

DOI: 10.7672/sgjs2025150097

哑铃形钢管混凝土拱桥拱内混凝土 施工顺序影响性分析*

罗霖¹,李睿¹,黄晓敏¹,吕雁¹,贾云²

(1. 昆明理工大学建筑工程学院, 云南 昆明 650000; 2. 云南省建设投资控股集团有限公司, 云南 昆明 650000)

[摘要] 在钢管混凝土拱桥施工过程中,拱肋核心混凝土灌注为关键施工工艺,不同混凝土施工顺序影响拱桥结构受力和整体稳定性。以哑铃形截面钢管混凝土拱桥为例,首先采用穷举法列出所有可能出现的混凝土施工顺序,然后对不同施工顺序下的拱肋应力与变形进行分析,得出最优施工方案。研究结果表明,随着混凝土灌注的进行,钢管应力逐渐增大;施工完成后的拱肋不同截面挠度极差较小,基本可忽略不计;最优混凝土灌注顺序为下游下弦管、上游下弦管、上游上弦管、下游上弦管、缀板和横撑。

[关键词] 拱桥;钢管;混凝土;应力;挠度;数值模拟

[中图分类号] TU528

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)15-0097-05

Analysis of Influence of Construction Sequence of Concrete in Arch of Dumbbell-shaped Concrete Filled Steel Tube Arch Bridge

LUO Lin¹, LI Rui¹, HUANG Xiaomin¹, LÜ Yan¹, JIA Yun²

(1. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650000, China; 2. Yunnan Construction Investment Holding Group Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China)

Abstract: In the construction process of concrete filled steel tube arch bridge, the core concrete pouring of arch rib is the key construction technology, and different concrete construction sequences affect the structural stress and overall stability of the arch bridge. Taking the dumbbell-shaped cross-section concrete filled steel tube arch bridge as an example, firstly, all possible concrete construction sequences are listed by exhaustive method, and then the stress and deformation of arch ribs under different construction sequences are analyzed to obtain the optimal construction scheme. The research results show that with the progress of concrete pouring, the stress of steel tube increases gradually. After the construction is completed, the deflection range of different sections of the arch rib is small and basically negligible. The optimal concrete pouring sequence is downstream lower chord tube, upstream lower chord tube, upstream upper chord tube, downstream upper chord tube, batten plate and transverse brace.

Keywords: arch bridges; steel pipes; concrete; stress; deflection; simulation

0 引言

钢管混凝土拱桥为结构轻巧、承载性能优越、形式多样且美学效果良好的桥梁结构,在20世纪80年代后期出现了先进的泵灌混凝土施工工艺后,钢管混凝土拱桥凭借其施工相对简单、拱圈施工时

间较短、施工成本较低、跨长增加较快等优点逐渐得到应用。在拱桥所有截面类型中,哑铃形截面具有面内刚度大、面外刚度小的特点,因而哑铃形截面钢管混凝土拱桥建造数量较多。确定合理的拱内混凝土施工顺序为哑铃形截面钢管混凝土拱桥施工重要环节,其关系到拱肋应力、轴力、变形等因素。本文采用穷举法对跨径为120m哑铃形截面钢管混凝土拱桥——下承式钢管混凝土系杆拱桥不同拱内混凝土施工顺序进行分析,比选出最优方

* 国家自然科学基金(51568029)

[作者简介] 罗霖,硕士研究生,E-mail:luolin@stu.kust.edu.cn

[通信作者] 李睿,博士,教授,E-mail:liruiking@163.com

[收稿日期] 2025-03-26

案,以期为实际工程施工提供参考。

1 工程概况

云南省香格里拉市上江乡木高村金沙江大桥灾后恢复重建为哑铃形截面钢管混凝土拱桥。新建的金沙江大桥上跨金沙江,江面宽约120m(常水位),主跨采用一跨过江,采用120m下承式钢管混凝土系杆拱桥结构,香格里拉岸采用现浇实心板连续梁桥,丽江岸采用现浇实心板简支梁桥。新建桥梁全长168.2m,桥跨布置为2×13m(香格里拉岸)+120m(钢管混凝土系杆拱桥)+13m(丽江岸)。钢管混凝土系杆拱桥拱轴线为二次抛物线,矢跨比为1/5,矢高240cm,标准横断面布置为1.4m宽系杆及拱肋+0.5m宽护栏+7.5m宽行车道+0.5m宽护栏+1.4m宽系杆及拱肋。拱肋钢管外径为1000mm,壁厚为14mm,拱桥桥墩采用柱式墩、承台连接钻孔灌注桩基础,主桥两端分别设置FD-160型伸缩缝。

