

极寒环境下大跨贝雷梁钢管施工平台力学性能研究

徐 嫚¹, 王 帆¹, 王庆贺², 刘昌永^{3,4}, 魏晨阳^{3,4}

(1. 东北林业大学土木工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150040; 2. 沈阳建筑大学土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 哈尔滨工业大学结构工程灾变与控制教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090;
4. 哈尔滨工业大学土木工程智能防灾减灾工业和信息化部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150090)

摘 要 目的 研究极寒环境对大跨贝雷梁钢管施工平台力学性能的影响, 解决高寒地区大型临时钢结构的力学性能与施工安全性问题, 并为其提供理论基础与工程价值。方法 首先采用已有的贝雷梁试验结果对 ABAQUS 建模技术进行验证; 在此基础上, 基于某工程常温下建造的贝雷梁钢管施工平台(20 ℃), 分析其环境温度降至-10 ℃、-20 ℃、-30 ℃、-40 ℃、-50 ℃时, 平台的应力、结构位移以及局部贝雷梁承载力的变化规律。结果 随着温度降低, 施工平台中贝雷梁应力从 20 ℃时的 85.0 MPa 增大到-50 ℃时的 232.2 MPa, 钢管柱应力从 20 ℃时的 9.9 MPa 增大到-50 ℃时的 108.3 MPa; 贝雷梁位移从 20 ℃时的 3.7 mm 增大到了-50 ℃时的 44.7 mm, 钢管柱位移从 20 ℃时的 0.4 mm 增大到了-50 ℃时的 17.4 mm。随着温度降低, 钢管柱直径与壁厚的改变对其应力变化影响逐渐变大。温度从 20 ℃降到-50 ℃, 贝雷梁平面外位移从 0.7 mm 增大到 36.6 mm, 承载力从 561.8 kN 减小到 475.5 kN, 下降约为 15.4%。结论 环境温度降低会导致贝雷梁和钢管柱应力不断增大; 贝雷梁平面外位移增大到一定程度时, 会对自身承载力造成明显影响。

关键词 大跨贝雷梁钢管施工平台; 极寒环境; 构件应力; 结构位移; 承载力

中图分类号 TU392.1 文献标志码 A

Mechanical Properties of Long-span Bailey Beam Steel Pipe Construction Platform in Extreme Cold Environment

XU Man¹, WANG Fan¹, WANG Qinghe², LIU Changyong^{3,4}, WEI Chenyang^{3,4}

收稿日期:2021-10-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51808351);天津市科技计划项目(18ZXGDGX00030);沈阳市科技局项目(RC200143)

作者简介:徐嫚(1982—),女,副教授,博士,主要从事组合结构与抗连续性倒塌等方面研究。

(1. School of Civil Engineering, Northeast Forestry University, Harbin, China, 150040; 2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 3. Key Lab of Structures Dynamic Behavior and Control of the Ministry of Education, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090; 4. Key Lab of Smart Prevention and Mitigation of Civil Engineering Disasters of the Ministry of Industry and Information Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, 150090)

Abstract: In order to solve the problems of mechanical properties and construction safety of large-scale temporary steel structures in alpine regions, and to provide theoretical basis and engineering value for them, the influence of extreme cold environment on the mechanical properties of large-span Bailey beam steel pipe construction platforms was studied, this paper first uses the existing Bailey beam test results to verify the ABAQUS modeling technology. On this basis, based on the Bailey beam steel pipe construction platform ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) constructed at room temperature of a certain project, the variation of stress, structural displacement and local Bailey beam bearing capacity of the platform are analyzed when the ambient temperature is reduced to $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. With the decrease of temperature, the stress of Bailey beam in the construction platform increases from 85.0 MPa at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to 232.2 MPa at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the stress of steel tube column increases from 9.9 MPa at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to 108.3 MPa at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. The displacement of Bailey beam increased from 3.7 mm at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to 44.7 mm at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the displacement of steel tube column increased from 0.4 mm at $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to 17.4 mm at $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$. With the decrease of temperature, the influence of the diameter and wall thickness of the steel tube column on the stress change is gradually increasing. When the temperature dropped from $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, the out-of-plane displacement of Bailey beam increased from 0.7 mm to 36.6 mm , and the bearing capacity decreased from 561.8 kN to 475.5 kN , which decreased by 15.4% . The decrease of ambient temperature will lead to the increasing stress of Bailey beam and steel tube column; when the out-of-plane displacement of Bailey beam increases to a certain extent, it will have a significant impact on its own bearing capacity.

