

真空辅助灌注技术+自密实无收缩混凝土在CFST拱桥中的应用

苏湘华,杨占峰

(广西路桥工程集团有限公司,广西 南宁 530011)

摘要:以主跨336 m的中承式CFST拱桥马滩红水河特大桥为工程背景,重点介绍了大跨径CFST拱桥管内混凝土真空辅助灌注新技术及自密实无收缩混凝土新材料两项新技术的应用效果,进一步验证了规范的条文要求,并充实了提高CFST密实性的理论和方法,可供同类型大跨径桥梁施工借鉴。

关键词:真空辅助;无收缩混凝土;CFST拱桥;应用

1 引言

中国近20年来CFST(钢管混凝土)拱桥发展迅速、应用广泛,根据文献[1]及后续的统计数据,截至2019年1月已有450余座。该桥型发展速度快,但相关的计算理论、施工规范并未跟上,直至2013年,住建部才发布了第一本国标GB 50923—2013《CFST拱桥技术规范》。一些省份,如广西,编制了地方标准对规范进行了补充,但仍有一些技术问题未能解决。其中,制约该桥型进一步发展的一项问题就是CFST脱黏问题。文献[2—3]研究表明:CFST脱黏问题普遍存在在CFST拱桥中,一直是工程界的难题,对其极限承载力和耐久性影响较大。造成CFST脱黏的因素有许多,其中,施工和混凝土收缩是重要的原因。为解决脱

黏问题,部分专家、学者提出了一些新的施工工艺和新材料,该文介绍真空辅助灌注技术及自密实无收缩混凝土在CFST拱桥中的应用及其应用效果,以验证上述新工艺、新材料的理论,为同类桥型施工提供借鉴。

2 工程概况

马滩红水河特大桥为主桥跨径336 m的中承式CFST拱桥,全长553 m。大桥分左右两幅桥,全宽达55.8 m,主体钢结构约14 000 t。主拱矢跨比为1/4,拱轴系数为1.167。拱肋采用变高度四管桁式截面,拱顶截面高7.0 m,拱脚截面高12 m,拱圈净矢高80 m。主弦管直径1.2 m,管内灌C55混凝土,单管灌注混凝土约400 m³。大桥总体布置及横断面如图1、2所示。

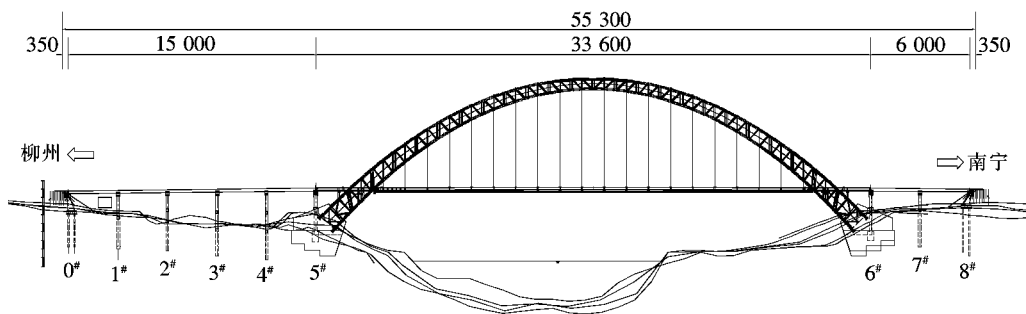


图1 马滩红水河特大桥总体布置图(单位:cm)

收稿日期:2019-05-14

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(编号:51738004)

作者简介:苏湘华,男,大学本科,高级工程师,E-mail:382114844@qq.com

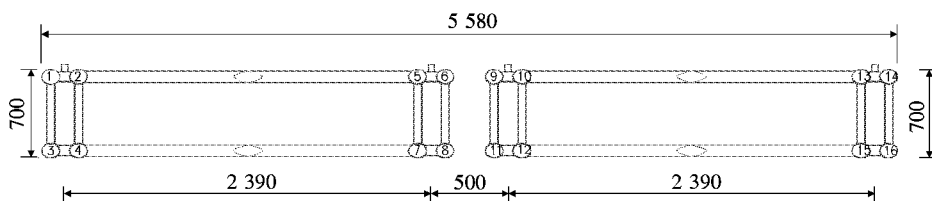


图2 马滩红水河特大桥横断面图(单位:cm)

