

特大跨径悬索桥钢桁梁运梁栈桥结构设计

朱立山¹, 张国刚^{2,3}, 刘武¹

(1.湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410004; 2.湖南省交通规划勘察设计院有限公司;
3.中南公路建设及养护技术湖南省企业重点实验室)

摘要:岳阳洞庭湖大桥为主跨1 480 m的钢桁梁悬索桥,两跨式布置,采用跨缆吊机方法安装加劲梁,在边跨、主跨无水区及浅水区搭设钢栈桥进行运梁和存梁。对岳阳侧栈桥进行了结构设计,运梁栈桥由钢管桩、贝雷架、分配梁、轨道梁等组成,采用Midas/Civil软件建立了栈桥三维有限元模型,进行了运梁和存梁工况的结构强度和刚度验算,以及存梁状态结构的稳定分析。结果表明:设计的运梁栈桥满足规范要求。此外,采用Abaqus软件建立了运梁支座的精有限元模型,计算结果表明支座的强度和刚度满足规范要求。

关键词:悬索桥;运梁栈桥;钢桁梁;贝雷架;有限元

1 工程概况

杭瑞高速公路湖南段岳阳洞庭湖大桥是临湘至岳阳高速公路全线的控制性工程,是目前中国最大跨径的钢桁梁悬索桥,其主缆跨径组合为:(460+1 480+491) m,主梁跨径组合为:(1 480+453.6) m,锚碇为重力式锚碇;索塔为钢筋混凝土门式塔结构。

加劲梁全宽35.4 m,梁高9 m。采用板桁结合钢桁加劲梁,设计时均考虑板桁共同作用。主桁架为带竖腹杆的华伦式结构,由上弦杆、下弦杆、竖腹杆和斜腹杆组成。主桁桁高9.0 m,桁宽35.4 m,节间长8.4 m。每个节间处设置一道主横桁架。一个标准节段长度16.8 m,由两个节间组成。

目前,悬索桥加劲梁架设主要有4种方法:桥面吊机悬拼法、缆索吊拼装法、跨缆吊机安装法以及柔性轨

索滑移法。根据现场情况,选择采用跨缆吊机方法安装加劲梁,由于洞庭湖悬索桥主边跨浅水区及无水区钢桁梁节段架设区域受到地形水文条件的影响,钢桁梁无法采用常规运梁驳船水运就位进行架设施工,故在浅水区及无水区架设栈桥,进行运梁和存梁作业。栈桥的设计是否合理、结构是否安全关系到整个加劲梁的架设安全及进度。该文对岳阳侧运梁栈桥进行详细的结构设计,以及强度、刚度、稳定性等验算,以保证大桥施工进行顺利、安全。

2 运梁栈桥结构设计

运梁栈桥从岳阳侧A1索塔延伸至江内,总长约258.8 m,从沿江大堤中线计起至江内约143.5 m。标准跨径单跨9 m。栈桥分左右两幅,分别与加劲梁节点位置对应。

- *****
- [9] 李荣.双壁钢围堰支撑体系优化设计研究[J].中外公路,2018(1).
- [10] 丁巍,张娟.超大哑铃形首节双壁钢围堰施工技术[J].中外公路,2019(1).
- [11] 刘浪.跨海桥梁下部结构波流力计算方法研究[D].西南交通大学博士学位论文,2017.
- [12] Kim J, Jeong Y J, Park M S. Structural Behaviors of Cylindrical Cofferdam with Plane and Corrugated Cross Section under Offshore Conditions [J]. International

- Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2017,7(9):334-340.
- [13] Yang W, Li Q. The Expanded Morison Equation Considering Inner and Outer Water Hydrodynamic Pressure of Hollow Piers[J]. Ocean Engineering, 2013,69:79-87.
- [14] 杜修力,赵娟,赵密.大直径深水圆柱结构动水压力的时域算法[J].土木工程学报,2012(S1).

