机械固定式单层卷材屋面系统关键连接节点抗拔性能试验研究

郝 勇[1],丁秋雨[1],武航飞[2*],周 垠[2],徐怀兵[1],周占学[1]
(1.河北建筑工程学院 土木工程学院,河北 张家口 075000;2.中铁二十局集团第二工程有限公司,北京 100142)

摘 要: 为研究风吸力作用下易发生破坏的机械固定式单层卷材屋面系统关键连接节点的抗拔性能,将0.8、0.9、1.0、1.1 mm四种厚度的Q235压型钢板分别与两种类型长螺钉组合,开展了8组共计24个试件的静力拉拔试验。分析了长螺钉-压型钢板连接的破坏机理、抗拔承载力的影响因素以及国内外规范中螺钉抗拔承载力计算公式的适用性,最后对某游泳馆屋面在各等级风力作用下的抗风揭安全性进行评估。结果表明,螺纹宽度相同时,长螺钉-压型钢板连接的抗拔承载力随着板厚的增加而呈非线性增大。螺纹宽度的增加对薄板试件抗拔承载力的提升作用比对厚板试件抗拔承载力的提升作用更显著。采用欧洲标准计算螺钉抗拔承载力的结果偏于保守;对于深螺纹长螺钉-压型钢板连接,澳洲标准计算值最接近试验值。对于浅螺纹长螺钉-压型钢板连接,中国规范计算值最接近试验值,而按澳洲标准计算则偏于不安全。游泳馆屋面在0~14级风作用下不会发生风揭破坏,而当风力大于14级后,长螺钉将被拔出,屋面系统将发生风揭破坏。

关键词: 机械固定;单层卷材;屋面系统;关键连接节点;抗拔承载力;抗风揭安全性评估
中图分类号: TU317 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-9379(2026)08-0055-10
DOI: 10.13969/j.jzgjgjz.20250108003

Experimental Study on Pull-Out Performance of Key Connection Joints in Mechanically Fixed Single-Ply Membrane Roofing Systems

HAO Yong[1], *DING Qiuyu*[1], *WU Hangfei*[2*], *ZHOU Yin*[2], *XU Huaibing*[1], *ZHOU Zhanxue*[1]
(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Architecture and Engineering, Zhangjiakou 075000, China; 2. China Railway 20th Bureau Group Second Engineering Co., Ltd., Beijing 100142, China)
*Corresponding author: 3139491677@qq.com

Abstract: To study the pull-out performance of key connection joints in mechanically fixed single-ply membrane roofing systems which are prone to damage under the action of wind uplift, Q235 profiled steel plates with four thicknesses of 0.8, 0.9, 1.0, and 1.1 mm were combined with two types of long screws respectively, and static pull-out tests were carried out on twenty-four specimens in eight groups. The failure mechanism of long screw-profiled steel plate connections, the influencing factors of pull-out bearing capacity, and the applicability of the calculation formula of screw pull-out bearing capacity in Chinese and international codes were analyzed, Finally, the wind-uplift safety of a

收稿日期:2025-01-08
基金项目:河北建筑工程学院创新基金(XY2024015),中铁二十局集团B类科研课题(YF2002FJ01B)
作者简介:
郝 勇(1980—),男,博士,副教授,主要从事结构韧性评估方面的研究。E-mail:h6_yong@163.com。
通信作者:
武航飞(1986—),男,学士,工程师,主要从事钢结构施工技术方面的研究。E-mail:3139491677@qq.com。

natatorium roof under different wind force levels was evaluated. The results show that when the thread width is the same, the pull-out bearing capacity of the long screw-profiled steel plate connection increases nonlinearly with the increase of the plate thickness. The increase in thread width has a more significant effect on the pull-out bearing capacity of thin plate specimens than on that of thick plate specimens. The calculation results of European standards are too conservative. For deep-thread long screw-profiled steel plate connections, the Australian standard calculation values are closest to the test values. For shallow-thread long screw-profiled steel plate connections, the calculated values of Chinese code are closest to the experimental value, while the calculation according to the Australian standard is unsafe. The natatorium roof will not suffer wind-uplift failure under wind forces of grades 0～14. When the wind force exceeds grade 14, the long screws will be pulled out, and wind-uplift failure will occur in the roofing system.

Keywords: mechanical fixation; single-ply membrane; roof system; key connection joint; pull-out bearing capacity; wind-uplift safety assessment

机械固定式单层卷材屋面系统是由防水卷材、保温材料、隔气膜、压型钢底板、机械固定件等组成的屋面系统[1]，保温隔气层等构造层被置于防水卷材下方、压型钢底板顶面，单层防水卷材外露使用，防水卷材之间的搭接缝采用热风焊接。与常规自钻自攻螺钉相比，长螺钉螺杆较长，其螺杆上部有一段光滑区域，用来穿过不需螺纹连接的保温隔气层等构造层，采用长螺钉可将单层卷材和中部的构造层固定于压型钢底板的波峰上。

近年来，水密性和气密性较佳的机械固定式单层卷材屋面系统被广泛应用于工业厂房、体育场馆以及机场航站楼等大跨建筑中。然而，此类屋面系统的抗风揭能力不足，在强大的风吸力作用下，屋面发生风揭破坏的现象时有发生[2]，如某工程于2004年建成，2008年其屋面卷材和保温材料就遭受了风揭破坏；国内某汽车公司厂房建成于2006年，仅隔一年，在风吸力作用下厂房屋面卷材和保温材料被揭开；某冷库项目工程还未经验收，其屋面就被大风掀起。屋面卷材和保温材料被风力掀起大多是由于长螺钉与压型钢底板的连接失效。屋面风揭破坏造成了建筑物使用功能的中断，带来较大的经济损失。

在冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗拔性能研究方面，SIVAPATHASUNDARAM等[3-5]在先前学者研究的基础上，针对自攻螺钉与不同厚度板件组合时节点的抗拔性能展开研究，提出了考虑螺钉内径和钻尾宽度影响的单螺钉抗拔承载力计算公式。BASKARAN等[6]分别对长螺钉-压型钢板单节点模型以及全尺寸模型进行试验研究，结果显示，长螺钉抗拔承载力可以作为单层卷材屋面系统抗风揭能力的验证因子。李元齐等[7]研究了由不同直径螺钉与不同种类及厚度钢板组合得到的试件的抗拔性能，针对影响螺钉抗拔性能的因素以及不同国家规范设计方法的适用性进行了探讨。周婷等[8]对厚度大于2 mm的厚钢板连接中自攻螺钉的抗拔性能进行了研究，得出了抗拔承载力与两侧钢板的厚度、螺钉直径成正比关系的结论。张文莹等[9]对各国规范里自攻螺钉抗拔承载力的设计方法进行了对比，以此为基础进而对中国规范征求意见稿中的螺钉抗拔承载力计算公式作出了修正。邓露等[10]针对冷弯薄壁型钢螺钉连接，开展了关于钢板材料强度、厚度，以及螺钉内外直径、螺纹间距等因素对其拔出破坏模式和抗拔承载力影响的研究，提出了考虑钢板材料强度、厚度以及螺钉的内、外直径、螺纹间距、钻头处直径的设计承载力计算公式。吴启超[11]研究了单层卷材屋面系统中长螺钉-压型钢板连接节点在水平往复循环荷载作用后的抗拔承载力衰减规律，结果表明，随着振幅增大和荷载循环次数增多，试件的抗拉拔承载力呈下降趋势，并且承载力下降的幅度会随着循环次数的增加而略微加大。综上可知，目前关于机械固定式单层卷材屋面系统中长螺钉-压型钢板连接抗拔性能方面的研究较少，而在风吸力作用下，仅通过螺纹连接在薄壁压型钢板中的长螺钉易遭受竖向拉拔力的影响，从而导致机械固定式单层卷材屋面系统关键连接节点的失效。

基于上述研究背景及现状，针对风吸力作用下机械固定式单层卷材屋面系统关键连接节点容易遭受破坏的问题，本文选用0.8、0.9、1.0、1.1 mm四种厚度的Q235压型钢板，分别与两种类型长螺钉组合，共制作8组24个试件进行静力拉拔试验。基于试验结果，分析了长螺钉-压型钢板连接的破坏机理，研究了螺纹宽度和钢板厚度对抗拔承载力的影响，并评估了国内外规范中螺钉抗拔承载力计算公式的适用性，最后以某游泳馆屋面为工程背景，进行了不同等级风力作用下的抗风揭安全性评估。

1 试验概况

1.1 试件设计

考虑压型钢板厚度和长螺钉螺纹宽度两种因素，共设计了8组抗拔试件，每组3个相同的试件，共计24个。试件由长螺钉、压型钢板、自钻自攻螺钉和C型钢檩条组成。长螺钉可按螺纹宽度分为深螺纹长螺钉和浅螺纹长螺钉两种。两种长螺钉的公称直径及长度均相同，分别为6.3 mm和180 mm，两种长螺钉参数的实测数据如表1所示。压型钢板根据厚度可分为0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm和1.1 mm四种。自钻自攻螺钉的公称直径为5.5 mm，公称长度为32 mm；压型钢板和C型钢檩条均采

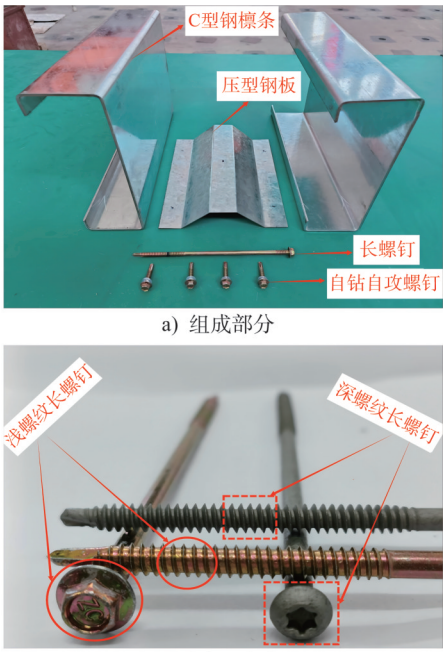
用镀锌的Q235钢。试件的组成部分如图1所示。

表1　长螺钉参数实测数据

Table 1　The measured data of long screw parameters

长螺钉类型	外直径/mm	内直径/mm	螺纹宽度/mm	螺纹间距/mm
深螺纹长螺钉	6.44	4.52	1.92	1.81
浅螺纹长螺钉	6.21	4.84	1.37	1.83

注：螺纹宽度等于外直径减内直径。



a) 组成部分

b) 两种类型长螺钉

图1　试件组成部分

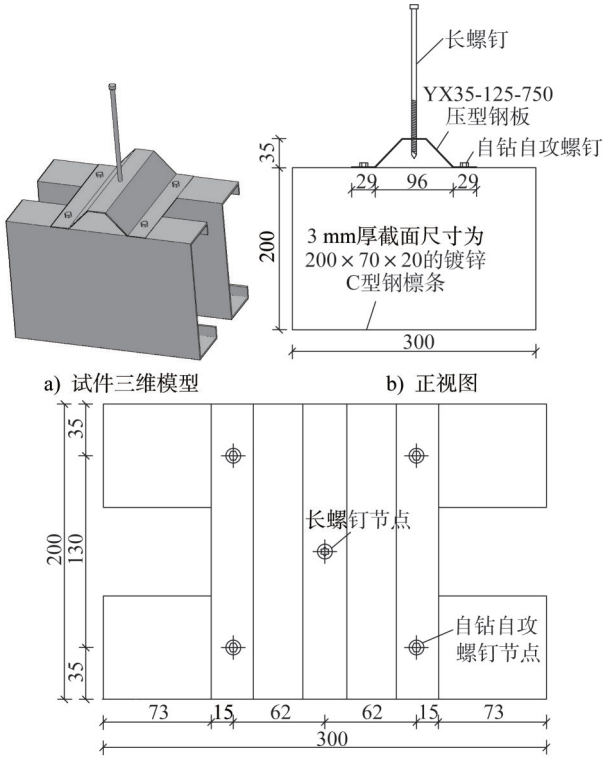
Fig. 1　Components of the specimen

采用手动电钻先将自钻自攻螺钉钻入压型钢板波谷处，以实现压型钢板与下方C型钢檩条的固定连接，然后将长螺钉垂直安装于压型钢板波峰位置，且保证长螺钉穿透压型钢板后，其伸出部分的有效长度不小于20 mm。由于板件跨度对螺钉连接的抗拔破坏模式和抗拔承载力影响很小[12]，故试验中所有试件采用了相同板跨。试件尺寸与三维模型如图2所示。

以试件S-1.0-1和Q-1.0-1为例说明试件的编号规则："S"代表长螺钉类型为深螺纹长螺钉；"Q"代表长螺钉类型为浅螺纹长螺钉；"1.0"表示压型钢板厚度为1.0 mm；"1"代表该试件在同组试件中排序为第1号。

