

doi: 10.11918/j.issn.0367-6234.2016.06.001

# 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

叶继红

(混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室(东南大学), 210018 南京)

**摘要:** 轻钢结构是天然的绿色建筑,也是天然的工业化建筑.中国人口众多,土地资源紧张,地震灾害严重,因此发展多层冷成型钢房屋建筑符合中国国情.将低层冷成型钢结构体系拓展至多层结构,存在4个主要技术难点.课题组通过结构体系与主要部件两个层面的改进,提出了多层冷成型钢龙骨式复合剪力墙结构体系及其两个重要部件——冷成型钢托梁龙骨-A1C板组合楼盖和带有夹心墙板单元的轻钢龙骨式复合墙体.还针对该新型体系的抗侧、抗火等基础理论问题,阐述了课题组研究进展及国内外同行的相关研究工作.最后,从宏观角度指出了该新型体系尚需开展的研究工作.

**关键词:** 冷成型钢结构;多层轻钢龙骨式复合剪力墙结构体系;抗震;抗火;研究进展

**中图分类号:** TU392.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 0367-6234(2016)06-0001-09

## An introduction of mid-rise thin-walled steel structures: Research progress on cold-formed steel framed composite shear wall systems

YE Jihong

(Key Laboratory of Concrete and Prestressed Concrete Structures (Southeast University), Ministry of Education, 210018 Nanjing, China)

**Abstract:** Cold-formed steel structures are natural green and industrialized buildings. Due to the large population, shortage of land resource, as well as serious earthquake disasters, the development of mid-rise cold-formed steel structure becomes very consistent with Chinese national conditions. At present, there are four major technical difficulties existed in the expansion of low-rise cold-formed steel structure systems to mid-rise buildings. Based on the investigation and improvement on the structure system and major components, a new mid-rise cold-formed steel framed composite shear wall structure system was proposed, and two important components of the new structure system were developed, including a composite floor system combining cold-formed steel joists with autoclaved lightweight concrete slabs and cold-formed steel shear wall with sandwich panel units. This paper also reviewed our and other researchers' latest investigation on some fundamental theory problems, such as the lateral and fire resistances of the new structure system et al. Finally, the author points out some research work need to be conducted for the new structure system from a macroscopic perspective.

**Keywords:** cold-formed steel structures; mid-rise cold-formed steel framed composite shear wall structure system; seismic resistance; fire resistance; research progress

冷成型钢(冷弯薄壁型钢)厚度一般为0.4~6.4 mm,常用厚度一般低于3.0 mm,是目前最“轻”的一种建筑结构用钢.它是以热轧或冷轧卷材

和带材为原料,在常温下,用连续辊弯成型、拉拔弯曲成型、冲压折弯成型等方法,加工制造出热轧方法难以生产的各种断面的型材和板材,其中,辊弯成型是冷成型钢目前的主要加工手段.因此,不同于热轧型钢,冷成型钢通过合理截面形状而非增加截面厚度提高构件承载力,具有令人满意的强重比.目前,发达国家冷成型钢已占钢材总量的5%,建筑业用

收稿日期: 2016-02-23.

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51538002).

作者简介: 叶继红(1967—),女,教授,博士生导师.

通信作者: 叶继红, yejihong@seu.edu.cn.

冷成型钢已占冷成型钢总量的 70%。

与传统结构相比,冷成型钢结构具有以下优势:

1) 结构轻质高强,抗震性能好,经济指标好。现有冷成型钢房屋建筑结构用钢量  $20 \sim 35 \text{ kg/m}^2$ ,而传统钢框架结构约为  $50 \text{ kg/m}^2$ 。较小的自重可有效降低结构的水平地震作用,加上合理的结构构造形式,因而具有较好的抗震性能;同时自重的减轻对地基承载力要求也相应降低,可减少地基基础造价。

2) 建筑设计美观、空间利用率高。墙板结构四壁规整,可按用户的需求设计出色彩鲜艳、立面丰富、具有现代化气息的建筑。管线暗埋于墙体及楼层结构中,日后检修与维护简单。墙体厚度小,房屋利用率较传统结构提高  $5\% \sim 7\%$ 。

3) 住宅的居住舒适性高。冷弯薄壁型钢住宅采用新型建筑材料,防潮、防霉、防虫蛀、不助燃,居住环境卫生健康,隔热和隔声性能好,是良好的宜居场所。

4) 施工便利、环保、周期短。工地施工主要为构件的安装。一般 3 层住宅建筑,从设计、生产到施工安装完毕仅需一个月左右时间。

5) 节能、节地、节材。所采用的主要结构材料是冷弯薄壁型钢,用钢量少,且钢材可回收利用;组合墙体所用的墙架钢柱、保温棉、石膏板取代了中国村镇大量使用的实心粘土砖,减少了水泥的使用,节约了不可再生资源。此外,这种轻自重的结构体系可建设在坡地、劣地,节约了土地资源。

6) 有利于住宅产业化。冷弯薄壁型钢结构现场拼装,所用构件可实行模数化设计、工厂标准化生产、市场化采购,配套性好,避免了现场人工制作对质量的影响,有利于推动住宅建筑向工业化和产业化发展。

目前,低层冷成型钢房屋建筑结构在欧美、澳洲、日本等国家得到广泛应用,主要用于别墅及三层以下公寓类型房屋。近十余年,多种形式的四至八层多层冷成型钢结构建筑在北美日益增多,在 2008 年北美钢框架联盟(NASFA)10 周年庆祝大会上,理事会主席 Don Moody 亦指出今后十年 NASFA 发展方向即包括多层冷成型钢房屋建筑结构。可见,多层冷成型钢房屋建筑是目前国际冷成型钢领域的重要研究、应用与发展方向。