运梁栈桥由钢管桩($\phi 710$ 钢管桩)+桩顶横向分配梁(3I45)+纵向贝雷梁+横向分配梁(2I36b)+运梁轨道(2I45b)组成,各片贝雷梁之间采用角钢花架连接,栈桥端部受力大,故端部花架采用角钢 $\angle 63\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,中间位置花架采用 $\angle 63\text{ mm}\times 4\text{ mm}$ 。钢管桩之间的剪力撑采用 I36b 工字钢。贝雷梁及连接花架采用 Q345 钢材,其他采用 Q235 钢材。跨沿湖路段采用落地轨道。基础立柱采用振打钢管桩,钢管桩采用专用设备(振动锤)插入岩层。运梁栈桥贝雷梁横向联

系图、立面布置图和栈桥桥墩横断面布置图如图 1~3 所示。

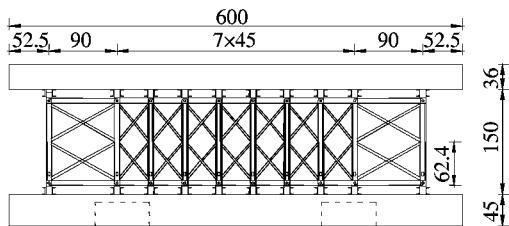


图 1 栈桥贝雷梁横向联系图(单位:cm)

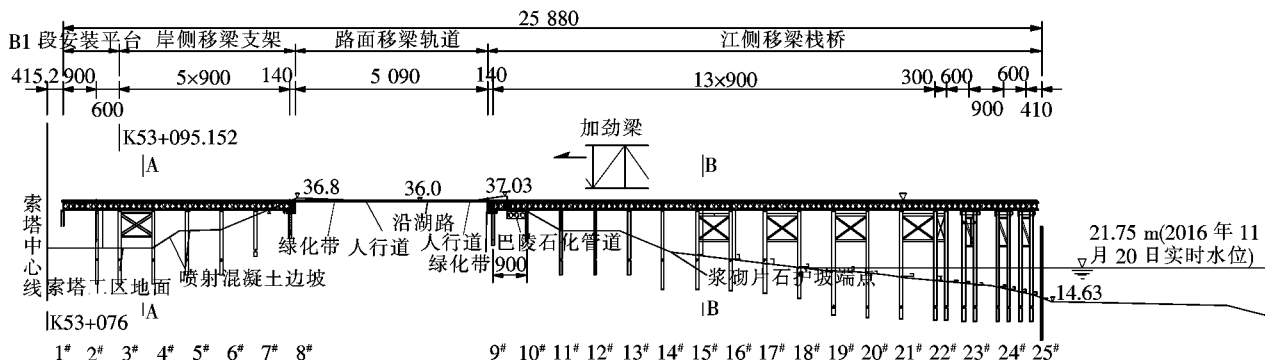


图 2 栈桥立面图(单位:cm)

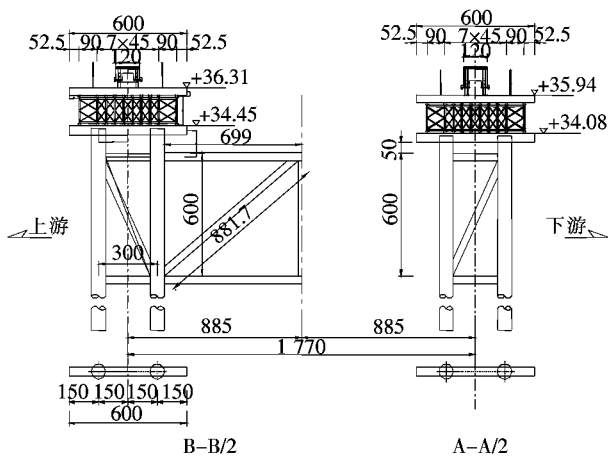


图 3 栈桥桥墩横断面布置图(单位:cm)

