

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.017

铝合金模板半刚性连接试验评估和参数分析

张 建¹, 彭宇一¹, 朱铁梅¹, 张昕雨¹, 王 哲^{2,3}, 宋满荣^{2,3}

(1. 无锡地铁建设有限责任公司, 江苏 无锡 214000; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 3. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘 要:为研究铝合金模板在半刚性连接下的破坏形式、连接性能以及承载能力的主要影响因素,文章进行铝合金模板半刚性连接的静力加载试验,并通过 ABAQUS 软件建立有限元模型,将有限元模拟结果与试验结果进行对比,验证有限元模型的有效性。在此基础上探究不同销钉数量对铝合金模板半刚性连接性能、承载能力的影响和面板及纵肋厚度、边肋及端肋高度、边肋及端肋壁厚、横肋数量、横肋壁厚 5 种参数对竖向荷载作用下模板挠度的影响,进而对 25 种不同几何参数组合下的模板进行基于正交试验的方差分析以比较不同参数对模板承载能力的影响程度。结果表明:整个加载过程中边肋的应力一直处于较高水平;模板断裂时的最大应力点位于破坏点位于加载点正下方的销钉孔处;增多销钉数量可以提高半刚性连接初始刚度和极限弯矩;不同几何参数对模板承载能力的影响程度从大到小依次为横肋数量、面板及纵肋厚度、边肋及端肋壁厚、横肋壁厚、边肋及端肋高度。

关键词:铝合金模板;半刚性连接;静力加载试验;参数分析;正交试验;方差分析

中图分类号:TU755.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)01-0119-09

Test evaluation and parametric analysis of semi-rigid connection of aluminum alloy formwork

ZHANG Jian¹, PENG Yuyi¹, ZHU Tiemei¹, ZHANG Xinyu¹, WANG Zhe^{2,3}, SONG Manrong^{2,3}

(1. Wuxi Metro Construction Co., Ltd., Wuxi 214000, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to study the damage form, connection performance and the main influencing factors of load carrying capacity of aluminum alloy formwork(AAF) under semi-rigid connection, this paper conducts the static loading test on the semi-rigid connection of AAF and establishes the finite element model by ABAQUS, and compares the finite element simulation data with the test data to validate the effectiveness of the finite element model. On this basis, the effects of different pin numbers on the semi-rigid connection performance and load carrying capacity of AAF and the effects of five parameters, namely, the thickness of face plate and longitudinal ribs, the height of side and end ribs, the thickness of side and end ribs, the number of transverse ribs and the thickness of transverse ribs, on the maximum displacement of the formwork under the action of vertical load were investigated. The analysis of variance(ANOVA) based on orthogonal tests was performed on the formwork with 25 different combinations of geometric parameters to compare the influence of different parameters on the load carrying capacity of the formwork. The results show that the stress of the side ribs is always at a high level during the whole loading process, and the maximum stress point(damage point) is at the pin hole directly below the loading point. Increasing the number of pins can improve the initial stiffness and ultimate bending moment of the semi-rigid connection. The influence degree of different geo-

收稿日期:2025-01-24;**修回日期:**2025-03-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52108154);安徽省交通运输重点科技资助项目(2023-KJQD-014)

作者简介:张 建(1980—),男,江苏如皋人,无锡地铁建设有限责任公司高级工程师;

宋满荣(1978—),女,安徽池州人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师,通信作者,E-mail:songmanrong@hfut.edu.cn.

metric parameters on the load carrying capacity of the formwork, in descending order, is the number of transverse ribs, the thickness of face plate and longitudinal ribs, the thickness of side and end ribs, the thickness of transverse ribs, and the height of side and end ribs.

Key words: aluminum alloy formwork(AAF); semi-rigid connection; static loading test; parametric analysis; orthogonal test; analysis of variance(ANOVA)

0 引言

铝合金模板是继竹木模板、塑料模板、钢模板等传统模板后的新一代模板系统,具有自重轻、承载力高、耐久性好、施工速度快、周转次数多、回收价值高等特点,目前已成为建筑行业大力推广的工业模板,被广泛应用于各类建筑施工中^[1-3]。

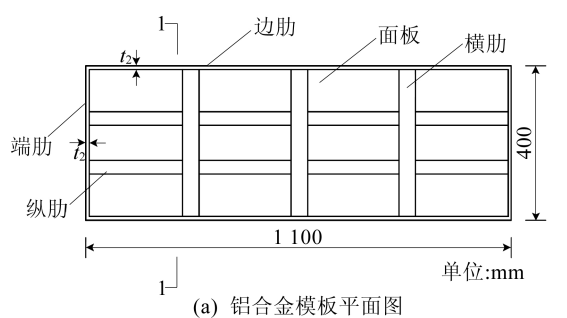
自美国提出铝合金模板系统以来,学者们开始在铝合金模板的材料性能、承载能力、计算模型等方面进行了大量的理论和试验分析^[4-6]。文献[7]分别对单块铝合金楼面模板和样板房组合铝合金楼面模板进行均布荷载试验,结果表明铝合金模板体系具有良好的持荷能力,组合铝合金模板的连接构件对铝合金模板承载力有一定的影响;文献[8]对铝合金模板进行静力加载试验,分析铝合金模板在极限荷载作用下的变形特征,并对其结构形式进行优化;文献[9-10]对铝合金模板进行静力纯弯试验,研究铝合金模板在加卸载后的残余变形、刚度变化、连接截面抗弯强度以及极限抗弯承载能力等力学性能;文献[11]开展铝合金模板均布荷载下的静力试验,提出一种新型板肋的布置形式;文献[12]通过改变墙体铝合金模板的板厚、纵肋截面形状和背楞间距,分析模板在浇筑过程中的挠度变化;文献[13]从铝合金模板的多种几何参数出发,提出一种基于粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法和有限元分析的反向传播(back propagation, BP)神经网络,以确定铝合金模板最优几何参数的方法。