拱肋管内混凝土采用“两岸对称,从下往上,两级接力连续泵送顶升”的方式灌注。全桥共16根主弦管,共需进行16次灌注。首先,在拱脚和拱肋2/3高度处的弦管上开设进浆孔,焊接进浆阀门。然后,在两岸拱脚处各布置两台80型混凝土输送泵,将泵管沿拱背布置,连接到进浆阀。施工时,两岸各使用4台罐车运输混凝土至泵机,用泵机连续向上压注,直至混凝土到达拱顶,然后从拱顶排出浮浆。

3 真空辅助灌注技术应用

CFST灌注时,由于混凝土含气,其在向上压注过程中不断将内部气泡内的气体释放出来,因此,会在其表面与钢管壁之间形成气囊,影响混凝土的密实性。另外,拱顶区段的弦管较平缓,管内空气易悬浮在钢管顶部,混凝土在该区段不易将其挤出,也会在混凝土与钢管壁间形成气囊,影响CFST灌注的密实性。

为排除管内空气,马滩红水河特大桥拱肋CFST灌注时参考广西地标的要求,采用了真空辅助泵送顶升压注技术。抽真空系统构造如图3所示。

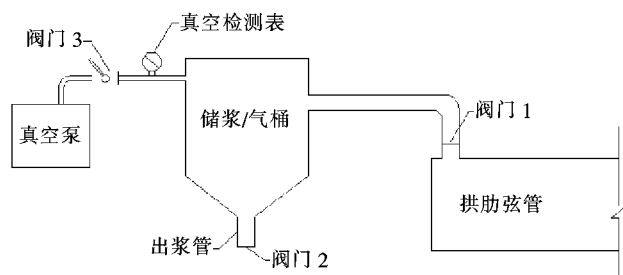


图3 抽真空系统布置示意图

(1) 抽真空系统与拱肋弦管通过拱顶出浆管连接,连接管采用高压软管。

(2) 拱肋弦管与抽真空系统设一个阀门1,阀门设于出浆管或连接管的顶部。

(3) 真空泵与拱肋弦管之间设一个储浆桶,桶的底部呈锥形,锥形底部设出浆管和阀门2。

(4) 真空泵和储浆桶之间设真空检测表和阀门3。

(5) 抽真空系统内部以及与外部的各处连接应保证牢固密封,不漏浆、不漏气。

真空辅助灌注操作步骤:

(1) 首先,在拱顶用型钢搭设施工平台,将抽真空设备安装在拱顶,并在拱肋钢管的1/8、1/4、3/8及拱顶抽真空系统处设置真空表。进行真空辅助灌注拱肋混凝土前,先提前进行空钢管试抽真空,检验设备的运转情况以及整个系统的密封性。

(2) 开始灌注后,当混凝土埋过进浆口2 m,确认进浆口不会漏气后暂停灌注,启动真空泵将弦管内空气抽出,达到 -0.08 MPa的真空度,然后继续泵送第一级管内混凝土。混凝土顶升过程中,每泵送完1车就记录一次各点的真空读数,随时保持弦管内真空度维持在 -0.08 MPa左右。

(3) 第一级泵送混凝土面接近排浆口,先将负压释放,直至弦管内恢复常压状态后,打开排浆口排出管内浮浆。浮浆排完后,关闭出浆口阀门。当第一级混凝土界面到达二级进浆管下50 cm时,打开第二级进浆管阀门,暂停第一级泵机,启动第二级泵机。直到混凝土界面高于第二级进浆管2 m时,然后启动抽真空系统,待真空度达到 $-0.075 \sim -0.086$ MPa(绝对真空现场无法达到,多次试验表明,采用 -0.08 MPa左右的真空度可实现灌注密实无气囊)时,第二级泵机继续泵送混凝土。期间,随时保持弦管内真空度维持在 -0.08 MPa左右。

(4) 当二级管内混凝土泵送到拱顶,拱顶出浆管开始出浆时,将混凝土泵送至储浆桶内至少 1.0 m^3 后,暂停二级泵机,缓慢打开空气阀门,拆开真空系统与主弦管的连接,真空系统退出工作。然后泵机继续泵送混凝土。卸除负压时,人工用铁锤敲击出浆管,靠声音辨识混凝土面在出浆管内的位置,检查混凝土是否有回落,当发现混凝土面下降后,立即通知泵机再泵进混凝土,使混凝土重新填满出浆管,确保排浆管内混凝土面不回落至钢管内,以防止空气回流至钢管。反复进行上述操作,直至负压卸载完毕。

