

王永,李隆,汪建群.梁肋斜交空间曲面吊索异形拱桥设计关键技术[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2021,36(2):46-51. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.007

WANG Y, LI L, WANG J Q. Key Design Technology of Special Shaped Arch Bridge with Skew Beam and Rib and Curved Surface Suspender[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021,36(2): 46-51. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.02.007

梁肋斜交空间曲面吊索异形拱桥设计关键技术

王永¹,李隆²,汪建群^{2*}

(1.北京交通大学 经济管理学院,北京 100044;2.湖南科技大学 土木工程学院,湖南 湘潭 411201)

摘要:拱肋与桥面斜交形成造型独特的异形斜跨拱桥,可用于城市景观桥梁.以某桥为实例,阐述了梁肋斜交空间曲面吊索异形拱桥设计的关键技术.该桥主跨190 m,主梁钢箱梁全宽达33.34 m,与钢箱拱肋斜交,吊索呈空间曲面分布,体系受力复杂,施工涉及多次体系转换,工序复杂.建立了空间有限元计算模型,对桥梁施工全过程、桥梁整体稳定性和弹塑性以及局部受力复杂区域进行了仿真分析.计算结果表明,该桥各关键设计参数均满足规范要求.该梁肋斜交空间曲面吊索异形结构为拱桥结构体系的创新发展提供了新的案例.

关键词:异形拱桥;仿真分析;整体稳定性;弹塑性分析;局部分析

中图分类号:U442.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-9102(2021)02-0046-06

Key Design Technology of Special Shaped Arch Bridge with Skew Beam and Rib and Curved Surface Suspender

WANG Yong¹, LI Long², WANG Jianqun²

(1. School of Economics and Management, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The skew intersection of arch rib and bridge deck forms a special-shape skew span arch bridge, which can be used for urban landscape bridges. The key design technology of special-shape arch bridge with skew beam and rib and curved surface suspender was discussed with a real bridge. The main span of the bridge was 190 m, the full width of the steel box girder was 33.34 m, which was obliquely intersected with the arch rib. The suspenders were distributed in a spatial curved surface, the system stress was complex, and the construction process was complicated with many system transformations involved. Finite element models were established to simulate and analyze the whole construction process of the bridge, the overall stability and elastic-plasticity of the bridge and the complex area of local forces. The calculation results show that the design meets the requirements of the code. Therefore, it provides a new case for the innovation and development of arch bridge structure system.

Keywords: special-shape arch bridge; simulated analysis; overall stability; elastoplastic analysis; local analysis

拱桥是历史最悠久的桥型,结构受力以压应力为主,经济性能好,承载能力高,造型美观,因而特别适用于圬工材料.随着材料的发展,钢材的使用使得拱桥的结构形式和跨径进一步发展,大跨径拱桥和异形

收稿日期:2021-02-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51408218);湖南省科技厅资助项目(14JJ2094;18A202)

*通信作者,E-mail:jqw@hnust.edu.cn

结构拱桥不断涌现^[1-3].传统的拱桥主拱圈与桥面在同一个竖面内,主拱圈主要承受压力^[4].拱肋与桥面斜交形成造型独特的异形斜跨拱桥,可用于城市景观桥梁^[5-7].西班牙坎波桥(1990年,主跨75 m)的设计采用了单根钢管混凝土拱肋与主梁斜交跨越,为第一座斜跨拱桥.英国在1997年建成了主跨为50 m的Humble桥,设计采用变截面钢箱拱肋与钢筋混凝土桥面板斜交体系.2002年建成通车的巴西JK总统大桥,桥面宽度为24 m,独特的梁肋斜交结构成为当地的地标建筑^[8-9].我国已建成了190 m主跨梁肋斜交空间曲面吊索异形拱桥,钢箱主梁全宽达33.34 m,刷新了斜交拱桥的桥面宽度记录.本文以该桥为案例,阐述了梁肋斜交空间曲面吊索系杆陡拱设计的关键技术.