由于历史原因,钢结构过去在中国一直被认为是工程造价高、设计施工复杂的建筑结构体系。住建部在 2000 年左右开始推广低层冷成型钢房屋建筑,但应用仅局限于少量别墅,总体效果不够理想。分析其原因可能是:

1) 中国人口众多,土地资源紧缺,多层及小高

层住宅是目前中国住宅产业需求量最大的建筑形式,更适合中国国情。

2) 国内在满足冷成型钢结构设计及使用功能的高性能建筑板材以及高强度、低厚度冷成型钢构件方面产量不足,不能形成规模效应,导致结构造价偏高。

3) 国内冷成型钢研究滞后,导致现行规范在冷成型钢结构技术层面相对落后。

中国目前正处于工业化和城镇化快速发展阶段,资源消耗严重,环境恶化压力巨大,发展绿色建筑已被列为国家中长期科技发展规划纲要中重点领域中的优先主题,而冷成型钢结构是天然的绿色建筑,也是天然的工业化建筑。

然而,将低层冷成型钢结构体系拓展到多层结构,将面临诸多技术难点。对此,本课题组从 2003 年开始对多层冷成型钢结构体系进行研究,提出了多层轻钢(冷成型钢)龙骨式复合剪力墙结构体系,并对其抗侧、抗火等基础理论问题展开系统试验与理论研究。下面针对这三方面内容结合国内外同行及本课题组的最新研究进展进行阐述。

## 1 新型多层冷成型钢房屋建筑结构体系

将低层冷成型钢房屋建筑结构体系扩展至多层结构存在以下技术问题:

1) 成倍增大的竖向荷载导致常用的单根 C 型墙体龙骨立柱难以满足承载力要求。

2) 结构抗侧力体系难以满足中国现行建筑抗震设计规范的多层结构抗剪及抗倾覆要求。由于低层冷成型钢房屋建筑结构的上、下层组合墙体不连续,构造上通常在上、下层组合墙体之间加设抗拔锚栓。但在多层建筑结构中,伴随着房屋高度增加,由于锚栓处的变形而引起的墙体整体转动变形不可忽略,并将明显降低结构侧向刚度及承载力。

3) 低层冷成型钢房屋建筑中普遍采用的冷成型钢托梁-OSB 板(定向刨花板)组合楼盖由于刚度偏小,存在振动、隔音等使用功能问题,在分户式多层房屋建筑中不适用。

4) 现有的冷成型钢组合墙体及楼盖形式不能满足中国多层建筑结构严格的建筑构件耐火要求。实际工程中的低层冷成型钢房屋建筑结构,其常用组合墙体耐火时间不足 40 min,远低于中国建筑设计防火规范的多层普通民用建筑承重墙至少三级(120 min)耐火极限要求。此外,OSB 板、胶合板具有可燃性,在多层冷成型钢房屋建筑中不可作为承重墙体及楼盖的覆面板材使用。

因此,低层冷成型钢房屋建筑结构体系不能直

接应用于多层建筑结构,而多层冷成型钢房屋的结构形式一般可采取以下两种方案:

1)采用普通热轧型钢框架或框架支撑结构作为主结构,将低层冷成型钢房屋建筑结构体系中的各部件仅作为填充墙体、楼面及屋面等次结构,形成热轧型钢与冷成型钢的混合结构体系。

2)对低层冷成型钢房屋建筑结构进行体系改进,使之在竖向承载、抗震、抗火等多方面性能得以强化、提升,最终拓展至多层建筑领域。

综合分析,第二种方案能够充分发挥冷成型钢结构优势,且经济成本优于第一种方案。近几年,在北美地区已建的多层冷成型钢房屋建筑多采取第二种方案,且主要用于住宅、公寓、办公楼及旅馆等商用房屋,见图1。然而,图1中冷成型钢建筑在中国并不适用,且并非多层冷成型钢房屋结构的最合理形式,主要体现在:

1)其承重组合墙体具有60~80 min的耐火性能,满足北美地区多层建筑承重墙60 min耐火极限要求,却远低于中国建筑设计防火规范的耐火极限要求。

2)其楼盖结构采用冷成型钢托梁-压型钢板现浇钢筋混凝土的楼盖形式,施工现场存在大量现浇钢筋混凝土作业,丧失了冷成型钢结构高度预制装配化、施工速度快、环境污染少等特点。部分北美已建多层冷成型钢建筑还有采用预制空心板楼盖形式,从抗震角度在中国亦不适用。



(a) 美国加利福尼亚州5层学生公寓



(b) 美国威斯康星州6层居民公寓

图1 北美多层冷成型钢房屋建筑

鉴于此,针对前述将低层冷成型钢建筑结构体系扩展至多层结构存在的4个技术问题,本课题通

过体系与主要部件2个层面的改进,提出了多层冷成型钢龙骨式复合剪力墙结构体系。其中,在体系层面的改进措施:

1)提高结构构件竖向承载力——各楼层复合墙体的冷成型钢龙骨立柱可根据其竖向荷载水平分别采用单C、双拼或三拼C型截面形式。

2)采取若干措施提升结构整体性及抗侧性能——其中包括在结构关键部位设置竖向连续的方钢管轻质混凝土柱代替C型龙骨立柱(图2),这是与传统冷成型钢复合墙体的显著区别。

