

DOI: 10.7672/sgjs2025060110

常泰长江大桥天星洲专用航道桥支座灌浆 施工关键技术*

王 辉^{1,2}, 种子康³, 唐 震^{1,2}, 厉勇辉^{2,4,5}

(1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430040; 2. 中交二航局第四工程有限公司, 安徽 芜湖 241060; 3. 淮海大学土木与交通学院, 江苏 南京 210003; 4. 交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北 武汉 430040; 5. 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室, 湖北 武汉 430040)

[摘要] 常泰长江大桥天星洲专用航道桥是世界上最大跨径公铁两用钢桁拱桥, 铁路侧中支点竖向支座为 19 000t 球形支座, 是世界上最大吨位支座, 支座底板尺寸大, 灌浆层厚度小, 灌浆材料流淌距离大, 灌浆材料性能要求高, 灌浆层施工质量难保证。开展了灌浆试验研究, 设计了一种大流动、低变形、高抗裂新型复合支座灌浆材料, 确定了一种适用于超大型支座灌浆材料性能参数; 开展支座底板气泡分布规律研究, 提出添加消泡剂和增加流入支座排气距离气泡防治措施; 采用改进型立轴式砂浆搅拌机, 解决大方量灌浆料配制问题, 提出了重力法分步灌浆施工工艺, 提高灌浆材料流动势能, 支座锚栓孔和底面灌浆层采用分步灌浆工艺, 实现了支座底板灌浆层连续浇筑施工, 保证了支座灌浆层施工质量。

[关键词] 桥梁; 拱桥; 支座; 灌浆材料; 密实度; 施工技术

[中图分类号] U445.46

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)06-0110-06

Key Technology of Bearing Grouting Construction of Tianxingzhou Dedicated Channel Bridge of Changtai Yangtze River Bridge

WANG Hui^{1,2}, CHONG Zikang³, TANG Zhen^{1,2}, LI Yonghui^{2,4,5}

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430040, China; 2. CCCCSHEC Fourth Engineering Co., Ltd., Wuhu, Anhui 241060, China; 3. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210003, China; 4. Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan, Hubei 430040, China; 5. Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Wuhan, Hubei 430040, China)

Abstract: Tianxingzhou Dedicated Channel Bridge of Changtai Yangtze River Bridge is the world's largest-span highway-railway steel truss arch bridge. Its mid-support vertical bearing on the railway side is a 19 000t spherical bearing, currently the heaviest of its kind globally. The construction faced significant challenges due to the bearing's oversized baseplate dimensions, thin grouting layer thickness, extended flow distance of grouting material, and stringent performance requirements for the grouting material that compromised construction quality assurance. To address these issues, grouting experimental research was conducted to develop a novel composite grouting material characterized by high-fluidity, low-deformation, and high-crack resistance, establishing performance parameters for super-large bearing grouting materials. Bubble distribution patterns in the bearing baseplate were investigated, leading to proposed anti-bubble measures involving defoaming agent addition and increased venting distance. A modified vertical-shaft mortar mixer was adopted to resolve large-volume grouting preparation challenges. A gravity method with step-by-step grouting process was introduced to enhance grouting flow potential

* 中交二航局科研课题(EHYF-2021-A-07-005)

[作者简介] 王 辉, 高级工程师, E-mail: 348566595@qq.com

[收稿日期] 2024-05-15

energy. By implementing separate grouting procedures for anchor bolt holes and baseplate grouting layers, continuous casting of the bearing baseplate grouting layer was achieved, which ensured high-quality construction of the bearing grouting system.