1.2　材料性能

用于测定材料性能的试样与试验中采用的压型钢板取自同一批次钢材，按照《金属材料 拉伸试验 第1部分：室温试验方法》(GB/T 228.1—2021)[13]的相关规定，先



a) 试件三维模型　　b) 正视图

c) 俯视图

图2　试件尺寸与三维模型(单位：mm)

Fig. 2　Specimen sizes and three-dimensional model(unit：mm)

制作标准拉伸试件，然后对其进行材性拉伸试验，材性试验结果的平均值如表2所示。

表2　钢板材性试验结果

Table 2　Steel plate material property test results

板厚/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	断后伸长率/%
0.8	355.26	430.59	36
0.9	342.45	397.97	48
1.0	321.43	391.33	52
1.1	395.09	452.34	44

1.3　试验装置及加载方案

试验装置如图3所示，采用PA-50J动静态自动加载系统进行试件抗拉拔试验。试验开始前，先将试件放置在支架上，依次旋进四根紧固螺栓以顶紧试件中C型钢檩条的上表面。在试件的位置确定后，可对作动器进行前后左右的微调，确保作动器轴线、夹具中心线与试件上长螺钉的轴线三线重合，从而保证长螺钉在后续试验中受到轴心拉力作用。试件安装完成后如图4所示。试验在河北建筑工程学院结构实验室进行，采用位移控制的

单调连续加载方式对试件加载，加载速度设置为2 mm·min^{-1}。



图3 试验装置

Fig. 3 Test device

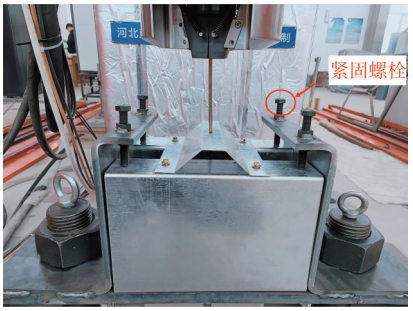


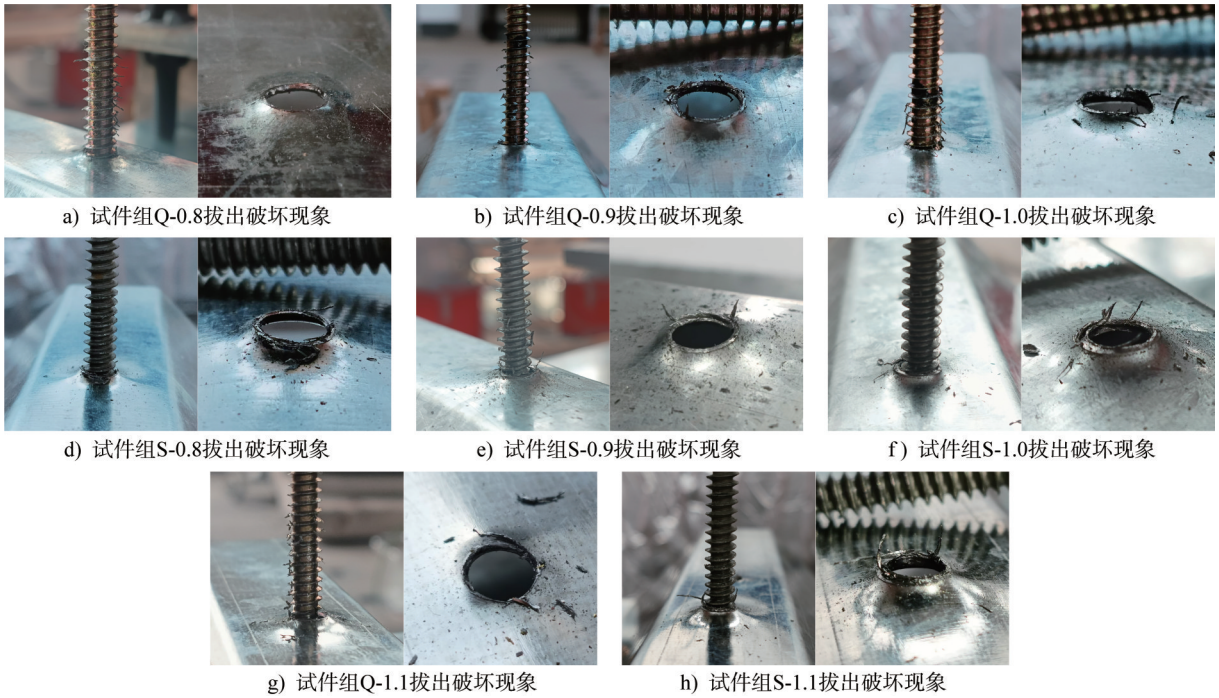
图4 试件安装

Fig. 4 Specimen installation

2 试验结果与分析

2.1 破坏模式及现象

试件破坏形态如图5所示，长螺钉-压型钢板连接的破坏模式为长螺钉被拔出。加载初期，板件处于弹性阶段，钉孔孔边未出现明显变形。随着荷载的增加，长螺钉螺纹挤压板件并带动其向上移动，孔边逐渐变形凸起。当荷载达到峰值后，初始螺纹伴随着“砰”的一声巨响从钉孔中脱出，接着下方螺纹逐个从钉孔中脱出。部分试件的钉杆上附着许多从孔边带出的细小薄钢片，长螺钉螺纹牙顶受到磨损，孔边产生上挠的残余变形，部分试件孔边粘连有细钢丝。在板厚相同的情况下，与浅螺纹长螺钉-压型钢板连接相比，深螺纹长螺钉的螺纹宽度较大，致使螺纹与钉孔孔边的接触挤压面积较大，因此深螺纹长螺钉-压型钢板连接发生拉拔破坏后，孔边上挠的残余变形更加明显。



a) 试件组Q-0.8拔出破坏现象　b) 试件组Q-0.9拔出破坏现象　c) 试件组Q-1.0拔出破坏现象

d) 试件组S-0.8拔出破坏现象　e) 试件组S-0.9拔出破坏现象　f) 试件组S-1.0拔出破坏现象

g) 试件组Q-1.1拔出破坏现象　h) 试件组S-1.1拔出破坏现象

图5 各试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of specimens

2.2 荷载-位移曲线

与压型钢板接触挤压的初始螺纹承受了较大的荷载，荷载-位移曲线第一个波峰对应的数值为长螺钉-压型钢板连接节点的极限承载力。初始螺纹脱出后下方螺纹接续挤压钢板孔边，重新形成受力系统，依次类推，随着长螺钉的拔出，荷载-位移曲线呈现出波峰数值依次降低的波浪线样式。当长螺钉的螺纹均从钉孔脱出后，荷载值为零，荷载-位移曲线呈现水平线。以试件Q-1.1-3

