

文章编号:1673-2049(2018)06-0088-06

冷成型钢龙骨-石膏板自攻螺钉连接低周往复 荷载试验

陈 伟^{1,2}, 陈励纬^{1,3}, 陈盛根^{1,3}, 张翼东^{1,3}, 苏意然^{1,3}, 刘 彬⁴

(1. 公安部天津消防研究所 建筑消防工程技术公安部重点实验室, 天津 300381;

2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116;

3. 东南大学 混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 江苏 南京 210096;

4. 浙江建筑职业技术学院 建筑工程系, 浙江 杭州 311231)

摘要:开展了冷成型钢龙骨-石膏板自攻螺钉连接抗剪试验研究, 完成了 32 个典型试件低周往复荷载试验, 分析了螺钉边距和覆板层数对自攻螺钉连接抗剪强度的影响, 并提出了抗剪强度简化公式。结果表明: 由于石膏板沿板边与板内方向所具备的抗挤压能力不同, 试件正向加载抗剪强度普遍小于负向加载抗剪强度; 部分试件在达到抗剪强度峰值后荷载-位移曲线发生突变, 此时一般伴随石膏板迅速开裂或者螺钉拔出等现象; 试件主要呈现石膏板挤压破坏, 部分自攻螺钉存在少量倾斜现象; 螺钉边距为 10~25 mm 时, 试件抗剪强度随边距增大呈增大趋势; 螺钉边距超过 25 mm 时, 试件抗剪强度增长不明显; 双层覆板试件抗剪强度明显高于单层覆板试件, 但尚未达到单层覆板试件抗剪强度的 2 倍; 所提出的抗剪强度简化公式预测结果与试验结果吻合良好。

关键词:冷成型钢; 石膏板; 自攻螺钉连接; 抗剪性能; 低周往复荷载

中图分类号: TU317

文献标志码: A

Low Cyclic Load Experiment of Cold-formed Steel Self Tapping Screw Connection of Keel-plasterboard

CHEN Wei^{1,2}, CHEN Li-wei^{1,3}, CHEN Sheng-gen^{1,3}, ZHANG Yi-dong^{1,3},
SU Yi-ran^{1,3}, LIU Bin⁴

(1. Key Laboratory of Building Fire Protection Engineering and Technology of MPS, Tianjin Fire Research Institute of MPS, Tianjin 300381, China; 2. State Key Laboratory for Geomechanics & Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory of C & PC Structures of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China; 4. Department of Building Engineering, Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, Zhejiang, China)

Abstract: The experimental research on the cold-formed steel self tapping screw connection of keel-plasterboard was carried out. The low cyclic load experiments of 32 typical specimens were completed. The influences of screw margin and number of surface plates on the shear strength of self tapping screw connections were analyzed, and the simplified formula of shear strength was put forward. The results show that because of the different anti extrusion abilities of plasterboard along the edge of plate and the inside direction of plate, the shear strength of specimen under

收稿日期: 2018-01-18

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51508088); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20150605); 建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题项目(KFKT2015ZD05)

作者简介: 陈 伟(1985-), 男, 山东莱阳人, 中国矿业大学副教授, 工学博士, E-mail: chenweiseu@163.com。

positive load is generally less than that under negative load. The load-displacement curves of some specimens are abrupt after reaching the peak value of shear strength, which is generally accompanied by rapid cracking of plasterboard or bolt pull-out. The specimen mainly presents the extrusion damage of the plasterboard, and some self tapping screws have a small amount of tilts. When the screw margin is 10-25 mm, the shear strength of specimens increases with the increase of margin. When the screw margin exceeds 25 mm, the shear strength of specimens don't increase obviously. The shear strength of double surface plates specimen is significantly higher than that of single surface plate specimen, but has not reached 2 times of that of the single surface plate specimen. The predicted results by simplified formula of shear strength are in good agreement with the test results.

