

引用本文:袁涛涛,隋璐,吴函恒,等.钢带加强螺钉孔型冷弯型钢组合墙体抗震性能[J].建筑科学与工程学报,2021,38(3):43-52.
YUAN Tao-tao,SUI Lu,WU Han-heng,et al. Seismic Behavior of Cold-formed Steel Framing Walls with Strengthened Steel Strips in Screw Holes[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2021,38(3):43-52.

DOI:10.19815/j.jace.2020.07001

钢带加强螺钉孔型冷弯型钢组合墙体抗震性能

袁涛涛¹,隋璐²,吴函恒²,续丛丛²

(1. 中铁第一勘察设计院集团有限公司,陕西 西安 710043; 2. 长安大学 建筑工程学院,陕西 西安 710061)

摘要:为研究钢带加强螺钉孔对冷弯型钢组合墙体抗震性能的影响,对 3 个冷弯型钢组合墙体足尺试件进行低周反复加载试验,分析该加强形式对冷弯型钢组合墙体的破坏模式、侧向刚度、承载能力、延性以及耗能性能的影响。同时采用有限元软件 OpenSEES 对墙体进行数值分析。结果表明:钢带加强螺钉孔型冷弯型钢组合墙体的破坏形式仍然为螺钉连接失效和板缝滑移,钢带能够使覆面板的螺钉连接处得到加强,从而提高组合墙体的抗侧刚度和受剪承载力;与螺钉孔未进行钢带加强的墙体试件(HS-140-A)相比,2 个加强式的组合墙体试件(HS-140-B,HS-140-C)受剪承载力分别提高了 32.5%,58.1%,抗侧刚度分别提高了 31.7%,59.3%;螺钉孔由钢带加强后,墙体试件的耗能性能显著提升;3 个试件的延性系数均大于 8,呈现出良好的变形能力;有限元模型能反映螺钉连接非线性行为对墙体滞回性能的影响,有限元分析结果与试验结果的相对误差控制在 10%以内,模型具有较好的精度。

关键词:冷弯型钢组合墙体;加强式钢带;抗震性能;低周反复加载试验;自攻螺钉

中图分类号:TU392.5

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)03-0043-10

Seismic Behavior of Cold-formed Steel Framing Walls with Strengthened Steel Strips in Screw Holes

YUAN Tao-tao¹, SUI Lu², WU Han-heng², XU Cong-cong²

(1. China Railway First Survey and Design Institute Group Co., Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract: In order to study the impact of strengthened steel strips in screw holes on seismic behavior of cold-formed steel (CFS) framing walls, three full scale specimens of CFS framing walls were tested subjected to low cyclic loads. The influence of the strengthening form on the failure mode, lateral stiffness, bearing capacity, ductility and energy dissipation performance of CFS framing walls was analyzed. The finite element software OpenSEES was used for the numerical analysis of the wall. The results show that the failure mode of the cold-formed steel framing walls with strengthened steel strips in screw holes is still screw connection failure and sheathing seam slip. The steel strip can strengthen the screw connection of the cladding panel, so as to improve the lateral stiffness and shear capacity of the composite wall. Compared with the

收稿日期:2020-08-01

基金项目:国家自然科学基金项目(51508029)

作者简介:袁涛涛(1982-),男,河南漯河人,高级工程师,E-mail:285522786@qq.com。

通信作者:吴函恒(1984-),男,河南平顶山人,副教授,工学博士,E-mail:wuhanheng@163.com。

specimen without steel strip reinforcement in screw hole(HS-140-A), the shear capacity of the strengthened specimens(HS-140-B, HS-140-C) is improved by 32.5% and 58.1%, and their lateral stiffness is increased by 31.7% and 59.3%. The energy dissipation capacity of the specimens was significantly improved after enhancement of screw holes by the steel strips. The ductility coefficients of the three specimens are greater than 8, which shows good deformation ability. The finite element models can represent the effect of screw connections nonlinear behaviour on hysteretic performance of the walls. The relative error between the finite element analysis results and the experimental data is controlled within 10%, and the model has good accuracy.

Key words: cold-formed steel framing wall; strengthened steel strip; seismic behavior; low cyclic loading test; screw hole

0 引言

近年来,中国大力提倡发展“绿色”建筑,不断提高建筑的装配化程度。冷弯型钢房屋住宅体系顺应了“绿色装配化”的发展趋势^[1],较传统住宅体系,该体系具有“绿色、环保、节能、抗震”等优良性能。随着《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[2]和《冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准》(JGJ/T 421—2018)^[3]的相继颁布,冷弯型钢房屋结构在中国得到迅速发展。

在冷弯型钢房屋结构中,冷弯型钢组合墙体为主要的水平承重构件。为充分考察墙体在水平荷载作用下的受力性能,美国、澳大利亚、日本、中国等学者对冷弯型钢组合墙体试件进行了系统的试验研究和理论分析^[4-11],深入考察构造方式、龙骨尺寸、龙骨间距、螺钉间距、面板材料和支撑配置等因素的影响。Fiorino 等^[12]对石膏板冷弯型钢墙体的抗震性能进行分析;Yu 等^[13]对 1.83 m 和 2.44 m 宽的冷弯型钢钢板剪力墙进行单调加载和低周反复加载试验研究,并给出构造建议;Zeynalian 等^[14]对水泥纤维板冷弯型钢组合墙体开展试验研究,并给出了结构影响系数 R 的建议值;Gao 等^[15]对冷弯型钢竹胶板覆面墙体进行水平加载试验,给出了名义抗剪强度的建议值。闫维明等^[16]通过低周反复加载试验研究了基于锁铆连接的冷弯型钢组合墙体的抗震性能。为了提高冷弯型钢组合墙体的抗剪刚度和承载力,王宇航等^[17]对带斜撑冷弯薄壁型钢墙体进行抗震性能试验研究,结果表明斜撑能有效提高墙体的抗侧力性能;Wu 等^[18-19]对脱硫石膏改性材料填充冷弯型钢组合墙体进行了试验研究,结果表明内填材料能显著提高墙体的受剪承载力和抗侧刚度。刘斌等^[20]对喷射砂浆冷弯薄壁型钢复合式墙体进行

了试验,研究了无支撑和有交叉支撑 2 种不同骨架形式对墙体抗震性能的影响。此外,叶继红等^[21]通过 OpenSEES 有限元软件研究冷弯薄壁型钢复合墙体在低周往复加载下的滞回性能,并提出了墙板螺钉的简化力流模型。

