

支架或临时墩,施工便捷。

π 型梁梁高 1.6 m,支座处及跨中各设置一道横隔板,横隔板高 147.5 cm,厚 15 cm。 π 型梁顶板宽 3.4 m,顶板厚 10 cm,湿接缝宽 30 cm。跨中截面如图 2 所示,顶板与腹板加液尺寸为 37 cm $\times$ 10 cm,腹板厚 16 cm,马蹄宽 40 cm,高 12.5 cm;支点截面如图 3 所示,顶板与腹板加液尺寸为 35 cm $\times$ 20 cm,腹板厚 20 cm,马蹄宽 40 cm,高 45 cm。距梁端 1 m 位置腹板厚度开始变化,变化长度为 2 m。

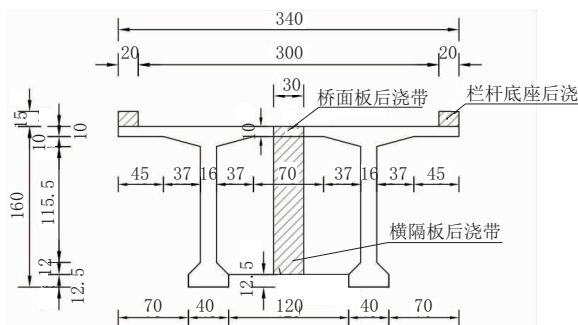


图2 主梁跨中截面(单位:cm)

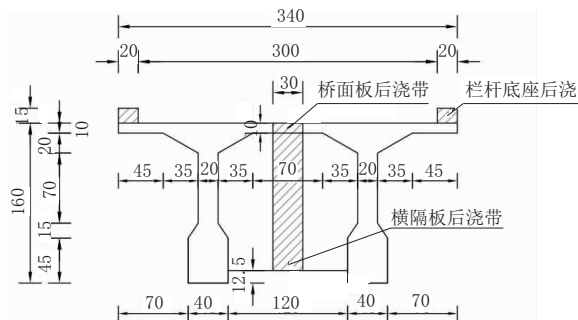


图3 主梁支点截面(单位:cm)

中跨 34 m 跨径,纵桥向分三段预制,各梁段间结合面采用剪力键齿和环氧树脂接缝,在预压状态下拼接为整体,其中最大节段长度约 13 m。

2.3 预应力布置

主梁为预应力 UHPC π 型筒支梁,采用体内预应力体系,纵桥向按全预应力混凝土构件进行设计。 π 型梁纵向预应力采用 $\phi^*15.2$ 钢绞线,标准强度 $f_{pk}=1\ 860$ MPa,锚下张拉控制应力 1 302 MPa,采用塑料波纹管成孔真空压浆,锚具采用与之配套的夹片锚。典型 34 m 跨径,顶板设置两孔 7 根 $\phi^*15.2$ 钢绞线,底板设置两孔 15 根 $\phi^*15.2$ 钢绞线,均设置于腹板中心线,待两片 T 梁形成 π 型梁且 UHPC 强度达到设计强度的 85%时,方可两端对称张拉钢绞线,钢束张拉顺序为 N1 $\rightarrow$ N2。主梁预应力布置断面图如图 4、图 5 所示。

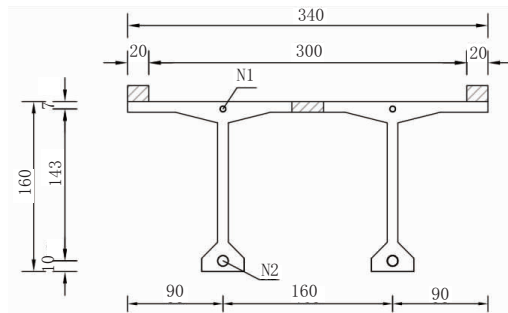


图4 跨中截面预应力布置图(单位:cm)

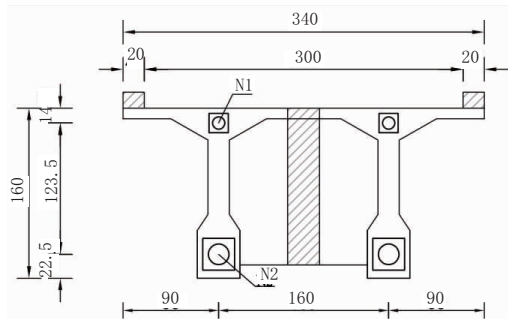


图5 支点截面预应力布置图(单位:cm)

2.4 普通钢筋配置

主梁为预应力构件,全截面受压,纵向普通钢筋不参与受力,仅满足最低构造要求配置普通钢筋。梁底纵筋直径 16 mm,其余纵筋直径 10 mm,间距 130~200 mm,桥面板横向钢筋直径 12 mm,间距 200~400 mm,腹板设双肢箍,箍筋直径 10 mm,跨中间距 400 mm,支点位置加密至 200 mm,以满足抗剪承载力要求。