桩位置处设置竖向支撑固结。

3.1.1 岸侧移梁支架有限元模型

岸侧移梁栈桥有限元模型立面图、空间图及横断面图分别见图 4~6。该模型单元总数 7 559 个,节点 4 124 个。

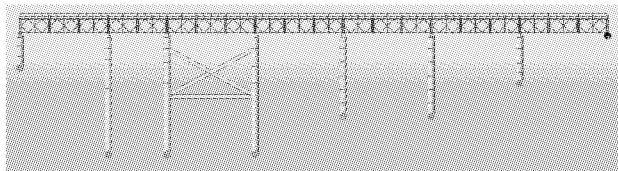


图 4 岸侧栈桥有限元模型立面图

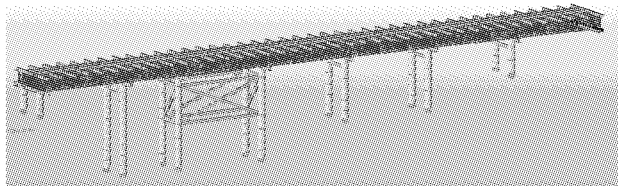


图 5 岸侧栈桥有限元模型空间图

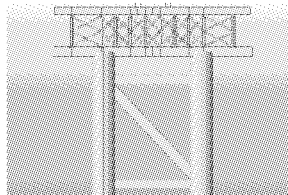


图 6 岸侧栈桥有限元模型横断面图

3 运梁栈桥结构分析

3.1 有限元模型

采用桥梁专业有限元分析软件 Midas/Civil 对运梁栈桥结构进行三维空间有限元分析。桁架弦杆采用梁框架单元,腹杆采用框架单元,贝雷梁单元之间采用铰接连接,贝雷梁单元内部节点采用刚结,贝雷梁横向连接节点亦采用刚结。

运梁栈桥在两端采用简支支撑,在跨中相应钢管

3.1.2 江侧移动梁栈桥有限元模型

江侧移动梁栈桥有限元模型立面图、空间图及横断面图分别见图 7~10。该模型单元总数 36 932 个,节点 20 894 个。

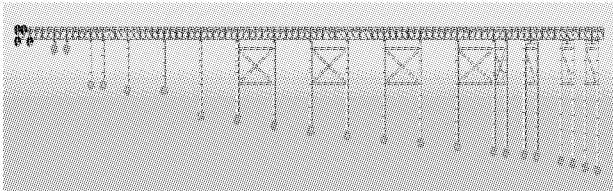


图 7 江侧栈桥有限元模型立面图

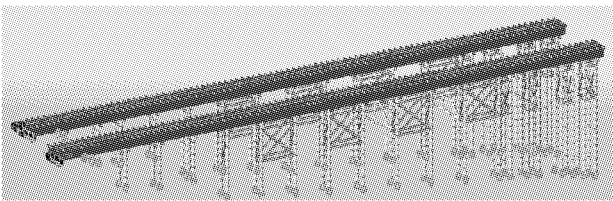


图 8 江侧栈桥有限元模型空间图

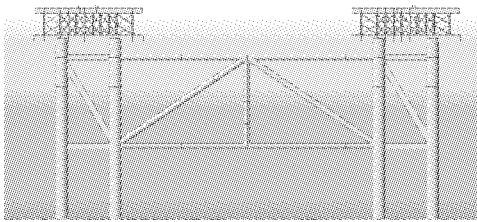


图 9 江侧栈桥有限元模型横断面图

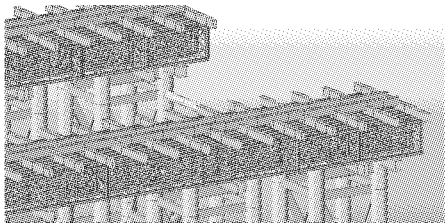


图 10 江侧栈桥有限元模型局部图

3.2 计算荷载

3.2.1 栈桥自重荷载

栈桥为全钢结构,钢结构自重荷载参数,钢材重度:78.5 kN/m³;重力加速度:9.806 m/s²。

3.2.2 加劲梁重量荷载

须用栈桥移运的加劲梁最大重量为 321 t,强度计算时,荷载分项系数恒载为 1.2、活载为 1.4,加劲梁移动时为活载,存梁时为恒载。加劲梁自重荷载分布如图 11 所示。

