

考虑蒙皮效应的轻钢结构力学性能分析

史艳莉, 王文达, 王秀丽

(兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要:利用有限元程序 ANSYS 对有蒙皮支撑的单层轻钢框架结构进行了考虑几何非线性的有限元分析, 在此基础上, 对影响结构力学性能的主要因素: 蒙皮板的厚度、框架柱的长细比及山墙支撑截面面积等进行了参数分析。结果表明: 增加蒙皮板厚度对提高结构的整体刚度, 减小结构在荷载作用下的侧移是有效的, 对减小结构的应力及内力有一定作用; 在结构允许的长细比范围内, 由于蒙皮板的存在, 使结构在长细比增加的情况下, 结构的变形和应力增长的幅度较为缓慢, 而内力逐渐减小; 山墙支撑从无到有, 对结构的影响较大, 使结构的侧移、应力及内力明显减小, 只是在支撑构件截面面积增大到一定程度后, 对结构的影响才相对减缓。因此, 在实际工程中, 应该重视且合理地考虑山墙支撑的作用。通过以上参数分析得到的初步结论, 可供工程实践参考使用。

关键词:蒙皮效应; 力学性能; 轻钢结构; 参数分析; 有限元

中图分类号: TU391 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-1933(2008)04-030-05

Analysis on the mechanic performance of the diaphragm braced light-weight steel structures

SHI Yanli WANG Wenda WANG Xiuli

(College of Civil Engineering Lanzhou University of Technology Lanzhou 730050, China)

Abstract: By finite element software ANSYS the finite element method for geometric nonlinear analysis of diaphragm braced the single layer of light weight steel frame under static loading is presented in this paper. The thickness of the panel, the λ of the column and the section of the gable bracings are studied. It shows that with the increase of thickness of the pane not only increase the entire rigidity of the building and reduce the deformation of loading but also have the certain effect to decrease the strain and the internal force. With the increase of the λ , the deformation and stress increase is comparatively slow but the internal force diminishes gradually because of the effect of the panel. From nonexistence to existence, the effect of the gable bracings to structure is very big, and the displacement, stress and the internal force decrease obviously, but with the section of the gable bracings increasing gradually, the effect to the building is weaken relatively. Therefore, in reality, the effect of the gable ought to be considered. Finally, some conclusions and suggestions that are important to design and construct are obtained, and which provides a basis for the further research of the stressed skin diaphragm structure.

Key words: diaphragm effect; mechanic performance; light weight steel structures; parameters study; finite element analysis

0 前言

轻钢结构,是指以轻型冷弯薄壁型钢、轻型热轧型钢、焊接型钢、薄钢板、薄壁钢管等为主要受力构件,并采用轻质围护材料的单层和多层建筑。它具有自重轻、安装便捷、造型轻盈美观等优点,近年来

在我国得到了较广泛的应用。但由于自重小,此类结构的主要受力构件截面较小,结构整体刚度不大,受力后变形较大。轻钢结构中的围护系统主要采用各种不同类型的压型钢板或夹芯钢板,压型钢板在作围护结构的同时,当与钢构件良好连接时还可以承受平面内的荷载,具有平面内的抗剪能力,称为应力蒙皮效应^[1],从而能够与整体结构共同工作,增强结构的整体刚度,减少结构的变形,并为与它相连的构件(如梁柱、檩条等)提供有效的侧向约束作用。

为了研究蒙皮效应对轻钢结构力学性能的影响

收稿日期: 2007-04-17

作者简介: 史艳莉(1977-),女,河北涿州人,讲师,硕士,主要从事轻钢结构的教学与研究。

基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(3ZS042-B25-016)

E-mail: wangwd@lzu.cn

响,本文采用有限元方法,对有蒙皮支撑的单层轻钢框架进行了考虑几何非线性的分析^[2],在此基础上,对影响其力学性能的主要因素进行了分析。

1 蒙皮支撑单层钢框架静力性能分析

1.1 有限元模型

设计了一近似实际工程的单层轻钢框架结构房屋,安全等级为二级,采用 Q235 钢材,房屋为封闭式单层单跨平屋顶结构,无支撑,屋面跨度 6.0 m,柱间距 6.0 m,柱顶标高 4.5 m,如图 1 所示,房屋框架梁柱均采用焊接工字形截面,截面尺寸为 200 mm × 180 mm × 5 mm × 7 mm,柱与基础理想刚接,框架梁柱理想刚接,蒙皮采用 YX35-125-750 压型钢板。