Key words: cold-formed steel; plasterboard; self tapping screw connection; shear performance; low cyclic load

0 引言

冷成型钢房屋建筑结构是天然的绿色与工业化建筑,它将冷成型钢构件相互连接形成轻钢骨架,而后再在轻钢骨架上通过自攻螺钉连接覆面板材形成主体结构。中国人口众多,土地资源紧张,又是世界上地震灾害最为严重的国家之一,发展冷成型钢房屋建筑符合中国基本国情^[1]。

在冷成型钢房屋建筑结构中,覆面板材与型钢龙骨之间的自攻螺钉连接方式对该类结构的承载力、抗弯及抗侧刚度均具有重要影响。已有研究大多针对轻钢骨架同侧单层覆板的自攻螺钉连接形式^[2-11],随着结构层数的增加,有必要在轻钢骨架的同侧采用双层覆板的自攻螺钉连接构造。然而,国内外对于冷成型钢-双层覆板自攻螺钉连接抗剪性能研究明显不足^[12-13]。此外,中国现行《冷弯薄壁型钢结构技术规范》^[14]给出了冷成型钢薄钢板-薄钢板自攻螺钉连接的抗剪强度计算公式,但尚未给出冷成型钢-覆面板材自攻螺钉连接的抗剪强度计算公式。美国 AISI 规范^[15]虽然给出了部分冷成型钢-覆面板材自攻螺钉连接的抗剪强度建议值,但仍未完善。

鉴于此,本文展开冷成型钢-石膏板自攻螺钉连接抗剪试验研究,论证了试验方案合理性,进而考察螺钉边距和覆板层数对自攻螺钉连接抗剪强度的影响,并提出了相应计算公式,以供设计参考。

1 试验设计

1.1 试验方案

本文试验试件的组成材料包括 12.5 mm 厚防火石膏板、1.2 mm 厚 Q345 冷成型钢龙骨以及公称

直径 4.2 mm 的沉头自攻自钻螺钉。国内外已有冷成型钢-建筑板材自攻螺钉连接抗剪性能研究主要采用以下 2 种试验方案:①多螺钉双剪连接试验方案(图 1);②单螺钉单剪连接试验方案(图 2)^[12]。

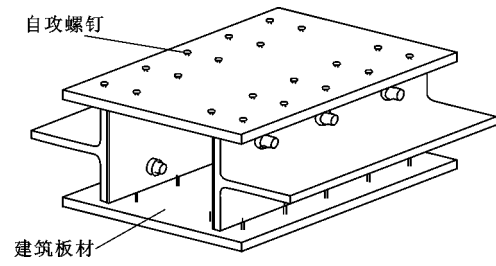


图 1 方案①试件
Fig. 1 Specimen in Program ①

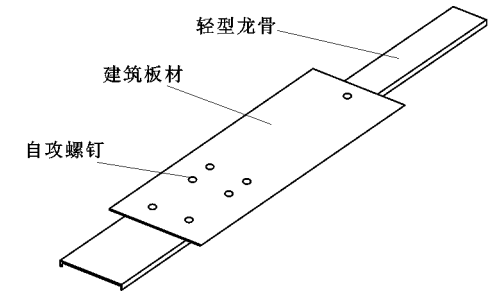


图 2 方案②试件
Fig. 2 Specimen in Program ②

在上述方案中,方案①更接近自攻螺钉在冷成型钢结构中的实际受力状态,但试件制作较为复杂,加工精度较难保证。相比之下,方案②优势在于试件制作简单,然而,方案②试件在试验中偏心受载,由此导致试验结果存在一定偏差。本文将方案①进行优化,即试件的一端规定为试验端,对称布置 4 颗自攻螺钉,试件的另一端为固定端,对称布置 16 颗自攻螺钉,两侧型钢龙骨再通过 6 处螺栓固定在加载用的钢板上(图 3)。

