

超高立柱竖向预应力施工技术研究

王炎,陈晓俊,张亦弛

(上海市政建设有限公司,上海市 200120)

摘要: 以上海市一处新建城市高架工程为例,研究探讨了超高立柱采用分节段预制拼装、竖向预应力后张法的施工技术,分析其关键工艺及技术要点,可为同类工程提供参考。该工程因上跨既有轨道交通和城市快速路,采用多层式立交匝道,匝道立柱多采用截面尺寸相对较小的超高单柱,经预制厂分节段预制、运输至施工现场后,采用大型起重设备安装就位。预制拼装为整根立柱后,其长细比相对较大,且受周边环境的影响后期需加装全影形声屏障,导致匝道立柱所承受的附加荷载和根部弯矩显著增大,因此需对匝道超高立柱施加竖向预应力并进行后张拉以提升其承载力,保障桥梁结构受力安全。超高立柱竖向预应力施工采用自锁式锚具体系。

关键词: 超高立柱;预制拼装;竖向预应力;后张法;自锁式锚具

中图分类号: U445;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0331-06

Research on Construction Technology of Vertical Prestress for Super-High Columns

WANG Yan, CHEN Xiaojun, ZHANG Yichi

(Shanghai Municipal Construction Co., Ltd., Shanghai 200126, China)

Abstract: Taking a newly-built urban elevated project in Shanghai as an example, the construction technology of segmental prefabrication and assembly as well as vertical prestressed post-tensioning for ultra-high columns is studied and discussed, and its key processes and technical points are analyzed, which can provide a reference for the similar projects. As the project crosses over the existing rail transits and urban expressways, a multi-level interchange ramp is adopted. The ramp column is mostly ultra-high single column with relatively small cross-sectional dimension. After prefabricated segmentally in a precast yard and transported to the construction site, the ultra-high columns are installed in place by large hoisting equipment. After assembled into an integral column, its length-to-width ratio is relatively large. Moreover, due to the influence of the surrounding environment, a full-shadow sound barrier needs to be installed later, resulting in a significant increase in the additional load and root bending moment borne by the ramp columns. Therefore, the vertical prestress must be applied and post-tensioned to the ultra-high ramp columns to enhance their load-bearing capacity and ensure the safety of the bridge structure under force. A self-locking anchorage system is adopted for the vertical prestress construction of the ultra-high columns.

Keywords: ultra-high column; prefabricated assembly; vertical prestress; post-tensioning method; self-locking anchorage

0 引言

随着城市化进程的快速发展,城市高架桥梁建设日益增多,对于桥梁结构强度、稳定性及施工效率提出了更高要求。对于上跨既有通行道路或建(构)筑物的桥梁匝道,为最大程度地减小立柱占地面积,降低对周边环境的影响,故采用设计高度相对较高、截面尺寸相对较小的单柱墩或门式墩,桥梁立柱不

仅承受巨大的竖向荷载,还必须适应复杂的受力环境^[1-3]。基于上述背景,采用分节段预制拼装施工工艺可有效降低施工周期、减小对周边环境的影响^[4-14],并在立柱柱身内部施加竖向预应力,可显著增强立柱抗裂、抗震和结构强度等性能^[15-16]。

该案例工程立柱竖向预应力施工采用后张法,其技术关键在于如何将预应力索体进行有效锚固。传统现浇施工工艺是将预应力钢绞线先在承台内部锚固,通过连接器分节段加长、张拉锚固预应力钢绞线,这种施工工艺繁琐复杂,且预应力钢绞线外露时间较长,极易造成预应力钢绞线生锈或损伤,预应力

收稿日期: 2026-03-20

作者简介: 王炎(1998—),男,本科,助理工程师,从事市政、公路工程建设管理工作。

施工质量无法得到有效保障。新型自锁式锚具体系对于竖向预应力施工提供了崭新的技术路线,自锁式锚具体系主要由固定端锚具、张拉端锚具、预应力索体及预埋管道组成,通过对固定端锚具及预应力索体进行创新改进,能够实现索体无需预埋、安装操作简便的目的^[17-22]。自锁式锚具体系可有效提高立柱的承载力并减小立柱截面尺寸,进一步扩展多节段预制拼装立柱的适用场景^[23-25]。