对于冷弯型钢组合墙体,墙面板作为“应力蒙皮”对冷弯型钢龙骨柱提供支撑作用,使墙体获得抗侧刚度和承载力。国内外学者研究发现:在水平力作用下,组合墙体的主要破坏特征为墙面板与立柱之间的螺钉连接破坏和墙面板拼缝滑移。当发生拼缝滑移或螺钉连接破坏时,墙面板自身并不能充分发挥其蒙皮支撑作用。为解决这一问题,本文提出一种钢带加强螺钉孔型冷弯型钢组合墙体(图 1),利用下料废弃钢带在墙面板外部对螺钉进行加强,以期改善螺钉孔的受力特性,从而提高组合墙体的刚度和承载力。

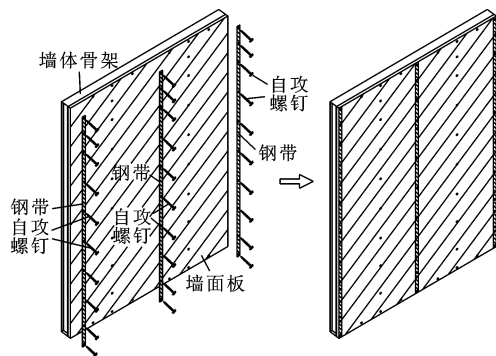


图 1 钢带加强螺钉孔型冷弯型钢组合墙体

Fig. 1 Cold-formed Steel Framing Wall with Strengthened Steel Strip in Screw Hole

本文为研究钢带加强螺钉孔型冷弯型钢组合墙体在循环水平荷载下的破坏形式、受力特点和耗能性能,设计了 3 个足尺试件进行水平低周反复加载试验,并提出了基于 OpenSEES 的数值模型,为今

后该结构体系的理论研究与工程应用提供参考。

1 试验概况

1.1 试件设计

本文针对冷弯型钢组合墙体共设计 3 个足尺试件

件,其中 HS-140-A 为对比试件,未对螺钉进行加强;HS-140-B 为钢带加强龙骨螺钉的墙体试件;HS-140-C 为钢带加强墙面板拼缝处螺钉的墙体试件,3 个试件的详细构造如图 2 所示,试件的设计和制作均参照《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》

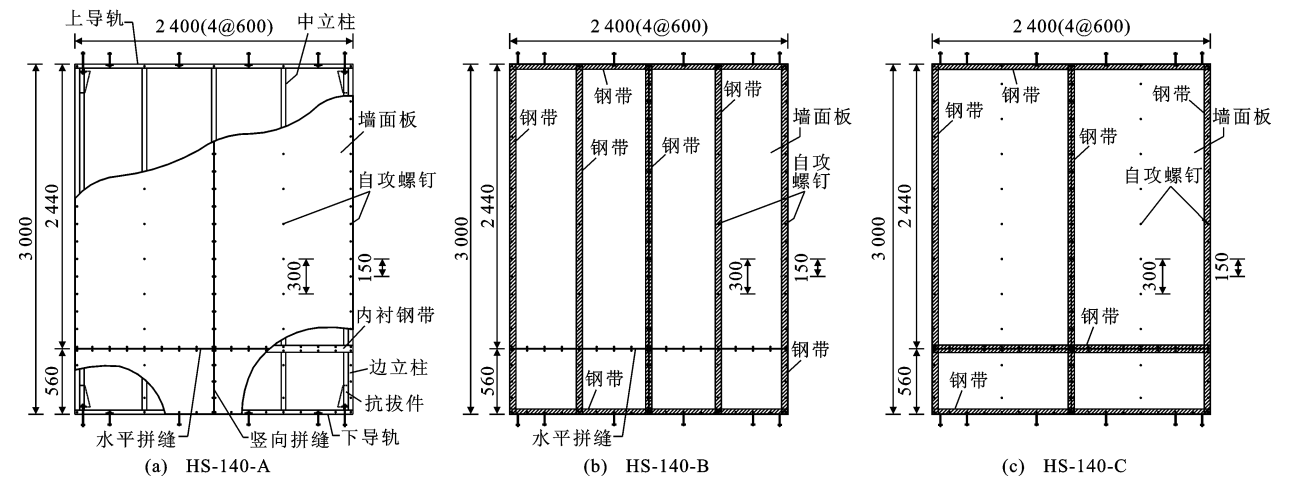


图 2 试件几何尺寸及构造(单位:mm)

Fig. 2 Construction and Geometric Dimension of Specimens (Unit:mm)

(JGJ 227—2011)^[2]建议的试验方法。

所有冷弯薄壁型钢组合墙体试件的规格均为高 3 000 mm,宽 2 400 mm,其中墙体试件的立柱采用 C 形冷弯薄壁型钢构件,规格为 C 140×40×15×1.5,立柱长 3 000 mm,间距均为 600 mm。C 形冷弯薄壁型钢立柱上下端嵌套 U 形截面冷弯薄壁型钢导轨,其规格为 U144×35×1.5,长 1 200 mm。墙面板为双面石膏板,其中石膏板由尺寸分别为 2 440 mm×1 200 mm 和 560 mm×1 200 mm 各 4 块板材拼接而成,厚度均为 12 mm,在组合墙体距底部 560 mm 的水平拼缝处内设扁钢衬带(长 2 400 mm,宽 60 mm,厚 1.2 mm),以便于墙面板的连接。在 C 形立柱与 U 形导轨相交部位以及扁钢衬带与 C 形立柱相交部位均采用 ST4.8 级自攻自钻螺钉连接。纸面石膏板采用 ST4.2 级自攻螺钉与墙体骨架连接。为加强边柱、中柱以及水平和竖向拼接处的螺钉孔而设置钢带,钢带尺寸分别为:3 000 mm×60 mm×1.5 mm,3 000 mm×40 mm×1.5 mm,2 400 mm×60 mm×1.5 mm,3 000 mm×60 mm×1.5 mm;竖向墙面板拼缝处所用钢带尺寸为 3 000 mm×60 mm×1.5 mm,水平墙面板拼缝处采用 2 400 mm×60 mm×1.5 mm 钢带。螺钉的间距为 150 mm(周边)和 300 mm(内部)。

