

文章编号:1673-9469(2026)03-0011-07

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2026.03.002

考虑支座缺陷的连续焊接不锈钢屋面抗风揭性能研究

嵇丽明¹,高明¹,孙家强¹,石峰桦¹,毛兆荣²,王斐亮^{3,4*}

(1. 国网浙江省电力有限公司衢州供电公司,浙江 衢州 324022;2. 衢州光明电力设计有限公司,浙江 衢州 324022;3. 上海交通大学 海洋工程全国重点实验室,上海 200240;
4. 上海交通大学 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室,上海 200240)

摘要: 为研究连续焊接不锈钢(CWSS)屋面系统的抗风揭性能和破坏行为,采用静态风揭试验和数值模拟相结合的方法,比较了有无滑动支座缺陷的CWSS屋面系统在失效模式和极限承载力方面的区别。利用有限元方法模拟CWSS屋面系统的抗风揭响应,并基于验证后的模型进一步进行参数分析。研究表明,初始支座缺陷会显著降低CWSS屋面系统的抗风揭性能,移除1、2、3个支座后极限风压分别降低10.7%、23.3%、35.7%。降低屋面板宽厚比对屋面整体极限承载力影响不大,但能增加抗弯刚度;增加支座厚度可显著提高屋面系统的抗风揭性能。

关键词: 连续焊接不锈钢;风揭试验;滑动支座;数值模拟;参数分析

中图分类号:TU391

文献标识码:A

Evaluation on Wind Uplift Resistance of Continuous Welded Stainless Steel Roof Considering Sliding Support Imperfections

Ji Liming¹, GAO Ming¹, SUN Jiaqiang¹, SHI Fenghua¹, MAO Zhaorong², WANG Feiliang^{3,4*}

(1. State Grid Quzhou Power Supply Company, Quzhou, Zhejiang 324022, China; 2. Quzhou Guangming Electric Power Design Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang 324022, China; 3. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to investigate the wind uplift resistance and failure behavior of the Continuous Welded Stainless Steel (CWSS) roof system, a combination method of static wind uplift test and numerical simulation was adopted to compare the differences in failure modes and ultimate bearing capacities of the CWSS roof system with and without sliding support imperfections. The wind uplift resistance response of the CWSS roof system was simulated using the finite element method, and further parametric studies were carried out based on the verified model. The research results show that the initial support imperfections can significantly reduce the wind uplift resistance of the CWSS roof system. When 1, 2, and 3 supports are removed, the ultimate wind pressure is reduced by 10.7%, 23.3%, and 35.7%, respectively. Reducing the width-to-thickness ratio of the roof panel has little impact on the overall ultimate bearing capacity of the roof but can enhance the flexural rigidity. Increasing the thickness of the support can notably improve the wind uplift resistance of the roof system.

Key words: continuous welded stainless steel; wind uplift test; sliding support; numerical simulation; parametric study

传统的直立锁边金属屋面板之间通过卷边机械咬合连接,屋面板和下部檩条之间通过支座咬

合连接,卷边咬合连接在风揭作用下容易发生变形^[1]。屋面整体抗风揭能力取决于屋面板-支座连

收稿日期:2024-10-08 修回日期:2024-12-31

基金项目:浙江公司2023年依托工程基建新技术研究项目(SGZJQZ00JJJS2310864);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2025BEG02023)

第一作者:嵇丽明(1982—),男,浙江衢州人,硕士研究生,高级工程师,从事电网建设、高压试验等方面的研究。

*通信作者:王斐亮(1985—),男,湖北咸宁人,博士,助理研究员,从事冷弯薄壁型钢、结构健康监测方面的研究。

接承载力以及支座自身抗拉强度^[2]。直立锁边金属屋面系统在风吸力作用下通常会因檩条屈曲^[3-4], 檩条与屋面板连接失效^[5-9]或屋面板变形、破裂、撕裂^[10-12]而失效。Tang等^[4]对轻钢屋面系统中檩条的屈曲行为进行了研究, 重点关注屋面板和侧向支撑对檩条承载力的影响, 并确定了防止檩条屈曲的支撑杆的刚度临界值。在金属屋面系统的承载力设计中, 可以考虑屋面板对檩条提供的转动约束, 以防檩条发生侧向和扭转变形^[13-15]。Luan等^[3]对直立锁边屋面系统的单跨Z型檩条进行的风揭荷载试验表明, Z型檩条的失效行为与系杆数量有关。Min等^[9]提出了一种用于金属屋面系统的新型滑动支座, 与传统滑动支座相比, 其具有更大的滑动位移和极限抗拉强度。Seek等^[5]研究了直立锁边屋面系统中支座有效高度的影响, 分析了有效高度对屋面承载力的影响趋势, 并为各种板型配置提供了近似有效高度的建议。Garifullin等^[11]研究了具有正弦轮廓的波纹钢板的承载力, 发现内部支撑可大大降低钢板跨中的弯曲变形。Xia等^[10]通过足尺试验研究了直立锁边金属屋面的失效模式和荷载路径, 发现在低风压(小于500 Pa)下风压与滑动支座反力之间存在线性关系。

