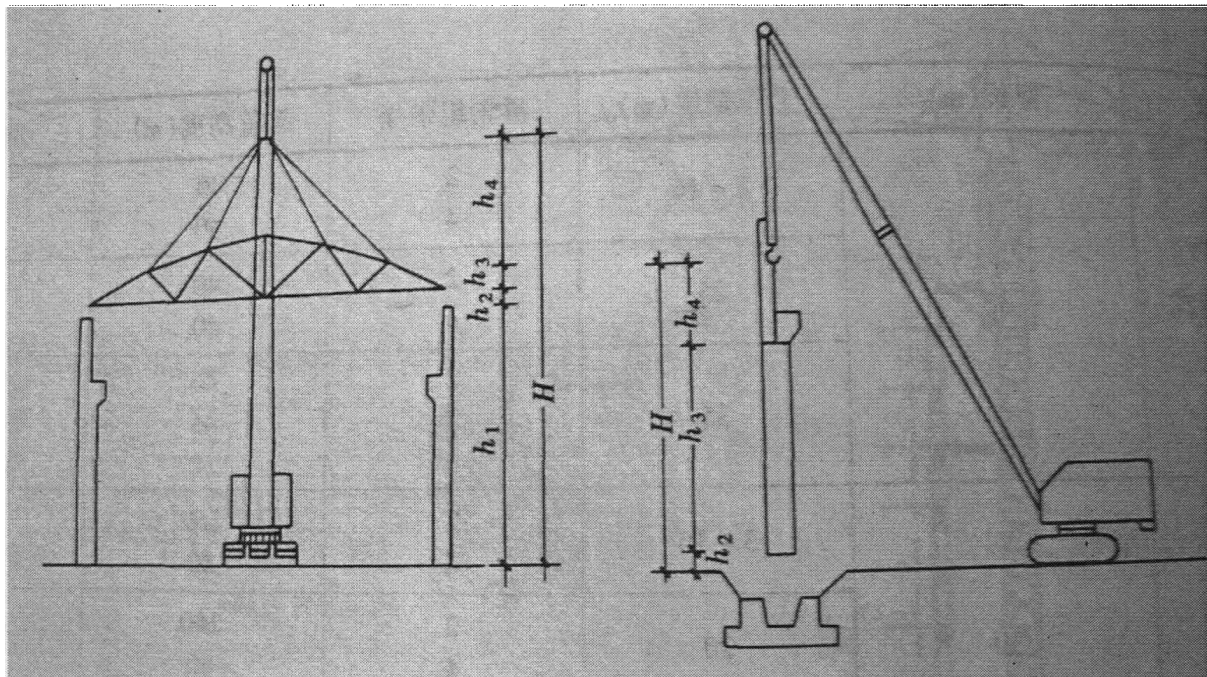


图 3-5 履带式起重机起重高度计算简图

Fig.3-5 The calculation diagram of crawler crane lifting height

(2) 起重半径的计算

1) 构件安装场地对起重半径的限制

构件安装场地有障碍物时, 起重机不能无限制地开到构件附近。使起重机不能按设备最小起重半径起吊, 这时起重机安装高度和起重重量不是最大值。因此, 一台起重机能否将构件吊起, 光知道构件起重重量和起重高度还不够, 还要看在构件安装场地起重机能开到

构件附件的最短距离,及场地最小起重半径。所选起重机械应满足,在该最小起重半径上所能达到的起重量和起重高度大于构件安装所要求的起重量和起重高度。

2) 场地最小起重半径的确定

一般情况,起重机可以不受限制地开到构件附件,没有产地最小起重半径;这时起重机可按照设备最小起重半径起吊。

在构件和起重机之间的地面上有障碍,起重机不能开到构件附件,这时场地最小起重半径等于障碍物与构件安装位置之间的距离。

在构件和起重机之间的空中有障碍,起重机也不能自由地开到构件附件,这时确定最小起重半径较复杂,需要根据起重臂不与空中障碍物相碰撞的条件来确定。

3.1.3 起重设备选择

起重设备选择包括类型、型号、数量。

起重机数量的确定按公式(3-3)计算:

$$N = \frac{1}{T \times C \times K} \sum \frac{Q_i}{P_i} \quad (3-3)$$

式中: N ——起重机数量;

T ——工期(d);

C ——每天工作班数;

K ——时间利用系数, 1.8-0.9;

Q_i ——每种构件安装工程量(件或台班);

P_i ——起重机相应的产量定额(件/台班或 t/台班)。

3.2 构件的吊装工艺

构件的吊装包括施工准备、绑扎、起吊、对位、临时固定、校正、永久固定等过程。

3.2.1 构件绑扎

构件绑扎要注意合理确定绑扎点的数目和位置。由于构件起吊时的受力与构件安装后的受力不一致,导致在起吊过程中产生附加应力,因此,构件绑扎点的位置和数目应按照附加应力最小的原则来确定。

1) 柱的绑扎

通常,柱采用一点或两点绑扎,长、细柱,抗弯能力低,可采用多点绑扎。柱绑扎方法有斜吊绑扎和直吊绑扎两种,直吊绑扎容易就位对正,但需要起重机的起重高度比斜吊绑扎法高。柱绑扎点位于牛腿下 200mm 处。

2) 屋架的绑扎

梁、板、拱片、屋架、天窗架等构件多采用多点绑扎。屋架绑扎点数目取决于跨度。绑扎点位置按照起吊附近应力最小和便于预埋件施工的原则确定。在起吊过程中吊索保持与水平面夹角大于 45° ，当构件尺寸很大时，要保证吊索与水平夹角大于 45° 所需起重高度会很大，这时可以采用横吊梁方法减小起重高度。

3.2.2 构件的起吊

根据在起吊过程中物件的运动特点，起吊方法分为：旋转法、滑行法；根据起重机台数可分为：单机起吊、双机抬吊，于是起吊方法包括：单机旋转法起吊、单机滑行法起吊、双机旋转法起吊、双机滑行法起吊。