实际工程中铝合金模板两侧龙骨通过销钉进行连接,属于半刚性连接。目前针对铝合金模板的研究多忽视了实际边界条件,主要以铰接为主;少数半刚性连接的研究只考虑了模板间的连接,而忽略了两侧龙骨的约束作用。本文结合工程实际情况进行单块铝合金模板两端与龙骨连接的竖向静力加载试验,研究模板半刚性条件下变形及破坏情况,通过有限元模拟分析半刚性连接性能的影响因素及不同几何参数对模板承载能力的影响,为铝合金模板的研究与设计提供理论依据。

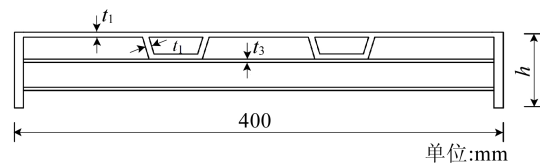
1 试验概况

1.1 试件设计

试验构件选取 400 mm×1 100 mm 的标准楼面铝合金模板,材料为 6061-T6 铝合金。铝合金模板构造图及参数如图 1 所示,龙骨构造图及参数如图 2 所示。

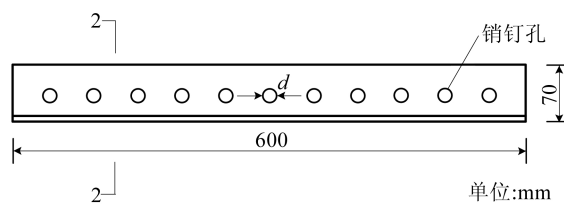


(a) 铝合金模板平面图

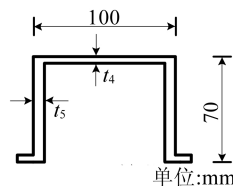


(b) 1-1剖面图

图 1 铝合金模板示意图



(a) 龙骨侧面尺寸图



(b) 2-2剖面图

图 2 龙骨示意图

面板与纵肋通过热挤压形成整体,端肋通过气保焊与边肋、面板、纵肋进行焊接,横肋通过气保焊与边肋、纵肋焊接形成整体。面板和纵肋的厚度 t_1 为 4 mm,端肋和边肋的壁厚 t_2 为 8 mm,横肋壁厚 t_3 为 3 mm,端肋和边肋的高度 h 为

65 mm,销孔直径 d 为 16.5 mm,横肋数量 n 为 3。龙骨的尺寸为 600 mm×100 mm×70 mm,上侧厚度 t_4 为 5 mm,侧边厚度 t_5 为 8 mm。铝合金模板与龙骨每侧通过 3 根销钉进行连接,销钉材料为 Q235 钢。

依据文献[14]中的相关规定对铝合金材料进行拉伸试验,结果见表 1 所列。

表 1 铝合金试件材料参数

编号	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa
1	69 277	0.33	247.96	276.25
2	68 949	0.32	244.18	276.72
3	69 125	0.32	243.27	274.28
平均值	69 117	0.32	245.16	275.78

1.2 试验装置及加载方案

试验采用 100 kN 的液压千斤顶结合手动油泵的方式将千斤顶荷载通过分配梁传递到铝合金模板三等分点处^[8],试验加载示意图和现场试验装置分别如图 3、图 4 所示。

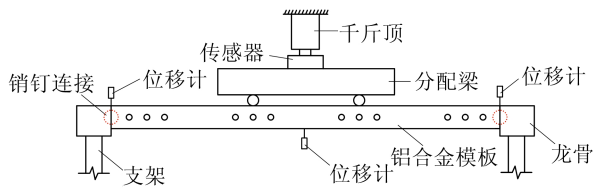


图 3 加载示意图

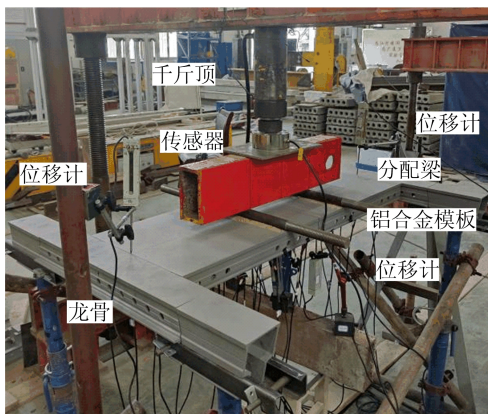


图 4 试验现场加载装置图

位移计以及应变片的布置情况如图 5 所示。图 5 中:铝合金模板的纵肋(Z1~Z4)、横肋(H1~H9)、边肋(B1~B12)、端肋(D1~D6)、面板(M1~M4)等位置布置电阻式单轴应变片监测加载过程中的应力变化,用黑色方框表示应变片位置及方向;在跨中及支座处设置位移计,分别记录铝合

