

引文格式:刘宜丰,姜雪,叶美琳,等. 模块化冷弯薄壁型钢结构体系低层村镇住宅设计研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2024, 41(3): 86-97.
LIU Yifeng, JIANG Xue, YE Meilin, et al. Design research of low-rise village houses with modular cold-formed thin-walled steel structure system[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 86-97.

DOI:10.19815/j.jace.2022.10061

模块化冷弯薄壁型钢结构体系低层村镇住宅设计研究

刘宜丰¹, 姜雪¹, 叶美琳¹, 赵广坡¹, 李秋稷¹, 王欢¹, 张鑫², 白蜀珺¹, 宋谦益¹

(1. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:在传统冷弯薄壁型钢结构体系的基础上,从模块化、装配化角度出发,提出了一种适用于低层村镇住宅的新型结构体系——模块化冷弯薄壁型钢结构体系。首先,简述了墙体模块单元的构成,给出了7种通用标准化墙体模块单元,并介绍了基于通用标准化模块单元的村镇模块化户型构建原则及过程;其次,详述了便于快速装配安装的标准墙体单元间模块化连接方式,对模块连接节点进行了受力分析及数值模拟,并给出了模块化冷弯薄壁型钢结构体系构建的原则;最后,重点介绍了适用于所有冷弯薄壁型钢结构体系的抗剪墙长简化设计方法以及基于模块化冷弯薄壁结构体系的抗剪墙长设计方法,并通过实际案例详述了墙长确定过程,同时对比了不同计算方法的抗剪墙长,进一步验证了所提出的抗剪墙长简化设计方法的可行性。结果表明:所提出的模块化冷弯薄壁型钢结构体系可大幅提高冷弯薄壁型钢结构低层村镇住宅的工业化和产品化水平,大幅缩减了工期;所提出的抗剪墙长简化设计方法可显著降低设计门槛,便于该类体系的推广应用。

关键词:冷弯薄壁型钢;村镇住宅;模块化;墙体模块单元;抗剪墙设计方法

中图分类号:TU392.5

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)03-0086-12

Design research of low-rise village houses with modular cold-formed thin-walled steel structure system

LIU Yifeng¹, JIANG Xue¹, YE Meilin¹, ZHAO Guangpo¹, LI Qiuji¹, WANG Huan¹,
ZHANG Xin², BAI Shujun¹, SONG Qianyi¹

(1. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

Abstract: Based on the traditional cold-formed thin-wall steel structure system, from the perspective of modularization and assembly, a new type of structural system — modular cold-formed thin-wall steel structure system was proposed, which was suitable for low-rise village houses. First of all, the composition of the wall module unit was described briefly, seven kinds of general standardized wall module units were given, and the construction principle and process of village modular house based on the general standardized module unit were introduced. Secondly, the modular connection mode between standard wall units, which was convenient for rapid assembly and installation, was described in detail. The force analysis and numerical simulation of

收稿日期:2022-10-17

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFD1100703)

作者简介:刘宜丰(1974-),男,教授级高级工程师,E-mail:Lyf0142@163.com。

通信作者:姜雪(1987-),女,高级工程师,E-mail:377632380@qq.com。

the module joint were carried out, and the principle of the construction for modular cold-formed thin-wall steel structure system was given. Finally, the simplified design method of shear wall length applicable to all the cold-formed thin-wall steel structure systems were emphatically introduced, and the design method of shear wall length applicable to modular cold-formed thin-wall structure systems were also emphatically introduced. The determination process of wall length was detailed described through a practical project, and the shear wall length with different calculation methods was compared, so the feasibility of the proposed simplified design method for shear wall length was further verified. The results show that the proposed modular cold-formed thin-wall steel structure system can greatly improve the industrialization and productization level of low-rise village residential buildings, which can also greatly reduce the construction period. The proposed simplified design method of shear wall length can significantly reduce the design threshold, which is convenient for the popularization and application of this type of system.

Key words: cold-formed thin-wall steel; village house; modular; wall module unit; shear wall design method

Author resumes: LIU Yifeng(1974-), male, senior engineer, E-mail: Lyf0142@163. com; JIANG Xue(1987-), female, senior engineer, E-mail: 377632380@qq. com.

0 引言

20世纪90年代,中国一些企业引入北美和澳洲的冷弯薄壁型钢结构体系,但受限于缺少相关政策的支撑和相应的设计规范和验收标准,不能在商品住宅项目或农村自建住宅中规模应用^[1-5]。近二三十年,随着国家相关政策的驱动,提倡“藏钢于民”,冷弯薄壁型钢结构体系较多的在西藏、四川等地区应用。周绪红等^[6-7]对弯薄壁型钢组合墙体的受剪性能进行了深入研究;Serrette等^[8-10]对提高冷弯薄壁型钢墙体的抗侧承载力提出了一些建议;石宇等^[11-12]对冷弯薄壁型钢组合墙体的抗震性能进行了研究,以上部分相关成果编入《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)、《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)、《冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准》(JGJ/T 421—2018)^[13-15]等标准中,一定程度上促进了冷弯薄壁型钢结构体系的发展。目前有关低层村镇住宅冷弯薄壁型钢结构体系模块化建造方面的研究较少。戴俭等^[16-19]从建筑学角度出发,提出了一种新型“板拼式”轻钢装配式住宅体系概念,但并无该体系相应的结构计算方法;闫维明等^[20-22]针对冷弯模块化提出了一套基于模块化墙体的轻钢龙骨体系房屋装配式体系,对锁铆连接用于轻钢龙骨体系房屋装配化建造的可行性进行了研究,同时提出的多项专利^[23-26]是中国少有的将墙体双侧覆面板均预制到墙体单元中的尝试,但暂无实际工程应用。

西南地区是中国遭受地震、地质灾害最为严重的地区,并且灾害往往发生在基础条件差、防灾能力薄弱的广大农村地区,历史上多次对村镇住宅造成灾难^[27]。同时中国超半数村镇住宅以自建为主,普遍存在抗震性能差、保温隔热性能弱、施工质量参差不齐等问题。自汶川地震以来的每次地震灾害,都造成大量的村镇房屋倒塌或破损,直接影响人民的生命财产安全。可见,提高村镇住宅的抗震防灾性能尤为重要。