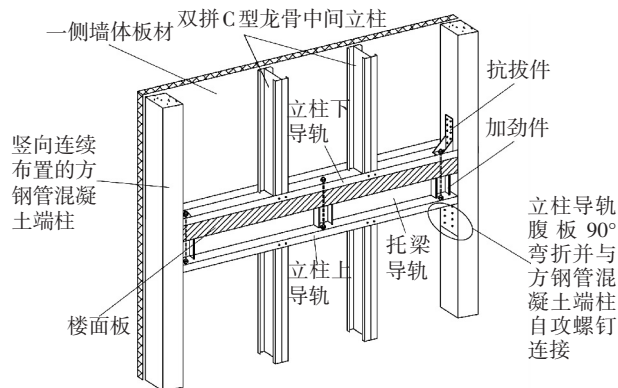


图2 具有连续方钢管边柱的组合墙体

在主要部件层面的改进措施:

1)提出新型楼盖形式——冷成型钢托梁龙骨-ALC板(蒸压轻质加气混凝土板)组合楼盖(图3)。新型楼盖在满足楼盖刚度以及振动、隔音等使用功能要求方面,与传统钢筋混凝土楼盖无明显区别,满足中国规范相关耐火要求(本文第2节)。

2)提出新型组合墙体——带夹心墙板单元的轻钢龙骨式复合墙体(图4),可提高复合墙体抗侧性能(本文第3节),并满足中国规范的多层结构承重墙耐火要求(本文第2节),同时,有效简化了组合墙体的施工工序。

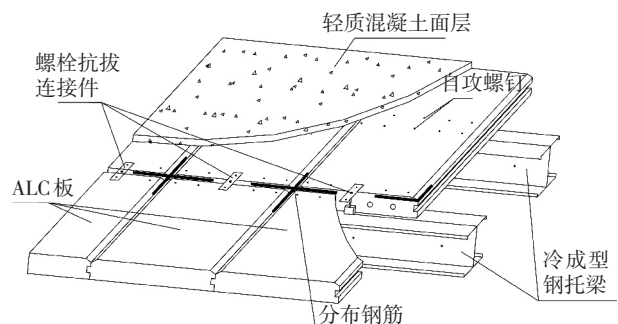


图3 新型冷成型钢托梁龙骨-ALC板组合楼盖结构

多层轻钢龙骨式复合剪力墙结构体系各楼层混凝土面层及方钢管内混凝土均采用轻质自密实混凝土,而该体系的其余部分均可实现工厂预制,现场拼装,并且可大量使用轻质环保节能材料。本体系包括龙骨立柱、复合墙体、组合楼盖等所有构件均参与受力,是一种高效的结构体系,可以获得显著经济指标。

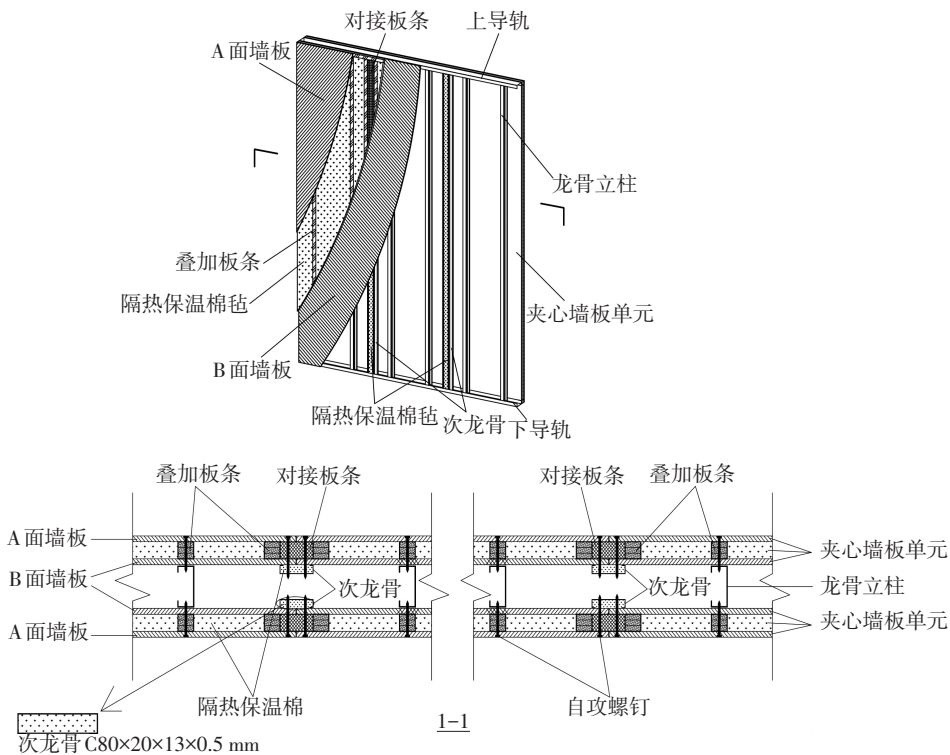


图 4 带有夹心墙板单元的轻钢龙骨式复合墙体

## 2 新型多层冷成型钢结构抗火研究

### 2.1 冷成型钢结构主要组成材料及连接件高温力学性能

冷成型钢结构的主要组成材料包括冷成型钢构件、建筑板材及填充材料等,各组成材料的高温力学性能是进行冷成型钢结构抗火问题热力耦合研究的基本输入参数。由于冷成型钢截面厚度小,热传导速率高,同时材料冷加工特性随温度升高逐渐消失,导致其高温力学性能降低程度快于热轧型钢,故现行各国规范中的热轧型钢高温力学特性曲线及公式对冷成型钢并不适用。同时,欧洲规范( EC3 part1.2)与英国规范( BS5950)的冷成型钢高温材性建议曲线均基于热轧型钢研究结果,缺乏足够合理性。冷成型钢结构常用建筑板材包括 OSB 板、石膏板、玻镁板及硅酸钙板等,其常用连接件包括冷成型钢构件间的自攻螺钉连接件以及冷成型钢构件与建筑板材间的自攻螺钉连接件。目前,冷成型钢、建筑板材及其连接件的高温力学性能大多通过试验获得,国内外尚未有规范对其做出明确规定。

