

轨道梁初始几何缺陷对活动屋盖运行的影响

徐光明¹, 汪凯超², 王必刚¹, 冯 龙³, 查晓雄^{2*}

(1. 深圳市体育中心运营管理有限公司, 广东 深圳 518031; 2. 哈尔滨工业大学(深圳)土木与环境工程学院, 广东 深圳 518055; 3. 中国建筑第八工程局有限公司, 上海 200112)

摘要: 为探究轨道梁的初始几何缺陷是否会影响轨道梁结构的安全性和是否会加剧台车的卡轨风险, 基于有限元瞬态分析提出一种活动屋盖闭合全过程模拟的简化方法, 并利用该方法探究了活动屋盖闭合过程中轨道梁位移和应力的变化特征, 研究了轨道梁的缺陷类型(z 向和 y 向初始几何缺陷)和缺陷尺寸对活动屋盖运行的影响。结果表明, 在活动屋盖闭合过程中, 台车与轨道梁间的 y 向位移存在一定的差值, 该位移差可达3.8 mm以上, 且越靠近固定屋盖跨中该位移差越大; 不同缺陷类型和缺陷尺寸下, 轨道梁应力比的峰值基本相同, 且应力比小于0.54; z 向初始几何缺陷基本不影响轨道梁的位移; y 向初始几何缺陷会使轨道梁产生一个与缺陷同向的附加位移, 且缺陷越大附加位移值越大, 当轨道梁的 y 向初始几何缺陷尺寸为轨道梁的跨度的1/250时, 台车的最大横移率是无缺陷模型最大横移率的4.3倍。

关键词: 开合屋盖; 钢结构; 轨道梁; 初始几何缺陷; 有限元瞬态分析; 台车横移率

中图分类号: TU391

文献标志码: A

文章编号: 1671-9379(2025)03-0084-09

DOI: 10.13969/j.jzgjz.20231016002

The Influence of Initial Geometric Imperfections of Track Beams on the Operation of Movable Roofs

XU Guangming¹, WANG Kaichao², WANG Bigang¹, FENG Long³, ZHA Xiaoxiong^{2*}

(1. Shenzhen Sports Center Operation Management Co., Ltd., Shenzhen 518031, China; 2. Civil and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Shenzhen, Shenzhen 518055, China; 3. China Construction Eighth Engineering Division Co., Ltd., Shanghai 200112, China)

*Corresponding author: zhahero@126.com

Abstract: A simplified method is proposed to simulate the complete closure process of the movable roof in a finite element transient analysis. The purpose is to investigate the impact of initial geometric imperfections in the track beam on the safety of the structure and the risk of track jamming of the trolley. This method examines the displacement and stress variation characteristics of the track beam during the closure of the movable roof, and also explores the influence of different types (initial geometric imperfections in z and y directions) and sizes of track beam imperfections on the operation of the movable roof. The results reveal that there is a displacement difference greater than 3.8 mm in the y -direction between the trolley and the track beam during the closure process, and this difference increases as the

收稿日期: 2023-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(52178129), 深圳市科技计划项目(GJHZ20220913143007013、KCXST20221021111408021)

作者简介:

徐光明(1980—), 男, 学士, 工程师, 主要从事大型公共建筑的建设管理方面的工作。E-mail: 2205288@qq.com。

汪凯超(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事大跨空间结构和钢-混凝土组合结构性能方面的研究。

通信作者:

查晓雄(1968—), 男, 博士, 教授, 主要从事钢结构和钢-混凝土组合结构性能方面的研究。E-mail: zhahero@126.com。

closure progresses towards the mid-span position. The stress ratio peak value of the track beam is consistent and remains below 0.54, irrespective of the imperfection type and size. The initial geometric imperfections in the z direction have almost no effect on the track beam displacement. Conversely, the initial geometric imperfections in the y direction result in additional displacement in the same direction as the imperfection, and the magnitude of this additional displacement increases with the imperfection size. When the size of the initial geometric imperfection in the y direction is $L/250$, the maximum lateral displacement ratio of the trolley is 4.3 times higher than that of the ideal model.

Keywords: retractable roof; steel structure; track beam; initial geometric imperfection; finite element transient analysis; lateral displacement ratio of the trolley

随着人们对生活体验的要求不断提高,开合屋盖结构在新建体育场馆中越来越受欢迎。目前绝大多数开合屋盖采用钢结构,而钢结构构件在生产、运输和施工过程中很容易产生初始弯曲。对于开合屋盖结构,轨道梁的初始弯曲容易引发卡轨、干涉和蛇形等问题^[1]。因此,有必要分析轨道梁的初始几何缺陷对活动屋盖运行的影响。

目前,关于整体初始几何缺陷^[2-7]和局部初始几何缺陷^[8-11]对钢屋盖结构性能影响方面存在大量研究,而关于初始几何缺陷对开合屋盖结构性能影响方面的研究相对较少。王人立^[12]分别研究了静力作用下和轮轨激励作用下含整体初始几何缺陷的活动屋盖的稳定性。陆鼎^[13]分别研究了整体缺陷为跨度的1/1 000的开合屋盖结构的静力稳定性和地震作用下的动力稳定性。周健^[14-15]对整体缺陷为跨度的1/300的开合屋盖的静力稳定性进行了研究。江晓峰等^[16]对不同开合状态下含初始几何缺陷的钢屋盖结构的静力稳定性进行了研究。目前,尚未发现有关轨道梁的初始几何缺陷对活动屋盖运行影响方面的研究,也尚未发现关于活动屋盖运动过程中轨道梁位移和应力变化特征方面的研究。