Keywords: bridges; arch bridges; bearings; grouting material; compactness; construction

1 工程概况

常泰长江大桥天星洲专用航道桥是世界上最大跨径公铁两用钢桁拱桥,跨径布置为(169.5+388+169.5)m,大桥首创高速公路、城际铁路和一级公路3种功能于一体,上层桥面布置双向6车道高速公路,下层桥面上游侧布置两线城际铁路,下游侧布置双向4车道普通公路,结构荷载横桥向非对称布置,支座上、下游规格尺寸不同,边墩上、下游分别设置2 500,1 800t球形支座,主墩上、下游分别设置19 000,14 500t球形支座,如图1所示。主拱合龙前1号主墩需向中跨顶推1m,以支座底板作为滑移面,支座底板纵桥向尺寸增加800mm,1号主墩上游侧支座底板平面尺寸为4.6m×4.4m,支座底板纵桥向每个边设置12个锚栓,将支座底板固定在墩顶垫石上,如图2所示。大桥采用“拱梁并进”施工工艺,主墩支座在第14节间钢桁梁和钢桁梁拱架设完成后灌浆,边墩支座在全桥施工完成后灌浆^[1-3]。

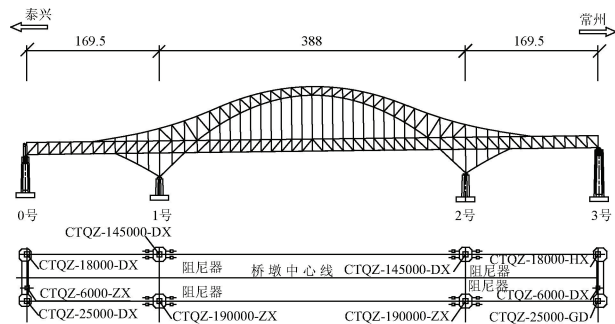


图1 桥梁跨径及支座布置(单位:m)

Fig. 1 Bridge span and bearing arrangement (unit: m)

支座是桥梁上部结构荷载传递至下部结构主要受力构件,为了确保支座与支座垫石间传力更加均匀和调整上部结构桥面标高,需在支座底板和支座垫石间设置25~40mm厚灌浆层,灌浆层施工质量直接影响支座工作性能和上部结构安全^[4-5]。随着桥梁跨径不断增加,支座断面尺寸越来越大,灌浆材料需求量越来越大、施工周期越来越长,支座灌浆层质量难保证。天星洲专用航道桥相对于已建成的朝天门大桥、大胜关长江大桥、广州明州湾大桥等,支座规模和支座底板尺寸有较大提高^[6-10],如表1所示。目前,还无可靠支座灌浆层质量检测手段,灌浆材料性能和灌浆施工工艺直接影响灌浆

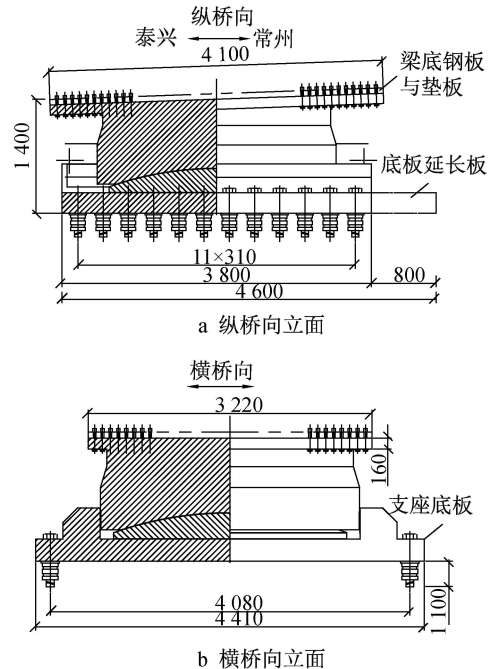


图2 19 000t 支座结构

Fig. 2 Structure of 19 000t bearing

层施工质量。本文通过缩尺模型试验和足尺模型验证,确定了适用于超大型支座灌浆材料性能参数,开展支座底板气泡分布规律研究,提出灌浆料抑气和排气措施;开展超大型支座灌浆施工工艺研究,提出了重力法分步灌浆施工工艺,确保支座灌浆层施工质量,目前还无可靠支座灌浆层质量检测手段,灌浆材料性能和灌浆施工工艺直接影响灌浆层施工质量。以下主要介绍1号主墩上游侧19 000t 支座灌浆施工技术。