试验方法主要分两种:稳态试验方法(恒温加载)和瞬态试验方法(恒载升温)。国内外均有学者对多种类型钢材的高温力学性能进行稳态试验研究,但是,限于试验设备条件,以及不同地区冷成型钢材料差异性,导致这些试验不够理想且试验结果相互差异明显。对于瞬态试验,仅有少量学者涉

及<sup>[1-3]</sup>,但并未给出基于瞬态试验的钢材高温应力-应变曲线以及高温极限强度折减系数曲线。此外,上述研究均针对冷成型钢平板部位,而其转角部位由于冷弯效应,常温与高温材料特性均与平板部位有所不同。但是,国内外目前对冷成型钢转角部位的相关研究明显不足<sup>[1,4]</sup>。

本课题组针对国内常用的 Q345、G550 冷成型钢进行了 200 余次高温稳态与瞬态试验,定量比较了 Q345 及 G550 冷成型钢瞬态与稳态试验结果、平板与转角部位的差异性,在此基础上,最终提出了统一的高温材性折减系数表达式及应变-应变本构模型<sup>[5-8]</sup>。

对于建筑板材及连接件,已有研究大多针对其常温力学特性,尚未发现常用建筑板材高温力学性能研究文献,仅有极少文献进行了少量冷成型钢(不锈钢)的螺栓连接件、自攻螺钉连接件及射钉连接件高温稳态试验<sup>[9-11]</sup>,试验表明现行北美、澳洲及欧洲规范的连接件常温计算公式在考虑了钢材高温材性折减后,对连接件高温极限承载力估计仍过于保守。

### 2.2 冷成型钢承重组合墙体、组合楼盖抗火试验

冷成型钢承重组合墙体是冷成型结构主要竖向承重及抗侧部件。火灾情况下,墙体通常为单侧受火,因此冷成型钢墙体立柱温度会呈现明显不均匀分布,由此产生温度弯曲(向受火墙体侧弯曲变形)及中性轴偏移,伴随着材料高温力学特性折减,组合墙体承载力较常温情况将明显下降。中国现行建筑设计防火规范( GB50016)规定 3 至 5 层普通民用建筑承重墙不应低于三级耐火要求,耐火极限 120 min

(4至9层住宅建筑的防火要求可按现行住宅建筑规范 GB50368 的规定执行,其承重墙耐火极限为 90 min);单、多层重要公共建筑承重墙的耐火等级不应低于二级,耐火极限 150 min,远高于美国、加拿大等国家的多层民用建筑承重墙 60 min 耐火极限要求。

国内外冷成型钢组合墙体抗火研究主要集中在最近十几年,且多为试验研究。其中,国内部分建筑厂商在天津消防所进行了冷成型钢承重组墙体耐火检验,最长耐火时间为 78 min,试件首先发生完整性破坏,未充分发挥建筑板材的耐火性能;国外则已进行了较多冷成型钢承重组墙体耐火试验,但大多只针对以(防火)石膏板作为覆面墙板的冷成型钢承重墙体,难以满足中国规范防火要求,即使采用两侧各三层 15 mm 厚防火石膏板组合墙体能够满足中国规范防火要求(其耐火时间 136 min)<sup>[12]</sup>,但由于石膏板层数过多造成的建筑成本增大及施工的明显不便,亦会限制多层冷成型钢结构在中国的推广应用。

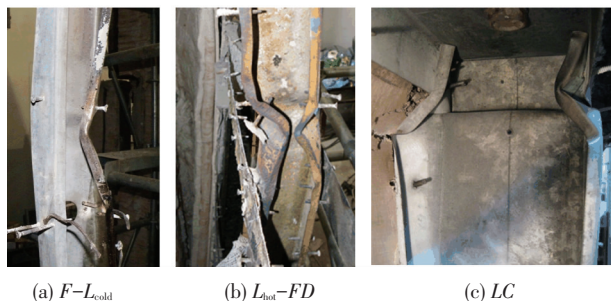
为了有效提高该类墙体耐火极限,课题组完成了十余片新型冷成型钢承重组墙体足尺耐火试验(图 5)<sup>[13-14]</sup>,同时考查了墙板类型、填充层及荷载水平等因素对墙体耐火性能的影响。发现:(1)墙体呈现 3 种破坏模式(图 6),即立柱向受火侧弯曲屈曲同时伴随中部高度处冷翼缘局部屈曲( $F-L_{cold}$ )、距柱顶 600~900 mm 处热翼缘局部屈曲导致立柱向背火侧弯曲-畸变相关屈曲( $L_{hot}-FD$ )、立柱顶端由局部屈曲引起的全截面压屈破坏( $LC$ );(2)不同荷载水平可能造成墙体产生不同的破坏模式,进而影响其耐火时间;(3)硅酸铝棉外填充层的设置可明显延缓墙体龙骨立柱升温,大幅度提高复合墙体耐火时间;(4)绝大多数墙体试件首先发生承载力破坏,建筑板材的耐火性能得以充分发挥,极少数墙体发生完整性破坏,说明新型墙体构造合理。其中,该类墙体在 65% 轴向极限荷载水平下的最长耐火时间达到 165 min,而前文提到的国外最长耐火时间 136 min 的墙体,其荷载水平不但低于本课题组墙体试验荷载而且低于正常使用荷载水平,同时墙板厚度也大于本课题组的新型墙体。