金模板的跨中及端肋和龙骨连接处的位移变化,用红色实心圆示意位移计位置。

在正式加载之前,对铝合金模板缓慢施加 0.1 kN 的荷载进行预加载,持荷 10 min,使加载装置与试件充分接触,通过采集仪的位移、应变数据判断加载是否出现偏心。正式加载时,以 1 kN 为增量逐级增加荷载,每级荷载持荷 2 min,根据荷载-位移曲线判断构件接近屈服时采用位移控制加载,直至铝合金模板出现破坏。

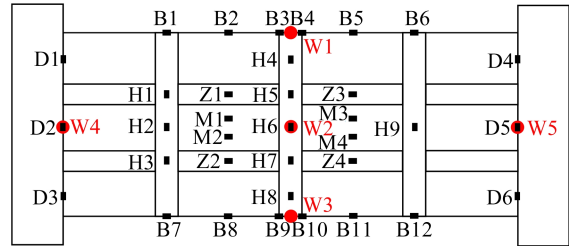


图 5 位移计及应变片布置图

1.3 试验现象

在加载前期,模板跨中位移随荷载均匀缓慢增加;加载至 12 kN,模板与龙骨之间开始出现缝隙并缓慢发展;加载至 21 kN,跨中位移、模板与龙骨之间的缝隙迅速增大,模板也产生较为明显的变形;位移加载至 36.3 mm 时,突发巨响,在铝合金模板边肋距离端肋 400 mm 处,分配梁下方的销钉孔受拉区处发生断裂失效,最大裂缝宽度约 5 mm,长度约 50 mm。卸载后模板弯曲变形较大,无法恢复。整个加载过程中未发现销钉的变形以及端肋销钉孔的断裂。试件整体变形及销钉孔断裂情况如图 6 所示。

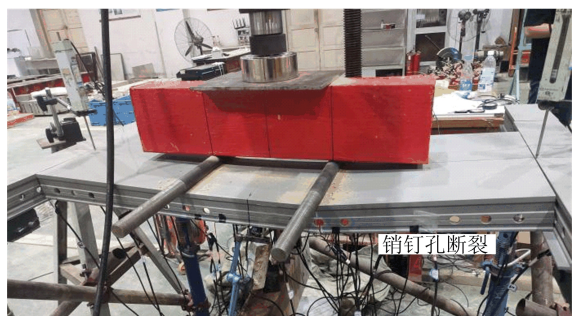


图 6 整体变形和销钉孔断裂图

1.4 荷载-位移曲线

试验中铝合金模板的荷载-位移关系曲线如图 7 所示,3 个测点的数值基本相同。曲线的走势分为 3 个阶段:模板跨中位移从 0~10.0 mm 的变化过程中,荷载与位移呈线性关系,为弹性阶

段,此时销钉与销片间的连接较紧,预紧力会阻止铝合金模板与龙骨发生滑移和相对转动;随后曲线斜率减小,这是由于销钉分配的荷载超过预紧力后开始出现滑移;跨中位移达到约 20.0 mm 时,模板的受拉区进入塑性阶段,模板位移迅速增大;当位移为 36.3 mm 时,模板达到峰值承载力 25.4 kN,此时由于销钉孔削弱产生应力集中,最终导致模板受弯破坏。

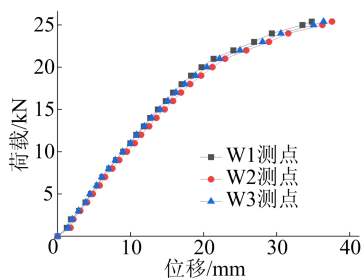
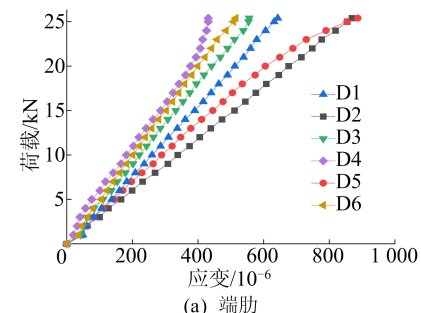