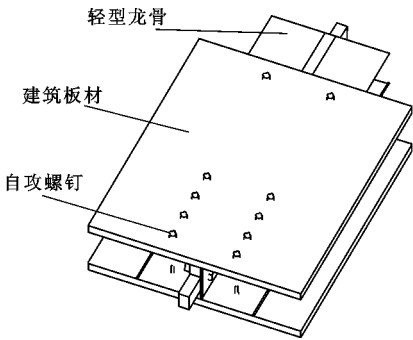


图 3 本文方案试件

Fig. 3 Specimen in Program of This Paper

该试验方案的优点在于,自攻螺钉无加载偏心,与实际受力状态相符。同时,试件将在试验端破坏,仅需保证试验端的加工精度,试件制作较为简便。

1.2 加载方式与试验编号

试验采用位移控制加载,对试件施加低周往复位移,如图 4 所示。单层覆板和双层覆板试件编号分别为 CR-SD x - n 和 CR-DD x - n ,其中 x 代表螺钉边距, n 代表同一组第 n 个试件,考察影响参数包括螺钉边距(螺钉中心距石膏板边缘的最短距离)和石膏板层数,其中,螺钉边距选取 10~30 mm,每 5 mm 设置 1 个试验组,石膏板层数分为单层覆板和双层覆板 2 种情况。试验共计 10 个工况,每个工况至少重复 3 次试验。

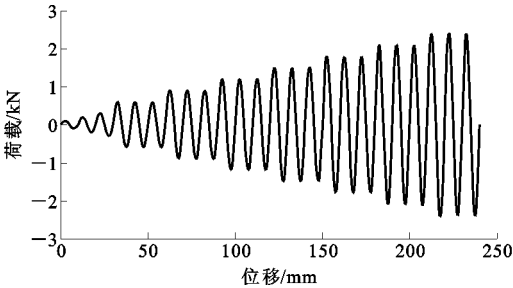


图 4 加载方式

Fig. 4 Loading Mode

2 试验结果

2.1 试验现象

2.1.1 单层覆板连接试件

单层覆板试件当螺钉边距较小(10 mm 和 15 mm)时,加载初期试件无明显变化。随着位移的增大,试件以螺钉为起点,在石膏板表面出现 2 条发散的 水平裂缝;同时,石膏板端部出现裂缝,并快速发展为石膏板边缘的局部豁口,破坏区域接近三角形状;随着位移进一步增大,破坏区域的石膏板发生脱落[图 5(a)]。

当螺钉边距为 20 mm 和 25 mm 时,试件破坏过程有所改变。随着位移的增大,螺钉上方石膏板表面出现鼓包现象,呈灯泡状[图 5(b)];在往复荷载作用下,由于螺钉的往复运动,石膏板表面出现槽形缺口;同时,石膏板底部逐渐出现微小裂缝,且裂缝随位移的增大逐步扩展贯通;此时,螺钉逐渐发生松动,并拔出石膏板,拔出过程伴随有螺钉螺纹与型钢龙骨摩擦产生的清脆响声。

当螺钉边距达到 30 mm 时,试验试件存在少量螺钉倾斜现象,且石膏板在螺钉位置附近存在因螺钉倾斜挤压而产生的弯折现象,如图 5(c)所示。



(a) 螺钉边距为10 mm和15 mm



(b) 螺钉边距为20 mm和25 mm



(c) 螺钉边距为30 mm

图 5 单层覆板试件破坏现象

Fig. 5 Failure Phenomenon of Specimens with Single-layer Sheathing

2.1.2 双层覆板连接试件

试验过程中,相同螺钉边距的双层覆板试件相对于单层覆板试件的破坏位移变小,且内层的石膏板一般先于外层石膏板发生破坏[图 6(a)]。螺钉边距为 10,15,20 mm 时双层覆板试件中内层石膏板底部最先出现裂缝。随着位移的增大,内层石膏板逐渐开裂,外层石膏板随后出现裂缝,同样存在螺钉崩出时与龙骨摩擦产生的清脆响声。在同侧 2 层石膏板均发生破坏后,螺钉连接丧失抗剪承载力,如图 6(b)所示。

此外,在双层覆板试件中,螺钉的松动现象较单

层覆板情况更为明显。在边距为 25 mm 和 30 mm 的双层覆板试件中,由于螺钉边距较大,致使试验过程中出现较大位移。此时,自攻螺钉可能会完全脱离石膏板。此外,在石膏板背面,螺钉的往复移动还通常会产生较长的槽形缺口[图 6(c)]。



