

Review of Numerical Simulation of Wind Uplift Resistance of Standing Seam Metal Roofs

Qingzheng Wang Li Xie Peifei Niu Gongxiong Zhang

Center International Group Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract

The vertical locking edge metal roof is widely used in industrial buildings and public buildings. At the same time, the wind uncovering accident of the metal roof has also caused serious economic losses and brought adverse effects to the society. Scholars at home and abroad adopt the method of test and simulation, further study of wind resistance upright lock edge metal roof system, on the basis of the existing research from the metal roof plate thickness, plate width, fixed support length, spacing, wind resistance clip five aspects of wind resistance ability, for the vertical lock edge metal roof system scientific research and engineering practice. This paper summarizes the research results of the numerical simulation of metal roof system in the existing literature, summarizes the influence of different factors on its wind resistance performance, and provides a basis for the subsequent numerical simulation research and engineering practice of metal roof system.

Keywords

metal roof with vertical locking edge; wind bearing capacity; numerical simulation model

直立锁边金属屋面抗风揭性能仿真模拟研究综述

王清正 谢莉 牛培飞 张功雄

森特士兴集团股份有限公司, 中国 · 北京 100176

摘 要

直立锁边金属屋面被广泛应用于工业建筑和公共建筑中, 同时金属屋面的风揭事故也造成了严重的经济损失, 给社会带来了不良影响。国内外学者采用试验和仿真模拟等方法, 深入研究直立锁边金属屋面系统的抗风揭性能, 在现有研究基础上从金属屋面板板厚、板宽、固定支座长度、间距、抗风夹5个方面对直立锁边金属屋面系统的抗风揭能力进行说明, 为直立锁边金属屋面系统的科学研究及工程实践提供参考依据。论文总结现有文献中金属屋面系统的抗风揭数值模拟研究成果, 归纳不同因素对其抗风性能的影响, 为后续的金属屋面系统抗风揭数值模拟研究及工程实践提供依据。

关键词

直立锁边金属屋面; 抗风承载力; 数值模拟模型

1 引言

金属屋面具有悠久的历史, 现代金属板材用作建筑外围护系统最早出现在国外, 20 世纪 80 年代中国引入了金属屋面系统, 初期主要应用于工业和民用建筑中, 随着经济的发展, 在一些公共建筑中也得到了广泛使用。当金属屋面系统大量应用在建筑围护工程中时, 各地的风揭事故也常有发生, 如北京国际机场 T3 航站楼先后几次被大风揭开; 2015 年台风造成湛江体育场馆屋面被严重破坏; 营口体育场金属

屋面被大风撕裂。这些风险事故都给中国造成了经济损失, 带来了不良影响。因此有效解决金属屋面抗风能力弱的问题, 对完善金属屋面系统的设计与应用都具有重要意义。

国内外学者都对金属屋面系统的抗风揭承载性能做了相关研究, 研究手段主要有试验研究和数值模拟研究。Filmon Habte^[1]通过动态抗风揭试验研究两种不同咬合方式的直立锁边金属屋面系统的抗风性能, 研究发现锁边处支座脱扣拔出的破坏模式; 余志敏^[2]通过研究直立锁边屋面系统的动态抗风揭试验, 分析直立锁边金属屋面的破坏机理并给出抗风建议; 刘军进^[3]等人设计了 12 组不同的直立锁边金属屋面抗风揭试验, 系统研究了包括屋面板厚度、宽度、T 形码支座间距等因素对其抗风揭性能影响; 于敬海^[4]等人研究金属屋面关键节点的抗风揭性能, 发现节点处存在 3 种破坏形式: 自攻钉拉出破坏、固定支座拉弯及自攻钉拉出破坏、固定支座拉弯及自攻钉螺帽拉断破坏。秦海鹏^[5]通