表1 已建钢桁拱桥支座信息

Table 1 Bearing information of built steel truss arch bridges

序号	桥名	主跨/ m	承载力/ 10 ⁵ kN	支座底板 尺寸/cm	通车 时间
1	朝天门大桥	552	1.45	350×350	2009年
2	大胜关长江大桥	336	1.80	412×394	2010年
3	珠海横琴二桥	400	1.40	410×385	2015年
4	沪通天生港专用航道桥	336	1.40	429×356	2018年
5	广州明珠湾大桥	436	1.20	340×340	2021年

2 超大型支座改性灌浆材料研究

2.1 超大型支座灌浆材料性能优化

超大型支座灌浆层灌浆料需求大、施工周期

长,要求初凝时间长,早期强度高,终凝时间短且具有较好流动性。从4个方面采取措施在传统灌浆材料的基础上进行优化,确定一种满足超大体积支座灌浆要求的早强、大流动、高抗裂新型复合支座灌浆材料。①措施1,精选粒径圆润、高强度、无杂质的天然砂代替机制砂,并优化级配,选用降黏剂和塑化快的分散剂提高分散效率,降低黏度,在提高流动性的同时,保证浆料悬浮性,不沉降、不离析;②措施2,为保证灌浆密实性,针对塑性阶段的收缩及后期收缩情况,采用不同种类膨胀剂进行复配,并选用优质消泡剂,降低搅拌过程中引气量;③措施3,采用保塑型分散剂的同时加入缓凝剂,提高保塑性能;④措施4,更换更高强度等级的优质水泥和矿物掺合料等材料。为了优化和验证灌浆材料性能,开展了缩尺和足尺模型试验研究。

2.2 足尺模型试验

为避免支座灌浆后支座底面形成泌水层而脱空,在进行足尺模型试验前开展了灌浆材料泌水试验,验证灌浆底板有无积水,并进行了灌浆料小样试验,通过优化水灰比,灌浆料浆液初始流动度 $\geq 350\text{mm}$,支座灌浆基准配合比为灌浆料:水:消泡剂 $=1:0.125:0.0004$ 。足尺模型试验尺寸为 $4.6\text{m}\times 4.6\text{m}$ (长 \times 宽),为便于观察灌浆料流淌效果,模拟支座底板的模板一半设置成钢模,另一半设置成玻璃透明模。底板模板采用 $50\text{mm}\times 50\text{mm}\times 50\text{mm}$ 混凝土垫块垫高,垫块间距按 $2\text{m}\times 2\text{m}$ 布置,如图3所示。沿底板模板四周设置侧模,侧面下面用砂浆垫层找平,防止漏浆。

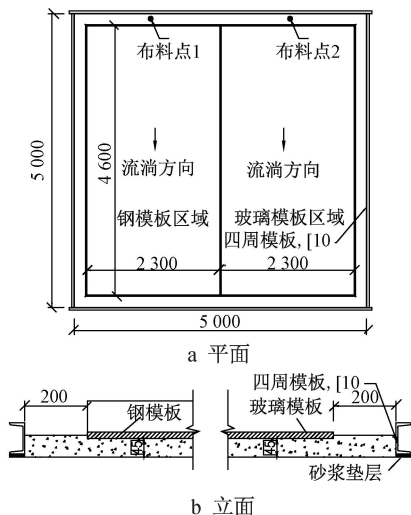


图3 足尺模型试验设计

Fig. 3 Design of full-scale model test

采用2台搅拌机分别接2套钢丝软管各自引到模型试验模板内,2个布料点位于底板模板一侧,在

灌浆料制备合格后,同时灌注,观测并记录模板边缘及玻璃模板下的灌浆料流淌动态。灌浆料通过钢丝软管引流到模板内布料点位置后,连续放料不间断,直至模具内灌浆料填满,且高出顶面模板 $5\sim 10\text{mm}$ 后停止灌浆,灌浆结束后采用覆盖保温棉养护,养护时间为 2d 。

试验表明,灌浆材料能均匀流淌和覆盖整个支座底板,灌浆层厚度均匀,同等养护条件下灌浆材料强度满足要求。布料点范围内存在较多气泡且具有规律性,集中出现在布料点向外延伸 1m 范围内,气泡呈现出密集且细小状态,与布料点距离增大,气泡呈逐渐变大、数量逐渐下降趋势,如图4所示。