与普通生土砖石房屋相比,冷弯薄壁型钢结构体系不仅有建造快速、无养护期、绿色环保、可回收利用等先天优势,同时由于轻钢结构本身轻质高强的特性,冷弯薄壁型钢房屋结构体系的抗震性能显著高于普通生土砖石房屋或砖砌体房屋。目前常见的传统冷弯薄壁型钢结构体系需要进行现场拼装,存在以下问题:①施工质量受现场工人技术水平影响较大,且材料损耗大;②现场施工工序多,工期较长;③现场劳动力需求量大;④防火要求构造层次多;⑤设计与生产、施工企业脱节,缺乏监管,存在一定的结构安全和消防安全隐患。结合中国大力推动建筑工业化和装配式建筑的大趋势,为提高村镇住宅的抗震防灾性能,同时兼顾西南偏远山区运输、建造条件及经济水平,本文提出了一种适用于西南地区低层村镇住宅的新型结构体系——模块化冷弯薄壁型钢结构体系(以下简称“模块化冷弯结构体系”)。该结构体系从模块化、装配化角度出发,基于本文提出的通用标准化墙体模块单元,构建形成模

块化冷弯结构体系,可较大幅度提高低层村镇住宅建造工业化和装配化程度。

1 通用标准化墙体模块单元

1.1 标准化通用墙体模块单元介绍

墙体模块单元由两侧的覆面板、中间轻钢骨架及覆面板与龙骨间的连接螺钉构成,如图 1 所示。覆面板可选择常见的定向刨花板、石膏板、水泥纤维板等,其中一侧覆面板需预留安装孔洞,墙体模块单元通过螺钉预制组装。结合实际的生产加工制造,以模块化、装配化、工业化为基础目标,将墙体模块单元双侧覆面板、内部岩棉及设备管线在工厂内预制组装完成(图 2),然后运至现场进行装配式拼装施工,以此解决传统冷弯体系的散件拼装施工工序多、质量控制难、人工需求量大、材料损耗大、工期较长等问题。

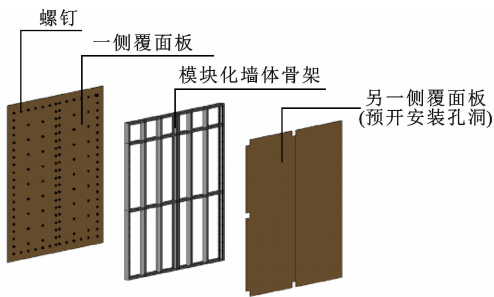


图 1 墙体模块单元的构成

Fig. 1 Composition of wall module unit

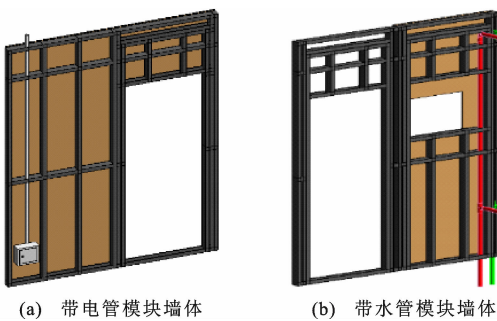


图 2 墙体模块单元的设备管线

Fig. 2 Device pipelines of wall module unit

基于低层(层数不大于 3 层)村镇住宅户型调研并结合模块化冷弯薄壁型钢结构体系的应用,本文共提出 7 种通用标准化墙体模块单元,编号详见表 1,标准化墙体模块单元对应的骨架布置如图 3 所示。通用模块以覆面板模数 1 220 mm 为基本模数,对应的冷弯薄壁型钢墙体竖龙骨间距按覆面板模数均分为 407 mm 和 610 mm 两种。模块 W-1 为非开洞墙体模块单元,考虑模块化户型构建的灵活

表 1 通用标准化墙体模块单元

Table 1 General standardized wall module unit

模块编号	模块内容
W-1a	1 220 mm 非开洞墙体
W-1b	2 440 mm 非开洞墙体
W-2	1 220 mm 墙上带 600 mm 宽洞口
W-3	1 220 mm 墙上带 900 mm 宽洞口
W-4	2 440 mm 墙上带 1 200 mm 宽洞口
W-5	2 440 mm 墙上带 1 500 mm 宽洞口
W-6	2 440 mm 墙上带 1 800 mm 宽洞口
W-7	2 440 mm 墙上带 2 100 mm 宽洞口

性,将模块 W-1 区分为模块 W-1a(墙长 1 220 mm)的非开洞墙体和模块 W-1b(墙长 2 440 mm)的非开洞墙体,模块 W-1b 是由 2 个 W-1a 模块拼合而成,故将两者均归为模块 W-1。

模块 W-2~W-7 是在模块 W-1 基础上开门、窗洞口,根据洞口宽度尺寸不同而编号,每个模块洞口居中布置,墙体模块骨架如图 3 所示,其中 H 表示模块墙体单元高度。洞口尺寸的设计涵盖了常规门窗洞口宽度尺寸,包括 600、900、1 200、1 500、1 800、2 100 mm 宽门窗洞口,该洞口可以是门洞口亦可以是窗洞口,根据具体户型需要选择。以模块 W-7 为例,洞口宽 2 100 mm,可以为门洞口或落地窗洞口,以及 2 100 mm×1 200 mm 窗洞口,墙体模块骨架如图 4 所示。

1.2 基于通用模块单元的村镇模块化户型构建

基于通用模块单元的村镇模块化户型构建的原则是以 1 220 mm 为基本模数 a ,然后以 a 或 $2a$ 为墙体基本模块单元,由墙体基本模块拼装出标准化功能空间模块,再将不同尺寸的功能空间模块进行组装,得到满足不同建筑面积需求的模块化标准户型。基于卧室、厨房、客厅等功能空间模块[图 5(a)],拼装组成建筑面积约 114 m² 的一层村镇模块化户型[图 5(b)]。在实际生产应用中,为满足不同居民的需求,村镇标准化户型除了通用的基本墙体模块单元外,还可有非标准模块。为了大力推进村镇住宅工业化生产制造,响应国家对住宅装配率的要求,促进模块化冷弯体系村镇住宅产业链的形成,建筑户型应尽量减少非标准模块的使用,宜优先选择表 1 中的通用标准化墙体模块单元,并且尽量使表 1 中的通用标准化墙体模块单元数量或墙长占比不小于 75%。