栈桥存梁阶段,加劲梁 1#~19# 节段均临时存于栈桥之上,1#~7# 梁段临时存在栈桥上之后即进行吊装。由于沿湖路将栈桥分为岸侧栈桥和江侧栈桥,计

算时选取江侧栈桥作为满布钢桁梁荷载进行计算,即 8#~19# 梁段全部存放于江侧栈桥上,如图 12 所示。

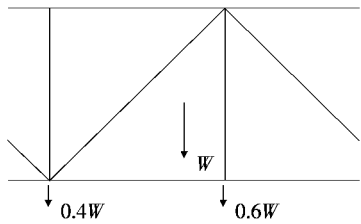


图 11 桁架节段重量分布图

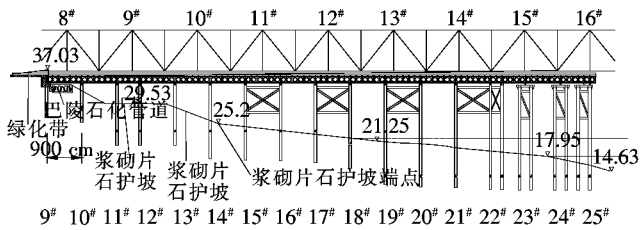


图 12 存梁示意图(单位:m)

3.2.3 风荷载

根据 JTG/T D60—01《公路桥梁抗风设计规范》,施工阶段风荷载计算公式为:

$$F = \frac{1}{2} \rho V_{sg}^2 C_H A_{WH} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度(kg/m³),取 1.25; V_{sg} 为施工分析阵静风风速, $V_{sg} = \eta C_v V_d$,重现期取 20 年, $\eta = 0.88$,湖南岳阳为湖岸地区,地面粗糙度为 A 类,取 $C_v = 1.29$, $V_d = K_1 V_{10}$,基准高度风速取 $V_{10} = 25$ m/s, $K_1 = 1.174 (Z/10)^{0.12}$, Z 为构件基准高度(m); C_H 为风载阻力系数,圆形截面取 1.0,矩形截面取 1.3; A_{WH} 为横向迎风面积(m²)。

可计算得到各构件的风荷载大小如表 1 所示。

表 1 各构件风荷载大小

构件	风荷载大小
栈桥剪刀撑	1.28 kN/m ²
每片贝雷架	2.1 kN
栈桥钢管桩立柱	0.51 kN/m ²
剪刀撑横梁	0.57 kN/m ²
加劲梁	钢桁梁标准段 44.13 kN