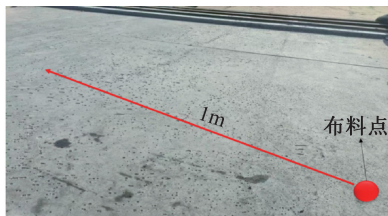


图4 足尺模型试验气泡分布

Fig. 4 Bubble distribution in full-scale model test

根据形成的气泡规律,气泡产生的原因是,灌浆料在管道内流淌混入空气外,在布料点灌浆料高速流动的浆液灌入模板内相对静止的液面后,带动液面向内侧翻滚,空气在此过程中混进浆体内,灌浆料布料口在底板模板边缘,灌浆料内空气未能及时排除,随着灌浆料向前缓慢移动,气泡不断上升,并从小气泡汇聚成大气泡,依附在底板模板底面。

2.3 灌浆料排气缩尺模型试验

为了验证灌浆料的流动性和减少灌浆料在布料过程中在支座底板上形成气泡,在灌浆料进入支座底板前,预留灌浆料自流淌距离,用于排除灌浆料内气体,开展相应缩尺模型试验研究。试验模拟底板尺寸为 $0.5\text{m}\times 5\text{m}$,侧模内轮廓尺寸为 $0.5\text{m}\times 6.5\text{m}$,布料点与钢模板边缘距离为 1.2m ,如图5所示。养护 3d 后拆除模板,模拟支座底板区域灌浆层平整光滑,通过增加流淌距离,混入浆液的气体能在入模前排除,支座底面仅分布零星无规律气孔,仅存在零星分布小气孔,气泡直径 $3\sim 6\text{mm}$,满足设计及规范要求,如图6所示。

2.4 超大型灌浆材料性能确定

经过足尺模型论证试验和实施过程中灌浆材料性能参数同等条件下测定,性能优化后灌浆材料其含水率、细度、流动度、泌水率、凝结时间、泌水率、抗压强度、抗折强度、竖向膨胀率等指标符合设计要求及JT/T 1130—2017《桥梁支座灌浆材料》中

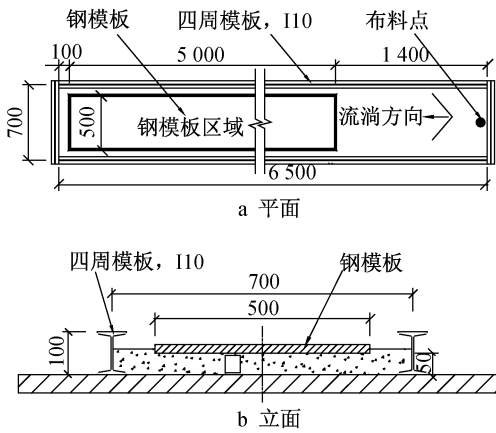


图 5 增加排气距离论证试验

Fig. 5 Demonstration test increasing exhaust distance

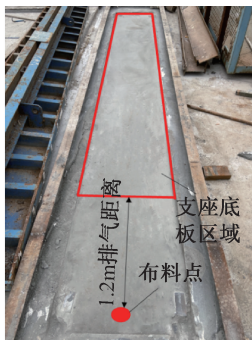


图 6 增加排气距离后试验结果

Fig. 6 Test results after increasing exhaust distance

普通型水泥基桥梁支座灌浆料规定^[11],经过测定,含水率为 0.2,远低于规范要求;初凝时间为 225min,远大于规范 60min 要求;终凝时间为 650min,较规范限值低 70min;24h 早期抗压强度为 32MPa,高于规范限值 20MPa;抗折强度与规范值接近。超大型支座灌浆材料性能参数如表 2 所示。

表 2 灌浆材料优化后性能参数与规范值对比

Table 2 Comparison of performance parameters and specification values of optimized grouting materials

检测项目	单位	规范限值	检测结果
含水率	%	≤1.0	0.2
细度(4.75mm 筛余)	%	0	0
泌水率	%	0	0
流动度(初始)	mm	≥320	360
凝结时间	初凝	≥60	225
	终凝	≤720	650
竖向膨胀率	%	0.1~2.0	0.29
抗压强度	24h	≥20	32.0
	28d	≥60	64.1
抗折强度	24h	≥4	5.4
	28d	≥10	11.2
水养自由膨胀率	28d	%	0.02~0.1
流砂(流动度达到 350mm 的流动时间)	s	—	24