Key words: long-span bailey beam steel pipe construction platform; extremely cold environment; component stress; structural displacement; bearing capacity

施工平台由板与临时支架组成,临时支架按构造形式可分为梁式支架、柱式支架以及梁柱式支架^[1-2]。施工平台中贝雷梁钢管支架作为常见的梁柱式支架,其结构简单、拆卸方便,力学性能优良^[3]。钢材在常温下具有均质高强的特点,并且韧性、塑性优良,是理想的建筑材料。但在我国黑龙江省,尤其是中俄边境,冬季气温常常处于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下,考虑工期问题,往往需要进行越冬施工^[4]。钢材在极寒环境下,力学性能会受到影响,其脆性提高,塑性、韧性、断面收缩率均降低^[5]。作为多次超静定结构形式,研究极寒环境对大跨贝雷梁钢管施工平台力学性能的影响有一定的科研和工程价值。

国内外学者针对钢材低温条件下的力学

性能进行了大量研究。武延民^[6]针对钢材在低温条件下的力学性能,对钢材在低温条件下发生脆性破坏的影响因素进行了分析,提出了钢材低温冷脆的设计方法;张世英^[7]对40CrNi2Mo钢在低温条件下进行拉伸试验,研究其力学性能随温度变化的规律,得出此种钢材随着温度的下降,塑性降低的结论;O. Pavlo等^[8]研究了低温下燃气管道钢的冲击韧性,对GIS管线钢的低温冲击性能展开研究,并分析了低温下钢的各种失效模式;Y. Q. Wang等^[9]针对钢厚板在常温及低温下的Z向性能,认为厚钢板的Z向性能要低于沿钢板轧制方向的性能,对温度和厚度的变化更敏感。

国内学者针对环境温度改变对多次超静

定结构力学性能的影响进行了研究;刘俊^[10]运用 SAP2000 软件对屋盖横、纵向桁架的温度效应进行了研究,分析了桁架在不同温度下的应力,提出了减小温度应力的方法;程科^[11]以体育场穹顶钢结构为例,对穹顶结构全年应力数据进行监测,分析环境温度变化对其力学性能的影响,并通过有限元模拟温度场,得到了环境温度与结构应力之间的关系;刘哲^[12]以摩天轮钢结构为研究对象,采用有限元分析与实测数据对比的方法,研究了环境温度改变对钢结构力学性能的影响。

以上学者针对低温条件下钢材、钢板的力学性能以及环境温度改变对多次超静定钢结构力学性能的影响进行了系列试验研究,但针对极寒环境下大跨贝雷梁钢管施工平台受力性能的影响方面研究的较少。基于此,笔者以某实际工程贝雷梁钢管施工平台为例,对平台在 20 ~ -50 ℃ 内的应力、位移以及局部贝雷梁承载力进行分析,研究结果可为今后钢结构在极寒环境下施工提供参考。

1 贝雷梁建模技术验证

由于现有极寒环境下大跨贝雷梁钢管施工平台试验相对较少,难以专门针对极寒环境下贝雷梁钢管施工平台的建模过程进行验证,又因平台承受荷载时,贝雷梁为直接承重构件,因而贝雷梁在整个支架结构中发挥着重要作用。基于上述原因,通过模拟常温下贝雷梁试验来对贝雷梁建模技术进行验证,从而为后续对极寒环境下大跨贝雷梁钢管施工平台受力性能的研究奠定基础。

1.1 贝雷梁试验介绍

为验证 ABAQUS 模拟贝雷梁钢管施工平台建模的正确性,对文献[13]贝雷梁试验进行有限元建模并验证,试验构件见图 1。

1.2 模拟试验模型

贝雷梁、花窗均采用 Q345 钢材,实测屈服强度为 344 MPa,弹性模量为 1.95×10^5 MPa。钢材本构关系如图 2 所示。

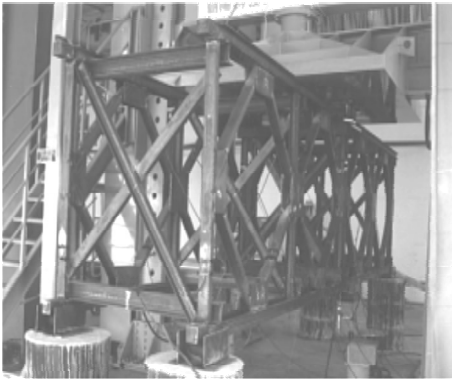


图 1 试验构件

Fig. 1 The diagram of test specimens

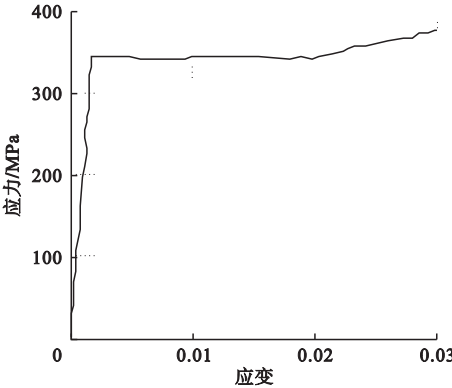


图 2 钢材本构模型

Fig. 2 The steel constitutive model

模型采用梁单元创建,贝雷梁与花窗、左右两组贝雷片之间设置为铰接,贝雷梁两端模拟为简支梁形式。加载时,在前后两排贝雷片跨中正上方进行加载。有限元模型如图 3 所示。

