

DOI:10.11918/202008089

直立锁缝屋面系统风致破坏全过程研究

夏俞超, 陈水福

(浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058)

摘要: 直立锁缝屋面系统广泛应用于厂房、车站、体育场馆等大型建筑中,但由于自重轻、柔性大,在强风作用下很容易发生局部损伤及整体破坏,探讨这类屋面系统的风致破坏模式和失效机理,以便提出有效的抗风措施很有必要。本文进行了足尺试验并结合精细有限元方法,对直立锁缝屋面系统在风荷载作用下的变形发展,直到局部屈曲,再到最终破坏的全过程进行了试验和数值的对比研究,探讨了屋面板在风荷载逐渐增大过程中的位移状况及各阶段的破坏模式与抗风承载力。结果表明,屋面系统的破坏模式为支座与屋面板在锁缝处的脱扣破坏,该脱扣始于屋面板中部屈曲所引发的整体大变形,从而使得临近支座的拉力出现陡增,进而导致脱扣。本文的有限元方法不仅能够完整再现上述变形过程和破坏模式,还能较准确地预测其关键位移及抗风承载力的大小。

关键词: 直立锁缝;风荷载;足尺试验;有限元分析;失效模式;极限承载力

中图分类号: TU242.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2021)04-0136-06

Wind-induced damage processes of standing seam metal roof systems

XIA Yuchao, CHEN Shuifu

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Standing seam metal roof systems are widely used in large-scale buildings such as factories, stations, and stadiums, while they are prone to have local and overall damages under strong wind due to the characteristics of lightweight and flexibility. It is crucial to study the wind-induced response and failure mechanism of standing seam metal roof systems, so as to improve their wind-resistance performance. Full-scale tests and numerical simulation were conducted to investigate the wind-induced response of standing seam metal roof systems, which includes the process of deformation, local buckling, and final failure. The displacement, failure modes, and ultimate bearing capacity of roof panel at different stages were studied under increasing wind loads. Results show that the failure mode of standing seam metal roof systems was the clip separation from seam. Local buckling was observed before the failure, which resulted in the global deformation of the roof panel. The clip force near the local buckling increased rapidly after the occurrence of the local buckling and caused the clip separation. The proposed finite element method can not only simulate the whole process of standing seam metal roof systems subjected to wind pressure but also predict failure modes and ultimate bearing capacity precisely.

Keywords: standing seam metal roof; wind loads; full-scale test; finite element method; failure mode; ultimate bearing capacity

直立锁缝屋面系统(standing seam metal roof system)是将相邻屋面板的卷边通过电动锁边机与支座立板进行咬合,再将支座通过螺栓连接到檩条的屋面系统。相比传统屋面系统,直立锁缝屋面系统具有自重轻、易安装、防水性能优异,并能有效释放温度应力等优点,因而广泛应用于工业厂房、车站、体育场馆等建筑的屋面围护结构中。在大量应用的同时,强风下的风揭事故也时有发生,造成了生命和财产损失^[1]。风灾调查表明^[2-3],这类屋面系

统的破坏多为锁缝处屋面板与固定支座的脱离,即脱扣破坏,而支座与檩条的连接仍基本完好。脱扣破坏将导致屋面板局部被掀起,最终造成屋面系统整体破坏。脱扣破坏表明屋面系统在咬合处的抗风承载力相对较低,然而这种破坏是如何逐步形成直至发生的,如何预测这类屋面的风致极限承载力等,目前仍处于研究和探索之中。

国际上针对直立锁缝屋面系统提出了一些抗风揭试验方法,常见的标准试验有 ASTM E1592, ANSI/FM 4474 和 UL 1897^[4-6]。需要指出的是,各个抗风揭试验对于试样的尺寸、边界条件及加载方式的要求并不一致,而且部分简化试验方法不能真实反映直立锁缝屋面系统的实际风致响应,导致试

收稿日期: 2020-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(50978230)

作者简介: 夏俞超(1991—),男,博士研究生;

