

广州南沙大跨径坦拱人行桥总体设计

高 涛¹, 陈娟婷²

(1.广州市南沙区建设中心, 广东 广州 511458; 2.东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096)

摘 要: 聚星桥人行桥项目采用大跨径坦拱结构, 在软土地基条件下修建存在巨大困难。设计团队为了解决坦拱结构水平推力的问题, 巧妙设计了 V 墩结构从铰接可转到张拉释放拱内压力、再到固接不可转的可变受力状态。通过严密的计算与分析, 该过程将拱体系部分转化为了梁体系, 实现了水平推力的显著降低。在对实际结构施工过程的监控中, 采集的数据为理论分析提供了很好的佐证。"后拉杆调控水平推力"的方法为实现在软土地基上建造大跨径坦拱结构探索了一种新的可能。

关键词: 坦拱结构; 软土地基; 体系转换; V 墩; 铰接转固接

中图分类号: U442.5+3

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)11-0122-04

1 工程概况

聚星桥人行桥项目地处广州市南沙新区蕉门河中心区中轴腹地的中央商务区。项目方案以“三地联手”为设计概念, 使用拱结构横跨蕉门河与乌洲涌交汇处, 以实现用最短距离便捷连通三岸, 如图 1 所示。桥梁采用三肢结构汇聚于中心, 形成浪漫舒适的水上休闲空间。桥面拱结构与桥上的顶棚及栏杆等结构浑然一体, 打造全钢结构外露的三维曲面造型。桥梁内部采用防腐木、钛锌板、钢化玻璃等材质饰面, 以坐凳、花箱、灯光亮化等方式提升功能, 打造科技型兼舒适型的通行与休闲体验。



图 1 人行桥鸟瞰效果图

2 工程建设条件

本工程项目场地基本稳定, 适宜工程建设, 但在较厚软土层, 地表 25 m 范围内基本为淤泥或淤泥

质土。

桥下目前无通航要求, 蕉门河规划为 VI 级航道, 最高通航水位为 4.8 m, 河口宽度为 80 m。乌洲涌无通航要求。蕉门河常水位高程为 5.0 m, 50 a 一遇洪水位高程为 5.8 m。

为了与创享湾的多层建筑相协调, 保证区域建筑与景观的和谐性, 给人以开阔的沿河视野, 聚星桥人行桥设计时需控制尺度, 故顶棚高程最终确定为 21.2 m, 如图 2 所示。为使得内部空间开阔舒适, 不产生压抑感, 中庭高度需要达到 5.5~6.5 m, 因此桥面中心的高程仅能控制在 14.8 m, 使得桥梁的矢高仅有 8.4 m。在桥梁计算跨径达到近 160 m 的前提下, 建筑师希望结构的根部高度不得超过 3 m, 而中心结构的高度不得超过 1.2 m, 因此为了营造桥梁飘逸轻盈的外观效果, 纯粹的曲梁结构无法实现, 只能考虑建造有推力的拱结构体系。因为相比梁结构来说, 在相同材料利用率的前提下, 拱结构在抗弯和抗剪方面的能力要强很多^[1]。但是, 其缺点也非常明显, 即会产生和轴力相当的水平推力, 且有推力坦拱结构(矢跨比约 1/20)在软土地基上建设的难度异常巨大^[2]。

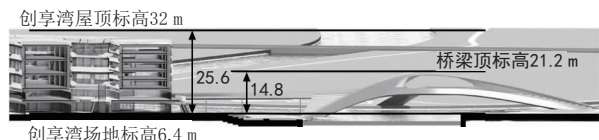


图 2 人行桥与周边区域高程示意(单位:m)

3 主要技术标准

桥梁净宽: 不小于 6 m。

收稿日期: 2023-12-10

作者简介: 高涛(1982—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事市政建设管理工作。

桥面纵断面:最大纵坡 12.5%,竖曲线半径 300 m。
桥梁设计工作年限为 100 a,环境类别 I-C 级,抗震设防烈度为Ⅶ度,地震分组为第一组,设计基本地震加速度 0.1g,抗震设计方法为 B 类,基本风速 32.2 m/s。
按照《城市桥梁设计规范》(2019 年版)(CJJ 11—2011)^[3],加载长度偏保守取用跨径的一半即 70 m,人行桥宽度偏保守取用 6 m,则经过计算得出的人群荷载 =2.76 kPa,设计取值采用 3 kPa。

