

受力蒙皮结构的研究及发展

史艳莉 王秀丽

(兰州理工大学 土木工程学院 兰州 730050)

摘要 简述了受力蒙皮作用的基本原理及国内外对受力蒙皮作用的研究及发展概况,介绍了蒙皮结构的主要形式,指出了我国在这方面存在的差距,展望了该结构体系在我国的发展前景。

关键词 受力蒙皮 蒙皮效应 压型钢板 钢结构

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF STRESSED SKIN DIAPHRAGMS

Shi Yanli Wang Xiuli

(College of Civil Engineering, Lanzhou University of Science & Engineering Lanzhou 730050)

ABSTRACT It is summarized that the primary principles of the stressed skin construction the main forms and the research situation and development of the structure both at home and abroad. The gap of developing the structural system in our country is also pointed out. The outlook for developing the structural system in our country is given.

KEY WORDS stressed skin diaphragms effect profiled sheet steel structure

随着我国钢结构的发展和国外钢结构技术的引进,国内在钢结构的理论研究和设计应用等方面都有了长足的进步,尤其是近年来在轻型钢结构方面的成就更是令人振奋。轻钢结构受力蒙皮应用于建筑业最早是受航天技术的影响,引入到结构中主要是考虑到对主体结构的有利作用,节省钢材,根据欧洲钢结构协会 TCT 委员会对受力蒙皮结构专门进行的经济性研究表明,可节约费用约为屋面板和主体钢结构总造价的 10%。此外,受力蒙皮结构设计的最大贡献在于反映了建筑物的真实受力情况,而不只是考虑理论化的框架作用。这方面的认识非常重要,因为无论是否予以考虑,框架与屋面板之间的作用是始终存在的。

受力蒙皮研究和应用的实际意义在于充分发挥压型钢板蒙皮的潜在承载特性,使结构整体作用的设计更加合理,从而获得加强结构空间刚度、降低结构用钢量等效果。

在我国的实际工程设计中,存在着这样一个误区:认为忽略应力蒙皮效应趋于保守,实际结构不考虑应力蒙皮效应是偏于安全的。然而,应力蒙皮效应事实上是存在于大量的工程实际中的,而不管工程本身是否按照应力蒙皮效应设计。在这些工程中,存在着作为屋面板的压型钢板在正常工作荷载下先破坏的情况。特别是在那些主要承受横向荷载

的轻钢结构中,由于高度大,结构体系存在着较大的侧向位移。在这种情况下,即使在工作荷载下,屋面板的屈曲甚至破坏都是有可能出现的。如果实际工程中一概不予考虑,可能会造成严重的后果。从这个意义上看应力蒙皮效应并不仅仅是一个简单的经济性问题,它也涉及到结构的安全性和适用性。

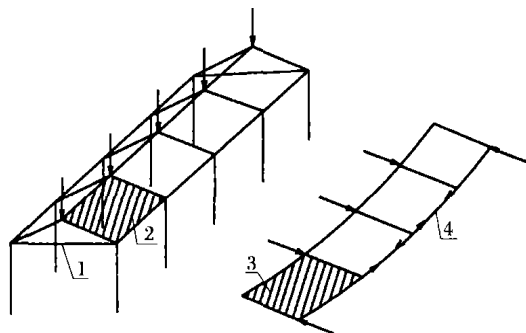
1 蒙皮作用的基本原理^[1]

最早,人们是从图 1 所示的坡屋顶门式刚架结构中认识到受力蒙皮作用的。框架在垂直荷载的作用下,屋脊有向下、屋檐有向外运动的趋势。但如果屋面板在平面内不出现变形,这类位移就不可能发生。屋面板在自身平面内有较大的刚度,它与支承檩条一起形成类似于深梁结构抵抗上述变形。檩条的作用类似于梁的翼缘,承受由弯曲作用引起的轴向力,屋面板则起着梁腹板的作用,承受剪力。