基于当前技术背景,针对案例工程超高立柱施工,采取分节段预制拼装及自锁式锚固体系在竖向预应力后张拉的施工应用,深入分析其施工工艺方法及技术要点,并总结其在案例工程中的应用效果。

1 工程概况

该案例工程上跨既有轨道交通和城市快速路采用多层式立交匝道,全工程共计162根立柱,31根立柱采用竖向预应力施工工艺,占比约20%。上述立柱预制高度11~28 m,最大截面尺寸为3.2 m×2.5 m,单根立柱最多预制节段为4节段,单节段预制重量约140~150 t。根据立柱截面尺寸和承载力要求的不同,单根立柱的预应力孔道分为2孔和4孔,每孔预应力索体采用15- ϕ 15.2 mm低松弛预应力钢绞线。

2 关键工艺及技术要点

2.1 施工工艺流程

分节预制超高立柱后张预应力施工可按如下工艺进行(见图1)。

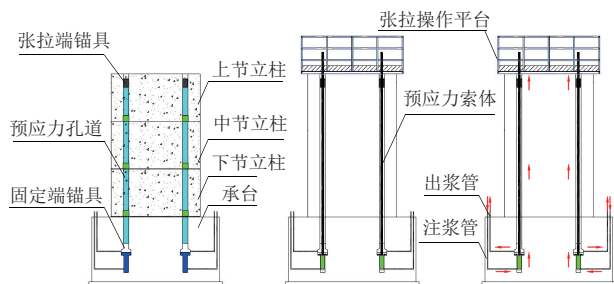


图1 施工工艺流程

第1步:承台施工阶段,需在承台内部预埋自锁式锚具体系的固定端锚具;

第2步:立柱预制阶段,需在立柱内部预埋竖向预应力孔道,分节段预制立柱并运输至现场;

第3步:根据立柱节段重量,选择起重性能满足要求的起重设备进行吊装、拼接;

第4步:由立柱顶部向承台内部预埋的固定端锚具进行竖向预应力索体穿束并实现自锁;

第5步:在立柱顶部进行竖向预应力后张拉;

第6步:通过承台固定端锚具预留压浆孔道,自承台向柱顶进行压浆、封锚施工。

2.2 关键技术要点

2.2.1 自锁式锚具体系

该案例工程采用广西柳州欧维姆厂商研发生产的ZSM-15型自锁式锚具体系。自锁式锚具体系由固定端锚具、预应力索体及张拉端锚具组成,见图2。

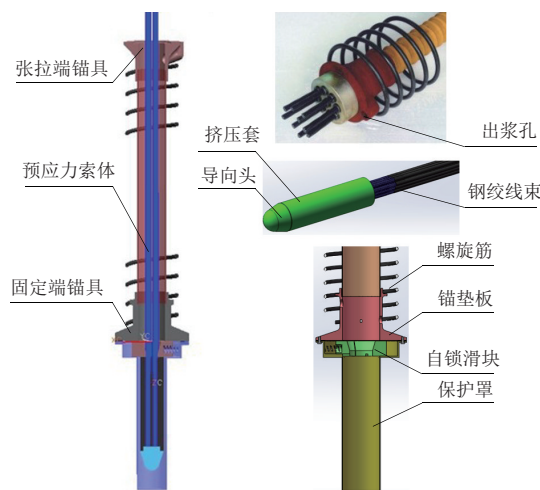


图2 自锁式锚具体系

固定端锚具主要由螺旋筋、锚垫板、保护罩、自锁滑块组成。自锁滑块安装于保护罩内,自锁滑块后方设置弹簧模组以实现其伸缩复位功能,保护罩与锚垫板通过螺栓紧固连接。该锚具在厂内整体组装发货至施工现场,在承台施工阶段进行预埋。