陈水福(1967—),男,教授,博士生导师

通信作者: 陈水福, csf@zju.edu.cn

验中的失效模式与实际情况并不相符^[7]。

为了改进标准试验的不足,相关学者进行了大量的研究。Sinno 等^[8]采用电磁力对一直立锁缝屋面系统进行加载来模拟金属屋面板的风荷载作用,但是该试验只能加载单一方向的力并且只适用于金属屋面板。Farquhar 等^[9]将一个 1:25 的缩尺直立锁缝屋面模型置于边界层风洞中测试,支座与屋面板之间通过金属线连接,当支座达到失效力后金属线将自动断开,以此模拟固定支座与屋面板的脱扣破坏,而支座的失效力通过密西西比州立大学的足尺度试验获得。Habte 等^[10]对一个按 ASTM E1592 标准试验设计的直立锁缝屋面试样进行了足尺风洞试验,并与美国规范 ASCE 7 - 10 的计算结果作了比较,发现 ASCE 7 - 10 中的参数设置过于保守。Morrison 等^[11]利用全尺寸风洞,对一带有直立锁缝屋面系统的双坡屋面低矮房屋的表面风压及风致变形进行了研究。

除了风揭试验方法,国内外学者还采用数值模拟方法研究直立锁缝屋面系统的风致响应。EI Damatty 等^[12]提出了一种计算模型,尝试通过等效弹簧来模拟锁缝处屋面板与支座的相互作用,以简化不同部件之间的复杂作用。Ali 等^[13]通过在屋面系统各个构件之间建立合适的约束关系来模拟它们的相互作用。李明等^[14]建立了一种有限元模型,假设相邻屋面板和支座在锁缝处的相对位移很小,并将不同部件在该处的结点位移完全耦合,用以研究屋面系统的失效模态与极限承载力。Habte 等^[10]发现屋面系统破坏前,锁缝处会经历大变形,屋面板卷边与固定支座之间将产生不可忽视的相对位移,锁缝处的等效刚度也将随之改变,因此采用等效弹簧或者将锁缝处的结点位移耦合会导致结果失真。

本文在西安大略大学的足尺度结构加载实验室 (Insurance Research Lab for Better Homes) 进行足尺加载试验,足尺试验可以消除缩尺试验的尺度效应,

从而获得更真实的结果^[15]。同时采用精细有限元数值模拟方法,建立起包括屋面构件和连接装置的精细计算模型,以便更准确、真实地描述屋面系统的几何构造、连接关系和边界条件,同时考虑强风作用下屋面的几何与材料非线性以及不同部件的接触效应,探讨直立锁缝屋面系统从风致变形直至破坏的全过程,特别是临近破坏时的大变形状况与失效模式,为此类屋面的抗风设计提供依据。

1 足尺试验研究

1.1 结构概况

本试验中直立锁缝屋面系统的构造与 Morrison 等^[11]在实验室中测试的一致,图 1 为该屋面的平面布置。屋面宽度 $D = 9.14$ m,长度 $B = 11.28$ m,屋檐处高度 $H = 3.7$ m,屋面坡度 1.3° 。直立锁缝屋面板为镀锌钢板,其侧视图见图 2。试验区域位于屋面系统中部,图 1 斜线区域所示。试验区域被 4 个大小相同的空气压力箱所覆盖,每个空气压力箱的尺寸为 1.05 m \times 2.44 m,因此整个试验区域的尺寸为 4.2 m \times 2.44 m。不同于以往的标准试验,此次试验的屋面板尺寸与边界条件均按照实际结构进行设计与安装。

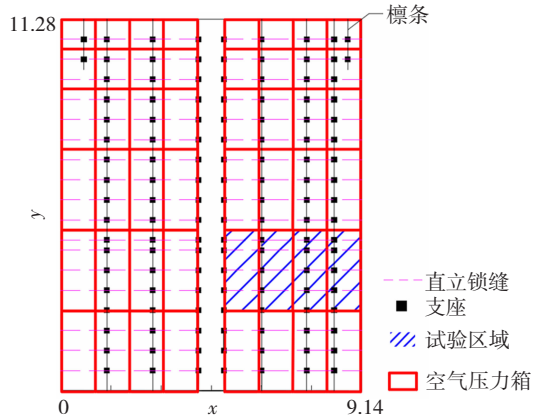


图 1 直立锁缝屋面系统平面布置 (m)