为例，其抗拔试验全过程荷载-位移曲线如图6所示。

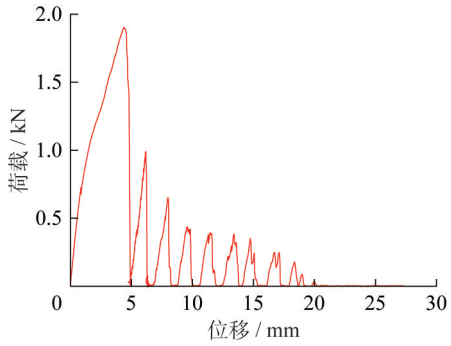


图6　试件Q-1.1-3荷载-位移曲线

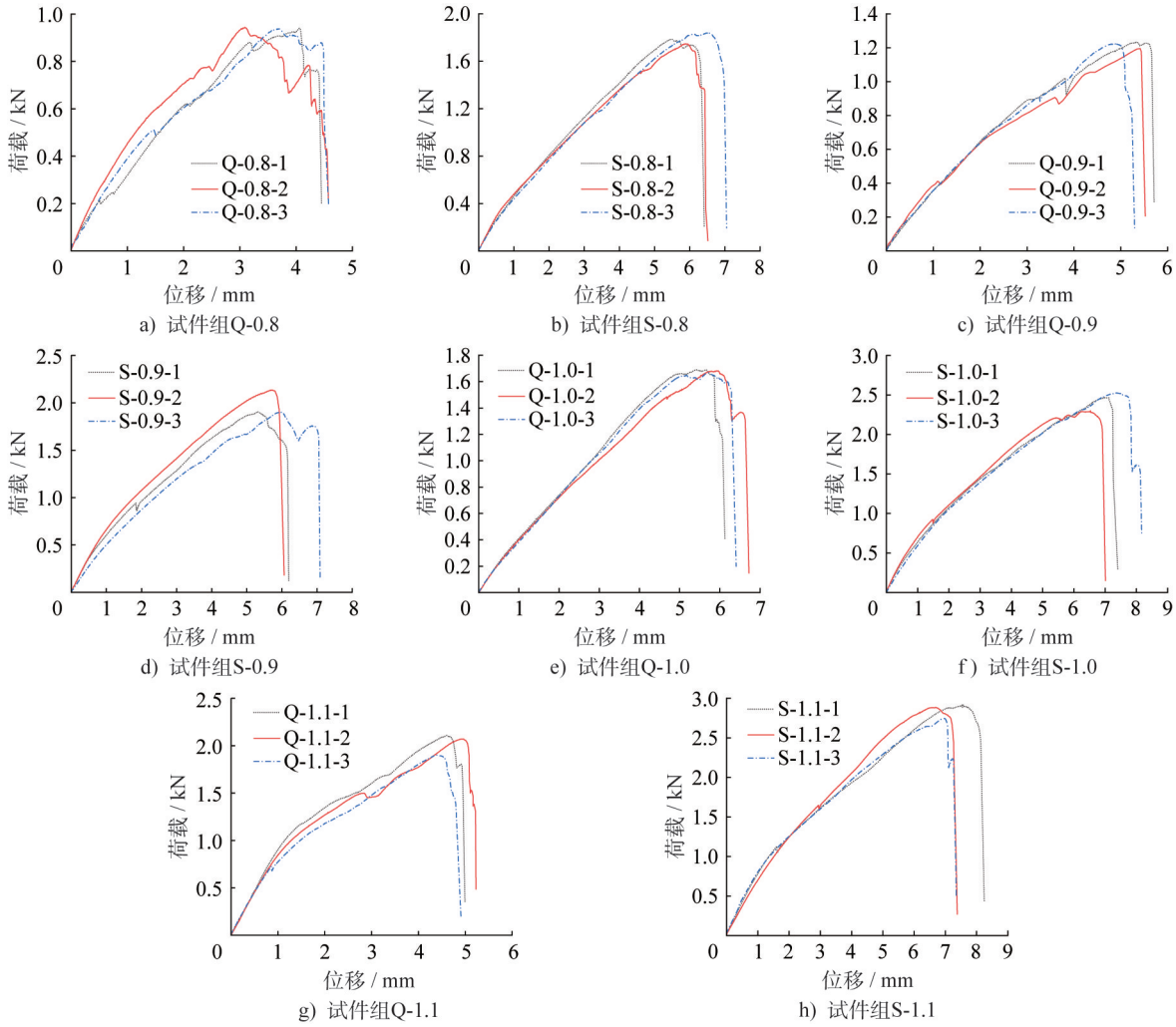
Fig. 6　Load-displacement curve of specimen Q-1.1-3

由试件全过程荷载-位移曲线的特点得到试件的破坏机理：与压型钢板接触挤压的初始螺纹脱出破坏后，钉孔扩张，钢板孔边发生了一部分不可恢复的塑性变形，另一部分弹性变形恢复原位；下方螺纹接续挤压钢板孔边，随着螺纹脱出个数的增加，孔边的塑性变形逐渐积累，导致长螺钉-压型钢板连接节点能够抵抗外荷载的能力逐渐降低。

图7为初始螺纹脱出过程试件的荷载-位移曲线。试件对应的抗拔承载力如表3所示，其中同组试件抗拔承载力试验平均值用P_u来表示，同组中第i个试件的抗拔承载力试验值记为P_i。由图7可知，在部分试件的荷载-位移曲线上升阶段中，曲线出现了先小幅度下降随后再度攀升的情况。这一现象源于初始螺纹牙顶发生磨损，致使螺纹产生瞬间滑动，紧接着螺纹与钢板快速重新形成挤压力，进而曲线再度上升。此外，初始螺纹脱出过程试件的荷载-位移曲线也具有一定的共性，可将其分为以下3个阶段：

（1）弹性阶段：加载初期，曲线呈线性上升趋势，与压型钢板接触挤压的初始螺纹处于稳定状态，并未出现滑动现象。钉孔附近的钢板没有出现明显的鼓曲变形。

（2）弹塑性阶段：随着位移增大，荷载增速变缓，曲线的斜率逐渐变小，钢板孔边刚度降低，钉孔周边的凸起变形逐渐显著直至达到极限状态。



a）试件组Q-0.8　b）试件组S-0.8　c）试件组Q-0.9

d）试件组S-0.9　e）试件组Q-1.0　f）试件组S-1.0

g）试件组Q-1.1　h）试件组S-1.1

图7　初始螺纹脱出过程试件的荷载-位移曲线

Fig. 7　Load-displacement curves of specimens during the initial thread removal process