与传统金属屋面相比, 连续焊接不锈钢(Continuous Welded Stainless Steel, CWSS)屋面在静态和动态风揭荷载下具有出色的抗风揭性能^[16]和密封能力^[17]。不锈钢板之间的焊接方式包括气保焊、电阻焊和电弧焊^[18]。在CWSS屋面系统中, L型滑动支座是一种常用的连接支座类型, 既为屋面板与下部支撑结构之间提供安全连接, 又能通过滑移消除因温度效应而产生的相对变形^[19]。支座连接承载力对CWSS屋面系统的抗风揭性能起着至关重要的作用^[20], 其设计需要考虑基板厚度、螺钉直径、支座间距和垫圈厚度等因素, 以确保提供必要的抗风揭能力^[21]。

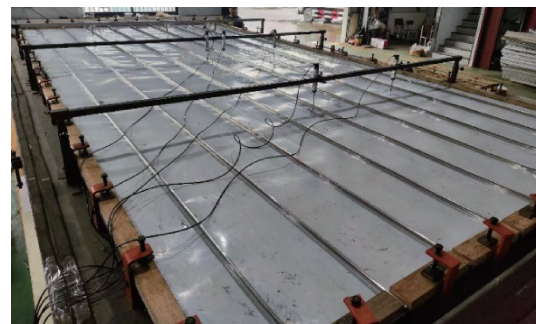
本文通过试验和数值分析方法研究了带有滑动支座的CWSS屋面系统的承载力和失效模式, 分析了滑动支座缺陷对屋面抗风揭性能的影响。利用数值参数分析, 揭示了关键结构设计参数对屋面极限承载力的影响规律。

1 CWSS 屋面系统风揭试验

1.1 试验布置

研究根据《钢结构工程施工质量验收标准》(GB 50205—2020)^[22]开展了CWSS屋面系统静态

风揭试验。在试验中, 图1(a)中的屋面板和檩条被放置在图1(b)中的真空箱内。当空气通过气泵从箱内抽出时, 箱体内部形成负压, 对屋面板的上表面施加了向上的均布荷载以模拟风吸力。屋面整体尺寸为宽4 m、长7.7 m、面积30.8 m²。压力泵能够提供高达100 kPa的负压, 流速为100 Pa/s。试验以每步700 Pa的等级逐步对屋面施加荷载。当荷载增加到分级压力值时, 保持60 s, 然后卸载至0 Pa, 间隔60 s后开始施加下一级荷载。通过观察窗或箱内的摄像头来观察试件的状态。如果试件在加载过程中出现破坏, 则终止试验, 并记录极限荷载值。为监测试件响应, 试验中使用8个线性可变差动变压器(Linear Variable Differential Transformer, LVDT)来监测屋面跨中和1/4跨位置的变形, 使用5个应变片来监测屋面应变的发展, 如图2所示。需要注意的是, 在预估的最后一级荷载施加之前拆除LVDT, 以防大变形造成测量设备损坏。为了进一步研究滑动支座缺陷的影响, 试验设计了1个标准试件和1个具有初始缺陷的控制试件。对于控制试件, 人为移除了2个跨中位置的滑动支座(图2中的C1、C2), 以观察屋面失效模式和冗余承载力的变化。