该桥钢箱主梁与钢箱拱肋斜交,吊索呈空间曲面分布,体系受力复杂,施工工序繁杂且涉及多次体系转换.采用有限元分析软件 ANSYS 建立了该桥的空间有限元计算模型,对桥梁施工全过程进行了模拟,对极限状态下桥梁整体稳定性和弹塑性进行了分析,并对局部受力复杂区域进行了精细化仿真.分析结果表明,该桥各关键设计参数满足规范要求.该梁肋斜交空间曲面吊索异形结构为拱桥结构体系的创新发展提供了新的案例.

1 工程背景

该桥位于 $R=600$ m的平面曲线上,主跨为190 m,矢高62.1 m,桥面钢箱梁与钢箱拱肋斜交布置.主梁为扁平钢箱梁,全宽达33.34 m,梁高3.0 m,双向六车道布置.主梁为密布横隔板体系,标准间距为3 m.主梁不设纵坡,双向设2%横坡排水.该桥的设计采用双索面,共布置14对吊索,呈空间曲面分布,间距为12 m,两侧设23 m无索区.拱肋设计采用单箱室钢箱截面,宽7.04 m,高3.8 m,每隔3 m设置一道横隔板.拱肋上设置20处吊点,水平间距为6 m.该桥立面及平面布置如图1所示.

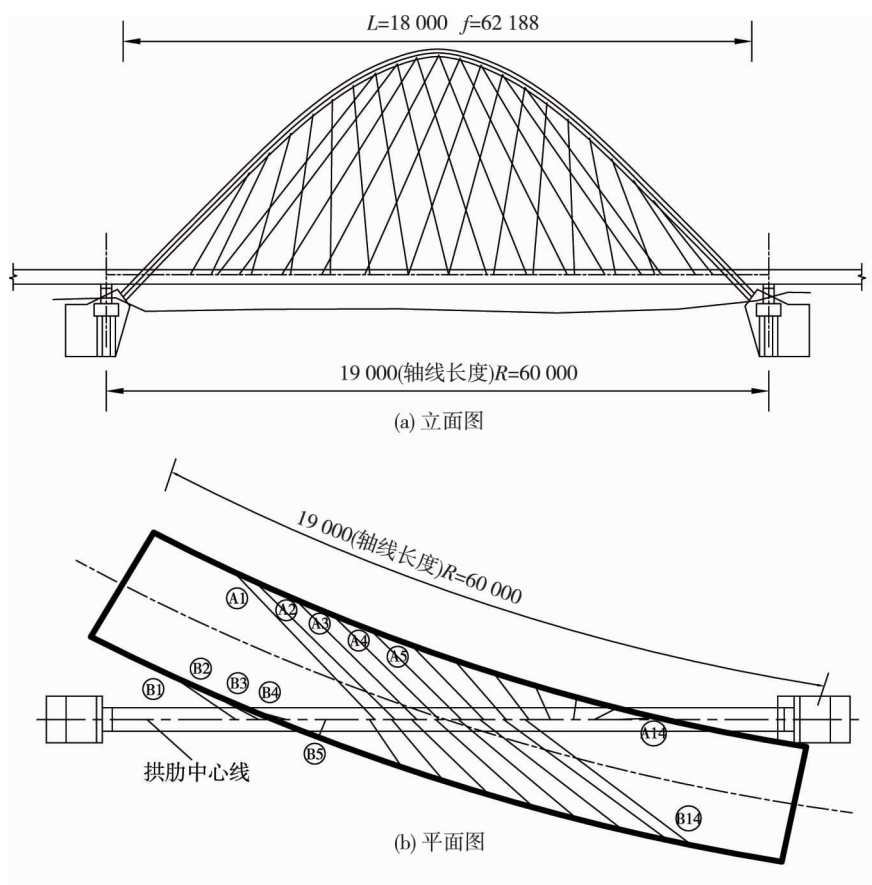


图1 大桥立面及平面布置(单位:cm)

