

某通航孔栈桥受力与变形验算

江浪, 陈得良

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 钢栈桥作为临时结构在大型桥梁施工中应用广泛, 在施工与使用阶段其受力较复杂, 安全性及经济性值得关注。文中结合某跨湖大桥工程通航孔钢栈桥, 根据设计荷载及使用车辆荷载情况考虑 3 种荷载组合加载状态, 基于 MIDAS 软件对栈桥各构件进行强度、刚度验算, 经简单结构优化补强后各构件受力均满足安全要求; 最后依据分析结果对栈桥设计和使用提出建议。

关键词: 桥梁; 钢栈桥; 受力验算; 变形验算

中图分类号: U446.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2021)01-0126-04

钢栈桥具有运输人员、材料、设备及充当工作平台等功能, 被广泛应用于大型桥梁、港口和大坝等基础设施工程中。为保障基础设施建设安全, 降低施工成本, 需开展临时栈桥施工、使用阶段受力分析。甄相国采用有限元法对某桥施工栈桥承载能力及稳定性进行了验算; 孟岩对安慈(安乡—慈利)高速公路一通航栈桥结构进行设计, 并对结构进行了验算分析; 朱玥莉、霍旭东等对输煤栈桥设计及受力进行了研究; 成凯对某桁架式钢栈桥在多种荷载工况下的力学性能进行了分析; 陈峰等对某栈桥结构进行了受力计算及洪水作用下稳定性分析; 谢辉、田福建等建立有限元仿真模型, 对钢栈桥各构件在多种不利荷载组合下的强度、刚度进行了验算。上述研究表明强度和刚度是栈桥全生命周期中的关注重点。该文基于 MIDAS/Civil 软件, 考虑设计荷载及使用车辆荷载情况, 对某跨湖钢栈桥通航孔各构件强度、刚度进行验算, 为相似工程设计和分析提供参考。

1 工程概况

某钢栈桥通航孔跨径 27 m, 通航净宽 20 m, 湖床标高 14.46 m, 栈桥顶标高 22.01 m, 桥面宽 6 m。上部结构自上而下为 10 mm 厚花纹钢板、纵向 I12 工字钢分配梁(间距 25 cm)、横向 I25a 工字钢分配梁(间距 35 cm)、双层 321 型贝雷桁梁、双拼 I36b 横向工字钢。下部结构采用 $\phi 530 \times 8$ mm 钢管桩基础, 桩间采用 I12 槽钢平联及剪刀撑(见图 1)。

2 计算参数取值

2.1 主要材料设计指标

321 型贝雷梁采用 Q345(16Mn) 钢材, 其余构

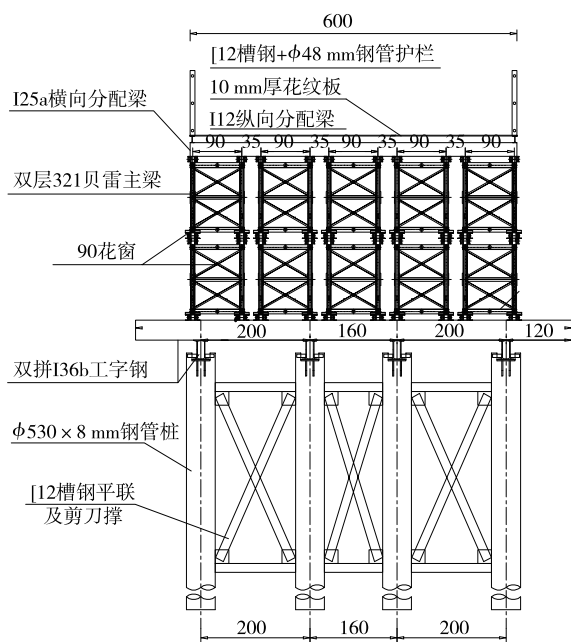


图 1 通航孔立面示意图(单位: cm)