2 拱内混凝土施工顺序设置

本工程采用顶升法泵送混凝土,拱内混凝土依据特定的顺序进行逐一灌注,每次仅对1根拱肋进行一次完整灌注,进行混凝土施工顺序分析时未考虑腹腔的影响。

按照相关规范要求对拱肋进行编号,其中编号①为下游上弦管,编号②为上游上弦管,编号③为下游下弦管,编号④为上游下弦管,如图1所示。为分析不同混凝土施工顺序对拱肋应力、变形和稳定性的影响,采用穷举法列举所有可能出现的混凝土施工顺序(见表1),经比选后确定最优方案。

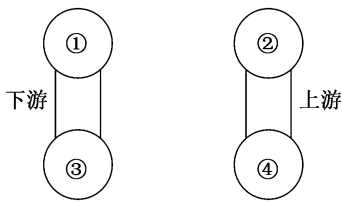


图1 拱肋编号

Fig. 1 Arch rib numbers

3 有限元分析

3.1 有限元模型建立

1) 基本假设

有限元模型建立时对原结构做如下假设:①满足截面平面假设,拱肋截面面积、形状不随拱肋变形而发生变化,拱肋截面形心和扭转中心一直重合;②假设拱肋钢管与核心混凝土完美结合并共同受力;③假设上次灌注混凝土成型后进行下次混凝土灌注;④假设核心混凝土刚灌入拱肋未成型时不参与受力;⑤假设拱肋一次成拱且拱肋合龙后拱轴

表1 混凝土施工顺序设置

Table 1 Concrete construction sequence setting

施工方案编号	混凝土施工顺序
1	按照拱肋③→拱肋④→拱肋②→拱肋①顺序灌注混凝土
2	按照拱肋①→拱肋②→拱肋④→拱肋③顺序灌注混凝土
3	按照拱肋①→拱肋③→拱肋②→拱肋④顺序灌注混凝土
4	按照拱肋①→拱肋③→拱肋④→拱肋②顺序灌注混凝土
5	按照拱肋①→拱肋④→拱肋②→拱肋③顺序灌注混凝土
6	按照拱肋①→拱肋④→拱肋③→拱肋②顺序灌注混凝土
7	按照拱肋②→拱肋①→拱肋③→拱肋④顺序灌注混凝土
8	按照拱肋②→拱肋①→拱肋④→拱肋③顺序灌注混凝土
9	按照拱肋②→拱肋③→拱肋①→拱肋④顺序灌注混凝土
10	按照拱肋②→拱肋③→拱肋④→拱肋①顺序灌注混凝土
11	按照拱肋②→拱肋④→拱肋①→拱肋③顺序灌注混凝土
12	按照拱肋②→拱肋④→拱肋③→拱肋①顺序灌注混凝土
13	按照拱肋③→拱肋①→拱肋②→拱肋④顺序灌注混凝土
14	按照拱肋③→拱肋①→拱肋④→拱肋②顺序灌注混凝土
15	按照拱肋③→拱肋②→拱肋①→拱肋④顺序灌注混凝土
16	按照拱肋③→拱肋②→拱肋④→拱肋①顺序灌注混凝土
17	按照拱肋③→拱肋④→拱肋①→拱肋②顺序灌注混凝土
18	按照拱肋①→拱肋②→拱肋③→拱肋④顺序灌注混凝土
19	按照拱肋④→拱肋①→拱肋②→拱肋③顺序灌注混凝土
20	按照拱肋④→拱肋①→拱肋③→拱肋②顺序灌注混凝土
21	按照拱肋④→拱肋②→拱肋①→拱肋③顺序灌注混凝土
22	按照拱肋④→拱肋②→拱肋③→拱肋①顺序灌注混凝土
23	按照拱肋④→拱肋③→拱肋①→拱肋②顺序灌注混凝土
24	按照拱肋④→拱肋③→拱肋②→拱肋①顺序灌注混凝土