3 重力法分步灌浆施工

3.1 支座临时支撑与约束体系

为了减少温度荷载、风荷载等临时荷载对支座灌浆层扰动,支座灌浆前需设置临时竖向支撑和平面约束装置。支座处上部结构荷载转移至中支点竖向临时支座上,单个中支点共设置 2 个竖向临时支座,沿中支座纵桥向两侧布置。为了实现中支点灌浆支座平面约束,同时释放温度荷载作用下边跨钢桁梁变形,边墩竖向临时支座右桥向可滑移。中支点竖向临时支座通过反力牛腿、永久支座和竖向临时支座间设置纵桥向限位型钢支撑,实现 2 个竖向临时支座右桥向限位。反力牛腿通过垫石上纵桥向阻尼器预埋件固定在桥墩上;通过在桥墩上预设挡块和竖向临时支座间设置横桥向限位支撑型钢,实现横桥向限位,如图 7 所示。中墩上、下游中支座灌浆层依次灌浆,在进行上游侧灌浆时,灌浆位置处临时竖向支座右桥向限位,下游侧竖向临时支座右桥向限位支撑解除,释放温度作用下中墩支座右桥向变形。

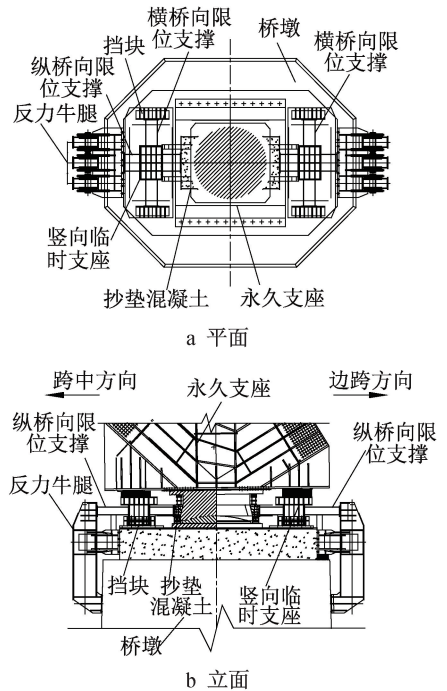


图 7 中支点竖向临时支座右约束

Fig. 7 Vertical temporary bearing constraint at the midpoint

3.2 灌浆料配制

主墩各支座灌浆料需求大,采用 2 台立轴式砂浆搅拌机配制灌浆料,搅拌机转速 >90r/min,容量 >1.5m³。结合支座灌浆料的性能要求,对立轴式砂浆搅拌机进行适应性改造,包括增加上层搅拌叶片、增加下层搅拌叶片长度,确保搅拌机内壁刮料

干净。灌浆料在配制前对搅拌机内部清理干净并进行润湿,防止失水影响灌浆料性能。为了避免灌浆料起球成团,采用边加料边加水原则进行搅拌,并采用手持式电动搅拌机对局部盲区进行辅助搅拌,用以破碎起团灌浆料,确保浆液搅拌均匀。灌浆料在搅拌过程中,定期对其流动性进行检测,流动性满足要求后,按基准配合比添加液体消泡剂,并继续搅拌2~4min,在保证浆体均匀性的同时使消泡剂成分充分发挥作用。灌浆料搅拌时间应控制在30~45min完成,以保证浆料黏度不明显增加,有足够的流动性。为了实现灌浆料连续灌注,2台搅拌机同时搅拌施工,并考虑到灌浆料拌制和管道输送及模板漏浆等损失,灌浆料配制量按需求量的1.3倍考虑。

3.3 灌浆料配制设备布置

支座位置处桥墩墩顶空间小,灌浆料需求量大,支座位置处灌浆料设备布置空间不足,且支座高程高于栈桥,为了提高支座灌浆料流动势能,将搅拌机布置在支座对应高度方向上桥面位置,灌浆料从搅拌机通过直径为75mm钢丝软管引流至桥墩墩顶支座位置处,如图8所示。