3.2.4 水流冲击荷载

流水压力的计算根据 JTG D60—2015《公路桥涵设计通用规范》中的第 4.3.9 条有关规定进行计算。

$$F_w = KA \frac{\gamma V^2}{2g} \quad (2)$$

式中： $\gamma=10\text{ kN/m}^3$ ； $V=2\text{ m/s}$ 。

栈桥钢管桩阻水面积 A 取 14.2 m^2 （以 2017 年实测洪水位 32.0 m 和最大水深处钢管桩计算）；圆形墩柱 K 取 0.8 。

3.2.5 荷载组合

栈桥结构验算工况及荷载组合如表 2 所示。岸侧栈桥考虑运梁工况、江侧栈桥考虑运梁及存梁工况。

表 2 计算工况及荷载组合

计算结构	计算工况	荷载组合
岸侧栈桥	工况 1	运梁过程结构强度验算
		1.2 自重+1.4 桁梁移动荷载
	运梁过程结构刚度验算	1.0 自重+1.0 桁梁移动荷载
江侧栈桥	工况 2	运梁过程结构强度验算
		1.2 自重+1.4 桁梁移动荷载+0.98 水流荷载+0.7 风荷载
	运梁过程结构刚度验算	1.0 自重+1.0 桁梁移动荷载+1.0 水流荷载+1.0 风荷载
	工况 3	存梁工况结构强度验算
		1.2 自重+1.2 桁梁存梁荷载+0.98 水流荷载+0.7 风荷载
	存梁工况结构刚度验算	1.0 自重+1.0 桁梁存梁荷载+1.0 水流荷载+1.0 风荷载
		1.0 自重+1.0 桁梁存梁荷载+1.0 水流荷载+1.0 风荷载

3.3 计算结果

3.3.1 工况 1 计算结果

(1) 贝雷架强度计算结果

贝雷架的强度验算结果见图 13、14。

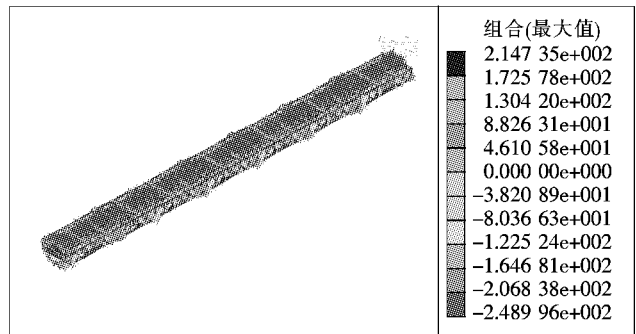


图 13 贝雷架最大正应力包络图(单位:MPa)

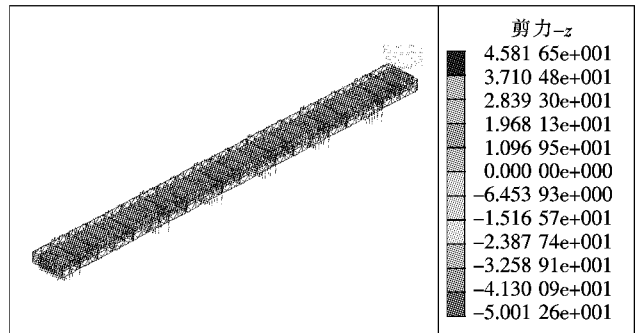


图 14 贝雷架最大剪应力包络图(单位:MPa)

由图 13、14 可见：岸侧贝雷架最大应力发生在江侧端部和塔侧端部边支点位置的花架，最大压应力 249.0 MPa ，小于 Q345 钢材抗压强度设计值 $f_d=275\text{ MPa}$ ；贝雷架最大剪应力 50.0 MPa ，小于 Q345 钢材抗剪强度设计值 $f_{vd}=160\text{ MPa}$ 。

(2) 轨道梁强度计算结果

轨道梁的强度验算结果见图 15、16。

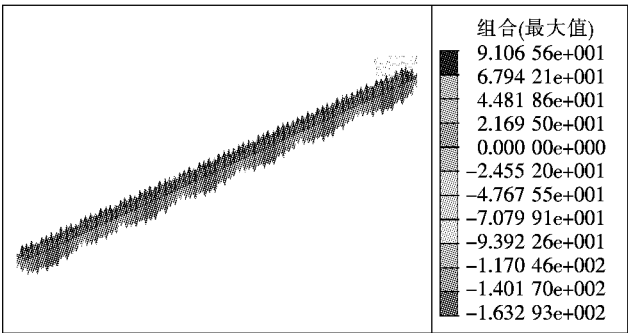


图 15 轨道梁最大正应力包络图(单位:MPa)