(a) 内侧板先于外侧板破坏



(b) 双层石膏板均发生破坏



(c) 双层双面石膏板的背面长槽形缺口

图 6 双层覆板试件破坏现象

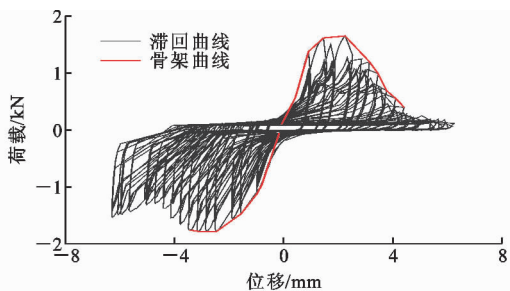
Fig. 6 Failure Phenomenon of Specimens with Double-layer Sheathing

2.2 试验结果曲线

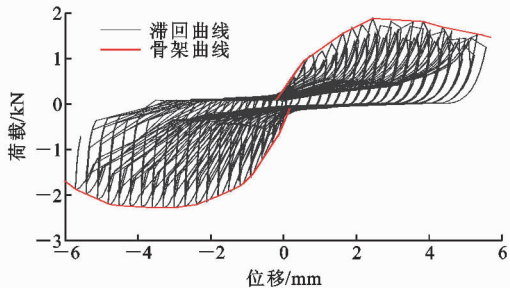
限于篇幅,图 7 给出 4 个典型试件的荷载-位移曲线。定义试验正向加载(荷载为正值)为试件的试验端处自攻螺钉朝向石膏板板边方向剪切滑动;反之,试验负向加载(荷载为负值)为试件的试验端处自攻螺钉朝向石膏板板内方向剪切滑动。

由图 7 可知:往复加载时,试件的正向加载抗剪强度普遍小于负向加载抗剪强度,该现象在螺钉边距为 10 mm 时尤为明显,这是由于石膏板沿板边方向与板内方向所具备的抗挤压能力不同所导致。此外,部分试件在达到抗剪强度峰值后荷载-位移曲线发生突变,此时一般伴随石膏板迅速开裂或者螺钉拔出等突发性现象。

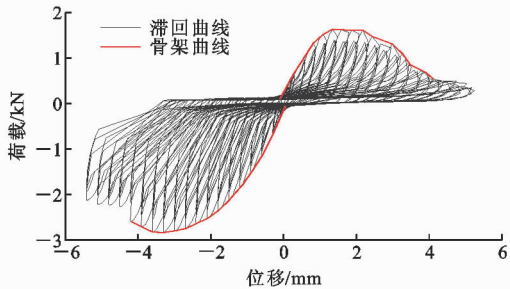
表 1 为各试验工况的平均试验结果。由于试验



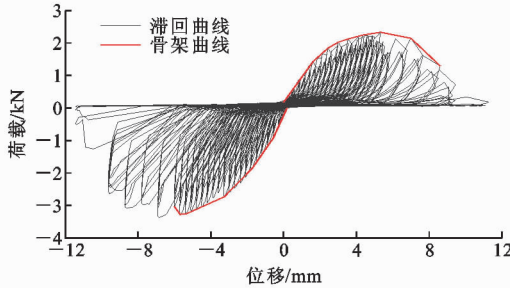
(a) 试件CR-SD15-2



(b) 试件CR-SD25-3



(c) 试件CR-DD10-1



(d) 试件CR-DD20-3

图 7 典型试件的荷载-位移曲线

Fig. 7 Load-displacement Curves of Typical Specimens

试件在试验端共有 4 个螺钉对称布置,因此单螺钉连接的抗剪强度为试件试验承载力的 1/4。此外,表 1 中试验结果数据的变异系数平均值为 0.09,试验稳定性良好。

3 分析与讨论

3.1 螺钉边距和覆板层数的影响

图 8 为各试件单螺钉抗剪强度与螺钉边距关系的试验结果。由图 8 和表 1 可知:

(1)连接试件的正向与负向抗剪强度均随螺钉边距增大呈增长趋势;当螺钉边距由 25 mm 变为 30

表 1 试件抗剪强度平均值

Tab. 1 Average Shear Strength of Specimens

试件编号	正向抗剪强度/N	负向抗剪强度/N
CR-SD10	284.75	488.75
CR-SD15	484.50	447.00
CR-SD20	459.25	593.75
CR-SD25	563.50	570.00
CR-SD30	477.50	517.00
CR-DD10	409.50	664.50
CR-DD15	541.50	802.00
CR-DD20	628.00	888.50
CR-DD25	621.50	940.50
CR-DD30	544.50	943.25