1) 单机旋转法起吊

其特点是柱在吊升过程中柱身绕柱脚旋转而逐渐直立，该方法要求柱布置成三点共弧，如不能三点共弧。这种起吊方法的优点是效率高；缺点是起重机运动幅度大。一般当起重机机动性好、中小型柱时采用此方法。

2) 单机滑行法起吊

其特点是柱脚沿地面滑行逐渐直立，柱的布置要求绑扎点位于基础附近就可以。该方法优点是起重机稳定性好，施工安全；缺点是效率不如旋转法高。

3) 双机旋转法起吊

双机旋转法起吊是两台起重机将构件吊起后同时升钩并回转，但回转方向相反。

4) 双机滑行法起吊

双机滑行法起吊是两台起重机同时升钩将柱吊起，柱沿地面滑行。

5) 双机抬吊时起重机负荷分配

双机抬吊时每台起重机负荷分配取决于吊点和构件重心位置。

3.3 小结

架梁是桥梁施工中的一个重要环节，安全、高效、精准的架梁将会为整个工程施工画上一个圆满的句号。

架梁的方法还有很多，如龙门架安装法，尤其适合预制场、有地基条件的预制梁体安装等；桥台后方有足够场地，且运输有困难的梁板可采用顶推法施工；拱桥施工中还可以转体施工法等等。应视工程的具体条件和要求，择优选取架梁方法。

结合宝鸡龚刘渭河大桥工程的特点及实际情况，该项目选择了两个 60t 的跨墩龙门式起重机配合双导梁穿行式架桥机架梁。预制梁的安装顺序是先安两个边梁，再安中间各梁。

架梁施工的研究与发展将会随着我国科技水平与技术的不断提高而与日俱增。

4 龚刘渭河大桥预应力混凝土连续箱梁制造技术及施工工艺实证分析

宝鸡市龚刘渭河大桥位于渭河中游蔡家坡段,上游距林家村水文站 58 km,下游距魏家堡水文站约 4 km。大桥北起西宝中线,经龚刘村跨西宝高速公路后再跨越渭河,南经眉县城关镇余管营村与西宝南线相接。该工程是蔡家坡经济技术开发区总体规划网中城市基础设施建设的重要组成部分,亦为蔡五中心区骨架道路“六纵三横”中纵向主干道的主要部分,属新规划项目。

龚刘渭河大桥全长 1.195km,总跨度 48 跨,其中主桥 23 跨 690m;河槽段桥面高程 505.0~508.4 m,河床面高程 493.0~496.8m,桥孔净高 6.6~13.8m。桥面宽 18.5m,平面呈一条直线布置,横断面布置为:1.25 m 人行道+16m 行车道+1.25m 人行道。南北引道长 2147m,是目前渭河上已建和拟建的最长桥梁。大桥主体为钢筋混凝土预应力连续箱梁,三柱联合单排式钢筋混凝土桥柱,由主桥和引桥两部分组成。主桥承重梁为 30m 后张法预应力混凝土箱梁,引桥承重梁为 20m 先张法预应力空心板梁,钻孔灌注桩基础,桩柱式桥台,两者均为预制梁。其中 20m 空心板为 306 块,30m 箱梁为 110 片。

4.1 工程施工设施配置

本次工程建设施工中投入的机械设备及测试仪器,见表 4-1(主要测量、试验仪器设备表)、表 4-2(主要施工机械表)。

4.2 梁场的选定与布置

项目部在梁场选定时,依据交通方便的原则考察了工程项目所建地周围的交通情况,工程起点位于渭河北岸岐山县龚刘村,距离西宝中线约 400m,且工程所建地旁有一条宽约 5m 的砂石路,工程终点位于渭河南岸眉县尧寺村,距离西宝南线约 2km,且周围均为农田无线状路直达西宝南线。综合以上基本情况,项目部拟定将梁场选定在工程起点处。

制梁场要根据现场的地质环境、地形地貌,同时应根据施工工艺及施工方法,各个工序的相互关系来合理布置施工场地,既要满足生活需要,又要方便施工,形成流水作业,并应考虑少占土地。场地布置包括混凝土搅拌站、制梁台座区、存梁台座区、运梁轨道、龙门吊机轨道、钢筋车间、钢绞线下料场、内模整修台位、钢筋绑扎台位、蒸汽养护锅炉房、生活区等,梁场布置见图 4-1 所示。

表 4-1 主要的材料试验、测量、质检仪器设备表

Table 4-1 Major materials、measurement、quality inspection instrument

序号	仪器名称	规格型号	单位	数量	备注
1	压力试验机	NYL-2000D	台	1	
2	混凝土强制式搅拌机	HX-30	台	1	
3	混凝土抗渗仪	HS-40	台	1	
4	油压式万能试验机	WE-100B	台	1	
5	电烘箱	中型	台	1	
6	天平	1KG、5KG、10KG	台	5	
7	承载比试验仪	CBR-1	台	1	
8	土样分析筛	FB-2 0.074~20	套	1	
9	土壤密度仪		台	1	
10	标准养护箱	HBY-A	套	1	
11	砂子套筛	0.080~10.0mm	套	1	
12	碎石套筛	2.00~80.00mm	套	1	
13	水泥电动抗折仪	DKN-6000	台	1	
14	水泥沸煮筛	FZ-31A	台	1	
15	雷氏夹测定仪	LD-50	台	1	
16	压碎指标测定仪		台	1	
17	砂浆稠度仪	TC905L	台	1	
18	经纬仪	北光	台	6	
19	水平仪	DSZ ₃	台	6	
20	全站仪	FTS412	台	2	
21	超声波探伤检测仪	CTS-8003、0.5-15HZ、1008DR	台	4	
22	X 光射线探伤检测仪		台	1	
23	千斤顶		台	10	