预应力索体主要由钢绞线、挤压套、导向头组成。每束钢绞线采用符合GB/T 5224—2023要求的1×7-15.20 mm-1 860 MPa低松弛预应力混凝土钢绞线,每孔共计15束,需通过挤压套和导向头挤压握紧形成整根预应力索体;挤压套与导向头的材质采用40Cr高强度合金钢,导向头直径为140 mm,挤压套整体长度为495 mm(含导向头)。结合立柱施工高度细化索体所需长度,在厂内加工完成后发货至施工现场。

张拉端锚具主要由螺旋筋、锚垫板、工作锚板、工作夹片等组成,并在锚垫板顶部预留出浆孔。在立柱预制阶段,张拉端锚具采用深埋锚工艺预埋于上节立柱顶端,以方便后期张拉、封锚施工。

2.2.2 固定端锚具施工

固定端锚具进场后需组织验收,验收内容主要为自锁滑块是否可以正常工作,该功能直接影响到

索体穿束后能否顺利实现自锁^[26-30]。为此专门设计了一种自锁滑块检验工具,该工具形似于索体,采用 5 mm 厚钢板卷制焊接而成,有效直径为 140 mm、工作长度为 1 000 mm,顶部焊接一根钢管以便于手持操作。检验方式为施工人员手持检验工具,由上至下穿入固定端锚具,工具前端通过自锁滑块进入固定端锚具的保护罩直至底部,然后将检验工具拔出,重复上述步骤 3~5 次。若自锁滑块每次都能顺利伸缩、复位,则证明该固定端锚具验收通过,否则需要求厂家更换固定端锚具并重新验收,见图 3、图 4。

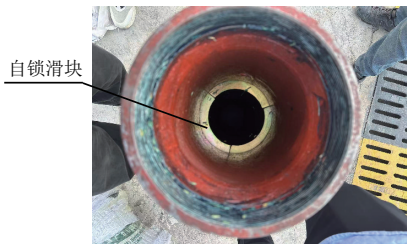


图 3 固定端锚具实物俯视图

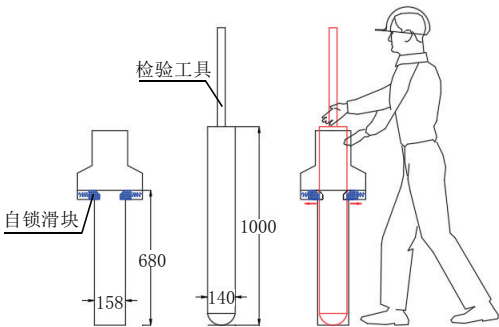


图 4 固定端锚具验收方法(单位:mm)

固定端锚具预埋施工。固定端锚具底部采用刚性托架对其进行支撑及固定。根据测量放样位置,在承台垫层顶部预埋钢板,垫层钢板上方焊接 4 根直径 28 mm 的螺纹钢筋作为支点,钢筋顶部焊接 1 块 3 mm 厚钢板作为固定端锚具底部的支撑平面。为了防止浇筑承台混凝土时,因振捣等因素导致固定端锚具侧向偏移,需在固定端锚具底部的钢板四周焊接角铁片进行限位,见图 5。

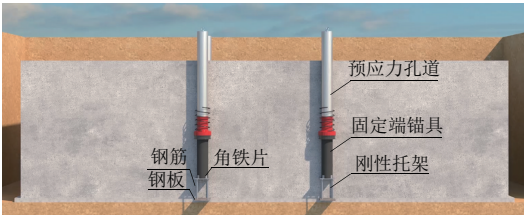


图 5 固定端锚具与承台位置关系

预应力管道与固定端锚具采用丝口形式连接,丝口位置采用止水带缠绕,空隙位置采用泡沫胶封闭,防止承台毛细水通过空隙进入固定端锚具,导致

自锁滑块弹簧模组生锈失效。管道采用外径 180 mm、壁厚 5 mm 无缝钢管,并在管顶加装钢锚塞(兼做吊点),防止雨水、杂物等进入固定端锚具导致穿束失败。通过定位板校核立柱插筋模块和固定端锚具相对位置关系是否准确,见图 6。