(3) 初始螺纹脱出破坏阶段:当荷载达到峰值后,初始螺纹脱出的瞬间荷载迅速下降。

表3 试件组抗拔极限承载力

Table 3 The ultimate pull-out bearing capacity of specimen groups

试件组编号	P_1/kN	P_2/kN	P_3/kN	P_u/kN
Q-0.8	0.941	0.944	0.935	0.940
S-0.8	1.786	1.747	1.838	1.790
Q-0.9	1.234	1.196	1.225	1.218
S-0.9	1.906	2.135	1.901	1.981
Q-1.0	1.690	1.683	1.669	1.681
S-1.0	2.467	2.300	2.526	2.431
Q-1.1	2.109	2.072	1.903	2.028
S-1.1	2.919	2.885	2.747	2.850

2.3 抗拔承载力影响因素分析

2.3.1 压型钢板厚度

根据表3中的P_u值绘制出图8,由图可知螺纹宽度相同时,随着压型钢板厚度的增加,长螺钉-压型钢板连接的抗拔承载力并非以线性方式增大。板厚不大于1.0 mm时,承载力随板厚增加而增大的速率逐渐加快;板厚超过1.0 mm时,承载力增大速率变慢。

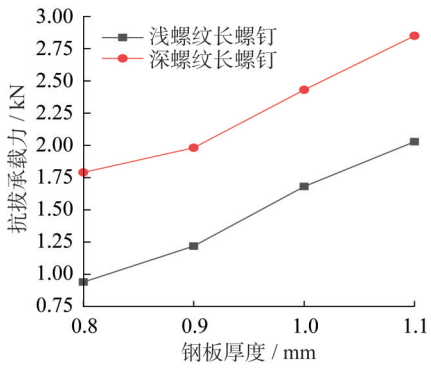


图8 钢板厚度对抗拔承载力的影响

Fig. 8 The effect of steel plate thicknesses on pull-out bearing capacity

2.3.2 长螺钉螺纹宽度

压型钢板厚度相同时,从图9中可以看出试件抗拔承载力随着螺纹宽度的增加而增加;而随着板厚的不断增大,试件抗拔承载力增加的幅度逐渐减小,说明螺纹宽度的增加对薄板试件抗拔承载力的提升作用比对厚板试件抗拔承载力的提升作用显著。由表1可知两种类型长螺钉的螺纹宽度,当螺纹宽度增大40.15%时,0.8 mm、0.9 mm、1.0 mm及1.1 mm厚压型钢板对应试件的承载力分别增加了90.43%、62.64%、44.62%和40.53%。

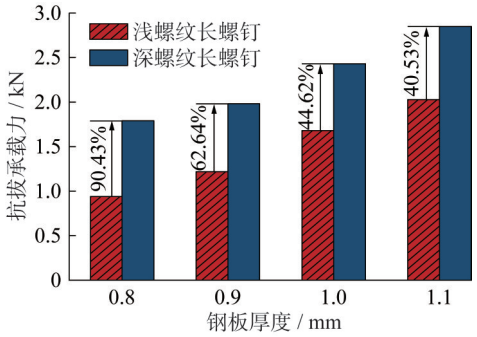


图9 螺纹宽度对抗拔承载力的影响

Fig. 9 The effect of thread widths on pull-out bearing capacity

2.4 抗拔承载力试验值与计算值对比

将依据规范获得抗拔承载力计算值与试验实测值进行对比分析,以研究现有规范中长螺钉-压型钢板连接抗拔承载力计算公式的工程适用性与安全可靠性。首先对中国规范[14]、澳洲标准[15]、英国标准[16]以及欧洲标准[17]的螺钉抗拔承载力计算方法进行对比,结果如表4所示。按照表4中各规范给出的螺钉抗拔承载力计算公式,对试件的抗拔承载力进行了计算,并将计算值与试验结果进行了对比,比较结果如图10所示。表5为8组试件依据各国规范计算的结果与试验值的比值,其中"GB"代表中国规范GB 50018—2002;"AS"代表澳洲标准;"BS"代表英国标准;"EC"代表欧洲标准。

由图10和表5可以看出:根据欧洲标准公式计算的抗拔承载力与试验值相比偏于保守,其中试件组S-1.0的平均承载力被显著低估了63.43%;对于深螺纹长螺钉-压型钢板连接,在各类标准与规范的计算值当中,澳洲标准计算值和试验值最为接近,中国规范计算值次之,再之后是英国标准计算值,而欧洲标准计算值偏于保守;对于浅螺纹长螺钉-压型钢板连接,中国规范计算值与试验值最为接近,其次为英国标准计算值,欧洲标准计算值较为保守,与试验值的差距偏大,其中按欧洲标准计算的试件组Q-1.0的平均承载力被低估了49.02%。而按澳洲标准计算的结果则偏于不安全,其中试件组Q-1.1的平均承载力被高估了27.17%。

3 各级风荷载作用下某游泳馆屋面抗风揭安全性评估

3.1 游泳馆屋面系统介绍

某游泳馆屋面采用机械固定式单层卷材屋面系统,该屋面系统构造层如图11所示,固定TOP防水卷材的带垫片长螺钉穿越构造层后,最终穿透压型钢板波峰实现

表4　各规范中螺钉抗拔承载力计算公式

Table 4　The calculation formula of screw pull-out bearing capacity in codes

规范/标准	计算公式	备注
中国规范[14]	$N_t^f=0.75t_1df_{y1}$	N_t^f为螺钉的抗拔承载力设计值；d是螺钉外直径；钉杆的圆柱状螺纹部分钻入基材的深度t_1需超过0.9 mm；f_{y1}为基材的抗拉强度设计值。
澳洲标准[15]	$N_t^f=0.85t_2df_{u1}$	t_2为螺钉钉头接触的板件厚度，t_2应大于0.9 mm；f_{u1}是与螺钉钉尖接触的板件抗拉强度。
英国标准[16]	$N_t^f=0.65t_3df_{y2}$	t_3为靠近螺钉钉尖的板件厚度，t_3应大于0.9 mm；f_{y2}为构件的抗拉强度设计值。
欧洲标准[17]	$N_t^f=\begin{cases}0.45dt_4f_{u2}/\gamma & t_4/s<1\\0.65dt_4f_{u2}/\gamma & t_4/s\geqslant1\end{cases}$	t_4为螺钉支撑板件的厚度，t_4应小于等于4.0 mm；f_{u2}是螺钉支撑板件的抗拉强度；s为螺纹间距；γ为分项系数，其值取1.25。