3 UHPC 材料参数

与常规混凝土材料相比,UHPC 材料的组分去除了粒径大于 1 mm 的粗骨料,代之以石英砂、石英粉,并掺入一定比例的粉煤灰、硅灰、高效减水剂和钢纤维,进而形成一种低孔隙率、低水胶比、含有较高比例微细短钢纤维的纤维增强水泥基复合材料,具有超高强度、超高韧性、低渗透性和高体积稳定性等性能特点^[4],抗压强度是常规混凝土的 2 倍以上,轴拉强度是 4 倍以上,弯折强度是 6 倍以上。

本项目 UHPC 材料,规格为 RPC140,其力学指标依据湖南省地方标准《活性粉末混凝土结构设计规程》(DBJ43/T 325—2017)取值,纤维采用镀铜钢纤维,抗拉强度 $\geq 2\ 000$ MPa,规格为 0.2 mm $\times$ 20 mm,体积掺量取 2%。具体参数见表 1。

4 计算分析

4.1 承载能力极限状态

构件正截面承载能力应按下列基本假定计算:

表 1 RPC140 力学指标汇总 单位:MPa

弹性模量	剪切模量	泊松比	承载能力 极限状态		正常使用 极限状态	
E_c	G_c	ν	f_{ck}	f_{tk}	f_c	f_t
4.52×10^4	1.808×10^4	0.2	98	8.6	68	5.9

注: f_{ck} 为抗压强度标准值, f_{tk} 为轴心抗拉强度标准值, f_c 为抗压强度设计值, f_t 为轴心抗拉强度设计值。

(1)构件弯曲后,其变形后仍然为平面,并且同变形后的杆件轴线垂直;

(2)截面受拉超高性能混凝土的抗拉强度不予考虑;

(3)纵向体内钢筋的应力等于钢筋应变与其弹性模量的乘积。

斜截面抗剪承载力的计算按式(1)计算:

$$\gamma_0 V_d \leq V_u \tag{1}$$

其斜截面抗剪承载力 V_u 应按式(2)计算:

$$V_u = V_c + V_f + V_p \tag{2}$$

式中: γ_0 为桥梁结构的重要性系数; V_d 为剪力组合设计值; V_u 为构件斜截面抗剪承载力; V_c 为超高性能混凝土基体抗剪承载力设计值; V_f 为构件斜截面上纤维抗剪承载力设计值; V_p 为构件斜截面上预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值。

其中,超高性能混凝土基体抗剪承载力设计值 V_c :

$$V_c = \frac{0.24}{\gamma_c} k_N (f_{cuk} - 15)^{\frac{1}{2}} b z \tag{3}$$

式中: f_{cuk} 为立方体抗压强度标准值,按本文表 1 取值; b 为矩形截面宽度或 T 形截面腹板宽度; z 为弯矩作用下构件的内力臂,取 $z=0.9 h_0$; h_0 为截面受压边缘到纵向受拉钢筋的距离,取 $h_0=7/8 h$; k_N 为荷载或预应力提高系数; γ_c 为超高性能混凝土材料分项系数,取 1.45。

纤维抗剪承载力设计值 V_f :

$$V_f = \frac{A_{fv} \sigma_f}{\tan \theta} \tag{4}$$

$$\sigma_f = 0.62 \times \frac{1}{\varepsilon^* - \varepsilon_{el}} \int_{\varepsilon_d}^{\varepsilon^*} \sigma_f(\varepsilon) d\varepsilon \tag{5}$$

$$\varepsilon^* = \max(\varepsilon_u, \varepsilon_{u,lim}) \tag{6}$$

式中: ε_u 为承载能力极限状态最大弯拉应变计算值; $\varepsilon_{u,lim}$ 为超高性能混凝土抗拉极限应变; ε_{el} 为超高性能混凝土弹性极限应变。

预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值 V_p :

$$V_p = 0.75 f_{pd,i} \sum A_{p,i} \sin \theta_{p,i} \tag{7}$$

式中: $f_{pd,i}$ 为体内预应力筋抗拉强度设计值; $A_{p,i}$ 为斜截面内弯起体内预应力钢筋的截面面积; $\theta_{p,i}$ 为体内

预应力筋弯起钢筋(在斜截面受压端正截面处)的切线与水平线夹角。

矩形、T 形和 1 形截面的受弯构件,其抗剪截面尺寸应符合下列要求:

$$\gamma_0 V_d \leq 2.3 \frac{\alpha_{cc}}{\gamma_c} b z (f_{cuk} - 15)^{\frac{2}{3}} \tan \theta \tag{8}$$

式中: α_{cc} 为荷载长期效应系数,取 0.85; γ_c 为超高性能混凝土材料分项系数,取 1.45; b 为腹板厚度; z 为弯矩作用下构件的内力臂,取 $z=0.9 h_0$; f_{cuk} 为立方体抗压强度标准值; θ 为临界斜裂缝与梁轴线间夹角,建议取值不小于 30° 。