蕉门河最高通航水位 4.8 m,通航净空 40.0 m × 4.5 m。

4 桥梁总体布置

桥梁分为主桥和匝道桥两部分。主桥的设计中心线互成 120°,平面为三岔受力结构,在 A 肢处存在分岔匝道,延伸至创享湾二层平台 11.95 m 标高处。三岔拱的设计中心线(即桥梁中心线)采用 (86+86+86)m 的 Y 形 120°对称的钢结构空间拱体系,中心线起点与中点高差为 8.415 m,受力结构与 172 m 的平面钢结构拱体系相似,如图 3(a)(b)所示。单肢桥宽为 10.2 ~ 21 m。

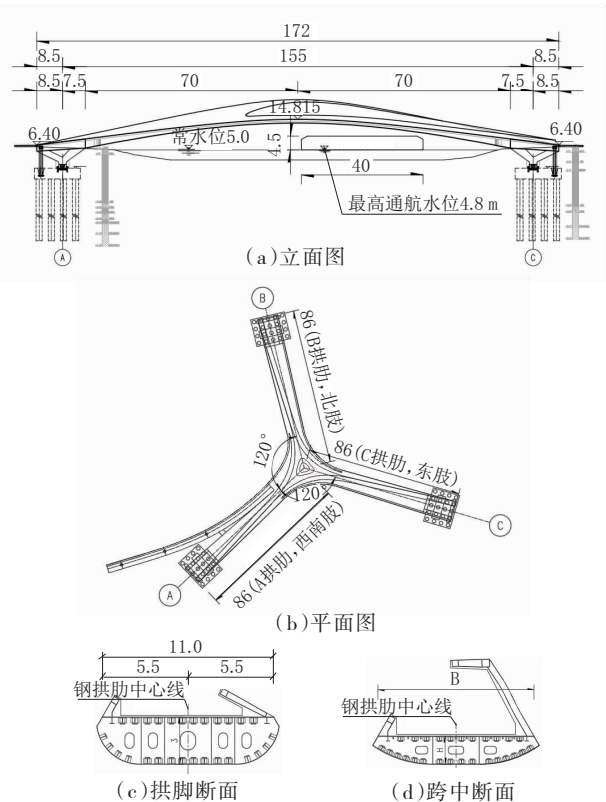


图 3 人行桥布置图(单位:m)

拱肋截面为变高变宽的碗形钢箱拱。V 墩前支点处的截面高度为 3 m,后支点高度为 2 m,跨中高度为 1.2 m;截面宽度在端部为 12.185 m,交汇前为 10.2 m,如图 3(c)(d)所示。三岔交汇形成的正三角

形最宽处可达 21 m。

主桥结构的基础采用承台 + 群桩基础的形式。桩径为 2 m,桩间距 4 m,为嵌岩桩。承台为 15.2 m(纵) × 19.2 m(横) × 3.5 m(厚)的矩形承台。

主桥的顶棚和栏杆结构融为一体,均为拱结构的上盖部分,待主桥结构成桥后再行施加,不承担过多的恒载,仅用于抵抗二期和运营后的部分荷载。

5 软土地基上大跨径坦拱结构的实现原理

在不增加拱顶高程的前提下,为了使得结构在软土地基上成为现实,设计方采用了以下一些措施。

(1)设置 V 墩装置,向下开挖基坑,将结构的拱脚下移,增加矢高 7 m。

(2)将 V 墩设计为可以转动的结构,如图 4(c)所示,通过张拉尾端拉杆以释放拱内的压力,甚至可以达到拉力的效果,从而使得拱脚的水平推力转变为拉力,为后期的竖向荷载增加水平力储备。张拉力的大小以目标水平力为控制标准,最终采用 40 000 kN 的张拉力以实现减小 20 000 kN 水平力的目的,如图 4(a)(b)所示。但是此方法会增加拱结构构件的弯矩,尤其是根部的弯矩,导致根部截面的上下缘钢板应力水平显著增加^[3]。