线与设计一致。

2) 模型建立

本文采用有限元软件建立金沙江大桥拱肋分析模型(见图2),采用双单元法模拟核心混凝土灌注拱肋整个过程。本文仅采用梁单元模拟拱肋和横撑,其他结构作用效应转化为与其等效的作用力施加在拱肋上。拱肋和横撑之间刚性连接,拱脚处固结,模拟混凝土刚灌入拱肋钢管且未成型阶段时,忽略混凝土刚度,通过向拱肋施加均布荷载近似模拟未成型混凝土。模拟混凝土成型阶段时,考虑钢管与混凝土之间的联合作用,并采用联合截面法进行模拟,待混凝土成型后钝化之前施加的均布荷载。通过在拱肋上施加节点荷载模拟吊杆和系梁弹性骨架。

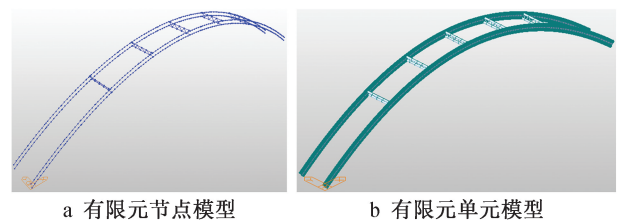


图2 拱肋模型

Fig. 2 Arch rib model

3.2 计算结果分析

3.2.1 应力

本文选择拱脚、 $L/4$ 处和拱顶作为关键位置(编号分别为1,2,3),将截面应力作为拱肋钢管应力, L 为拱桥两拱脚(拱圈与基础交接点)之间的水平距离。拱肋截面编号由所处位置编号和拱肋编号组成,如1-①表示拱肋①拱脚截面,其他类推。

本文将每个方案的施工阶段分为12个子阶段,分别为一次成拱和架设横撑、系杆劲性骨架和吊杆安装、下游上弦管混凝土湿重、下游上弦管混凝土成型、上游上弦管混凝土湿重、上游上弦管混凝土成型、下游下弦管混凝土湿重、下游下弦管混凝土成型、上游下弦管混凝土湿重、上游下弦管混凝土成型、缀板和横撑混凝土湿重、缀板和横撑混凝土成型。因为拱桥在核心混凝土泵送过程中,拱肋钢管核心混凝土应力小于拱肋钢管应力,为更直观地反映拱肋应力变化,本文采用拱肋钢管应力分析金沙江大桥灌注顺序。

通过对比不同施工方案上下游拱肋关键位置截面应力,得到方案1,8,16,20,24具有良好的代表性(见图3,4),其中方案1最具普适性,因此以方案1为例进行分析。由于横撑和缀板均在最后施工阶段,因此图3未进行统计。

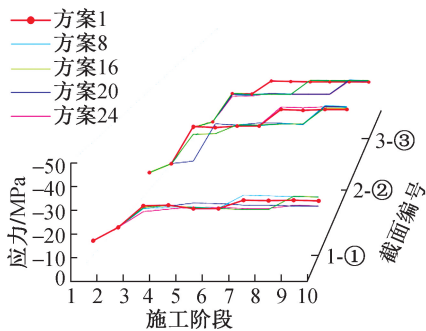


图3 代表性方案下拱肋应力

Fig. 3 Arch rib stress under representative schemes

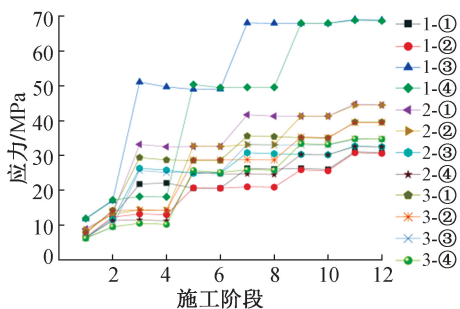


图4 方案1下拱肋应力

Fig. 4 Arch rib stress under scheme 1

小;同样的,灌注下游拱肋混凝土时,对上游拱肋的影响较小。3个位置截面应力最大阶段均出现在缀板和横撑混凝土湿重阶段。拱脚处下弦管应力增幅约为上弦管的2倍, $L/4$ 和拱顶处上弦管与下弦管应力增幅大致相同;大部分施工阶段下拱脚处下弦管应力大于上弦管应力, $L/4$ 和拱顶处下弦管应力小于上弦管应力。鉴于混凝土在部分情况下应力较小,所以采用施工完成后的拱肋钢管应力分析评估混凝土施工顺序,如图5和表2所示。