Fig. 1 Plan layout of standing seam metal roof system (m)

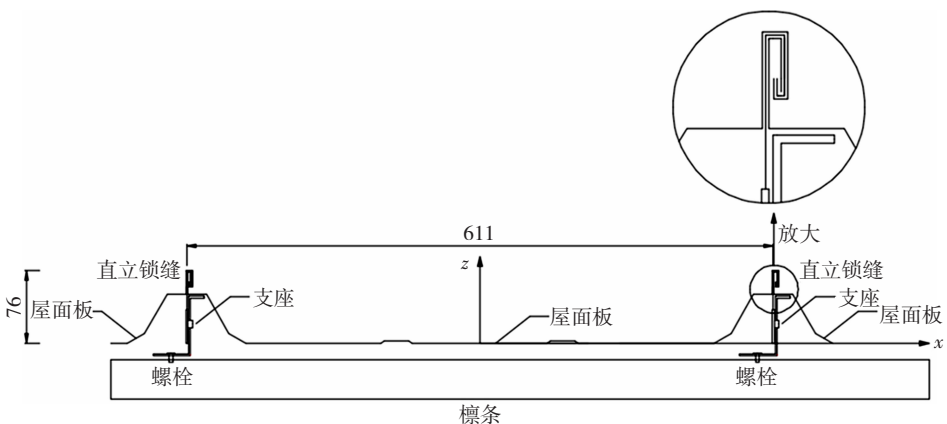


图 2 直立锁缝屋面侧视图 (mm)

Fig. 2 Side view of standing seam metal roof system (mm)

1.2 加载与测量

压力加载驱动器 (pressure loading actuators, PLA) 由西安大略大学开发^[7], 装置安装见图 3。该系统主要部件有风扇、阀门和控制系统。压力加载驱动器产生的风压通过导管连接到空气压力箱, 每一个空气压力箱与一台独立的压力加载驱动器相连, 可分别进行控制。空气压力箱的结构示意图见图 4, 由柔性聚乙烯膜制造, 上方与反力架连接, 下端通过胶水固定到屋面板上。反力架到屋面板的垂直距离约 30 cm, 这样的设计可以保证加载装置不会对屋面板的风致变形产生影响。4 个并排的空气压力箱同时加载, 对屋面板施加均布的风吸力, 吸力线性增加直到结构破坏, 加载速度 0.5 kPa/min。4 个空气压力箱中都安置了压力传感器, 可以记录各个空气压力箱中实际承受的风压。图 5 为预设的风压 - 时间曲线与 4 个空气压力箱中实际测得的风压 - 时间曲线的对比, 可以看到 4 个空气压力箱的曲线与目标风压 - 时间曲线吻合很好, 说明该加载装置可以保证通过各个空气压力箱施加在屋面板上的风压是相等且同步的。



图 3 试验装置安装图
Fig. 3 Test setup

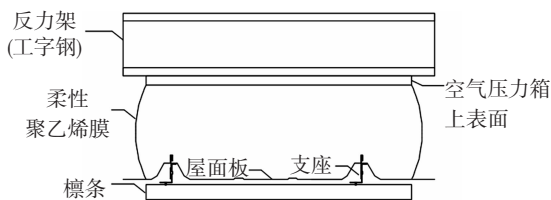


图 4 空气压力箱结构示意图

Fig. 4 Structure diagram of pressure chamber

采用力传感器和位移传感器分别监测支座处的拉力和屋面板的变形。每个支座处均安装了 Mettler Toledo 公司的 TSC - 1000 测力传感器, 最大量程 10 000 N, 精度 ± 10 N。预计屋面板中部的变形较大, 因此在此处安装位移传感器测量屋面板垂直位移。位移传感器采用 Novotechnik 公司生产的 TR100 型号, 量程 100 mm, 精度 ± 0.75 mm。