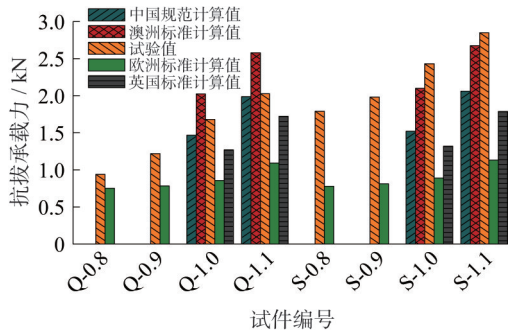


图10　试验结果与计算结果对比

Fig. 10　Comparison bewteen test results and calculation results

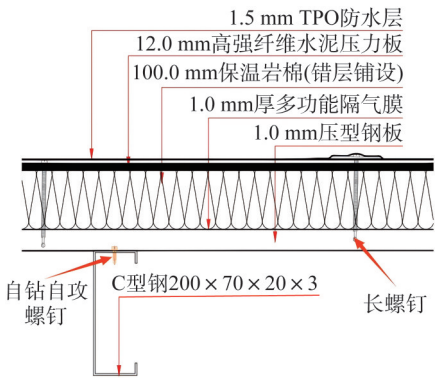


图11　游泳馆屋面系统构造层

Fig. 11　Roof system structural layer of the swimming pool

表5　抗拔极限承载力计算值与试验值的比值

Table 5　Ratio of calculated value to test value of ultimate pull-out bearing capacity

试件组编号	t/mm	d/mm	P_u/kN	P/P_u			
				GB	AS	BS	EC
Q-0.8	0.78	6.21	0.940	—	—	—	79.88%
S-0.8	0.78	6.44	1.790	—	—	—	43.50%
Q-0.9	0.88	6.21	1.218	—	—	—	64.28%
S-0.9	0.88	6.44	1.981	—	—	—	40.99%
Q-1.0	0.98	6.21	1.681	87.28%	120.42%	75.64%	50.98%
S-1.0	0.98	6.44	2.431	62.59%	86.35%	54.24%	36.57%
Q-1.1	1.08	6.21	2.028	98.00%	127.17%	84.93%	53.85%
S-1.1	1.08	6.44	2.850	72.31%	93.83%	62.67%	39.74%

注：t为实测压型钢板厚度；d为实测长螺钉外直径；P为计算值。

固定，采用热风焊接的方式固定防水卷材之间的搭接缝，防水卷材下方的保温隔气层等构造层用带垫片的长螺钉固定于压型钢板波峰上，压型钢板波谷处通过自钻自攻螺钉与C型钢檩条连接。

机械固定式单层卷材屋面系统关键连接节点如图12所示，节点1、2、3分别是单层卷材与长螺钉的连接、长螺钉与压型钢板波峰的连接、自钻自攻螺钉将压型钢板波谷固定于檩条上的连接。在强大的风吸力作用下，上述三类关键连接节点依次受力，关键连接节点的抗风承载力直接影响该金属屋面系统的抗风承载力。根据游泳馆屋面系统关键连接节点2的形式设计出了上述8组试验试件，其中S-1.0组试件与组成节点2的压型钢板和长螺钉的规格、材质相同。对S-1.0组试件进行静力拉拔试验，模拟风吸力作用下长螺钉受到单层卷材带动而产生的向上拉力，研究游泳馆屋面系统中长螺钉-压型钢板连接的抗拔承载力。

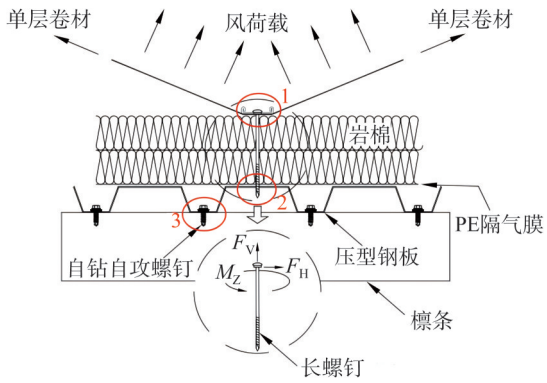


图12　机械固定式单层卷材屋面系统关键连接节点[11]

Fig. 12　Key connection joints of mechanically fixed single-ply membrane roofing system[11]

3.2 各级风荷载作用下游泳馆屋面抗风揭安全性评估

游泳馆位于体育中心东北侧，屋面形状为不规则的五边形曲面，建筑高度为22.7 m，地面粗糙度为B类。对游泳馆外表面进行风洞测压试验，以10°为间隔在0°～360°风向角范围内共设置了36个风向角工况，游泳馆模型方位和试验风向角如图13所示。游泳馆屋顶外表面共布置了154个测点，测点具体布置位置及测点编号如图14所示。

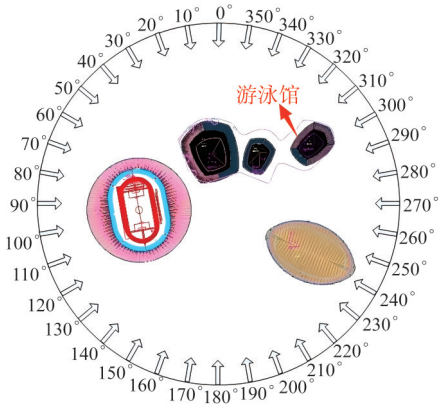


图13 游泳馆模型方位与试验风向角

Fig. 13 The swimming pool model orientation and test wind direction angles

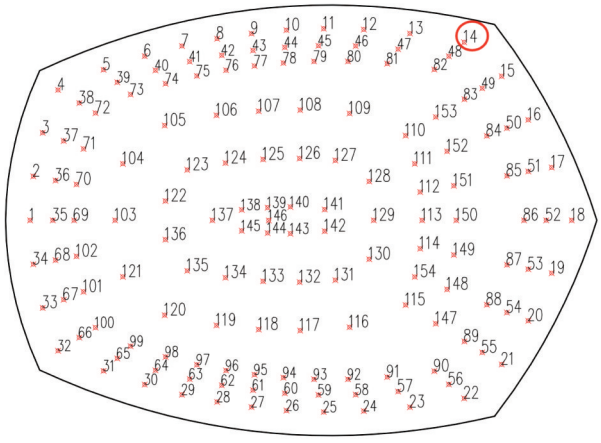


图14 游泳馆屋面测点布置图

Fig. 14 Arrangement of measuring points on the roof

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[18]，154个测点在36个风向角下的风压标准值均可按式(1)计算：