2 模块化冷弯薄壁型钢结构体系构建

2.1 模块连接节点构建

模块化冷弯结构体系是在传统的冷弯薄壁型钢

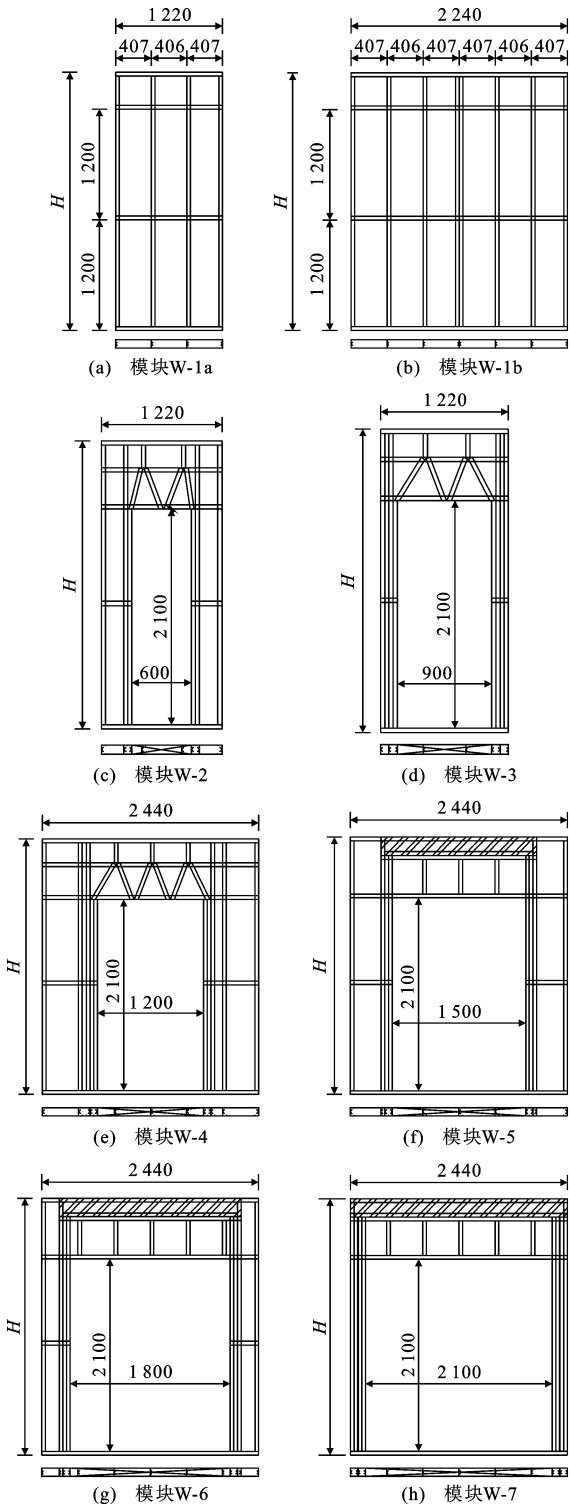


图 3 通用标准化墙体模块单元(单位:mm)

Fig. 3 General standardized wall module unit (unit:mm)

体系的基础上,引入模块化理念,采用通用的标准化模块单元,在工厂将墙体模块、楼盖模块、屋架模块等预制组装,再将各个模块运输到现场,通过装配式连接螺栓,将模块与模块之间组合拼装。模块化冷弯结构体系的提出完全符合中国对住宅建筑装配化、工业化的政策导向,可大幅提高冷弯薄壁体系的

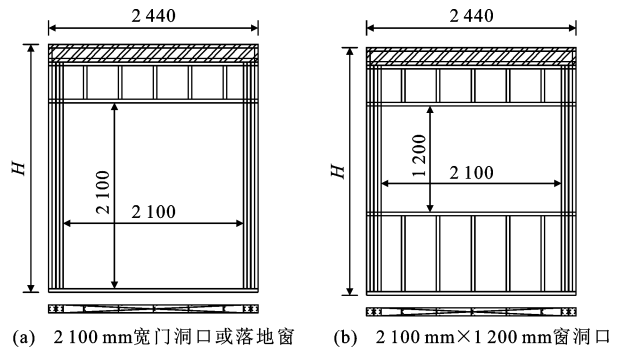


图 4 模块 W-7 门窗洞口骨架(单位:mm)

Fig. 4 Door and window openings for module W-7 (unit:mm)

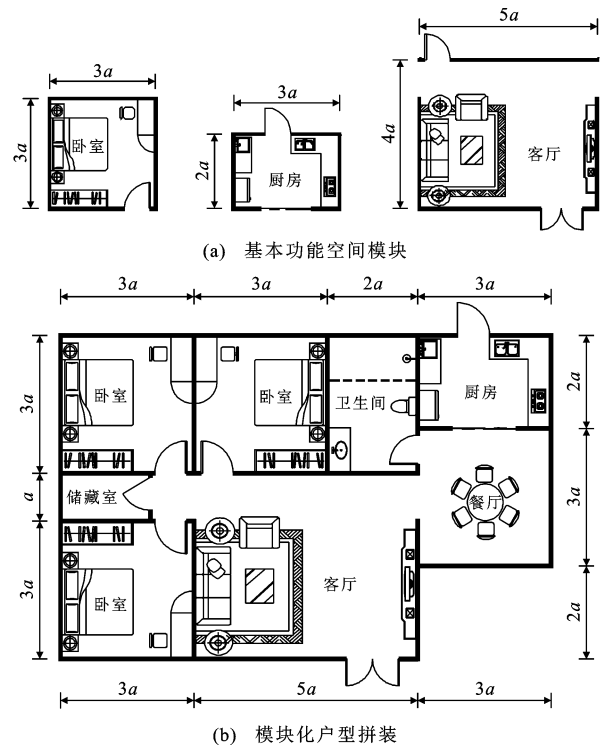


图 5 基于通用模块单元的村镇标准化户型构建示例

Fig. 5 Example for construction of standardized household types in villages based on general modular units

工业化、产品化水平。

一般低层冷弯村镇住宅建筑包括墙体、楼盖、屋架、基础、楼梯等结构系统,本文主要围绕墙体系统进行论述。模块化冷弯结构体系墙体模块化连接的3个核心部件分别为3 mm厚小卡件[图6(a)]、3 mm厚方管(图7)以及螺栓。首先,对于模块墙板之间的“一”字形墙拼接,两片墙体之间从受力需求、结构构造和施工安装便利角度,采用3处螺栓连接,“一”字形模块化墙板间连接示意如图6所示。因两侧均已安装了覆面板,故需在其中一侧覆面板上预留安装孔,建议安装孔尺寸100 mm×100 mm~100