(5) 真空系统退出后,二级泵机继续泵送混凝土,

拱顶出浆管不断排出浮浆,当管口浮浆排尽,出现良好混凝土后,暂停泵送,静置 10 min。然后泵送两下,再静置 10 min。当出浆管内无明显气泡后,关闭二级进浆管阀门,完成单条主弦管浇筑。

灌注过程中,现场技术人员详细记录每泵送完 1 车混凝土后各处真空表的读数,该文选取有代表性的一次真空度记录(左幅上游内侧下弦管)进行分析,具体如表 1 所示。

表 1 真空度检测记录(南宁岸半拱数据)

序号	混凝土灌完时间	混凝土到达位置	不同钢管位置真空度/MPa		
			1/4 读数	3/8 读数	拱顶读数
1 车	12:35	砂浆润管,无混凝土	未开	未开	未开
2 车	12:55	倒流段	未开	未开	未开
3 车	13:25	第 1 个进浆口往上 1.5 m	-0.078	-0.078	-0.079
4 车	13:50	第 2 个接头往下 2 m	-0.081	-0.081	-0.081
5 车	14:15	第 2 个接头往上 4 m	-0.078	-0.078	-0.078
6 车	14:35	第 3 个接头往下 1.5 m	-0.075	-0.074	-0.074
7 车	14:54	第 3 个接头往上 4 m	-0.081	-0.083	-0.083
8 车	15:17	第 4 个接头往下 1.5 m	关闭	-0.074	-0.074
9 车	15:35	第 4 个接头往上 4 m	关闭	-0.079	-0.079
10 车	16:00	第 5 个接头位置	关闭	关闭	-0.082
11 车	16:18	第 6 段拱肋中间	关闭	关闭	-0.078
12 车	17:35	第 6 个接头位置	关闭	关闭	-0.077
13 车	18:25	第 7 段拱肋中间	关闭	关闭	-0.079
14 车	19:15	开始二级泵送	关闭	关闭	未开
15 车	19:50	第 8 段拱肋中间	关闭	关闭	-0.080
16 车	20:15	第 8 个接头位置	关闭	关闭	-0.078
17 车	20:38	第 9 段拱肋中间位置	关闭	关闭	-0.078
18 车	21:02	第 9 个接头位置	关闭	关闭	-0.079
19 车	21:25	第 10 个接头往下 2 m	关闭	关闭	-0.082
20 车	21:57	第 11 段拱肋中间偏下 1 m	关闭	关闭	-0.083
21 车	22:22	第 11 段与 12 段拱肋管底部	关闭	关闭	-0.075
22 车	22:53	第 11 段与 12 段拱肋管底部	关闭	关闭	-0.075

从表 1 可看出:CFST 灌注过程中,管内始终维持 -0.08 MPa 左右的负压。马滩红水河特大桥共 16 根主弦管,均采用了真空辅助灌注。

4 自密实无收缩混凝土

为解决管内混凝土间的脱空问题,大桥项目组研发了可控制可设计膨胀混凝土。原理是在混凝土中掺加 CaO 和 MgO 两种新型膨胀剂,利用特制的 CaO 类膨胀组分实现强度生成过程中的早期膨胀,利用高活性 MgO 类膨胀组分实现中期膨胀,利用低活性 MgO 膨胀组分实现后期膨胀,通过采用不同活性膨胀组分多元复合,实现硬化混凝土分阶段、全过程的收缩抑制,达到无收缩的目的。

传统补偿收缩混凝土可补偿一定的收缩量,JGJ/

T 178—2009《补偿收缩混凝土应用技术规程》要求 28 d 限制膨胀率为 -0.01%,未能做到真正的无收缩。项目组参照该规程对自密实无收缩混凝土提出了更高的试验控制指标,具体如表 2 所示。

表 2 自密实无收缩混凝土体积变形控制指标

项目	限制膨胀率/%		自生体积变形/%	
	水中 14 d	水中 14 d 转空气 28 d	7 d	28 d
规范要求	≥0.020	≥-0.030	—	—
该文试验 控制指标	≥0.025	≥-0.015	≥0.020	≥0.010

为确保混凝土达到设计的性能,使用磨圆整形的碎石作为混凝土骨料,以提高其工作性能及骨架密实性;使用优质的天然砂作为细集料;以及使用 I 级粉煤

灰和 42.5 级硅酸盐水泥。

经多次试验后,得出了混凝土的配合比,满足上述指标要求。项目组还进行了 1:1 的 CFST 收缩试验。试验采用 3 根直径 1.2 m 的钢管,每根 3 m 高,分别进行基准(不掺膨胀剂)、单掺(掺 1 种膨胀剂)、双掺(掺两种膨胀剂)3 种混凝土的收缩对比。在钢管中心布置了径向及轴向应变计,测试其混凝土浇筑完成后的内部温度及变形历程。采集了 50 d 的数据(图 4),图 4 显示,双掺混凝土的性能较优,从灌注完成至 50 d 龄期一直呈微膨胀状态,未发生收缩。

