

悬索桥施工技术与应用

高 华, 张 涛

(中国水利水电第五工程局有限公司, 四川 成都 610066)

摘要:悬索桥是以悬索为主要承重结构的桥梁结构类型, 主要由主缆、索塔、锚碇、钢箱梁和吊索组成。相对于其它桥梁结构, 悬索桥可以使用比较少的材料, 跨越比较长的距离。本文论述了悬索钢箱梁桥施工采用的关键技术, 沉井锚碇基础、主缆及猫道架设和钢箱梁的制作与吊装采用的施工工艺, 提高了工艺效率和质量保障程度, 所取得的经验可为同类工程建设参考。

关键词:印水桥; 锚碇; 主塔; 主缆; 钢箱; 悬索桥; 施工技术

中图分类号: [TU997]; TU7; TU5

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2023)02-0022-06

Construction Technology and Application of Suspension Bridge

GAO Hua, ZHANG Tao

(Sinohydro Bureau 5 Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610066)

Abstract: The suspension bridge, a type of bridge with suspension cables as the main load-bearing structure, is composed of main cables, rope towers, anchorages, steel box girders and slings. Compared with other bridge structures, the suspension bridge can span longer distances using less material. This paper elaborates on key technologies adopted in the suspension steel box girder bridge construction, including the construction process of caisson anchorage foundation, main cable, catwalk erection and fabrication and lifting of steel box girder, improving the efficiency and quality assurance, which can provide reference for the construction of similar projects.

Key words: Yinshui bridge; anchorages; main tower; main cable; steel box; suspension bridge; construction technology

1 概 述

湖北省黄冈市浠水河生态综合整治工程印水桥是连结浠水县主城区浠水河两岸的人行景观桥梁, 悬索桥建成后的实景见图 1。主桥采用主跨为 141 m 的平行主缆悬索桥, 矢跨比为 $f/l=1/10$, 主梁采用钢箱梁, 两侧引桥采用钢筋混凝土结构, 浠水河北岸(起点侧)梯道桥跨径布置为 (2×18) m, 浠水河南岸(终点侧)引桥跨径布置为 (2×18.5) m, 上部采用现浇钢筋混凝土空心板梁; 主桥、引桥均采用实体塔与墩身, 桥塔采用钢筋混凝土双柱结构, 桥梁标准横断面宽 6 m, 引桥桥宽 4~6 m。钢箱梁采用钢制纵、横梁结构形式, 钢桥面总长度为 141 m, 主纵梁横桥向间距为 4 m, 沿桥跨方向通长设置, 横梁标准间距为 2.5 m, 钢箱梁桥面宽度为 6 m, 梁高为 0.6 m; 吊索纵桥向间距为 5 m, 与横梁位置一致。该工程主桥、主缆、引桥采用的施工工艺流程见图 2。

2 主要施工技术

2.1 桩基锚碇结构的设计及施工

2.1.1 桩基锚碇结构的设计

主桥两侧的锚碇采用重力式, 锚碇基础采用沉井基础^[1]。锚碇前端高 9 m, 上宽 8.6 m, 下宽 11.6 m, 后端锚体高 2.5 m, 散索点距离前锚面 4.35 m, 前锚面与后锚面距离为 4 m。根据实际地质条件, 北岸锚碇锚体底部设置为 $15 \text{ m} \times 13.28 \text{ m}$ 扩大基础, 扩大基础高度为 4.1~7.6 m。

南岸锚碇锚体底部设置为 $26.5 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ (长 \times 宽 \times 高)的承台, 承台下采用沉井基础。沉井采用四孔矩形沉井, 长 15 m, 宽 12 m, 沉井壁厚 0.8 m。沉井采用分段浇筑、分段下沉方式。沉井内加 16 根直径为 1.5 m 的桩基础, 沉井底设置了 3 m 厚的钢筋混凝土承台将桩基础与沉井进行连接。沉井高度为 7.31 m, 沉井内部填充了容重为 70 kN/m^3 的铁砂混凝土压重, 沉井顶设置了厚 2.8 m 的承台, 对承台上锚体后锚