该桥钢箱主梁和拱肋均在工厂预制施工,移运到现场后进行拼装焊接.具体施工流程:首先施工拱座和5个临时墩,搭设主梁支架,安装主梁,形成六跨连续梁;再搭设主拱圈临时支撑体系,分13段进行拱箱的吊装和现场焊接,在拱肋合拢后拆除拱肋支架;然后按顺序安装吊索,进行分步张拉使主梁脱空,依次拆

除主梁支架和临时墩,进行结构体系转换;最后进行桥面铺装施工,安装栏杆等附属设施并成桥。

该桥的设计和施工存在以下难点:(1)桥梁施工过程中结构涉及多次体系转换,工序复杂,需要对施工全过程进行精细化模拟仿真,以确定施工受力的安全性并合理设置预拱度。(2)该桥为异型梁肋斜交拱桥,主拱圈的受力有别于常规体系,因此有必要对结构在偶然荷载(如风荷载等)作用下的破坏模式和安全性进行分析^[10-11]。(3)吊索呈空间曲面分布,桥梁空间体系受力复杂,主梁局部受力受到影响。

因此,有必要基于上述难点建立空间有限元计算模型,对桥梁施工全过程、桥梁整体稳定性和弹塑性以及局部受力复杂区域进行仿真验算分析。

2 施工过程模拟分析

采用有限元分析软件 ANSYS 建立全桥模型对该桥进行施工全过程仿真分析,成桥状态整体模型如图 2 所示。建模时考虑到 beam188 梁单元可以方便地模拟复杂截面的几何形状,且可兼顾几何非线性和材料非线性,因此,主拱圈和钢箱梁均采用 beam188 单元建模,并利用 beam4 单元实现刚臂连接。全桥模型包含 481 个单元,即 370 个 beam188 梁单元、73 个 beam4 单元、28 个 link8 杆单元和 10 个 link10 杆单元。图 3 和图 4 分别给出了代表性的主梁和拱肋节段模型图。

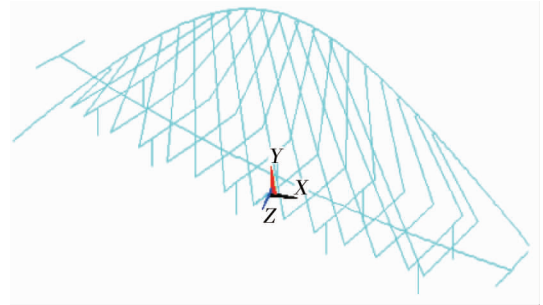


图 2 成桥状态有限元模型

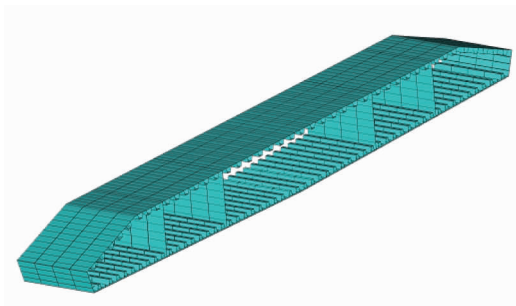


图 3 主梁单元(A3)

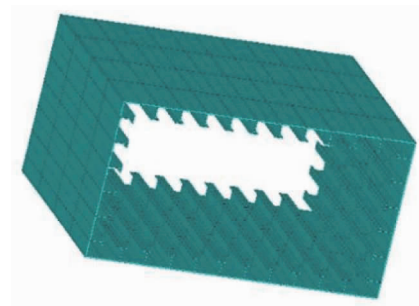


图 4 拱肋单元(第二节段)