(a) CWSS屋面

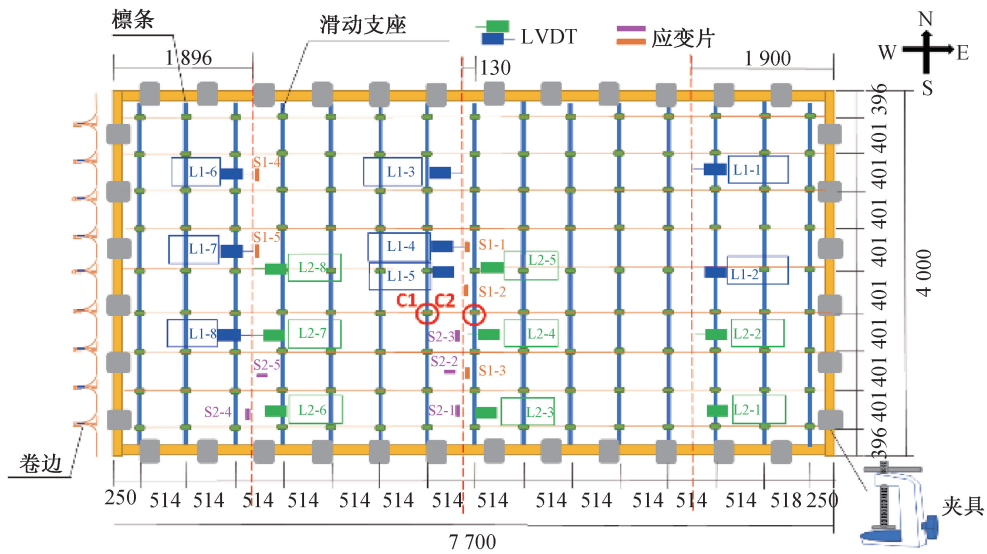


(b) 真空箱

图1 试验整体布置

Fig. 1 Overall setup of the test

在试验中, 檩条由屈服强度为235 MPa的冷弯薄壁型钢C140×70×20×2制成。檩条长度为



注:L1-x/L2-x,S1-x/S2-x 分别为试件 1 和试件 2 的 LVDT、应变片位置。

图 2 测点布置(单位: mm)

Fig. 2 Instrumentation for measuring (unit: mm)

3 630 mm,间距为 2 040 mm。屋面板由 304 不锈钢制成,标称厚度为 0.5 mm。滑动支座同样采用标称厚度为 0.5 mm 的 304 不锈钢板加工而成。CWSS 屋面板通过铝合金滑动支座与檩条连接(图 3),每个滑动支座通过 2 个直径为 4.8 mm、长度为 19 mm 的自攻螺钉与檩条连接。屋面板通过夹具固定在下部支架上,夹具之间的距离约为 600 mm。

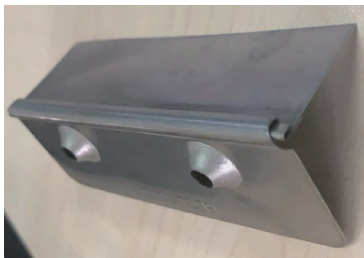


图 3 滑动支座

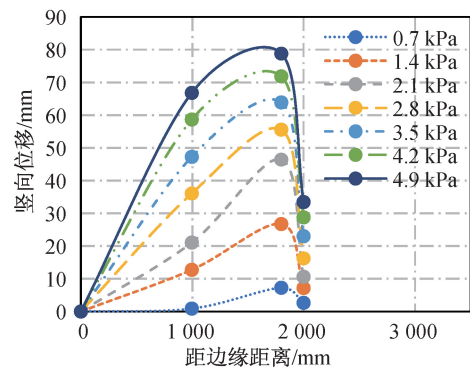
Fig. 3 Detailing of the sliding support

1.2 试验结果

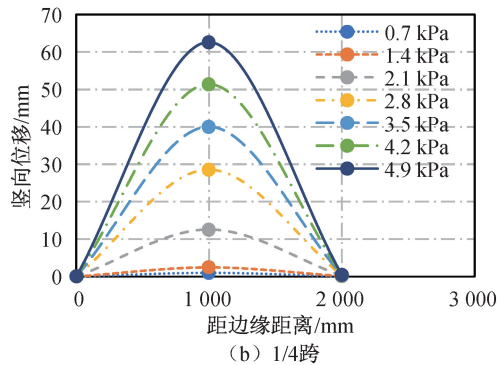
1.2.1 试件 1(标准试件)

试件 1 在试验过程中的变形见图 4。在跨中位置,面板的位移始终高于卷边处的位移,面板的最大鼓胀约为 78.9 mm,卷边的最大位移为 33.4 mm,见图 4(a)。这表明不锈钢面板的面外刚度较低,在风压较低时已出现超过卷边高度 35 mm 的变形。在 1/4 跨位置,可以看到面板的最大鼓胀出现在距边缘 1 m 处,最大变形为 62.6 mm,见图 4(b)。试件 1 的极限压力值为-5.632 kPa,失效发生在 1/4 跨位置,破坏时屋面板下部滑动支

座咬合处脱开。在整个试验过程中,未观察到屋面板直立锁边之间的焊缝发生损坏(图 5),表明 CWSS 屋面系统整体性能良好,其抗风揭性能的控制因素为支座抗拉强度。



(a) 跨中



(b) 1/4跨

图 4 试件 1 加载过程中的变形

Fig. 4 Deflection at each loading step of the specimen 1

1.2.2 试件 2(控制试件)