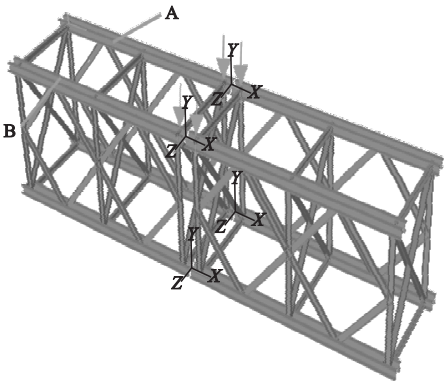


图 3 贝雷梁验证模型

Fig. 3 The verification model of Bailey beam

1.3 结果对比

加载结束时,贝雷梁构件在跨中两侧位置均发生较大变形(见图 4)。试验中贝雷梁达到极限荷载时产生的最大跨中竖向挠度为 21.1 mm,有限元模拟最大结果为 22.1 mm,有限元结果如图 5 所示。



图 4 贝雷梁挠度变形图

Fig. 4 The deflection and deformation diagram of Bailey beam

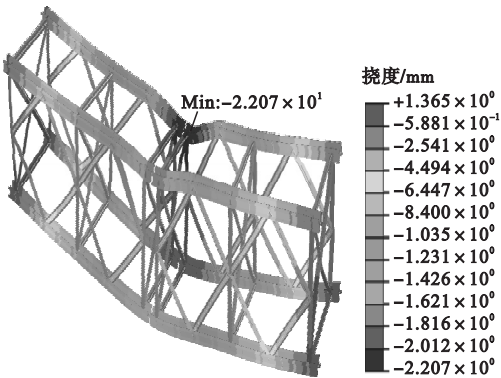


图 5 贝雷梁竖向挠度

Fig. 5 The vertical deflection result of Bailey beam

将有限元中模拟的 A、B 两组贝雷片所受荷载和产生的竖向挠度与试验结果进行对比(见图 6)。由图可知,相同荷载条件下,试件跨中产生的竖向挠度略高于有限元模拟结果;当荷载达到 500 kN,试验与有限元中贝雷梁均达到极限荷载。分析误差产生的原因,进行有限元模拟时未能充分考虑试验中贝雷梁存在的初始缺陷。有限元与试验得到的荷载-挠度曲线在整个加载过程中保持着较高的拟合度,有限元模型具有一定的可靠性。

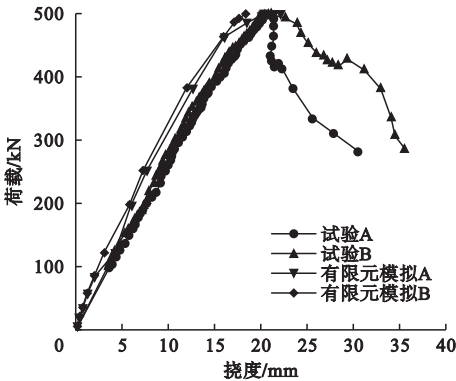


图 6 贝雷梁荷载-挠度曲线对比

Fig. 6 The comparison of load-deflection curves of Bailey beam

2 考虑极寒环境的大跨贝雷梁钢管施工平台有限元分析

2.1 施工平台有限元模型

2.1.1 模型设计参数

某实际工程贝雷梁钢管施工平台中贝雷梁采用 Q345 钢材,钢管柱、联结系、横梁、分配梁、花窗及平台板采用 Q235 钢材。钢管柱采用 22 根高度为 9 000 mm 的 $\phi 500 \times 10$ mm 钢管,纵向布置两排,间距为 8.95 m,横向布置 11 排,间距为 5 m;钢管柱之间纵向采用槽钢 22 a 联结系相连,由于平台下方用于车辆通行,钢管柱间不设置横向联结系;钢管上设置横梁双拼工 32 a,为保证侧向稳定,横梁与平台两侧混凝土墩设置连接件;横梁上横向搭设 21 组贝雷梁,每组 2 排贝雷片。贝雷片弦杆采用双拼槽钢 10,竖杆、斜杆采用 I8 工字钢。每组贝雷梁横向间距均为 2 500 mm。贝雷梁上纵向铺设分配梁工 14 a,铺设总长为 5 0450 mm,从中间向两端间距分别为 2×712.5 mm、225 mm、 4×712.5 mm;平台板厚度为 10 mm。有限元模型见图 7。