表 4-2 主要施工机械表

Table 4-2 Major construction machinery

机械名称	规格型号	额定功率 (kw)或容量 (m³)或吨位(t)	厂牌以及 出厂时间	数量				新旧程 度 (%)	预计进场 时间
				小计	其中				
					拥有	新购	租赁		
挖掘机	日立220	0.7 m³	夏工/1999	2台	拥有			80	开工1d
挖掘机	CAT320/	1.0 m³	美国/2001	2台	拥有			90	开工1d
装载机	2150A	2.5 m³	柳工/1999	3台	拥有			85	开工1d
振动压路机	Y218	18t	洛阳/1999	2台	拥有			85	开工20d
光轮压路机	3Y8-15t	8-15t	洛阳/2000	4台	拥有			85	开工320d
胶轮压路机	YL-16t	16t	洛阳/2001	2台	拥有			90	开工350d
自卸汽车	太拖拉	15t	捷克/2000	14台	拥有			85	开工1d
洒水车	东风104/47	5-10t	湖北/2002	2台	拥有			90	开工1d
泥浆泵	H45	3kW	上海/1999	4台	拥有			85	开工10d
风钻	7655	10kW	西安/1999	4处	拥有			80	开工10d
正循环潜水钻	20型	50kW	国产/2001	10台	6		4	80	开工20d
冲击钻		30kW	国产/2001	2台	拥有			88	开工20d
导管	L260-3		西安/2000	100m	拥有			90	开工20d
砼搅拌运输车	AH5265GJB	8 m³	西安/2002	6台	拥有			85	开工20d
吊车	QY25A	25t	成都/2001	1台	拥有			85	开工5d
吊车	QY18A	18t	成都/2001	2台			租赁	85	开工30d
张拉设备	MD17-180/45R		江苏/1997	4套	拥有			75	开工35d
自卸汽车	东风EQ3228G	≥10t	西安/1997	20台	拥有			82	开工1d
自动焊接设备	SHZQ-320F		吉林/1999	4台	拥有			90	开工15d
电动击实仪	STDJ-3		深圳/2001	1台	拥有			90	开工15d
压力机	200T		河北/2001	1台	拥有			95	开工15d
支架设备			吉林/2000	4套	拥有			85	开工20d
电动卷扬机	JM6	30kN	吉林/1999	4套	拥有			80	开工15d
平地机	PY185A		成都/2001	1台	拥有			85	开工120d
架桥机	DF50/150III		郑州/2002	1台	拥有			85	开工300d
沥青砼摊铺机	ABG411		柳州/2001	1台	拥有			80	开工400d

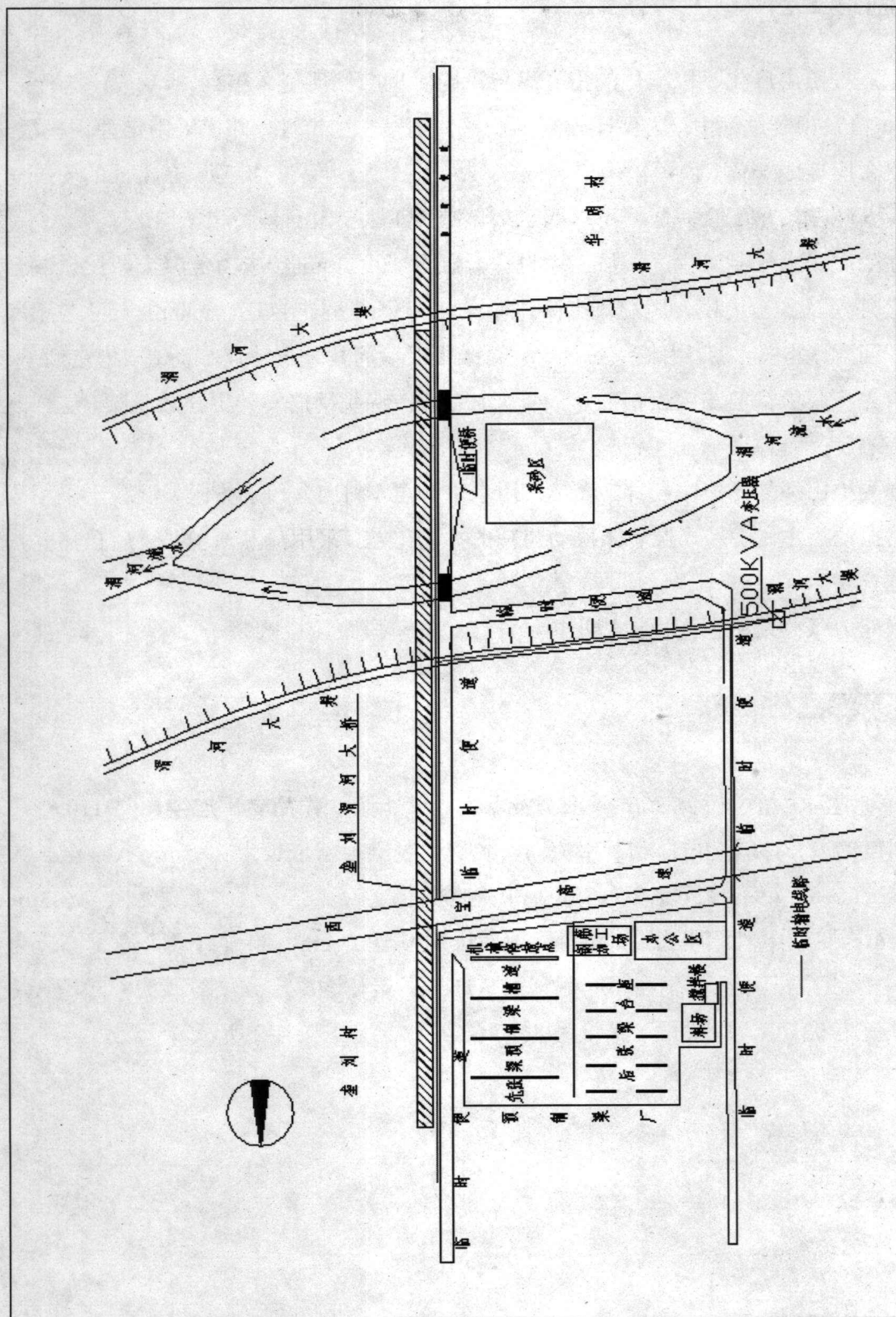


图 4-1 梁场布置图
Fig.4-1 The map of Beam field layout

4.3 箱梁制造工艺

箱梁生产按照工厂化、标准化的指导思想，确保生产优质耐久箱梁。

在 30m 箱梁预制过程中，为保证外侧模板整体刚度与稳定性，外模采用定型钢模板，底模与箱梁台座连成一体。内模采用拼装式工具内模，便于拼装与拆除。在模板的安装与拆除由两台 5 吨龙门吊配合完成，可提高工效，减少工人劳动强度。