收稿日期: 2022-12-12

块尺寸加大进行压重。沉井基础前侧加两排 8 根直径为 1.5 m 的抗推桩基础,与沉井上承台进行

连接,南岸沉井桩基锚碇承台情况见图 3。

2.1.2 桩基锚碇结构的施工



图 1 悬索桥建成后实景图

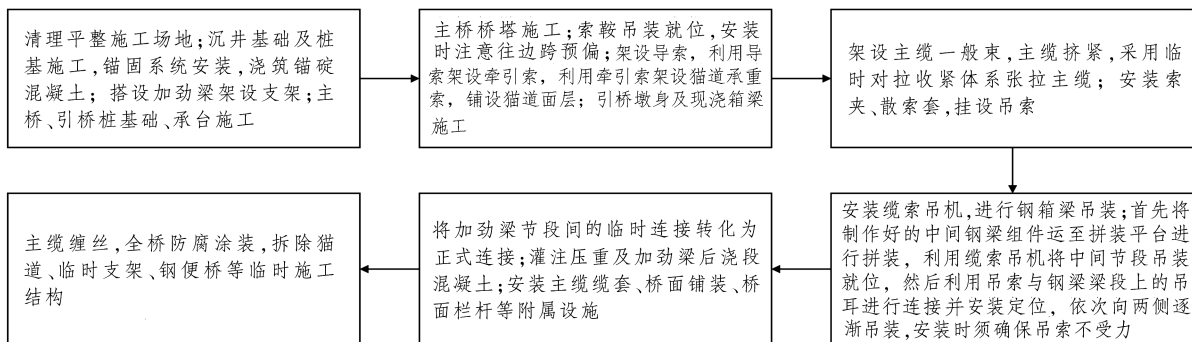


图 2 总体施工工艺流程图

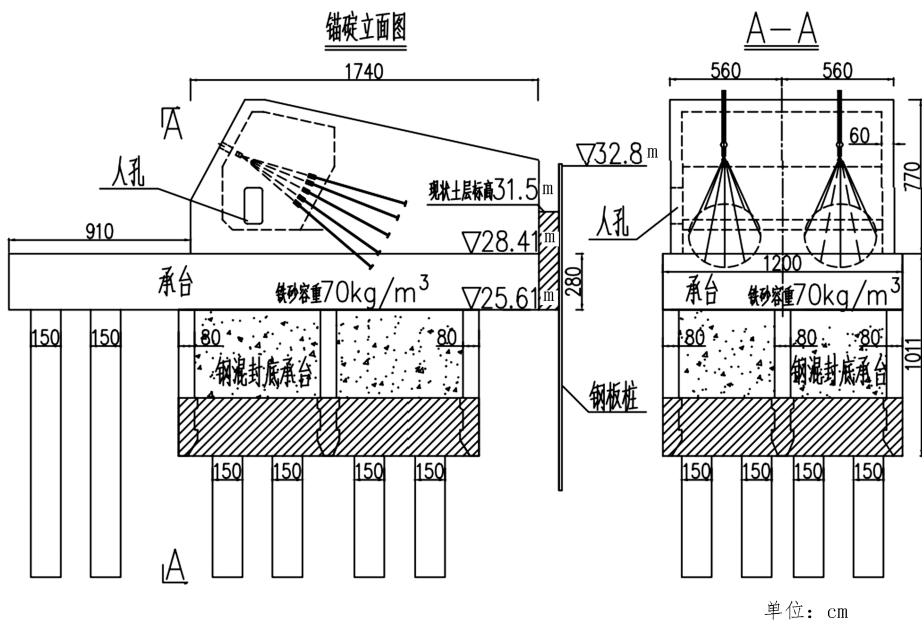


图 3 南岸沉井桩基锚碇承台图

桩基施工采用旋挖钻成孔,待钻孔深度达到标高后进行孔径、孔深及倾斜度的检查验收,验收合格后方可清孔,在吊入钢筋骨架后,再次检查沉

渣厚度不大于 5 cm(必要时进行二次清孔后方可灌注水下混凝土)。待桩基混凝土强度达到 80%后进行超声波检测检查桩身的完整性,合格后破除

桩头,安装下承台钢筋及模板并采用泵车入仓进行混凝土的浇筑。利用锚体混凝土结构之间的相互作用并采用逐层跟进的施工方法进行混凝土的浇筑^[2]。在上承台与下承台之间浇筑铁砂混凝土作为锚碇基础配重,浇筑前应做好沉井内的防水施工。锚碇基础、上下承台钢筋的安装必须严格按照设计及规范验收要求进行,上承台锚箱预埋件的位置要精确,上下承台、铁砂混凝土及锚碇浇筑过程中必须注意分层浇筑、分层振捣,浇筑完成后及时养护。