因此,为了研究轨道梁的初始几何缺陷对活动屋盖运行的影响,本文提出一种模拟活动屋盖运动过程的简化方法,并利用该方法对活动屋盖的闭合过程进行了全过程模拟,分析了活动屋盖闭合过程中轨道梁位移和应力的变化特征,研究了不同缺陷类型和缺陷大小对轨道梁位移和应力的影响。

1 工程背景及建模方法

1.1 工程背景

开合屋盖由固定屋盖和活动屋盖组成,如图1所示,其中固定屋盖由井字形主桁架、正交正放平面桁架及外环矩形管桁组成,活动屋盖由2片正交正放的平面桁架组成,每片活动屋盖均能独立在各自的轨道上运行。井字形主桁架支撑在型钢混凝土柱上,每片活动屋盖由8个台车支撑在2根轨道梁上(每根轨道梁上有4个台车,

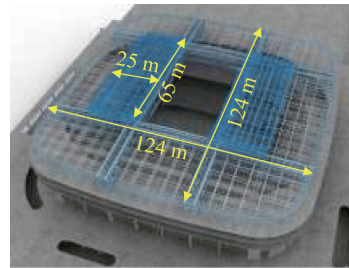


图1 体育馆示意

Fig. 1 Schematic diagram of gymnasium

每个台车在 x 方向的水平间距为5 995 mm),轨道梁支撑在主桁架顶部的中间位置(每个支点间隔约3 150 mm),每根轨道梁的坡度为4%。

活动屋盖中所有杆件采用Q355B钢,固定屋盖中除了主桁架的上下弦杆、轨道梁及轨道梁的支撑构件采用Q420B钢外,其他全部采用Q355B钢。

1.2 建模方法

由于活动屋盖与固定屋盖仅通过台车与轨道梁间的相互作用进行连接,所以活动屋盖传给固定屋盖的荷载主要为垂直于轨道梁的法向接触力和平行于轨道梁的切向接触力。又因为活动屋盖刚度较大,一般可将活动屋盖视为刚性结构^[1],因此本文基于瞬态分析提出一种模拟活动屋盖运动过程的简化方法,即:将活动屋盖等效成台车位置处的质量块,每个质量块的质量根据活动屋盖的质量及其所受的外荷载确定(先将活动屋盖的自重与外荷载全部换算成质量,然后将换算后的总质量平均分配给每个质量块),活动屋盖在固定屋盖上的运动则等效成质量块在轨道梁上的运动。

此外,因为足尺模型的闭合全过程模拟存在计算量大、计算时间长等问题,所以应适当简化计算模型。考虑到固定屋盖上的荷载主要是通过井字形主桁架传递到支座上,所以在建立有限元模型时,忽略固定屋盖中的平面桁架和外环矩形管桁,仅考虑井字形主桁架对活动屋盖的支撑作用,简化后的计算模型如图2所示,其中N1~N4为轨道梁上的4个特征点,特征点的具体位置如

图3所示,T1~T4为单根轨道梁上的4个台车,N1~N4为轨道梁上的4个特征点;图3中的坐标系为局部坐标系,局部坐标系的 x 轴与轨道梁的轴向平行, y 轴与全局坐标系的 y 轴平行。

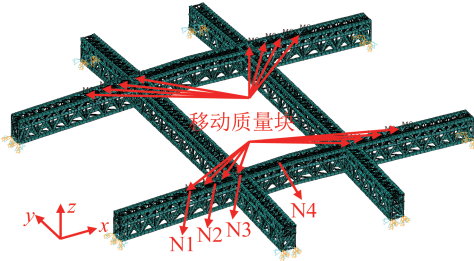


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

建立有限元模型时固定屋盖采用梁单元来模拟,活动屋盖采用3D无旋转惯性的质量单元来模拟,轨道梁与质量单元之间采用不分离接触来模拟。由于活动屋盖可视为刚体结构,所以本文约束质量块在 y 向方向上的位移。因为在正常使用状态时材料处于弹性阶段,所以材料采用线弹性本构,弹性模量为 2.06×10^{11} Pa,泊松比为0.3,密度为 $7850 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。结构阻尼采用Rayleigh阻尼,根据模态分析和理论计算取质量阻尼系数为0.3,刚度阻尼系数为0.001。

2 初始几何缺陷类型

为探究轨道梁的竖向和横向初始几何缺陷对活动屋盖运行的影响,本文分别考虑了 z 向初始几何缺陷和 y 向初始几何缺陷两种缺陷形式。 z 向和 y 向分别指轨道梁的 z 轴和 y 轴坐标随着 x 的变化呈正弦函数分布,如图3所示。其中N1和N4均为正弦波波谷处的节点,N2为正弦波波峰处的节点,N3为上下波交接处的节点。轨道梁的初始几何缺陷采用正弦函数来模拟,正弦波的波长取轨道梁下方支撑点的间距,建模时采用修改节点坐标的方式将缺陷引入两侧轨道梁中。