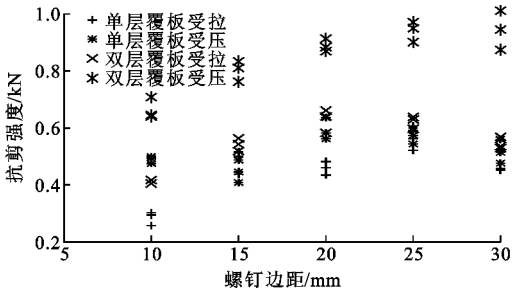


图 8 螺钉连接的抗剪强度

mm 时,单层覆板试件的正向与负向抗剪强度、双层覆板试件的正向抗剪强度均出现小幅度下降。

(2)双层覆板试件的抗剪强度明显高于单层覆板试件,但尚未达到单层覆板试件抗剪强度的 2 倍,其中单螺钉正向抗剪强度的平均增量约为 95 N,单螺钉负向抗剪强度平均增量约为 324 N。

3.2 简化公式

结合上述分析,提出冷成型钢-石膏板自攻螺钉连接的抗剪强度简化公式,如式(1)所示。偏于保守考虑,假定单层覆板试件的负向抗剪强度与正向抗剪强度一致。

$$P=\alpha_d[326+16.2(d-10)] \tag{1}$$

式中: P 为冷成型钢龙骨-石膏板连接试件的单螺钉抗剪强度; d 为螺钉边距,当螺钉边距大于 25 mm 时取 25 mm; α_d 为板层数调整系数,单层覆板螺钉连接时, α_d 取 1.0,双层覆板螺钉连接计算正向抗剪强度时, $\alpha_d=1.5-0.02d$,计算负向抗剪强度时, $\alpha_d=2.2-0.02d$ 。

图 9 为简化公式预测结果与试验结果比较。单层覆板试件采用同一线性预测曲线;双层覆板正向、双层覆板负向试件采用不同的非线性抗剪强度预测曲线。图 10 为简化公式预测结果精度分析,预测结

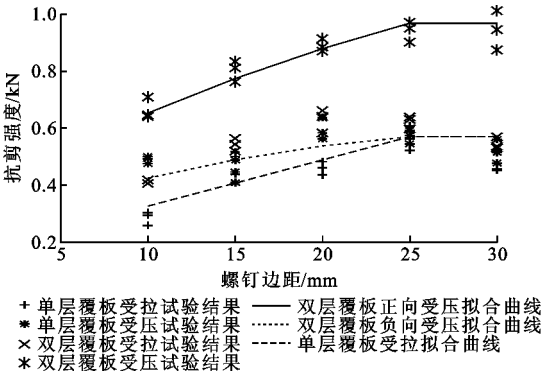


图 9 简化公式预测结果和试验结果比较

Fig. 9 Comparison Between Predicted Results of Simplified Formula and Experimental Results

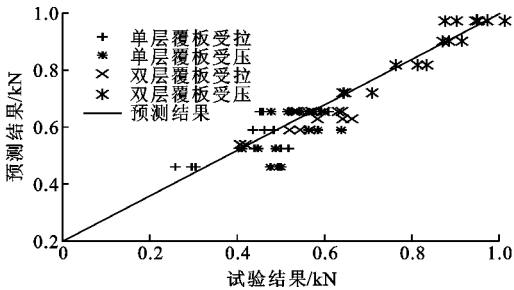


图 10 简化公式预测结果精度分析

Fig. 10 Precision Analysis of Predicted Results of Simplified Formula

果与试验结果比值的平均离散系数为 13.3%,满足工程精度要求。

4 结 语

(1)试验试件主要呈现石膏板挤压破坏,部分试件的自攻螺钉存在倾斜现象。不同螺钉边距的试件破坏现象存在一定差异性。

(2)自攻螺钉连接的抗剪强度随螺钉边距增大呈增长趋势,但当螺钉边距超过 25 mm 时,抗剪强度增长趋势不明显。

(3)双层石膏板覆面连接的抗剪强度明显高于单层覆板情况,尤其负向抗剪强度增幅明显,但尚未达到单层覆板试件抗剪强度的 2 倍。

(4)提出了冷成型钢-石膏板自攻螺钉连接的抗剪强度简化公式,可考虑覆板层数和螺钉边距的影响,与试验结果吻合良好。

参考文献:

References:

[1] 叶继红. 多层轻钢房屋建筑结构——轻钢龙骨式复合剪力墙结构体系研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(6): 1-9.