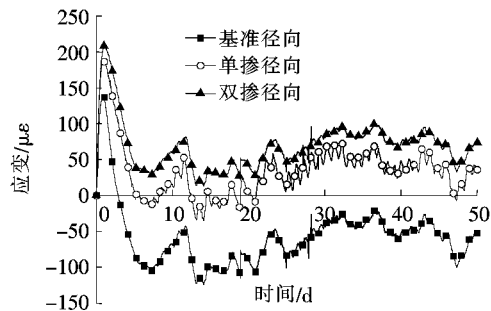


图 4 试验管混凝土轴向应变历程

采用双掺混凝土进行实桥灌注,配合比见表 3。

表 3 自密实无收缩混凝土配合比									kg
水泥	粉煤灰	矿粉	硅粉	膨胀剂	砂	碎石	水	减水剂	
400	45	25	10	50	711	1 052	157	12.19	

采用表 3 配合比,得到混凝土坍落度为 180~220 mm,扩展度为 580~650 mm,工作性能良好,实桥灌注较成功。混凝土灌至拱顶,从出浆管排出后,浮浆也较少。

5 CFST 成形效果检测

由图 4 可知:灌注完 3 d,混凝土尚未开始收缩。在 3 d 龄期时采用敲击法和超声波对整条 CFST 的灌注密实性进行检查,各测区检测结果如表 4 所示。

表 4 显示,3 d 龄期 CFST 灌注饱满性好,填充密实,真空辅助灌注有效。

对 28 d 龄期的 CFST 采用超声波法检测其黏结情况,采集了声速、波幅和波形等数据及图形,各测区检测结果如表 5 所示。

同时,在拱顶弦管内埋设两个应变计进行混凝土变形测定,从灌注完成开始,连续自动测量和记录,结果如图 5 所示。

表 4 CFST 检测结果(3 d 龄期)

位置	敲击声音	声速/(km·s ⁻¹)
Z3#下弦管 0#拱脚	沉闷	4.710
Z3#下弦管 1/8 截面	沉闷	4.225
Z3#下弦管 1/4 截面	沉闷	4.223
Z3#下弦管 3/8 截面	沉闷	4.134
Z3#下弦管 1/2 截面	沉闷	4.489
Z3#下弦管 5/8 截面	沉闷	4.601
Z3#下弦管 3/4 截面	沉闷	4.293
Z3#下弦管 7/8 截面	沉闷	4.140
Z3#下弦管 1#拱脚	沉闷	4.604

注:各测区波形均正常、清晰。

表 5 左幅上游内侧下弦管 CFST 超声波检测结果(28 d 龄期)

测区位置	声速/(km·s ⁻¹)		波幅/dB	
	均值	标准差	均值	标准差
Z3#下弦管 0#拱脚	5.120	0.021	63.72	2.536
Z3#下弦管 1/8 截面	4.485	0.197	43.10	1.916
Z3#下弦管 1/4 截面	4.646	0.100	49.10	6.313
Z3#下弦管 3/8 截面	4.475	0.068	40.62	3.089
Z3#下弦管 1/2 截面	4.909	0.027 7	59.22	0.704
Z3#下弦管 5/8 截面	5.015	0.030 0	52.11	1.482
Z3#下弦管 3/4 截面	4.705	0.024 6	49.51	3.492
Z3#下弦管 7/8 截面	4.540	0.039 8	39.71	2.238
Z3#下弦管 1#拱脚	5.011	0.031 4	53.82	2.546

注:各测区波形均正常、清晰。

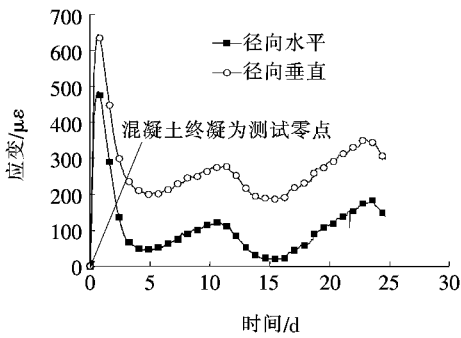


图 5 实桥混凝土钢管内中心混凝土轴向应变历程

从图 5 可看出:混凝土的变形曲线在前 3 d 呈上升趋势,而后下降,从第 5 d 开始呈平缓,但一直保持正应变状态,采用双掺膨胀剂制作自密实无收缩混凝土是成功的。150 d 龄期后,对部分声速值低于 4.5 km/s 的部位进行钻孔验证,未发现脱黏现象。灌水检查也无渗漏现象。