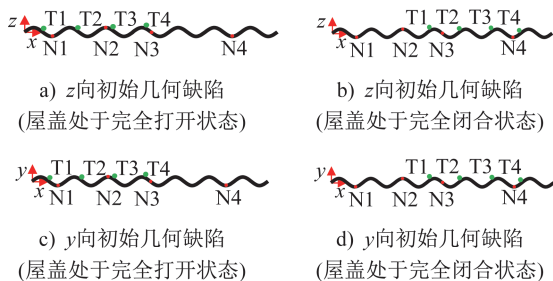


图3 轨道梁的缺陷类型及台车位置

Fig. 3 Imperfection types of track beam and trolley position

为研究缺陷尺寸对活动屋盖运行的影响,根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[17]中构件的初始几何缺陷不应小于跨度的 $1/1000$ 的要求,分别取缺陷尺寸为 $L/1000$ 、 $L/500$ 和 $L/250$,其中 L 为轨道梁的跨度。

3 计算结果

在研究轨道梁初始几何缺陷对活动屋盖运行的影响时,主要探究初始几何缺陷是否会加剧台车卡轨的风险和是否会影响轨道梁结构的安全性。

因为卡轨问题主要由轨道梁的 y 向变形所引起,所以本文主要关注轨道梁 y 向位移的变化特征。因为轨道梁最可能出现的破坏为压弯破坏,所以本文主要关注轨道梁轴向应力、 y 向和 z 向弯曲应力的变化特征。其中,轴向应力为轴向荷载作用下梁截面的应力;弯曲应力为纯弯作用下截面上某点的应力, y 向和 z 向弯曲应力分别为在局部坐标系下梁截面上在 y 轴和 z 轴正方向最远点的弯曲应力。

3.1 z 向几何缺陷

轨道梁上不同节点的 z 向位移曲线如图4所示,其中编号为T1、T2、T3和T4的竖向虚线分别表示为台车T1、T2、T3和T4经过该节点的时刻。由图可知,不同 z 向几何缺陷下,各节点的 z 向位移曲线基本重合,由此说明 z 向几何缺陷基本不影响轨道梁的 z 向位移;当台车经过某个节点时,该节点的 z 向位移会出现一个先增大、后减小的变化过程;活动屋盖从完全打开状态到完全闭合状态,增大了大部分节点的 z 向位移,但 z 向位移的增大不会引起卡轨问题,因为台车和轨道梁在竖直方向上的位移能够时刻保持一致。

轨道梁上不同节点的 y 向位移曲线如图5所示。由图可知,不同 z 向几何缺陷下,各节点的 y 向位移曲线基本重合,由此说明 z 向几何缺陷基本不影响轨道梁的 y 向位移;活动屋盖由完全打开状态转为完全闭合状态后,轨道梁的 y 向位移发生了明显的变化,且越靠近屋盖跨中节点的 y 向位移变化越大,其中节点N4的 y 向位移值增加了3.8 mm。轨道梁产生 y 向位移是因为井字形主桁架为双向传力结构,在 x 向主桁架与 y 向主桁架相交处, y 向主桁架对 x 向主桁架会产生一个 y 向力,该力会使 x 向主桁架和轨道梁产生 y 向位移。

轨道梁上不同节点的轴向应力曲线如图6所示。由图可知,不同 z 向几何缺陷下,各节点的轴向应力曲线大体上重合,由此可以说明 z 向几何缺陷对轨道梁轴向应力的影响不大;当台车经过某个节点时,该节点的轴向应力会产生7 MPa左右的突变,且突变的次数等于经过该点的台车数量。

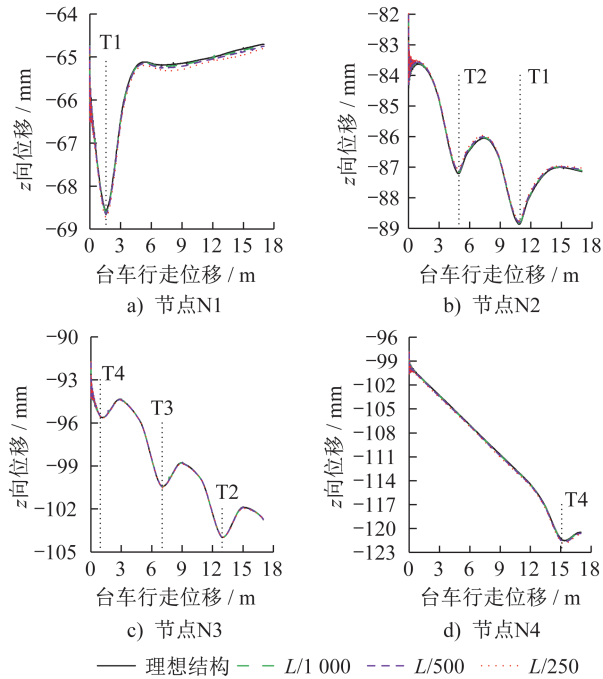


图4 不同z向初始几何缺陷下轨道梁的z向位移
Fig. 4 Z-direction displacement of track beam under different z-direction initial geometric imperfections

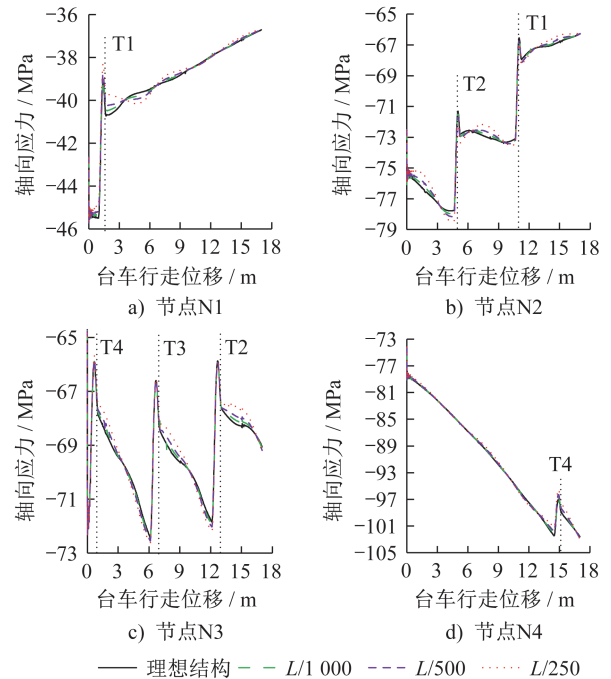


图6 不同z向初始几何缺陷下轨道梁的轴向应力
Fig. 6 Axial stress of track beam under different z-direction initial geometric imperfections