冷成型钢组合楼盖是冷成型钢结构主要竖向荷载传递部件。由于冷成型钢组合楼盖具有组合梁工作特性,因此应至少满足中国现行建筑设计防火规范(GB50016)及住宅建筑规范(GB50368)的多层民用建筑的梁构件三级耐火极限要求(60 min)。火灾条件下,冷成型钢托梁受楼板及吊顶板保护,托梁截面温度亦呈现明显不均匀分布。仅有少量文献涉及冷成型钢组合楼盖抗火试验研究<sup>[15-16]</sup>,但大多针对

冷成型钢托梁-OSB板(胶合板)组合楼盖或存在大量现浇作业的冷成型钢托梁-压型钢板现浇钢筋混凝土楼盖。如前所述,上述楼盖形式在分户式多层房屋建筑中不适用。



图5 冷成型钢承重组墙体足尺耐火试验



(a)  $F-L_{cold}$  (b)  $L_{hot}-FD$  (c)  $LC$

图6 火灾下承重组墙体 3 种屈曲破坏模式

课题组针对图 3 所示的新型冷成型钢组合楼盖,完成了近十片足尺耐火试验,考查了吊顶板材类型、填充层及荷载水平等因素对楼盖耐火性能的影响<sup>[17]</sup>。发现:(1)组合楼盖的破坏模式与均布静载下筒支板的变形形态相一致;(2)与承重组墙体不同,组合楼盖的破坏模式不随荷载水平而变化;(3)外置填充层对楼盖抗火不利,但内置岩棉填充层可将组合楼盖的耐火时间延长 10% 以上。课题组所提出的新型组合楼盖,各试件耐火时间均大于 60 min,其中包括书库(5.0 kN/m<sup>2</sup>)等高楼面荷载工况。

### 2.3 冷成型钢组合墙体、组合楼盖抗火简化理论

冷成型钢组合墙体、楼盖的抗火理论研究主要涉及瞬态传热及热-力耦合分析。

目前,冷成型钢组合墙体、组合楼盖抗火研究的常用计算分析方法为有限元方法及简化理论模型方法,其中有限元方法计算耗时长、效率较低。为进一步提高计算效率,部分学者分别通过显式有限差分方法以及串并联热阻能量方程方法预测组合墙体横截面温度分布情况<sup>[18]</sup>,但存在以下不足:(1)显式差分方法收敛准则较为严格,对于部分建筑材料将难以收敛;(2)串并联热阻能量方程方法精度偏低。

在热-力耦合分析方面,部分学者分别通过对

欧洲 ENV1993 规范建议公式、北美 AISI 规范的直接强度法计算公式进行修正, 以此用于冷成型钢承重组合墙体单侧受火计算<sup>[19-20]</sup>, 其不足之处在于: (1) 修正公式计算过程繁琐, 且计算结果为构件高温极限承载力, 而不是实际工程更为关心的耐火时间, 不便工程设计使用; (2) 冷成型钢组合墙体受火破坏模式已较常温情况发生明显改变, 但其仍沿用墙体常温屈曲计算思路, 物理意义不明确; (3) 计算过程中无法考虑构件由于温度弯曲变形引起的二阶  $P-\Delta$  效应, 而其在墙体的侧向变形所占比重以及对墙体破坏模式的影响都非常重要, 由此导致墙体高温极限承载力计算结果精度不够理想。

为了提高冷成型钢组合墙体、楼盖的防火分析精度与计算效率, 课题组提出了瞬态传热简化模型——隐式差分模型<sup>[21-23]</sup> (图 7)。该模型可考虑各

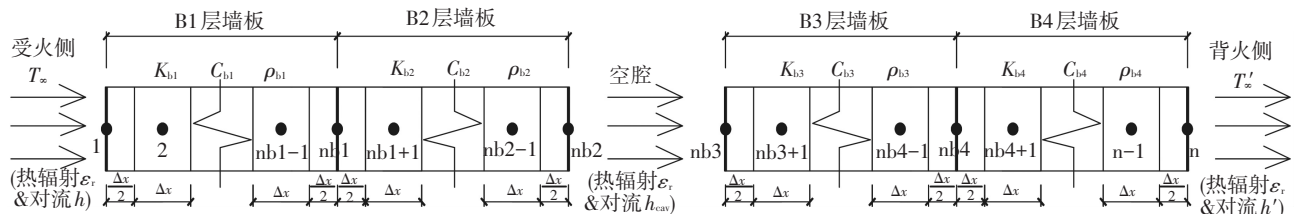


图 7 冷成型钢复合墙体有限差分传热模型

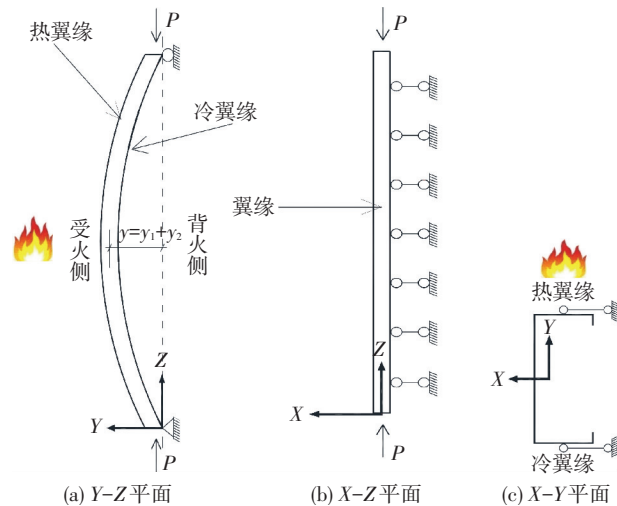


图 8 冷成型钢复合墙体热-力耦合简化理论模型

### 3 新型多层冷成型钢结构抗侧研究

#### 3.1 多层冷成型钢龙骨式复合剪力墙结构体系抗震特点

地震模拟振动台实验和震害调查表明, 低层冷成型钢房屋具有良好的抗震性能, 9 度罕遇地震下一般不会出现整体倒塌。但多层轻钢龙骨式复合剪力墙结构, 随着结构高度的增加,  $P-\Delta$  效应将加剧; 同时, 轻钢龙骨式复合墙体在各楼层处上、下构造不连续, 由此会明显降低结构的侧向刚度和承载力, 导致震害程度和破坏概率大大增加。