件采用 Q235(A3) 钢材。材料设计指标见表 1。

表 1 主要材料设计指标 MPa

材料	抗拉、抗压、抗弯	抗剪
	强度设计值	强度设计值
Q235(A3)	190	110
Q345(16Mn)	275	160

2.2 设计荷载

2.2.1 恒载

采用有限元软件 MIDAS/Civil 进行建模分析, 自重恒载由程序根据模型设定的截面和尺寸自动进行计算。

2.2.2 车辆荷载

该栈桥主要工程车辆有 12 m³ 砼罐车、80 t 履

带吊及120 t旋挖钻。

(1) 砼罐车荷载。12 m³砼罐车空车20 t,满载总重约50 t,其荷载布置见图2。根据实际情况,一跨内不会出现2辆满载砼罐车。

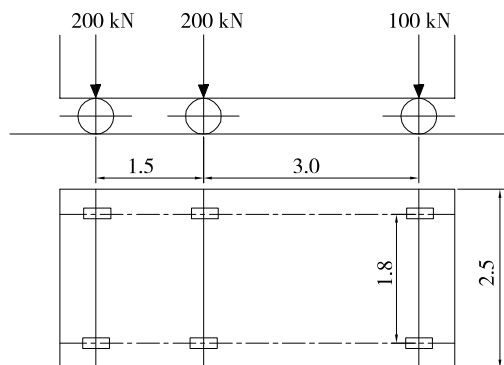


图2 砼罐车车辆荷载的立面、平面尺寸(单位:m)

(2) 80 t履带吊。履带吊自重80 t,吊重按20 t考虑。侧吊考虑70%重量作用在同一条履带。单个履带着地面积为5.44 m×0.8 m,履带中心距4.2 m。履带荷载按单侧分别为70%和30%加载计算,其两侧压力分别为:

$$p_1 = \frac{700}{5.44 \times 0.8} = 160.85 \text{ kN/m}^2$$

$$p_2 = \frac{300}{5.44 \times 0.8} = 60.94 \text{ kN/m}^2$$

(3) 旋挖钻荷载。420旋挖钻自重120 t,单个履带接地尺寸为6 m×0.8 m,履带中心距3.4 m。履带轮压为:

$$p = \frac{600}{6 \times 0.8} = 125 \text{ kN/m}^2$$

2.2.3 风荷载

该栈桥所在地区常年平均风速2.0 m/s,台风时期风速一般可达8~12级,最大可达12级以上。施工及使用期出现6级风(10.8~13.8 m/s)时应停止施工。栈桥正常工作期风速按13.8 m/s取值,计算得6级风荷载作用下,贝雷主桁梁单位长度上的顺风向等效静阵风荷载为0.583 kN/m,钢管桩为0.049 kN/m。

2.2.4 水动力

取水流速度0.8 m/s,计算得前排钢管桩水动力为1.51 kN,后排钢管桩水动力为0.99 kN,合力的作用点为设计水位线以下1/3水深处。

2.3 荷载组合

通航孔一跨内严格按单车工作,工况见表2。

根据JTGD60—2015《公路桥涵设计通用规

表2 钢栈桥计算工况

工况 编号	荷载组合		
	恒载	基本可变荷载	其他可变荷载
I		12 m ³ 砼罐车通行	
II	结构自重	80 t履带吊机侧吊	正常风载、水流
III		420旋挖钻(120 t)通行	

范》,公路桥涵结构按承载能力极限状态设计时,应考虑荷载分项系数及有关规定所列荷载系数和调整系数,作用基本组合的效应设计值按下式计算:

$$S_{ud} =$$

$$\gamma_0 S \left(\sum_{i=1}^m \gamma_{Gi} G_{ik} + \gamma_{Q1} \gamma_{L1} Q_{1k} + \psi_c \sum_{j=2}^n \gamma_{Lj} \gamma_{Qj} Q_{jk} \right)$$