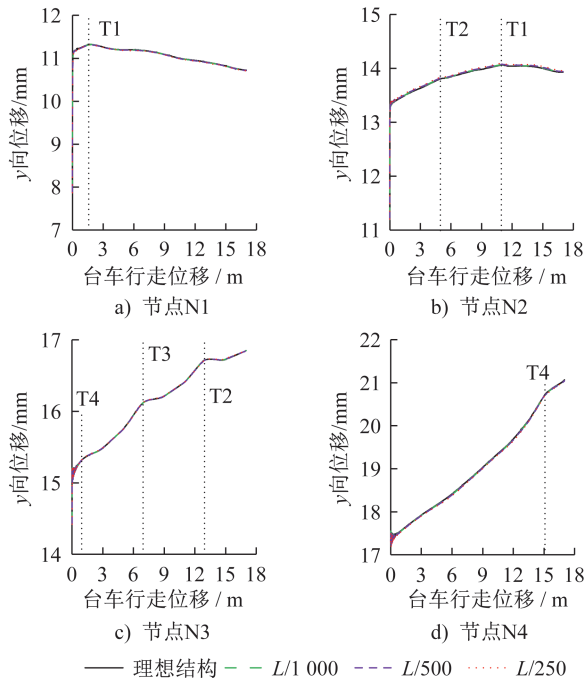


图5 不同z向初始几何缺陷下轨道梁的y向位移
Fig. 5 Y-direction displacement of track beam under different z-direction initial geometric imperfections

程中存在受拉和受压的交替变换,且变换的次数等于经过该点的台车数量,每次变换时对应的应力幅值在120 MPa左右。

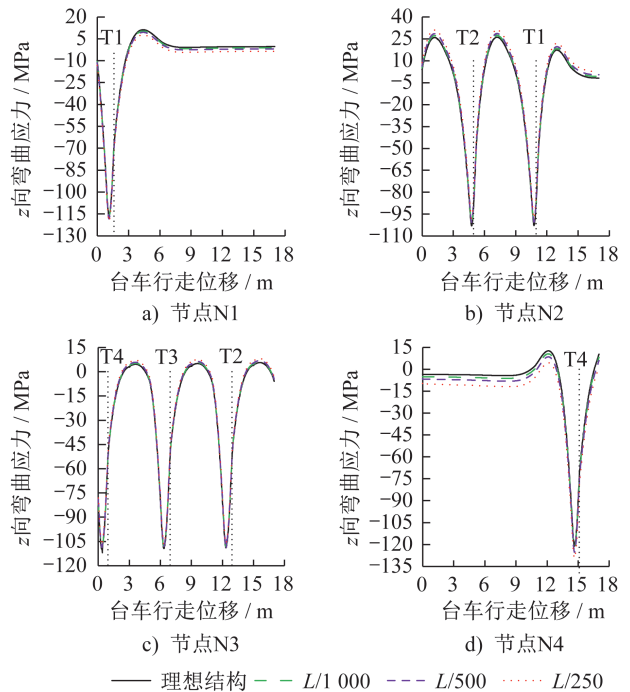


图7 不同z向初始几何缺陷大小下轨道梁的z向弯曲应力

轨道梁上不同节点的z向弯曲应力曲线如图7所示。由图可知,不同z向几何缺陷下,各节点的z向弯曲应力曲线大体重合,由此可以说明z向几何缺陷对轨道梁z向弯曲应力的影响不大;轨道梁的z向弯曲应力在屋盖闭合过

Fig. 7 Z-direction bending stress of track beam under different z-direction initial geometric imperfections

轨道梁上不同节点的 y 向弯曲应力曲线如图8所示。由图可知,不同 z 向几何缺陷下,各节点的 y 向弯曲应力曲线基本重合,由此可以说明 z 向几何缺陷基本不影响轨道梁的 y 向弯曲应力;当台车经过某个节点时,该节点的 y 向弯曲应力会产生5 MPa左右的突变,且突变的次数等于经过该点的台车数量。

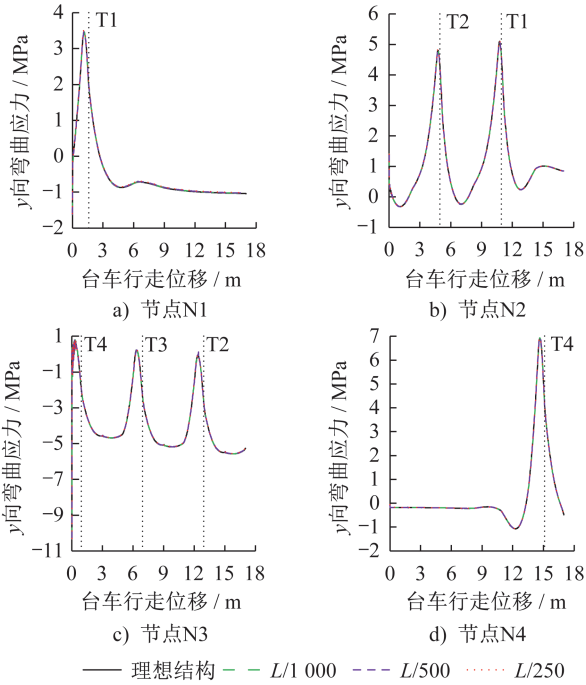


图8 不同 z 向初始几何缺陷大小下轨道梁的 y 向弯曲应力

Fig. 8 Y-direction bending stress of track beam under different z -direction initial geometric imperfections