为施工平台赋予常温 20 ℃ 以及 -10 ℃、-20 ℃、-30 ℃、-40 ℃、-50 ℃ 五类低温,对平台在常温 20 ℃ 和五种低温时的力学性能进行分析。

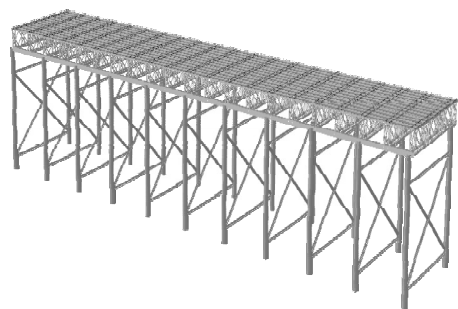


图7 贝雷梁钢管施工平台模型

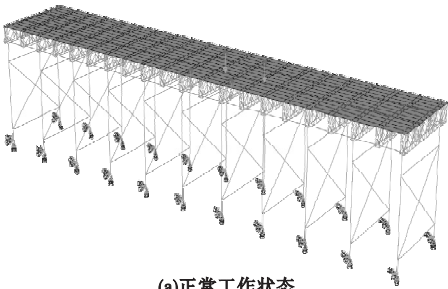
Fig. 7 The steel pipe construction platform model of Bailey beam

2.1.2 荷载工况及边界条件

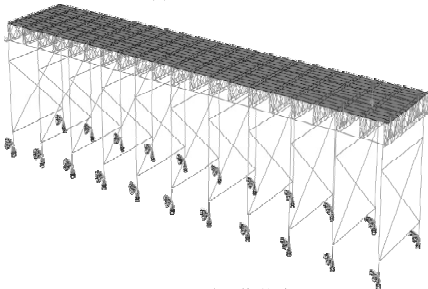
平台主要承受上方汽车吊及吊物荷载,荷载考虑最不利情况,简化为节点荷载。建立模型时,为了提高模型分析效率,平台中贝雷梁钢管柱支架采用梁单元创建,平台板采用 S4R 壳单元创建。

板与分配梁之间、分配梁与贝雷梁之间、贝雷梁横梁之间、横梁与钢管柱之间采用连续梁连接形式来模拟实际工程中的搭接与传力。贝雷片之间采用铰接,贝雷梁与花窗之间采用铰接,钢管柱与联结系之间采用“merge”模拟刚接,横梁与混凝土墩之间采用限制横梁沿其长度方向移动的连接形式,钢管柱与地面采用固结。模型温度采用创建“Predefined Field”赋予模型初始温度与工作温度。

平台上部作用汽车吊及吊物荷载,汽车吊工作时,四个支点全部作用在平台上,当吊物与吊臂置于一侧时,汽车吊的四个支点作用荷载可以近似由两个支点全部作用。当汽车吊两个支点承担全部荷载作用在平台端部贝雷梁上时为最不利荷载工况。风荷载相较于汽车吊及吊物荷载太小,可忽略。根据《钢结构设计标准》(GB50017—2017)^[14],规范规定结构的最大水平安装误差不大于 $h_i/1\,000$ (h_i 为计算结构高度),因此在建立施工平台模型时,考虑 $L/1\,000$ 的初始缺陷 (L 为单排贝雷梁总长度,9 m)。布置形式如图 8 所示。



(a)正常工作状态



(b)最不利工作状态

图8 荷载布置形式

Fig. 8 The load layout form

2.1.3 钢材本构关系

钢材的弹性模量随温度变化不大,钢材的各项强度指标随温度下降的变化规律^[15]按式(1)计算:

$$f_y = f'_y \exp[q_s(T' - T)]. \tag{1}$$

式中: T 为初始温度; T' 为变化后的温度; f'_y 为钢材在 T' 下的屈服强度。钢材在各温度下的本构关系如图 9 所示(以 Q345 为例)。

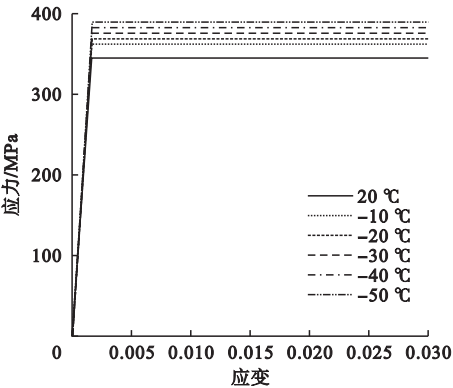


图9 钢材低温本构模型

Fig. 9 The low temperature constitutive model of steel

2.2 有限元参数分析结果

2.2.1 平台应力

为了研究极寒环境对大跨贝雷梁钢管施工平台力学性能的影响,选取正常工作状态

下荷载布置形式,汽车吊及吊物荷载为520 kN。有限元模拟 20 ℃施工平台应力结果如图 10 所示。

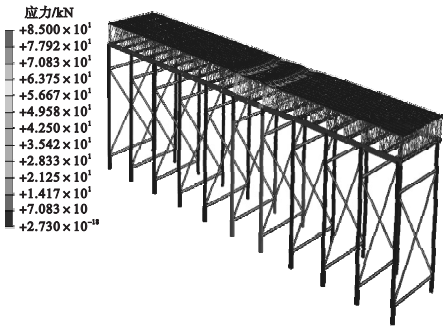


图 10 20 ℃施工平台应力结果

Fig. 10 The stress cloud diagram of the steel pipe construction platform of Bailey beam at 20 ℃

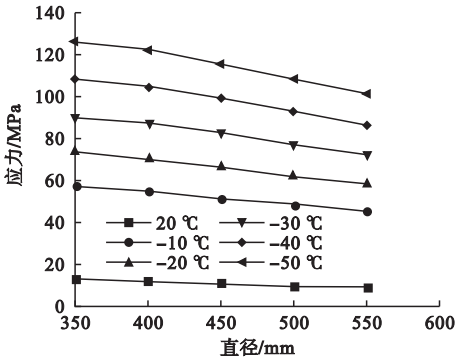
由图 10 可知,汽车吊及吊物荷载作用位置产生了最大应力为 85.0 MPa,在上部贝雷梁处,下部钢管柱应力很小。对施工平台在 20 ~ -50 ℃内进行受力分析,并分别提取贝雷梁和钢管柱应力,结果如表 1 所示。贝雷梁和钢管柱的应力均随温度降低越来越大,贝雷梁随着温度降低开始出现上部向中间倾斜的平面外变形,从而导致贝雷梁下弦杆处产生额外应力,从 20 ℃时的 85.0 MPa 增大到 -50 ℃时的 232.2 MPa;钢管柱与地面固结,随着温度降低,联结系收缩,带动钢管柱变形,而地面限制了钢管柱的变形,在柱底产生了明显的应力增大现象。从 20 ℃到 -50 ℃,应力从 9.9 MPa 增大到了 108.3 MPa。

表 1 贝雷梁与钢管柱应力结果

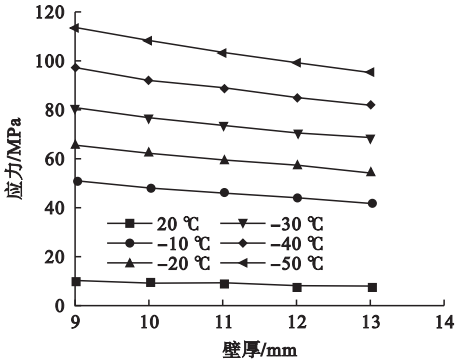
Table 1 The stress results of Bailey beam and steel tube

温度/℃	应力/MPa	
	贝雷梁	钢管柱
20	85.0	9.9
-10	100.1	48.6
-20	133.1	62.4
-30	166.2	77.4
-40	199.1	92.9
-50	232.2	108.3

针对钢管柱在 20 ~ -50 ℃内应力进行参数化分析,应力变化趋势见图 11。由图可知,20 ~ -50 ℃内,随着温度降低,钢管柱应力逐渐增大。



(a)钢管柱应力随直径变化折线图



(b)钢管柱应力随壁厚变化折线图

图 11 20 ~ -50 ℃钢管柱应力变化折线图

Fig. 11 The stress variation of steel pipe column at 20 ~ -50 ℃

图 11(a)中钢管柱直径不断增大,应力逐渐减小;20 ℃下,钢管柱应力从 13.4 MPa 减小到 9.4 MPa;随着温度不断降低,这种减小的趋势不断增大,在 -10 ℃、-20 ℃、-30 ℃、-40 ℃、-50 ℃下分别减小了 12.0 MPa、15.2 MPa、18.0 MPa、21.6 MPa、25.3 MPa;图 11(b)中,随着钢管柱壁厚的增大,在 20 ℃、-10 ℃、-20 ℃、-30 ℃、-40 ℃、-50 ℃下,钢管柱应力分别减小了 2.2 MPa、8.3 MPa、10.5 MPa、12.6 MPa、15.1 MPa、17.7 MPa。说明温度越低,增大钢管柱直径与壁厚来减小钢管柱应力的作用越来越明显。