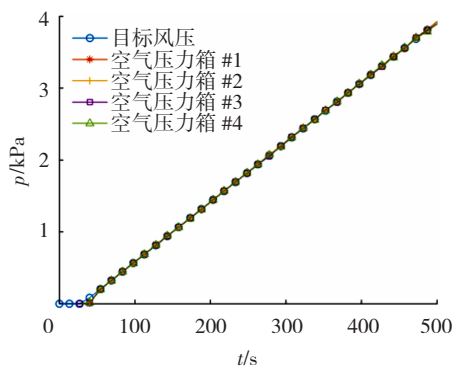


图 5 风压 - 时间曲线对比

Fig. 5 Comparison of wind pressure-time curves

2 数值模拟研究

2.1 有限元建模及参数设置

本文采用通用有限元软件 ANSYS/LS - Dyna 建立精细有限元模型, 考虑到计算时间以及结构对称性, 仅建立直立锁缝屋面的局部模型。局部模型的边界为相邻两条锁缝的中线位置, 见图 6 虚线所示, 并沿着中线设置对称边界条件。屋面板、支座和檩条采用四结点 SHELL163 单元建立, 该单元每个结点有 12 个自由度, 适用于大变形分析。各个构件的尺寸按照实际结构建立, 同时为了获得较好的网格质量, 采用映射方法划分网格, 并对支座和锁缝处的网格进行细化, 最终支座网格、锁缝处与支座咬合的屋面板网格的边长为 20 mm, 锁缝处未与支座咬合的屋面板网格边长为 40 mm, 其余部位屋面板及檩条的网格边长为 80 mm。屋面系统和支座的有限元模型见图 7。

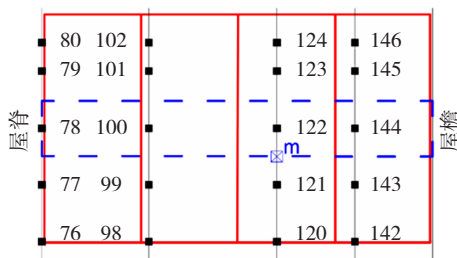
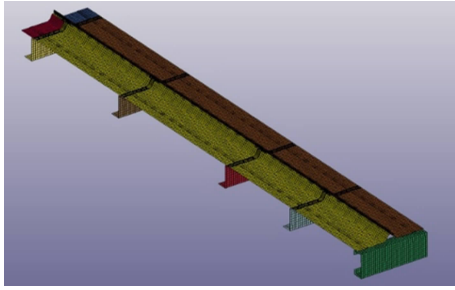


图 6 有限元建模区域

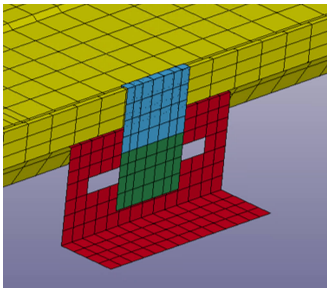
Fig. 6 Finite element modelling area

试验中观察到支座与檩条结合紧密, 因此采用耦合节点自由度来实现支座与檩条的连接。屋面板边缘通过螺栓固定在檩条上, 在脱扣破坏前未产生破坏, 因此将屋面板边缘结点固定到檩条上相对应结点位置。锁缝处相邻屋面板与支座相互咬合, 受力情况复杂, 考虑到结构在大变形过程中接触关系很难预测, 因此采用自动通用接触 (automatic_general contact) 形式, 不需要人工定义接触面, 对于复杂的大变形问题, 软件能有效考虑各个部件之间的接触关系以及部件的自接触。计算时钢材的应力应变关