式中: S_{ud} 为承载能力极限状态下作用基本组合的效应设计值; γ_0 为结构重要性系数; $S()$ 为作用组合的效应函数; γ_{Gi} 为第*i*个永久作用的分项系数; G_{ik} 为第*i*个永久作用的标准值; γ_{Q1} 为汽车荷载的分项系数; γ_{L1} 为汽车荷载的结构设计使用年限荷载调整系数; Q_{1k} 为汽车荷载的标准值; ψ_c 为作用组合中除汽车荷载外其他可变作用的组合值系数,取 $\psi_c=0.75$; γ_{Lj} 为第*j*个可变作用的结构设计使用年限荷载调整系数; γ_{Qj} 为作用组合中除汽车荷载、风荷载外其他第*j*个可变作用的分项系数; Q_{jk} 为作用组合中除汽车荷载外其他第*j*个可变作用的标准值。

栈桥设计安全等级为二级,取 $\gamma_0=1.0$;当钢桥采用钢板面板时, $\gamma_G=1.1$; $\gamma_{Q1}=1.4$; $\gamma_{Lj}=1.0$; $\psi_c=0.75$;作用组合中除汽车荷载、风荷载外的其他可变作用的分项系数 $\gamma_{Qj}=1.4$,风荷载的分项系数 $\gamma_{Qj}=1.1$ 。该栈桥的工况荷载组合为1.1×恒载+1.4×车辆荷载+0.825×6级风荷载+1.05×水流力。

结构刚度验算采用荷载效应的标准组合:

$$S_d = S_{Gk} + \sum S_{Qik}$$

式中: S_d 为荷载的标准组合; S_{Gk} 为自重荷载; S_{Qik} 为第*i*个可变作用荷载值。

主梁等受弯构件容许挠度值为 $L/400$,其中纵向分配梁、贝雷梁竖向位移容许值为50 mm,承重梁为5.75 mm。

3 数值建模

施工现场贝雷梁与承重梁采用卡扣限位,上下层贝雷梁采用螺栓固定,横向分配梁与贝雷梁、纵向分配梁间采用点焊。因各构件接触方式复杂,分配梁与贝雷主梁数量较多,荷载横向分布系数很难准确计算,采用单梁计算分析存在很大限制。整体建

模并直接施加荷载更能反映栈桥的实际工作状态。

3.1 边界条件

(1) 桥面系构件连接。花纹钢板与纵向分配梁采用共节点设置,纵向分配梁与横向分配梁、横向分配梁与贝雷梁、贝雷梁与贝雷梁之间采用一般连接,竖向刚度按照经验值取 10^7 kN/m,横向刚度取 10^4 kN/m。

(2) 其余构件连接。贝雷桁架梁之间为销接,对贝雷桁架连接处设置释放梁端绕 y 轴旋转的约束;双拼 I36b 工字梁与贝雷梁下弦杆采用简支边界连接,与桩顶横梁采用刚性连接;钢管桩基础底部按固结处理。

3.2 荷载布置

车辆荷载作用在跨中时,主梁受力最不利;作用在墩顶时,对贝雷梁腹杆、承重梁及钢管桩最不利。车辆荷载均采用静力荷载模拟,在跨中及墩顶加载,罐车与旋挖钻荷载横向布置中载和偏载(车轮外侧离桥面板边缘 0.5 m)。图 3~6 为各车辆荷载不利横向布置示意图。