箱梁在生产线上预制，生产线按工序设计，制梁厂设 30m 预应力混凝土箱梁预制台 10 个、5 套外模及 5 套内模。用混凝土修建 4 条 85m 长张固定台座，台面的尺寸与梁底部的尺寸相匹配，外模 4 套，内模气囊 8 个。箱梁腹板箍筋其外形特点窄而高、稳定性差，因此我们事先将腹板箍筋与底板箍筋焊成骨架，然后在特制钢筋模架上摆放骨架，这样既可提高施工进度又可保证箍筋间距。

箱梁混凝土由搅拌站集中搅拌，浇筑采用水平分层、斜向分段的方式，混凝土采用附着式振动器振动为主、插入式振动棒振动为辅的振动工艺，采用先蒸汽养护，后自然养护的施工工艺。

箱梁预应力张拉采用预张拉、初张拉、终张拉三阶段张拉模式。

应用龙门式起重机配合双导梁穿行式架桥机进行架梁

4.4 预应力预制箱梁模板

宝鸡龚刘渭河大桥主桥为 30m 预应力混凝土连续箱梁，先简支后连续，共 110 片，桥梁设置斜度为 6.7° ，斜度方向和洪水流向一致。预制梁顶部全长为 29.5m，底部全长为 29.7m；梁高 160cm；箱梁底板宽度为 1.0m；中梁上翼缘宽为 2.6m，边梁上翼缘宽为 3.3m；顶板厚 14cm；底板中段厚度为 15cm，端部底板加厚至 25cm。箱梁内最大净空高度为 1.31m，梁中部设中横隔板，隔板上进入孔净高 71cm。梁体混凝土强度等级为 C50，一片边梁设计重量为 93.26t，中梁设计重量为 86.71t，具体尺寸见图 4-2 所示。

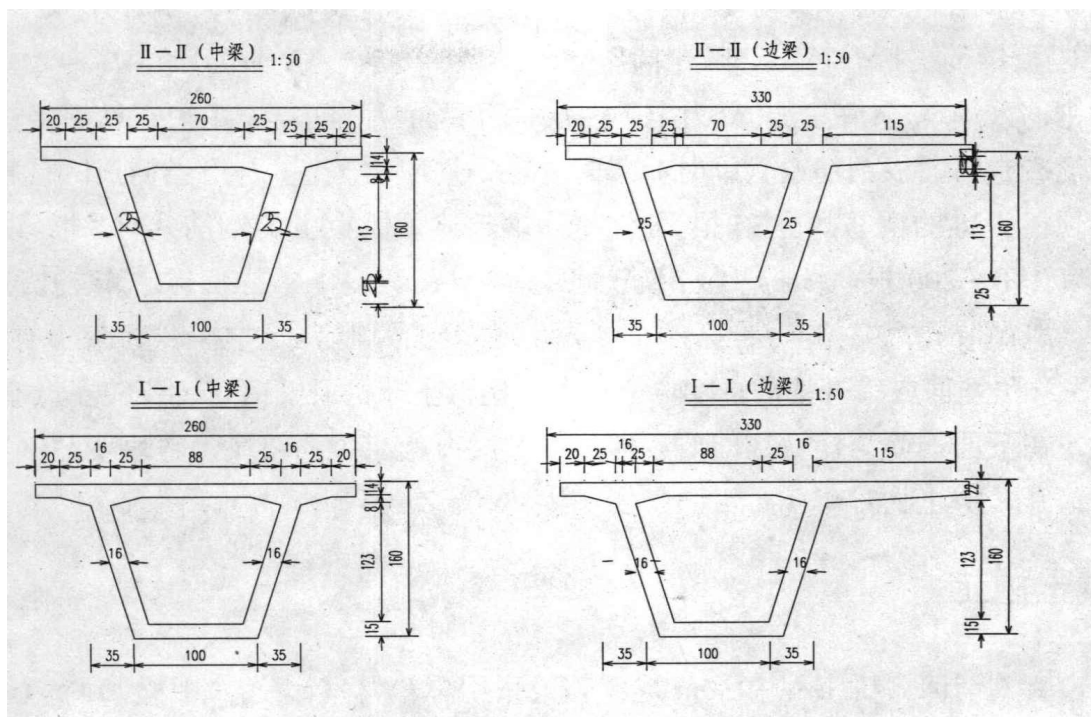


图 4-2 梁体尺寸

Fig.4-2 Liang body size

4.5 钢筋加工

本工程,钢筋进行进场验收时,每批质量不超过 60t;在 30m 箱梁中主要使用的钢筋型号为 $\Phi 28$ 、 $\Phi 22$ 、 $\Phi 16$ 、 $\Phi 14$ 、 $\Phi 12$ 、 $\Phi 10$ 。

箱梁钢筋加工区面积约 400m²,主要用于钢筋原材的存放、钢筋的加工及成型钢筋的放置。

30m 箱梁钢筋弯曲成型主要采用机械弯曲成型。主要为 90°和 180°弯曲,例如顶板 $\Phi 16$ 的箍筋末端应作 180°弯钩,其弯弧内直径不应小于钢筋直径的 2.5 倍,弯钩的弯后平直部分长度不应小于钢筋直径的 3 倍。对已弯曲成型好了的钢筋必须轻抬轻放,避免产生变形;应在指定的堆放地点,按编号分隔整齐堆入;特别应当注意的是,要与箱梁钢筋班联系好,按名称、部位及钢筋编号、需用顺序堆放,防止先用的被压在下面,使用时因翻垛而造成钢筋变形,影响箱梁质量。