3.2 y 向几何缺陷

轨道梁上不同节点的 z 向位移曲线如图9所示。由图可知,不同 y 向几何缺陷下,各节点的 z 向位移曲线大体上重合,由此可以说明 y 向几何缺陷对轨道梁的 z 向位移影响不大。

轨道梁上不同节点的 y 向位移曲线如图10所示。由图可知, y 向几何缺陷会使轨道梁的 y 向位移产生一定的波动,且缺陷越大波动的幅值越大。此外可以发现,对于缺陷位于 y 轴负方向的节点N1和N4,当台车经过该节点时,缺陷会使节点在 y 轴负方向产生一个附加位移;对于缺陷位于 y 轴正方向的节点N2,当台车经过该节点时,缺陷会使节点在 y 轴正方向产生一个附加位移;对于无缺陷的节点N3,当台车经过该节点时不会使节点产生附加位移。由此可以说明,若轨道梁中的某一部分存在 y 向初始几何缺陷,则当台车经过该部分时,该部分轨道梁会产生一个与缺陷同向的附加位移。其中,轨道梁 y 向初始几何缺陷为 $L/250$ 的模型与理想结构模型相比,当台车T1经

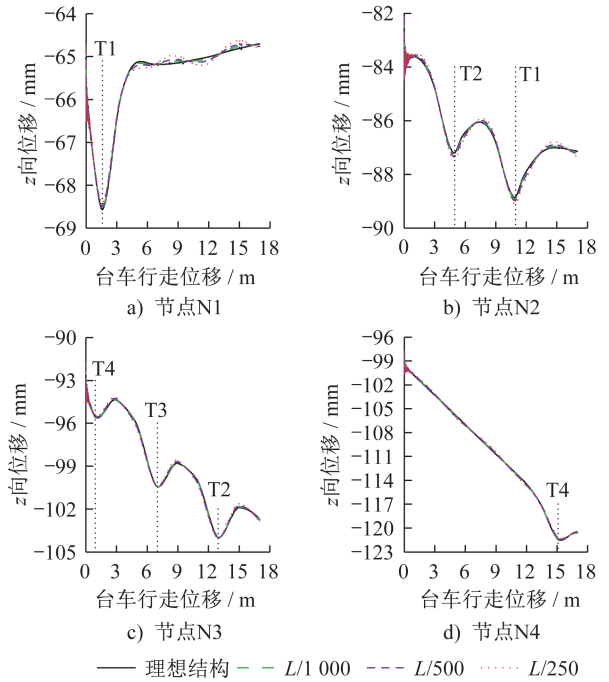


图9 不同 y 向初始几何缺陷大小下轨道梁的 z 向位移
Fig. 9 Z-direction displacement of track beam under different y -direction initial geometric imperfections

过节点N1时,节点N1在 y 轴负方向产生了1.2 mm的附加位移;当台车T2经过节点N2时,节点N2在 y 轴正方向产生了0.7 mm的附加位移。

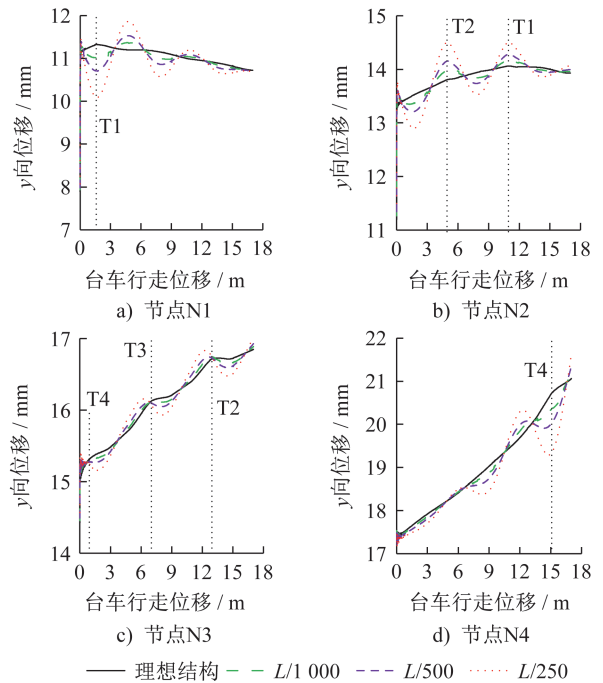


图10 不同 y 向初始几何缺陷大小下轨道梁的 y 向位移
Fig. 10 Y-direction displacement of track beam under different y -direction initial geometric imperfections