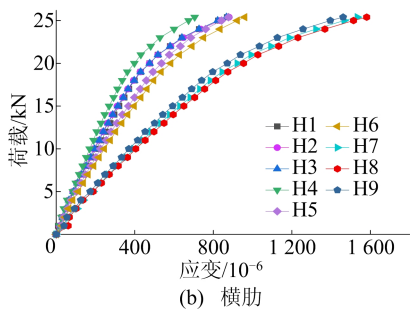
图 7 铝合金模板半刚性试验荷载-位移曲线

1.5 应变分析

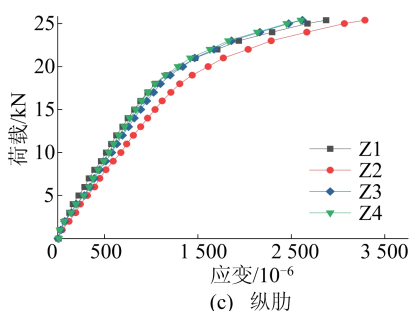
各测点的荷载-应变关系如图 8 所示。



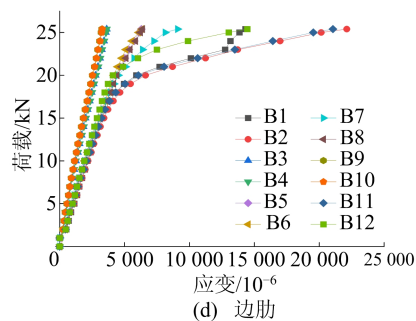
(a) 端肋



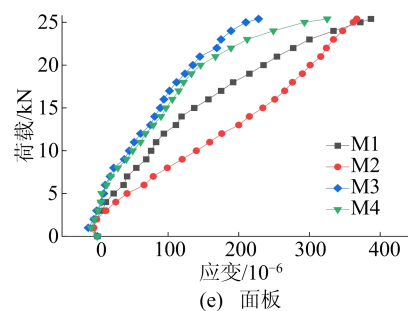
(b) 横肋



(c) 纵肋



(d) 边肋



(e) 面板

图 8 铝合金模板荷载-应变曲线

由图 8a 可知,端肋的应变与荷载呈线性变化,端肋中部(D2、D5)的刚度相对其他测点较低。由图 8b、图 8c 可知,横肋和纵肋应变前期线性增长,加载至 21 kN 时,刚度逐渐降低。由图 8d 可知,在加载初期边肋各测点的应变变化基本在同一水平,加载至约 21 kN 时, B1、B2、B11、B12 曲线出现转折,应变持续增长,但承载力上升缓慢,表明边肋受拉区的铝合金材料进入塑性流动状态,出现了应变硬化现象。最终 B2 (销钉孔处) 应变值达到 $22\ 124 \times 10^{-6}$ 而发生断裂破坏,此时 B1、B11、B12 处的应变值分别为 $14\ 317 \times 10^{-6}$ 、 $21\ 056 \times 10^{-6}$ 、 $14\ 456 \times 10^{-6}$,远大于边肋其他测点。由图 8e 可知,面板在加载过程中呈现出先受压再受拉的受力特性,同时应力水平一直处于较低水平。边肋应力水平远远高于其他部位,应力由高到低依次为边肋、纵肋、横肋、端肋、面板。

2 有限元分析

2.1 有限元模型建立

运用 ABAQUS 软件建立数值模型,与试验结果对比分析,验证模型的合理性。铝合金模板的面板、边肋、端肋、横肋以及龙骨等部件采用壳单元。面板与纵肋采用整体建模,面板、边肋、端肋与横肋之间均采用 Tie 接触,铝合金模板两侧端肋与龙骨在连接处法向采用硬接触,切向采用罚接触,摩擦系数取 0.3。由于销钉连接属于半刚性连接,在有限元模拟中采用弹簧单元进行简

化^[10],弹簧单元刚度的计算公式为:

$$k = \frac{EA}{l} \quad (1)$$

其中: E 为销钉的弹性模量; A 为销钉的截面面积; l 为销钉连接部分的长度。最终可以求得 $k=2\ 752\ 992\ \text{N/mm}$ 。

铝合金材料采用文献[9]中的本构模型,其应力-应变关系如图 9 所示,关系表达式为:

$$\sigma = \begin{cases} E\varepsilon, & 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_p; \\ f_p + \frac{f_{\max} - f_p}{\varepsilon_{\max} - \varepsilon_p}(\varepsilon - \varepsilon_p), & \varepsilon_p < \varepsilon \leq \varepsilon_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

其中: f_p 为铝合金材料的屈服应力; ε_p 为 f_p 对应的应变; ε_u 为极限应变; $\varepsilon_{\max} = 0.5\varepsilon_u$; f_{\max} 为 ε_{\max} 对应的应力。

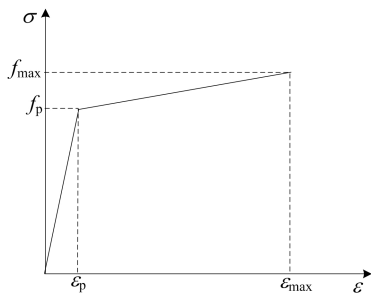


图 9 铝合金材料应力-应变曲线

龙骨边界完全固定,对模板施加竖向荷载,加载机制与前述试验相同,试件的有限元模型如图 10 所示。

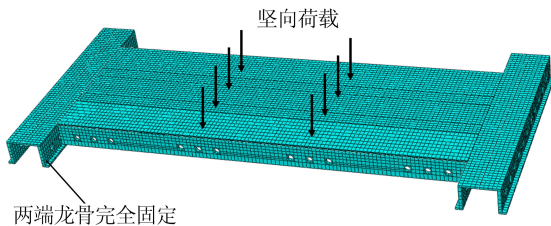


图 10 试件有限元模型

2.2 有限元分析结果

当应力达到铝合金模板的极限强度时,模板此时的应力云图和位移云图分别如图 11、图 12 所示。

由图 11 可知,加载点处、边肋跨中的下部受拉区、边肋与端肋的连接支撑处以及端肋销钉孔上部受拉区应力较为集中。最大应力位于边肋销钉孔处,与静力加载试验的破坏位置一致。由图 12 可知,模板的最大位移位于面板跨中处,并向两侧逐渐减少,端肋与龙骨连接处的位移很小。

