

文章编号:1673-9469(2024)05-0050-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.05.007

## 130 m 中承提篮系杆钢拱桥吊杆力优化与施工控制

李雪纯,梁辰奇,王慧东\*

(石家庄铁道大学 土木工程学院,河北 石家庄 050043)

**摘要:** 采用有限元分析软件 MIDAS Civil 对石家庄市泊水湾大桥进行研究,对采用零位移法、刚性支承连续梁法、最小弯曲能量法计算得到的合理成桥状态进行对比分析,利用正装迭代法计算三种不同张拉次序的吊杆张拉力,并用影响矩阵法修正杆力值,确定较优的张拉次序。研究发现,最小弯曲能量法得到的成桥吊杆力分布较均匀,端部杆力较中部杆力值偏差较大的问题基本消除,且拱肋最大弯矩较小,系梁和拱肋端部弯矩整体分布较均匀;对比三种不同的吊杆张拉次序,张拉次序一(由跨中至梁端依次张拉)从施工经济性和合理性等方面要优于张拉次序二(由梁端至跨中依次张拉)和张拉次序三(跳杆张拉);三组不同张拉次序下的吊杆力经过迭代,虽然吊杆力最大偏差值均有所降低,但是按照张拉次序一进行迭代计算的成桥吊杆力优于按照张拉次序二和张拉次序三迭代计算的成桥吊杆力。

**关键词:** 成桥吊杆力;吊杆张拉力;合理成桥状态;影响矩阵法;张拉次序

中图分类号:U448.22

文献标识码:A

## Optimization of Boom Force and Construction Control of 130 m Arch with Bridge Medium-bearing Basket-Tie Steel

LI Xuechun, LIANG Chenqi, WANG Huidong\*

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050043, China)

**Abstract:** The finite element analysis software MIDAS Civil was used to study the Boshuiwan Bridge in Shijiazhuang City. The reasonable bridge state calculated by zero displacement method, rigid support continuous beam method and minimum bending energy method was compared and analyzed. The forward iteration method was used to calculate the boom tension of three different tensioning sequences, and the impact matrix method was used to correct the boom force value to determine the better tensioning sequences. Based on the research results, the minimum bending energy method has a more uniform distribution of the boom force of the bridge, and the problem that the end boom force has a larger deviation from the middle boom force is basically eliminated, and the maximum bending moment of the arch rib is small. The overall distribution of bending moments at the end of the tie beam and the arch rib is more uniform. By comparing three different boom tensioning sequences, the tensioning sequence one is tensioning from the mid-span to the beam end, the tensioning sequence two is tensioning from the beam end to the mid-span, and the tensioning sequence three is the jumper tensioning. The tensioning sequence one is superior to the tensioning sequence two and the tensioning sequence three in terms of construction economy and rationality. Three groups of boom forces under different tension sequences are iterated. Although the maximum deviation value of boom force is reduced, the boom force calculated iteratively according to tension sequence 1 is better than that calculated iteratively according to tension sequence 2 and tension sequence 3.

收稿日期:2023-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50175095)

作者简介:李雪纯(1998-),女,山东聊城人,硕士,从事桥梁结构设计及施工控制方面的研究。

\* 通信作者:王慧东(1963-),男,山东威海人,博士,教授,从事桥梁结构设计及施工控制方面的研究。

**Key words:** bridge-forming boom force; boom tension; reasonable bridge state; impact matrix method; tensile sequence

中承式钢箱系杆钢拱桥吊杆力的合理性关系到整座桥梁结构的线形以及受力状态,因此对吊杆力要求较高,有必要对成桥及施工阶段合理的吊杆力进行研究,并且在模拟、分析时需要选取合适变量、目标函数及约束条件。

周绪红等<sup>[1]</sup>以合龙后的线形为优化目标,以索力初值、截面内力等为约束条件,考虑结构大变形的影响,辅之以随动坐标迭代法求得最优索力。徐岳等<sup>[2]</sup>结合线性规划的理论和影响矩阵法,以合龙阶段各扣索点位移值为约束条件计算吊杆力初值,计入切线拼装位移的影响后,通过正装插值迭代得到最优吊杆力。刘世建<sup>[3]</sup>通过对大跨提篮拱二次调索过程中的影响矩阵增设加权系数,使得迭代运算加速收敛,并有效降低了非线性效应对结构的影响。