2.2 主塔结构的设计及施工

桥塔采用钢筋混凝土双柱结构。北侧桥塔柱全高 29.4 m,南侧桥塔柱全高 27.4 m。两塔柱间的横向中心间距为 8 m,塔柱之间设置横向连系梁,梁高 2 m,宽 1.8 m。塔柱截面为矩形,纵桥向和横桥向的宽度分别为 2.5 m 和 1.8 m,主塔结构见图 4。

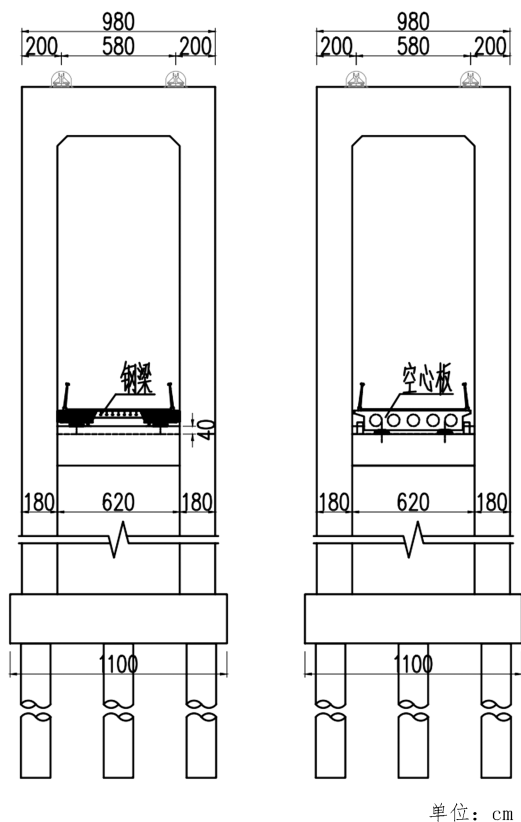


图 4 主塔结构图

主塔基础采用钻孔灌注桩基础,每个主塔布置 6 根,单根桩直径为 1.5 m,桩基纵向中心间距为 4 m,横向中心间距均为 4.2 m,桩长 9~18 m。

承台厚 2.5 m,平面尺寸为 11 m×6.5 m。

主塔桩基的施工采用旋挖钻成孔,其施工工序与锚碇桩基施工的要求一致。主塔承台为实体结构,混凝土拌制采用低热混凝土以降低大体积混凝土水化热。承台混凝土要求连续分层浇筑,且钢筋和混凝土应在无水条件下施工。施工前必须做好防水或排水措施、创造干地施工条件。