系采用双线性各向同性弹塑性模型,具体参数见表 1。加载方式与试验一致,在屋面板上施加均布吸力,线性增加直到结构破坏。



(a) 屋面系统有限元模型



(b) 支座有限元模型

图 7 屋面系统和支座有限元模型

Fig. 7 Finite element model of roof system and clip

表 1 双线性各向同性弹塑性模型参数

Tab. 1 Parameters of bilinear isotropic elastoplastic model

屈服强度/ MPa	弹性模量/ (N·m ⁻²)	切线模量/ (N·m ⁻²)	密度/ (kg·m ⁻³)	泊松比	屈服强度/ MPa
345	2.1 × 10 ¹¹	6.7 × 10 ⁹	7 850	0.3	450

2.2 有限元结果分析

如图 6 所示,在屋面板 m 点安装有一位移传感器,记录屋面板跨中的竖向位移随风压的变化。图 8 给出了有限元计算得到的风压 - 位移曲线,并与试验测量曲线对比。需要注意的是位移传感器最大量程为 100 mm,在风压大于 2.0 kPa 后,屋面板中部的变形量便超过位移传感器的最大量程,因此后续的位移值没有被记录下来。可以看到,有限元模拟结果与与测量范围内的试验结果有很好吻合,说明有限元方法可以较准确地反映屋面结构在风荷载下的非线性变形情况。同时看到,当风压在 0 ~ 0.6 kPa 时,位移随风压增加增长较快;而当风压在 0.6 ~ 3 kPa 时,位移增幅明显慢于前一阶段。这是由于屋面板是柔性结构,故在较小风压下就能产生较大竖向位移,但当位移增大后,屋面板中部拱起,与边界处的约束一起限制了屋面板位移,或者说拱起效应强化了屋面板的竖向刚度。下一节中将对风荷载大于 3 kPa 后的位移与风压变化曲线作进一步阐述。

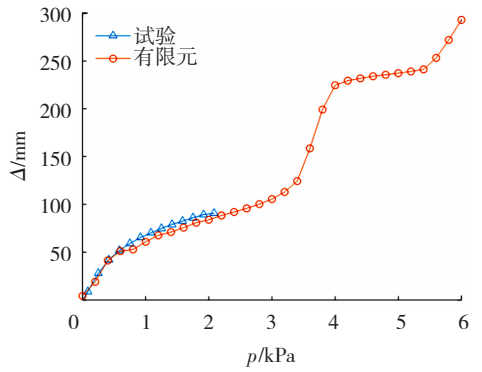
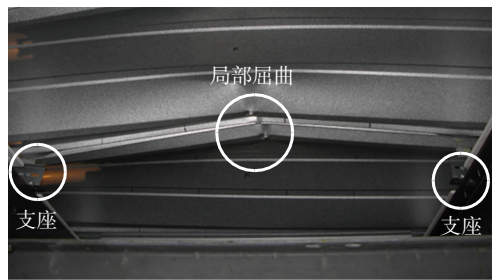


图 8 跨中处风压 - 位移曲线

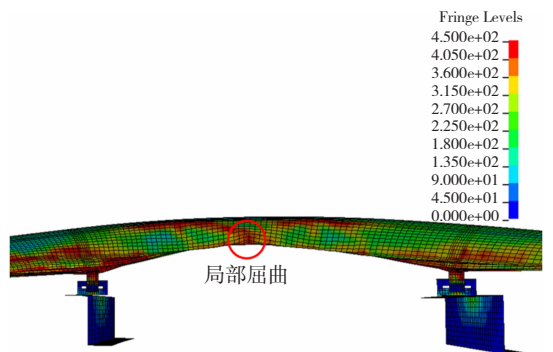
Fig. 8 Wind pressure-displacement curves at midspan