$$w_{ki,\theta}=\beta_{gzi}u_{si,\theta}u_{zi}w_0 \tag{1}$$

式中：$w_{ki,\theta}$为i点在θ风向角下的风荷载标准值；β_{gzi}和u_{zi}分别为i点的阵风系数和风压高度变化系数，两者的取值均遵循《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)[18]的相关规定；$u_{si,\theta}$为i点在θ风向角下的体型系数，根据《张家口奥林匹克体育中心风荷载研究报告：游泳馆部分》获得了36个风向角下游泳馆屋面154个测点的体型系数，图15给出了每个风向角下体型系数最小值及其对应的测点编号；w_0为基本风压，其可按式(2)计算。

$$w_0=\frac{1}{2}\rho v^2 \tag{2}$$

式中：ρ为空气密度，取1.25 kg·m^{-3}；v为标准气象观测场10 m高度处的风速大小。

风力等级可分为0～17级，每级风力对应不同的风速范围，将各级风对应的最大风速v_{max}代入到公式(2)，可得到不同风力等级下的基本风压w_0，结果如表6所示。

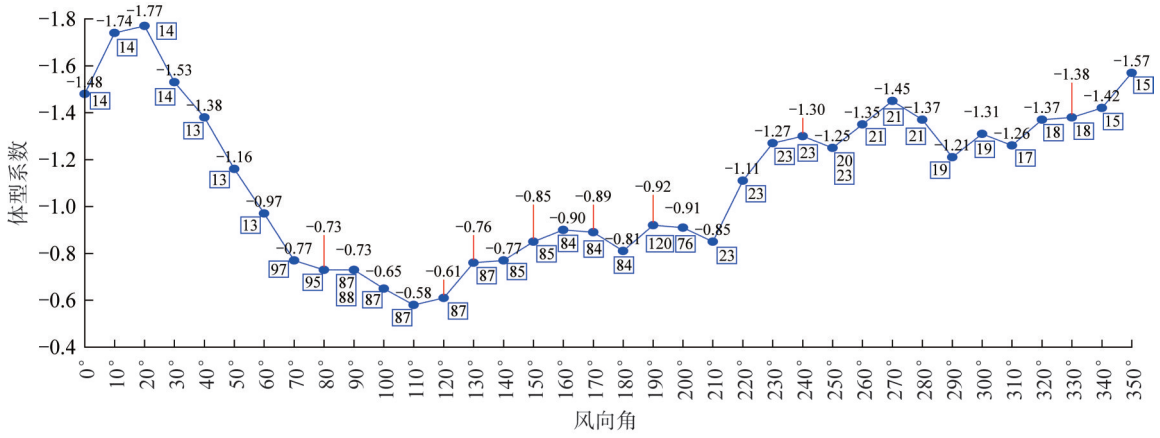
对于由公式(1)计算得到的风荷载标准值，首先找出每个风向角下的最大负风压值，然后对选出的36个负风压值再取最大值，即得到屋面的最不利负风压值w_{max}，0～17级风作用下游泳馆屋面的最不利负风压值如表6所示。最不利负风压值均发生在20°风向角下、14号测点处，14号测点恰好位于屋面檐口的位置，因此在进行建筑物屋面的设计及施工时，要加强屋面边缘悬挑区域的防护，以防屋面在强大的风吸力作用下发生风揭破坏。

固定游泳馆屋面单层卷材的长螺钉间距为0.25 m，单层卷材宽度为2 m，则单个长螺钉承担风荷载的面积A为0.5 m^2。把表6中0～17级风作用下游泳馆屋面的最不利负风压值分别代入公式(3)，可得到各级风荷载下单个长螺钉所受到的最大拉拔力F_{max}，具体数值如表6所示。

$$F_{max}=Aw_{max}=0.5w_{max} \tag{3}$$

由试验结果可知，试件组S-1.0的抗拔承载力均值为2.431 kN，即游泳馆屋面系统中长螺钉-压型钢板连接的抗拔承载力可视为2.431 kN。表6中14级大风下单个长螺钉所受最大拉拔力为2.423 kN，其小于2.431 kN；15级大风下单个长螺钉所受最大拉拔力为2.954 kN，其大于2.431 kN；由此可知，游泳馆屋面在0～14级风荷载作用下不会出现风揭破坏问题，而风力大于14级后，长螺钉将被拔出，屋面单层卷材被吹飞，保温板等构造层被吹落，屋面系统将发生风揭破坏。

在无法改变檩条间距和压型钢板厚度的情况下，可以通过减小固定单层卷材的长螺钉间距来提高屋面抗风揭承载力。游泳馆屋面采用的YX35-125-750规格压型钢底板的相邻波峰间距为0.125 m，若把固定单层卷材的长螺钉间距从原来的0.250 m缩小到0.125 m，则单个长螺钉分摊到的受荷面积减小，17级大风下单个长螺钉所受最大拉拔力为2.136 kN，小于试件组S-1.0的抗拔承载力均值2.431 kN，游泳馆屋面系统不会出现风揭破坏，是安全可靠的。



注：蓝色方框内的数字代表测点编号。

图15　各风向角对应的体型系数最小值及其测点编号

Fig. 15　Minimum shape coefficients corresponding to various wind direction angles and their corresponding measurement point numbers

表6　不同风力等级下单个长螺钉所受到的最大拉拔力

Table 6　The maximum pull-out force of a single long screw under different wind levels

风力等级	最大风速 v_{max}/(m·s^{-1})	基本风压 w_0/(kN·m^{-2})	最不利负风压值 w_{max}/(kN·m^{-2})	单个长螺钉所受到的最大拉拔力 F_{max}/kN
0	0.2	0.000	0.000	0.000
1	1.5	0.001	0.005	0.003
2	3.3	0.007	0.025	0.012
3	5.4	0.018	0.067	0.033
4	7.9	0.039	0.142	0.071
5	10.7	0.072	0.261	0.131
6	13.8	0.119	0.434	0.217
7	17.1	0.183	0.667	0.333
8	20.7	0.268	0.977	0.489
9	24.4	0.372	1.358	0.679
10	28.4	0.504	1.839	0.920
11	32.6	0.664	2.424	1.212
12	36.9	0.851	3.105	1.553
13	41.4	1.071	3.909	1.954
14	46.1	1.328	4.847	2.423
15	50.9	1.619	5.909	2.954
16	56.0	1.960	7.152	3.576
17	61.2	2.341	8.542	4.271