对于试件 2,当压力值达到-4.299 kPa 时,滑动支座移除处的屋面板出现明显鼓胀,结构承载



图5 试件1破坏模式

Fig. 5 Failure mode of the specimen 1

失效。此时屋面板鼓胀处的卷边存在横向变形(图6),鼓胀区域周围的滑动支座未出现失效,卷边处的焊缝也未发现损坏。屋面系统在跨中和1/4跨处的变形如图7所示。在跨中位置,由于滑动支座缺失,卷边处存在相当大的变形(52.67 mm),仅比面板最大变形(55.97 mm)低5.9%。在1/4跨位置,滑动支座处卷边的最大变形值为30.66 mm,远大于试件1的相应值。

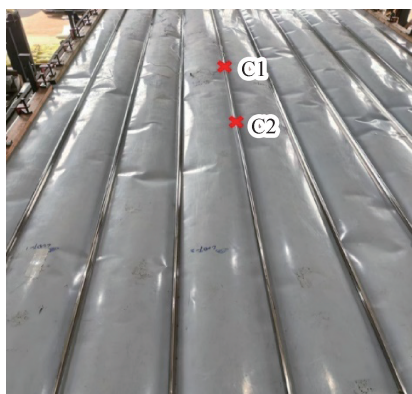
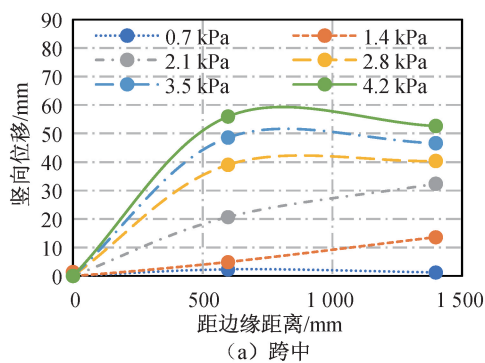


图6 试件2破坏模式

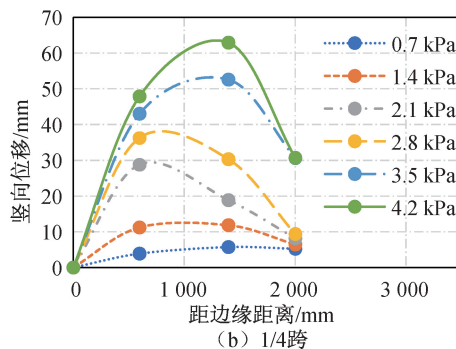
Fig. 6 Failure mode of the specimen 2

1.2.3 结果比较

通过比较发现,试件2能承受的极限风压比试件1降低了23.7%(表1)。试件2在各加载水平下的面板变形也明显大于试件1,平均增加13.9%(图8)。同时,支座的移除也导致屋面板卷边处变形增大。在移除滑动支座的区域,控制试件的应变水平明显大于标准试件(图9)。控制试件在相对较低的风压作用下就已达达到塑性阶段(应变水平超过304不锈钢的屈服强度)。



(a) 跨中



(b) 1/4跨

图7 试件2加载过程中的变形

Fig. 7 Deflection at each loading step of the specimen 2

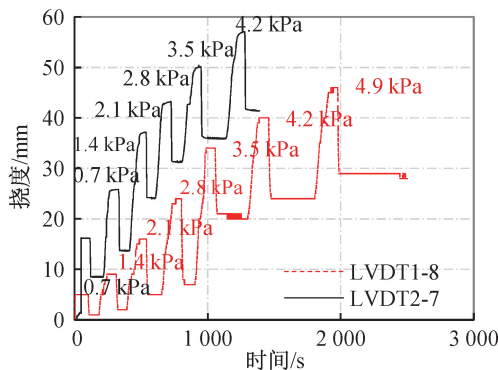


图8 挠度-时间关系曲线

Fig. 8 Deflection vs. time response

2 数值分析

2.1 建模过程

采用通用有限元软件 ABAQUS 对屋面系统进行仿真模拟。模型中利用壳单元 S4R 模拟檩条、滑动支座和屋面板,利用实体单元 C3D8I 模拟焊缝。通过网格敏感性分析,确定网格尺寸为 30 mm。