墙体试件骨架及钢带采用冷弯薄壁型钢镀锌板材,基材厚度为 1.5 mm,单侧镀层厚度为 20~30

μm,拉伸试验参照《金属材料拉伸试验第 1 部分:室温试验方法》(GB/T 228.1—2010)^[22]进行,得到的结果见表 1。

表 1 镀锌钢板的力学性能

Tab. 1 Mechanical Properties of Galvanized Steel Sheet

厚度 <i>t</i> /mm	弹性模量 <i>E</i> /10 ⁵ MPa	屈服强度 <i>f_y</i> /MPa	抗拉强度 <i>f_u</i> /MPa	伸长率 <i>l</i> /%	泊松比 <i>ν</i>
1.5	2.18	285.3	388.9	33	0.3

1.2 试验装置与加载制度

采用 MTS 电液伺服作动器进行水平加载。采用 500 kN 的油压千斤顶进行竖向加载,在门架大梁和竖向加载装置间设置聚四氟乙烯板消除摩擦力;L 形水平反力墙的主墙尺寸为 12.5 m×18 m×2.5 m,其基底总承受剪力为 4 000 kN,总承受弯矩为 37 000 kN·m。试验数据由 500 通道 IMP 输力强数据采集仪采集。试件所承受的水平荷载通过顶梁均匀传递到墙体顶部。为防止试件发生平面外失稳并模拟楼板对墙体的约束,在试件顶部设置侧向滚动支撑。试件采用钢结构底梁,底梁四周与加载平台采用螺栓固定,在墙体 4 个角部布置抗拔件,将顶梁和底梁用 M16 螺栓固定连接,墙体上下导轨设有间距 600 mm 的 M12 螺栓,M12 螺栓与顶梁、底梁固定连接。试验加载装置如图 3 所示。

首先施加恒定竖向荷载,取值参照层高为 3 m 的 3 层住宅底层墙体的荷载值。经计算,其荷载值

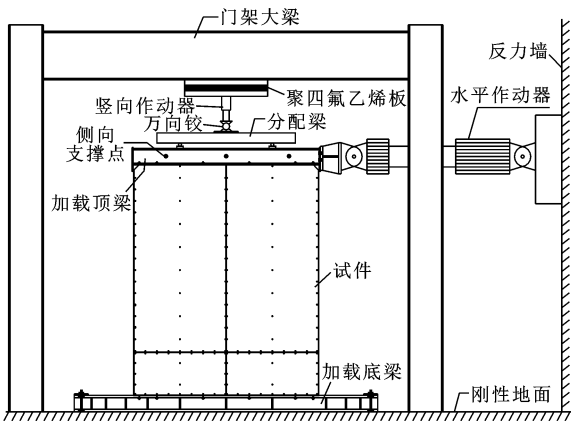


图 3 试验装置

Fig. 3 Test Setup

约为 80 kN。将竖向荷载加载到位,开始施加水平荷载,试验采用位移增量控制加载。试验开始时,以 2 mm 为增量,每级循环 1 次;当位移达到 10 mm 时,改为以 5 mm 为增量,每级进行 3 次循环;当位移超过 40 mm 时,将增量改为 10 mm,每级进行 3 次循环;当加载至水平荷载下降到荷载最大值 P_t 的 85% 后,再进行 1 次循环后停止加载。

1.3 测点布置与量测内容

位移计按图 4 进行布置,以得到组合墙体的净剪切变形值。位移计 D1,D2 分别测试水平方向底座相对地面及试件相对底座的位移值;D3,D4 分别测试竖直方向底座相对地面的位移值;D5 测试墙体的平面外位移值;D6,D7 分别测试试件垂直方向相对底座的位移值;D9,D8 分别测试试件加载顶梁和试件顶部随作动器变化的位移值。

2 试验现象及破坏特征

2.1 试件 HS-140-A

由于石膏板为脆性材料,在反复拉伸和挤压下容易发生破坏。面板的十字拼缝处作为组合墙体的

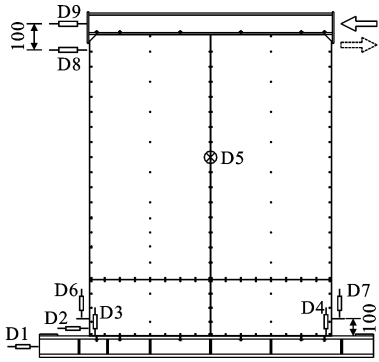


图 4 位移计布置(单位:mm)

Fig. 4 Arrangement of Displacement Meters (Unit:mm)

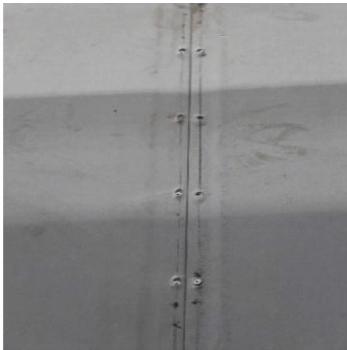
最薄弱部位,在循环荷载作用下容易产生拉压应力。以位移计 D9 的数据为准,当墙体位移加载至 -12 mm 时,螺钉孔变大,部分螺钉开始内陷,十字拼缝处的石膏板开始掉渣[图 5(a)];继续施加荷载,当加载位移至 16 mm 时,石膏板连带螺钉在拼缝处一起发生错动,且螺钉内陷[图 5(b)],十字拼缝处石膏板竖向错动达到 6 mm,水平错动 2 mm;当位移加至 20 mm 时,螺钉孔显著增大,螺钉愈发倾斜,并与石膏板发生错位,螺钉孔周围石膏板鼓起,石膏板开裂[图 5(c)],石膏板竖直方向螺钉孔变大,此时水平荷载达到峰值,此后荷载随着水平位移的增加逐渐减小;当加载位移至 32 mm 时,石膏板在十字拼接处完全挤压开裂,螺钉最大程度地倾斜内陷,使螺钉孔壁损坏严重;当加载位移至 44 mm 时,试件各部位破坏程度加剧,并伴有连续响声;当加至 68 mm 时,石膏板四周边上螺钉均明显内陷进入板内部,石膏板十字拼缝处显著破坏,水平缝开口达 35 mm。继续增加位移,使水平荷载降低到 85% P_t ,则试验完成。