对于如图 2 所示的平屋顶结构,侧向水平荷载直接作用在檐口标高处屋面板的平面内,因此,该屋面板也象上述的深板梁,凭借受力蒙皮作用,可有效地承受该水平荷载。这种形式的受力蒙皮作用相当有效,以至于往往有可能完全依靠这种屋面板来保证其稳定性而无需刚接框架或抗风支撑。在上述两

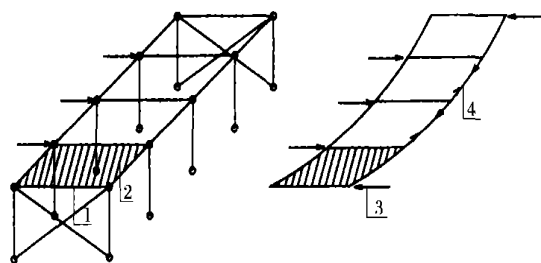
第一作者:史艳莉 女 1977 年 8 月出生 硕士研究生
收稿日期:2003-12-03

种结构中可以看到,受力蒙皮作用的效果依赖于两端山墙的约束作用,但一般这种约束并不是为了受力蒙皮作用。因此,无论设计者是否意识到,受力蒙皮作用总是存在的。



1—抵抗屋面板中作用力的山墙拉杆; 2—屋面板;
3—屋面板中的受剪区; 4—边缘构件中的翼缘内力

图1 承受垂直荷载作用的坡屋顶门架
结构中的受力蒙皮作用



1—屋面板; 2—屋面板中的受剪区;
3—如同深板梁作用的屋面板把荷载传到山墙上;
4—边缘构件中的翼缘内力

图2 承受水平荷载作用的平屋顶门架
结构的受力蒙皮作用

显然,受力蒙皮作用只对水平荷载有利,而对于垂直荷载是不起作用的。因此,对于坡屋顶框架结构所承受的竖向荷载,受力蒙皮作用的有效程度取决于屋面的坡度,坡度越小,受力蒙皮作用越弱。

2 国内外的研究发展概况^[1~3]

2.1 国外研究概况

20世纪中期,人们就认识到了受力蒙皮作用的存在及其潜在意义,50年来,发达国家在这方面进行了长期、系统的试验研究。

20世纪40年代末期,美国就开始对受力蒙皮作用进行试验研究,但系统的研究试验工作是在1955年的Cornell大学开始的,该校的Witer和Nilson研究小组进行了50个足尺寸的大型系统的受力蒙皮试验,阐明了不同板形、波高、板厚和板跨对受力蒙皮抗剪强度和柔度的影响及受力蒙皮总变形

的组成等,为蒙皮作用的研究和应用奠定了基础。1965年美国的Luttrell进行了深入的试验研究,提出了估算受力蒙皮刚度的半经验公式。1967年美国钢铁协会(AISI)编制了《轻钢蒙皮设计》一书,成为世界上第一本受力蒙皮设计规程。1968年,英国的Bryan等在大量试验研究基础上,提出了受力蒙皮剪切柔度和强度的计算方法和公式。1969年至1975年,Easley等研究并提出了受力蒙皮整体失稳的计算公式。1972年美国钢板协会(SDI)发布了《受力蒙皮设计暂行建议》。1973年美国军方出版了《房屋抗震设计》,提出了焊接蒙皮板的设计经验公式。1977年欧洲钢结构协会(ECCS)出版了《欧洲建议——钢结构受力蒙皮设计》。1981年美国钢板协会出版了蒙皮设计手册,同年,该协会综合英美研究成果编写了《冷弯型钢蒙皮设计》(草案)。1982年,英国出版了受力蒙皮设计研究方面较全面的权威性设计手册——《受力蒙皮设计手册》,直到现在仍是世界各国进行受力蒙皮设计研究的主要参考资料。

继英美之后,澳大利亚、瑞典、德国、捷克、加拿大、日本等国也进行了相应的研究工作,并出版了各自的设计规程。

近几十年来,在发达国家,受力蒙皮设计在许多工程实践中得到了成功的应用。如:20世纪60年代英格兰东南建筑师协会设计并建造的考虑蒙皮效应的学校、办公楼;70年代建成的新修道院果菜市场(386 m×68.6 m)、比斯顿药厂(跨度36 m)、诺丁汉郡女王大道工业仓库(14 000 m²)、斯图特体育场主看台挑棚结构及建于旧金山和洛杉矶机场的波音747机库等。而1983年匹斯堡采用蒙皮筒体建成54层、高222 m、面积15.8万m²的文米隆银行大厦则首开了高层钢结构建筑应用蒙皮技术的先河。