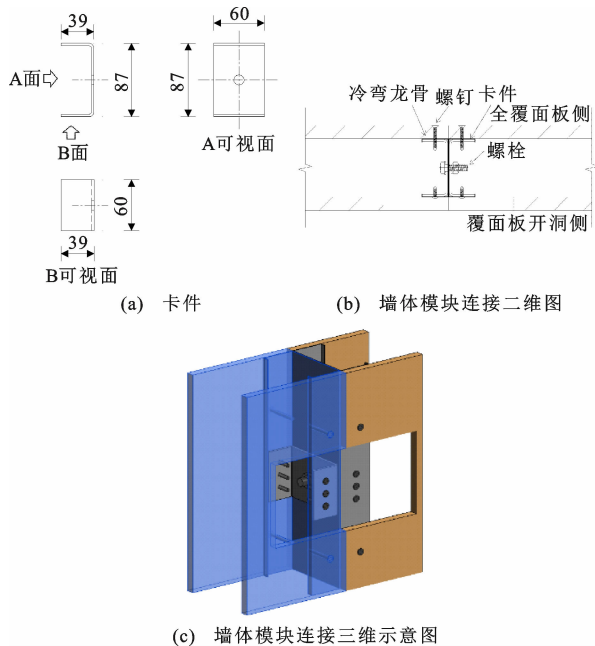


图6 “—”字形模块化墙板间连接(单位:mm)
Fig. 6 Connection between “—”-shaped modular wall panels (unit:mm)

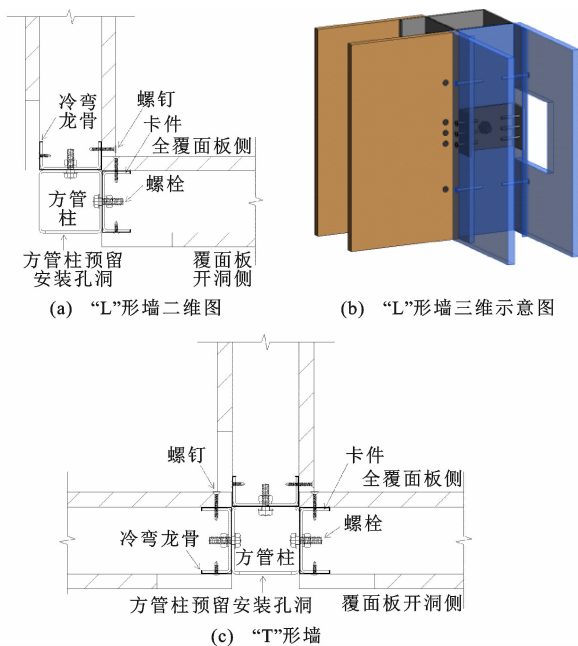


图7 模块化墙体与方管连接

Fig. 7 Connection between modular wall panels and square pipe

mm×140 mm,亦可根据具体工程确定覆面板开洞尺寸。小卡件长60 mm,卡件中部预留 $d+1$ mm(d 为螺栓直径)螺栓孔,以保证卡件与螺栓匹配,而冷弯龙骨上开 $d+4$ mm调节孔,方便两片墙体安装定位。最后通过自攻钉将小卡件与冷弯龙骨有效连接[图6(b)、(c)],保证力的连续传递。

通过在墙体相交角部引入方管,作为墙体的一个通用标准单元,巧妙解决了L形、T及十字形转角墙体单元的拼接问题,提高了墙体模块单元的通用化程度。模块墙体与方管之间的连接同样通过3处螺栓连接,如图7所示。模块墙体与方管的连接与图6模块化墙板间连接类似,同样在卡件中部预留 $d+1$ mm螺栓孔,冷弯龙骨上开 $d+4$ mm调节孔;不同之处是方管上除了正面预留孔洞方便安装操作外,在方管与墙体接触面一侧,也要预留 $d+1$ mm螺栓孔,以保证螺栓连接有效传力。

模块化墙体、方管与基础之间的连接如图8所示。每片模块化墙体的两端下方均设置抗拔件[图8(a)],以抵抗墙体因抗剪而产生的拉拔力。方管底部提前在工厂等强焊接8 mm厚端板,与方管整体形成角部抗拔件[图8(b)],抗拔件螺栓配套采用8 mm厚垫片,垫片尺寸为70 mm×70 mm。方管可根据具体工程直通二层,替代上下层之间的抗拔连接,在节省了一二层之间抗拔件的同时也起到了为墙体模块定位的作用。

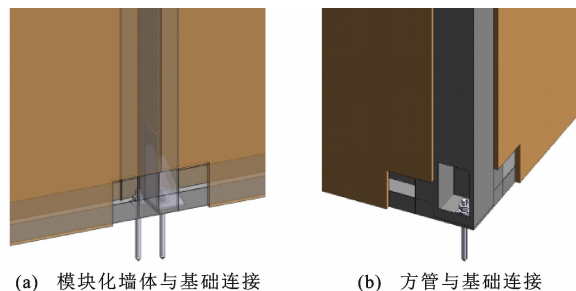


图8 模块化墙体和方管与基础之间的连接

Fig. 8 Connection between modular wall panels, square pipe and foundation

2.2 模块连接节点受力分析

对模块化连接节点进行受力分析,模块化墙体连接件承受的剪力即为墙体端龙骨压力或拔力,按《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[14]中8.2.3、8.2.4条计算,偏保守考虑,以抗剪墙体单位长度受剪承载力较大的定向刨花板来反算螺栓连接内力,定向刨花板的抗剪墙体单位长度的受剪承载力设计值 $S_n=6.4$ kN·m⁻¹。墙体高度为3 m,用公式(1)计算得出模块墙体之间的螺栓连接需共同承受24 kN剪力。

$$N = \eta P_s h / b = 24 \text{ kN} \quad (1)$$

式中: N 为剪力; η 为轴力修正系数,取1.25; P_s 为墙体单元承受的水平剪力; h 为墙体单元高度; b 为墙体单元宽度。

墙体上中下部各设置 3 处螺栓连接,则每处连接点所承受的剪力值为 8 kN,经计算,一颗 M12 螺栓抗剪承载力为 10.43 kN,如式(2)所示,承压承载力为 11.44 kN,如式(3)所示,由此可得,每处连接采用一颗 M12 螺栓即可。参考部分螺钉抗剪强度标准试验^[28]并偏保守考虑,ST4.8 螺钉的抗剪承载力取为 2.5 kN,则双侧共 6 颗 ST4.8 螺钉,抗剪承载力为 15 kN,大于 8 kN,由此可知,卡件与龙骨之间双侧共使用 6 颗 ST4.8 螺钉满足要求。

$$N_v^b = \frac{\pi d_c^2}{4} f_v^b = 10.43 \text{ kN} \quad (2)$$

$$N_c^b = d_c t f_c^b = 11.44 \text{ kN} \quad (3)$$

式中: N_v^b 、 N_c^b 分别为一个螺栓的抗剪、承压承载力设计值; f_v^b 、 f_c^b 分别为螺栓的抗剪和承压强度设计值; d_c 为螺栓在螺纹处的有效直径,M12 螺栓有效直径为 10.31 mm; t 为承压构件的厚度,即方管厚度, $t=3$ mm。