4　结论

（1）长螺钉-压型钢板连接的破坏模式为长螺钉被拔出。破坏机理为：与压型钢板接触挤压的初始螺纹率先脱出，钉孔扩张，钢板孔边发生了不可恢复的塑性变形和可恢复的弹性变形；下方螺纹依次继续挤压钢板孔边，随着脱出螺纹数量的增多，孔边的塑性变形逐步累积，使得长螺钉-压型钢板连接节点抵抗外荷载的能力逐渐降低，最终发生连接失效。

（2）螺纹宽度相同时，长螺钉-压型钢板连接的抗拔承载力随板厚增加呈非线性上升。板厚不超过1.0 mm时，承载力随板厚增加而增大的速率逐渐加快；板厚超过1.0 mm时，承载力增大速率变慢。螺纹宽度的增加对薄板试件抗拔承载力的提升效果优于对厚板试件抗拔承载力的提升效果。

(3) 对于深螺纹长螺钉-压型钢板连接,澳洲标准计算值最接近试验值,欧洲标准计算值偏于保守,最大低估幅度约为试验值的63.43%;对于浅螺纹长螺钉-压型钢板连接,中国规范计算值最接近试验值,欧洲标准计算值偏于保守,最大低估幅度约为试验值的49.02%,而按澳洲标准计算则偏于不安全,最大高估幅度约为试验值的27.17%。

(4) 游泳馆屋面在0~14级风作用下不会发生风揭破坏,而当风力大于14级后,长螺钉将被拔出,屋面单层卷材被吹飞,屋面系统将发生风揭破坏。

参考文献:

[1] 朱志远. 单层卷材屋面系统关键技术及其标准体系[J]. 中国建筑防水, 2012(15): 12-15, 19. DOI: 10.3969/j.issn.1007-497X.2012.15.003.
ZHU Zhiyuan. Key technology of single-ply membrane roof system and its standard system [J]. China Building Waterproofing, 2012(15): 12-15, 19. DOI: 10.3969/j.issn.1007-497X.2012.15.003.(in Chinese)

[2] 余奕帆, 高敏杰, 邢文清, 等.《单层卷材屋面系统抗风揭试验方法》国家标准解读[J]. 中国建筑防水, 2017(7): 9-14. DOI: 10.15901/j.cnki.1007-497x.2017.07.003.
YU Yifan, GAO Minjie, XING Wenqing, et al. Interpretation of national standard of "test methods for wind uplift resistance of single-ply roof assemblies" [J]. China Building Waterproofing, 2017(7): 9-14. DOI: 10.15901/j.cnki.1007-497x.2017.07.003.(in Chinese)

[3] SIVAPATHASUNDARAM M, MAHENDRAN M. Development of suitable test methods for the screw connections in cold-formed steel roof battens[J]. Journal of Structural Engineering, 2016, 142(6): 04016025. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001476.

[4] SIVAPATHASUNDARAM M, MAHENDRAN M. Experimental studies of thin-walled steel roof battens subject to pull-through failures[J]. Engineering Structures, 2016, 113: 388-406. DOI: 10.1016/j.engstruct.2015.12.016.

[5] 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. DOI: 10.1016/j.engstruct.2017.05.038.

[6] BASKARAN B A, PING KO S K, MOLLETI S. A novel approach to estimate the wind uplift resistance of roofing systems[J]. Building and Environment, 2009, 44(4): 723-735. DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.06.024.

[7] 李元齐, 帅逸群, 沈祖炎, 等. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗拉性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(12): 143-152. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.12.017.
LI Yuanqi, SHUAI Yiqun, SHEN Zuyan, et al. Experimental study on tension behavior of self-drilling screw connections for cold-formed thin-walled steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2015, 36(12): 143-152. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2015.12.017. (in Chinese)

[8] 周婷, 孙克肇, 陈志华, 等. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉厚钢板连接的抗剪及抗拔性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展, 2023, 25(7): 32-40. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.004.
ZHOU Ting, SUN Kezhao, CHEN Zhihua, et al. Experimental study on the shear and pull-out capacity of cold-formed thin-walled steel self-tapping screw thick plate connections[J]. Progress in Steel Building Structures, 2023, 25(7): 32-40. DOI: 10.13969/j.cnki.cn31-1893.2023.07.004.(in Chinese)

[9] 张文莹, 刘希宇, 赵金友, 等. 冷弯型钢自攻螺钉连接抗拉承载力设计方法比较分析[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(1): 95-104. DOI: 10.11936/bjutxb2020080005.
ZHANG Wenying, LIU Xiyu, ZHAO Jinyou, et al. Comparison of design methods for tensile capacity of screw connections in cold-formed steel structures[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(1): 95-104. DOI: 10.11936/bjutxb2020080005.(in Chinese)

[10] 邓露, 杨远亮, 刘定荣, 等. 冷弯薄壁型钢螺钉连接抗拔性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2021, 42(12): 144-153. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0032.
DENG Lu, YANG Yuanliang, LIU Dingrong, et al. Experimental study on pull-out capacity of screw connections for cold-formed thin-walled steel structures[J]. Journal of Building Structures, 2021, 42(12): 144-153. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2020.0032.(in Chinese)

[11] 吴启超. 机械固定式单层卷材屋面系统关键连接节点力学性能研究[D]. 广州: 广州大学, 2023.
WU Qichao. Research on mechanical properties of key connection joints of mechanically fixed single-ply membrane roofing system [D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2023. (in Chinese)

[12] SIVAPATHASUNDARAM M, MAHENDRAN M. New pull-out capacity equations for the design of screw fastener connections in steel cladding systems [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 122: 439-451. DOI: 10.1016/j.tws.2017.08.019.

[13] GB/T 228.1—2021 金属材料 拉伸试验 第1部分: 室温试验方法[S].
GB/T 228.1—2021 Metallic materials—Tensile testing—Part 1: Method of test at room temperature[S]. (in Chinese)

[14] GB/T 50018—2025 冷弯型钢结构技术标准[S].
GB/T 50018—2025 Technical standard for cold-formed steel structures[S]. (in Chinese)

[15] AS /NZS 4600: 2018 Cold-formed steel structures[S].

[16] BS 5950-5: 1998 Structural use of steelwork in building—Part 5: Code of practice for design of coldformed thin gauge sections[S].

[17] EN 1993-1-3 Eurocode 3: Design of steel structures—Part 1-3: General rules-Supplementary rules for cold-formed members and sheeting[S].

[18] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范[S].
GB 50009—2012 Load code for the design of building structures[S]. (in Chinese)