【基金项目】国家重点研发计划“零碳建筑及社区可再生能源应用关键技术研究”(项目编号: 2022YFE0134000-09)。

【作者简介】王清正(1995-), 男, 中国河北保定人, 硕士, 从事金属围护结构、建筑光伏一体化研究。

过静态抗风揭试验,研究 400/65 型直立锁边金属屋面的极限承载性能,并提出抗风夹布置密度对金属屋面抗风性能的影响。

通过试验研究能够直观反映金属屋面的承载性能,但是这种方法耗费较大,同时市场上存在的金属屋面种类众多,针对各种规格的屋面板进行试验研究是不现实且耗费财力巨大。

2 直立锁边金属屋面系统仿真模拟

金属屋面系统开始于国外,因此在直立锁边金属屋面系统上研究较早,并且在数值模拟上也取得一定的研究成果,尽管国内研究起步较晚,但研究成果却可观。国内外学者从不同方面展开研究直立锁边金属屋面系统的抗风揭性能,现有文献中主要研究参数包括:屋面板搭接形式、屋面板板厚、屋面板板宽、固定支座长度、固定支座间距、有无抗风夹及划分单元选取等各个影响因素,基于现有直立锁边金属屋面数值模型,下文归纳总结了不同参数的影响。

2.1 屋面板板厚、板宽的影响

金属屋面板的板厚、板宽^[6]都会对整体的抗风揭性能产生影响,目前市场上的板厚主要有 5 种: 0.7mm、0.8mm、0.9 mm、1.0mm、1.2mm。研究表明随着板厚的增加,金属屋面系统的抗风揭性能有着明显提升。贺海建^[7]建立 5 组分析模型,分别研究相同风荷载作用下不同铝合金厚度的金属屋面板跨中位移随厚度变化和不同厚度金属屋面板破坏时的极限荷载,研究发现:相同风荷载作用下,金属屋面板跨中位移会随着板厚的增加而减少;当金属屋面板厚度增加时,铝合金金属屋面板的破坏荷载会随着厚度增加而变大,且呈线性关系。

同样,金属板板宽也会影响整体的抗风揭性能,贺海建^[8]、李松阳^[9]、陈玉^[10]等人都借助数值模拟的方法证明了板宽、板厚对金属屋面系统的抗风揭性能有着极大影响,汪明波^[11]将试验方法和数值模拟相结合,研究得出:对于直立锁边金属屋面,板厚的变化对抗风揭性能影响最大,板宽的影响因素次之。

2.2 固定支座的影响

直立锁边金属屋面系统中,金属屋面板通过固定支座与下部檩条连接在一起,马志杓^[11]通过金属屋面抗风揭试验发现:发生风揭破坏时,屋面板体系在风压差下会对屋面板产生向上的拉力,屋面板的隆起变形会在锁边位置产生竖直方向和水平方向的力,固定支座发生弯曲变形,进而引起风揭破坏。范亚娟^[12]通过数值模拟的方法,研究直立锁边金属屋面单跨模型在风揭作用下的静力和疲劳分析,研究结果表明发生风揭破坏是由于屋面板与 T 形码支座连接处脱离引起,其应力变化也明显超过屋面板其他部分。李颖^[13]建立 T 形码支座精细化模型,研究得出屋面咬合处与 T 形码支座间的受力性能。

李明^[14]等人通过数值模拟的方法发现 T 形码支座间距

会对金属屋面抗风性能存在明显影响;崔忠乾^[15]通过数值模拟的方法发现一定范围内 T 形码支座的改变会影响金属屋面系统的抗风揭性能,且 T 形码支座间距产生的影响(图 1)明显大于 T 形码支座长度改变产生的影响(图 2)