2.2.2 平台位移

钢材是一种随温度变化变形较为明显的

材料,为了研究极寒环境下大跨贝雷梁钢管施工平台的变形情况,对整个施工平台进行低温下位移分析,结果见图 12。由图 12 可知,20 ℃下,施工平台最大位移出现在荷载作用位置。随着温度下降,贝雷梁开始出现上部向中间倾斜的平面外位移,并且温度越低位移越大,端部的贝雷梁位移最大,施工平台最大位移出现的位置也随之发生了转移,出现在端部贝雷梁上弦杆处。下部钢管柱也

产生了向内的变形。产生这种变形的原因是因为贝雷梁上、下弦杆分别与分配梁、横梁铰接,温度降低导致分配梁与横梁同步收缩,但横梁因与混凝土墩相连,限制了自身的收缩变形,因此贝雷梁上部因分配梁的收缩而向中间倾斜,下部基本保持不动。钢管柱也因联结系的收缩向收缩方向变形。各温度下贝雷梁与钢管柱位移结果如表 2 所示。

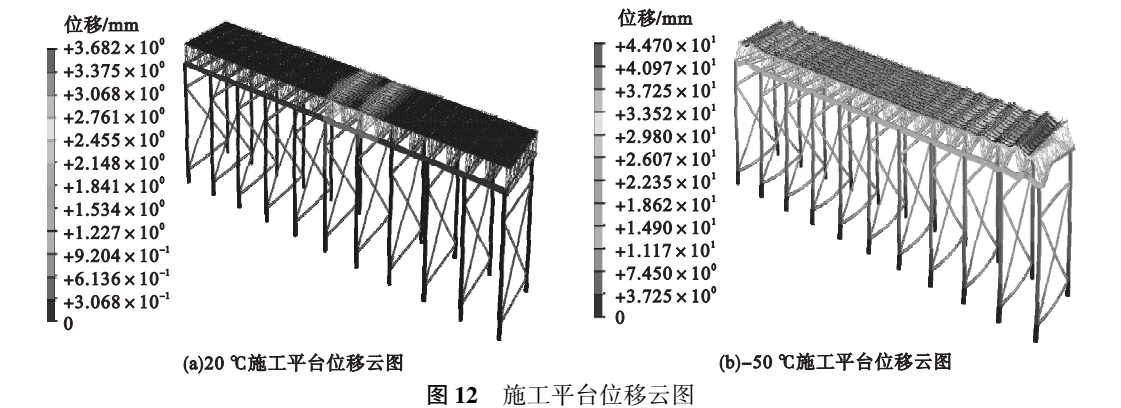


Fig. 12 The displacement cloud map of construction platform

表 2 贝雷梁与钢管柱位移结果

Table 2 The displacement results of Bailey beam and steel tube column

温度/℃	位移/mm	
	贝雷梁	钢管柱
20	3.7	0.4
-10	18.6	6.9
-20	24.7	9.1
-30	30.8	11.3
-40	37.4	14.1
-50	44.7	17.4

图 13 所示。

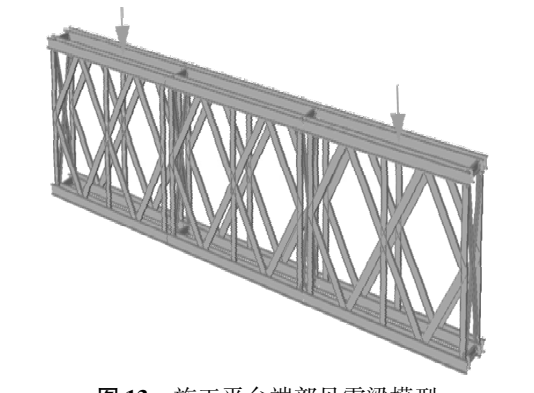


图 13 施工平台端部贝雷梁模型

Fig. 13 The Bailey beam model at the end of the construction platform

3 局部贝雷梁承载力分析

3.1 侧向变形影响贝雷梁承载力分析

由 2.2.2 节可知,温度降低,贝雷梁会产生向分配梁收缩方向的平面外变形。为了研究这种变形对贝雷梁承载力的影响,选取施工平台上方端部贝雷梁,对不同平面外位移下的贝雷梁承载力进行分析,加载方式如