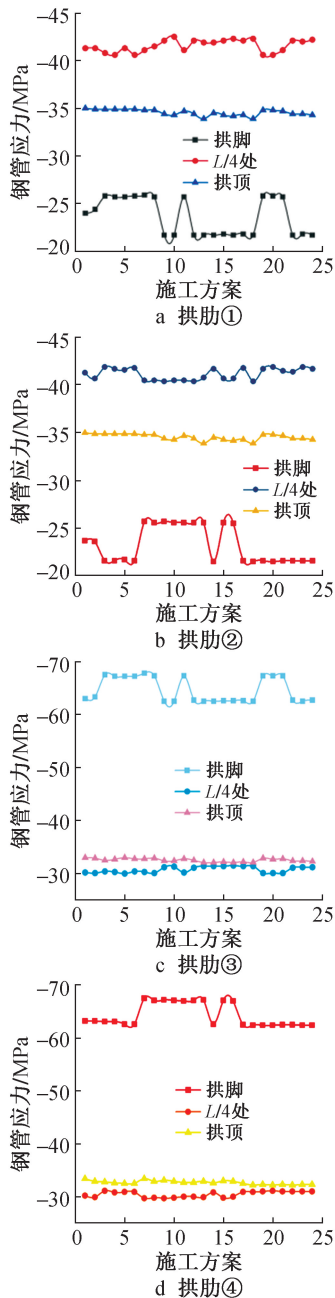


图5 施工完成后的拱肋钢管应力

Fig. 5 Arch rib steel tube stress after construction completion

灌注上游拱肋混凝土时,对下游拱肋的影响较

表2 拱肋钢管最大、最小应力及对应的施工方案

Table 2 Maximum and minimum stresses of the arch rib steel tubes and corresponding construction schemes

截面编号	最大应力/MPa	最小应力/MPa	对应的施工方案
1-①	25.9	—	7
	—	21.5	9,10,12,13,14,16,18
1-②	25.7	—	7,9
	—	21.5	14,18,20
1-③	67.8	—	7
	—	62.5	9,10,13,14,18,23
1-④	67.5	—	7
	—	62.4	18,19,20,23,24
2-①	42.5	—	10
	—	40.6	4,6,19,20
2-②	41.9	—	3,20,23
	—	40.4	9,12,18
2-③	31.5	—	6
	—	30.1	2,19,20,21
2-④	31.1	—	3,20
	—	29.8	8,10,15
3-①	35.0	—	1
	—	33.9	13,18
3-②	35.0	—	1,9,15
	—	33.8	22
3-③	33.0	—	1,5
	—	32.1	13,14,16,18
3-④	33.4	—	1,7
	—	32.2	18,20,22

由图5和表2可知,施工完成后,拱脚下弦管承受的应力高于上弦管,且下弦管应力为上弦管应力的2.5倍左右; $L/4$ 处上弦管承受的应力高于下弦管,约较下弦管承受的应力大10MPa;拱顶上弦管承受的应力基本与下弦管相同,应力相差约1MPa,在可接受范围之内。在3个关键截面中,拱肋钢管最大应力出现在拱肋下游下弦管拱脚截面处,其值为67.8MPa,低于拱肋钢管极限应力。由于拱脚截面位置应力最大,因此该截面是结构中的最危险截面,所以当从应力方面考虑灌注方案优劣时,拱脚截面应力是重要评价指标,其值越小方案越优。由图4,5可知,灌注方案1为最优方案。

3.2.2 变形

在使用相同钢管材料的条件下,拱肋变形越小混凝土施工方案越好。本文选择 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 和拱顶处截面挠度评价施工方案优劣,以施工完成后的挠度为例进行分析,如表3所示。由表3可知,不同施工方案下上下游拱肋挠度均在 $L/8$ 到 $L/4$ 处增幅明显,且上下游拱肋挠度变化趋势基本一致。上游拱肋 $L/8$ 截面挠度极差为0.537mm,下游拱肋 $L/8$ 截面挠度极差为0.613mm,上游拱肋 $L/4$ 截面挠

度极差为0.501mm,下游拱肋 $L/4$ 截面挠度极差为0.401mm,上游拱肋 $3L/8$ 截面挠度极差为0.158mm,下游拱肋 $3L/8$ 截面挠度极差为0.152mm,上游拱肋拱顶截面挠度极差为0.105mm,下游拱肋拱顶截面挠度极差为0.173mm,因为本工程采用非对称泵送施工方法,可能导致上下游拱肋在短时间内变形有所不同,拱肋不同截面挠度极差最大值为0.613mm,基本可忽略不计,且由于结构面内刚度明显大于面外刚度,可知混凝土施工顺序对金沙江大桥拱肋变形的影响较小。因拱顶截面在各关键截面中挠度最显著,应采用拱顶截面挠度最小时的方案作为最优方案。综合分析方案1拱顶挠度最小,因此其为最优方案。