表1 试件结果列表

Tab. 1 List of specimen results

序号	试件类型	初始缺陷	极限风压/kPa	破坏模式
1	标准试件	无	5.6	支座咬合脱开
2	控制试件	移除2个跨中位置支座	4.3	移除支座区域板件破坏

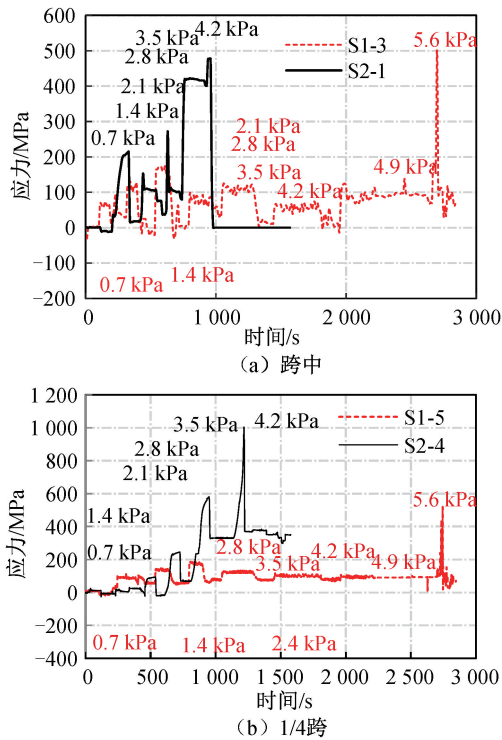


图 9 应力-时间关系曲线
Fig. 9 Stress vs. time response

在模型中,沿屋面周边施加铰接约束以模拟试验中夹具的约束作用,檩条两端按简支处理(图 10)。滑动支座与檩条之间的自攻螺钉使用壳单元建模。模型中板件间的连接均通过 Tie 接触模拟。所有屋面板之间以及屋面板-檩条表面之间均采用面-面接触,法向接触属性使用罚函数以防表面穿透,切向摩擦系数为 0.01。模型采用应力三轴度失效准则^[23],风荷载以均布荷载的形式施加在屋面板上。

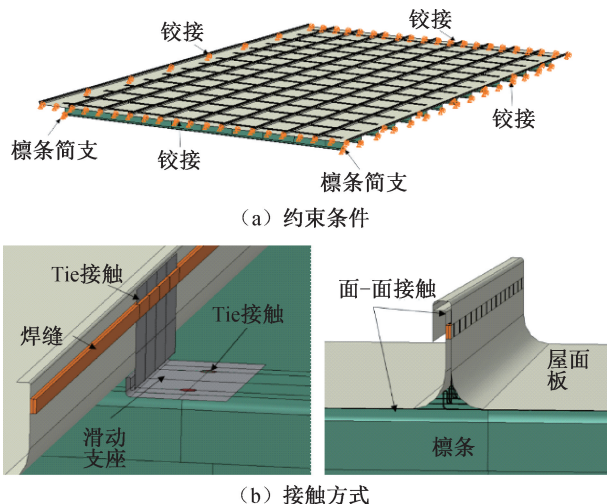


图 10 约束条件和接触方式
Fig. 10 Boundary conditions and interaction method

2.2 结果比较

2.2.1 荷载-位移行为

通过比较荷载-位移曲线(图 11)发现,有限元方法模拟结果与试验结果之间的平均误差为 1.6%,这表明有限元模拟可靠,所提出的简化建模方法和失效准则是可行的。

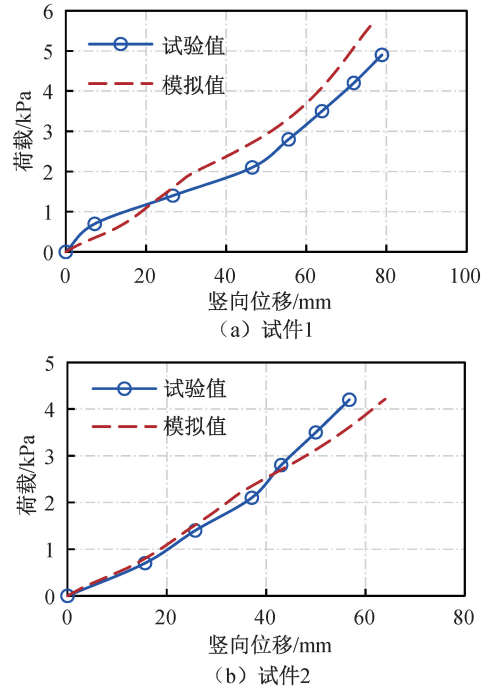


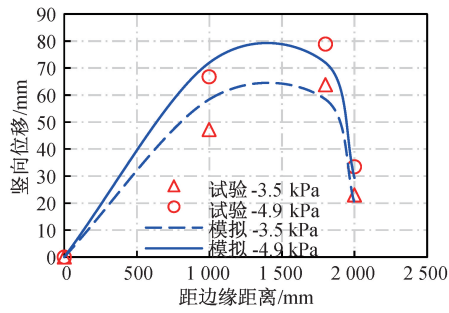
图 11 荷载-位移曲线比较
Fig. 11 Comparison of load-displacement curves