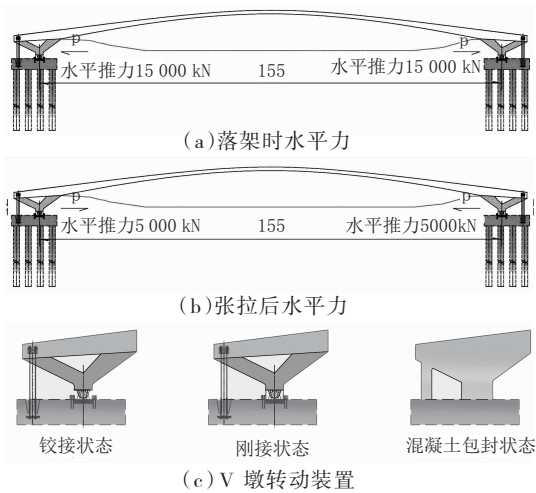


图 4 坦拱结构体系转换原理

(3)采用双层搅拌桩进行地基处理,以增强地基土抗水平推力的能力,进一步加强桩基础的水平承载力。

(4)利用 V 墩和基础部分的土体和结构共同受力,有效地发挥了地基土对提高结构承载力的协作能力^[4]。

在以上措施的综合运用下,结构在自重下的矢跨比约为 1/9.67,通过拱脚转动减小水平力 20 000 kN,通过地基处理将桩基承载力提高为 30 000 kN,从而使得上下部构件的承载力在确保符合美学的外观和经济性的要求下达到平衡。

6 结构分析和计算

6.1 刚度验算

考虑到人群荷载和高温合拢对成桥线形的影响,本设计给定的预拱度涵盖了成桥下挠、50%人群和10℃降温的作用。成桥时在恒载作用下最大变形量为454 mm,如图5所示。在50%人群荷载作用下的最大下挠为19 mm,降温10℃作用下的最大下挠为56 mm,叠加以上数据最终给出的预拱度为530 mm。

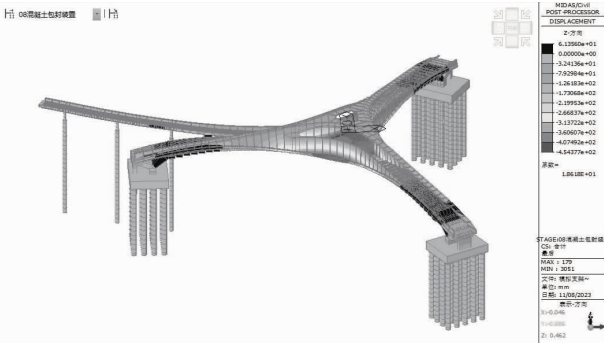


图5 人行桥成桥结构变形

6.2 强度验算

6.2.1 拱肋

按照极限状态下的最不利组合推算,得出的拱肋最大应力为-224~215 MPa,如图6所示,出现在V腿前支点的钢箱拱断面处。此处的截面高度为3 m,上下翼缘板厚均为40 mm,考虑到局部稳定和剪力滞的折减,224/0.79=283 MPa<370 MPa,满足桥梁所用Q460qC钢材的强度要求。

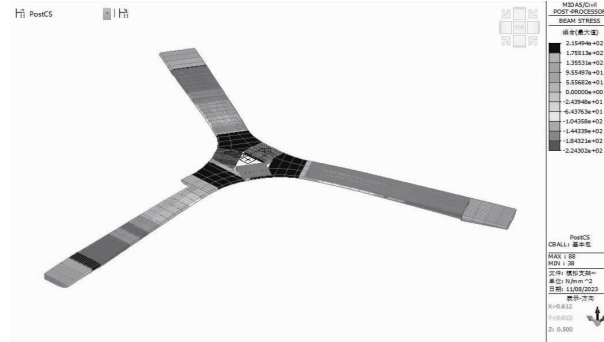


图6 人行桥拱肋应力云图

6.2.2 V墩

梁单元模型中V腿前支点的节点区域内有较大的正应力,板单元模型中此处应力水平不高,故按照梁单元模型的计算值进行应力控制。在基本组合极限状态下的应力为-323~210 MPa,如图7所示,满足Q460qC钢材的强度要求。