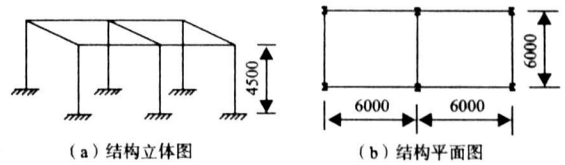


图 1 房屋结构

Fig 1 The prototype of the building

采用有限元程序 ANSYS 分析该单层轻钢框架结构,框架梁柱采用 BEAM188 单元;梁柱节点刚接,柱脚和基础也为刚接;压型钢板采用 SHELL143 单元;板与框架梁柱连接点采用自由度耦合处理。采用考虑几何非线性的方法,分别对不考虑蒙皮效应的纯框架结构和考虑蒙皮效应的结构进行分析,其有限元分析模型分别如图 2(a), (b)所示,其柱顶最大位移值见表 1。

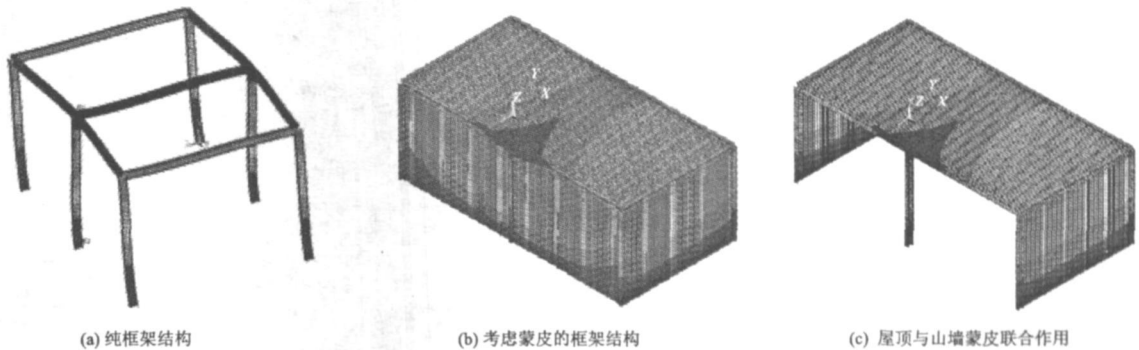


图 2 框架及蒙皮结构变形

Fig 2 Deformation of structure

表 1 不同蒙皮形式结构柱顶最大位移值

Table 1 The maximum deformation of different types stressed skin in diaphragms

	中柱柱顶位移 /mm	边柱柱顶位移 /mm
无蒙皮框架	31.823	17.320
蒙皮框架	1.502	0.848
屋顶与山墙蒙皮联合作用	1.521	0.865

本文主要是模拟平屋顶结构承受风荷载作用。为了简化计算,将房屋纵墙实际承受的沿高度分布的风荷载这一面荷载简化为施加在每榀框架柱顶的水平集中力。根据 GB50009-2001《建筑结构荷载规范》^[3]假定结构所处地区地面粗糙类别为 A 类,风压高度变化系数 $\mu_z = 1.17$,风载体形系数 $\mu_s = 0.8$,风振系数 $\beta_z = 1.0$,基本风压取规范中 50 年一遇的最大风压 $w_0 = 1.85 \text{ kN/m}^2$,则作用在纵墙上的风荷载标准值为:

$$w = \beta_z \mu_z \mu_s w_0 = 1.7316 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