2.2 试件 HS-140-B

试件 HS-140-B 为钢带加强龙骨螺钉孔型墙体



(a) 十字拼缝处石膏板挤碎



(b) 竖向拼缝处螺钉错位内陷



(c) 水平拼缝处端部石膏板开裂

图 5 试件 HS-140-A 的试验现象

Fig. 5 Test Phenomenon of Specimen HS-140-A

试件,其试验现象及破坏特征如下:对墙体试件施加位移荷载,当水平位移达 8 mm 时,石膏板受到螺钉的挤压,沿水平拼缝处两侧的螺钉孔在水平方向开始挤压扩张;随着位移的增加,十字拼缝处的石膏板上板和下板在水平方向产生 2 mm 相对位移,下部石膏板角部位置出现拉裂,并沿钢带发生斜裂缝,随后拼缝处其他角部也相继破坏[图 6(a)];位移达到 35 mm 时,石膏板水平错动 10 mm,十字拼缝处面板被挤碎、破坏严重[图 6(b)];随后,螺钉孔周围石膏板开裂严重,大部分螺钉失效,底部端部螺钉被拔断,钢带鼓起[图 6(c)];在位移继续增大过程中,墙面板出现明显的相对转动[图 6(d)],直到位移加载至 90 mm,墙体出现较大倾斜,墙面板因为墙体内部龙骨部分上的螺钉连接没有被破坏而未发生脱落。试验结束后,除去墙面板观察内部,龙骨位置的螺钉孔几乎未被破坏,边柱及上下导轨的螺钉孔出现较大的旷动,拼缝处的螺钉孔破坏最为严重,石膏被拉裂,螺钉完全失效[图 6(e)],部分螺钉倾斜、被拔断。边柱柱脚翼缘部分发生局部屈曲[图 6(f)]。

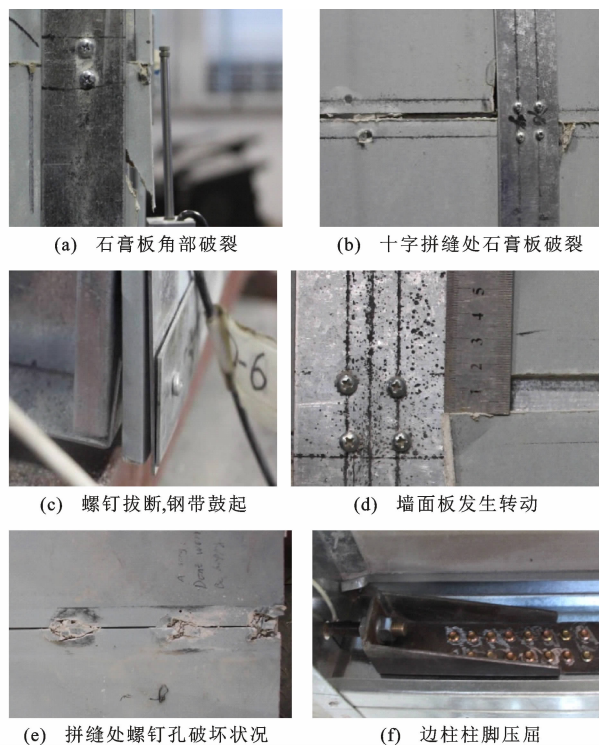


图6 试件 HS-140-B 的试验现象

Fig. 6 Test Phenomenon of Specimen HS-140-B

2.3 试件 HS-140-C

试件 HS-140-C 为钢带加强墙面板拼缝处螺钉孔型墙体试件,其试验现象及破坏特征如下:当位移施加到 15 mm 时,中间立柱的螺钉孔发生扩张[图 7(a)];继续施加荷载,当位移达到 35 mm 时,墙体

角部石膏板被拉裂[图 7(b)];随着位移的增加,十字拼缝处的 4 个角部均发生破坏[图 7(c)];试验结束时,墙体各角部均被拉裂,中间立柱处上部的少数螺钉孔发生较大的旷动,大多数嵌入石膏板内[图 7(d)];拆除面板后发现边柱处螺钉孔旷动较大,拼缝处石膏板在推拉过程中已经完全破碎[图 7(e)];墙体端部部分螺钉被拔断,边柱翼缘局部屈曲[图 7(f)]。

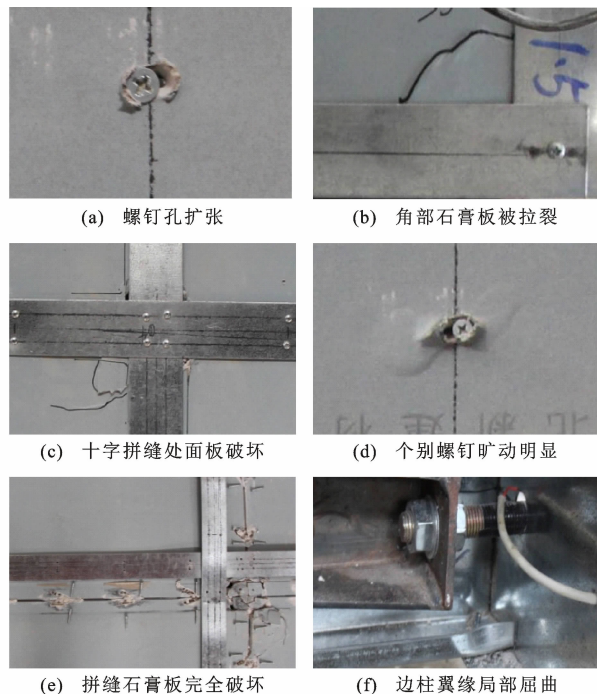


图7 试件 HS-140-C 的试验现象

Fig. 7 Test Phenomenon of Specimen HS-140-C

2.4 试件破坏特征

试件 HS-140-A 为螺钉孔未进行加强墙体试件,其破坏特征为:冷弯型钢立柱与石膏板之间自攻螺钉连接的剪切破坏,墙面板竖向拼缝和水平拼缝处产生滑移,最终墙面板不能充分发挥应力蒙皮作用而导致墙体失效。

试件 HS-140-B 为钢带加强龙骨螺钉孔型墙体试件,其破坏特征为:墙面板拼缝处冷弯型钢立柱与石膏板之间自攻螺钉连接的破坏,拼缝滑移导致墙体失效。

试件 HS-140-C 为钢带加强墙面板拼缝处螺钉孔型墙体试件,其破坏特征为:墙面板拼缝处石膏板的拉裂与挤压破坏导致墙体失效。

3 试验结果和分析

3.1 滞回曲线

按照图 4 所示进行位移计布置,测得墙体试件的剪切变形值,根据《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技