按照 11 个施工步骤模拟桥梁施工,具体工况如表 1 所示。分析时主要考虑的荷载包括结构自重、二期恒载、梁端压重以及其他临时荷载。

表 1 施工计算工况

工况编号	工况内容
施工步骤 1	施工拱座和临时墩,搭设支架,施工主梁
施工步骤 2	支架施工拱肋
施工步骤 3	张拉 A07、A08、B07、B08 吊索,3 [#] 临时墩脱空
施工步骤 4	张拉 A06、A09、B06、B09 吊索,4 [#] 临时墩脱空
施工步骤 5	张拉 A05、A10、B05、B10 吊索,2 [#] 临时墩脱空
施工步骤 6	张拉 A04、A11、B04、B11 吊索
施工步骤 7	张拉 A03、A12、B03、B12 吊索
施工步骤 8	张拉 A02、A13、B02、B13 吊索,5-A [#] 临时墩、1-B [#] 临时墩脱空
施工步骤 9	张拉吊索 A01、A14、B01、B14,实现 1-A [#] 临时墩、5-B [#] 临时墩脱空
施工步骤 10	调整吊杆索力到成桥索力
施工步骤 11	施加桥面铺装和栏杆荷载

在整个施工过程中,按表 1 的施工步骤,主梁和拱肋的最大 Mises 应力出现在施加完桥面铺装和栏杆荷载后,分别为 30.6 和 76.3 MPa,所有 28 根吊杆的最大应力均小于 835 MPa(按照 2 倍安全系数的容许应力取值)。因此,施工过程中主梁、拱肋和吊索的受力满足材料强度要求,结构处于安全状态。同时,由施工

位移计算结果可知,该桥成桥状态的最大累计位移值为 21 cm,满足规范要求.

3 整体稳定性和弹塑性分析

大桥为异型梁肋斜交拱桥,主拱圈的受力有别于常规体系,桥梁拱肋和主梁均为薄壁钢箱截面,吊索分布呈空间曲面且索力较大,因此,有必要对结构在偶然荷载(如风荷载等)作用下的破坏模式和安全性进行分析.

具体的计算内容如下:施工过程中主拱圈裸拱在自重和风荷载耦合作用下的整体弹性稳定和弹塑性稳定;全桥施工完毕结构在使用荷载作用下的整体弹性和弹塑性稳定.建模时验算荷载主要考虑结构自重、二期恒载、梁端压重、汽车活载以及风荷载效应等.该桥主梁和拱肋设计均采用 Q345 钢材,为了兼顾计算效率采用理想的弹塑性本构模型.吊索采用直径为 7 mm、抗拉标准强度为 1 670 MPa 的高强度低松弛镀锌钢丝,本构关系参照文献[12]取值.成桥后结构的整体弹性稳定分析主要考虑了 4 种荷载工况:工况 1,恒载;工况 2,恒载+风荷载;工况 3,恒载+风荷载+活载满载(六车道满跨布载);工况 4,恒载+风荷载+活载偏载(三车道满跨布载).根据规范计算出拱肋从拱底到拱顶横风荷载为 4.43~6.72 kN/m,主梁的横风荷载为 3.50 kN/m.

3.1 弹性稳定验算

大跨度拱桥的拱肋横向刚度一般较弱,在施工过程中容易受到横风的影响导致失稳.自重和风荷载作用下拱肋一类稳定失稳模态计算结果表明:裸拱肋一类稳定第 1 阶的稳定系数为 70.2,为正对称面外失稳;裸拱肋一类稳定第 2 阶的稳定系数为 98.4,为反对称面内失稳.实际施工过程中尤其要注意面外失稳,现场采用风缆增加结构的临时刚度,在施工完毕后再拆除.

该桥的成桥阶段弹性稳定分析主要考虑了 4 种典型荷载工况:工况 1,恒载;工况 2,恒载+风荷载;工况 3,恒载+风荷载+活载满载(六车道满跨布载);工况 4,恒载+风荷载+活载偏载(三车道满跨布载).根据规范计算出拱肋从拱底到拱顶横风荷载为 4.43~6.72 kN/m,主梁的横风荷载为 3.50 kN/m.表 2 给出了各工况的计算结果.