将纵墙风荷载标准值简化为柱顶集中荷载,则中柱柱顶荷载 $P_{中柱} = 1.7316 \times 4.5 \times 6 = 46.7532$

kN,近似取 $P_{中柱} = 50 \text{ kN}$,边柱 $P_{边柱} = 1/2 P_{中柱} = 25 \text{ kN}$ 。

由图 2(a), (b)及表 1 可见,考虑蒙皮效应后,框架柱顶位移明显减小,在最大荷载作用下,中柱柱顶的位移仅有 1.5 mm,边柱为 0.8 mm,远小于规范的限值,位移最大点为中柱柱顶。对于屋顶,位移值中间较大,逐渐向两边减小。这主要是由于山墙和屋顶的压型钢板在柱顶水平荷载的作用下,均可发挥应力蒙皮作用,因此,面内刚度较大,受力后变形较小。

由于纵墙压型钢板在柱顶水平荷载作用下,所承受的是垂直于平面的荷载,不能发挥蒙皮作用,因此,仅考虑屋顶与山墙蒙皮的作用。计算表明,其变形与蒙皮框架结构(屋顶、山墙和纵墙均被蒙皮覆盖)在柱顶水平集中荷载作用下的变形比较接近,如图 2(b), (c)所示及见表 1。因此,在实际工程中,可将较大的门窗洞口设在纵墙上。

1.2 与英国标准 BS5950 (1994)对比分析

英国钢结构标准 BS5950 (1994)^[4]第 9 章有考

考虑蒙皮效应的轻钢结构房屋的设计方法。用该方法计算本文的轻钢框架结构,其最大柱顶位移 $\Delta = k\eta^2 = 0.64 \times 50 \times 0.0335 = 1.1 \text{ mm}^{[5]}$, 而用 ANSYS 分析得到的柱顶最大位移值为 1.502 mm , 两者相差稍大。这主要是由于在英国标准中假定山墙有支撑的作用而阻止其侧移的产生, 即假定山墙是没有侧移的, 而本文的 ANSYS 模型在山墙处用压型钢板代替支撑, 其抗侧移的刚度肯定较差, 故 ANSYS 的分析结果比用英国标准计算的结果偏大。

2 参数分析

为了得到考虑蒙皮效应的单层轻钢框架结构力学性能的一般规律, 在上述模型的基础上, 选取了影响蒙皮效应的主要因素, 如蒙皮厚度、框架柱长细比及山墙支撑等^[6], 进行参数分析, 分析以上各因素对结构变形和内力的影响规律。

2.1 蒙皮板厚度的影响

从 BS5950(1994)^[4] 规程中计算屋顶蒙皮板柔度的公式可以看出, 蒙皮板的厚度与其柔度关系紧密, 为了考察蒙皮板厚度对结构的影响, 仍取上节的钢框架、屋顶及山墙设有蒙皮, 其余条件不变, 分别取压型钢板的厚度为 $0.6, 0.8, 1.0, 1.2(\text{mm})$, 分析蒙皮板厚度变化对结构内力和变形的影响。

2.1.1 对结构侧移的影响

在柱顶水平荷载作用下, 随着蒙皮板厚度的增加, 中柱和边柱的柱顶侧移线性减小, 因此, 增加蒙皮板厚度对提高结构的整体刚度、增强结构的抗侧移能力是有效的。但是, 从图 2(a)中也可以看出, 在工程常用的压型钢板厚度范围内, 这种减小的幅度并不大。因此, 在实际工程中, 单纯通过改变蒙皮板的厚度来提高其抗变形能力, 意义不大。

2.1.2 对结构应力分布的影响

随着蒙皮板厚度的增加, 蒙皮板的刚度和强度逐渐增大, 其承受荷载和变形的能力也相应增加, 结构的应力最大值逐渐减小, 如图 3(b)所示。但值得注意的是, 当蒙皮板的厚度为 1.2 mm 时, 结构应力最大值虽然减小了, 但其出现点却由山墙蒙皮底部转移到了中间框架梁上靠近梁柱结点处, 如图 4 所示。这主要是由于蒙皮板厚度增加了, 但框架梁柱的截面却始终没有变化, 因此, 应力最大点也就由山墙蒙皮底部转移到了框架中受力相对较大的中间框架梁上。