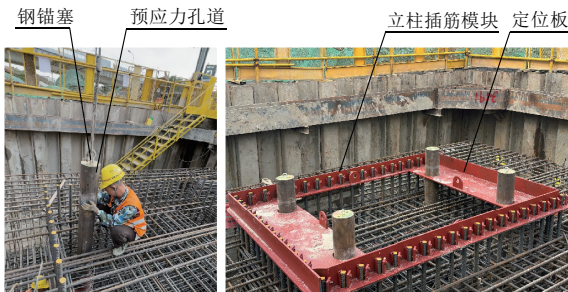


图 6 固定端锚具安装及校核

固定端锚具校核完成后,需安装 L 型注浆管和出浆管,注浆管和出浆管与固定端锚具采用丝口连接,丝口处采用止水带缠绕,注浆管和出浆管应高于承台顶标高 20~25 cm 作为压浆操作面,见图 7。焊接绑扎剩余承台钢筋、合模浇筑承台混凝土。

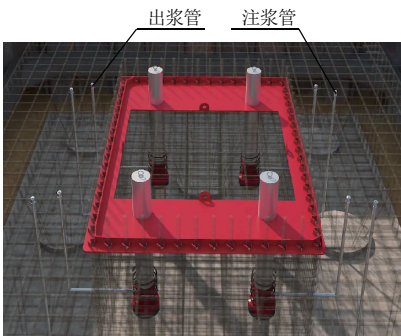


图 7 安装 L 形注浆管、出浆管

2.2.3 立柱分节段预制与安装

立柱预制需结合截面尺寸、运输条件、预制厂加工条件以及机械设备起重性能等多种因素确定合理的预制节段数量、节段高度及节段重量。该案例工程采用竖向预应力后张拉工艺的超高立柱,其高度为 11~28 m,最大截面尺寸为 3.2 m×2.5 m,单根立柱最多预制节段为 4 节段。

竖向预应力立柱分节段预制重难点主要包括预应力管道的精确定位以及预应力管道的顺直度。预应力管道定位根据承台专用定位板定型化加工立柱底模定位板,并结合承台预埋管道的实测数据进行局部微调,匹配误差控制在±2 mm 内。立柱钢筋和预应力管道安装采用定型化胎架进行精确定位,预应力管道每间隔 1.5 m 设置 1 道限位措施钢筋。预应力管道采用外径 180 mm、壁厚 5 mm 无缝钢管,预应力管道长度与立柱预制节段高度相匹配。为了增

加预应力管道对接的成功率,将预应力管道对接形式调整为承插式,即每节段立柱柱底采用外径200 mm、壁厚5 mm无缝钢管,其他位置采用外径180 mm、壁厚5 mm无缝钢管,见图8。

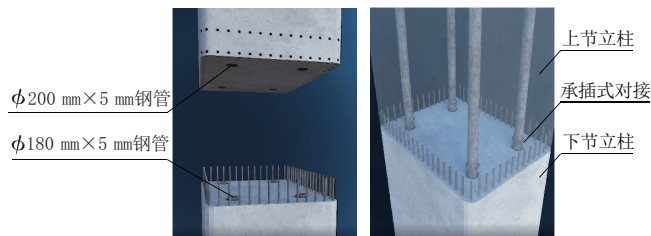


图8 立柱预应力管道

单节段立柱重量140~150 t,根据现场实际工况选择合适的起重设备进行立柱安装。立柱与承台之间的拼接面采用C60高强无收缩水泥砂浆,相邻节段立柱间的拼接面采用环氧黏结剂,上述材料具有强度高、流动性好、凝结速度快等特点,在立柱安装过程中,因立柱自重产生的巨大压力易将上述材料挤入预应力管道,从而造成管道堵塞或落入固定端锚具,致使自锁滑块功能失效等不利工况发生,进而影响索体穿束等工序实施。因此防止上述材料进入管道是立柱安装的重难点。

在立柱与承台进行拼接时,需在管道周围设置橡胶阻浆环。经实践发现,橡胶阻浆环为柔性材料,受压力作用后易变形、移位,仍会存在一定缝隙致使水泥砂浆进入管道,因此在阻浆环上方加设一层钢盖板防止其变形和移位,从而很好地避免了水泥砂浆进入预应力管道和固定端锚具。相邻节段立柱拼接面采用环氧黏结剂,涂抹厚度为3~5 mm,预应力管道高于立柱顶面约50 mm,并在预应力管道周围少量涂抹环氧黏结剂,可有效避免环氧黏结剂因压力作用进入管道,见图9、图10。