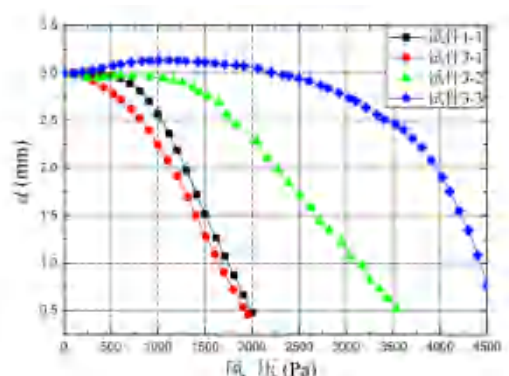


图 1 不同 T 形码间距 - 风压变化曲线

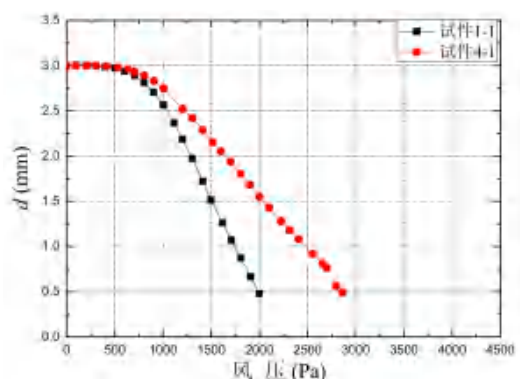


图 2 不同 T 形码长度 - 风压变化曲线

2.3 屋面板间的咬合搭接影响

直立锁边金属屋面板间采取咬合搭接的方式连接在一起,在仿真模拟中相邻屋面板接触和屋面板与固定支座间的接触都会对模拟结果产生影响。

A.A.El Damatty^[16]采用弹簧模拟支座与屋面板间的连接,将最终结果与足尺试验结果进行对比,证明该方法的可行性。罗永峰^[17]等人在直立锁边屋面板咬合处采用切向弹簧和法向约束模拟分析 T 形码支座与屋面板卷边处滑移。李明^[18]等人同样采用弹簧单元等效固定支座与屋面板的咬合作用,研究直立锁边金属屋面的抗风揭承载性能。范亚娟采用接触单元模拟屋面板与支座连接处的咬合作用,建立简化模型研究金属屋面系统的抗风揭性能。

2.4 屋面板单元选取影响

金属屋面板模拟中单元选取对模型计算效率和结果精度都有影响。刘军进等人为了保证结果的真实性,屋面板选取实体单元 C3D8I 进行模拟,有效模拟出屋面板在厚度方向上的应力变化,提供了更精确的模拟结果。关伟梁^[19]采用 S4R 壳单元划分金属屋面板,这种单元对薄壳问题有较好的模拟结果,且可以应用在屋面板这种大变形分析中。王

烁^[20]分析屋面板与固定支座的接触问题,分析壳单元建模计算量较小且符合屋面板薄壁的结构特点,最终屋面板采用壳单元,固定支座采用实体单元,保证了模拟的成功率及计算效率。

2.5 抗风夹的影响

工程应用中一般会对金属屋面板进行加固以提高金属屋面系统的抗风承载力,其中最常用的手段便是增设抗风夹。抗风夹会提高金属屋面系统的抗风能力,但也会带来应力集中等问题,尤其在抗风夹与屋面板交界位置尤为严重,在循环风荷载影响下,这些区域会产生疲劳损坏。

武涛^[21]通过模拟抗风夹在静态风载作用下的变形过程,揭示了增设抗风夹后金属屋面系统的风揭破坏过程。徐启中^[22]等人模拟了增设抗风夹后金属屋面系统整体的抗风揭性能,研究得出抗风夹对整体的抗风揭能力有着显著提升。

3 结论及展望

20世纪80年代,直立锁边金属屋面系统首次引入中国,经历几十年的发展,目前已广泛应用于工业及公共建筑中,国内外学者也对其抗风揭承载性能上有了深入了解。论文归纳总结了直立锁边金属屋面发展过程中的不同因素对该系统的抗风揭性能影响,主要归纳总结如下:

①屋面板的板厚、板宽都对该系统的抗风性能有着重要影响,其中板厚的变化对抗风揭性能影响最大,板宽的影响因素次之。

②固定支座在上部屋面板与下部檩条连接中起着重要作用,固定支座的长度、相邻固定支座的间距都影响整体的抗风揭能力,固定支座间距对抗风能力的影响强于固定支座长度的影响,因此合理的固定支座间距是影响金属屋面抗风能力的重要因素。