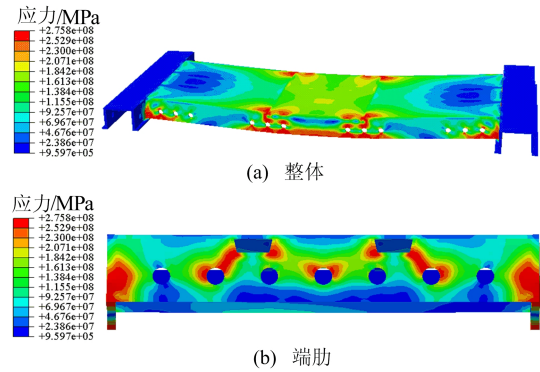


图 11 应力云图

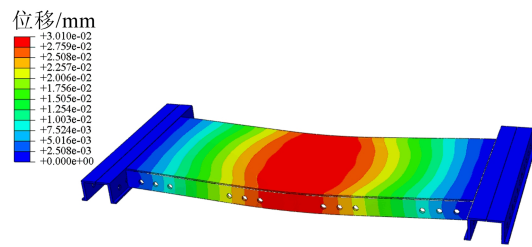


图 12 位移云图

试件跨中位移试验数据平均值和模拟数据的对比情况如图 13 所示。

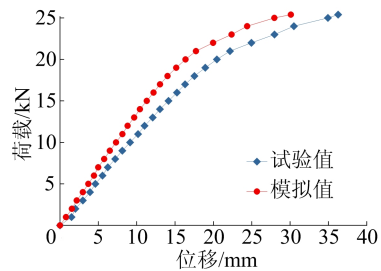


图 13 荷载-位移曲线对比

由图 13 可知,2 条曲线的走势基本一致。模拟曲线的承载力和刚度较高,破坏时跨中最大位移为 30.1 mm,比试验平均值略小。由于构件在加工时材料、设备、工艺等存在误差、在试验加载时构件之间的接触面不平整,而有限元模型中的材料是均质的,且构件间的接触是理想状态。综上所述本节建立的有限元模型是合理的。

3 销钉连接的半刚性分析

3.1 理论分析

铝合金模板与龙骨之间的连接节点发生一定转动,也承担部分弯矩,是介于固接与铰接间的半刚性连接。转动刚度是评判半刚性连接性能的重要参数。

参照文献[15]提出的计算半刚性节点刚度的

方法,本文将铝合金模板的跨中挠度 y 分为 2 个部分:一部分为铝合金模板在刚性约束下变形产生的挠度 y_1 ;另一部分为半刚性节点在加载过程中由于转动而产生的挠度 y_2 。计算简图如图 14 所示,其中 l 为支座到跨中的距离。

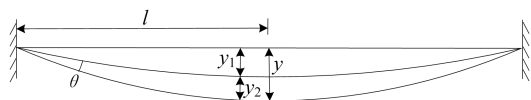


图 14 半刚性节点转动刚度计算简图

挠度表达式为:

$$y = y_1 + y_2 \quad (3)$$

半刚性节点转角 θ 与位移 y_2 的关系为:

$$\theta = y_2/l \quad (4)$$

半刚性连接处的转动刚度为:

$$R = dM/d\theta \quad (5)$$

其中: M 为连接处的弯矩; θ 为半刚性节点转角。

前述试验或有限元模拟均可得到 y ,将前述数值模型中铝合金模板边界条件改为刚性连接,可得到模板跨中位移 y_1 。由式(3)可得到 y_2 ,进而由式(4)得到半刚性节点转角 θ 。连接处的弯矩 M 可由半刚性连接有限元分析得到。

3.2 销钉数量对半刚性的影响

铝合金模板与龙骨连接节点的弯矩主要由销钉承担,本节采用有限元模型来分析销钉数量对连接节点半刚性的影响。销钉间距均为 100 mm,销钉数量分别为 1、3、5 个。不同销钉数量的 $M-\theta$ 曲线如图 15 所示。

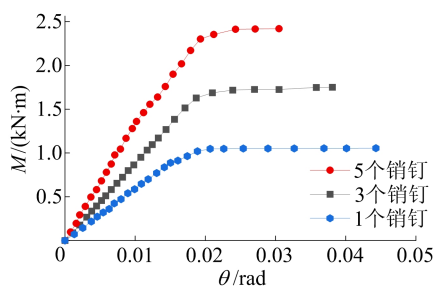


图 15 不同销钉数量的 $M-\theta$ 曲线

由图 15 可知,不同销钉数量 $M-\theta$ 曲线变化趋势基本一致。加载前期,弯矩与转角间呈现线性变化,这种线性关系反映了半刚性连接的初始刚度。根据式(4)求得 1、3、5 个销钉的初始刚度分别为 53.59、80.00、121.50 (kN·m)/rad。5 个销钉的初始刚度相对于 3 个销钉的初始刚度提高了 51.88%,3 个销钉的初始刚度相对于 1 个