塔柱钢筋的安装必须满足规范要求,模板采用定制钢模,强度与刚度应满足施工要求,确保塔柱结构体型符合相关规范及设计要求,塔柱倾斜度的施工误差小于 1/3 000 塔高,且塔柱轴线偏差不大于 30 mm,断面尺寸偏差不大于 20 mm。为使混凝土表面光泽和颜色一致,应选用同一品种的水泥和脱模剂。混凝土浇筑应分层下料,分层厚度为 30~50 cm,且需加强振捣以确保混凝土浇筑密实,外观光洁。塔柱混凝土相邻分层浇筑的时间差应控制在 5 d 之内。接缝处理需满足相关施工规范要求,施工时应按照设计要求准确安装各部分预埋件,不得错漏。

2.3 主索鞍的架设施工

该桥塔顶鞍座采用全铸式结构,采用 ZG310-570 铸钢铸造^[3],全桥主索鞍共 4 个,布置在两岸桥塔上横梁上,主索鞍的安装分为鞍体(单件重约 2.3 t)、底板(单件重约 0.5 t)两部分,索鞍布置情况见图 5。

主塔总高度为 29.4 m,选用 QY25K5 型全液压起重机进行底板及鞍体的安装,索鞍在安装时根据设计规定的预偏量进行就位和固定,鞍体与底板板间通过锁定板连接,锁定板在鞍体顶推期间起横向限位作用,以避免鞍座顶推时鞍体发生横移和偏转。

2.4 猫道的架设施工

猫道是悬索桥上部构造施工时重要的高空工作通道和临时作业场地,线型按平行于主缆空缆线型布置。在整个悬索桥上部施工期间,猫道作为索股牵引、索股调整、主缆紧固、索夹及吊索安装、主缆缠丝防护等施工的作业平台。

2.4.1 猫道结构

为便于主缆及上部结构施工,将猫道设置在主缆中心线下方。猫道主要由承重索、扶手索、猫道面层、锚固体系等组成。单幅猫道采用三跨连续式猫道系统,中跨与边跨猫道绳连接为一体,

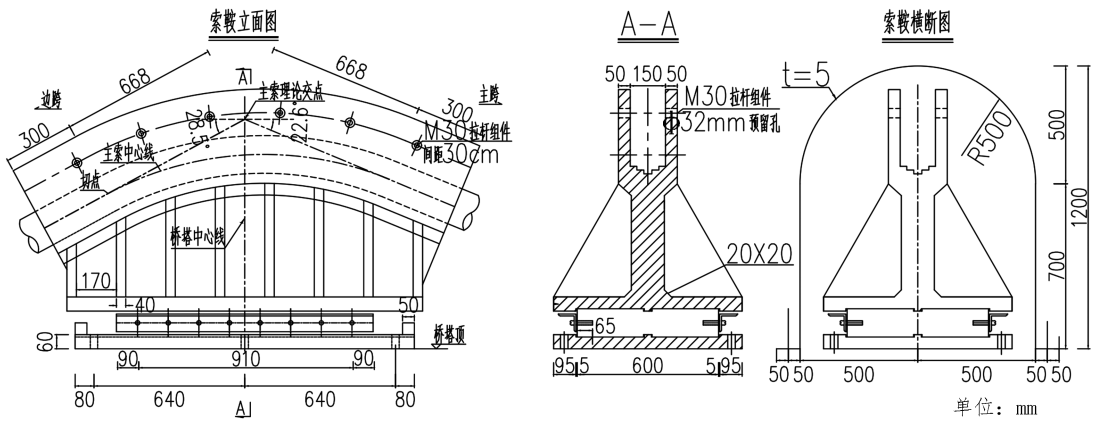


图5 索鞍示意图

猫道承重索采用6根 $\Phi 26$ mm钢芯镀锌钢丝绳,猫道栏杆立柱每侧每隔8 m设置一处,采用 $\Phi 15$ mm镀锌钢丝绳作为猫道扶手索,采用 $\Phi 10$ mm镀锌钢丝绳作为栏杆索。猫道承重索下端通过分配梁锚固在大桥桥面上,锚固系统采用 $\Phi 32$ mm精扎螺纹钢及锚梁组合结构,其中猫道锚固梁采用型钢焊接构件,猫道锚固预埋件采用钢板组焊构件。猫道面层设计宽度为3 m,面层距离主缆中心线高度为1.2 m,猫道外观见图6。