轨道梁上不同节点的轴向应力曲线和 z 向弯曲应力曲线如图11~12所示。由图可知,不同 y 向几何缺陷下,

各节点的应力曲线基本重合,由此说明 y 向几何缺陷并不影响轨道梁的轴向应力和 z 向弯曲应力。

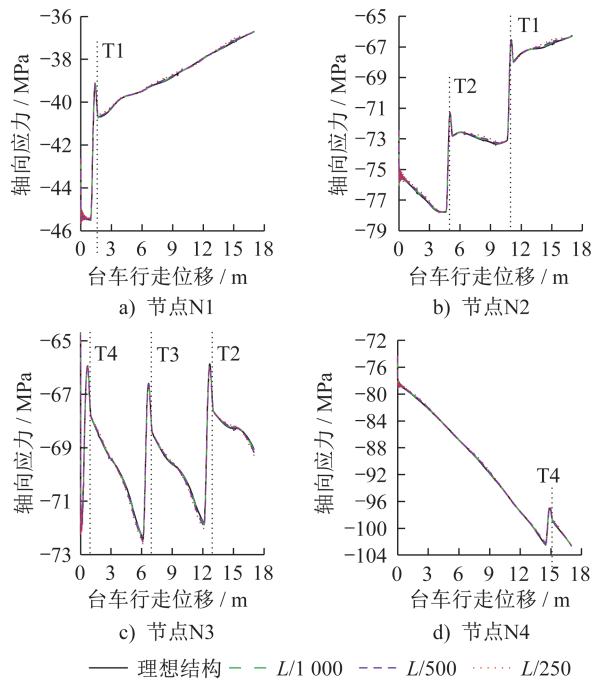


图 11 不同 y 向初始几何缺陷大小下轨道梁的轴向应力
Fig. 11 Axial stress of track beam under different y -direction initial geometric imperfections

有较大影响,且缺陷越大影响越显著。其中,在轨道梁 y 向初始几何缺陷为 $L/250$ 的模型中,节点N2的 y 向弯曲应力最大峰值比理想结构的对应值大6.7 MPa,峰值增加了132%;节点N4的 y 向弯曲应力最小峰值比理想结构的对应值大6.0 MPa,峰值增加了561%。

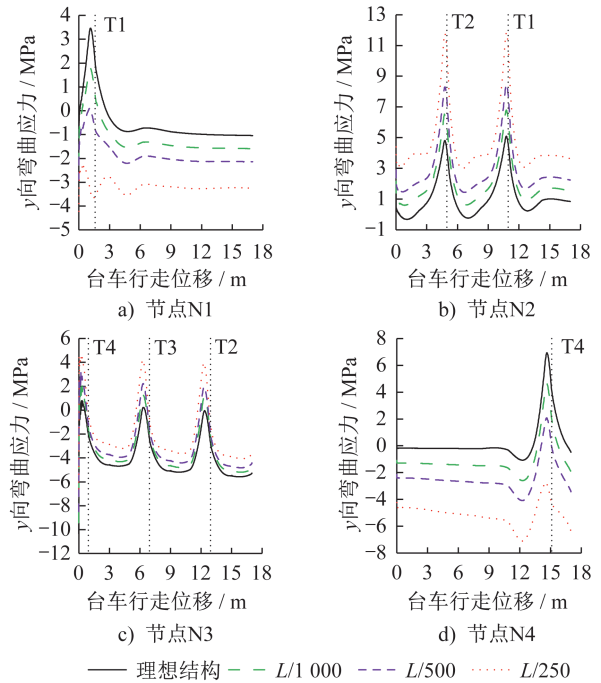


图 13 不同 y 向初始几何缺陷大小下轨道梁的 y 向弯曲应力

Fig. 13 Y -direction bending stress of track beam under different y -direction initial geometric imperfections

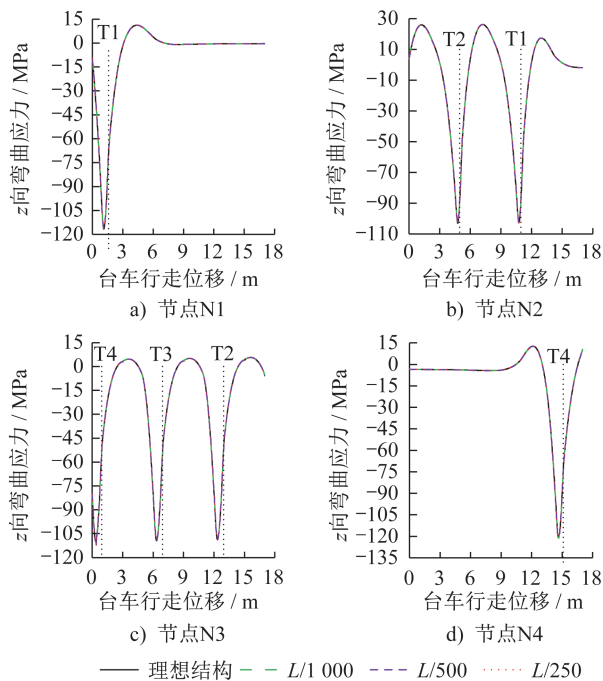


图 12 不同 y 向初始几何缺陷大小下轨道梁的 z 向弯曲应力

Fig. 12 Z -direction bending stress of track beam under different y -direction initial geometric imperfections

轨道梁中不同节点的 y 向弯曲应力曲线如图13所示。由图可知, y 向几何缺陷对各节点的 y 向弯曲应力具

4 结果分析

由于台车与轨道梁的 z 向位移能时刻保持一致,而台车与轨道梁的 y 向位移无法时刻保持一致,因此分析卡轨问题时,只讨论初始几何缺陷对台车与轨道梁间的 y 向位移差的影响。