图9 立柱与承台拼接面阻浆措施

2.2.4 索体穿束及预应力张拉

因立柱截面尺寸较小,立柱顶面操作空间相对较小,为确保索体穿束及张拉施工安全并兼具拓宽

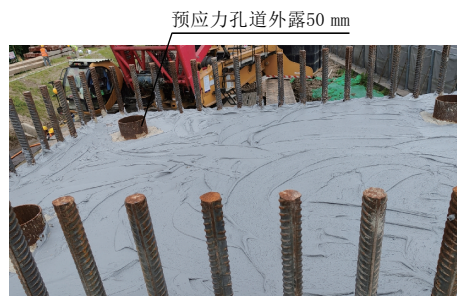


图10 相邻节段立柱拼接面阻浆措施

操作空间的功能要求,需在立柱柱顶增加抱箍式张拉操作平台。平台与立柱顶部外露主筋通过高强螺栓紧固固定。张拉平台为成品运输至现场,通过吊装设备安装就位,平台安装就位后需进行堆载预压后再使用。

索体进场后应验收钢绞线束规格、束数、下料长度、导向头完好程度等,并在每一孔索体端部做好编号,以便与立柱孔位一一对应匹配使用。索体穿束吊点可采用紧固式夹具吊点,索体端部需缠绕土工布增加摩擦力并用紧固式夹具将索体端部固定。为防止索体穿束过程中因重力作用发生钢绞线与夹具滑脱的情况发生,需在夹具上端安装限位卡。采用汽车吊起吊索体,索体导向头朝下进入预应力管道,从上至下匀速缓慢进入固定端锚具实现自锁,见图11。



图11 索体吊点安装及索体穿束

索体张拉采用对角线张拉、应力应变双控制原则。张拉过程中可采用分级张拉,张拉流程:0→10%控制应力(读数量测伸长值)→50%控制应力(读数量测伸长值)→100%控制应力(读数量测伸长值,持荷5 min)→锚固→卸荷,见图12。

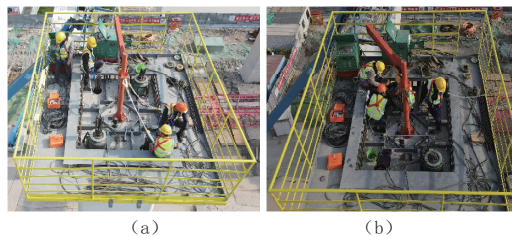


图12 索体预应力张拉

2.2.5 压浆封锚

索体张拉完毕后48 h内应完成压浆施工,通过承台预留注浆管由下至上进行压浆施工,整个压浆

过程应确保一次性不间断完成,压浆料采用水泥浆,水泥浆强度不得小于40 MPa,并确保流动性满足设计要求。压浆设备接头接入注浆管,待出浆管连续、均匀冒浓浆后,观察15~30 s,无异常情况则说明固定端锚具已注满,并对出浆管进行封堵,开始对预应力管道压浆,待柱顶张拉端锚具出浆口连续、均匀冒浓浆后,观察15~30 s,直至无气泡冒出,说明预应力管道已压浆完成,见图13。压浆结束后,采用与结构同强度等级的补偿收缩细石混凝土进行封锚,并保证保护层厚度不小于50 mm,封锚混凝土应捣固密实,无蜂窝麻面,并及时抹面收光。

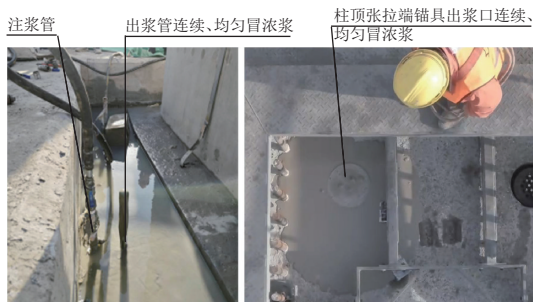


图13 压浆施工

3 实施建议

该工程已顺利完成共计31根竖向预应力立柱施工,切实证明了竖向预应力施工工艺的可行性。通过总结施工经验,在施工过程中还应注意以下几方面的情况。

(1)承台混凝土养护至设计强度要求后才可进行立柱安装施工,承台养护周期较长,在进行立柱安装前,需再次对固定端锚具的自锁滑块功能进行检查,自锁滑块能否正常工作是竖向预应力施工工艺的核心关键。