销钉的初始刚度提高了 49.28%。在加载后期,支座弯矩值达到极限弯矩并趋于稳定,1、3、5 个销钉的极限弯矩分别为 1.05、1.75、2.42 kN·m。5 个销钉的极限弯矩相对于 3 个销钉的极限弯矩提高了 66.67%,3 个销钉的极限弯矩相对于 1 个销钉的极限弯矩提高了 38.29%。由此可知,增多销钉数量可有效提高半刚性连接的初始刚度和极限弯矩。

4 几何参数对模板力学性能的影响

本节探讨在竖向荷载作用下面板和纵肋的厚度、边肋和端肋的高度、边肋和端肋的壁厚、横肋数量、横肋壁厚的变化对半刚性连接下铝合金模板承载能力的影响。在实际工程中面板直接承受竖向荷载,其挠度变化也是评估铝合金模板承载能力的直接标准,因此以下将面板的挠度变化作为其评价标准。

4.1 竖向荷载设计

根据文献 [16-17],楼面模板竖向荷载的基本组合效应设计值为:

$$\gamma_0 S = \gamma_0 (1.3 \sum_{i \geq 1} S_{G_{ik}} + 1.5 \sum_{j \geq 1} S_{Q_{jk}}) \quad (6)$$

其中: γ_0 为结构重要性系数; G_{ik} 为第 i 个永久荷载标准值; Q_{jk} 为第 j 个可变荷载标准值。

以某工程 120 mm 厚的混凝土楼板为例,取 $\gamma_0 = 1.1$,铝合金模板自重 $G_1 = 0.3$ kN/m²,现浇钢筋混凝土楼板自重 $G_2 = 25.1$ kN/m³,施工人员及设备产生的荷载 $Q_1 = 2.5$ kN/m²,则铝合金模板承受的竖向荷载设计值 $\gamma_0 S = 8.77$ kN/m²。

4.2 面板及纵肋的厚度

面板直接承受竖向荷载,纵肋与面板通过热挤压形成整体,是铝合金模板的重要纵向支撑。面板及纵肋的厚度是铝合金模板设计过程中重要参数。为探讨面板及纵肋的厚度 t_1 对模板承载能力的影响,模型参数和有限元分析相关结果见表 2 所列。

表 2 面板及纵肋厚度对模板承载能力的影响

h / mm	t_1 / mm	t_2 / mm	t_3 / mm	l / mm	n	挠度/ mm	变化率/ %
65	3.5	8	3	50	3	0.545	-7.07
65	4.0	8	3	50	3	0.509	
65	4.5	8	3	50	3	0.476	6.48
65	5.0	8	3	50	3	0.445	12.57
65	5.5	8	3	50	3	0.429	15.72

从表 2 可以看出,当面板及纵肋厚度 t_1 以 0.5 mm 为变化量改变时,面板最大挠度的变化率分别为-7.07%、6.48%、12.57%、15.72%,厚度增加至 5.0 mm 后,挠度变化趋于平稳。

4.3 边肋和端肋的高度及壁厚

从试验和有限元分析可以看出,边肋上的应力一直处于较高水平,最终在边肋销钉孔处发生断裂。端肋和龙骨通过销钉连接,在加载时该连接部位会产生较大的应力。为研究边肋和端肋的高度 h 及壁厚 t_2 对铝合金模板承载能力的影响,模型参数和有限元分析结果见表 3、表 4 所列。

表 3 边肋及端肋高度对模板承载能力的影响

$h/$ mm	$t_1/$ mm	$t_2/$ mm	$t_3/$ mm	$l/$ mm	n	挠度/ mm	变化率/ %
55	4.0	8.0	3.0	50	3	0.518	-1.77
60	4.0	8.0	3.0	50	3	0.509	
65	4.0	8.0	3.0	50	3	0.497	2.36
70	4.0	8.0	3.0	50	3	0.489	3.93
75	4.0	8.0	3.0	50	3	0.481	5.50

表 4 边肋及端肋壁厚对模板承载能力的影响

$h/$ mm	$t_1/$ mm	$t_2/$ mm	$t_3/$ mm	$l/$ mm	n	挠度/ mm	变化率/ %
65	4.0	7.0	3.0	50	3	0.549	-7.86
65	4.0	7.5	3.0	50	3	0.529	-3.93
65	4.0	8.0	3.0	50	3	0.509	
65	4.0	8.5	3.0	50	3	0.488	4.13
65	4.0	9.0	3.0	50	3	0.465	8.64

从表 3 可以看出,当边肋及端肋高度以 5 mm 为变化量改变时,面板最大挠度的变化率分别为-1.77%、2.36%、3.93%、5.50%;从表 4 可以看出,当边肋及端肋壁厚 t_2 以 0.5 mm 为变化量改变时,面板最大挠度的变化率分别为-7.86%、-3.93%、4.13%、8.64%。

4.4 横肋的数量及壁厚

横肋在铝合金模板中具有重要作用,通过焊接将纵肋与边肋连接起来,以提高结构的整体性;另外横肋可作为横向支撑,将纵肋所承受的面板荷载传递到边肋上。为探讨横肋的数量 n 和壁厚 t_3 对模板承载能力的影响,模型参数和有限元分析结果见表 5、表 6 所列。

从表 5 可以看出,当横肋数量 n 发生改变时,面板最大挠度的变化率分别为-127.70%、-21.22%、24.17%、45.38%;从表 6 可以看出,当横肋壁厚 t_3 以 0.5 mm 为变化量改变时,面板