本文以 130 m 提篮中承式钢拱桥为背景进行吊杆力研究,借鉴斜拉桥的索力优化方法研究系杆拱桥的吊杆力优化问题,主要分为两个部分:首先通过零位移法、最小弯曲能量法、刚性支撑连续梁法计算成桥吊杆力并进行对比,然后通过正装迭代法分析成桥吊杆力反推出的三种不同张拉次序下的吊杆张拉力,比较较优张拉方案,最后通过影响矩阵法迭代吊杆张拉力,并进一步比较较优吊杆张拉力。

### 1 工程概况

石家庄市泊水湾系杆拱桥为中承式提篮钢箱系杆拱桥,拱肋绕拱脚连线方向旋转倾斜,形成空间拱式结构,跨径 130 m,主拱跨径 117.03 m,平面内矢高为 50 m,主体钢结构采用 Q345qE 钢;拱座、立柱采用 C40 混凝土;二期恒载考虑伸缩缝、顶棚、检修和排水系统,以及铺装、防撞护栏等附属设备重量。该桥立面布置见图 1,平面布置见图 2。

### 2 有限元模型

采用 Midas Civil 有限元软件建立整桥空间梁格模型,分析空间受力性能。系杆及拱肋采用梁单元模拟,吊杆采用桁架单元模拟。本模型将桥体共划分成 831 个节点,1 807 个单元。根据具体研究情况,建立一次成桥模型及施工过程的模型

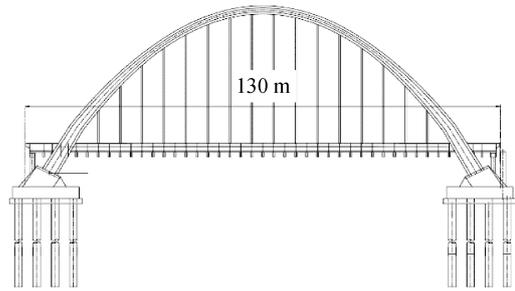


图 1 泊水公园系杆拱桥立面布置

Fig. 1 Elevation arrangement of the tie arch bridge in Boshui Park

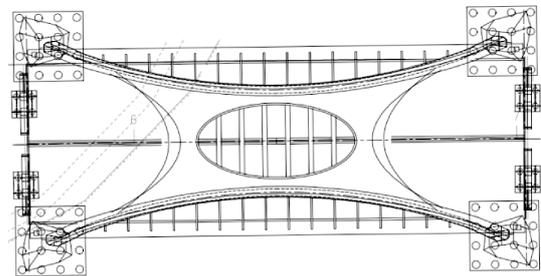


图 2 泊水公园系杆拱桥平面布置

Fig. 2 Plan layout of the tie arch bridge in Boshui Park

仿真模拟<sup>[4]</sup>。主梁采用双边箱系梁+横梁+小纵梁的梁格体系。拱肋与系梁腹板采用整体节点板形式,桥面板采用正交异性钢桥面板。桥位中心向两侧设纵坡 0.5%;拱肋分 A、B、C 节段,由两片分离的拱肋及横撑组成组合式拱圈,共设 9 道一字横撑、16 道斜撑增强拱肋的整体稳定性。主要构件材料特性及截面参数如表 1 所示。全桥共 16 对吊杆。吊杆上端固定,下端张拉。两端均设有叉耳,通过销轴与拱肋、系梁上的耳板连接。现场施工时,在吊杆张拉前割断桥面系支架,张拉后进行铺装使之达到成桥吊杆力。

表 1 主要构件材料特性及截面参数

Tab. 1 Material properties and cross-section parameters of the main components

构件	材料类型	弹性模量 /GPa	截面惯性矩 /cm <sup>4</sup>	泊松比 $\nu$	容重/(kN · m <sup>-3</sup> )
系杆	Q345qE 钢材	206	1.43×10 <sup>4</sup>	0.3	77.01
拱肋	Q345qE 钢材	206	2.72×10 <sup>7</sup>	0.3	77.01
吊杆	1 860 MPa 钢绞线	206	7.75×10	0.3	77.01
顶棚横撑	Q345qE 钢材	206	3.55×10 <sup>6</sup>	0.3	77.01