表3 不同施工方案下拱肋钢管各截面最后施工阶段挠度

Table 3 Each cross-section deflection of the arch rib steel tubes at the final construction stage under different construction schemes

施工方案编号	上游				下游			
	$L/8$	$L/4$	$3L/8$	拱顶	$L/8$	$L/4$	$3L/8$	拱顶
1	-9.160	-19.867	-23.526	-24.185	-9.140	-19.816	-23.514	-24.185
2	-9.144	-19.837	-23.537	-24.314	-9.156	-19.846	-23.503	-24.249
3	-9.388	-20.254	-23.661	-24.262	-9.350	-20.154	-23.655	-24.339
4	-9.092	-19.848	-23.527	-24.275	-9.128	-19.771	-23.515	-24.341
5	-9.071	-19.819	-23.546	-24.329	-9.154	-19.844	-23.504	-24.250
6	-9.083	-19.849	-23.537	-24.286	-9.139	-19.815	-23.516	-24.298
7	-9.156	-19.846	-23.503	-24.249	-9.144	-19.837	-23.537	-24.314
8	-9.140	-19.816	-23.514	-24.295	-9.160	-19.867	-23.526	-24.268
9	-9.154	-19.844	-23.504	-24.253	-9.071	-19.819	-23.546	-24.329
10	-9.139	-19.815	-23.516	-24.298	-9.083	-19.849	-23.537	-24.286
11	-9.129	-19.772	-23.515	-24.339	-9.163	-19.866	-23.519	-24.261
12	-9.128	-19.771	-23.515	-24.341	-9.092	-19.848	-23.527	-24.275
13	-9.161	-19.863	-23.521	-24.268	-9.055	-19.754	-23.525	-24.356
14	-9.090	-19.845	-23.529	-24.281	-9.054	-19.753	-23.525	-24.358
15	-9.158	-19.864	-23.527	-24.274	-9.061	-19.797	-23.528	-24.316
16	-9.142	-19.835	-23.539	-24.318	-9.073	-19.827	-23.519	-24.273
17	-9.081	-19.847	-23.539	-24.292	-9.060	-19.795	-23.529	-24.319
18	-9.070	-19.817	-23.548	-24.333	-9.071	-19.825	-23.521	-24.278
19	-9.061	-19.797	-23.528	-24.316	-9.158	-19.864	-23.527	-24.274
20	-9.591	-19.827	-23.519	-24.273	-9.667	-19.835	-23.539	-24.318
21	-9.055	-19.754	-23.525	-24.356	-9.161	-19.863	-23.521	-24.268
22	-9.054	-19.753	-23.525	-24.358	-9.090	-19.845	-23.529	-24.281
23	-9.071	-19.825	-23.521	-24.278	-9.070	-19.817	-23.548	-24.330
24	-9.060	-19.795	-23.529	-24.319	-9.081	-19.847	-23.539	-24.292

4 结语

1) 在混凝土灌注过程中,钢管应力逐渐增大,当完成最后1根钢管混凝土灌注时,拱脚、 $L/4$ 和拱顶处钢管应力均达最大值。

2) 以施工完成后的拱肋 $L/8$ 、 $L/4$ 、 $3L/8$ 和拱顶处截面挠度评估变形程度,结果表明拱肋不同截面挠度极差最大值为0.613mm,基本可忽略不计,混

混凝土施工顺序对金沙江大桥拱肋变形的影响较小。

3) 通过建立特定的有限元模型, 并采用双单元法模拟混凝土灌注过程, 充分考虑钢管与混凝土之间的相互作用, 可更准确地模拟结构施工过程中的实际受力行为。

4) 经比选选择方案 1 的混凝土施工顺序, 取得良好施工效果。

参考文献:

- [1] 顾箭峰. 钢管混凝土拱桥灌注混凝土仿真分析研究 [D]. 西安: 长安大学, 2012.
GU J F. Simulation analysis for the pumping liquid concrete process of concrete-filled steel tube arch bridge [D]. Xi' an: Changan University, 2012.
- [2] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2016.
CHEN B C. Concrete filled steel tubular arch bridges [M]. 3rd edition. Beijing: China Communications Press, 2016.
- [3] 陈礼榕, 陈宝春. 钢管混凝土哑铃形截面拱桥应用与分析 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2016, 41 (1): 270-275.
CHEN L R, CHEN B C. Application and analysis of concrete-filled steel tubular arch bridge with arc rib of dumbbell-shaped cross section [J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2016, 41 (1): 270-275.
- [4] 胡迎新, 王思伟. 非对称式网状系杆拱桥结构力学性能研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (24): 45-49.
HU Y X, WANG S W. Mechanical performance of asymmetric network tied arch bridge structure [J]. Construction technology, 2024, 53 (24): 45-49.
- [5] ZHENG J L, WANG J J. Concrete-filled steel tube arch bridges in China [J]. Engineering, 2018, 4 (1): 143-155.
- [6] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥计算理论研究进展 [J]. 土木工程学报, 2003, 36 (12): 47-57.
CHEN B C. State-of-the-art theory of calculation for concrete-filled steel tubular arch bridge [J]. China civil engineering journal, 2003, 36 (12): 47-57.
- [7] HAN L H, LI W, BJORHOVDE R. Developments and advanced applications of concrete-filled steel tubular (CFST) structures; Members [J]. Journal of constructional steel research, 2014, 100: 211-228.
- [8] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WANG X M. Numerical analysis of ANSYS engineering structure [M]. Beijing: China Communications Press, 2007.
- [9] 魏焱波, 王海峰. 大跨度拱桥劲性骨架管内压注及拱圈外包混凝土施工技术 [J]. 施工技术 (中英文), 2024, 53 (4): 109-113.
WEI Y B, WANG H F. Construction technology of large-span arch bridge with strong skeleton pipe pressing and arch ring wrapped with concrete [J]. Construction technology, 2024, 53 (4): 109-113.
- [10] 余强. 钢管砼拱桥拱肋安装与管内砼灌注应力调整研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
YU Q. Research on arch rib installation and concrete pouring stress adjustment in steel tube concrete arch bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2017.
- [11] 徐波. 哑铃形钢管混凝土拱桥爆管成因分析与构造改进研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
XU B. Analysis of the causes of pipe burst and structural improvement of dumbbell-shaped concrete-filled steel tube arch bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [12] 陈宝春, 肖泽荣, 韦建刚. 钢管混凝土哑铃形拱肋灌注混凝土时的截面应力分析 [J]. 中国公路学报, 2005, 18 (1): 73-76.
CHEN B C, XIAO Z R, WEI J G. Analysis on stresses of dumbbell-shaped cross-section of CFST arch rib during concrete pouring construction [J]. China journal of highway and transport, 2005, 18 (1): 73-76.
- [13] 何文敏. 北深沟大桥钢管混凝土泵送顶升施工技术 [J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2011, 10 (3): 29-32.
HE W M. Pump ascending construction technology for steel pipe concrete of Beishengou Bridge [J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2011, 10 (3): 29-32.
- [14] 白向龙, 张义, 田世宽, 等. 上承式 CFST 拱肋施工安全技术研究 [J]. 施工技术 (中英文), 2023, 52 (21): 81-87.
BAI X L, ZHANG Y, TIAN S K, et al. Research on construction safety technology of concrete filled steel tubular arch bridge deck arch rib [J]. Construction technology, 2023, 52 (21): 81-87.
- [15] 李传习, 曾昭东, 董创文. 哑铃型钢管混凝土拱桥拱肋混凝土灌注施工稳定分析 [J]. 公路工程, 2007, 32 (4): 142-145.
LI C X, ZENG Z D, DONG C W. Stability research of the construction of the dumbbell-shaped arch rib of CFST arch bridge [J]. Highway engineering, 2007, 32 (4): 142-145.
- [16] 贾云. 钢管混凝土拱桥混凝土泵送过程仿真模拟分析 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2023.
JIA Y. Simulation analysis of concrete pumping process of concrete filled steel tubular arch bridge [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2023.
- [17] 赵艺程, 牟廷敏, 邹圻, 等. 大跨径钢管混凝土拱桥管内混凝土顶升灌注工艺试验 [J]. 公路交通科技, 2023, 40 (3): 115-122.
ZHAO Y C, MOU T M, ZOU Q, et al. Test on technology of jacking and pouring concrete in pipe of long-span CFST arch bridge [J]. Journal of highway and transportation research and development, 2023, 40 (3): 115-122.