2.2 国内研究概况

我国对钢结构受力蒙皮的研究起步较晚,20世纪80年代在原哈尔滨建筑工程学院等单位开始了这项研究工作,刘锡良教授、张耀春教授及其课题组在这方面做了大量的试验研究工作,提出了分析蒙皮支撑的钢构件静力性能的有限元法,该方法将钢构件离散成空间薄壁梁柱单元,将蒙皮离散成等效的正交各向异性的壳单元,并将钢构件与蒙皮之间的连接件作为连接单元,对蒙皮支撑的钢构件在静荷载作用下的线性和几何非线性性能进行了一系列的分析研究^[4~7],并用该方法对蒙皮支撑的梁和柱的静力性能进行了分析,采用考虑几何非线性的有

限元分析方法分析了蒙皮的抗剪刚度、扭转约束、构件长细比及荷载偏心对蒙皮支撑梁及柱基本受力性能的影响,指出蒙皮的支撑作用可以显著地改善长细比较大的梁柱构件的受力性能并提高其承载力^[8-11]。此外,还有受力蒙皮连接的抗剪性能试验的研究^[12,13]、蒙皮支撑的C型檩条在静力荷载作用下的性能以及在风吸力作用下性能的理论分析及试验研究^[14,15]、跨越多檩条蒙皮体抗剪性能的试验研究等^[16]。

1985年在张耀春教授的指导下,我国在这方面进行了第一次专题试验研究(V115型压型钢板蒙皮基本性能试验研究);1987年在我国冷弯薄壁型钢结构规范组的支持下,成立了冷弯型钢蒙皮结构研究课题组,协调并组织原哈尔滨建筑工程学院、原重庆建筑工程学院、原南京建筑工程学院和原冶金部建筑研究总院等分别进行了自攻螺钉连接和焊接连接低压型板蒙皮基本性能试验研究及高波板蒙皮用于厂房的抗剪性能研究,并作为一大型综合课题通过了部级鉴定。在此基础上,由冷弯型钢技术研究委员会和建设部决定于1992年6月成立有上述单位参加的《受力蒙皮设计规程》编制项目组,开展有关补充试验研究及规程编制工作,1993年由原冶金部建筑研究总院初步完成了高波板蒙皮抗剪基本性能的试验工作,为我国在蒙皮作用方面的研究奠定了基础。

3 蒙皮结构的主要形式

3.1 常规结构

采用压型钢板墙面和屋面板的多层或单层建筑,是蒙皮结构中最常见的结构类型。随着国家住宅产业化进程的不断推进,多层钢结构住宅和别墅结构中采用轻型型钢或冷弯薄壁型钢结构作为其主要骨架、用夹芯板作为墙面围护材料的结构越来越多,这种墙面板能够与建筑的骨架结构共同抵抗水平方向的荷载。

3.2 轻型钢折板结构

这种结构是坡屋顶门架的一种合理演化。在坡屋顶门式框架中,取消中间的框架,依靠仅由折叠线构件和面板组成的板式结构覆盖两山墙之间的空间。其主屋盖结构仅包括两种构件及与其有关的紧固件,即由平板经冷弯加工成型的折叠线构件及折叠线构件之间的压型金属薄板板面。

3.3 轻型薄钢双曲抛物面壳

对于轻型薄钢结构,双曲抛物面是一种特别有

利的几何形状,因为压型薄钢板易于加工,可做出许多形式的屋盖。洛杉矶和旧金山的大型飞机库就采用了双曲抛物面形式的屋盖结构。

3.4 轻型薄钢圆柱壳

由多块永久性曲板可以拼装成任何壳体外形,而不必使之扭曲。最常用的方法为将压型薄板卷成圆柱面,也可以制成其他形状。轻型薄钢圆柱壳屋顶还包括设内部框架与不设内部框架两种情况。在农业建筑中可以使用这种形式建造粮仓。