表 2 拱肋弹性失稳计算结果

失稳模态	稳定系数				失稳形式
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	
1 阶	20.185	20.150	16.900	18.379	拱肋在平面内往西侧倾
2 阶	25.844	25.801	21.785	23.615	拱肋在平面内往东侧倾
3 阶	33.112	33.088	27.885	30.240	拱肋平面内失稳
4 阶	37.774	37.753	31.638	34.395	拱肋平面外弯扭失稳

3.2 弹塑性稳定验算

进行施工阶段裸拱整体弹塑性稳定分析和成桥后主桥的整体弹塑性稳定分析^[13-17],其中,施工阶段裸拱整体弹塑性稳定分析主要是研究裸拱在结构自重和风荷载作用下的整体弹塑性稳定,即分析在自重作用下,裸拱能承受的极限风荷载和拱肋的破坏过程.图 5 为拱顶节点横向变形荷载位移曲线,由该曲线的形状特征可以将裸拱结构的破坏过程分为 3 个典型阶段.

在自重作用下,随着风荷载作用的逐渐增加,裸拱结构的破坏过程根据曲线形状可以分为 3 个阶段:第一阶段 AB 段接近直线,拱顶节点横向变形与风荷载的增加呈线性关系,此时拱脚段拱肋的应力一直增加,但最大应力不超过材料的屈服强度 345 MPa,因此整个结构尚处于弹性受力阶段,当最大的荷载系数为 9.57,也即当基本风速达到 72.4 m/s 时,从应力来看拱脚截面接近屈服状态;第二阶段 BC 段为曲线,随着风荷载的继续增加,拱脚段拱肋应力达到屈服的面积进一步增大,整个结构处于弹塑性受力阶段,最大的荷载系数为 13.4,也即当基

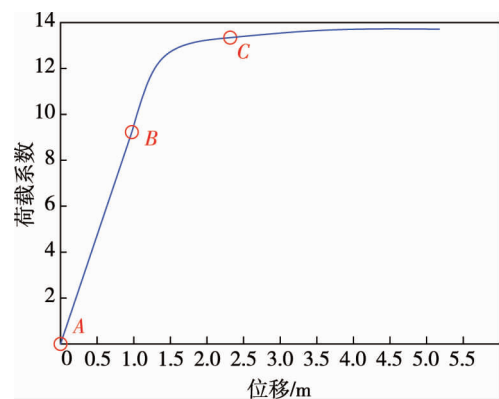


图 5 裸拱拱顶节点横向变形荷载位移曲线

本风速达到 92.8 m/s 时,拱脚整个断面达到屈服应力;第三阶段随着风荷载的继续增加,裸拱结构两拱脚处屈服应力的面积快速增加,结构的横向变形迅速增加,一直到不能继续承受外荷载为止.

大桥成桥后整体弹塑性稳定主要验算了 2 种工作状态:结构在自重作用下的安全储备;结构在自重和风荷载共同作用下所能承受的极限风荷载.自重作用下的安全储备分析结果表明:只考虑自重作用下,大桥弹塑性稳定的薄弱环节是吊索,其弹塑性失稳过程如下(括号内为相应的荷载系数):吊索 B5 首先达到第二个屈服点(2.95)→几乎所有吊索都达到第二个屈服应力,主梁开始出现屈服应力(3.49)→主梁出现较大面积的屈服应力,此时拱肋尚未出现屈服应力(3.6).在自重和风荷载共同作用下所能承受的极限风荷载计算结果表明:西侧环主梁偏南侧的支座脱空(2.96)→东侧环主梁偏南侧的支座脱空(4.76)→拱脚断面开始屈服(10.0)→吊索 B14 由于拉力减小到 0,退出工作(10.28)→吊索 B13, A14, B12, A13, B11, A12, B10 的拉力先后减小到 0,退出工作→拱脚全截面屈服(15.03).