采用 ABAQUS 有限元分析软件分别对上述墙体间连接节点、墙体与方管连接节点进行受力分析。通过应力结果确定节点连接是否满足强度设计要求,为该模块连接节点应用和工程设计提供依据。图 9 为两种连接节点的有限元模型,各部件均采用 8 节点缩减积分格式的三维实体单元,螺栓、ST4.8 螺钉与钢管或龙骨间均采用摩擦接触进行模拟。

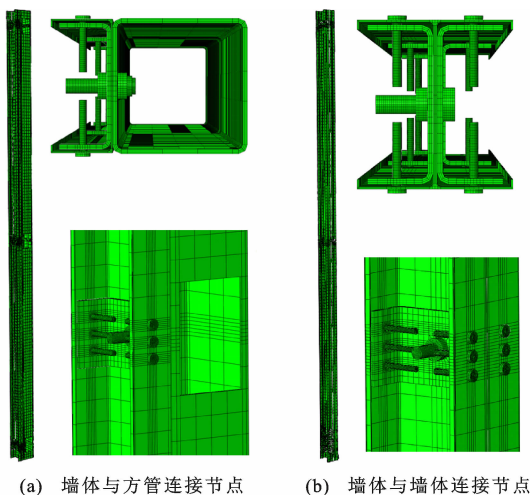


图 9 有限元模型

Fig. 9 Finite element model

卡件、矩管采用 Q355 级钢,龙骨采用 LQ550 钢,屈服强度分别为 355 MPa 和 500 MPa,螺栓采用 C 级普通螺栓,螺钉规格为 ST4.8,冷弯龙骨壁厚为 0.9 mm,其他各部件截面、厚度均与第 2.1 节相同。钢材本构关系采用双线性随动强化模型,选用 Mises 屈服准则,弹性模量为 2.06×10^5 MPa,塑

性阶段考虑 0.01 倍弹性模量的应力强化。图 10 为约束和加载简图,将方管或一侧钢龙骨施加位移约束,对另一侧钢龙骨施加 $P=24$ kN 的竖向力。

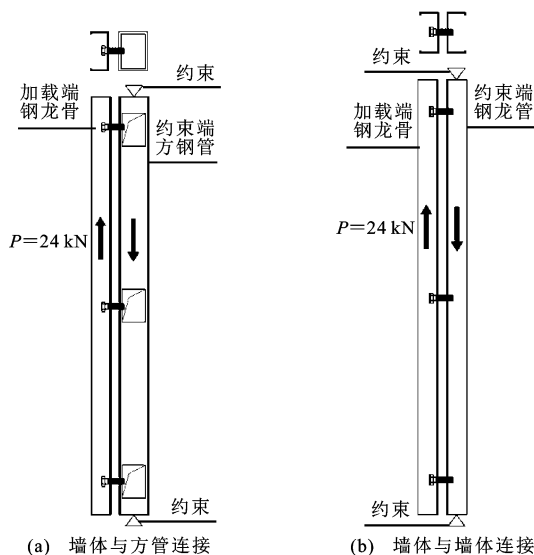


图 10 约束和加载简图

Fig. 10 Constraint and load diagram

图 11、12 为两种连接节点细部计算应力云图,墙体与方管连接节点最大应力出现在钢龙骨的螺钉与孔壁接触处,墙体与墙体连接节点最大应力出现在约束端钢龙骨的螺栓与孔壁接触处。表 2、3 给出了两种连接节点各部件的最大应力结果,螺栓、ST4.8 螺钉满足《冷弯薄壁型钢结构技术规范》(GB 50018—2002)^[13]中强度设计要求,其余部件最大应力均未超过钢材的设计强度限值。因此,采用本文所述的模块连接方式可以有效地连接墙体模块,连接强度满足墙体最大承载力要求,可以作为模块化冷弯薄壁型钢结构体系的典型连接节点。

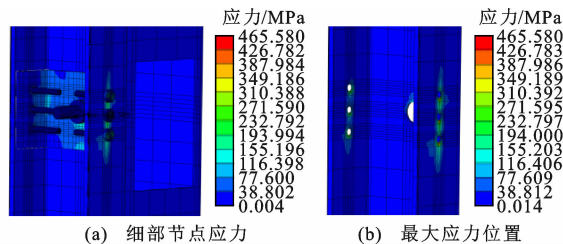


图 11 墙体与方管连接节点细部应力云图

Fig. 11 Stress nephogram of wall-to-square pipe connection joint

2.3 结构体系构建

模块化冷弯结构体系对传统冷弯薄壁型钢结构体系做了一些创新性的变化和优化,例如引进方管解决墙体模块化连接和层间连接问题,因此模块化结构体系的设计方法也与传统冷弯薄壁型钢结构体

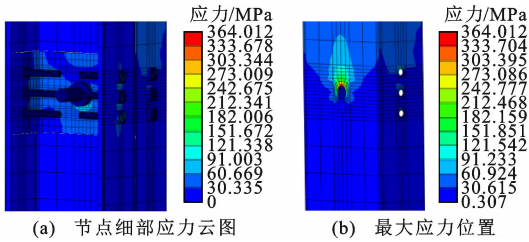


图 12 墙体与墙体连接节点应力云图

Fig. 12 Stress nephogram of wall-to-wall connection joint

表 2 墙体与方管连接计算结果

Table 2 Calculation results of wall-to-square pipe connection

构件类型	最大应力/MPa	应力限值/MPa	结论
加载端钢龙骨	465.58(Mises 应力)	500	满足
约束端方钢管	310.99(Mises 应力)	355	满足
螺栓	22.84(剪应力),	125(抗剪承载力),	满足
	138.08(主压应力)	385(承压承载力)	
ST4.8 螺钉	87.73(剪应力),	125(抗剪承载力),	满足
	186.57(主压应力)	385(承压承载力)	

表 3 墙体与墙体连接计算结果

Table 3 Calculation results of wall-to-wall connection

构件类型	最大应力/MPa	应力限值/MPa	结论
加载端钢龙骨	281.22(Mises 应力)	500	满足
约束端钢龙骨	364.01(Mises 应力)	500	满足
螺栓	82.94(剪应力),	125(抗剪承载力),	满足
	99.48(主压应力)	385(承压承载力)	
ST4.8 螺钉	91.41(剪应力),	125(抗剪承载力),	满足
	140.12(主压应力)	385(承压承载力)	