术规程》(JGJ 227—2011)^[2] 建议的试验方法,得到墙体试件在每个阶段的剪切变形值 Δ 。图 8 给出试件水平荷载 P 与剪切变形值 Δ 的滞回曲线,其中 δ 为试件的层间位移角。

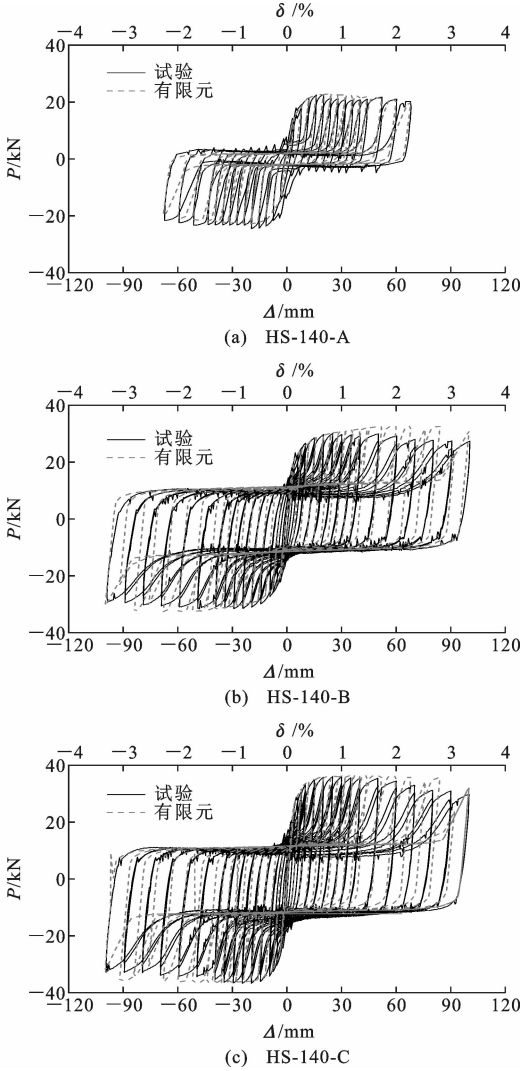


图 8 试件的滞回曲线
Fig. 8 Hysteretic Curves of Specimens

3 个试件的滞回曲线形状较为相近,试验开始阶段,水平荷载-侧移曲线均呈梭形,滑移量基本为 0;随着水平位移的不断增大,滑移量不断增大,力与位移曲线呈反 S 形发展。墙体试件在低周往复荷载作用下,不断推、拉,致使试件出现滑移现象,而卸载存在残余变形。由于位移和循环次数不断增加,墙体的刚度不断退化。当荷载达到峰值后,承载力并未由于位移增加而发生显著下降,而墙体滑移量较大,远大于规范中 $H/300$ (H 为墙高) 的规定,致使滞回环的水平段很长,曲线呈 Z 形,不能继续承载。

3.2 骨架曲线、承载力、变形性能及延性

根据墙体剪切变形值 Δ 和水平荷载 P 之间的

关系,可以绘制得到墙体的骨架曲线(图 9)。可以看出:在微小变形下,3 块墙体均呈现出一定程度的非线性,而无明显的屈服点。依据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[23] 规定,当荷载逐渐降低至最大值 P_{\max} 的 85% 时,此时相对应的荷载和位移即为破坏荷载 P_u 和相应位移 Δ_u ;根据等面积法确定屈服荷载 P_y ,相应的侧移即为屈服点位移 Δ_y ,如图 10 所示(Δ_{\max} 为峰值点对应的位移)。

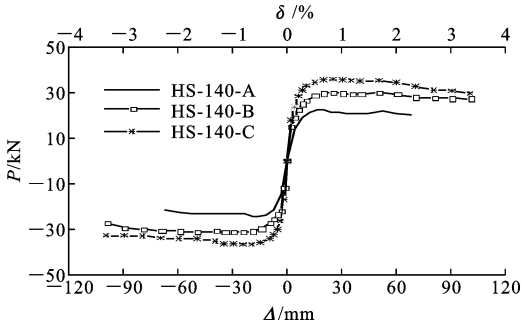


图 9 试件骨架曲线
Fig. 9 Skeleton Curves of Specimens

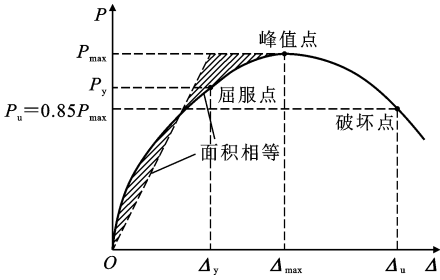


图 10 特征点确定方法

Fig. 10 Definition Method of Characteristic Points

根据《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[2] 的建议,取墙体侧移为 $1/300$ 层高时对应的割线刚度,作为墙体的弹性抗侧刚度;另外,延性系数根据 $\mu = \Delta_u / \Delta_y$ 得到,其大小反映了结构的塑性变形性能,是评价结构抗震性能的一个重要参数。根据上述数据处理原则得到各墙体试件主要特征点的试验数据,见表 2。通过表 2 可以得出以下结论:

(1) 利用钢带对螺栓钉孔进行加强后,组合墙体的受剪承载力显著提高。3 个试件的荷载最大值 P_{\max} 分别为 22.74, 30.13, 35.95 kN, 试件 HS-140-B 和 HS-140-C 的承载力相对于 HS-140-A 分别提高了 32.5%, 58.1%。