基于单轴拉伸试验的水稳碎石损伤本构方程研究

孙雅珍¹, 房辰泽^{1,2}, 李凯翔¹, 洪媛³

(1.沈阳建筑大学 交通学院, 辽宁 沈阳 110168; 2.大连海事大学 交通运输工程学院; 3.沈阳建筑大学 理学院)

摘要: 为了建立材料的损伤本构方程, 针对不同龄期的水泥稳定级配碎石开展了单轴拉伸试验。根据不同龄期试验结果, 研究了水泥稳定级配碎石抗拉强度与龄期之间的关系。通过拟合材料本构关系, 建立了本构方程。基于 Mazars 损伤模型, 提出了材料单轴拉伸状态下的损伤模型和损伤本构方程。结果表明: 水泥稳定级配碎石前 28 d 的抗拉强度快速增长, 28 d 后抗拉强度的增长速率下降, 对数函数可以很好地表征龄期与抗拉强度的关系; 建立的本构方程可以从数学角度反映水泥稳定级配碎石的应力应变关系, 但不能揭示材料的损伤演化过程; 单轴拉伸状态下水泥稳定级配碎石的非线性损伤演化过程由 3 阶段组成; 损伤本构方程比本构方程可以更好地表征水泥稳定级配碎石的 3 阶段损伤演化过程和应力应变关系。

关键词: 损伤本构方程; 单轴拉伸试验; 水泥稳定级配碎石; 损伤模型; 损伤演化

中国道路建设行业在经济快速发展的大环境下已经取得长足发展, 水稳基层材料被广泛地应用于中国沥青路面结构的基层。水泥稳定级配碎石这种路面基层常用材料是一种典型的准脆性材料, 如工程中常用的岩石、混凝土等也是准脆性材料。水泥稳定级配碎石的承载能力在其承受的荷载达到极限荷载后开始下降, 同时会出现应变软化和应力跌落现象。

采用 90 d 的强度指标对沥青路面结构的基层进行设计, 及时地保湿养生可以避免结构材料的干燥收缩裂缝, 但由于受施工季节及工期所限, 许多高速公路在养生 7 d 后即进行基层的铺筑, 造成了施工期即产生了路面结构的内部损伤。水稳基层材料往往抗压而

不抗拉, 在实际路面结构中水稳基层的破坏一般为受拉开裂破坏。单轴拉伸试验可以准确地反映材料拉伸状态下的受力状态, 可以用来很好地研究水泥稳定级配碎石的力学性能以及损伤演化过程。掌握单轴拉伸作用下的损伤演化规律并建立相应的损伤本构方程, 对于解决水稳基层的开裂破坏问题有着十分重要的工程意义。

在道路工程中, 一般将水稳基层材料视为连续均匀介质, 少有学者运用损伤力学理论研究水稳基层材料的损伤演化。Judyci J. 等对基层材料在重复加载过程中的回弹模量变化规律进行了研究; 杨磊以水泥稳定级配碎石为研究对象, 通过分析抗拉强度的衰减

6 结语

要提高 CFST 的密实性, 减少和杜绝混凝土与钢管间的脱空现象, 可先采用真空辅助灌注技术将混凝土灌满, 其次, 使用自密实无收缩混凝土, 使其在钢管中不产生收缩。事实证明, 上述新技术和新材料的联合应用可大幅提高 CFST 的质量及耐久性, 同时提高拱肋的极限承载力, 这亦是 CFST 拱桥迈向更大跨径的保障和途径。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国 CFST 拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017(6).
- [2] 殷迅. 温度对 CFST 拱桥管内混凝土脱粘的影响[J]. 公路交通技术, 2013(5).
- [3] 苏永亮, 焦楚杰, 张亚芳, 等. CFST 脱空问题的研究进展[J]. 钢结构, 2013(3).
- [4] DB45/T 1097—2014 CFST 拱桥施工技术规范[S].
- [5] JGJ/T 178—2009 补偿收缩混凝土应用技术规程[S].

收稿日期: 2018-10-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 51478276); 辽宁省自然科学基金资助项目(编号: 20170540770)

作者简介: 孙雅珍, 女, 教授, 博士生导师. E-mail: syz16888@126.com