2.2.2 屋面板位移和应变

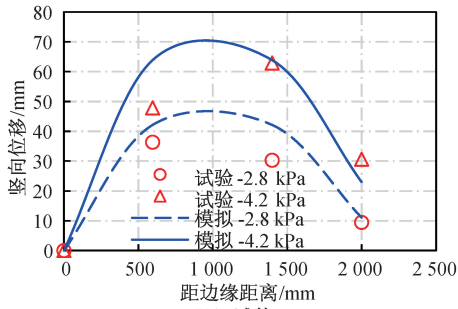
试验和有限元模拟得到的下屋面板的竖向位移分布如图 12 所示,两者的拟合程度良好。屋面板跨中处的竖向位移明显大于卷边处,这是因为卷边处的竖向支座对卷边具有约束作用,竖向支座通过螺钉直接与檩条连接,限制了此处的竖向位移。

2.2.3 破坏模式

在试件 1 的加载初始阶段,屋面板在风揭荷载作用下受到向上的吸力,板件主要承受弯矩。随着荷载的进一步增加,风吸力使屋面板不断向上拱起。屋面板的咬合卷边受到向上的风吸力以及两侧的横向拉力,支座受到向上的拉力。当荷载达到极限荷载时,滑动支座咬合处破坏,屋面系统失效。屋面整体的抗风揭能力可分为 3 个阶段:(1)弹性阶段,施加的荷载由屋面板承担;(2)塑性阶段,抗风揭能力由卷边区域的抗弯能力提供;(3)破坏阶段,极限荷载由滑动支座的抗拉强度控制。对于试件 2,当风揭荷载达到一定程度时,在支座移除处卷边出现较大的侧向变形,直至失去



(a) 试件1

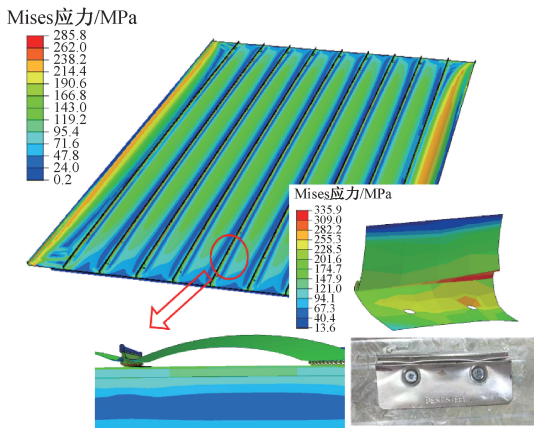


(b) 试件2

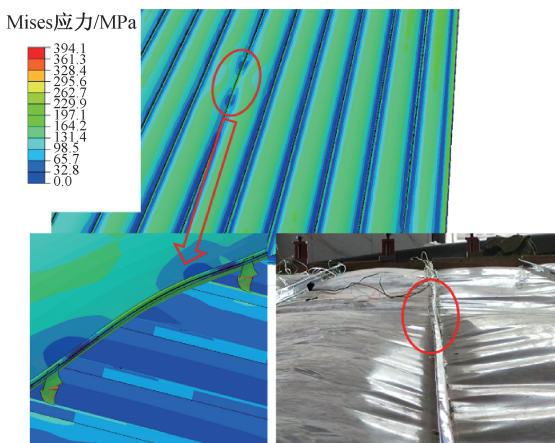
图 12 屋面位移比较

Fig. 12 Comparison of roof displacement

承载能力。试件2未出现支座破坏阶段。两试件的屋面破坏模式对比见图13。



(a) 试件1



(b) 试件2

图 13 屋面破坏模式比较

Fig. 13 Comparison of roof failure modes

3 参数分析

3.1 支座缺陷

通过比较不同支座的初始缺陷情况可见,减少支座数量对屋面系统抗风揭性能影响较大,主要是因为周边支座的受荷面积增加。移除1、2、3个支座后极限风压分别降低10.7%、23.3%、35.7%,呈线性下降趋势(图14)。