4 局部精细化分析

根据整体受力情况,选取具有代表性的拱上 A3 锚箱和梁上 B7 锚箱节段建立精细化模型进行分析.建模时在端承板上施加成桥索力,取 2 段拱肋建模,两端施加固定约束.选用壳单元 shell63 和体单元 solid45 模拟锚箱,所建立的有限元模型如图 6 和图 7 所示.局部模型有 46 740 个单元,44 244 个节点.考虑结构的对称性并提高计算效率,选取位于 B7 吊点的钢箱梁节段建立对称模型,共有 33 653 个单元,22 467 个节点.在节段模型的两端施加固定约束边界条件,并在端承板上施加成桥索力.

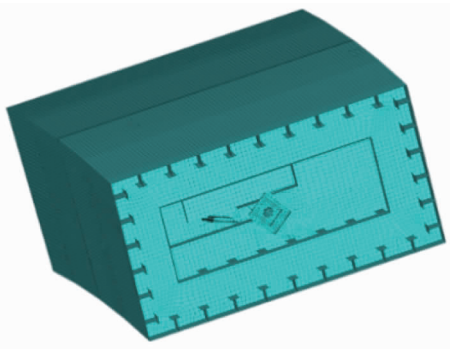


图 6 拱上 A3 锚箱节段有限元模型

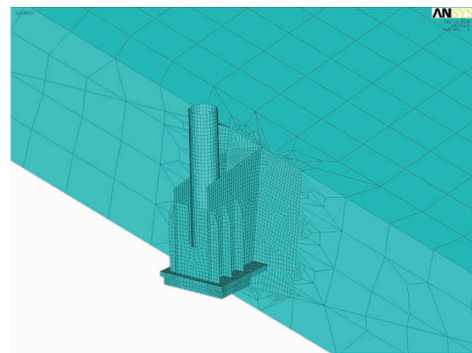


图 7 梁上 B7 锚箱有限元模型

Mises 应力计算结果如图 8 和图 9 所示.由图 8 可知:大桥拱上 A3 锚箱的整体应力水平并不高,在横隔板与底板加劲相交的某些切口处存在应力集中,不利于荷载作用下的最大应力值达到 204 MPa,但仍然小于材料的允许强度.由图 9 可知:梁上 B7 锚箱的整体应力水平较 A3 锚箱更低,基本在 100 MPa 以内.值得注意的是,在边节段腹板与锚箱相交处也存在应力集中的情形,为保证结构受力安全,在施工过程中应特别注意该处锚固区的焊接质量.现场焊接时,由专门人员对腹板与锚箱相交处进行焊接,并进行 100% 探伤检测,使焊接质量满足要求.

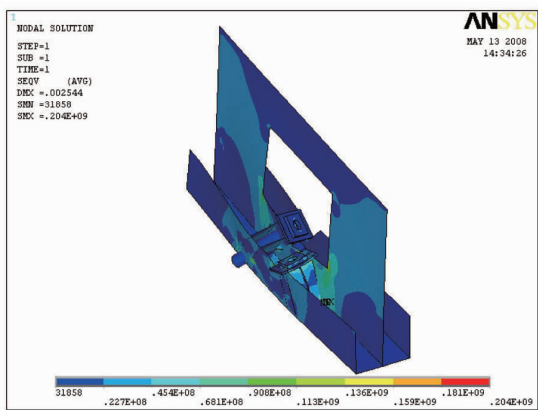


图 8 拱上 A3 锚箱 Mises 应力

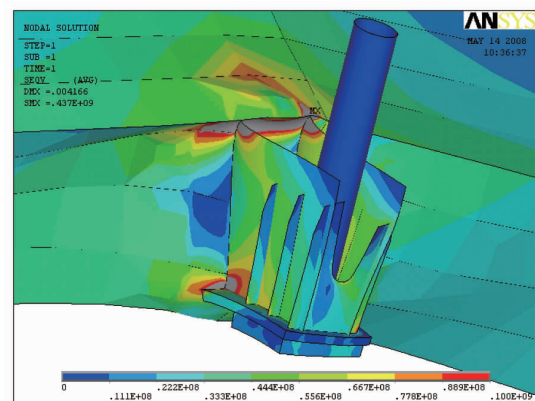


图 9 梁上 B7 锚箱 Mises 应力

5 结论

1) 大桥钢箱主梁的最大 Mises 应力为 30.6 MPa, 钢箱主肋最大 Mises 应力出现在施加完桥面铺装和栏杆荷载后, 为 76.3 MPa; 所有吊杆的最大应力均小于 835 MPa (2 倍安全系数取值的容许应力值); 成桥状态的最大累计位移值为 21 cm, 满足规范要求。