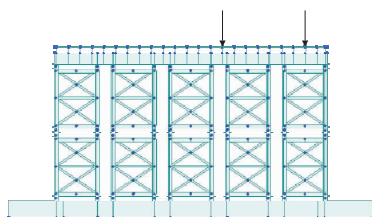


图 3 罐车荷载横向偏载示意图

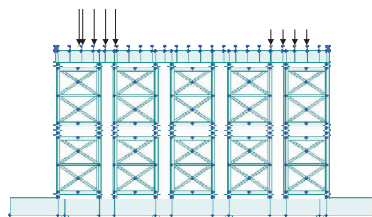


图 4 履带吊荷载横向布置示意图

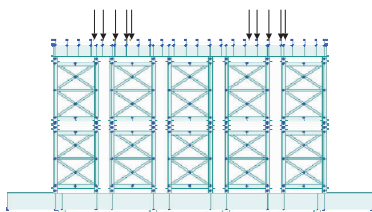


图 5 旋挖钻荷载横向中载示意图

3.3 建立模型

采用 MIDAS/Civil 建立栈桥整体有限元模型,

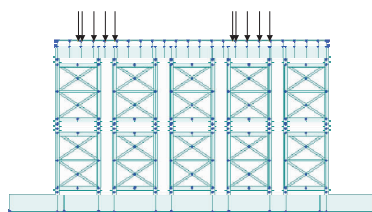


图 6 旋挖钻荷载横向偏载示意图

其中桥面花纹钢板采用板单元模拟,其余构件采用一般梁单元模拟。结构离散为 9 934 个节点、1 850 个板单元、12 635 个梁单元(见图 7)。

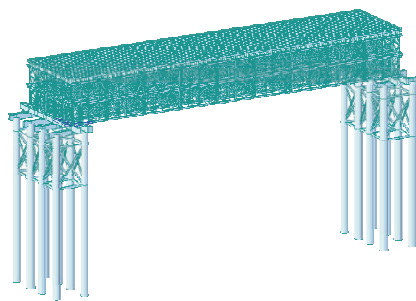


图 7 栈桥有限元整体计算模型

4 计算结果分析

4.1 栈桥强度分析

计算结果显示,履带吊在墩顶侧吊时,对栈桥受力最不利,贝雷梁腹杆最大正应力 $\sigma = 284.9$ MPa $>$ $f = 275$ MPa,不满足安全要求。其余构件均满足安全要求,且强度尚有富余。图 8 为贝雷梁腹杆应力超标局部示意图。

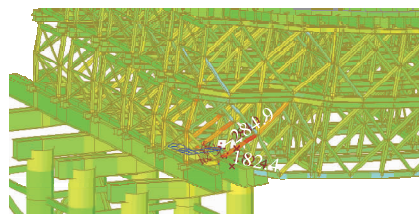


图 8 履带吊墩顶起吊时局部正应力(单位:MPa)

根据结构力学桁架结构受力特点,荷载通过分配梁传递到贝雷梁弦杆上,再通过节点传递给腹杆,最终通过贝雷梁弦杆—承重梁接触点传递给承重梁。因靠近跨中一侧承重梁上贝雷梁无竖腹杆,仅由斜腹杆传力,且栈桥跨度较大,变形也较大,导致此处斜腹杆受力过大,正应力超标。

综上,对栈桥进行补强优化,在承重梁上方下层贝雷梁腹杆处增加 Q235 材质 2[10 槽钢,与上下弦杆焊接,共同分担支点处内力(见图 9、图 10)。结构

优化后栈桥各工况下计算结果见表 3。

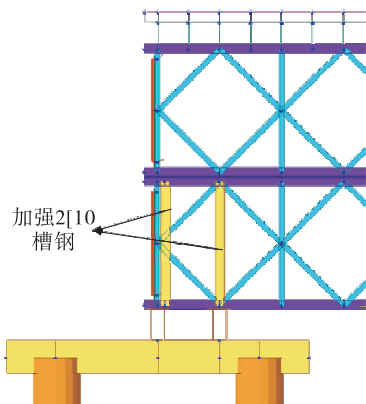


图 9 增设 2[10 槽钢示意图



图 10 增设 2[10 槽钢现场示意图

表 3 栈桥各工况计算结果

项目	构件	各工况下计算结果		
		I	II	III
组合应力 σ_{\max}/MPa	桥面板	33.4	26.6	24.8
	纵梁	64.4	38.4	34.6
	分配梁	70.0	40.0	39.0
	贝雷弦杆	183.3	257.8	228.3
	贝雷腹杆	118.9	159.4	126.2
	加强槽钢	35.6	61.3	53.5
	花窗	87.2	63.5	58.1
	横向连接	31.4	44.1	44.1
	承重梁	51.9	66.6	68.2
	钢管桩	59.1	82.8	84.4
剪应力 τ_{\max}/MPa	纵梁	31.2	21.9	14.0
	分配梁	45.2	18.4	20.3
	贝雷弦杆	44.2	51.8	45.2
	贝雷腹杆	4.1	2.9	3.8
	承重梁	48.8	57.6	60.0
变形 δ/mm	纵梁	26.6	36.2	33.3
	分配梁	26.7	36.5	33.4
	贝雷桁梁	26.6	36.2	33.3
	承重梁	1.53	2.08	2.06