地板腹板钢筋骨架:腹板 $\Phi 12$ 的箍筋共 192 根,其中两侧加密区共 86 根,一侧为 43 根,间距为 10cm,中间普通区为 106 根,间距为 20 cm;腹板筋与底板箍筋事先焊成骨架,只需按模架上的限位筋位置放置即可。

地板腹板钢筋拼装绑扎方法:腹板箍筋中的水平分布筋均为 $\Phi 10$ 的 7#、8#、9#和 10# 筋。其中 7#筋一侧为 7 根,两侧共 14 根,每根长度为 3000cm;8#筋一侧为 6 根,两侧共 12 根,每根长度为 3000.4cm;9#筋在加密区一侧为 7 根,箱梁两端四侧共 28 根,每根长度为 440cm;10#筋在加密区一侧为 7 根,箱梁两端四侧共 28 根,每根长度为 440.2cm;

腹板端头 $\Phi 10$ 的 U 型筋一侧为 18 根, 共 72 根; 两侧腹板端头网片 A、B、C、D 共计 28 片。端隔板钢筋支撑要可靠, 防止倾斜变形。

顶板钢筋采用现场绑扎法, 分为上下两层, 两层面板之间需要用短钢筋焊接支撑, 以防止浇筑混凝土时面板钢筋遭受临时荷载时上层钢筋网被压下, 与下层钢筋网接触。负弯矩区箱梁顶板 $\Phi 28$ 的钢筋共有 35 根, 伸缩缝两端箱梁顶板 $\Phi 28$ 的钢筋共有 4 根。顶板 $\Phi 16$ 的横向筋有 198~200 根。绑扎顶板钢筋时要注意留有吊装孔, 图纸上对吊装孔位置未进行规定, 一般吊装孔离箱梁端头约 1.1m。人行道横梁预埋筋一侧 23 组, 每组有 4 根 U 型筋, 要注意预埋筋应错开摆放, 以防位置不准确。在绑扎顶板钢筋时还应注意筋与筋之间的间距。在下层钢筋与模板之间要设置与保护层厚度相等的垫块, 垫块要与钢筋扎紧, 并且互相错开, 防止临时荷载时钢筋位置产生移动。

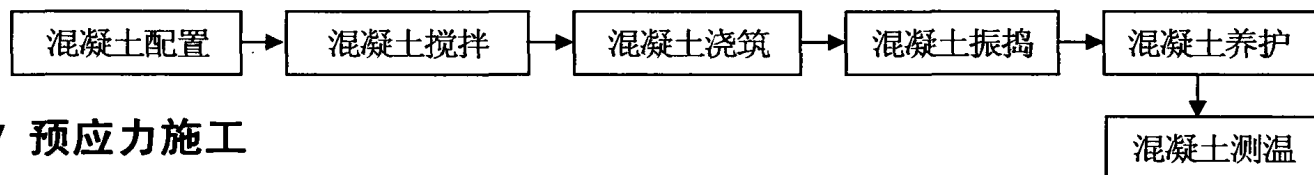
4.6 混凝土施工

宝鸡市龚刘渭河大桥工程中 30m 连续箱梁采用单箱单室, 箱梁(中梁)顶宽为 2.60m, 底宽为 1m, 高 1.60m, 中梁两侧各悬臂 0.45m, 悬臂端部厚为 0.14 m, 悬臂根部厚为 0.22 m。顶板在箱室内净跨 1.38m, 顶板设计厚度为 0.14m, 底板中段厚度 0.15m, 端部底板加厚至 0.25m, 腹板为斜腹板, 斜坡为 0.25, 腹板中段厚度为 0.16m, 端部厚度加厚至 0.25m。考虑到箱梁存在渐变段, 中段底板、腹板比较薄, 在加上钢筋较多、较密, 故浇筑混凝土时下料、振捣都比较困难。因此, 项目部从原材料、配合比、设备、机具、工艺、人员等方面做了针对性的调整 and 安排。

(1) 30m 箱梁(中梁)混凝土约为 33.35m^3 , 混凝土使用的原材料选用以下材料:

- 1) 水泥: 采用冀东 P.042.5R 普通硅酸盐水泥。
- 2) 中砂: 采用龚刘渭河中砂。
- 3) 碎石: 凤翔县姚家沟 5~25mm。
- 4) 水: 采用经化验合格的地下水。
- 5) 外加剂: 宝鸡关中高效减水剂、宝鸡二电厂 II 级粉煤灰。

(2) 混凝土施工流程:



4.7 预应力施工

宝鸡市龚刘渭河大桥 30m 预应力混凝土箱梁钢绞线共 8 束, 中跨梁下部 6 束为每束 5 根, 上部 2 束为每束 4 根。边跨梁每束均为 5 根钢绞线。其预应力施工的工艺流程如下:

制孔 → 钢绞线制作 → 钢绞线穿束 → 钢绞线张拉 → 端头钢绞线切割 → 压浆。

施工工艺如下:

(1) 锚固端部横梁与跨中转向横肋、墩顶导向槽的施工

这三部分确定了钢绞线的空间位置,由该索形及张拉应力决定了等效荷载的大小。跨中转向横肋、墩顶导向槽钢绞线存在偏折。承受局部挤压应力,这就要求锚固端横梁处锚垫板预埋位置及方向要准确。转向横肋、墩顶导向槽的制作应严格按照图纸要求进行,既要保证弯折处的曲率半径,又要打磨端部,使之平滑,防止张拉时端部对钢绞线的挤压和卡滑。

(2) 钢绞线下料与穿束

在桥梁加固中,由于张拉完毕后,锚垫板与钢管中要灌浆,形成有粘结段,所以在下料时就应将粘结段的钢绞线的 PE 层及油脂清洗干净,控制该段的长度和位置是很难的,因为既要预先考虑到穿束过程中钢绞线下垂的影响,保证 PE 保护层预先进入密封罩,又要考虑张拉伸长的影响,保证两端伸长部分要一致,以确保两粘结段粘结力大致相等。在穿束过程中,由于钢绞线的长度在 150m 以上,中间要通过多个墩顶导向槽及跨中转向装置,无法在箱梁内进行 12 根钢绞线的整束穿索,因此采用单根穿索的方法。钢绞线的缠绕将会影响有效预应力的建立,所以必须保证钢绞线在全桥长范围内不缠绕,在实际施工中,预先将钢绞线、工作锚板孔、密封盖小孔分别编号,每束 12 根钢绞线采用单根穿索,每隔一段就用与密封罩小孔对应的橡胶垫限制钢绞线的位置,在张拉完并后发现,采用该方法使得每束钢绞线顺直且无缠绕现象,见图 4-3。