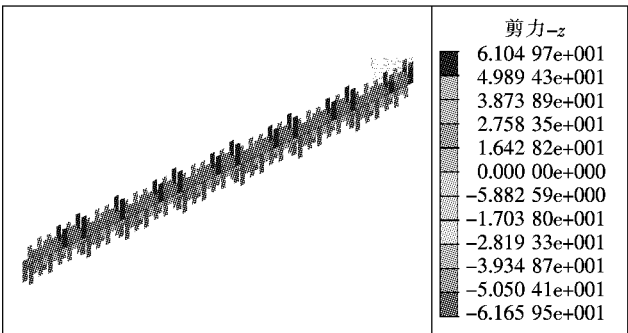


图 16 轨道梁最大剪应力包络图(单位:MPa)

由图 15、16 可见：最大压应力为 163.3 MPa ，小于 Q235 钢材抗压强度设计值 $f_d=190\text{ MPa}$ ；最大剪应力 61.7 MPa ，小于 Q235 钢材抗剪强度设计值 $f_{vd}=110\text{ MPa}$ 。

(3) 横向分配梁强度计算结果

横向分配梁的强度验算结果见图 17、18。

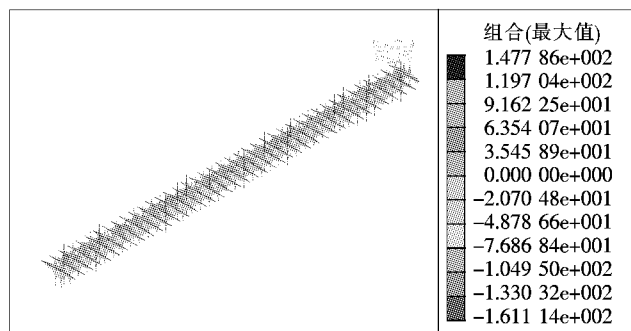


图 17 横向分配梁最大正应力包络图(单位:MPa)

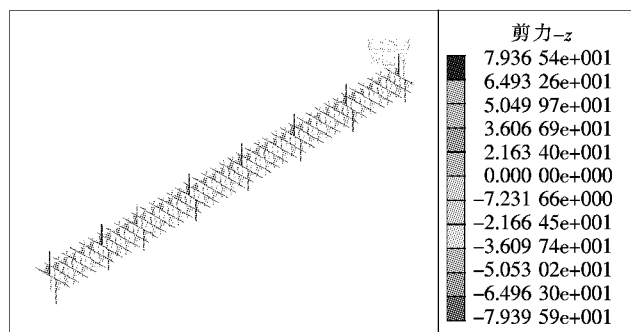


图 18 横向分配梁最大剪应力包络图(单位:MPa)

由图 17、18 可见:最大压应力 161.1 MPa, 小于 Q235 钢材抗压强度设计值 $f_d = 190$ MPa; 最大剪应力 79.4 MPa, 小于 Q235 钢材抗剪强度设计值 $f_{vd} = 110$ MPa。

(4) 钢管桩、剪刀撑强度计算结果

钢管桩、剪刀撑的强度验算结果见图 19、20。

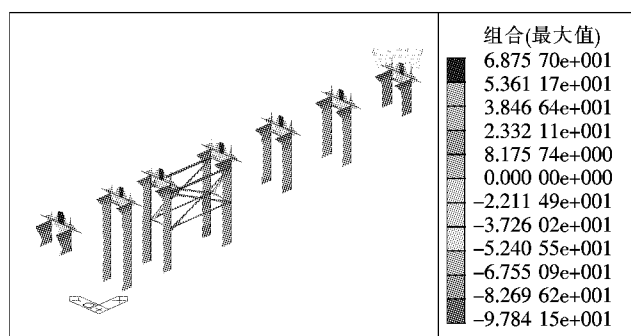


图 19 钢管桩、剪刀撑最大正应力包络图(单位:MPa)