由表 3 可知:贝雷梁弦杆强度富裕度较小,其他构件强度富裕量较大,贝雷梁腹杆受力在结构优化后得到很大改善,最大正应力从 284.9 MPa 降到 159.4 MPa。

4.2 横向分配梁调整

表 3 显示,纵横向分配梁强度富余量较大。一方面,横向分配梁作为辅助受力构件,其主要作用是将上部荷载传递至贝雷梁处,贝雷桁梁为钢栈桥的骨架,承担绝大部分荷载作用;另一方面,该栈桥横向分配梁设置较密,纵向间距仅 35 cm。因此,将横向分配梁的间距调整为 70 cm,关注贝雷梁及分配梁的受力变化情况。表 4 为横向分配梁间距调整后栈桥主要构件受力情况。

表 4 横向分配梁间距调整后栈桥主要构件计算结果

项目	构件	各工况下计算结果		
		I	II	III
组合应力 σ_{\max}/MPa	纵梁	55.5	50.2	41.4
	分配梁	77.3	63.0	63.6
	贝雷弦杆	184.6	264.1	230.7
	贝雷腹杆	113.1	148.6	129.6
剪应力 τ_{\max}/MPa	纵梁	20.0	28.0	22.9
	分配梁	63.6	28.8	33.8
	贝雷弦杆	45.8	55.4	47.6
	贝雷腹杆	4.4	3.9	4.0
变形 δ/mm	纵梁	27.3	38.2	34.5
	分配梁	27.5	38.4	34.6
	贝雷桁梁	27.3	38.2	34.5

由表 4 可知:与调整前相比,贝雷梁和分配梁的受力变化不明显,强度、刚度仍在规范允许范围内。因此,可再次调整 I25a 横向分配梁工字钢型号,如调整为 I20a 工字钢,此处不再进行验算。

5 结论与建议

建立钢栈桥整体有限元模型,相比原有结构,在承重梁上方下层贝雷梁腹杆处增加 Q235 材质 2[10 槽钢进行补强,将横向分配梁间距调整为 70 cm,以 12 m³ 砼罐车、80 t 履带吊、120 t 旋挖钻为主组成 3 种分析工况,对钢栈桥进行计算分析。结果表明:3 种工况下所有构件的强度和刚度均满足规范要求。

虽然钢栈桥各构件受力、变形满足规范要求,但因条件所限,计算不能完全反映实际操作过程中各种荷载(可能出现主观或客观的偏载情况),模拟计

(下转第 132 页)

衰减系数与荷载之间成负指数函数关系,线性函数拟合效果较好, $R^2=0.999\ 1$ 。

2.4 砼箱梁开裂特征研究

图5为不同工况下动力试验后砼箱梁的裂缝扩展情况。由图5可知:低荷载作用下砼箱梁上产生的裂缝主要集中在箱梁中点部位,且主要为张拉破坏,与前述一阶模态振型结果相对应;随着荷载水平的提高,砼箱梁上的裂缝逐渐增多,且逐渐由中点向两端扩散,裂纹方向也逐渐由竖直方向向倾斜方向过渡。综上,砼箱梁的破坏特征能与试验结果很好地对应起来,荷载越大,砼箱梁的损伤破坏程度越高,动刚度越小。