### 3 最优成桥吊杆力确定

#### 3.1 合理成桥状态的确定原则

最优成桥状态,是指以满足规范要求为前提,通过控制不同变量求解吊杆力,在系杆线形平顺且内力分布均匀的基础上,取一组合适的吊杆内力,依据吊杆力均匀分布、长吊杆相比短吊杆受力更大等原则,在一定程度上保证结构具有安全储备量。同时应避免主加劲梁、拱肋及系梁由于内力过大而导致的结构局部破坏。

确定合理成桥状态以指定受力或位移状态、无约束优化等方式计算,参考代金鹏等<sup>[5-7]</sup>分别用不同的系杆拱桥成桥阶段的索力优化方法对比分析,本文选用刚性支撑连续梁法、零位移法和最小弯曲能量法计算成桥状态下的吊杆力。

#### 3.2 吊杆力优化分析

采用上述三种方法计算得到的成桥杆力值见图3所示,成桥状态下系梁弯矩分布见图4(a)所示,拱肋弯矩分布如图4(b)所示。

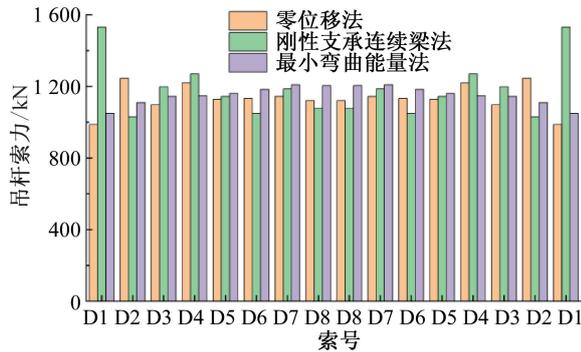


图3 成桥吊杆力计算值

Fig. 3 Calculated value of boom force for bridge formation

从图3中可以看出,三种方法求解得到的吊杆力分布规律各不相同,大部分吊杆力在900~1300 kN,拱肋端部吊杆力多出现突变,最大不超过1600 kN。

由图4可知:刚性支撑连续梁算法,吊杆力作用下拱肋产生竖向位移使系梁也产生竖向位移,系梁端部弯矩过大,且正负弯矩交替受力不连续。拱肋截面弯矩结果较均匀;但吊杆力分布不均匀,且梁端吊杆出现较大值。零位移算法,系梁中部弯矩较小且正负交替分布均匀,拱肋端部正负弯矩相距过大,此方法用于本桥时虽达到指定系梁各吊点竖向位移为0的控制目标,但吊杆受力分配并不理想,出现了吊杆力值骤降。最小弯

曲能量法,吊杆力分布较均匀,指定受力状态的吊杆力优化方法,基本消除了端部杆力较中部杆力值偏差较大的问题,拱肋最大弯矩较小,系梁和拱肋端部弯矩整体分布较均匀,但系杆弯矩在端部截面偏大,最大值达到5961.43 kN·m,特定截面位置仍有进一步改进的空间。

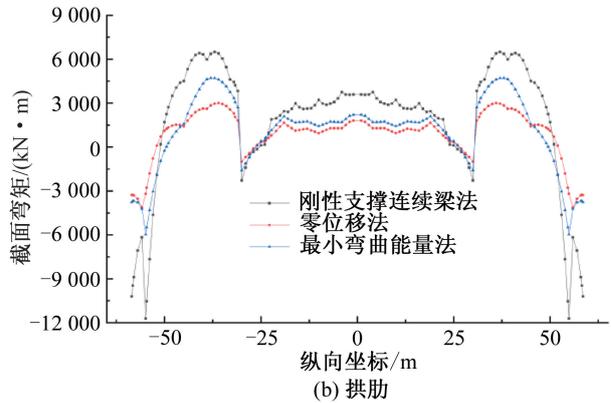
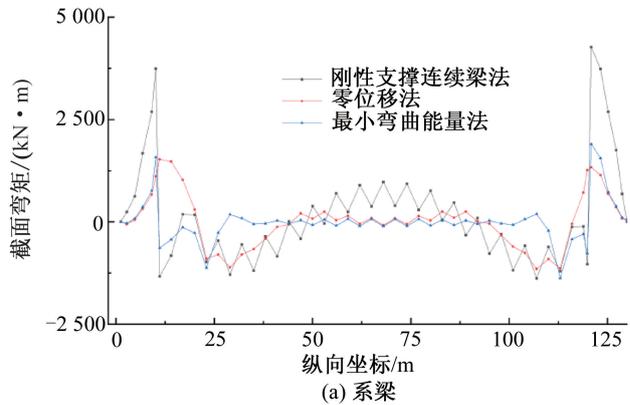