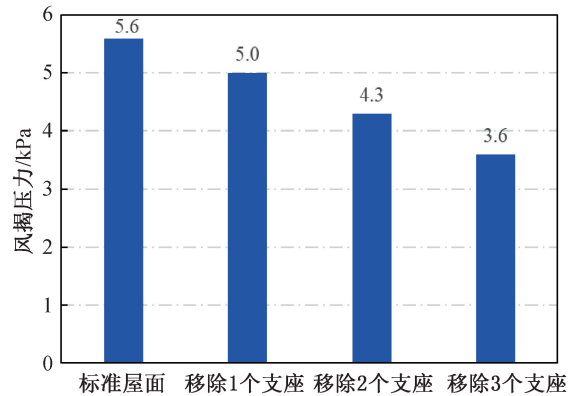


图 14 不同支座缺陷对风揭压力的影响

Fig. 14 Effect of support imperfections on wind pressure

3.2 屋面板和支座厚度

由于屋面板宽厚比较大($b/t=800$),CWSS屋面试件容易在风压较小(小于3.5 kPa)的情况下发生超过卷边高度的变形。通过改变宽厚比发现,当宽厚比降低37.5%和66.7%时,极限风压分别提高0.6%和0.1%,极限变形分别降低9.5%和50.4%。由于CWSS屋面试件破坏模式为支座咬合脱开,改变屋面板厚度对屋面整体极限承载力的影响有限,但能增加屋面板抗弯刚度,减小板面变形(图15)。当支座厚度增加到0.8 mm时,屋面最大位移改变不显著(1.6%),极限风压提升49.2%,可见支座厚度对屋面系统的抗风揭性能影响较显著(图16)。

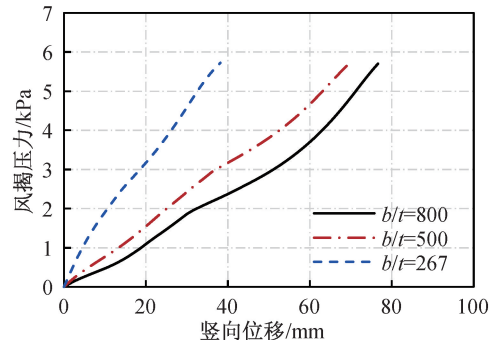


图 15 不同屋面板宽厚比结果

Fig. 15 Comparison of width-to-thickness ratio results

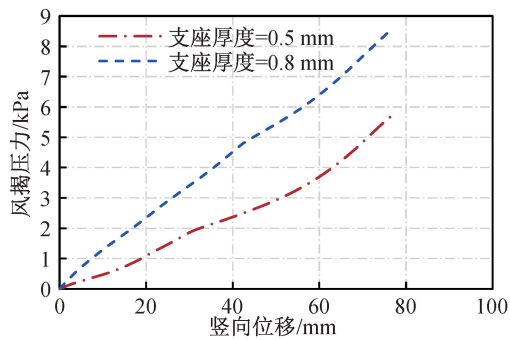


图 16 不同支座厚度结果

Fig. 16 Comparison of support thickness results

4 结论

1) 滑动支座是决定 CWSS 屋面系统抗风揭性能的关键节点。CWSS 屋面整体性能良好,不会出现类似卷边咬合屋面的渐进式破坏。

2) 通过两组屋面风揭试验对比可以看出,移除 2 个支座后,屋面的抗风揭性能显著降低。在风吸力荷载作用下,支座移除处屋面板及卷边会出现局部变形,相邻支座会出现咬合失效。

3) 为提高 CWSS 屋面系统的抗风揭性能,可以增加滑动支座的板件厚度。同时,屋面板要保证一定厚度,避免在较小压力下出现不可恢复的变形。焊缝处受力较小,主要是满足屋面的防水密封要求。

参考文献:

- [1] SUN Y, WU T, CAO Z G. Wind vulnerability analysis of standing seam roof system with consideration of multistage performance levels [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 165: 107942.
- [2] WU T, SUN Y, CAO Z G, et al. Study on the wind uplift failure mechanism of standing seam roof system for performance-based design [J]. *Engineering Structures*, 2020, 225: 111264.
- [3] LUAN W, LI Y Q. Experimental investigation on wind uplift capacity of single span Z-purlins supporting standing seam roof systems [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 144: 106324.
- [4] TANG Y J, TONG G S, ZHANG L. Buckling of parallel purlins in standing seam or screw-fastened roofs [J]. *Thin-Walled Structures*, 2018, 132: 136-150.
- [5] SEEK M W, AVCI O, MCLAUGHLIN D. Effective standoff in standing seam roof systems [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2021, 180: 106590.