由图 19、20 可见:最大压应力 98.7 MPa, 小于 Q235 钢材抗压强度设计值 $f_d = 190$ MPa; 最大剪应力 48.3 MPa, 小于 Q235 钢材抗剪强度设计值 $f_{vd} = 110$ MPa。

(5) 刚度计算结果

岸侧栈桥最大位移包络图如图 21 所示, 运梁过程中最大竖向位移为 -6.48 mm (“-”表示向下), 小于

规范限值 $L/400 = 9\,000/400 = 22.5$ mm, 满足规范要求。

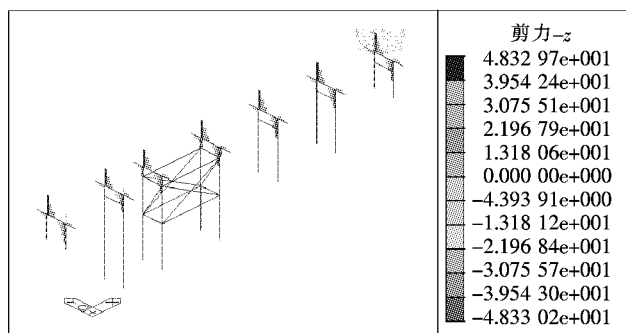


图 20 钢管桩、剪刀撑最大剪应力包络图(单位:MPa)

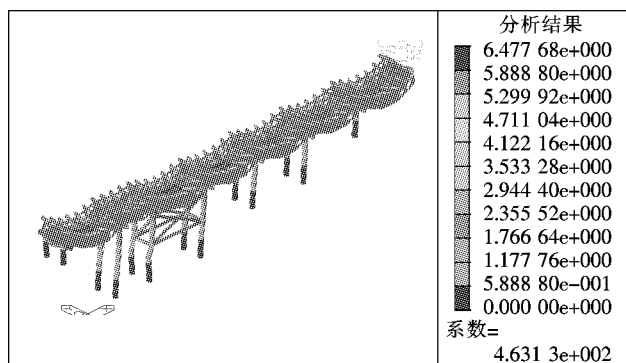


图 21 岸侧栈桥最大位移包络图(单位:mm)

3.3.2 计算结果汇总

3 种工况的计算结果汇总如表 3 所示。由表 3 可知:各工况的强度和刚度以及稳定性计算结果均满足规范要求。结构稳定系数如图 22 所示, 失稳杆件为钢管桩斜撑, 其细部如图 23 所示。

3.4 运梁支座计算

运梁支座顶板、侧边限位板采用 $\delta 20$ 钢板, 其余均采用 $\delta 14$ 钢板。采用 Abaqus 建模进行计算, 用 S4R 单元模拟各钢板。边界条件为:底板约束竖向、纵向平动位移, 限位板约束横向位移。荷载条件为:加劲梁移动时产生的最大支座压力, 考虑一个支座脱空, 最大支座反力 $F = 3\,210/2 \times 1.4 = 2\,247$ kN。主要计算结果:最大变形为 $f = 0.27$ mm, 最大 Mises 应力 $\sigma = 126$ MPa < 190 MPa (均位于顶板) (图 24), 满足要求。