图4 成桥状态各结构弯矩分布

Fig. 4 Distribution of bending moments of each structure in the state of bridge formation

#### 3.3 成桥吊杆力选取与优化

综合对比三种方法计算的吊杆力分布及对应的弯矩结果可以看出:刚性支撑连续梁法和零位移法的吊杆力分布及内力值均不理想,不适用于该桥;最小弯曲能量法,系梁和拱肋端部最大弯矩较小且分布较均匀,优化后的吊杆力值分布较均匀,基本未出现系梁端部弯矩值较大的问题,此方法对于该桥仍有较大改进空间,可将影响矩阵工具应用于此法当中,对结构刚度矩阵进行调整,多次调整构件参数以获得更优解,并将其结果应用于此系杆拱桥初步设计阶段来确定吊杆的杆力。

为得到更合理的优化结果,使用了有约束的弯曲能量法,首先对拱肋端部位置的弯矩进行控制,适当添加竖向约束,对端部节点位移和构件内

表 2 不同张拉次序正装迭代过程 (只展示半桥 D1—D8 的部分迭代过程)

Tab. 2 Forward iteration process with different tensioning sequences

张拉次序一										
索号	成桥索力 /kN	第一次迭代/kN			第二次迭代/kN			第三次迭代/kN		
		约束后最小弯曲能量法								
		初拉力	成桥后	差值	初拉力	成桥后	差值	初拉力	成桥后	差值
D1	1 018	1 150	1 337	-319	831	1 023	-5	825	1 020	-2
D2	1 070	1 204	1 325	-255	950	1 111	-41	909	1 075	-5
D3	1 112	1 204	1 212	-100	1 105	1 179	-67	1 038	1 124	-12
D4	1 132	1 159	1 104	28	1 188	1 183	-51	1 137	1 152	-20
D5	1 143	1 112	1 110	33	1 145	1 156	-13	1 132	1 160	-17
D6	1 159	1 089	1 165	-6	1 083	1 151	8	1 091	1 167	-8
D7	1 162	1 075	1 186	-24	1 050	1 146	16	1 066	1 163	-1
D8	1 173	1 080	1 084	89	1 168	1 154	19	1 188	1 166	7
张拉次序二										
D1	1 018	1 150	1 108	-90	1 059	1 090	-72	987	1 033	-15
D2	1 070	1 204	1 257	-187	1 018	1 129	-59	959	1 079	-9
D3	1 112	1 204	1 317	-205	999	1 131	-19	981	1 118	-6
D4	1 132	1 159	1 221	-89	1 070	1 122	10	1 080	1 140	-8
D5	1 143	1 112	1 077	66	1 178	1 125	18	1 196	1 156	-13
D6	1 159	1 089	983	176	1 265	1 159	0	1 266	1 177	-18
D7	1 162	1 075	1 005	157	1 232	1 206	-44	1 188	1 173	-11
D8	1 173	1 080	1 384	-211	869	1 174	-1	868	1 174	-1
张拉次序三										
D1	1 150	1 109	1 018	-91	1 059	1 078	-60	1 000	1 042	-24
D2	1 204	1 121	1 070	-51	1 154	1 124	-54	1 099	1 089	-19
D3	1 204	1 478	1 112	-366	838	1 115	-3	836	1 116	-4
D4	1 159	1 019	1 132	113	1 273	1 176	-44	1 229	1 149	-17
D5	1 112	1 289	1 143	-146	965	1 181	-38	928	1 147	-4
D6	1 089	1 033	1 159	126	1 215	1 172	-13	1 202	1 172	-13
D7	1 075	1 236	1 162	-74	1 000	1 165	-3	997	1 173	-11
D8	1 080	1 044	1 173	129	1 208	1 140	33	1 241	1 180	-7

力制定合理的约束条件,同时也要保证吊杆力的均匀性,在上述优化结果的基础上,降低系梁最大弯矩,以拱肋弯矩分布更均匀为优化目标,得到泊水公园特大桥吊杆力、系梁和拱肋弯矩与优化前对比结果,见表 2、图 5、图 6,可以看出,约束后得到的吊杆力值分布更均匀,拱肋截面弯矩最大值由 5 961 kN·m 下降至 3 509 kN·m,端部弯矩值由 -3 763 kN·m 上升至 1 102 kN·m,中部截面弯矩均有所下降且分布更均匀,均在 1 300 kN·m 以下。还可以看出,约束后得到的系梁截面最大弯矩值有所升高,端部截面弯矩值增加,中部截面弯矩值基本不变,部分截面弯矩值下降,由于用来反映结构内力状况的目标函数,其极值由结构自身特性和荷载分布情况决定,以结构弯曲能为优化目标,结构形式和荷载条件确定后,弯曲应变能极值也被确定,吊杆力调整会改变弯曲应变能在