- YE Ji-hong. An Introduction of Mid-rise Thin-walled Steel Structures; Research Progress on Cold-formed Steel Framed Composite Shear Wall Systems [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48 (6): 1-9.
- [2] FULOP L A, DUBINA D. Design Criteria for Seam and Sheeting-to-framing Connections of Cold-formed Steel Shear Panels[J]. Journal of Structural Engineering, 2006, 132(4): 582-590.
- [3] FIORINO L, DELLA CORTE G, LANDOLFO R. Experimental Tests on Typical Screw Connections for Cold-formed Steel Housing [J]. Engineering Structures, 2007, 29(8): 1761-1773.
- [4] NITHYADHARAN M, KALYANARAMAN V. Experimental Study of Screw Connections in CFS-calcium Silicate Board Wall Panels[J]. Thin-walled Structures, 2011, 49: 724-731.
- [5] PETERMAN K D, NAKATA N, SCHAFER B W. Hysteretic Characterization of Cold-formed Steel Stud-to-sheathing Connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101: 254-264.
- [6] 董军, 夏冰青, 马宏, 等. NAFC、LCFC板及其与轻钢龙骨自攻螺栓连接性能[J]. 南京工业大学学报, 2002, 24(5): 12-15.
- DONG Jun, XIA Bing-qing, MA Hong, et al. Researches on NAFC and LCFC Plates and Their Screw Connections with Light-gauge Steel Members [J]. Journal of Nanjing University of Technology, 2002, 24 (5): 12-15.
- [7] 石宇, 周绪红, 聂少锋, 等. 冷弯薄壁型钢结构住宅螺钉连接的抗剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(增1): 184-188.
- SHI Yu, ZHOU Xu-hong, NIE Shao-feng, et al. Experimental Investigation on Shear Behavior of Screw Connections in Cold-formed Steel Residential Building [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31 (S1): 184-188.
- [8] 李元齐, 马荣奎, 何慧文. 冷弯薄壁型钢与结构用 OSB 板自攻螺钉连接性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(5): 48-56.
- LI Yuan-qi, MA Rong-kui, HE Hui-wen. Experimental Study on Behavior of Screw Connections for Cold-formed Thin-walled Steel and Structural OSB Boards [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(5): 48-56.
- [9] 卢林枫, 张亚平, 方文琦, 等. 冷弯薄壁型钢自攻螺钉连接抗剪性能试验研究及数值分析 II: 数值分析[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(8): 3493-3502.
- LU Lin-feng, ZHANG Ya-ping, FANG Wen-qi, et al. Experimental Investigation and Numerical Analysis on Shear-bearing Capacity for Self-drilling Screw Connections of Cold-formed Thin-walled Steel II: Numerical Analysis[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(8): 3493-3502.
- [10] YE J H, WANG X X, ZHAO M Y. Experimental Study on Shear Behavior of Screw Connections in CFS Sheathing [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 121: 1-12.
- [11] ROGERS C A, HANCOCK G J. Screwed Connection Tests of Thin G550 and G300 Sheet Steels[J]. Journal of Structural Engineering, 1999, 125(2): 128-136.
- [12] CHEN W, YE J H, CHEN T. Design of Cold-formed Steel Screw Connections with Gypsum Sheathing at Ambient and Elevated Temperatures[J]. Applied Sciences, 2016, 6(9): 248-263.
- [13] CHEN W, YE J H, BAI Y, et al. Thermal and Mechanical Modeling of Load-bearing Cold-formed Steel Wall Systems in Fire[J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(8): A4013002.
- [14] GB 50018—2002, 冷弯薄壁型钢结构技术规范[S]. GB 50018—2002, Technical Code of Cold-formed Thin-wall Steel Structures[S].
- [15] AISI-S400-15, North American Standard for Seismic Design of Cold-formed Steel Structural Systems[S].