6.2.3 栏杆和顶棚结构

在栏杆和顶棚的全桥分析计算中,按照极限状

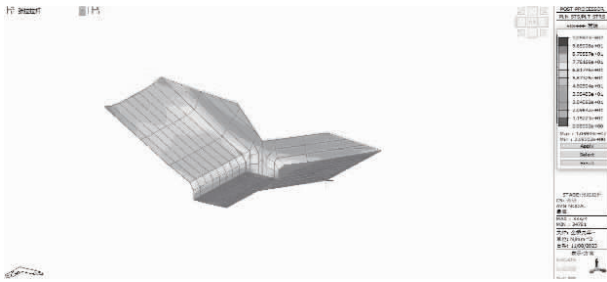


图7 人行桥V墩应力云图

态最不利组合得出的应力分布如图8所示,除局部节点处的应力集中外,栏杆和顶棚的应力水平不超过250 MPa,满足Q345qC钢材的强度要求。

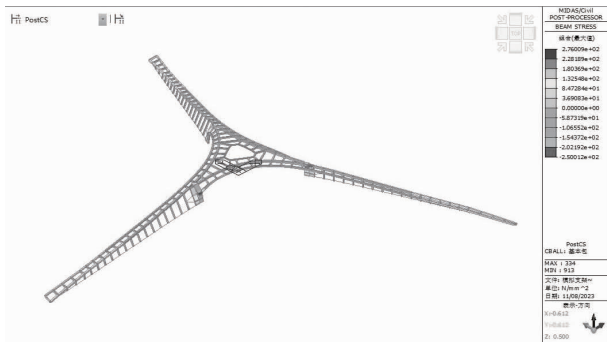


图8 人行桥顶棚应力云图

6.2.4 拉杆

主桥拉杆采用16套21根一束15.2 mm的高强钢绞线,张拉力控制为40 000 kN。上节点为张拉端,采用锚箱与拱肋端部相连;下节点为固定端,在承台施工前预先定位埋置,设置锚板、预埋钢管及锚下钢筋等实施嵌固。

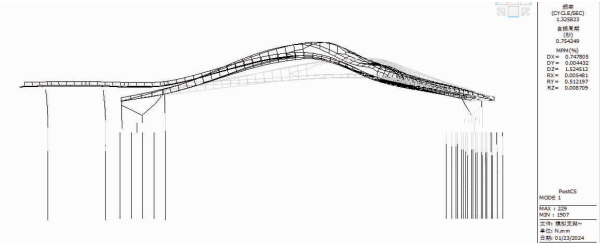


图9 振型1:有匝道拱肢一阶竖弯(1.326 Hz)

6.3 结构基频和舒适度控制

桥梁的前三阶竖弯振型分别位于三肢的拱肢处,且频率均处于1.4 Hz左右,结构竖向振动基频不在人群敏感范围(1.6~2.4 Hz)内。但是,本桥在进行舒适度分析之时,还考虑了更高阶的振型模态和横向振动的影响。结构体系最终通过施加TMD(Tuned Mass Damper)阻尼器的方式使得人行桥即使在TC5工况下加速度也可以满足0.5 m/s²的限值,从而达到舒适度级别中“最好”的要求。TMD阻尼器的总质量约为桥体质量的1/300,通过弹簧连接在结构主体之

上,分别布置在结构的跨中和 1/4 跨径处,用于减小人致振动对结构动力加速度的影响。

7 施工方案

本项目桥梁为 V 墩铰接拱→梁→V 墩铰接拱→V 墩固接拱→无墩坦拱的结构转变过程,采用少支架架设、大节段拼装的施工方案。但是在主拱结构拆架后,存在非线性的体系转换(由拱至梁),因此需要密切关注施工过程的安全性。具体的施工顺序如下:

- (1)地基处理,施工主桥桩基,基坑开挖,施工承台(注意预埋件);
- (2)搭设支架,在支架上施工钢结构 V 墩和主拱部分;
- (3)拆除支架(第一次体系转换为 V 墩两铰拱结构);
- (4)逐级张拉端部预应力至张拉控制应力 34 000 kN 或 37 000 kN (第二次体系转换为通过张拉体外预应力,产生变形,优化该结构的水平推力,致拱效应消失、梁效应呈现);
- (5)施工匝道箱梁结构;
- (6)施工主桥匝道桥的栏杆及主桥的顶棚结构(V 墩两铰拱受力模式);
- (7)施工桥面铺装和桥梁内饰、中心观景台、种植、灯光(V 墩两铰拱受力模式);
- (8)转换拱脚为固接构造(第三次体系转换为 V 墩无铰拱);
- (9)对基坑内的地下结构如 V 墩、部分拱桥下缘、预应力拉杆等进行混凝土包封的防腐处理;
- (10)基坑回填(对下部结构土体压缩度要求不小于 95%);
- (11)在钢结构拱脚外露部分敷设异形曲面防腐混凝土层;
- (12)成桥。