轻钢龙骨式复合剪力墙结构的破坏机理与延性的框架结构和剪力墙结构不同, 也和采用脆性材料

层覆面板材随温度变化的不同热物理特性 (包括受火过程中脱水、分解及水蒸气移动现象) 及板材脱落影响。课题组还提出了热力耦合简化理论模型<sup>[20-22]</sup> (图 8)。模型将问题简化为轻钢龙骨在不均匀温度、荷载下的二阶分析问题, 可以考虑截面材料不均匀热物理特性、强几何非线性、中性轴偏移等。利用上述模型, 组合墙体、楼盖破坏模式模拟结果与试验结果一致, 耐火时间估算结果与试验结果相比整体偏于安全, 相对误差在 15% 以内。此外, 课题组还利用有限元软件 ANSYS 进行了墙体耐火数值模拟, 模拟过程一般需要花费几个甚至十几个小时, 而采用热力耦合模型仅需几秒钟即可完成求解。特别是, 热力耦合模型的时间-侧向变形曲线计算结果与试验结果整体亦较为吻合, 由此大幅度提高了该类墙体及楼盖的耐火计算分析效率。

的砌体房屋结构不同。前文已提到, 轻钢龙骨式复合墙体在各层的不连续会明显降低结构的侧向刚度和承载力, 因此, 单纯从墙体抗剪强度角度低于砌体结构。另一方面, 复合墙体中的 C 形和 U 形轻钢龙骨立柱壁厚多为 2 mm 以下, 截面板件宽厚比大, 水平荷载作用下易在构件端部受压区域发生屈曲破坏。大量单层石膏板 (或 OSB 板) 龙骨复合墙体的滞回曲线多为反 S 形和 Z 形<sup>[24-25]</sup>, 曲线形状不饱满, “捏拢”现象明显, 说明墙板的延性和吸收地震能量的能力较差, 因而无法像框架结构或剪力墙结构形成理想塑性屈服机制。综上, 多层轻钢龙骨式复合剪力墙结构是介于延性与脆性结构之间的一种新型结构体系。

#### 3.2 多层轻钢龙骨式复合墙体抗剪性能

国内外学者普遍采用低周反复抗剪足尺试验和数值模拟方法研究轻钢龙骨式复合墙体的抗剪性能, 并以实验手段为主。大量的试验集中于单层墙体, 试验墙体分为单面覆板和双面覆板, 墙板种类包括波纹钢板、OSB 板、石膏板和胶合板等。试验结果非常一致, 即: 墙板对结构抗侧刚度和承载力起主要作用; 立柱间距对墙体抗剪性能影响不大; 墙体滞回曲线形状不饱满, 曲线基本呈反 S 形或者 Z 形, 滞回曲线滑移及“捏拢”现象明显, 结构的耗能机制主要是通过钢龙骨与覆面板之间的相对变形, 墙板吸收地震能量能力较差。

本课题组针对图 4 所示墙体形式,进行了 50 余片的单层、双层及三层低周反复抗剪足尺试验(图 9)。发现<sup>[26-30]</sup>:(1)破坏模式与普通双拼边柱墙体明显不同。对于多层结构,边柱稳定尤为重要,且因抗拔螺栓与螺栓孔的间隙带来的相邻墙体之间的相对侧向变形同样不容忽视。一旦墙板失效,传统的双拼 C 型边柱很容易被压屈(图 10(a)),进而导致整片墙体的失效;采用方钢管混凝土边柱则可同时解决边柱稳定和抗拔问题(图 10(b)),因为其自身稳定性能大大提升,且能有效抑制螺钉倾斜。墙体破坏时,边柱螺钉被剪断,但除墙板周边螺钉外的其余螺钉无明显变形,保证了失去周边螺钉约束的墙板仍可发挥蒙皮受力作用;当边柱刚度足够大时,上下层通长的方钢管混凝土边柱可保持稳定并为墙体提供除墙板以外的另一道安全防线,从而进一步提升了加强型墙体的安全性能;(2)新型墙体的抗剪承载力可较普通墙体提高 30%~50%。虽然各试验墙体的材料、龙骨截面尺寸和螺钉间距均存在一定差异,但总体来说,采用方钢管混凝土柱作为墙体边柱可显著提高冷成型钢组合墙体的抗剪承载力;(3)与普通型边柱墙体相比,采用方钢管混凝土边柱可显著提高墙体的弹性抗侧刚度,且墙体屈服后表现出较好的耗能能力。这是由于柱内混凝土对螺钉尾部约束较强,降低了螺钉的倾斜幅度,从而减小了墙体的侧向变形、提高了墙体的抗变形能力。组合墙体的耗能机制主要是螺钉连接件及立柱的变形,墙体屈服后,钢管混凝土边柱改善了墙体的侧向变形,使墙体内部螺钉变形得以充分开展,提高了墙体的耗能能力;(4)提出了开洞墙体抗剪承载力简化计算方法。冷成型钢组合墙体主要通过墙板与骨架经螺钉连接后产生的蒙皮效应抵抗水平荷载,墙体开洞削弱了这种作用。开洞面积越大,墙体抗剪承载力越小,且与洞口位置有关。美国 AISI 规范采用经验公式对传统开洞墙体的抗剪承载力进行估算,但计算结果偏保守。课题组将洞口两侧及洞口上部墙体等效为组合柱和连梁,提出了新型墙体开洞后的抗剪承载力简化计算方法,与试验结果对比表明,简化方法不但适用于单层开洞墙体的抗剪承载力计算,还可用于计算多层开洞墙体的底层剪力,且计算精度理想。