(2) 由于钢带对墙体薄弱部位的加强,使墙面板能够充分发挥“蒙皮作用”,致使试件的抗侧刚度得到了明显的提高,3 个试件的弹性抗侧刚度依次为

表 2 骨架曲线特征点实测结果

Tab. 2 Measured Results of Characteristic Points on Skeleton Curves

试件编号	分析方法	屈服点		峰值点		破坏点		P_{300}/kN	$K_{300}/(\text{kN} \cdot \text{rad}^{-1})$	μ
		P_y/kN	Δ_y/mm	P_{\max}/kN	Δ_{\max}/mm	P_u/kN	Δ_u/mm			
HS-140-A	有限元	20.22	9.80	22.82	20.00	20.03	68.00	20.10	2.01	6.94
	试验	21.30	10.58	24.25	20.33	21.47	69.54	22.00	2.20	6.57
	相对误差/%	5.07	7.37	5.90	1.62	6.71	2.21	8.64	8.64	5.61
HS-140-B	有限元	25.52	8.04	32.48	28.91			26.30	2.63	
	试验	23.45	7.07	30.13	25.56			27.00	2.70	
	相对误差/%	8.83	13.72	7.80	13.11			2.59	2.59	
HS-140-C	有限元	31.84	7.85	36.38	28.10	32.12	98.07	32.97	3.30	12.49
	试验	29.52	7.00	35.95	25.00	30.56	90.60	32.65	3.26	12.94
	相对误差/%	7.86	12.14	1.20	12.40	5.10	8.25	0.98	1.23	3.48

注: P_{300} 为墙体侧移达到 1/300 时的荷载值; K_{300} 为墙体侧移达到 1/300 时的割线刚度。

2.05, 2.70, 3.26 kN·mm⁻¹, 试件 HS-140-B 和 HS-140-C 的抗侧刚度相对于 HS-140-A 分别提高了 31.7%, 59.3%。

(3)试件 HS-140-A 与 HS-140-C 的位移延性系数 μ 分别为 6.57, 12.94, 可以看出空腔的组合墙体延性及变形性能很好; 试件 HS-140-B 的顶端侧移达到 99.024 mm 时, 荷载并没有降低至 0.85 P_{\max} , 其变形能力较强, 延性好。

(4)试件 HS-140-B 与 HS-140-C 相比, 后者承载力提高较多, 是因为拼缝处作为组合墙体最薄弱的部位, 利用钢带加强拼缝处的螺钉孔对整个墙体承载力的提高最为有效。

3.3 耗能性能

以能量耗散系数 E 衡量试件的耗能性能。按照规程^[23]中的计算方法, 得到 3 个试件的能量耗散系数分别为 9.45, 12.55, 14.98。由此可知, 通过钢带加强螺钉孔的墙体, 其耗能能力得到了显著提高。究其原因是钢带加强促使螺钉孔的破坏延迟, 墙面板的作用得到充分发挥, 使其耗能能力增强。

3.4 刚度退化

为描述刚度退化, 对骨架曲线采用“点对点”的割线刚度, 可按下式计算

$$K_i = \frac{|P_i^+| + |P_i^-|}{|\Delta_i^+| + |\Delta_i^-|}$$

(1)

式中: K_i 为在第 i 级加载时试件相应的割线刚度; P_i^+ , P_i^- 分别为试件在第 i 级加载时相应的正、负峰值荷载; Δ_i^+ , Δ_i^- 分别为试件在第 i 级加载时相应的正、负剪切变形。

将 Δ_i^+ 和 Δ_i^- 的平均值作为 Δ_i , 绘制出 $K_i-\Delta_i$ 曲线, 即为刚度退化曲线(图 11)。

根据刚度退化曲线可以得出: 试件刚度退化规

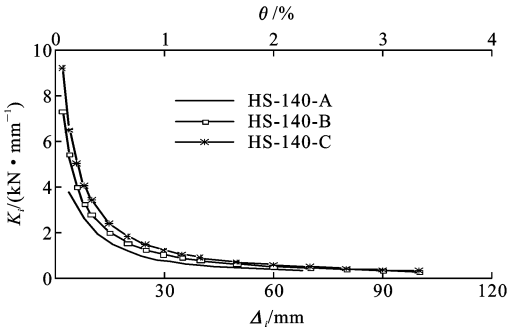


图 11 试件的刚度退化曲线

Fig. 11 Stiffness Degradation Curves of Specimens

律基本一致, 在加载初期, 刚度退化较快, 当荷载位移达到 30 mm 后, 刚度退化变慢并逐渐趋于平缓; 当加载位移至 70 mm 后, 试件刚度不再变化, 其大小趋于 0, 此时各试件已发生较大破坏。

4 基于 OpenSEES 的有限元分析

4.1 模型建立

采用 OpenSEES 对加强螺钉孔型冷弯型钢组合墙体进行数值模拟。墙体由冷弯型钢骨架、墙面板和自攻螺钉三部分组成的。采用基于位移的非线性梁柱单元用来模拟立柱和导轨, 立柱和导轨截面类型采用纤维截面, 由于立柱和导轨连接的转动刚度较弱, 所以它们之间的连接定义为铰接。立柱和导轨在每个自攻螺钉连接部位建立节点, 相邻 2 个节点之间定义为单元。采用弹性壳单元来模拟墙面板。墙面板和骨架之间的连接则采用零长度单元模拟。数值模型如图 12 所示。

数值分析采用位移控制的加载方式, 位移幅值大小与试验相同, 模型的材料特性和边界条件也与试验保持一致。

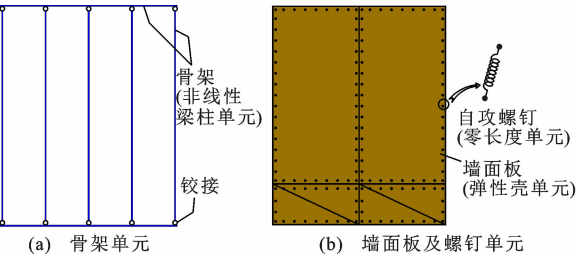


图 12 基于 OpenSEES 的数值模型

Fig. 12 Numerical Models Based on OpenSEES

4.2 Pinching04 的参数确定

试验研究表明,墙面板蒙皮效应是影响冷弯型钢组合墙体抗侧力性能的主要因素。墙面板蒙皮效应的发挥主要取决于“冷弯型钢龙骨-自攻螺钉-墙面板”的连接。冷弯型钢组合墙体的破坏主要发生在自攻螺钉连接处,因此自攻螺钉连接模拟的准确性对墙体模拟的准确性有着重要的影响。由于 OpenSEES 有限元软件中的 Pinching04 材料能够模拟强度和刚度退化以及捏缩、滑移效应,所以零长度单元被赋予 Pinching04 材料,以考虑自攻螺钉连接的滞回性能。