系有所改变。模块化冷弯结构体系构建的原则包括:①模块化冷弯结构体系中所有带门窗洞口的模块均归为非抗剪墙体,其余非开洞墙体模块均按抗剪墙体考虑,按此原则进行墙体剪力分配及抗剪承载力验算;②所有方管均应与基础有效连接,方管底部端板厚度不应小于 6 mm,抗拔锚栓的规格不宜小于 M16,具体规格尺寸可通过计算确定;③每个模块化墙体底部两端应布置抗拔锚栓,抗拔锚栓的规格不宜小于 M16,其余墙体构造规定同《低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程》(JGJ 227—2011)^[14]中 8.3 节;④模块间连接的螺栓规格及不锈钢螺钉规格和数量应由计算确定,本文以覆面板选择定向刨花板为例,推荐采用 3 处连接,每处采用 1 颗 M12 螺栓且双侧使用不少于 6 颗 ST4.8 螺钉;⑤考虑不锈钢螺钉攻钢时对钢材厚度有要求,建议模块化连接的卡件厚度不宜大于 4 mm,卡件尺寸设计宜与冷弯龙骨尺寸相匹配。

3 抗剪墙设计方法

3.1 抗剪墙长简化设计方法

针对冷弯薄壁型钢结构体系村镇住宅建筑,中国尚无成熟的结构设计软件,致使冷弯薄壁型钢结构体系村镇住宅建筑设计效率低,进而导致应用推广难等问题。本文提出了一套适用于低层(层数不大于 3 层)村镇住宅冷弯薄壁型钢结构体系的抗剪墙长简化设计方法,见表 4、5。

冷弯薄壁型钢结构的抗剪墙是通过覆面板与冷弯薄壁型钢骨架协同工作,共同抗剪。抗震设计时抗剪墙最小长度设计方法系基于《建筑抗震设计规范》(GB 5011—2010)^[29]中的底部剪力法而得来。冷弯薄壁型钢结构体系构造层次复杂,通过对多个冷弯薄壁型钢村镇住宅项目进行研究,总结冷弯体系典型常见的构造层次,给出楼面恒荷载取 2.0 kPa,墙体恒荷载取 1.5 kPa,可变荷载按《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2012)^[30]取值,层高取 3 m,基于底部剪力法得到抗震设计时抗剪墙最小长度,如表 4 所示。考虑到低层村镇住宅每一层的平面面积和墙长因户型设计而不同,表 4 中 A 为建筑物的平均楼层面积,由总的建筑面积除以层数得到; L 为平均平面墙体总长度,由建筑所有楼层平面的所有墙体长度之和除以层数得到。数值 A 及数值 L 取平均值是为了更准确地确定重力荷载代表值,进而确定抗震时的抗剪墙长。

抗风设计时抗剪墙最小长度系基于《建筑结构荷载规范》(GB 5000—2012)^[30]中风荷载的计算规定,考虑不同风压值、不同层数,可选择 3 种常见的覆面板形式,查表计算得到抗风设计时抗剪墙最小长度,结果见表 5。表 5 中只有一个可变参数 B ,系垂直于该抗剪墙方向的建筑物宽度,当二层及以上的宽度与一层差别较大时,可取 B 为建筑所有楼层建筑物宽度之和除以层数。冷弯薄壁型钢结构体系两个方向(X 向、 Y 向)的抗剪墙长度均不应小于表 4、5 取值,且应取抗震、抗风两种情况的包络值。本文提出的低层村镇住宅冷弯薄壁型钢结构体系的抗剪墙长简化设计方法降低了设计门槛,操作简单,建筑户型确定后即可估算出抗剪墙长度,有利于对建筑平面墙体布置进行校核,方便非专业人员的使用。

3.2 基于模块化冷弯结构体系的抗剪墙设计方法

表 4、5 主要针对传统冷弯薄壁型钢结构体系,适用面广,同样适用于模块化冷弯结构体系。鉴于模块化冷弯结构体系是基于传统冷弯结构体系创新

表4 抗震设计时抗剪墙最小长度

Table 4 Minimum length of shear wall in seismic design

抗震设防烈度	设计基本地震加速度取值	层数	不同覆面板的抗剪墙最小长度		
			单面 9 mm 定向刨花板	单面 0.42 mm 波纹钢板	单面 8 mm 水泥纤维板
6 度		1F	0.014A+0.031L	0.012A+0.025L	0.025A+0.054L
		2F	0.043A+0.072L	0.035A+0.058L	0.075A+0.125L
		3F	0.058A+0.093L	0.046A+0.074L	0.100A+0.161L
7 度	0.10g	1F	0.029A+0.062L	0.023A+0.050L	0.050A+0.107L
		2F	0.087A+0.145L	0.069A+0.116L	0.150A+0.250L
		3F	0.116A+0.186L	0.093A+0.149L	0.200A+0.322L
	0.15g	1F	0.043A+0.093L	0.035A+0.074L	0.075A+0.161L
		2F	0.130A+0.217L	0.104A+0.174L	0.225A+0.375L
		3F	0.174A+0.279L	0.139A+0.223L	0.300A+0.482L
8 度	0.20g	1F	0.058A+0.124L	0.046A+0.099L	0.100A+0.214L
		2F	0.174A+0.289L	0.139A+0.231L	0.300A+0.500L
		3F	0.231A+0.372L	0.185A+0.298L	0.400A+0.643L
	0.30g	1F	0.087A+0.186L	0.069A+0.149L	0.150A+0.322L
		2F	0.260A+0.434L	0.208A+0.347L	0.450A+0.751L
		3F	0.347A+0.558L	0.278A+0.446L	
9 度	0.40g	1F	0.116A+0.248L	0.093A+0.198L	0.200A+0.429L
		2F	0.347A+0.579L	0.278A+0.463L	
		3F	0.463A+0.744L	0.370A+0.595L	