3 失效模式

图 9 ~ 11 为屋面板破坏全过程的试验与有限元对比。通过足尺试验,观察到了屋面板在风荷载作用下变形逐步增大直至脱扣破坏的全过程,其中代表性的破坏有两次。第一次是当风压达到 3.7 kPa 时,屋面板在两支座的中间位置靠近锁缝处,发生了局部屈曲,见图 9(a)。与此同时,中部锁缝处的竖向位移随即变大,并能清晰听到屋面板因变形产生的巨响。此后观察到锁缝处出现开口,原本紧密的锁缝结构暴露出来,见图 10(a)。随着风压继续增加,屋面板位移继续缓慢增大,同时锁缝也进一步张开;当风压增大至 5.8 kPa 时,屋面板锁缝处发生脱扣破坏,支座从锁缝中脱离,见图 11(a)。通过精细有限元分析,可以看到最初同样在屋面板两支座的中间位置靠近锁缝处发生局部屈曲并导致了屋面板



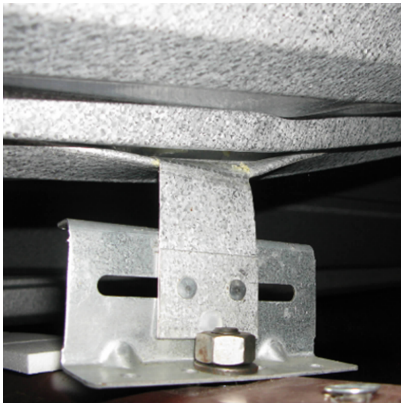
(a) 试验



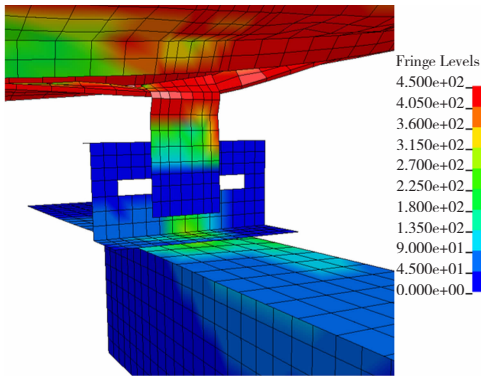
(b) 有限元

图 9 屋面板局部屈曲

Fig. 9 Local buckling of roof panel



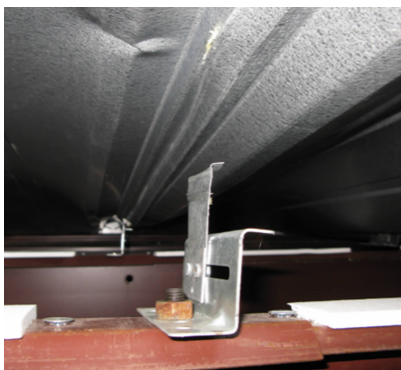
(a) 试验



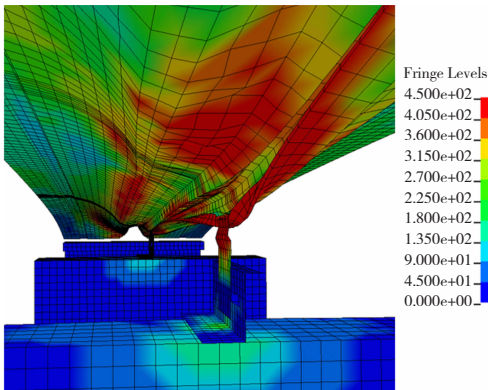
(b) 有限元

图 10 锁缝打开

Fig. 10 Seam opening



(a) 试验



(b) 有限元

图 11 脱扣破坏

Fig. 11 Clip separation from seam

整体大变形,最终支座从锁缝中脱离,有限元方法成功再现了屋面板各个阶段的变形与破坏全过程。

考察图 8 的有限元结果可看到,在风压处于 3.4 ~ 3.9 kPa 时,位移迅速增加,此范围正是屋面板发生屈曲的区间。当风压大于 3.9 kPa 后,跨中位移进入平缓增长阶段,这与试验结果相符。当风压大于 5.8 kPa 后,跨中位移急剧增大,此刻屋面板出现脱扣破坏,这与试验结果也相吻合。图 12 给出了两支座中间位置的锁缝处位移随风压的变化曲线。可以看到,锁缝处的竖向位移在风压不太大时很小,例如当风压等于 3.6 kPa 时也仅为 32 mm,但是在下一瞬间位移陡然增大,此时正是屋面板屈曲发生的时刻;而当风压达到 4 kPa 时,锁缝处的位移已增至 158 mm。与跨中位移的变化规律类似,当风压超过 4 kPa 之后,锁缝处位移进入平缓增加阶段直到风压到达 5.8 kPa 后发生脱扣破坏。对比图 8 和图 12,不难发现跨中和锁缝处的位移变化有相似之处,在屋面板屈曲后位移急剧增加,随后进入一段平缓期直到脱扣破坏。所不同的是,跨中部位即使在较小风压下其位移已比较显著,而锁缝处在此阶段的位移始终很小。