如图 13 所示,Pinching04 材料的本构模型主要由骨架曲线、卸载/再加载路径和破坏准则三部分组成,其中, f_1, f_2, f_3, f_4 分别为正向骨架曲线的弹性点、屈服点、峰值点和破坏点处的荷载值,而 d_1, d_2, d_3, d_4 分别为正向骨架曲线在弹性点、屈服点、峰值点和破坏点处的变形值。骨架曲线呈四线型,卸载/再加载曲线呈三线型。通常需要 16 个参数来定义 Pinching04 材料的骨架曲线,但是大多数结构的骨架曲线在正负向基本对称,因此只需用正向的 8 个参数来定义骨架曲线,骨架曲线的参数取自相应的试验数据。另外,卸载/再加载路径需要用 6 个参数来确定,正负向对称规则同样适用于卸载/再加载路径,所以只需要用正向的 3 个参数来定义卸载/再加载路径,即再加载点变形值与最大变形值的比值为 r_D ,再加载点荷载值与最大荷载的比值为 r_F ,卸载点荷载值与最大荷载的比值为 u_F 。强度退化通过 5 个参数来控制,卸载刚度退化和再加载刚度的退化也分别需要 5 个参数来定义。能量耗散和破坏类型需要用 2 个参数来定义。已对加强型和非加强型自攻螺钉连接开展了低周反复加载试验研究^[18-19],本文参照取值,可确定 Pinching04 材料的相应参数。

4.3 分析结果对比

采用上述方法对墙体进行数值模拟,可以得到试件的滞回曲线和骨架曲线,其与试验曲线的对比

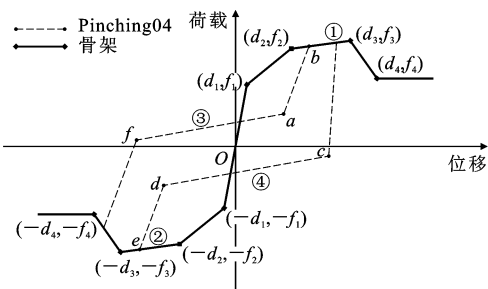


图 13 试件的刚度退化曲线

Fig. 13 Stiffness Degradation Curves of Specimens

如图 14 所示。可以看出:有限元模拟得到的曲线和试验曲线较为相似,模型能够反映冷弯型钢墙体的非线性行为,并能反映出墙体捏缩滑移的滞回特征。

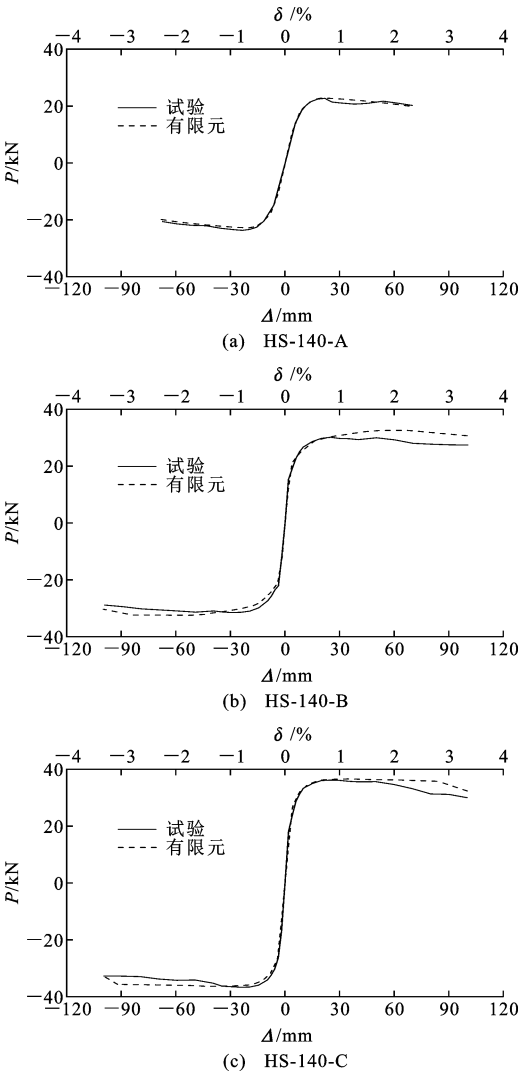


图 14 骨架曲线对比

Fig. 14 Comparison of Skeleton Curves

根据第 3.2 节所述方法,可得到有限元模型的荷载和位移特征值,计算结果见表 2。通过表 2 中数据可知,有限元和试验的荷载特征值和抗侧刚度

计算结果较为吻合,相对误差均在10%以内,仅个别试件位移特征值相差较大,但相对误差不超过15%。同时,根据《建筑抗震试验规程》(JGJ/T 101—2015)^[23]相关规定,荷载-位移滞回曲线所包围的面积用来衡量试件的耗能能力。得到试验曲线和有限元曲线的累积耗能量,如图15所示,有限元模拟得到的累积耗能量略小于试验值。

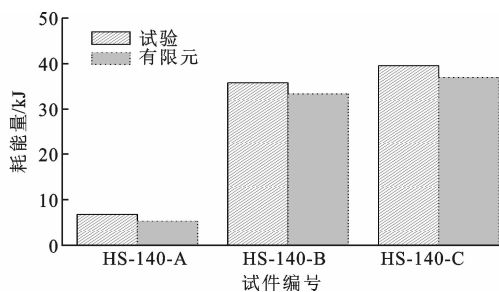


图15 耗能对比

Fig. 15 Comparison of Energy Dissipation

通过对试件的滞回曲线、骨架曲线、荷载与位移特征值以及耗能性能的对比分析可知,有限元模型能较好地模拟试件在低周往复加载时的非线性行为,模拟精度较好,该模型可为后续结构体系的相关分析提供参考。

5 结语

(1)对于传统的冷弯型钢组合墙体试件,面板拼缝处螺钉孔、面板与立柱连接处的螺钉孔是墙体损坏的薄弱部位,利用钢带对这些部位进行加强,能够有效地改善墙体的受力性能,使墙面板充分发挥“蒙皮作用”。

(2)利用钢带对龙骨处和面板拼缝处的螺钉孔进行加强,可有效提高墙体的抗侧刚度和受剪承载力,与未加强墙体试件相比,其抗侧刚度提高31.7%~59.3%,承载力提高32.5%~58.1%。钢带加强螺钉孔型组合墙体试件的耗能和延性性能也得到显著增强。

(3)加强龙骨螺钉孔墙体试件与加强墙面板拼缝螺钉孔墙体试件相比,在提高承载力、抗侧刚度、耗能能力等方面,后者更为有效。

(4)基于OpenSEES建立墙体数值分析模型,模拟结果与试验结果较为一致,模型具有较高的精度,该模型能反映冷弯型钢墙体的非线性本质。

参考文献:

References:

[1] 周绪红,石宇,周天华,等.低层冷弯薄壁型钢结构

住宅体系[J].建筑科学与工程学报,2005,22(2):1-14.