注:1F指单层、二层或三层的顶层;2F指二层的底层或三层的二层;3F指三层的底层;g为重力加速度;表格中参数均已考虑量纲转换问题。

表5 防风设计时抗剪墙最小长度

Table 5 Minimum length of shear wall in wind resistance design

基本风压/ kPa	层数	不同覆面板的抗剪墙最小长度		
		单面 9 mm 定向刨花板	单面 0.42 mm 波纹钢板	单面 8 mm 水泥纤维板
0.30	1F	0.516B	0.413B	0.893B
	2F	1.033B	0.826B	1.787B
	3F	1.549B	1.239B	2.680B
0.35	1F	0.603B	0.482B	1.042B
	2F	1.205B	0.964B	2.084B
	3F	1.808B	1.446B	3.127B
0.40	1F	0.689B	0.551B	1.191B
	2F	1.377B	1.102B	2.382B
	3F	2.066B	1.653B	3.573B
0.45	1F	0.775B	0.620B	1.340B
	2F	1.549B	1.239B	2.680B
	3F	2.324B	1.859B	
0.55	1F	0.947B	0.757B	1.638B
	2F	1.894B	1.515B	3.275B
	3F	2.840B	2.272B	
0.65	1F	1.119B	0.895B	1.936B
	2F	2.238B	1.79B	3.871B
	3F	3.357B	2.686B	

演变而来,图13给出了一套基于模块化冷弯结构体系的抗剪墙长设计方法流程,详细阐述了两种抗剪墙长设计方法的关系及应用。步骤如下:①采用表4、5简化设计方法计算出风、地震作用下各方向需求的抗剪墙长 L_1 ;②采用模块化冷弯结构体系的抗剪墙长设计方法,搜索各方向非带洞的墙体模块单元并计算总墙长 L_2 ;③将 L_2 与 L_1 进行比较,判断抗剪承载力是否满足要求;④若 $L_2 \leq L_1$,说明抗剪承载力不满足,一方面可通过调整户型布置,增加抗剪墙,另一方面若不改动户型,可将墙体单面覆板改为双面覆板,增加抗剪承载力,或改变覆面板类型,选择抗剪承载力更高的覆面板材料;⑤若 $L_2 > L_1$,可不修改或根据富余程度对墙板系统进行优化调整,如调整覆面板厚度、类型等。

4 实例分析

4.1 标准村镇住宅户型

本文通过一个实际案例,介绍模块化冷弯薄壁型钢结构体系在低层村镇住宅中的示范应用。该项目位于成都市金堂县云合镇云桥社区,结合居民需求设计户型,项目效果如图14所示,平面户型如图15所示,工程概况如表6所示。

对该户型结构进行模块化拆分,包括非标准模

表8 抗剪墙长简化设计方法计算结果

Table 8 Calculation results of shear wall length with simplified design method

计算内容		抗震工况	抗风工况	
参数		$A=96.0,$ $L=72.5$	$B_X=10.165,$ $B_Y=13.77$	
查表	底层	$0.15A+0.25L$	$1.787B$	
	二层	$0.05A+0.107L$	$0.893B$	
抗剪墙长/m	底层	32.53	X向	18.16
			Y向	24.61
	二层	12.56	X向	9.08
			Y向	12.30

表9 手算方法计算结果

Table 9 Calculation results of manual calculation

抗震工况			抗风工况			
参数	底层	二层	参数	底层	二层	
重力荷载代表值(抗震工况)/kN	961.36	246.91	风荷载设计值(抗风工况)/kN	X向	40.72	17.93
水平剪力设计值(抗震工况)/kN	123.50	39.76		Y向	51.19	19.61
所需抗剪墙长(抗震工况)/m	34.55	11.12	所需抗剪墙长(抗风工况)/m	X向	11.01	4.85
				Y向	13.84	5.30

表10 不同计算方法的抗剪墙长对比

Table 10 Comparison of shear wall lengths with different calculation methods

墙长计算方法	底层所需墙长/m	二层所需墙长/m	
简化方法	32.53	12.56	
手算方法	34.55	11.12	
抗剪墙设计方法	X向	36.60	18.30
	Y向	27.88	14.64

的重力荷载代表值,但仍然存在一定误差,由此也提醒设计人员,当上部楼层面积明显小于底层面积时,简化方法的底层抗剪墙长应酌情放大。采用基于模块化冷弯结构体系的抗剪墙设计方法,X向抗剪墙长度满足且有富余,按图13方法流程,可考虑优化或不做任何修改;底层的Y向抗剪墙长度不满足,可将墙体单面覆板改为双面覆板,增加抗剪承载力,或改变覆面板类型,选择比单面8mm水泥纤维板抗剪承载力更高的覆面板材料,如定向刨花板或钢板。

5 结语

(1)本文提出了一种适用于西南地区低层村镇

住宅的模块化冷弯薄壁型钢结构体系,同时给出了7种通用标准化墙体模块单元,建议设计村镇住宅时,通用标准化墙体模块单元数量或墙长占比不小于75%。

(2)提出了模块化冷弯薄壁型钢结构体系的模块化螺栓连接方式,包括模块间以及模块与角部通柱间的连接方式,并对连接节点进行了受力分析和数值模拟,验证了螺栓连接的可行性。

(3)提出了适用于所有冷弯薄壁型钢结构体系的抗剪墙长简化设计方法,适用范围广且操作简单,降低设计门槛,方便非专业人员使用。

(4)基于本文提出的抗剪墙长简化设计方法和模块化冷弯结构体系构建原则,通过一个实际案例详述了墙长确定过程。

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 Xuhong,SHI Yu,ZHOU Tianhua,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] NAKASHIMA M,ROEDER C W,MARUOKA Y. Steel moment frames for earthquakes in United States and Japan[J]. Journal of Structural Engineering,2000,126(8):861-868.
- [3] 朱明.冷弯薄壁型钢结构体系在低层工业化住宅中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2013.
ZHU Ming. The application and research of the light gauge steel structural system in the low rise industrialized housing[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2013.
- [4] 董建军.多层冷弯薄壁型钢结构住宅的研究[D].杭州:浙江大学,2007.
DONG Jianjun. Study of cold-formed thin-wall steel structures in multi-floor residential buildings[D]. Hangzhou,Zhejiang University,2007.
- [5] KAMALI M,HEWAGE K. Life cycle performance of modular buildings:a critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,62:1171-1183.
- [6] 周绪红,石宇,周天华,等.冷弯薄壁型钢结构住宅组合墙体受剪性能研究[J].建筑结构学报,2006,27(3):42-47.
ZHOU Xuhong,SHI Yu,ZHOU Tianhua,et al. Study on shear resistance of cold-formed steel stud walls in