最大挠度的变化率分别为-8.45%、-4.32%、4.52%、9.04%。

表 5 横肋数量对模板承载能力的影响

$h/$ mm	$t_1/$ mm	$t_2/$ mm	$t_3/$ mm	$l/$ mm	n	挠度/ mm	变化率/ %
65	4.0	8.0	3.0	50	1	1.159	-127.70
65	4.0	8.0	3.0	50	2	0.617	-21.22
65	4.0	8.0	3.0	50	3	0.509	
65	4.0	8.0	3.0	50	4	0.386	24.17
65	4.0	8.0	3.0	50	5	0.278	45.38

表 6 横肋壁厚对模板承载能力的影响

$h/$ mm	$t_1/$ mm	$t_2/$ mm	$t_3/$ mm	$l/$ mm	n	挠度/ mm	变化率/ %
65	4.0	8.0	2.0	50	3	0.552	-8.45
65	4.0	8.0	2.5	50	3	0.531	-4.32
65	4.0	8.0	3.0	50	3	0.509	
65	4.0	8.0	3.5	50	3	0.486	4.52
65	4.0	8.0	4.0	50	3	0.463	9.04

5 正交试验及方差分析

根据前文单因素分析的结果,本节采用正交试验及方差分析来定量比较各几何参数对铝合金模板在竖向荷载作用下挠度变化的影响程度。

5.1 正交试验

为在尽可能少的试验次数内确定影响试验结果的各种因素及其相互作用。通过使用正交表来确保每个因素水平均匀出现,以保证试验结果的准确性,并最大程度地减少试验次数。

本节选择 5 个几何参数面板及纵肋厚度(A)、边肋及端肋高度(B)、边肋及端肋厚度(C)、横肋数量(D)和横肋壁厚(E)作为正交试验的试验因素。假定试验因素之间互不影响,正交试验中的因子数及水平数见表 7 所列。

表 7 因子及水平表

水平	因子				
	A	B	C	D	E
1	3.5	55	7.0	1	2.0
2	4.0	60	7.5	2	2.5
3	4.5	65	8.0	3	3.0
4	5.0	70	8.5	4	3.5
5	5.5	75	9.0	5	4.0

采用五因子五水平表将 25 个具有代表性的不同参数的铝合金模板组合在一起,并通过

ABAQUS 分析不同参数的模板在竖向荷载作用下的最大挠度变化。正交试验的组合情况及模拟结果见表 8 所列。

表 8 五因子五水平正试验及结果

序号	A	B	C	D	E	最大挠度/mm
1	1	1	1	1	1	1.169
2	1	2	3	4	5	0.353
3	1	3	5	2	4	0.527
4	1	4	2	5	3	0.381
5	1	5	4	3	2	0.501
6	2	1	5	4	3	0.332
7	2	2	2	2	2	0.644
8	2	3	4	5	1	0.423
9	2	4	1	3	5	0.494
10	2	5	3	1	4	1.056
11	3	1	4	2	5	0.591
12	3	2	1	5	4	0.327
13	3	3	3	3	3	0.475
14	3	4	5	1	2	1.091
15	3	5	2	4	1	0.411
16	4	1	3	5	2	0.302
17	4	2	5	3	1	0.450
18	4	3	2	1	5	1.101
19	4	4	4	4	4	0.365
20	4	5	1	2	3	0.463
21	5	1	2	3	4	0.415
22	5	2	4	1	3	0.992
23	5	3	1	4	2	0.354
24	5	4	3	2	1	0.529
25	5	5	5	5	5	0.094

5.2 方差分析

对表 8 的结果进行方差分析,分析结果见表 9 所列。表 9 中: F 值为组间均方和组内均方的比值,反映各组之间的差异程度; P 值为基于 F 值计算得出的显著性指标。

表 9 面板最大挠度值的方差分析结果

因子	平方和	自由度	均方	F	P
A	0.046	4	0.012	28.387	0.003
B	0.015	4	0.004	9.428	0.026
C	0.025	4	0.006	15.147	0.011
D	1.897	4	0.474	1168.413	<0.001
E	0.020	4	0.005	12.613	0.015

由表 9 可知,因素 D(横肋数量)对模板挠度变化的影响极为显著,因素 A(面板及纵肋厚度)对模板挠度变化的影响较为显著,其次是因素 C(边肋及端肋壁厚)和因素 E(横肋壁厚),且二者的影响较为接近,影响最小的因素是 B(边肋及端肋高度)。

6 结 论

1) 在铝合金模板半刚性连接的静力试验加载前期,模板跨中位移与荷载之间呈现出良好的线性关系;在加载后期由于销钉出现滑移,模板位移增大速度加快。在整个加载过程中,边肋应变一直处于较高水平,最终边肋销钉孔处发生断裂而导致试验终止。试验终止时未发现销钉变形和端肋销钉孔破坏。

2) 有限元分析表明模板的应力主要集中在加载点处、边肋跨中的下部受拉区、边肋与端肋连接支撑处以及端肋销钉孔上部受拉区,最大应力位于加载点下方的销钉孔处。

3) 对于铝合金模板的半刚性连接,不同销钉数量的 $M-\theta$ 曲线走势基本一致, M 会随着 θ 增大呈现出先增大后趋于稳定的趋势,增多销钉数量可以有效提高半刚性连接的初始刚度和极限弯矩。