2) 在风荷载和自重作用下, 一类稳定前两阶的稳定系数为 70.2 和 98.4。当基本风速达到 72.8 m/s 时 (荷载系数为 13.4), 拱脚断面全截面屈服。恒载作用下结构的弹塑性稳定系数为 3.6, 当荷载系数增大到 2.95 时, 吊索 B5 最先达到第二个屈服点; 荷载系数为 3.49 时几乎所有吊索都达到第二个屈服点且主梁梁段开始屈服, 荷载系数为 3.6 时主梁出现较大面积的屈服应力。

3) A3 锚箱的整体应力水平并不高, 在横隔板与底板加劲相交的某些切口处存在应力集中, 不利于荷载作用下的最大应力值达到 204 MPa; 梁上 B7 锚箱大部分在 100 MPa 以下, 边腹板相交处存在应力集中, 在施工中应该严格控制锚固区的焊接质量。

参考文献:

- [1] 王乐冰, 梅新咏, 苏杨. 成贵铁路鸭池河特大桥主桥结构设计[J]. 桥梁建设, 2020, 50(s2): 99-103.
- [2] 王睿. 高原山区大跨度铁路拱桥施工关键技术[J]. 桥梁建设, 2020, 50(1): 105-110.
- [3] 王银刚, 李玉美. 上承式异型拱桥的设计[J]. 结构工程师, 2020, 36(5): 197-202.
- [4] 白金超. 反对称钢筋混凝土拱肋异型系杆拱桥施工控制技术[J]. 桥梁建设, 2018, 48(3): 116-120.
- [5] 孙大斌, 施威, 刘祥君. 高速铁路异型拱桥抗震体系及抗震措施分析[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(12): 45-50.
- [6] 王志美, 舒小娟, 汪旭. 斜拉拱桥异形箱梁截面温度梯度效应分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(2): 50-55.
- [7] 郑玉国, 袁万城. 典型大跨连续梁桥悬臂施工全过程地震反应谱分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2013, 28(3): 59-65.
- [8] 吴学华. 斜跨拱桥结构特点及力学性能分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.
- [9] 杨光. 异型拱桥的拱轴线优化和稳定分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.
- [10] 黄天立, 傅金龙. 支架现浇刚性系杆拱桥的吊杆施工张拉力确定方法[J]. 桥梁建设, 2016, 46(5): 35-40.
- [11] 肖雄杰. 某异型系杆拱桥空间力学特性分析[J]. 桥梁建设, 2012, 42(1): 60-66.
- [12] 邱文亮. 自锚式悬索桥非线性分析与试验研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- [13] 彭霞, 王行耐. 单孔斜跨曲梁异形拱桥空间数值分析[J]. 公路, 2009(7): 187-193.
- [14] 刘莉. 钢拱肋异型拱桥设计与研究[J]. 中国市政工程, 2016(2): 106-109.
- [15] 傅金龙, 黄天立. 刚性系杆拱桥成桥吊杆索力优化方法的适用性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2014, 11(4): 6-13.
- [16] Hassan M M, Nassef A O, Damatty A. Determination of optimum post-tensioning cable forces of cable-stayed bridges[J]. Engineering Structures, 2012, 44: 248-259.
- [17] Hu S X, Ma W G, Luo M. Optimization of Stay Cables in the Double-Set Arch Pylon Cable-Stayed Bridge[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015, 711: 495-498.