- residential structures[J]. *Journal of Building Structures*, 2006, 27(3): 42-47.
- [7] 周天华, 石宇, 何保康, 等. 冷弯型钢组合墙体抗剪承载力试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 38(1): 83-88.
ZHOU Tianhua, SHI Yu, HE Baokang, et al. Experimental research on the shear resistance of cold-formed steel stud composed wall[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 38(1): 83-88.
- [8] SERRETTE R, OGUNFUNMI K. Shear resistance of gypsum-sheathed light-gauge steel stud walls [J]. *Journal of Structural Engineering*, 1996, 122(4): 383-389.
- [9] TIAN H W, LI Y Q, YU C. Testing of steel sheathed cold-formed steel trussed shear walls[J]. *Thin-walled Structures*, 2015, 94: 280-292.
- [10] 石宇, 曾乐, 向弋, 等. 新型冷弯薄壁型钢板剪力墙抗侧性能试验研究[J]. *建筑钢结构进展*, 2021, 23(7): 21-30.
SHI Yu, ZENG Le, XIANG Yi, et al. Experimental study on the lateral performance of new cold-formed thin-walled steel plate shear walls [J]. *Progress in Steel Building Structures*, 2021, 23(7): 21-30.
- [11] 石宇. 水平地震作用下多层冷弯薄壁型钢结构住宅的抗震性能研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
SHI Yu. Study on seismic behavior of cold-formed steel framing system of mid-rise residential building under horizontal earthquake action [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [12] 石宇, 周绪红, 聂少锋, 等. 冷弯薄壁型钢组合墙体的抗震性能研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(增1): 124-129.
SHI Yu, ZHOU Xuhong, NIE Shaofeng, et al. Study on seismic behavior of cold-formed thin-walled steel composite wall [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(S1): 124-129.
- [13] 冷弯薄壁型钢结构技术规范: GB 50018—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.
Technical code of cold-formed thin-wall steel structures: GB 50018—2002 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2003.
- [14] 低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程: JGJ 227—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Technical specification for low-rise cold-formed thin-walled steel buildings: JGJ 227—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.
- [15] 冷弯薄壁型钢多层住宅技术标准: JGJ/T 421—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
Technical standard for cold-formed thin-walled steel multi-storey residential buildings: JGJ/T 421—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [16] 戴俭, 刘思远. 新型“板拼式”轻钢装配式住宅体系初探[J]. *新建筑*, 2017(2): 24-27.
DAI Jian, LIU Siyuan. A “board splicing type” light steel assembled house structure system [J]. *New Architecture*, 2017(2): 24-27.
- [17] 刘思远. 北京地区新型“钢结构板拼装装配式”农宅关键性构造研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
LIU Siyuan. Research on the key structure of newtype “plate-assembly steel structural” rural house in Beijing [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [18] 彭天雪. 北京地区轻钢装配式新型四合院设计方法研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
PENG Tianxue. Research on design method of steel prefabricated new type of courtyard house [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [19] 陈腾. 北京地区轻钢装配式农宅户型标准化与多样化研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016.
CHEN Teng. Layout standardized design and diversity application research of light steel prefabricated rural house [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016.
- [20] 闫维明, 谢志强, 宋林琳, 等. 冷弯薄壁型钢锁铆连接力学性能及其本构模型研究[J]. *工程力学*, 2017, 34(8): 133-143.
YAN Weiming, XIE Zhiqiang, SONG Linlin, et al. Study on the mechanical property of self-piercing rivet and its constitutive model in cold-formed thin-walled steel [J]. *Engineering Mechanics*, 2017, 34(8): 133-143.
- [21] 闫维明, 谢志强, 宋林琳, 等. 冷弯薄壁型钢结构多颗锁铆连接受剪性能试验研究[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(10): 131-138.
YAN Weiming, XIE Zhiqiang, SONG Linlin, et al. Experimental investigation on shear behavior of multiple self-piercing rivet connections for cold-formed thin-walled steel structures [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(10): 131-138.
- [22] 谢志强, 闫维明, 慕婷婷, 等. 锁铆连接在模块化装配式冷弯薄壁型钢结构中应用可行性研究[J]. *北京工业大学学报*, 2018, 44(1): 104-111.
XIE Zhiqiang, YAN Weiming, MU Tingting, et al. Feasibility research on self-piercing rivet connections

- used in structure prefabricated modularly with cold-formed thin-walled steel[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2018, 44(1): 104-111.
- [23] 谢志强, 闫维明, 宋林琳, 等. 一种模块化装配式冷弯薄壁型钢墙板结构体系: CN105863110B[P]. 2018-02-09.
XIE Zhiqiang, YAN Weiming, SONG Linlin, et al. Modular assembling type cold-bent thin-wall type steel wall board structural system; CN105863110B [P]. 2018-02-09.
- [24] 闫维明, 谢志强, 宋林琳, 等. 一种模块化装配式 L 形冷弯薄壁型钢组合墙体及其连接方式: CN105888102A[P]. 2016-08-24.
YAN Weiming, XIE Zhiqiang, SONG Linlin, et al. Modular assembly type L-shaped cold-formed thin-walled steel combined wall and connecting mode thereof; CN105888102A[P]. 2016-08-24.
- [25] 谢志强, 闫维明, 宋林琳, 等. 一种模块化装配式 T 形冷弯薄壁型钢组合墙体及其连接方式: CN105888101A[P]. 2016-08-24.
XIE Zhiqiang, YAN Weiming, SONG Linlin, et al. Modular assembly type T-shaped cold-formed thin-walled steel combined wall and connecting mode thereof; CN105888101A[P]. 2016-08-24.
- [26] 闫维明, 谢志强, 宋林琳, 等. 一种模块化装配式十字形冷弯薄壁型钢组合墙体及其连接方式: CN105908855A[P]. 2016-08-31.
YAN Weiming, XIE Zhiqiang, SONG Linlin, et al. Modularized assembling-type cross-shaped cold-bending thin-wall profile steel combined wall and connection method thereof; CN105908855A[P]. 2016-08-31.
- [27] 熊峰, 吴潇, 柳金峰, 等. 西南民族村寨防灾综合技术研究构想与成果展望[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(4): 13-22.
XIONG Feng, WU Xiao, LIU Jinfeng, et al. Research framework and anticipated results of the comprehensive disaster prevention technology in ethnic villages of southwest China [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(4): 13-22.
- [28] 叶美琳. 冷弯薄壁型钢用自攻螺钉选配标准研究[D]. 上海: 同济大学, 2021.
YE Meilin. Research on matching criteria of self-drilling screw in cold-formed thin-walled steel structures [D]. Shanghai: Tongji University, 2021.
- [29] 建筑抗震设计规范: GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
Code for seismic design of buildings: GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [30] 建筑结构荷载规范: GB 50009—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Load code for the design of building structures: GB 50009—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.