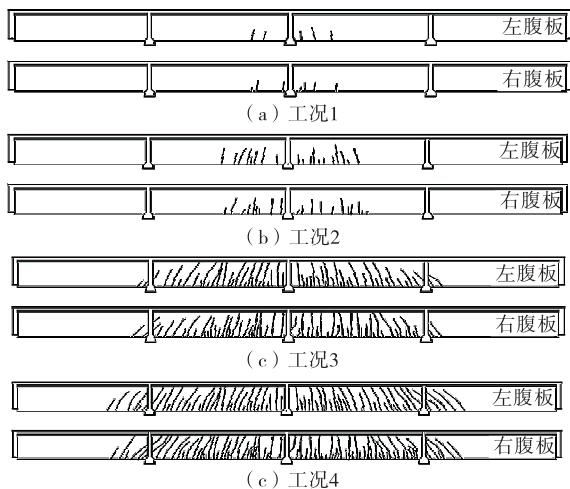


图5 不同工况下砼箱梁开裂特征

3 结论

(1) 随着荷载水平的提高,砼箱梁的一、二阶竖

向振动频率降低,二者之间成负线性关系;动荷载下产生的结构损伤对二阶竖向频率的影响更明显。

(2) 随着荷载水平的提高,砼箱梁上裂纹逐渐增多且逐渐由中部向两端扩展,砼箱梁破坏程度不断提高;砼箱梁的动刚度不断下降,动刚度衰减系数也不断降低,动刚度衰减系数与荷载之间成负指数函数关系。

参考文献:

- [1] 李民伟.基于刚度退化模型的连续刚构桥梁损伤指数计算[J].绿色环保建材,2020(3):142—143.
- [2] 周凌宇,张广潮,余志武,等.循环温度荷载下无砟轨道结构模型试验研究[J].铁道学报,2020,42(1):82—88.
- [3] 王爱勤,曾蔚.基于刚度改变的旧桥损伤分析与研究[J].辽宁交通科技,2004(8):47—49.
- [4] 李龙祥,周凌宇,黄戡,等.循环荷载下无砟轨道—桥梁结构体系刚度退化性能[J].中南大学学报(自然科学版),2019,50(10):2481—2490.
- [5] 张贺斌,陈锐.先天缺陷对大跨径预应力混凝土连续桥梁刚度的影响分析[J].西部交通科技,2019(4):139—141.
- [6] 梁志广,李建中.刚度退化对结构横向分布的影响浅析[J].中南公路工程,2005,30(1):47—49.
- [7] 魏峰,高亮,侯博文.重载列车—轨道—桥梁纵向动荷载限值研究[J].桥梁建设,2019,49(2):68—73.
- [8] 杨陆军.动荷载试验在简支梁桥检测中的应用分析[J].山西建筑,2018,44(35):176—177.

收稿日期:2020—09—21

(上接第129页)

算存在一定局限性,即理论计算和实际受力情况会产生一定偏差。因此,车辆在栈桥上应有序通行,严格限速限载,重车尽量沿中线行驶,避免过于偏载。

参考文献:

- [1] 封帆.超长钢管桩施工栈桥受力分析研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [2] 甄相国.某桥梁施工钢栈桥及钻孔平台稳定性有限元分析[D].衡阳:南华大学,2017.
- [3] 孟岩.安慈高速公路考虑通航需求的钢栈桥设计分析与安全保障措施研究[J].工程技术研究,2019,4(23):171—174.
- [4] 朱玥莉,王德锋,王朝霞.特宽型钢结构输煤栈桥的设

计[J].煤炭工程,2014,46(4):26—28.

- [5] 霍旭东,李健荣,刘健康.钢桁架输煤栈桥设计要点及受力分析[J].山西建筑,2019,45(13):33—35.
- [6] 成凯.某桁架式钢栈桥安全性验算[J].科学技术创新,2018(25):108—109.
- [7] 陈峰,于艺林,陈俐光,等.某施工栈桥受力计算及洪水作用下稳定性分析[J].公路与汽运,2019(6):107—109+113.
- [8] 谢辉,潘存军.施工钢栈桥结构设计及受力特征分析[J].湖南交通科技,2019,45(3):163—167.
- [9] 田福建.白石大桥栈桥结构设计及有限元仿真分析[J].国防交通工程与技术,2020,18(1):52—55.

收稿日期:2020—02—23