对不同温度下施工平台进行静力分析,将得到的施工平台上方端部贝雷梁平面外位移引入贝雷梁局部模型中。由于贝雷梁大部分构件属于型钢构件,型钢构件加工制作时,构件内部产生的残余应力较小,因此不考虑残余应力的影响。在考虑初始缺陷、材料与

几何非线性的条件下对局部贝雷梁模型进行承载力分析,得到贝雷梁承载力随平面外位移变化结果,如表3所示。

表3 不同平面外位移下贝雷梁承载力结果

Table 3 The bearing capacity results of Bailey beams under different out-of-plane displacements

温度/℃	平面外位移/mm	承载力/kN
20	0.7	561.8
-10	17.0	540.5
-20	22.6	526.5
-30	28.1	516.7
-40	32.3	508.9
-50	36.6	475.5

由表3可知,随着贝雷梁平面外位移的增大,贝雷梁承载力逐渐减小,平面外位移从0.7 mm增大到36.6 mm,承载力从561.8 kN减小到475.5 kN,减小了15.4%,说明贝雷梁发生平面外位移能够对自身承载力产生较为明显的影响。贝雷梁荷载位移曲线如图14所示。

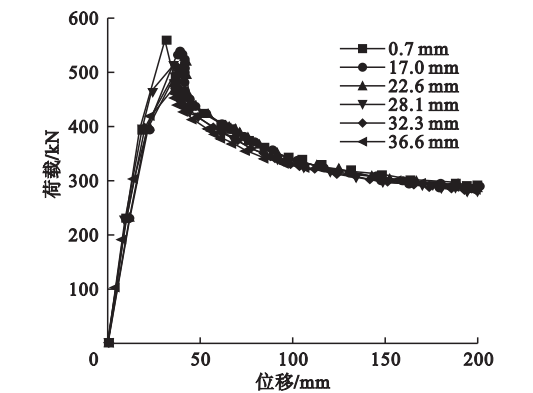


图14 贝雷梁承载力随平面外位移变化

Fig. 14 The result of the bearing capacity of Bailey beam changing with the out-of-plane displacement

3.2 花窗布置影响贝雷梁承载力分析

花窗作为横向连接贝雷梁的钢构件,对提高贝雷梁的侧向刚度有很大帮助,而工程上对贝雷梁之间花窗的布置形式并没有明确要求。因此,为了研究不同花窗布置形式下贝雷梁的承载力,除原布置形式(距端部3 010 mm附加花窗)外,另选取了图15所示

2种花窗布置形式进行贝雷梁承载力分析,结果对比如图16所示。由图可知,只有两端设置花窗时,贝雷梁承载力只有250 kN左右;距端部3 010 mm附加花窗,贝雷梁承载力增大到560 kN;当距端部1 425 mm(即在加载点处)附加花窗时,贝雷梁承载力增大到868 kN。由此可见,在贝雷梁加载点处增加花窗对增大贝雷梁承载力的效果最明显。

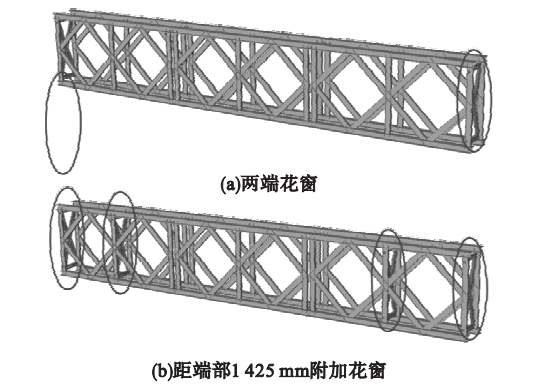


图15 不同花窗布置形式

Fig. 15 The different arrangement of flower window

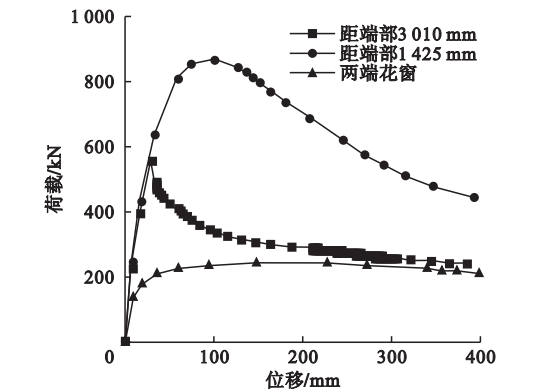


图16 不同花窗布置形式贝雷梁承载力结果

Fig. 16 The bearing capacity results of Bailey beams with different flower window