本文提出采用台车的横移率 v 来判断是否会增加台车卡轨的风险,横移率越大,台车越容易发生卡轨。横移率的计算方法如下:

$$v = |u/[u]| \times 100\% \quad (1)$$

式中: $[u]$ 为台车横移的容许值,本项目中 $[u]$ 取25 mm; u 为台车与轨道梁间的横移量。

由第3节可知,台车与轨道梁间的横移量由以下部分组成:活动屋盖闭合过程中轨道梁的 y 向位移、轨道梁的 y 向初始几何缺陷和初始几何缺陷引起的 y 向附加位移。因此,台车与轨道梁间横移量的计算方法如式(2)所示。

$$u = u_1 + u_2 + u_3 \quad (2)$$

式中: u_1 为台车运行引起的台车与轨道梁间的横向位移

差; u_2 为施工后轨道梁的实际轴线与设计轴线间的横向偏移量; u_3 为轨道梁初始几何缺陷引起的横向附加位移。

本文采用轨道梁最大正向应力与材料屈服强度的比值(应力比)来判断对结构安全性的影响程度。应力比的峰值变化越大,对结构的安全性影响就越大。

4.1 横移率

如表1所示,由于轨道梁的 z 向初始几何缺陷对轨道梁的 y 向位移基本没有任何影响, y 向初始几何缺陷对轨道梁 y 向位移的影响随着初始几何缺陷的增大而增大,所以只给出理想结构模型和轨道梁 y 向初始几何缺陷为 $L/250$ 模型中台车的横移率。

表1 有无初始几何缺陷下台车的横移率

Table 1 Lateral displacement ratio of trolley with and without initial geometric imperfections

模型	时刻	u_1/mm	u_2/mm	u_3/mm	u/mm	$v/\%$
理想结构	N1(T1)	0.300	0.000	0.000	0.300	1.2
	N2(T2)	0.491	0.000	0.000	0.491	2.0
	N2(T1)	0.746	0.000	0.000	0.746	3.0
	N3(T4)	0.104	0.000	0.000	0.104	0.4
	N3(T3)	0.908	0.000	0.000	0.908	3.6
	N3(T2)	1.504	0.000	0.000	1.504	6.0
	N4(T4)	3.209	0.000	0.000	3.209	12.8
	轨道梁 y 向初始几何缺陷为 $L/250$	N1(T1)	0.300	-12.600	-1.230	-13.530
N2(T2)		0.491	12.600	0.696	13.787	55.1
N2(T1)		0.746	12.600	0.441	13.787	55.1
N3(T4)		0.104	0.000	-0.077	0.027	0.1
N3(T3)		0.908	0.000	-0.025	0.883	3.5
N3(T2)		1.504	0.000	0.036	1.540	6.2
N4(T4)		3.209	-12.600	-1.384	-10.775	43.1

注:时刻中括号内为台车编号,括号前为节点编号,例如N1(T1)表示台车T1经过节点N1的时刻。

由表中理想结构的结果可知,在活动屋盖闭合过程中,越靠近固定屋盖的跨中,台车的横移率越大。由表中节点N1、N2和N4的结果可知,轨道梁的 y 向初始几何缺陷增加了台车经过波峰和波谷处时的横移率;在几何缺陷相同的情况下,将轨道梁的缺陷方向与横向位移方向反向布置,可减小台车的横移率。此外,理想结构模型和轨道梁 y 向初始几何缺陷为 $L/250$ 模型中台车的最大横移率分别为12.8%和55.1%,即几何缺陷模型的最大横移率比理想结构模型的最大横移率增大了3.3倍。由此可以说明,轨道梁的 y 向初始几何缺陷会增大台车发生卡轨的风险。

4.2 应力比

将轨道梁上各节点的轴向应力、 z 向弯曲应力和 y 向弯曲应力叠加可得各节点的最大正向应力,在活动屋盖闭合过程中,不同情况下各节点的应力比如图14所示。由图可知,不同缺陷类型下的应力比在部分区域稍有差异,但不同缺陷类型下轨道梁应力比的峰值基本重合,且

应力比均小于0.54。由此可以说明, y 向初始几何缺陷和 z 向初始几何缺陷均不会影响运行期间轨道梁结构的安全性。

此外,由图14可以看出在活动屋盖闭合过程中,轨道梁截面上的最大正向应力在台车经过前后均会产生一个突变。该突变会使梁截面上的正应力产生一个较大的正应力幅,且正应力幅出现的次数等于经过该点台车的数量。因此,在设计轨道梁时应考虑轨道梁的疲劳问题。

5 结论

本文利用有限元模拟研究了轨道梁初始几何缺陷的类型和缺陷尺寸对活动屋盖运行性能的影响,探究了活动屋盖闭合过程中轨道梁应力和位移的变化特征。研究结论如下:

(1) 活动屋盖的闭合会引起轨道梁发生 y 方向的位移 u_1 ,且越靠近跨中的节点, u_1 越大;轨道梁的 y 向初始几何缺陷会使轨道梁产生与缺陷同方向的 y 向附加位移 u_3 ,且缺陷越大, u_3 值越大。