图8 灌浆设备布置

Fig. 8 Layout of grouting equipment

3.4 分步灌浆施工工艺

支座底板锚栓孔灌浆料需求大,达到 1.5m^3 ,为了避免灌浆料流过锚栓孔后导致支座底面灌浆不连续造成灌浆层不均匀和分层,支座底板灌浆层和锚栓孔采用分步灌浆施工工艺。优先对锚栓孔进行灌浆,在灌浆前采用高压气枪对锚栓孔进行清孔,避免灌浆料过水后离析和浮渣吸附在支座底面,导致灌浆层不密实。灌浆料通过溜槽对锚栓孔灌浆,完成各锚栓孔灌浆后,对支座底面进行灌浆,如图9所示。

支座底板灌浆层模板采用“钢板+角钢”组合形式,钢板规格为厚10mm、高200mm,采用 $\angle 50 \times 50$,钢板点焊在角钢上,侧模高出灌浆层顶面约80mm,可起到防止浆液溢出和保湿养护灌浆层作用,模板

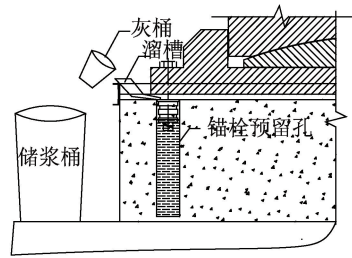


图9 锚栓孔灌浆

Fig. 9 Grouting for anchor bolt holes

内轮廓尺寸为 $5.6\text{m} \times 5\text{m}$,在模板底部设置止浆条,防止漏浆。为了提高模板侧向刚度,避免模板扰动导致模板底部漏浆,增设1根 $\phi 20$ 精轧螺纹拉杆对拉。在支座上、下游共设置2个布料点灌浆料连续浇筑,布料点距离支座灌浆层边缘1.1m,灌浆料流淌至灌浆层时排除灌浆料内气泡,如图10所示。灌浆料高出支座底面5~10mm后停止灌注,并观察灌浆料是否有下沉分层现象。灌浆入口处需严格控制灌浆速度,严禁灌浆入口处超量灌注,避免灌浆料气泡在进入支座底板前无法有效排出。

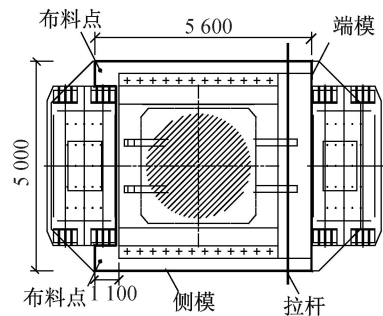


图10 支座底板模板及布料点布置

Fig. 10 Layout of bearing baseplate formwork and fabric points

4 结语

本文主要介绍常泰长江大桥天星洲专用航道桥主墩超大型支座灌浆施工技术,通过优化灌浆材料性能参数和灌浆施工工艺,解决超大型支座灌浆施工技术难题,主要结论如下。

1) 提出了适用于超大型支座灌浆料优化措施,确定了一种适用于超大型支座灌浆料性能参数,并通过缩尺模型和足尺模型验证,其中灌浆料初凝时间、终凝时间、流动度和早期强度相对于规范值均有较大改善。

2) 开展支座底板气泡防治措施研究,得到支座底板气泡分布规律,通过增加消泡剂减少灌浆料配制含气量,布料点增加1m流淌距离可排除灌浆料拌制过程中气体,有效抑制支座底板气泡。

3) 提出超大型支座重力法分步灌浆施工工艺,解决墩顶受限空间设备布置问题,提高了灌浆料流

淌速度,锚栓孔和支座底面分步灌浆施工,避免支座底面灌浆层不连续灌注导致分层和不均匀。

参考文献:

- [1] 徐伟,王恒,李少骏. 常泰长江大桥专用航道桥设计[J]. 桥梁建设, 2020, 50(6): 85-90.
XU W, WANG H, LI S J. Design of Changtai Yangtze River Bridge Dedicated Channel Bridge [J]. Bridge construction, 2020, 50(6): 85-90.
- [2] 王恒,李少骏,梁志雯. 常泰长江大桥专用航道桥恒载非对称力学行为分析研究[J]. 现代交通与冶金材料, 2022, 2(4): 14-18.
WANG H, LI S J, LIANG Z W. Analysis and study on non symmetric mechanical behavior of constant load of Changtai Yangtze River Bridge Dedicated Channel Bridge [J]. Modern transportation and metallurgical materials, 2022, 2(4): 14-18.
- [3] 李少骏,徐伟,李镇,等. 常泰长江大桥专用航道桥钢梁安装方案设计[J]. 桥梁建设, 2022, 52(1): 139-144.
LI S J, XU W, LI Z, et al. Design of steel beam installation scheme for Changtai Yangtze River Bridge Special Channel Bridge [J]. Bridge construction, 2022, 52(1): 139-144.
- [4] 李慧. 桥梁支座灌浆料工作性能试验研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(8): 21-24,63.
LI H. Experimental study on the working performance of grouting material for bridge bearings [J]. Railway construction technology, 2020(8): 21-24,63.
- [5] 王高新,丁幼亮,刘华,等. 基于支座动位移监测的高铁桥梁支座磨损状态安全评估[J]. 中国铁道科学, 2019, 40(1): 39-46.
WANG G X, DING Y L, LIU H, et al. Safety assessment of wear status of high-speed railway bridge bearings based on dynamic displacement monitoring of bearings[J]. China railway science, 2019, 40(1): 39-46.
- [6] 李强,朱力. 运营期轨道交通桥梁支座病害治理方法研究[J]. 铁道建筑技术, 2020(1): 67-71.
LI Q, ZHU L. Research on the treatment method of bearing defects in rail transit bridges during operation period[J]. Railway construction technology, 2020(1): 67-71.
- [7] 陈胜吉,袁亚军,蒋少波. 桥梁支座智能灌浆系统的设计及应用研究[J]. 中外公路, 2019, 39(5): 146-149.
CHEN S J, YUAN Y J, JIANG S B. Design and application research of intelligent grouting system for bridge bearings [J]. Journal of China & foreign highway, 2019, 39(5): 146-149.
- [8] 杨光旭,欧阳先凯. 重庆朝天门大桥 QZ145MN 大吨位球型支座设计[J]. 交通科技, 2012(3): 31-33.
YANG G X, OUYANG X K. Design of QZ145MN large tonnage spherical bearing for Chongqing Chaotianmen Bridge[J]. Transportation science & technology, 2012(3): 31-33.
- [9] 瞿国钊. 大跨度钢桁拱桥的创新设计[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 64-67,125.
QU G Z. Innovative design of large-span steel truss arch bridge [J]. Journal of railway engineering society, 2016, 33(12): 64-67,125.
- [10] 上官兵,胡会勇,赵健,等. 广州明珠湾大桥结构体系设计关键技术[J]. 桥梁建设, 2022, 52(4): 1-7.
SHANGGUAN B, HU H Y, ZHAO J, et al. Key technologies for structural system design of Guangzhou Mingzhu Bay Bridge[J]. Bridge construction, 2022, 52(4): 1-7.
- [11] 交通运输部公路科学研究院,云南云岭高速公路建设集团有限公司. 桥梁支座灌浆材料:JT/T 1130—2017 [S]. 北京:人民交通出版社,2017.
Research Institute of Highway of Ministry of Transport, Yunnan Yunling Expressway Construction Group Co., Ltd. Bearing grouting material for bridge: JT/T 1130—2017 [S]. Beijing: China Communications Press, 2017.
- (上接第 30 页)
- CCCC Highway Consultants Co., Ltd. General specifications for design of highway bridges and culverts: JTG D60—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [19] 中交公路规划设计院有限公司. 公路钢结构桥梁设计规范: JTG D64—2015 [S]. 北京:人民交通出版社,2015.
CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Specifications for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [20] 刘奎. 小半径曲线梁桥力学性能及局部分析研究[D]. 南京:东南大学,2018.
LIU K. Research on mechanical behavior and partial analysis of small radius curved girder bridges [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.