抗弯承载力依据湖南省地方标准《活性粉末混凝土结构设计规程》(DBJ43/T 325—2017)相关条文公式计算,从模型提取内力进行验算,具体结果见表 2。

表 2 抗弯、抗剪承载力验算

跨中最大弯矩 / (kN·m)	抗弯承载力 / (kN·m)	支点最大剪力 / kN	抗剪承载力 / kN
7 818.8	8 867.0	963.6	1 798.1

由表 2 验算结果可知,主梁正截面抗弯承载力、斜截面抗剪承载力均满足规范要求。

4.2 正常使用极限状态

本项目主梁为预应力 UHPC π 型筒支梁,受力模式简单,采用 MIDAS Civil 2020 软件建立 34 m 典型跨径主梁单梁模型,模拟了各施工过程及运营阶段受力情况,主梁按全预应力混凝土构件进行验算。主梁有限元模型如图 6、图 7 所示。

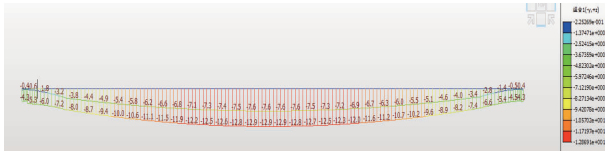


图 6 π 型梁上缘应力包络图(单位:MPa)

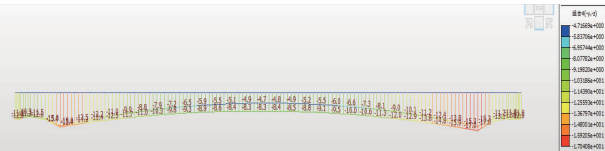


图 7 π 型梁下缘应力包络图(单位:MPa)

从以上计算结果可得,持久状况正常使用极限状态正截面上、下缘均为压应力,表明主梁全截面处于受压状态,跨中下缘压应力储备 3 MPa。

同时采用 MIDAS FEA 3.7.0 软件建立 34 m 典型跨径主梁实体模型与单梁模型进行对照验算,发现实体模型跨中下缘压应力储备为 2.5 MPa 与单梁模型结果相近,表明 UHPC π 型筒支梁受力满足平

截面假定等初等材料力学假定,单梁模型计算结果可满足工程要求。

5 施工过程

UHPC 优越的工程使用性能,得益于其各组分适当的配合比以及高温蒸汽养护,其施工要求较常规混凝土严格许多,现场浇筑条件有限,质量难以保证,所以一般为工厂预制品。

本项目 UHPC 材料配合比设计符合《活性粉末混凝土》(GB/T 31387—2015)要求,并达到设计需求的各项力学指标。UHPC 材料原材料、搅拌、运输、浇筑、养护等符合湖南省地方标准《活性粉末混凝土结构设计规程》(DBJ43/T 325—2017)相关要求。

主要施工步骤^[5]为:

- (1)在工厂分节段预制 UHPC 梁,并蒸汽养护成型;
- (2)节段临时拼装,在接缝处采用硅酮硫密封胶,安装预应力管道密封圈,移动待拼梁段,准确对位拼接,初张拉使环氧树脂在不小于 0.3 MPa 的压力下固化;
- (3)浇筑湿接缝,形成 π 型梁;
- (4)对称张拉预应力,压浆封锚;
- (5)运输、整孔吊装就位;
- (6)施工桥面系及附属设施。

主要施工过程现场照片如图 8、图 9 所示。

6 结 语

超高性能混凝土(UHPC)材料具有优良的力学性能,在桥梁工程中的实践案例越来越多。本项目首次在桥梁主体结构中大规模应用了 UHPC,取得了一定成效——不到 40 天时间,18 座人行天桥主梁全部架设完毕,缩短了工期;相比原设计钢结构天桥,建安



图 8 绑扎钢筋



图 9 π 型梁成型

费节约了约 10%,建设效果良好。表明 UHPC π 型梁是一种有竞争力的人行天桥方案,特别是大规模应用时,相比钢结构有经济优势,具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 章烽锋.超高性能混凝土(UHPC)在桥梁改建工程中的应用[J].广东交通科技,2019,45(5):31-34.
- [2] 陈宝春,季韬,黄卿维,等.超高性能混凝土研究综述[J].建筑科学与工程学报,2014,31(3):1-24.
- [3] 管亚萍.预制超高性能混凝土 π 形梁桥的设计与初步试验[D].湖南长沙:湖南大学,2016.
- [4] 阳琴.超高性能混凝土在城市人行天桥中的应用[J].福建建材,2020(11),71-73.
- [5] 管亚萍.RPC 的力学性能及在桥梁工程中的应用前景研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.

(上接第 82 页)

- [6] Bro 2004, Vaagverkets allmänna tekniska beskrivning för nybyggande och förbättring av broar[S].
- [7] EN 03, Design of Footbridges Guideline[S].
- [8] JRC, Design of lightweight footbridges for human induced vibrations

[S].

- [9] CJJ 69—201X, 城市人行天桥与人行地道技术规范(征求意见稿)[S].
- [10] Hartog, De J P. Mechanical Vibrations /-4th ed[M]. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1956.