4) 由正交试验得出,不同几何参数对模板承载能力的影响程度从大到小依次为横肋数量、面板及纵肋厚度、边肋及端肋壁厚、横肋壁厚、边肋及端肋高度。

[参 考 文 献]

- [1] GADDAM M S, ARAVINDAN A. A comparative study on newly emerging type of formwork systems with conventional type of form work systems[J]. Materials Today Proceedings, 2020, 33: 736-740.
- [2] LI S Q, WANG J, YU Z W. Study on the bearing capacity of steel formwork concrete columns [J]. Buildings, 2023, 13(3): 820.
- [3] CORDEIRO-LOUREIRO M, CASSIMIRO-ALVES E, FERNANDA-GROBERIO-CALENZANI A. Geometry optimization of steel formwork for steel-concrete composite slabs[J]. Structures, 2023, 58: 105395.
- [4] SOETENS F. Aluminum structures in building and civil engineering applications[J]. Structural Engineering International, 2010, 20(4): 430-435.
- [5] DE-MATTEIS G, BRANDO G, MAZZOLANI F M. Pure aluminum: an innovative material for structural applications in seismic engineering[J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 677-686.
- [6] LIU S J, XIE J Q, SHEN C Q, et al. Bearing fault diagnosis based on improved convolutional deep belief network[J]. Applied Sciences, 2020, 10(18): 6359.
- [7] 幸晓娇, 段晓农, 姜博, 等. 铝合金楼面模板性能试验[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 54-59, 118-119.

(下转第 132 页)

150 kPa 时沉降值突增,说明 200~150 kPa 之间存在极限值,当小于极限值时,地表沉降速率会增大。

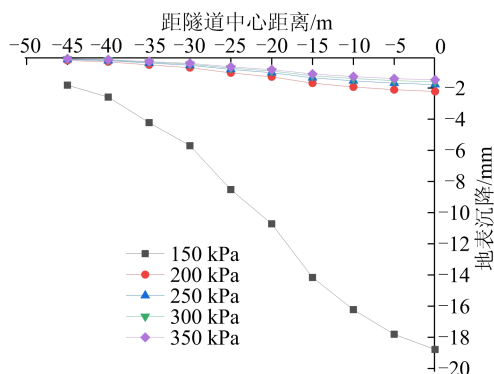


图 10 不同开挖面附加压力下地表沉降

4 结 论

1) 盾构机穿越全断面砂层时,地表沉降隧道埋深呈负相关;开挖面附加压力存在一个最适区间,附加压力小于和大于最适区间时地表沉降都会增大,且附加压力大于最适区间时,盾构前方地表会出现隆起,附加压力越大,隆起范围越广,隆起值也越大。

2) 盾构机穿越砂-岩复合地层时,在一定的开挖面附加压力下,由于砂层相对于岩层弹性模量小,地表沉降与开挖面砂层厚度占比呈正相关;地表沉降与开挖面附加压力呈负相关,且开挖面附加压力存在极限值,当低于极限值时,地表沉降

增长速率会增大,开挖面附加压力应介于 150~200 kPa 之间。

[参 考 文 献]

- [1] 秦佳佳. 合肥地区复合地层盾构掘进参数控制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 435-443
- [2] 刘栋. 复合地层中土压盾构隧道开挖面稳定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [3] 王俊, 何川, 胡瑞青, 等. 土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 953-963.
- [4] 胡茂兴. 大直径盾构施工引起地表沉降研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [5] 朱牧原, 魏力峰, 方勇, 等. 超大直径盾构隧道下穿黄河大堤沉降分析与控制研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 211-219.
- [6] 吴昌胜. 大直径盾构隧道施工引起的地层变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [7] 霍晓科. 考虑土拱效应的盾构隧道开挖面稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [8] 肖衡. 大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [9] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [10] 邵迅, 姚华彦, 张振华, 等. 合肥地铁盾构隧道下穿河道施工数值模拟分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 95-100.
- [11] 徐良, 王建国. 隧道开挖对地表沉降影响的数值分析与沉降预测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(10): 1370-1375.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 126 页)

- [8] 寇展华. 铝合金模板静力试验、数值模拟及优化设计研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [9] 潘钦锋, 崔洪亨, 蔡雪峰, 等. 铝合金模板抗弯性能试验研究及参数分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 142-147.
- [10] 庄金平, 邱豪, 崔洪亨, 等. 铝合金模板销钉半刚性连接性能研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(12): 152-156.
- [11] 段迪. 新型铝合金模板的受力机理与板肋形式优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [12] 魏佳, 杨佩荣, 王晨, 等. 基于有限元方法的铝合金模板受力分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1192-1196.
- [13] CHEN Y J, QIAN Z X, KANG C F. Optimization of aluminum alloy formwork geometry parameters based on a PSO-BP neural network[J]. Buildings, 2023, 13(5): 1283.

- [14] 国家市场监督管理总局. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228. 1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 14-17.
- [15] 李成玉, 郭耀杰, 李美东. 钢框架节点刚度测试方法研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 98-100.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 29.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构通用规范: GB 55001—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 10-11.

(责任编辑 吴 亮)