系梁和拱肋的比例,但不会降低极值,因此加以约束后拱肋的受力状况得到优化,系梁弯矩总体分布均匀程度较之前差些,使得一部分截面弯矩也会增大,即产生拱肋弯矩分布趋于均匀,系梁弯矩分布趋于不均匀的现象。

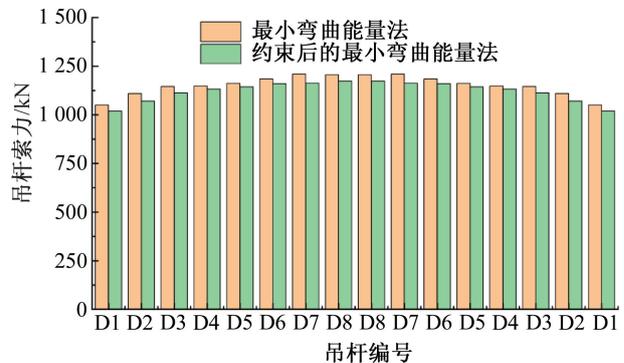


图 5 成桥吊杆杆力计算值

Fig. 5 Calculated value of boom force for bridge formation

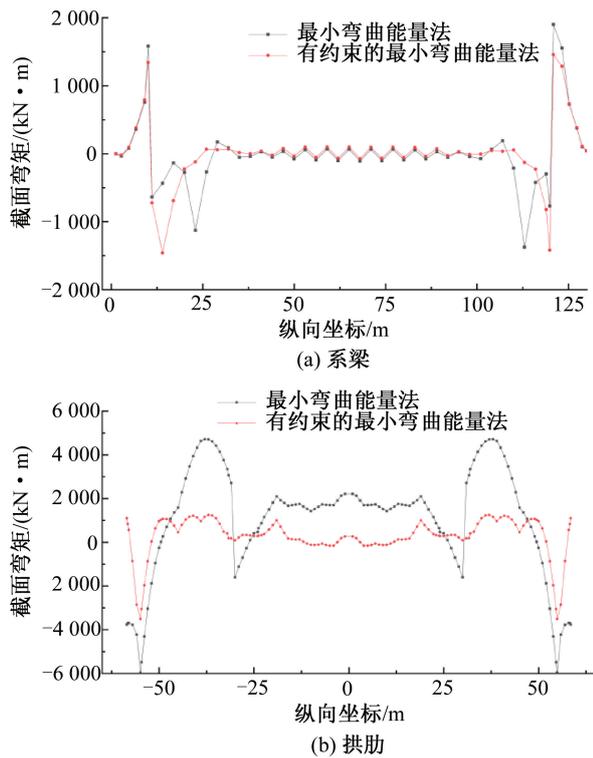


图6 成桥状态各结构弯矩分布

Fig. 6 Distribution of bending moments of each structure in the state of bridge formation

综上,以最小弯曲能量法确定的初步优化结果为基础制定约束条件,用有约束的最小弯曲能量法,得到了更优的吊杆力优化结果和更合理的成桥内力状态。可将该方法在此类系杆拱桥的施工图设计阶段以及施工监控过程中使用,进一步确定更优化合理的吊杆力及成桥状态。

## 4 施工吊杆力确定

### 4.1 吊杆力确定原则

吊杆力调整时,全桥所有吊杆采用分次分批张拉<sup>[8]</sup>,文献<sup>[9]</sup>研究表明:对钢梁吊杆力再次进行调整的优化作用已十分有限,因此对该拱桥进行吊杆力调整时,通过严格控制制造吊杆长、吊杆初拉力的方法,采用施工预拱度设置来调整结构变形,实现对吊杆“一步到位”的调整方式,使成桥状态达到设计要求。