3.5 受力蒙皮箱形结构

蒙皮作用用于箱形单元式结构时,整个箱形单元的墙壁、地面和顶面用轻型压型构件制成。这种单元可在厂房内预制,内部装修好后再运到施工现场。这种箱形单元经常用作单层活动房屋,也可组装成多层建筑及各种形式多样的建筑。

3.6 竖向蒙皮在控制侧移方面的应用

在低层或多层建筑中,经常采用的竖向稳定系统均可用竖向隔板代替。后者的主要抗剪构件为压型薄钢板面板和其他类型冷加工成型钢墙板。竖向隔板的工作原理类似于水平屋面隔板的工作原理。

4 受力蒙皮作用的必要条件

要能提供受力蒙皮作用,建筑物的蒙皮构造必须满足以下条件:

1) 应当设置适用的结构件和连接件,以便把隔板作用产生的内力传至主体结构框架上,最后传递给基础。

2) 相邻面板或铺板单元之间的接缝应采用焊接、铆接或以自攻螺栓或其他类似的紧固件固定,要求在使用期间紧固件不得松动、拔出,在面板或铺板材料撕裂前不得出现剪切破坏。

3) 每块面板或铺板的两端均应直接固定在支撑构件上,其固定方法可以采用焊接或通过自攻螺栓、射钉、螺栓或其他紧固件,要求在使用期间紧固件不得松动,并在覆面材料撕裂前不得出现剪切破坏。所有这些紧固件均应穿过波谷固定,并将面板直接紧固在支撑构件上,不宜采用靠摩擦传递剪力的钩头螺栓或其他紧固件。

4) 沿蒙皮隔板跨度的反方向,所有隔板均应设有边缘构件,这些构件及其连接节点应具有足够的强度,能承担蒙皮作用产生的翼缘内力。

在蒙皮设计中必须满足下列基本假设和规定:

1) 蒙皮作为深梁腹板起抗剪作用,其弯曲变形和弯曲约束忽略不计;

2) 设计中必须按试验所依据的同等条件下的蒙皮构造规定其设计构造要求;

3) 设计中一旦考虑了蒙皮效应,必须严格规定建筑物在使用期间不得随意拆除围护板。

5 受力蒙皮作用的应用及研究

最近几年,钢结构在我国得到了广泛的应用,但压型钢板的蒙皮作用,只有 Butler, ABC 等国际公司在设计中予以考虑,国内的《门式刚架轻型房屋钢结构技术规程》(CECS 102: 2002)和上海的《轻型钢结构设计规程》(DBJ 08-68-97)中对于蒙皮效应有“当有必要且有条件时,可考虑屋面板的应力蒙皮效应”的规定,但均没有给出明确的计算和设计方法,主要原因是考虑到国内有关屋面板抗剪性能和板与构件螺栓的连接性能的资料尚不充分,如:采用什么样的连接,连接件的间距,是否需要设置中间梁等,还需进行大量的试验研究。而且国内钢结构施工企业的技术水平不一,施工工艺或施工质量参差不齐,墙板或屋面板与结构的连接不能达到要求,蒙皮效应很难明确量化。此外,钢蒙皮的腐蚀问题等还处于研究阶段。因此,国内还没有制订出相应的蒙皮效应设计规程。以目前国内的施工能力和检测水平将蒙皮效应应用到工程中还为时尚早,因此国内的设计基本上没有考虑,这在经济上是不小的损失。

综上所述,多年来国外在蒙皮作用方面做了大量卓有成效的研究工作,使这门技术在工程中得到了较广泛的应用,积累了很多经验,并逐渐成为一门较为成熟的技术。虽然我国在这方面也做了大量的工作,但还存在着很大的差距,亟需我们加强这一领