图6 猫道外观图

2.4.2 猫道施工

猫道承重索的两端通过预埋耳板锚固在锚碇上,预埋耳板的布置间距与猫道承重索间距相同,猫道需在塔顶设置转索鞍作为承重索过塔承重结构,在塔顶位置绕过主索鞍,猫道钢丝绳通过钢丝绳卡进行固定,每根钢丝绳使用6个绳卡。猫道承重索架设时,由北岸将承重索一端(预留锚接部分)与牵引索相连接,采用卷扬机牵引^[4]。当牵引索前进至北索塔顶时置于预先安装的转索鞍通

道,然后继续将其牵引至南索塔顶转索鞍通道,最后牵引承重索至南侧锚碇位置用钢丝绳卡锁紧,松开导链即可。其他承重索、钢丝绳的架设方法与边跨承重索基本一致。承重索全部架设完成后,即可施工猫道面层。

2.5 主缆架设施工

2.5.1 主缆锚固体系施工

主缆锚固系统为钢锚杆锚固体系,后端为后锚板,前端为前钢锚杆。后锚板设置于锚体钢筋混凝土内,前钢锚杆后端与后锚板连接,前端伸出锚体前锚面,通过连接平板与主缆索股锚头相连,并通过连接拉杆螺纹旋合调节索股的长度以实现无级调长。主缆索股散开后,先通过锚固连接器与锚体前锚面外的锚杆相连,通过锚杆将主缆索股力沿主缆散开方向继续扩散后再传给锚体后端的后锚板,通过后锚板的承压面将主缆索股力传给锚体混凝土^[5]。

锚体施工时,先进行锚固系统定位支架的安装,并将后锚板及锚杆利用定位支架固定安装,其安装精度必须符合相关规范及设计要求,经验收合格后浇筑混凝土。在浇筑混凝土过程中,要求精心组织,加强管理并对锚杆变位进行严密观测,防止因施工不当造成锚杆跑位、偏斜等人为事故的发生。

2.5.2 主缆结构

主缆按平行索面横向布置两根,主缆跨度布置为 $27.46\text{ m}+141\text{ m}+32.22\text{ m}=200.68\text{ m}$ 。主缆矢跨比采用1/10,横向间距为5.8 m。每根主缆由19股索股组成,每根索股由37丝、直径为5.2 mm的镀锌高强钢丝组成,极限抗拉强度为

1 670 MPa,采用平行钢丝预制束股法制作,主缆束股挤紧后外径为 154 mm,为规则的正六边形截面,锚头采用热铸锚。

2.5.3 主缆架设施工

主缆索股架设前,首先按要求安装好塔顶鞍座、散索套临时支撑架,塔顶鞍座按要求预偏并临时锁定。主缆施工采用牵引索将索股安装就位,主缆架设过程中对其线形应不定时测定以确保全桥的整体线形,主要施工步骤为:施工准备工作→架设、调试循环系统→架设基准索→基准索线型测量、调整→基准索观测→架设一般索股→一般索股线型测量、调整。索股架设分为索股牵引、横移、整形(从边跨向主跨方向依次进行整形)、入鞍、锚固等工序。主缆架设前对所有索股进行编号,架设时,首先架设 1 号基准索,然后依次架设一般索股(基准索以外的索股)。索股牵拉到位后进行索股的上提、横移、整形、入鞍工作^[6]。在上述工序施工中,严格按照施工规范及设计要求施工,每道工序施工完成后进行质量验收,验收合格后方可进行下道工序的施工。

2.5.4 索夹的安装

(1)因该桥索夹重量较轻,故在南北两岸塔顶支架间安装了承重钢丝绳作为索夹运输承重绳。索夹运输至主塔顶部后,先与牵引卷扬机连接,再通过承重绳的提升使索夹悬空,通过牵引卷扬机将索夹运输至安装位置并完成安装。