## 4 新型多层冷成型钢结构体系尚需研究的问题

### 4.1 整体结构抗火

一般结构发生火灾时,只有部分构件受热,且受热构件之间以及受热构件与非受热构件之间相互影

响,因此采用单独构件进行标准火灾试验的方法分析实际结构在火灾下的性能不够精确。为了达到安全经济的防火设计目标,需要对火灾下的结构进行整体分析。



图 9 双层组合墙体抗剪试验



(a) 普通双拼边柱

(b) 方钢管混凝土边柱

图 10 双拼边柱与方钢管混凝土边柱破坏模式对比

由于造价昂贵,目前整体结构火灾试验很少<sup>[31-33]</sup>。文献[30]提及了著名的 Cardington 火灾试验,该试验使人们对轻钢工业厂房的实际抗火能力有了全新认识,并为该类结构抗火设计提供了宝贵的经验与数据。目前缺少多层轻钢房屋整体结构的基准火灾试验。通过建立分析模型进行整体结构数值模拟的方法亦是研究结构火灾反应的重要手段。冷成型钢结构通常含有几百上千根龙骨,同时大片的墙板及自攻螺钉连接件对冷成型钢骨架的约束作用不可忽略,导致冷成型钢整体结构数值模型较传统框架结构复杂许多。大量文献涉及钢框架整体结构抗火数值模拟,甚至包括火灾诱发的结构连续倒塌过程仿真,仅有极少量文献涉及冷成型钢整体结构抗火数值模拟,其中,文献[34]采用美国 GSA 和 DOD 纲要中的线弹性分析方法对一栋 3 层冷成型钢结构兵营进行弹性受火倒塌分析。该方法可避免整体结构模型中部分构件进入塑性后引起的数值计算收敛困难问题,但计算结果准确性难以保证。尚未

检索到冷成型钢整体结构受火弹塑性连续倒塌数值模拟研究文献。

#### 4.2 地震下抗倒塌相关设计理论与方法

中国低层冷弯薄壁型钢房屋建筑技术规程 (JGJ227—2011) 未给出罕遇地震下抗倒塌设计方法。美国 AISI 协会于 2013 年 3 月 20 日批准编制 AISI S400, North American Standard for Seismic Design of Cold-Formed Steel Structural Systems, 该标准已与 2016 年 2 月 1 日正式公布实施, 相关设计理论在我国的适用性尚需验证。

中国现行抗震规范 GB 50011—2010 给出了多层钢结构和钢筋混凝土框架结构房屋“大震不倒”的验算方法和弹塑性层间位移角限值。但前文已述, 多层轻钢龙骨式复合剪力墙结构由于材料、构件和结构体系均存在独特之处, 罕遇地震下的失效机理和破坏模式势必与上述钢结构和钢筋混凝土框架结构不同, 故无法照搬其抗倒塌设计方法。

## 5 结 论

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, 因此发展多层冷成型钢房屋建筑更加符合中国国情。将在北美、澳洲、日本等广泛应用的低层冷成型钢结构体系拓展至多层结构, 本文指出了 4 个主要技术难点。在此基础上, 介绍了一种新型多层轻钢结构体系, 即多层冷成型钢龙骨式复合剪力墙结构体系及其两个重要部件 (冷成型钢托梁龙骨-ALC 板组合楼盖、带有夹心墙板单元的轻钢龙骨式复合墙体), 并针对该新型体系的抗侧、抗火等基础理论问题, 阐述了课题组研究进展及国内外同行的相关研究工作。最后, 从宏观角度指出了该新型体系尚需开展的研究工作。

## 致 谢

感谢我的学生们在此文所提及的研究成果中所做的贡献, 他们是: 陈伟博士、王星星博士生、江力强博士生、贾鸿远硕士、彭贝硕士、刘巍硕士、尹亮硕士、汪正流硕士、赵孟圆硕士、赵明月硕士生、许阳硕士生、于强硕士生。

## 参 考 文 献

[1] OUTINEN J. Mechanical properties of structural steels at elevated temperatures[D]. Finland: Helsinki University of Technology, 1999.

[2] CHEN Ju, YOUNG B. Experimental investigation of cold-formed steel material at elevated temperatures[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 45 (1): 96-110.

[3] 屈立军, 李焕群, 王跃琴, 等. 国产钢结构用 Q345 (16Mn) 钢在恒载升温条件下的应变-温度-应力材料模型[J]. 土木工程学报, 2008, 41 (7): 41-47.

[4] CHEN J, YOUNG B. Corner properties of cold-formed steel sections at elevated temperatures[J]. Thin-Walled Structures, 2007, 44 (2): 216-223.

[5] YE Jihong, CHEN Wei. Elevated temperature material degradation of cold-formed steels under steady and transient state conditions[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 2013, 25(8): 947-957.

[6] CHEN Wei, YE Jihong. Mechanical properties of G550 cold-formed steel under transient and steady state conditions[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 73: 1-11.

[7] 陈伟, 叶继红. 国产 Q345 冷成型钢高温力学性能瞬态试验研究[J]. 建筑结构学报, 2012, 33(2): 41-49.

[8] 陈伟, 叶继红. G550 高强度冷成型钢高温力学性能瞬态试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 56-64.

[9] CAI Yangcheng, YOUNG B. Behavior of cold-formed stainless steel single shear bolted connections at elevated temperatures[J]. Thin-Walled Structures, 2014, 75: 63-75.