③屋面板间的咬合、屋面板与固定支座上部的接触也会影响屋面整体的抗风能力,实际工程中需要做好板间咬合。

④直立锁边金属屋面系统的仿真模拟过程中,各个部件间的网格划分会影响着模型的成败、计算效率和结果精度,因此进行相关的仿真模拟研究时,应该根据不同的研究目的选择合适的网格单元。

⑤抗风夹会提高该金属屋面系统的抗风性能,现有的研究成果对抗风夹的固定作用有着细致研究。

目前的直立锁边金属屋面系统抗风揭承载性能在固定支座与屋面板的研究较为系统,整体在影响该屋面系统抗风能力的各个因素有着深入研究,但对于实际工程应用中,金属屋面系统在真实风荷载的研究较少,建议后续的仿真模拟研究可以进行相关风洞仿真模拟,提出相关模型,推动直立锁边金属屋面系统的工程应用。

参考文献

[1] Habte F, Mooneghi M A, Chowdhury A G, et al. Full-scale testing to evaluate the performance of standing seam

metal roofs under simulated wind loading[J]. *Engineering Structures*,2015,105:231-248.

- [2] 余志敏.直立锁边金属屋面系统动态抗风揭试验及抗风性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [3] 刘军进,崔忠乾,李建辉,等.铝镁锰直立锁边金属屋面抗风揭性能试验研究与理论分析[J].*建筑结构学报*,2021,42(5):19-31.
- [4] 于敬海,赵或洋,蒋智宇,等.直立锁边金属屋面系统关键连接节点抗拉承载力试验[J].*建筑科学与工程学报*,2019,36(1):112-119.
- [5] 秦国鹏,刘美思,刘毅.金属屋面系统抗风揭性能的试验研究[J].*钢结构*,2016,31(3):26-28.
- [6] 孙成疆,直立锁缝金属屋面系统在模拟极端暴风工况下抗风揭能力测试和分析[J].*建筑结构*,2011(42).
- [7] 贺海建.铝合金屋面系统抗风揭性能数值分析[J].*结构工程师*,2020,36(5):58-65.
- [8] 李松阳.直立锁边金属屋面系统抗风揭性能的参数研究[D].武汉:湖北工业大学,2021.
- [9] 陈玉.直立锁边屋面系统抗风承载能力研究[D].北京:北京交通大学,2015.
- [10] 汪明波.两类常用金属屋面板抗风揭性能研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [11] 马志杓.金属屋面系统抗风揭试验解析[J].*建筑技术*,2022,8(8):1025-1028.
- [12] 范亚娟.金属屋面系统抗风吸力的静力性能和疲劳性能研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [13] 李颖.金属屋面T型连接构件受力性能分析[J].*工程设计*,2018,6(33):48-51.
- [14] 李明,殷小珠,张伟,等.直立锁边屋面抗风揭性能有限元分析[J].*钢结构*,2017,32(8):72-76.
- [15] 崔忠乾.直立锁边金属屋面抗风揭性能试验研究[D].中国建筑科学研究院,2019.
- [16] Damatty A A E, Rahman M, Ragheb O. Component testing and finite element modeling of standing seam roofs[J]. *Thin-walled structures*,2003,41(11):1053-1072.
- [17] 罗永峰,郑祥杰,郭小农,等.铝合金屋面系统抗风连接受力性能分析[J].*重庆大学学报*,2013,36(10):94-100.
- [18] 李明,殷小珠,张伟,等.直立锁边屋面抗风性能有限元分析[J].*钢结构*,2017,32(8):72-76.
- [19] 关伟梁.直立锁边金属屋面抗风承载能力研究[D].广州:华南理工大学,2019.
- [20] 王烁.直立锁边金属屋面系统精细化有限元模型研究[D].北京:北京交通大学,2022.
- [21] 武涛.直立锁边金属屋面板风揭破坏机理与风灾易损性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2022.
- [22] 徐启钟,殷小珠,朱召泉.金属屋面系统抗风揭试验研究及数值分析[J].*粉煤灰综合利用*,2020,34(3):19-22+105.