4 结 论

(1)随着温度降低,贝雷梁和钢管柱的应力均随温度降低越来越大,贝雷梁应力从85.0 MPa增大到了232.2 MPa,钢管柱应力从9.9 MPa增大到了108.3 MPa,增大钢管柱直径与壁厚来减小钢管柱应力的作用越来越明显。

(2)随着温度降低,贝雷梁和钢管柱的位移不断增大,贝雷梁下弦杆位移基本无变化,贝雷梁上部产生向分配梁收缩方向的平面外位移,钢管柱产生沿联结系长度收缩方向的变形。

(3)随着温度降低,平台上方端部贝雷梁平面外位移从0.7 mm增大到36.6 mm,承载力下降15.4%,贝雷梁发生平面外位移能够对自身承载力产生一定影响。在贝雷梁加载点处增加花窗能有效增大贝雷梁承载力。

参考文献

- [1] 高策.组合支架现浇连续箱梁施工监测与分析[D].北京:北京交通大学,2010.
(GAO Ce. Monitoring and analysis of cast-in-site continuous box girder used composite falsework during construction stage [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2010.)
- [2] WEESNER L B, JONES H L. Experimental and analytical capacity of frame scaffolding [J]. Engineering structures, 2001, 23 (6): 592-599.
- [3] CHEN Z P, NING F, CHEN J J, et al. Test on mechanical behavior of SRC L-shaped columns under combined torsion and bending moment [J]. Earthquake engineering and engineering vibration, 2021, 20(1): 161-177.
- [4] LI Z C, LI X J, MOU Y J, et al. Tuning austenite stability in a medium Mn steel and relationship to structure and mechanical properties [J]. Materials science and technology, 2020, 36(12): 1308-1317.
- [5] 王元清,周燕,戴国欣,等.钢材低温力学性能变化规律的灰色预测方法[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2014,30(6):971-979.
(WANG Yuanqing, ZHOU Yan, DAI Guoxin, et al. The grey prediction method for mechanical behaviors of steel at low temperature [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2014,30(6):971-979.)
- [6] 武延民.钢结构脆性断裂的力学机理及其工程设计方法研究[D].北京:清华大学,2005.
(WU Yanmin. Research for mechanism of brittle fracture of structural steel and its engineering design method [D]. Beijing: Tsinghua University,2005.)
- [7] 张世英.40CrNi2Mo钢低温力学性能的研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2009.
(ZHANG Shiyong. A study on mechanical properties of 40CrNi2Mo steel at low temperatures [D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology,2009.)
- [8] MARUSCHAK P O, DANYLIUK I M, BISHCHAK R T, et al. Low temperature impact toughness of the main gas pipeline steel after long-term degradation [J]. Open engineering, 2014, 4(4): 408-415.
- [9] WANG Yuanqing, LIAO Xiaowei, ZHANG Yuanyuan, et al. Experimental study on the through-thickness properties of structural steel thick plate and its heat-affected zone at low temperatures [J]. Journal of Zhejiang university-science a (applied physics & engineering), 2015, 16(3): 217-228.
- [10] 刘俊,刘彦生,李果,等.上海国家会展中心大跨钢结构屋盖温度应力分析与对策[J].建筑结构,2020,50(12):40-45.
(LIU Jun, LIU Yansheng, LI Guo, et al. Temperature stress analysis and measures of large-span steel roof structure of national exhibition and convention center in Shanghai [J]. Building structure, 2020, 50(12): 40-45.)
- [11] 程科.穹顶结构体育场温度场监测与分析[D].杭州:浙江工业大学,2019.
(CHENG Ke. Temperature field monitor and analysis of a domed stadium [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.)
- [12] 刘哲,丁阳,宗亮.环境温度对圆拱形钢结构模态频率的影响研究[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2019,52(2):183-190.
(LIU Zhe, DING Yang, ZONG Liang. Investigation of environment temperature effects on modal frequency of circular arch steel structure [J]. Journal of Tianjin university(science and technology), 2019, 52(2): 183-190.)
- [13] KING W S, WU S M, DUAN L. Laboratory load tests and analysis of bailey bridge segments [J]. Journal of bridge engineering, 2013, 18(10): 957-968.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.钢结构设计标准:GB50017—2017[S].北京:中国建筑工业出版社,2018.
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of steel structures: GB50017—2017 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.)
- [15] 王元清,林云,张延年,等.Q460C高强钢材对接焊缝的低温力学性能试验[J].铁道科学与工程学报,2012,9(2):1-7.
(WANG Yuanqing, LIN Yun, ZHANG Yannian, et al. Experimental study on the mechanical properties of butt weld of Q460C high-strength construction steel at low temperature [J]. Journal of railway science and engineering, 2012, 9(2): 1-7.)

(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)