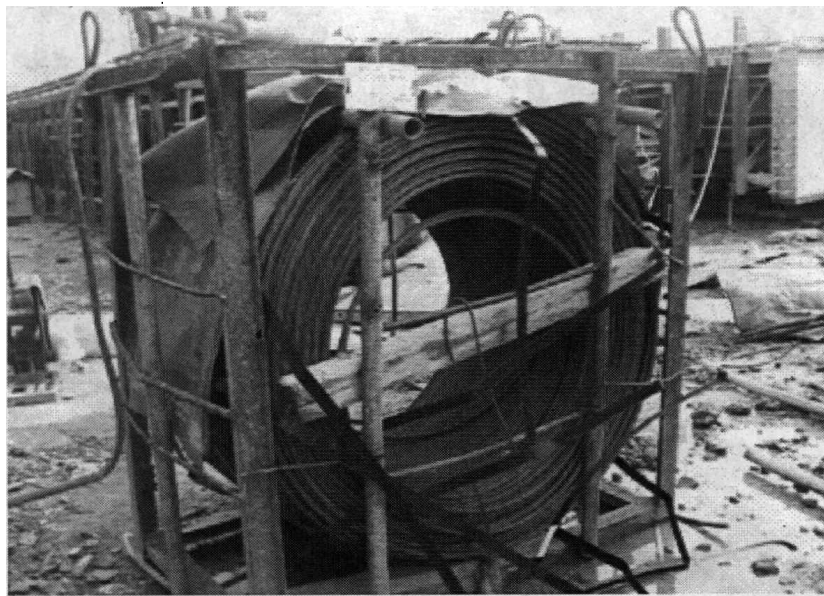


图 4-3 钢绞线的放置

Fig.4-3 The placing of the Strand

(3) 钢绞线张拉

桥梁加固采用两箱对称单根两端同时张拉,张拉过程分两部分:预紧和高应力张拉。

1) 预紧

为了达到钢绞线从松散状态到张拉完成后顺直不缠绕,正式张拉前先要进行预紧张拉,预紧的质量决定了整个加固效果的好坏。首先,钢绞线在松散状态下,即使采用了必要的措施,但是由于钢绞线很长,下垂量还是较大,所以,为保证两端粘结段长度大致相等,预紧要两端对称进行;其次,预紧力的大小既要保证在预紧过程中,钢绞线绷紧且不缠绕,又要保证在高应力张拉时钢绞线不错位,预紧力过大或过小都达不到预紧的目的。在加固施工中,预紧张拉力采用 15% 设计张拉力。

2) 高应力张拉

由于桥梁加固采用通长环氧涂层钢绞线,在张拉中需多行程连续张拉,工作夹片要进行多次锚固,在工作夹片进行临时锚固时,环氧涂层保护膜形成的碎屑将附着在夹片的齿间。随着工作夹片的反复多次夹持钢绞线,齿间环氧涂层碎屑增多,将引起滑丝现象,从而影响工作夹片的锚固效果。针对这一情况,研制出一种临时锚固装置,在中间行程中,由临时锚固装置的工具夹片夹持钢绞线,避免了工作夹片的中间临时锚固,确保锚固效果。见图 4-4。

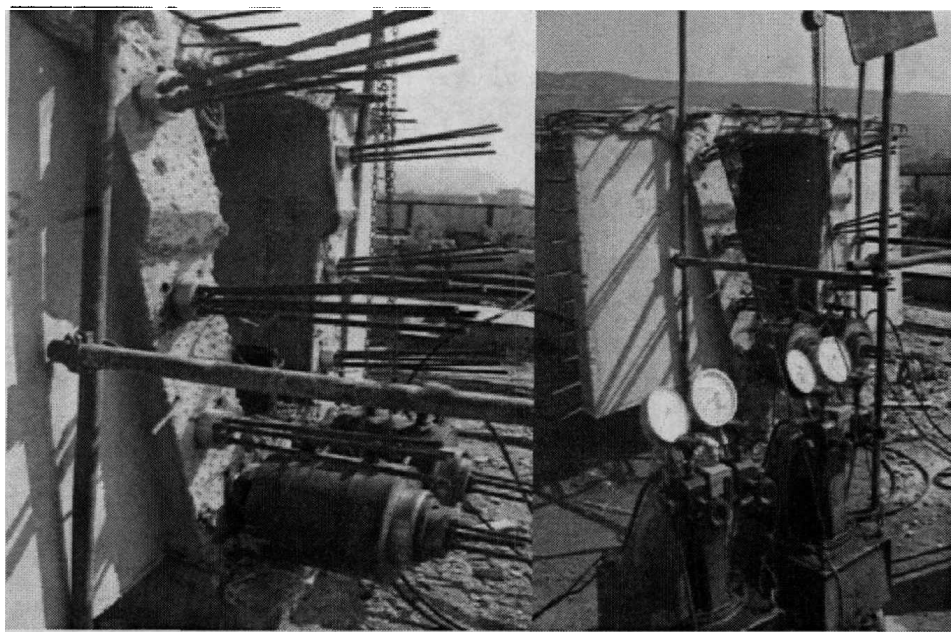


图 4-4 张拉图片

Fig.4-4 Tension picture

(4) 压浆

体外索锚固横梁采用局部有粘结形式,为了达到设计者和业主对于局部有粘结段钢绞线粘结力的要求,张拉完成后局部有粘结段的压浆工作是一道很重要的工序:施工前进行了 1:1 的模型试验,在保证压浆密实饱满的情况下,局部有粘结段的粘结力可达到设计