(2)在整根立柱安装完成后,建议使用内窥镜从柱顶向下至固定端锚具进行检查,检查是否存在浆液挤入预应力管道落入固定端锚具,以确保后续索体穿束顺利实施。

(3)建议尽早安排索体穿束、张拉施工,若因其他因素导致索体穿束滞后,需对柱顶预应力管道进行遮盖,以防止雨水进入预应力管道造成承台固定端锚具内部积水,造成自锁滑块功能失效,并在索体穿束前使用内窥镜检查。

(4)结合具体工程情况,若立柱预制高度较高,压浆设备可能无法一次性压浆至柱顶,造成压浆不密实的情况发生,建议在中节立柱附近预留备用注浆孔。

4 结语

超高立柱竖向预应力施工技术为城市高架桥梁建设提供了一种高效、安全的施工方法。该技术有效解决了传统现浇工艺中存在的不足,提高了施工效率,确保了施工质量,并减少了对周边环境的不利影响。未来,随着预制拼装技术的不断发展,该技术有望在更多的高架桥梁建设中得到应用,并为后续类似工程提供借鉴和参考,为城市高架桥梁建设提供更加高效、安全、环保的解决方案。

参考文献:

- [1] 王学琛. 预应力混凝土桥墩受力性能分析[J]. 工程技术研究, 2024, 9(4): 18-20.
- [2] 吕乃芝, 欧湘萍, 李俊辉, 等. 全预制快速桥墩施工工艺[J]. 工程与建设, 2018, 32(4): 622-625.
- [3] 李建华, 俞章宽, 张喜山, 等. 预制拼装桥墩的连接构造分类及其适用性研究[J]. 现代交通技术, 2019, 16(2): 26-30.
- [4] 孙策. 城市桥梁预制装置化绿色建造技术应用与发展[J]. 世界桥梁, 2021, 49(1): 39-44.
- [5] 曹明. 预制拼装立柱施工技术关键控制要点研究[J]. 黑龙江科学, 2022, 13(8): 76-78.
- [6] 王景全, 王震, 高玉峰, 等. 预制桥墩体系抗震性能研究进展: 新材料、新理念、新应用[J]. 工程力学, 2019, 36(3): 1-23.
- [7] 王志刚, 余顺新, 陈亚莉. 桥梁快速建造技术[J]. 中外公路, 2018, 38(4): 184-188.
- [8] 罗璇. 桥梁下部结构预制拼装工艺经济效益及社会效益分析[J]. 建筑科技, 2024, 8(7): 74-76.
- [9] 徐华生. 装配式桥梁下部结构预制拼装施工工艺研究[J]. 工程与建设, 2024, 38(3): 596-600.
- [10] 高奇. 多节段预制拼装桥墩构造及施工关键技术[J]. 上海建设科技, 2025(4): 78-81.
- [11] 兰勇. 自锚式预应力-灌浆套筒连接多节段预制拼装桥墩施工关键技术[J]. 城市道桥与防洪, 2025(5): 206-210.
- [12] 闫畅, 刘朵, 张建东. 预制拼装桥墩连接构造的研究进展及工程应用[C]//2019年泛长三角公路发展论坛论文集. 南京: 江苏省综合交通运输学会公路分会, 2019.
- [13] 吴俊亭. 预制节段拼装混凝土桥墩综述[J]. 科技风, 2018, 351(19): 105.
- [14] 项贻强, 竺盛, 赵阳. 快速施工桥梁的研究进展[J]. 中国公路学报, 2018, 31(12): 1-27.
- [15] 王祥云, 隋新义, 孙业发. 港珠澳大桥墩柱竖向预应力粗钢筋系统安装技术研究[J]. 工程技术研究, 2020(5): 24-26.
- [16] 李金亭. 46 m高竖向预应力薄壁空心墩施工技术[J]. 科技资讯, 2009(28): 51-52.
- [17] 谢正元, 苏强. 自锁式预应力锚固体系的研究[J]. 上海公路, 2012(3): 46-48; 56.
- [18] 张燕, 刘晓霞. 自锁式与常规齿块预应力体系优劣分析[J]. 城市道桥与防洪, 2020(8): 248-250.
- [19] 李国平, 周良, 周振兴, 等. 自锁紧预应力锚固结构及竖向预应力锚固体系: 中国, CN202544243U[P]. 2012-11-21.