[10] YAN Shu, YOUNG B. Screwed connections of thin sheet steel at elevated temperatures-part 1: steady state tests[J]. Engineering Structures, 2012, 35: 234-243.

[11] LU Wei, MA Zhongcheng, MAKELAINEN P, et al. Behavior of shear connectors in cold-formed steel sheeting at ambient and elevated temperatures [J]. Thin-Walled Structures, 2012, 61: 229-238.

[12] KOLARKAR P N. Structural and thermal performance of cold-formed steel stud wall systems under fire conditions [D]. Queensland: Doctoral Thesis in Queensland University of Technology, 2010: 95-102.

[13] CHEN Wei, YE Jihong, BAI Yu, et al. Improved fire resistant performance of load bearing cold-formed steel interior and exterior wall systems[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 73(12): 145-157.

[14] CHEN Wei, YE Jihong, BAI Yu, et al. Full-scale fire experiments on load-bearing cold-formed steel walls lined with different panels [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 79(12): 242-254.

[15] SULTAN M A. Fire resistance of steel C-joist floor assemblies[J]. Fire Technology, 2010, 46: 375-405.

[16] SAKUMOTO Y, HIRAKAWA T, et al. Fire resistance of walls and floors using light-gauge steel shapes[J]. Journal of Structural Engineering, 2003, 119(11): 1522-1530.

[17] 叶继红, 陈伟, 汪正流, 等. 冷弯薄壁 C 型钢托梁-加气混凝土板组合楼盖足尺耐火试验研究[J]. 建筑结构学报, 2015, 36(8): 108-115.

[18] SHAHBAZIAN A, WANG Yongchang. A simplified approach for calculating temperatures in axially loaded cold-formed thin-walled steel studs in wall panel assemblies ex-

- posed to fire from one side [J]. *Thin-Walled Structures*, 2013, 64: 60-72.
- [19] FENG M, WANG Y C. An analysis of the structural behavior of axially loaded full-scale cold-formed thin-walled steel structural panels tested under fire conditions [J]. *Thin-Walled Structures*, 2005, 43(2): 291-332.
- [20] SHAHBAZIAN A, WANG Yongchang. A fire resistance design method for thin-walled steel studs in wall panel constructions exposed to parametric fires [J]. *Thin-Walled Structures*, 2014, 77: 67-76.
- [21] 叶继红,陈伟,彭贝,等. 冷弯薄壁 C 型钢承重组合墙耐火性能简化理论模型研究[J]. *建筑结构学报*, 2015, 36(8): 123-132.
- [22] CHEN Wei, YE Jihong, BAI Yu, et al. Thermal and mechanical modeling of load-bearing cold-formed steel wall systems in fire [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2014, 140(8): 1-13.
- [23] CHEN Wei, YE Jihong. Simplified prediction of the thermal and mechanical behavior of the cold-formed steel composite floor at room and elevated temperatures [J]. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2016. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001484.
- [24] 周绪红,石宇,周天华,等. 冷弯薄壁型钢组合墙体抗剪性能试验研究[J]. *木工程学报*, 2010, 43(5): 38-44.
- [25] HASSAN M, HAMID R R. Performance of light-gauge cold-formed steel strap-braced stud walls subjected to cyclic loading [J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(1): 36-83.
- [26] YE Jihong, WANG Xingxing, ZHAO Mengyuan. Experimental study of shear behavior of screw connections in CFS sheathing [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121: 1-12.
- [27] WANG Xingxing, YE Jihong. Cyclic testing of two-and three-story cold-formed steel (CFS) shear walls with reinforced end studs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2016, 121: 13-28.
- [28] YE Jihong, WANG Xingxing, JIA Hongyuan, et al. Cyclic performance of cold-formed steel shear walls sheathed with double-layer wallboards on both sides [J]. *Thin-Walled Structures*, 2015, 92: 146-159.
- [29] WANG Xingxing, YE Jihong. Reversed cyclic performance of cold-formed steel shear walls with reinforced end studs [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 113: 28-42.
- [30] YE Jihong, FENG Ruoqiang, CHEN Wei, et al. Behavior of cold-formed steel wall stud with sheathing subjected to compression [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2015, 116(1): 79-91.
- [31] PYL L, SCHUEREMANS L, DIERCKX W, et al. Fire safety analysis of a 3D frame structure based on a full-scale fire test [J]. *Thin-Walled structures*, 2012, 61: 204-212.
- [32] LENNON T. Results and observations from full-scale fire test at BRE Cardington [R]. BRE Client Report. Watford: Building Research Establishment Ltd, 2004: 215-741.
- [33] 吕俊利,孙建东,董毓利. 钢框架厂房火灾后的破坏形态 [J]. *防灾减灾工程学报*, 2012, 32: 95-98.
- [34] BAE S W, LABOUBE R A, BELARBI A, et al. Progressive collapse of cold-formed steel framed structures [J]. *Thin-Walled Structures*, 2008, 46: 706-719.

(编辑 赵丽莹)

## 封面图片说明

封面图片来自“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”,轻钢结构是天然的绿色建筑,也是天然的工业化建筑.通过结构体系与主要部件两个层面改进,提出了多层冷成型钢龙骨式复合剪力墙结构体系及其两个重要部件——冷成型钢托梁龙骨-ALC板组合楼盖和带有夹心墙板单元的轻钢龙骨式复合墙体.针对该新型体系的抗侧、抗火等基础理论问题,系统阐述了课题组及国内外同行的相关试验及理论研究进展.最后,从宏观角度指出了该新型体系尚需开展的研究工作.

(图文提供:叶继红,混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室(东南大学))