4 结语

对洞庭湖特大跨径悬索桥岳阳侧运梁栈桥进行了结构设计计算, 栈桥采用贝雷梁和钢管桩等作为主要受力构件, 岸侧栈桥无流水荷载, 上下游栈桥之间无横

表 3 结构计算结果汇总

工况	项目	正应力/MPa		剪应力/MPa		挠度/mm		竖向挠度/mm		剪力撑横向 挠度/mm		结构整体稳定临 界荷载系数	
		计算值	允许值	计算值	允许值	计算值	允许值	计算值	允许值	计算值	允许值	计算值	允许值
工况 1	贝雷梁	249.0	275	50.0	160	6.48	22.5						
	轨道梁	163.3	190	61.7	110								
	横向分配梁	161.1	190	79.4									
	钢管桩、剪刀撑	97.8	190	48.3	110								
工况 2	贝雷梁	273.0	275	67.3	160	7.99	22.5						
	轨道梁	184.6	190	56.1	110								
	横向分配梁	189.6	190	53.1	110								
	钢管桩、剪刀撑	106.5	190	43.3	110								
工况 3	贝雷梁	204.8	275	27.6	160			4.6	22.5	34.8	37.5	5.48	4
	轨道梁	104.0	190	53.2	110								
	横向分配梁	114.9	190	45.0	110								
	钢管桩、剪刀撑	174.6	190	33.6	110								

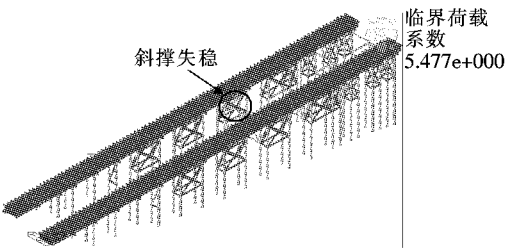


图 22 稳定系数

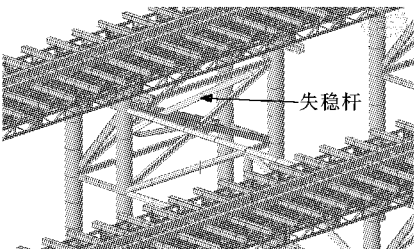


图 23 失稳杆件细部图

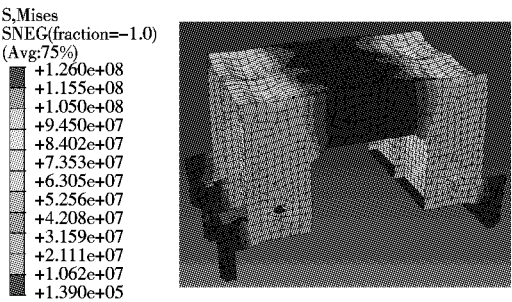


图 24 运梁支座应力云图(单位:Pa)

向联系,江侧栈桥采用 X 撑进行联结。从强度、刚度、稳定性方面对栈桥进行了分析,贝雷梁正应力最大为 273 MPa,端部花架加强后可明显改善端部的局部受力情况。各工况剪应力均较小,存梁时剪力撑横向位移最大为 34.8 mm,稳定系数为 4.046,结果表明各项指标均满足规范要求。对运梁支座进行了细部分析,最大 Mises 应力 $\sigma=126$ MPa,满足规范要求。

参考文献:

[1] 郭吉平.北盘江大桥缆吊系统及钢桁梁安装关键技术[J].世界桥梁,2011(6).
[2] 沈锐利,闫勇,唐茂林,等.轨索滑移法节段足尺模型试验设计与安装[J].桥梁建设,2013(1).
[3] 胡建华,崔剑峰.湘西矮寨大桥设计创新技术[J].桥梁建设,2011(6).
[4] 邓年春,刘显晖.轨索运梁与缆载吊机结合架设悬索桥主梁及其应用[J].科技创新与应用,2018(8).
[5] 高本涛,张敏,彭代友,等.黄冈公铁两用长江大桥钢梁运输方案研究[J].江西建材,2015(5).
[6] 李阳,杨宇波,于海力,等.江津中渡长江大桥无水(浅水)区钢梁二次荡移架设施工技术[J].施工技术,2016(24).
[7] JTG/T D60-01-2004 公路桥梁抗风设计规范[S].
[8] JTG D60-2015 公路桥涵设计通用规范[S].
[9] JTG D64-2015 公路钢结构桥梁设计规范[S].
[10] 袁理,黄影,赵宇影.悬索桥浅滩区钢桁梁吊装施工新技术[J].中外公路,2019(3).