上述施工顺序中第 4 步最为关键,该步骤中需要通过张拉拱桥端部预应力,使得 V 墩装置发生绕着铰接点的旋转,从而使得跨中 140 m 范围内的拱内轴力得以释放,由于轴力与水平推力几乎对等,因此释放的程度取决于设计对拱脚目标水平力的控制。

8 施工监控

由于本项目主桥的施工工序复杂,施工阶段过程中的合理控制是桥梁结构体系转换的关键,因此在项目施工过程中采用全过程监控,采集现场结构形

变、应力与温度等数据。

合拢后落架的变形对比如图 10 所示,张拉的变形对比如图 11 所示。两个过程中的结构监控数据表明结构的实际变形及应力情况都与计算理论值的分布趋势相吻合,但是总体来说,在数值上比起梁单元模型的计算结果,更为接近板单元模型的计算结果。这是由于结构在高温时合拢,故后续的变形有环境温度降低带来的因素。

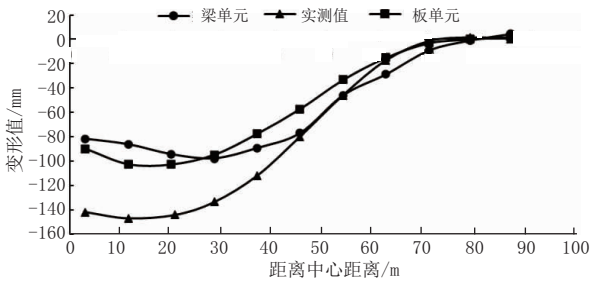


图 10 一次落架变形对比图

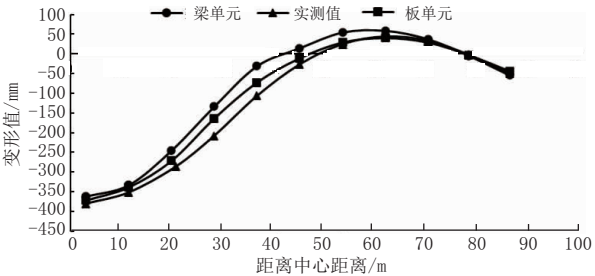


图 11 张拉后变形对比图

9 附属设计

桥梁附属设计主要由铺装设计、景观小品设计、幕墙设计、无障碍设计和泛光设计组成。

铺装采用竹木地板,利用平台区和阶梯区的衔接使得上桥的安全性和舒适感增强。

景观小品主要为中心交汇区的钢化玻璃和人造石座凳,基于此设置桥上休息区、种植区和打造景观凸点。景观绿化采用模块种植盆设置在人造石的花坛内部。

幕墙设计主要应用于建筑内表面的装饰部分和少量外表面的修饰部分。主桥顶棚和栏杆内的饰面采用钛锌板,而主桥与匝道的衔接处采用不锈钢板包封形成三维圆滑曲面。除了结构本身的全曲面设计外,内饰和外贴的金属质感曲面修饰能更加彰显一个充满未来感和科技感的公共空间。

无障碍设计为升降平台。在尽量减少对景观的影响的同时,满足无障碍同行需求,增加人文关怀。

泛光设计使用高效节能 LED 光源以避免产生光污染和光干扰。桥身檐口处采用隐蔽 4 000 K 洗墙灯勾勒出轮廓线,桥体底部采用 4 000 K 投光灯投亮底

(下转第 139 页)