张拉力的 108%，满足锚固要求：工程中，压浆施工在张拉完成后 24h 内进行。压浆采用手动压浆机，保证压浆过程的均匀稳定和压浆压力的要求。

(5) 施工中的主要技术要点

1) 原桥施工情况与原桥的设计情况有差别，如箱梁翼缘的厚度，墩顶横隔梁的尺寸，在设计中要充分考虑墩顶导向槽的位置与墩顶横隔梁之间的关系，在该桥加固中，由于墩顶横隔梁的宽度大于原设计很多，结果墩顶导向槽无法施工，从而改变加固设计。

2) 由于环氧涂层钢绞线暴露在箱梁中，钢绞线的防腐尤为重要，所以在下料及穿束过程中，严禁在混凝土地面上拖拽钢绞线，穿束用的架立筋要用棉丝包裹，不能破损 PE 保护层，如有不慎，个别破损处，采用与 PE 保护层同性质的胶带缠绕。

3) 墩顶导向槽与转向装置的加工应在加工厂进行，严禁在现场加工，现场安装中，要严格按图纸进行，在运输及焊接过程中，应采取措施防止焊接变形，穿束前应拉线确定安装是否合适。

4) 预紧过程中，必须在箱梁中安排人员，在钢绞线绷紧时，进行必要的调整；高应力张拉时，观察在各墩顶导向槽和转向横肋处钢绞线是否有挤破的现象，如有该现象，应进行防护处理。

5) 压浆密实程度将直接影响粘结效果，所以在压浆中应严格控制水灰比，并保持压力均匀。

4.8 架梁施工

桥梁构件安装是一项复杂的高空作业，方法很多，结合本工程的特点及实际情况，我们选择了跨墩龙门式起重机配合双导梁穿行式架桥机架梁。跨墩龙门式起重机具有安全、方便、生产效率高的优点；双导梁穿行式架桥机，由于双导梁支撑在桥墩和已架设的桥面上，不设桥下支架，不影响桥下通车，不受河水影响，施工安全迅速、方便，但是需要的设备却较多。

本工程采用了两个 60t 的龙门吊，预制梁由平板拖车运至龙门架下，由龙门吊将预制梁吊起横移至运梁小车上。运梁小车在电机带动下，徐徐进入架桥机双导梁内，用导梁上的前行车将预制梁的前端吊起，然后慢慢前行。当梁的后端进入后行车的吊点下时，再用后行车将梁的后端吊离运梁小车，继续前进。梁行进到规定位置后，随即将导梁进行整体横移至规定位置，然后落梁就位。预制梁的安装顺序是先安两个边梁，再安中间各梁。全孔安装完毕横向焊接联系后将导梁推向前进安装下一孔。

5 结论与展望

5.1 结论

预应力混凝土箱形梁预制是一个复杂的系统工程,大量采用新技术、新设备、新工艺、新材料。宝鸡市龚刘渭河大桥工程本着安全适用、技术先进、经济合理的原则进行箱梁预制场的规划,采用工厂化生产线的管理方式,进行现场箱梁预制、存放、运输、架设的方法,不但保证了工程质量,而且使制梁生产工艺流程更为合理,有效的保证了台座、模板的循环效率;避免了箱梁的长途运输,缩短了建桥工期,经济效益十分显著。通过本文的工作,取得的研究成果如下:

(1) 本文首先回顾了预应力混凝土连续箱梁的发展历程,介绍了目前混凝土箱梁常用的一些施工方法以及施工过程中箱梁混凝土出现的不同性质的裂缝,并对裂缝的形成进行了分析;对箱梁施工中引入的新技术、新材料、新设备进行了介绍。

(2) 在箱梁模板的施工过程中,主要对制梁台座、底模、外模、内膜等进行施工。其中,因为 30m 箱梁的设计重量比较大,而且还要进行张拉施工,因此为满足工程施工需要,30m 箱梁底模的刚度应足够大且满足受力均匀的要求,我们将底模与台座设计成一体;在 30m 箱梁预制过程中,为保证外侧模板整体刚度与稳定性,外模采用定型钢模板;另外,为了便于拼装与拆除,现场内模采用拼装式工具内模进行操作。

(3) 对于钢筋的加工,首先必须对进场的钢筋进行检验并且进行力学常规试验,然后对钢筋进行除锈、调直、弯曲成型、焊接。在钢筋绑扎过程中,为了保证钢筋绑扎的精度,加快进度,梁体钢筋的底、腹板筋在台座模架上进行绑扎。箱梁钢筋绑扎,要严格控制预留钢筋的外露尺寸和位置,防止安装焊接的位置有误或搭接长度不足。

(4) 梁体混凝土的施工。本工程中 30m 连续箱梁采用单箱单室型。在混凝土施工中,混凝土拌和后,用混凝土运输罐车运到待浇梁处,混凝土入模采用场内龙门吊灰斗浇筑的方法。混凝土入模前要保证混凝土不发生离析现象。30m 预制箱梁混凝土浇筑采取连续浇筑,浇筑时采用斜向分段、水平分层的方法,在浇筑的过程中以插入式振捣为主。混凝土浇注完成初凝后,应及时进行养护,养护方法要适应根据施工季节的不同进行相应的变化。

(5) 预应力的施工。预应力成孔采用预埋波纹管成孔工艺,内穿塑胶管的方法,波纹管要求顺直和足够的抗拉强度。钢绞线下料长度按给定的长度下料,采用砂轮切割机切割。预应力张拉采用双孔锚下张拉并且压力表应与张拉千斤顶配套使用,不得混用,并要成套标定张拉机具在进场时应进行配套检查和校验。压浆的过程中,压浆机采用活塞式压浆泵,压浆泵要同水泥浆搅拌机相连接并不停搅拌,防止水泥浆凝固,压浆后布设钢筋网浇筑封锚混凝土。最后应对施工中出现的各种问题进行相应的处理。