文献<sup>[10]</sup>表明:在全部吊杆张拉完毕前,已张拉的吊杆力一直处于变化状态,全部张拉结束后只有最后张拉的那根吊杆杆力能达到设计值,因此采取逐步调整吊杆力的施工方法,逐步张拉后实现桥面结构主动脱离支架,在桥面铺装及附属设施,施工结束后,给出合理的吊杆力施工指令,

使吊杆调整的数目最少化,保证杆力值,使吊杆力达到预期的设计张拉目标,提高施工效益。

吊杆张拉力决定着成桥后吊杆力的分布、主梁及拱肋的受力情况,因此吊杆初张力的确定要根据以下原则:张拉力充分考虑到与之配套的张拉设备的技术指标;张拉时吊杆力在规范允许范围内,且具有足够的安全储备;张拉吊杆力时要控制好拱肋位移,保证拱肋应力不超限;张拉吊杆力时要保证主梁挠度不产生过大变化;成桥后吊杆力分布均匀,同时保证吊杆力与设计值之间的偏差符合规范相关规定。

### 4.2 施工次序及吊杆张拉次序确定

泊水公园拉篮拱桥桥梁上部结构经施工优化后选择采用先拱后梁的施工方法。首先进行桩基、承台、异形拱座的钢筋绑扎、混凝土浇筑与养护工作,然后采用先低位拼装后提升的方法施工拱肋钢质提升段,提升段提升就位后,进行整拱合龙,使整拱进入自持状态,主拱肋施工结束后,拆除拱肋低位拼装支架及提升塔,然后安装主梁滑移拼装支架,同时拼装系梁、小纵梁、横梁等桥面系结构,最后安装桥面板,主梁施工完成后拆除主梁拼装支架,安装吊杆并初张拉,为节省工期,在张拉吊杆后铺装二期,使拱肋及主梁下沉至设计高程。

为了对不同吊杆张拉次序进行对比分析,设计三种张拉次序,吊杆在横桥向、顺桥向均对称张拉,每次张拉四根,因此,以梁端最短的4根吊杆为D1,跨中最长的4根吊杆为D8依次对每组吊杆编号,张拉次序一为D8至D1,次序二为D1至D8,次序三为D1—D8—D2—D4—D6—D7—D5—D3。三种张拉次序下均能保证结构施工过程及施工状态受力合理性和安全性<sup>[11]</sup>;采用影响矩阵法确定有应力状态下吊杆的施工张拉力,调整吊杆力与目标吊杆力对比后发现,误差控制在2%以内,达到吊杆力优化目的,实现了仅需“一次张拉”就可使吊杆力达到成桥设计的目标。主梁拱肋结构形式、尺寸和施工步骤都已确定,吊杆制造时已经考虑了节段拼装引起的拱肋变形、吊杆伸长量导致的主梁线形变化。施工阶段的吊杆张拉力,是在施工阶段的受力状态、主梁线形等满足规范要求的前提下确定的<sup>[12]</sup>。

### 4.3 施工吊杆力计算与选取

#### 4.3.1 正装迭代法应用

利用Midas Civil仿真模拟施工过程,将上一阶

段优化的目标吊杆力定义为吊杆初拉力,赋予给索单元,节点安装坐标假定为成桥设计标高,进行一次正装计算<sup>[13]</sup>得到成桥状态,将该成桥状态与合理成桥状态比较,求出差值。利用吊杆杆力影响矩阵,根据最小二乘法原理,控制两个成桥状态的差值最小,计算吊杆初拉力调整量,补偿到新的吊杆初拉力上,重复以上步骤,反复迭代,直到结果收敛且结构的内力、线形、应力满足规范要求。由于迭代次数多,表 2 只展示出按三种张拉次序正装迭代的部份过程。

图 7、图 8 所示为各施工阶段需要张拉的吊杆力,根据分析,施工次序三个别吊杆张拉力过大,发生在吊杆 1、2、4、6 处;相比之下按次序二进行张拉,吊杆张拉力过大的根数较少,发生在吊杆 1、2 处;按次序一张拉,张拉力过大的根数更少且吊杆力较均匀,发生在吊杆 3 处。