ZHOU Xu-hong, SHI Yu, ZHOU Tian-hua, et al. Cold-formed Steel Framing System of Low-rise Residential Building[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2005, 22(2): 1-14.

[2] JGJ 227—2011, 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程[S].

JGJ 227—2011, Technical Specification for Low-rise Cold-formed Thin-walled Steel Buildings[S].

[3] JGJ/T 421—2018, 冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准[S].

JGJ/T 421—2018, Technical Standard for Cold-formed Thin-walled Steel Multi-storey Residential Buildings[S].

[4] BADR A R, ELANWAR H H, MOURAD S A. Numerical and Experimental Investigation on Cold-formed Walls Sheathed by Fiber Cement Board[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 158: 366-380.

[5] BIAN G, CHATTERJEE A, BUONOPANE S G, et al. Reliability of Cold-formed Steel Framed Shear Walls as Impacted by Variability in Fastener Response[J]. Engineering Structures, 2017, 142: 84-97.

[6] KECHIDI S, BOURAHLA N, CASTRO J M. Seismic Design Procedure for Cold-formed Steel Sheathed Shear Wall Frames; Proposal and Evaluation[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 128: 219-232.

[7] FENG R Q, ZHU B C, XU P H, et al. Seismic Performance of Cold-formed Steel Framed Shear Walls with Steel Sheathing and Gypsum Board[J]. Thin-walled Structures, 2019, 143: 106238.

[8] NIARI S E, RAFEZY B, ABEDI K. Seismic Behavior of Steel Sheathed Cold-formed Steel Shear Wall: Experimental Investigation and Numerical Modeling[J]. Thin-walled Structures, 2015, 96: 337-347.

[9] MOHEBBI S, MIRGHADERI R, FARAHBOD F, et al. Experimental Work on Single and Double-sided Steel Sheathed Cold-formed Steel Shear Walls for Seismic Actions[J]. Thin-walled Structures, 2015, 91: 50-62.

[10] SHAMIM I, ROGERS C A. Numerical Evaluation: AISI S400 Steel-sheathed CFS Framed Shear Wall Seismic Design Method[J]. Thin-walled Structures, 2015, 95: 48-59.

[11] SELVARAJ S, MADHAVAN M. Flexural Behaviour and Design of Cold-formed Steel Wall Panels

- Sheathed with Particle Cement Board[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 162: 105723.
- [12] FIORINO L G, SHAKEEL S, MACILLO V, et al. Seismic Response of CFS Shear Walls Sheathed with Nailed Gypsum Panels: Numerical Modelling [J]. Thin-walled Structures, 2018, 122: 359-370.
- [13] YU C, CHEN Y J. Detailing Recommendations for 1.83 m Wide Cold-formed Steel Shear Walls with Steel Sheathing [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2011, 67(1): 93-101.
- [14] ZEYNALIAN M, RONAGH H R. Seismic Performance of Cold Formed Steel Walls Sheathed by Fibre-cement Board Panels [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015, 107: 1-11.
- [15] GAO W C, XIAO Y. Seismic Behavior of Cold-formed Steel Frame Shear Walls Sheathed with Ply-bamboo Panels [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 132: 217-229.
- [16] 闫维明, 赵锦成, 谢志强, 等. 基于锁铆连接的冷弯薄壁型钢开洞组合墙体抗震性能试验研究 [J]. 北京工业大学学报, 2019, 45(8): 754-762.
- YAN Wei-ming, ZHAO Jin-cheng, XIE Zhi-qiang, et al. Experimental Study of Seismic Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel Shear Walls Using Self-piercing Rivets with Openings [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2019, 45(8): 754-762.
- [17] 王宇航, 邓 锐, 姚欣梅, 等. 带斜撑冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验 [J]. 建筑科学与工程学报, 2019, 36(2): 30-38.
- WANG Yu-hang, DENG Rui, YAO Xin-mei, et al. Experiment on Seismic Behavior of Cold-formed Thin-walled Steel Walls with Diagonal Braces [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2019, 36(2): 30-38.
- [18] WU H, CHAO S, ZHOU T H, et al. Cold-formed Steel Framing Walls with Infilled Lightweight FGD Gypsum Part I: Cyclic Loading Tests [J]. Thin-walled Structures, 2018, 132: 759-770.
- [19] WU H, CHAO S, ZHOU T H, et al. Cold-formed Steel Framing Walls with Infilled Lightweight FGD Gypsum Part II: Axial Compression Tests [J]. Thin-walled Structures, 2018, 132: 771-782.
- [20] 刘 斌, 郝际平, 邵大余, 等. 低周反复荷载作用下复合式冷弯薄壁型钢墙体抗震性能试验研究 [J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(6): 169-178.
- LIU Bin, HAO Ji-ping, SHAO Da-yu, et al. Experimental Study on Seismic Behavior of Cold-formed Thin-wall Steel Composite Walls Under Low Reversed Cyclic Loading [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(6): 169-178.
- [21] 叶继红, 陈 伟, 许 阳. 冷弯薄壁型钢复合墙体受剪性能数值模拟及简化力学模型研究 [J]. 建筑结构学报, 2018, 39(11): 94-103.
- YE Ji-hong, CHEN Wei, XU Yang. Numerical Simulation and Simplified Mechanical Model on Shear Behavior of Enhanced Cold-formed Steel Composite Wall [J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(11): 94-103.
- [22] GB/T 228. 1—2010, 金属材料拉伸试验第 1 部分: 室温试验方法 [S].
- GB/T 228. 1—2010, Metallic Materials — Tensile Testing — Part 1: Method of Test at Room Temperature [S].
- [23] JGJ/T 101—2015, 建筑抗震试验规程 [S].
- JGJ/T 101—2015, Specification for Seismic Test of Buildings [S].