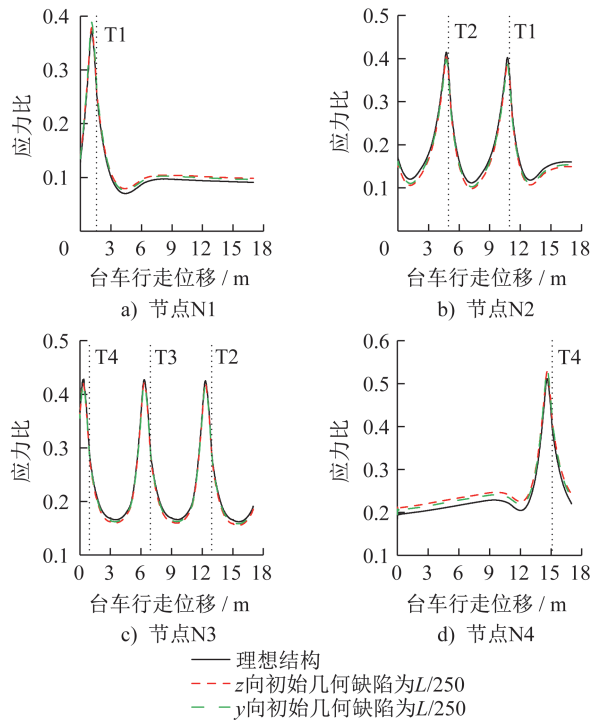


图14 不同初始几何缺陷下轨道梁的应力比

Fig. 14 Stress ratio of track beam under different initial geometric imperfections

(2) 台车与轨道梁间的横移量由以下部分组成:因活动屋盖运动引起的 y 向位移 u_1 、轨道梁的 y 向初始几何缺陷 u_2 以及因 y 向初始几何缺陷引起的 y 向附加位移 u_3 。

(3) z 向初始几何缺陷不会增大台车卡轨的风险,也不会影响轨道梁结构的安全性; y 向初始几何缺陷不会影响轨道梁结构的安全性,但会增大台车卡轨的风险。当轨道梁的 y 向初始几何缺陷大小为 $L/250$ 时,台车与轨道梁间的横移量可达13.8 mm,台车的最大横移率为理想结构最大横移率的4.3倍。

参考文献:

- [1] 范重,彭翼,张康伟,等. 开合屋盖结构与技术标准的新进展[J]. 钢结构(中英文), 2020, 35(2): 29-65. DOI: 10.13206/j.gjgS19112602.
- FAN Zhong, PENG Yi, ZHANG Kangwei, et al. New progress in retractable roof structures and technical standards[J]. Steel Construction (Chinese & English), 2020, 35(2): 29-65. DOI: 10.13206/j.gjgS19112602. (in Chinese)
- [2] 马志海,毛小勇,黎明,等. 考虑初始几何缺陷的大跨管桁架屋盖非线性稳定性研究[J]. 结构工程师, 2022, 38(1): 47-52. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2022.01.002.
- MA Zhihai, MAO Xiaoyong, LI Ming, et al. Research on nonlinear stability of long-span pipe truss roof considering initial geometric imperfections[J]. Structural Engineers, 2022, 38(1): 47-52. DOI: 10.15935/j.cnki.jggcs.2022.01.002. (in Chinese)
- [3] 赵若旭. 弦支穹顶结构静力稳定及动力响应分析[D]. 保定: 河北大学, 2020.
- ZHAO Ruoxu. Analysis of static stability and dynamic response of suspend-dome structure [D]. Baoding: Hebei University, 2020. (in Chinese)
- [4] 张卫,陈兴,李霆,等. 襄阳东津站屋盖稳定分析[J]. 钢结构(中英文), 2019, 34(12): 58-61, 103. DOI: 10.13206/j.gjg201912011.
- ZHANG Wei, CHEN Xing, LI Ting, et al. Stability analysis of roof structure of Xiangyang Dongjin railway station [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2019, 34(12): 58-61, 103. DOI: 10.13206/j.gjg201912011. (in Chinese)
- [5] 苏哲. 梯形截面筒支空间桁架的整体稳定研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.
- SU Zhe. Study on global stability of trapezoidal section simply supported space truss [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022. (in Chinese)
- [6] 孙鸣. 考虑双重非线性的铺钢板肋环网壳结构稳定性分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.
- SUN Ming. The stability analysis of a new radial rib dome with plates considering double nonlinearity [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [7] 张明,侯积英,支旭东,等. 初始几何缺陷模式对单层球面网壳抗震性能的影响[J]. 振动与冲击, 2021, 40(5): 33-38, 74. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.05.005.
- ZHANG Ming, HOU Jiying, ZHI Xudong, et al. Effect of initial geometric imperfection modes on aseismic performance of single-layer spherical reticulated shell [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(5): 33-38, 74. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2021.05.005. (in Chinese)
- [8] 王金祥. 单层球面网壳动力分析中初始几何缺陷模拟方法的探讨[D]. 济南: 山东建筑大学, 2016.
- WANG Jinxiang. The discussion of initial geometric imperfection simulation method on single-layer spherical lattice shell in the dynamic analysis [D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2016. (in Chinese)
- [9] 王珺,卿强,龚景海. 圆钢管空间桁架结构的直接分析设计方法研究[J]. 钢结构(中英文), 2023, 38(2): 8-17. DOI: 10.13206/j.gjgS22101701.
- WANG Jun, QING Qiang, GONG Jinghai. Study on direct analysis and design method of space truss structure with steel pipes [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2023, 38(2): 8-17. DOI: 10.13206/j.gjgS22101701. (in Chinese)
- [10] 赵雷,齐欣,郑腾虎,等. 初始几何缺陷对跨层平面桁架稳定承载力的影响[J]. 建筑钢结构进展, 2022, 24(4): 66-73. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2022.04.009.
- ZHAO Lei, QI Xin, ZHENG Tenghu, et al. Influence of initial geometric imperfection on the stability bearing capacity of a cross-story plane truss [J]. Progress in Steel Building