(2)安装好的索夹不能急于快速拧紧全部螺栓,应在安装的次日清晨利用水平尺调整完索夹的垂直度后再拧紧。初次索夹螺栓的紧固分为三个步骤:

①由人工用普通扳手通过加长杆进行初拧以达到固定索夹的作用;

②用校验过的扭力扳手进行螺栓紧固,并在各螺栓之间循环两次,以保证各螺栓张力均达到设计值;

③使用标定过的螺栓拉伸器对拧紧的螺栓进行抽检,若一个索夹螺栓中出现多根不达标者,则需重新校验扭力扳手并重新紧固螺栓。

2.5.5 吊索的安装

吊索是大桥主缆系统与大桥主体的连接构件,吊索上端的吊耳安装在索夹下口对应的猫道位置,剪出 50 cm×80 cm 的长方形缺口,将吊索

从方形缺口放下至桥面,用 3 t 卸扣将捆绑锚头的千斤绳与卷扬机钢丝绳连接,收紧塔顶卷扬机,拆除吊索外层包装带,吊杆将慢慢被提升至索夹位置,暂停卷扬机,用索夹两端事先准备好的手拉葫芦连接到锚杯下方,提升吊索,解除卷扬机钢丝绳,通过两端的手拉葫芦将吊索锚头的位置调整好,安装连接销和保险销,单根吊索即安装完成。

2.6 缆索吊的架设施工

结合该桥的结构形式,缆索吊索跨布置为:23.5 m(北岸边跨)+192 m(主跨)+28 m(北岸边跨)。缆索吊机额定吊重及主索的额定净吊重均设计为 35 t,主索设置两台跑车,两个吊点可独立升降,两个跑车同步运行。

2.6.1 缆索吊两岸锚固采用的预埋件安装

缆索吊在两岸的锚固采用预埋件结构,预埋于主锚碇,按类型分为主索预埋件、起重、牵引索预埋件和索鞍预埋件。

(1)主索预埋件。主索预埋件结构采用 2 m 双槽 20 型钢,埋入混凝土深度为 1.2 m。预埋件平面、立面允许偏差为 5 mm,型钢预埋件还需控制倾横桥向、顺桥向斜角度偏差不大于 0.1°。预埋件通过主锚碇内架立的钢筋固定,混凝土浇筑时必须振捣密实,确保型钢预埋件内填充密实。

(2)起重、牵引索预埋件。起重索力单根最大为 3.5 t、牵引索力单根最大为 9.5 t。由于该预埋件用于起重牵引索转向用,均采用 2 m 双槽 20 型钢,埋入混凝土的深度为 1.2 m,预埋件按最大双根牵引索力 20 t 验算。

2.6.2 缆索索鞍的设置

(1)预埋件的安装。全桥索鞍预埋件共 8 个,预埋在两岸桥塔上横梁上,采用钢板锚筋预埋件。每块钢板尺寸为 0.6 m×0.6 m,下方 L 型焊有 9 根长 0.518 m、Φ20 mm(HRB400)的钢筋,锚板顶部再焊接一块 0.6 m×0.6 m 的钢板。

(2)缆索吊索鞍的吊装。先对索鞍位置进行测量划线,定出索鞍安装中心位置,再由人工配合汽车吊将索鞍分块起吊到上横梁平台上进行安装,安装就位后,将其与预埋件焊接牢固。

2.6.3 缆索吊的安装及试吊

缆索吊安装时,此时猫道已架设完成,采用猫道上的主缆牵引系统辅助安装往复式导索。往复式导索由一根 Φ19.5 mm 钢丝绳组成,导索两端

分别进入两台 5 t 卷扬机。通过两台卷扬机的协同工作可以实现导索的往复运行,从而用于主索、牵引索和起重索的安装。缆索吊安装完毕,组织一次全面检查及试吊试验检测,其检查及试吊检测应做好详细的现场记录,以便及时处理出现的问题和备查。