- [20] 李国平,周良,周振兴,等.自锁紧预应力锚固结构及竖向预应力锚固体系及施工方法:中国,CN102535755A[P].2012-07-04.
- [21] 李国平,周良,周振兴,等.自锁紧预应力锚固结构及竖向预应力锚固体系及施工方法:中国,CN102535755B[P].2014-12-24.
- [22] 柏国清,郝玉柱,束永胜,等.竖向预应力体系固定端锚固结构:中国,CN215484088U[P].2022-01-11.
- [23] 贾俊峰,王召辉,许坤,等.预张预应力-承插式预制桥墩抗震试验数值仿真[J].振动与冲击,2024,43(2):254-263.
- [24] 郭建强,邓向振,庞明锐,等.宁句城轨预应力预制桥墩抗震性能试验研究[J].结构工程师,2023,39(2):116-126.
- [25] 乔宁.采用混合配筋的预应力节段拼装双柱桥墩地震损伤评估研究[D].南京:南京理工大学,2023.
- [26] 程健,宋杰.跨海桥梁装配式墩身竖向自锁式预应力施工技术研究与应用[J].天津科技,2021,48(12):50-60;63.
- [27] 张兴志,朴珑,余允锋,等.跨海桥梁大型预制墩身施工关键技术[J].桥梁建设,2020,50(5):113-118.
- [28] 方明山.港珠澳大桥非通航孔桥下部预制墩台设计关键技术[J].中外公路,2015,35(1):112-117.
- [29] 彭宏辉,徐宝林.装配式海上高墩自锁预应力施工技术研究[J].城市建设理论研究(电子版),2025(33):116-118.
- [30] 经凤明.固定端自锁式锚具结构设计与应用研究[J].企业科技与发展,2023(2):39-42.

(上接第320页)

- [6] 黄智德,谢谟文,杜岩,等.激光测振仪在斜拉索索力检测中的应用研究[J].公路,2018,63(5):109-113.
- [7] 周子杰.基于视频亚像素模板匹配算法的索力试验[J].城市道桥与防洪,2021(12):140-143.
- [8] 许广富,曾继超,刘锡祥.融合光流法和特征匹配的视觉里程计[J].激光与光电子学进展,2020,57(20):270-278.
- [9] 赵明富,曹利波,宋涛,等.针对间断纹理环境中的图像特征追踪和匹配算法研究[J].半导体光电,2020,41(1):128-134;140.
- [10] Barnea D I, Silverman H F. A class of algorithms for fast digital image registration[J]. IEEE Transactions on Computers, 2009, C-21(2): 179-186.
- [11] Harris C G, Stephens M J. A combined corner and edge detector[C]// Proceedings of the 4th Alvey Vision Conference. Manchester: AVC, 1988: 147-151.
- [12] 高晶,吴育峰,吴昆,等.基于角点检测的图像匹配算法[J].仪器仪表学报,2013,34(8):1717-1725.
- [13] Lucas B D, Kanade T. An iterative image registration technique with an application to stereo vision[C]// Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence. Vancouver: William Kaufmann, 1981: 674-679.
- [14] 陶卓,黄卫华,章政,等.基于稀疏光流法的改进ORB特征匹配算法[J].组合机床与自动化加工技术,2021(12):1-5.
- [15] 裴巧娜.基于光流法的运动目标检测与跟踪技术[D].北京:北方工业大学,2009.