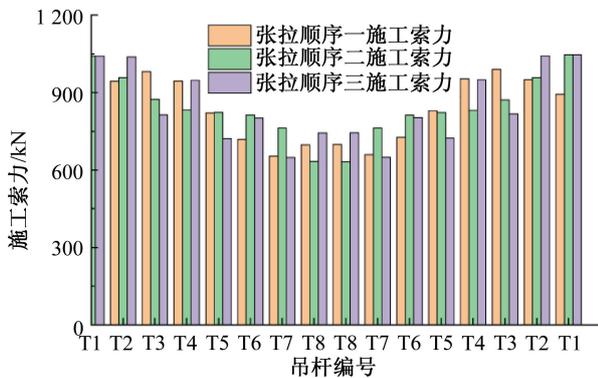


图 7 三种张拉次序施工吊杆力值

Fig. 7 Construction boom force diagram for three tensioning sequences

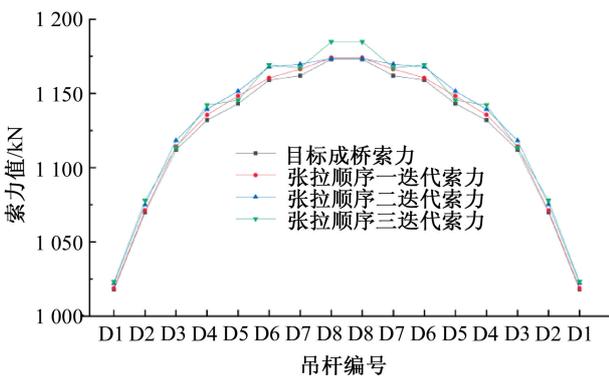


图 8 成桥吊杆力比较

Fig. 8 Comparison of boom forces for bridge formation

三种张拉次序单根张拉力最大分别为 981.15、1 046.85、1 041.05 kN,这与施工次序及结构的刚度效应有关。整体来讲,次序一、二除个别张拉力过大外,其余张拉力都较为均匀。按次序一、二、

三张拉吊杆力,张拉力总和分别为 26 705、26 955、27 069 kN。从张拉施工经济性、施工合理性等方面考虑,按照张拉次序一施工要优于按照次序二和次序三施工。

#### 4.3.2 正装迭代法验证吊杆力

采用正装迭代法对以上三种张拉次序进行了 6 次迭代,5 次迭代结束后,吊杆力结果与合理成桥吊杆力之差在允许的范围内。从图 8 分析可以看出,按张拉次序一及次序二代迭计算的成桥吊杆力与目标吊杆力都较为接近,按三种张拉次序迭代计算成桥吊杆力普遍大于目标吊杆力,张拉次序一与目标吊杆力最大偏差达到 0.46%,发生在吊杆 5、7 处;张拉次序二与目标吊杆力最大偏差达到了 0.74%,发生在吊杆 4、5、6 处;张拉次序三与目标吊杆力最大偏差达到了 0.97%,发生在吊杆 6、8 处;从迭代计算得到的成桥吊杆力方面比较,按张拉次序一迭代计算的成桥吊杆力要优于按照次序二、三代迭计算的成桥吊杆力,三种次序计算下主梁和拱肋线形、内力、吊杆力理想成桥状态与计算成桥状态的误差均在规范允许范围之内,均可达到正装迭代施工要求,但张拉次序一结果更优,本桥最终采用了张拉次序一得到的设计施工吊杆力。

## 5 结论

1) 刚性支承连续梁法、零位移法和最小弯曲能量法三种计算方法得到的成桥吊杆力计算结果中,最小弯曲能量法得到的成桥吊杆力分布较均匀,端部杆力较中部杆力值偏差较大的问题基本消除,且拱肋最大弯矩较小,系梁和拱肋端部弯矩整体分布较均匀,并且采用这种方法计算吊杆力也较为简便,因此,最小弯曲能量法更适用于本桥初步确定成桥杆力阶段。

2) 对比三种不同的吊杆张拉次序,张拉次序一从施工经济性和合理性等方面优于张拉次序二和张拉次序三。三组不同张拉次序下的吊杆力经过迭代,虽然吊杆力最大偏差值均有所降低,但是按照张拉次序一进行迭代计算后的成桥吊杆力仍然优于按照张拉次序二和张拉次序三代迭计算的成桥吊杆力。

3) 若要进一步优化成桥吊杆力,有效减小系杆拱肋最大弯矩,可采取以初步结果为基础,进而指定约束条件来实现。本文对最小弯曲能量法

(下转第 77 页)

15.7~18.5 L/min 之间。

3)数值模拟得到的覆岩裂隙特征与现场实测显示的结果基本一致,说明采用数值模拟定性分析与现场定量观测相结合,综合分析得到采动覆岩导水裂隙带高度的方法是科学、有效的。