2.7 钢箱梁结构及吊装施工

该桥梁结构采用钢箱梁形式,箱梁为双箱室结构,中间通过横梁进行连接(T 型结构)。箱梁宽度为 6 m,含衬嘴总宽度为 6.8 m。根据设计及制作要求,纵向分 13 个节段,横向分 2 个节段,共计 26 个节段。

梁段由工厂加工成半成品后运输至现场在桥下进行二次拼装成吊装单元。单个构件最重为 13.3 t,在现场进行二次拼装成吊装单元,吊装单元最长为 12.75 m,最重为 25.96 t。吊装单元采用 35 t 缆索吊机进行钢箱梁吊装。钢箱梁的长度分为靠近塔柱段的 12.75 m,标准节段 10 m 和跨中段 13 m,重量均不超过 26 t;缆索吊机额定吊重按 35 t 设计,可以满足吊装需要。

主梁按从中间往两岸架设的顺序施工,其中靠近塔柱附近的主梁由于其在缆索吊机的起吊盲区,可借用斜拉辅助施工。钢箱梁的吊装实景见图 7。



图 7 钢箱梁吊装实景图

主梁吊装前,检查缆索吊系统及吊具、吊耳等设备性能,待其符合吊装要求后方可启动起重卷扬机。提升过程中必须保持钢梁梁体基本处于水平状态。当吊离支承面约 30 cm 时暂停提升并保持静止约 10 min,再次检查缆索吊的起吊系统、吊耳、吊具等,确认一切正常后继续起吊。待提升至桥面设计高程以下 1 m 处,牵引卷扬机缓慢调整钢梁位置。牵引到位后,从中跨主缆下方安装人行钢梯至主梁上弦杆,作业人员上至主梁顶面板上(在梁段起吊之前,已在梁段永久及临时吊点周围相应部分安装安全网、木板及防护栏杆并绑扎牢固)。将吊索下端耳板与主梁永久吊点耳板销好并拧紧挡板。松开起吊系统,即完成一节梁段的吊装。

主梁吊装从主梁轴线控制、缆塔在主梁安装中的偏移、缆索吊缆索系统主缆垂度及索力观测

等几方面进行观测,待所有参数符合设计及相关规范要求后进行钢箱梁的焊接作业。

3 防腐处理

3.1 索鞍、散索鞍、索夹和吊索的防腐

索鞍、散索鞍、索夹和吊索的外露面必须进行喷砂除锈处理,之后喷涂环氧富锌底漆 2 道,厚度为 $2 \times 30 \mu\text{m}$;中间喷涂环氧云铁漆 2 道,厚度为 $2 \times 40 \mu\text{m}$;最后喷涂聚氨脂面漆 2 道,厚度为 $2 \times 40 \mu\text{m}$ 。索夹及散索套内的加工表面须进行喷锌处理,锌层厚度 $\geq 200 \mu\text{m}$,并在锌层上涂 $40 \mu\text{m}$ 环氧富锌封闭漆。

3.2 主缆的防腐

主缆的防护涂装应按设计图及悬索桥主缆系统防腐涂装技术的要求进行,主缆防护的施工步骤如下:刷除磷化底漆、刮涂不干性阻蚀密封胶、

(下转第 34 页)

期的对数呈正比例关系。而本次试验混凝土的立方体抗压强度不符合该发展规律。

(2)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土力学性能的发展规律类似于普通混凝土。

(3)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土的劈裂抗拉强度可以达到普通混凝土劈裂抗拉强度的 56%;再生粗骨料混合砂混凝土的轴心抗压强度均超过普通混凝土的轴心抗压强度。

5 结 语

通过对再生粗骨料混合砂配合比设计进行的研究以及力学性指标的测定分析,得出了以下主要结论:

(1)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土水灰比为 0.3 的再生粗骨料混合砂混凝土的立方体抗压强度超过了普通混凝土的抗压强度,水灰比为 0.5 与 0.6 的抗压强度可以达到普通混凝土抗压强度的 88.5%与 93.2%。虽然水灰比为 0.4 的抗压强度只能达到普通混凝土强度的 73.5%,但其还是能够满足混凝土的工作性能。

(2)普通混凝土抗压强度的发展大致与其龄期的对数呈正比例关系。而本次试验中混凝土立方体的抗压强度不符合该发展规律。对于再生粗

(上接第 27 页)

缠丝、缠丝后进行表面清洗、涂刷柔性环氧磷酸锌底漆、刮涂聚硫密封胶、涂刷白色防护氟碳面漆及防滑面层。主缆缠丝应在不干性阻蚀密封胶涂抹完毕 1 h 后进行,缠丝拉力为 2.2 kN。

3.3 索夹及散索套结构缝隙的涂装

索夹环缝、对接缝的密封涂装首先使用 MF-DJ2000F 非硫化不干性密封胶将其缝隙填充密实并采用密封胶条封闭,最后采用 MF-860F 聚硫防腐密封胶嵌缝进行整形使其外观光滑美观。

4 结 语

依次对悬索桥下部结构、索塔、主缆、猫道架设、缆索吊和钢箱梁的结构设计及施工技术进行了详细的阐述,提出了一系列的技术见解和施工经验,可为同类工程的建设提供参考。

参考文献:

骨料混合砂混凝土的立方体抗压强度随龄期之间的变化关系还需进一步进行研究确定。

(3)此次试验结果表明:再生粗骨料混合砂混凝土的力学性能的发展规律及破坏形态类似于普通混凝土。

参考文献:

- [1] 王飞. 多龄期下混合再生骨料混凝土的力学性能试验研究[D]. 华北水利水电大学,2019.
- [2] 郭琦. 再生骨料混凝土配合比设计方法与研究[D]. 华北水利水电大学,2013.
- [3] 王雪萍. 再生混凝土力学性能试验研究及其配合比优化[D]. 武汉理工大学,2008.
- [4] 肖建庄. 再生混凝土[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [5] 张允宝. 莲易公路再生骨料混凝土应用技术试验研究[D]. 长沙理工大学,2006.
- [6] 普通混凝土砂石质量检验方法标准,JGJ52-2006[S].
- [7] 普通混凝土配合比设计规程,JGJ55-2011[S].
- [8] 刘俊华,孙勇,刘凤利,张承志. 建筑垃圾再生混合砂混凝土力学性能试验研究.[J]. 混凝土与水泥制品,2014,41(5): 94-97.
- [9] 混凝土力学性能试验方法标准,GB/T50081-2019[S].

作者简介:

王治锋(1992-),男,河南商丘人,工程师,学士,从事市政工程建设技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)

- [1] 公路桥涵施工技术规范,JTG3650-2020[S].
- [2] 王滔. 双控张拉在后张预应力连续梁施工中的应用[J]. 城市建设理论研究(电子版),2015,5(15):290.
- [3] 金强,祝文斌. 独塔非对称自锚式悬索桥主缆施工的监控测量[J]. 安装,2020,40(1):27-30.
- [4] 罗涛. 黄山世纪广场观光悬索桥施工[J]. 施工技术,2002,31(5):26-28.
- [5] 康晋,舒思利,徐恭义. 金沙江白鹤滩水电站葫芦口大桥主桥设计[J]. 世界桥梁,2015,43(5):6-9.
- [6] 陈禹江,史文洁,王龙,等. 贵州抵母河大桥主缆架设与控制技术研究[J]. 建筑工程技术与设计,2017,149(3):161,585.

作者简介:

高 华(1985-),男,甘肃天水人,华中分公司副总工程师兼项目管理中心主任,高级工程师,从事市政工程桥梁建设技术与管理工作;

张 涛(1990-),男,河南漯河人,项目生管部主任,工程师,从事市政工程桥梁建设技术与管理工作。

(责任编辑:李燕辉)