- [6] SIVAPATHASUNDARAM M, MAHENDRAN M. Numerical studies and design of thin steel roof battens subject to pull-through failures [J]. *Engineering Structures*, 2017, 146: 54-74.
- [7] SIVAPATHASUNDARAM M, MAHENDRAN M. Experimental studies of thin-walled steel roof battens subject to pull-through failures [J]. *Engineering Structures*, 2016, 113: 388-406.
- [8] MYURAN K, MAHENDRAN M, SIVAPATHASUNDARAM M. Pull-through capacities of cold-formed steel roof battens considering loading rate sensitivity [J]. *Engineering Structures*, 2018, 177: 459-472.
- [9] MIN Q L, LI N, ZHANG Y J, et al. A novel wind resistance sliding support with large sliding displacement and high tensile strength for metal roof system [J]. *Engineering Structures*, 2021, 243: 112670.
- [10] XIA Y C, KOPP G A, CHEN S F. Failure mechanisms and load paths in a standing seam metal roof under extreme wind loads [J]. *Engineering Structures*, 2023, 296: 116954.
- [11] GARIFULLIN M, MELA K, RENAUX T, et al. Load-bearing capacity of cold-formed sinusoidal steel sheets [J]. *Thin-Walled Structures*, 2021, 161: 107475.
- [12] PIEKARCZUK A, WIĘCZ P, CYBULSKI R. Experimental method to evaluate the load-carrying capacity of double corrugated sheet profiles [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 144: 106283.
- [13] WANG F L, ZHANG H W, YANG J, et al. Numerical studies of the rotational stiffness of purlin-sheeting system [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2018, 18(3): 719-733.
- [14] YANG J, LIU Q. An experimental study into flexural behaviour of sigma purlins attached with roof sheets [J]. *Engineering Structures*, 2012, 45: 481-495.
- [15] ZHAO C X, YANG J, WANG F L, et al. Rotational stiffness of cold-formed steel roof purlin-sheeting connections [J]. *Engineering Structures*, 2014, 59: 284-297.
- [16] 汪大山, 刘轩. 静态与动态风荷载下连续焊接不锈钢屋面系统风致响应分析 [J]. *广东土木与建筑*, 2021, 28(7): 31-36.
- [17] WANG D S, LIU X. Wind-induced response analyses of long-span continuous welded stainless steel roof system under static and dynamic wind loads [J]. *Guangdong Architecture Civil Engineering*, 2021, 28(7): 31-36.
- [17] OU T, WANG D Y, XIN Z Y, et al. Full-scale tests on the mechanical behaviour of a continuously welded stainless steel roof under wind excitation [J]. *Thin-Walled Structures*, 2020, 150: 106680.

- [24] 李雨润,闫志晓,张健,等. 饱和砂土中直群桩动力响应离心机振动台试验与简化数值模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2020,39(6):1252-1264.
LI Y R, YAN Z X, ZHANG J, et al. Centrifugal shaking table test and numerical simulation of dynamic responses of straight pile group in saturated sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39 (6): 1252-1264.
- [25] CHATTERJEE K, CHOUDHURY D, KUMAR M. Influence of depth of liquefiable soil layer on dynamic response of pile group subjected to vertical load [J]. Bulletin of Earthquake Engineering, 2022, 20(1): 113-142.
- [26] 陈国兴,王志华,左熹,等. 振动台试验叠层剪切型土箱的研制[J]. 岩土工程学报,2010,32(1):89-97.
CHEN G X, WANG Z H, ZUO X, et al. Development of laminar shear soil container for shaking table tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32 (1): 89-97.
- [27] 胡海波. 公路桥梁群桩基础竖向承载特性研究[D]. 西安:长安大学,2020.
HU H B. Study on vertical bearing characteristics of pile group foundation of highway bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2020.
- [28] 徐光明,章为民. 离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J]. 岩土工程学报,1996,18(3):80-86.
XU G M, ZHANG W M. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18 (3): 80-86.
- (责任编辑 唐彦彦)
-
- (上接第 17 页)
- [18] FORTAN M, DEJANS A, KARABULUT B, et al. On the strength of stainless steel fillet welds [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 170: 106081.
- [19] 任建,苗吉军,李健,等. 连续焊接不锈钢金属屋面系统温度循环作用下工作性能试验研究与理论分析[J]. 建筑结构,2021,51(18):62-68+61.
REN J, MIAO J J, LI J, et al. Experimental research and theoretical analysis on working performance for continuous welded stainless steel metal roofing system subject to temperature cycling [J]. Building Structure, 2021, 51 (18): 62-68+61.
- [20] 李浩,区彤,辛志勇,等. 连续焊接不锈钢屋面系统抗风揭性能研究[J]. 钢结构(中英文),2019,34(8):21-26+36.
LI H, OU T, XIN Z Y, et al. Research on wind resistance of continuous welded stainless steel roofing system [J]. Steel Construction (Chinese & English), 2019, 34(8): 21-26+36.
- [21] WANG D Y, XIN Z Y, OU T, et al. Experimental study on mechanical properties of the key connection joint for the continuous welded stainless steel roof system [J]. Structures, 2023, 48: 53-63.
- [22] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构工程施工质量验收标准:GB 50205—2020[S]. 北京:中国计划出版社,2020.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for acceptance of construction quality of steel structures: GB 50205—2020 [S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [23] WANG F L, YANG J, PAN Z F. Progressive collapse behaviour of steel framed substructures with various beam-column connections [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 109: 104399.
- (责任编辑 唐彦彦)