(6) 箱梁的架设。结合本工程的特点及实际情况,选择了两个 60t 的跨墩龙门式起重机配合双导梁穿行式架桥机架梁。预制梁的安装顺序是先安两个边梁,再安中间各梁。

5.2 展望

预应力混凝土连续梁桥在我国的发展与应用虽然只有二十余年历史，但是箱梁预制、架设的工法已经得到了大面积的推广。目前，我国在设计、施工、预应力材料和设备等各个方面都取得了很大进步和一定成就，然而与国际先进水平仍存在一定差距。所以，我们需要不断地总结经验、吸取教训，在设计理论、设计规范、预应力材料和施工技术上不断完善、不断发展、勇于创新，将我国预应力混凝土梁桥的设计、施工水平推向更新的高度。

致 谢

本论文是在马斌教授的指导下完成的。马斌老师渊博的知识、严谨的治学态度、求实的工作作风、谆谆教诲给我留下了深刻的印象，不仅使我在学业上受益匪浅，而且也使我养成了在工作中一丝不苟、科学求实的作风。马斌老师基础理论扎实、实践经验丰富，在论文选题和研究过程当中，就如何进行科学的分析、论证，如何把握研究方向等方面，均给予了悉心指导，引导我逐步进入科研的殿堂，并提出严格要求。论文完成之际，在向老师的谆谆教诲表示衷心感谢之余，心中惴惴不安，因为我深知论文的质量距老师的要求和期待甚远，惟恐辜负老师的教诲和指导。

在学习和论文完成期间，西安理工大学研究生部、水电学院的各位老师，给予了极大的帮助和支持，谨此致谢！

同时，感谢我的同事、家人对我学习的鼓励、理解和支持，由于他们的支持，使我能够专心致志的学习和完成我的学业。

最后，祝所有关心和帮助过我的人们永远幸福、快乐！

徐晓辉

2009年5月于西安理工大学

参考文献

- 【1】李坚. 我国预应力混凝土连续梁桥的发展与工程实践[J]. 城市道桥与防洪, 2001, (3): 21~26.
- 【2】范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- 【3】袁雪勘. 近十年我国公路桥梁技术的发展及未来趋势[J]. 中国公路学报, 1992, 5(1): 45~49.
- 【4】曹宪武, 王永珩. 桥梁建设的回顾和展望[J]. 公路, 2002, (1): 14~21.
- 【5】袁红茵. 日本长大桥梁的现状与发展趋势[J]. 国外公路, 1997, 17(2): 27~30.
- 【6】范立础. 预应力混凝土连续梁桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
- 【7】范立础. 桥梁工程(上). 北京: 人民交通出版社. 1996: 1~17.
- 【8】Kristek, V. Theory of Box Girders John Wiley & Sons, ,1979: 42~46.
- 【9】姚玲森. 桥梁工程. 北京: 人民交通出版社. 1999: 1~25.
- 【10】J. R. Libby. Modern Prestressed Concrete Van Nostrand Reinhold Company, 1977.
- 【11】赵志刚. 预应力混凝土连续箱梁桥静动力特性分析与试验研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2007.
- 【12】张凤乐, 张静波, 高俊波. 浅谈预应力混凝土连续梁桥的施工[J]. 黑龙江交通科技, 2004, (10).
- 【13】项海帆. 世界桥梁发展中的主要技术创新[J]. 广西交通科技, 2003, 28(5): 1~7.
- 【14】李坚. 我国预应力混凝土连续梁桥的发展与工程实践[J]. 中国市政工程, 1999, (4): 14~21.
- 【15】贺铁飞. 多跨预应力混凝土连续梁桥施工控制关键问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- 【16】龚建灿. 预应力混凝土连续箱梁桥设计与施工研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2007.
- 【17】中华人民共和国交通部标准. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTJ023-85), 北京: 人民交通出版社, 1998.
- 【18】中华人民共和国交通部标准. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范(JTG D62-2004), 北京: 人民交通出版社, 2004.
- 【19】中华人民共和国交通部标准. 公路桥涵设计通用规范 (JTJ D60-2004), 北京: 人民交通出版社, 2004.
- 【20】柏华军. 移动架模若干问题研究与优化[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- 【21】黄绳武. 桥梁施工及组织管理(上)[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- 【22】王立超. 移动模架的设计、安全性监测及其实用性研究汇[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- 【23】项贻强, 张少锦, 王立超, 等. 移动模架工法的特点及其经济适用跨度分析[C]. 中国公路学会桥梁和结构工程分会 2007 年全国桥梁学术会议论文集[R], 2007.
- 【24】雷俊卿. 桥梁悬臂施工与设计. 北京: 人民交通出版社, 2000: 91~112.
- 【25】Mathivat, J. The Cantilever Construction of Prestressed Concrete Bridge. John Wiley & Sons Inc. 1983.
- 【26】Rosignl, Dying, M. Solution of the Continuous Beam in Launched Bridges Structural And Buildings, 1997, (5): 390~398.
- 【27】王贵增, 王贵岭. 浅谈预应力混凝土连续梁桥的施工方法[J]. 黑龙江交通科技, 2008, (11).

- 【28】卢树圣. 现代预应力混凝土桥梁结构的新发展[J] . 桥梁建设, 1996, (1): 41~48
- 【29】周履, 陈炳坤. 预应力混凝土桥梁的新发展[J] . 国外桥梁, 1995, (4): 281~284.
- 【30】王永珩. 我国桥梁建设的成就、现状和存在的问题[J] . 公路, 2004, (12): 155~157.
- 【31】郭丰哲, 李贞新. 走向 21 世纪的桥梁工程[J] . 四川建筑, 2004, 24(6).

附录

一、攻读硕士学位期间发表的主要论文：

1. 徐晓辉,齐苑儒.城市非点源污染研究进展[J].电网与清洁能源（已录用）.

二、硕士学位期间主持及完成的工程项目：

1. 西安市工农路道路、排水改造工程施工管理、成本控制管理。
2. 西安市团结南路道路、排水工程施工管理、成本控制管理。
3. 西安市大寨路道路、排水工程施工管理、成本控制管理。
4. 西安市南三环 C16 标施工管理、成本控制管理。
5. 西安市一环路小北门立交工程施工管理、成本控制管理。
6. 西安市第三污水厂室外管网工程施工管理。
7. 西安市莲湖路道路、排水改造工程施工管理。