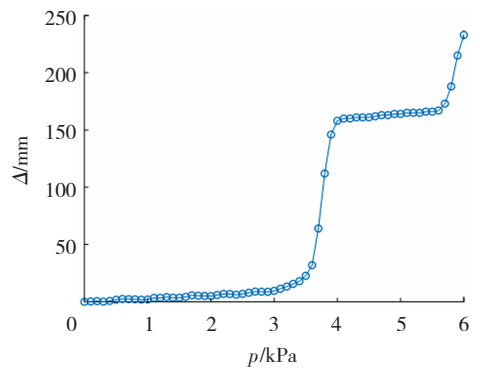


图 12 锁缝处风压 - 位移曲线

Fig. 12 Wind pressure-displacement curves at seam

4 抗风承载力

足尺试验中,屋面板在风荷载作用下,122 号支座最终发生脱扣破坏。该支座处的力传感器记录了支座力随风压的变化情况,见图 13。为与试验结果比较,该图同时给出了有限元计算得到的支座力 - 风压变化曲线。由图可见,有限元与试验的结果非常符合。观察试验得到的支座力 - 风压曲线后发现,当风压达到 3.7 kPa 后,支座力发生了突变,支座力从 922 N 瞬间增加到 2 427 N,此时刻对应屋面板因局部屈曲导致大变形发生的瞬间,之后支座力与风压近似呈现出线性相关,直到风压到达 5.8 kPa 后发生脱扣破坏,支座力瞬间降至 0,试验测得最大支座力为 3 682 N。

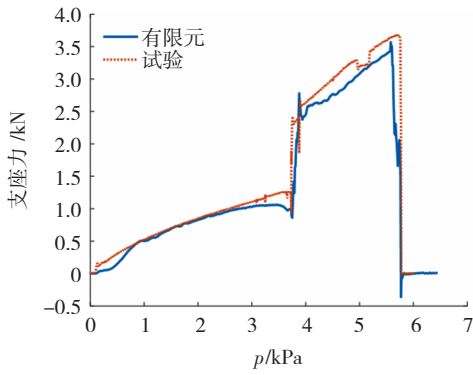


图13 支座力-风压曲线

Fig. 13 Clip force-wind pressure curves

有限元计算得到的支座力-风压曲线与试验曲线有很好的吻合。当风压达到3.7 kPa时,计算的支座力同样产生了突变,从861 N迅速增大到2 780 N,这与图8和图12中屋面板在此刻因局部屈曲产生整体大变形的现象相一致。随后支座力呈近似线性增加态势直至风压达到5.6 kPa,最终因为支座脱扣破坏而迅速降低到0。有限元得到的最大支座力为3 570 N,与试验值的偏差仅为3.04%。这表明本文建立的精细有限元模型及所采用的非线性计算方法不仅能够很好再现此类屋面系统从开始加载到局部屈曲,再到最终失效的完整破坏模式,而且能够较准确地预测屋面关键部位的位移变化及屋面系统的抗风承载力。

5 结论

采用精细有限元方法并结合足尺模型试验,对直立锁缝屋面系统在风荷载作用下的变形发展,直到局部屈曲,再到最终破坏的全过程进行了试验和数值的对比研究,探讨了屋面板在风荷载逐渐增大过程中各阶段的破坏模式和相应的抗风承载力。通过分析对比可获得以下结论:

1) 锁缝处屋面板与支座连接部位是此类结构抗风揭的薄弱环节;直立锁缝屋面系统的破坏模式是脱扣破坏,锁缝处的屋面板卷边在强风作用下变形过大导致锁缝张开,支座从中拔出,致使屋面系统最终失效。

2) 屋面系统破坏始于屋面板的局部屈曲,屈曲造成了屋面板整体大变形;而锁缝处的位移也由此产生突变,使得临近支座拉力瞬间增大,进而发生脱扣破坏。

3) 本文建立的精细有限元模型和所采用的非线性计算方法,不仅能够很好再现此类屋面系统从开始加载到局部屈曲,再到最终失效的完整破坏模式,还能较准确地预测屋面关键部位的位移状况及屋面系统的抗风承载力大小。

参考文献

- [1] KASPERSKI M. Design wind loads for low-rise buildings: A critical review of wind load specifications for industrial buildings [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1996, 61(2/3):169. DOI: 10.1016/0167-6105(96)00051-7
- [2] 郑卫基. 压型钢板屋面抗风设计有关问题的探讨[J]. *福建建筑*, 2012(1):45
ZHENG Weiji. Profiled steel sheet roof discussion of wind-resistant design[J]. *Fujian Architecture & Construction*, 2012(1):45
- [3] 景晓昆, 李元齐. 轻型钢结构抗风研究现状[J]. *四川建筑科学研究*, 2012, 38(3):30
JING Xiaokun, LI Yuanqi. State-of-the-art: research on wind-resistant design of light-weight steel structures[J]. *Sichuan Building Science*, 2012, 38(3):30. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1933.2012.03.007
- [4] Standard test method for structural performance of sheet metal roof and siding systems by uniform static air pressure difference: ASTM E1592[S]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2001
- [5] Evaluating the simulated wind uplift resistance of roof assemblies using static positive and/or negative differential pressures: ANSI/FM Approvals 4474 [S]. Norwood, MA: American National Standards Institute, 2004
- [6] Standard for uplift tests for roof covering systems: UL 1897 [S]. Gales, WA: Underwriters Laboratories, 2004
- [7] MORRISON M J, KOPP G A. Analysis of wind-induced clip loads on standing seam metal roofs[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2010, 136(3):334. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.118
- [8] SINNO R R, SURRY D, FOWLER S, et al. Testing of metal roofing systems under simulated realistic wind loads [C]// *Proceedings of the 11th International Conference on Wind Engineering*. Lubbock, TX: ICWE, 2003: 1065
- [9] FARQUHAR S, KOPP G A, SURRY D. Wind tunnel and uniform pressure tests of a standing seam metal roof model[J]. *Journal of Structural Engineering*, 2005, 131(4):650. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:4(650)
- [10] HABTE F, MOONEGI 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.10.006
- [11] MORRISON M J, REINHOLD T A. Performance of metal roofing to realistic wind loads and evaluation of current test standards [C]// *Proceeding of the 14th International Conference on Wind Engineering*. Porto Alegre: ICWE, 2015
- [12] EI DAMATY A A, RAHMAN M, RAGHEB O. Component testing and finite element modeling of standing seam roofs [J]. *Thin-Walled Structures*, 2003, 41(11):1053. DOI: 10.1016/S0263-8231(03)00048-X
- [13] ALI H M, SENSENY P E. Models for standing seam roofs [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91(12/13/14/15):1689. DOI: 10.1016/j.jweia.2003.09.014
- [14] 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
LI Ming, YIN Xiaozhu, ZHANG Wei, et al. Finite element analysis of wind-resistance performance of standing seam roof [J]. *Steel Construction*, 2017, 32(8):72. DOI: 10.13206/j.gjg201708015
- [15] 马宏伟, 姜维山, 郝际平, 等. 一种新型组合结构梁柱节点的试验研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2003, 35(增刊1):185
MA Hongwei, JIANG Weishan, HAO Jiping. Study on a new type of composite structure joint [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2003, 35(S1):185