4 施工方案

图 10 为施工流程示意图,具体施工流程如下。

(1)桥梁下部结构施工,施工小桩号侧钢梁拼装支架。

(2)支架上拼装钢桁梁主桁、横梁、桥面系、桥门及横联。

(3)根据施工时水位及浮船吃水深度进行必要的河道清淤,浮运拖拉施工过程中须确保浮船吃水深度。

(4)钢桁架采用一侧搁置在浮船上,另一侧在临时支架上搭设小车轨道拖拉过河施工。

(5)纵桥向拖拉施工应连续进行,应选择在风力不大于 5 级、水位稳定、波浪较小的时间对桥梁进行拖拉施工。

(6)采用拖船将钢桁架牵引到位,拆除钢梁拼装支架。

(7)桥面工程施工,桥梁验收和通车。

5 结 论

一是本项目主桥采用 120 m 变高简支钢桁架桥梁跨越京杭运河,主要考虑到桥梁跨越航道后需尽快落地,桥梁结构应尽量选择其下建筑高度较小的桥型方案;二是桥梁位于城区,桥梁方案需结合运河文化,充分考虑景观因素。充分发挥钢桁架桥梁建筑

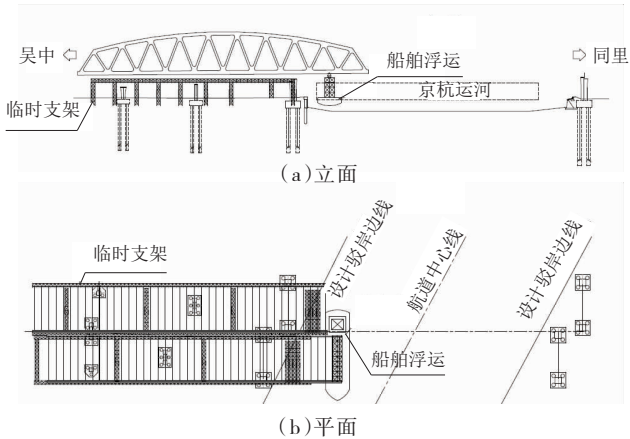


图 10 钢桁架桥梁施工流程示意图
高度低、跨越能力强、景观效果好的特点。

主桥采用 MIDAS Civil 软件进行结构验算,经计算,桁架杆件的强度、总体稳定满足规范要求,桁架的桥面系、刚度满足规范要求。

桁架采用浮运拖拉的施工方案,充分利用了现有航道,节约了施工工期。

参考文献:

[1] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2012.
[2] 赵廷衡.桥梁钢结构设计细节[M].成都:西南交通大学出版社,2011.
[3] 吴冲,强士中,现代钢桥(上册)[M].北京:人民交通出版社,2006.
[4] GB 50139—2014,内河通航标准[S].
[5] GBT 714—2015,桥梁用结构钢[S].
[6] TB 10091—2017,铁路桥梁钢结构设计规范[S].
[7] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
[8] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].

(上接第 125 页)

部,在桥体内部空间的天花板采用隐蔽灯槽漫射出天花板造型线,并运用星空投影灯配合天花板星光灯,展现星光闪烁场景。桥体顶部采用支架固定激光灯打造节日场景激光秀,桥面环境照明依靠暗装扶手灯具和嵌入式筒灯,整体桥面见光不见灯,体现出南沙港澳合作区年轻、活力的形象。

10 结 语

聚星桥人行桥项目从前期概念方案设计中到中期施工图设计过程中对各种技术难题的反复论证,再到后期施工建造和监测过程中实际问题的逐渐暴露和逐个解决,是管理、设计、建设、监控、咨询等多家单位通力合作的结果。本项目的软土基础是对建筑

设计方案中的坦拱结构的巨大挑战,为应对这一挑战,结构设计团队利用计算机强大的运算能力构建出了物理场中高精度的结构模型,分析判断验证了设计结构体系的适用性和安全性,并在实践中得到进一步验证,反过来支持理论数据,有效贯彻了复杂结构的工程项目从理论到实践再到理论的科学技术实现路径。

参考文献:

[1] 顾懋清,石绍甫.拱桥[M].北京:人民交通出版社,1991.
[2] 范立础.桥梁工程[M].北京:人民交通出版社,2004.
[3] CJJ 11—2011,城市桥梁设计规范(2019 年版)[S].
[4] 吴巨贵,丁汉山.上承式坦拱桥台后“预顶”的设计研究[J].江苏建筑,2013(1):23-25.
[5] 徐明芳.三心圆实腹式坦拱设计探讨[J].建材与装饰,2019(3):275-276.