#### 参考文献:

- [1] 刘天泉. 矿山岩体采动影响与控制工程学及其应用[J]. 煤炭学报, 1995(1): 1-5.
- [2] 钱鸣高, 石平五, 许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 3-6.
- [3] 郭文兵. 煤矿开采损害与保护[M]. 北京: 应急管理出版社, 2019.
- [4] 杨国勇, 陈超, 高树林, 等. 基于层次分析-模糊聚类分析法的导水裂隙带发育高度研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2015, 32(2): 206-212.
- [5] 国家安全监管总局, 国家煤矿安监局, 国家能源局, 等. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- [6] 国家煤矿安全监察局. 煤矿防治水细则[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2018.

(上接第55页)

确定的吊杆力进一步优化,对拱肋端部位置加以约束后,使得整体上最大弯矩下降,得到更合理的吊杆力及成桥状态,同时也验证该桥的成桥杆力满足设计要求。

4)要确定吊杆初拉力,先以优化的目标吊杆力作为初拉力赋予给索单元进行正装迭代,利用杆力影响矩阵,依据最小二乘法原理修正施工过程中的杆力值,与合理成桥杆力状态对比差值控制在1%之内,实现至预先设定的成桥内力,同时验证该桥的成桥杆力满足施工阶段的要求。

#### 参考文献:

- [1] 周绪红, 戴鹏, 狄谨, 等. 钢箱梁斜拉桥成桥索力优化分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2007, 24(2): 19-23.
- [2] 徐岳, 展丙来, 李扬, 等. 钢管混凝土拱桥斜拉扣挂施工扣索索力的优化计算方法[J]. 公路交通科技, 2016, 33(6): 61-67.
- [3] 刘世建. 基于加权影响矩阵的提篮拱二次调索方法研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2019, 36(2): 43-46.
- [4] 李健, 辛克贵, 张崇厚, 等. 梁拱组合体系桥梁的设计实例[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2008(1): 5-8.

- [7] 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, 2012, 37(4): 613-620.
- [8] 刘英锋, 王世东, 王晓蕾. 深埋特厚煤层综放开采覆岩导水裂缝带发育特征[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 1970-1976.
- [9] 高延法, 黄万朋, 刘国磊, 等. 覆岩导水裂缝与岩层拉伸变形量的关系研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(3): 301-306.
- [10] 杜文刚, 柴敬, 张丁丁, 等. 采动覆岩导水裂隙发育光纤感测与表征模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1565-1575.
- [11] 袁峰, 申涛, 谢晓深, 等. 基于深度学习的地震多属性融合技术在导水裂隙带探测中的应用[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3234-3244.
- [12] 杨达明, 郭文兵, 赵高博, 等. 厚松散层软弱覆岩下综放开采导水裂隙带发育高度[J]. 煤炭学报, 2019, 44(11): 3308-3316.
- [13] 谭毅, 郭文兵, 杨达明, 等. 非充分采动下浅埋坚硬顶板“两带”高度分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(5): 845-851.

(责任编辑 王利君)

- [5] 代金鹏. 128 m 系杆拱桥成桥及施工阶段索力优化研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [6] 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.
- [7] 朱利明, 申昆, 濮卫, 等. 空间三索面斜吊杆非对称系杆钢拱桥合理成桥索力优化[J]. 世界桥梁, 2020, 48(6): 54-59.
- [8] 虞建成, 邵荣光, 王小林. 系杆拱桥吊杆初始张拉力及施工控制[J]. 东南大学学报, 1998, 28(3): 112-116.
- [9] 王震, 卫东, 沈剑卿. 斜跨曲线拱桥施工阶段索力优化分析[J]. 黑龙江交通科技, 2017(6): 90-92.
- [10] 王鹏亮. 吊杆拱桥索力二次调整几何求解与优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] 曹璐, 秦大燕. 中承式提篮拱桥“过程最优, 结果可控”索力优化法研究[J]. 世界桥梁, 2022, 50(6): 52-58.
- [12] 计静, 罗干, 姜信贺, 等. 斜靠式钢箱系杆拱桥成桥索力检测及稳定性分析[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2023, 40(1): 41-48.
- [13] 赵伟, 郑剑涵, 陆森强. 特大跨系杆钢拱桥成桥状态与吊杆张拉力优化分析赵伟[J]. 中外公路, 2016, 36(1): 113-118.

(责任编辑 王利君)