域的研究和开发工作。

参考文献

- 1 Davies J M, Bryan E R. Manual of Stressed Skin Diaphragm Design. New York: Granada Publishing, 1982
- 2 季 渊,童根树. 轻钢结构受力蒙皮设计研究综述. 工业建筑, 2002, 32(12): 61~63
- 3 林醒山,柏树新. 国内外受力蒙皮研究发展概况. 南京建筑工程学院学报, 1992, 21(2): 43~49
- 4 朱勇军,张耀春. 蒙皮支撑的钢构件静力分析的有限元方法. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(2): 35~41
- 5 朱勇军,张耀春. 蒙皮支撑的钢构件非线性静力分析. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(3): 53~61
- 6 朱勇军,张耀春,刘锡良. 蒙皮支撑的钢构件静力工作性能研究. 工业建筑, 1998, 29(3): 32~35
- 7 朱勇军,张耀春. 蒙皮支撑的钢构件静力工作性能研究综述. 哈尔滨建筑大学学报, 1995, 28(4): 121~127
- 8 朱勇军,张耀春. 蒙皮支撑的梁在静力荷载作用下的性能. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(6): 15~20
- 9 朱勇军,张耀春,等. 影响蒙皮支撑梁静力性能的若干因素. 天津大学学报, 1999, 32(35): 163~166
- 10 朱勇军,张耀春,等. 影响蒙皮支撑柱静力性能的若干因素. 哈尔滨建筑大学学报, 1998, 31(5): 20~25
- 11 朱勇军,张耀春,刘锡良. 蒙皮支撑柱的静力性能分析. 建筑结构学报, 1999, 20(6): 32~37
- 12 朱延方,姬广华,柏树新. 受力蒙皮连接的抗剪性能试验研究. 南京建筑工程学院学报, 1992, 21(2): 50~59
- 13 乐延方,姬广华,等. 受力蒙皮性能试验研究. 南京建筑工程学院学报, 1992, 21(2): 60~72
- 14 朱勇军,张耀春. 蒙皮支撑的 C 形檩条在静力荷载作用下的性能. 哈尔滨建筑大学学报, 1997, 30(3): 23~28
- 15 李 禄,刘锡良,等. 蒙皮支撑 C 形檩条在风吸力作用下性能的理论分析及试验研究. 钢结构, 2000, 15(4): 18~21
- 16 武振宇,张耀春. 跨越多檩条蒙皮体抗剪性能的试验研究. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(4): 32~37

(上接第 58 页)

对照表 6 可知,荷载比为 0.48 时,耐火钢涂覆 20 mm 的厚涂层能够达到国家 1 级梁的耐火极限要求。由表 6 计算的数据结果还可看出,耐火钢按照其定义的耐 600 °C 高温设计,达到国家 1 级梁的耐火极限时所需涂层厚度应为 23 mm;普通钢按 350 °C 设计应为 50 mm。此状态下耐火钢比普通钢节省 1/2 以上的涂层材料。即便是耐火钢涂覆 20 mm 的厚涂层能够达到 1 级梁的耐火极限要求,普通钢涂覆厚涂层材料增加一倍,即涂层厚度为 40 mm,对照表 6 可知,钢构件温度已达 400 °C,超出了普通钢 350 °C 的防火设计要求。

耐火极限试验结果表明,耐火钢比普通钢具有优越的防火性,而且能够节约 1/2 的涂料。

4 结 论

耐火钢与普通钢对比的耐火极限试验结果表明,耐火钢在无涂覆状态下,达到了《建筑设计防火规范》(GBJ 16-87)规定的 4 级梁耐火极限要求,而普通钢达不到这个规定。说明耐火钢板经过自动焊接成耐火 H 型钢构件,工艺可行,抗火性明显高于普通钢。

薄型涂覆试验耐火钢达到 3 级梁的耐火极限,随着薄型涂层材料厚度的增加并没有显著提高耐火极限,分析认为可能是涂覆薄型涂层后养护期未满足或薄型涂层材料自身不能满足 1000 °C 以上高温状态下的使用。

厚型涂覆试验耐火钢达到了 1 级梁的耐火极限,并且实现耐火钢的涂覆材料比普通钢节省 1/2。