2.1.3 对结构内力的影响

随着蒙皮板厚度增加, 结构侧移逐渐减小, 因此框架梁柱弯矩减小, 剪力也逐渐减小, 如图 3(c), (d)所示。

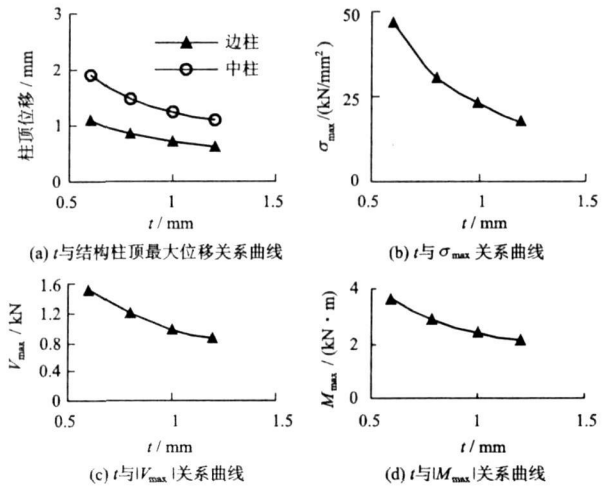


图 3 蒙皮板厚度 t 与结构侧移、应力及内力关系曲线

Fig 3 The influence of different t to the structure

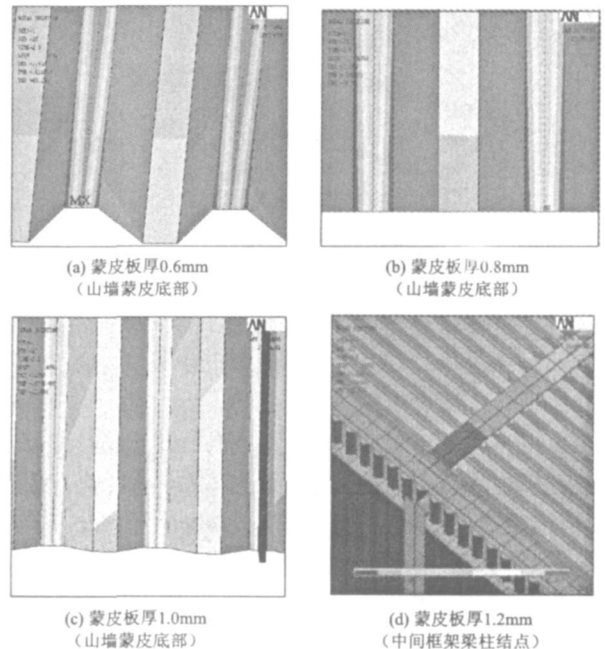


图 4 不同蒙皮板厚度时结构应力最大点详图

Fig 4 The location of σ_{\max} under different panel thickness

2.2 长细比

钢结构中的轴心受力构件及拉弯和压弯构件, 均应考虑长细比的影响, 使其不超过允许长细比限值, 这是结构正常使用极限状态的要求。我国 GB 50017-2003《钢结构设计规范》^[7] 中规定: 一般压杆的容许长细比 $[\lambda] = 150$ 。为了分析柱的长细比在允许范围内改变时, 蒙皮结构力学性能的变化, 仍取上节的蒙皮框架结构, 通过调大框架柱的高度, 改变柱的长细比, 以分析不同长细比条件下结构的侧移和内力。

2.2.1 长细比对结构侧移的影响

随着柱长细比的调大, 在柱顶水平荷载作用下,

柱顶位移将逐渐增加,且中柱和边柱的增加幅度和趋势相似,如图 5(a)所示。蒙皮结构的侧移主要由两部分因素决定:首先是横向框架的刚度,由于框架梁柱截面尺寸并没有改变,因此,随着柱高度的增加,柱线刚度逐渐减小,在柱顶水平荷载作用下,蒙皮结构的侧移有增大的趋势;其次是蒙皮的刚度,尽管屋顶蒙皮尺寸没有改变,但由于山墙蒙皮厚度有所增大,山墙的刚度随之增大,在柱顶水平荷载作用下,蒙皮结构的侧移有减小的趋势。在这两部分因素相互抵消其影响下,柱高度与蒙皮厚度同时调大的效应是:柱顶侧移虽然有所增加,但幅度不大。

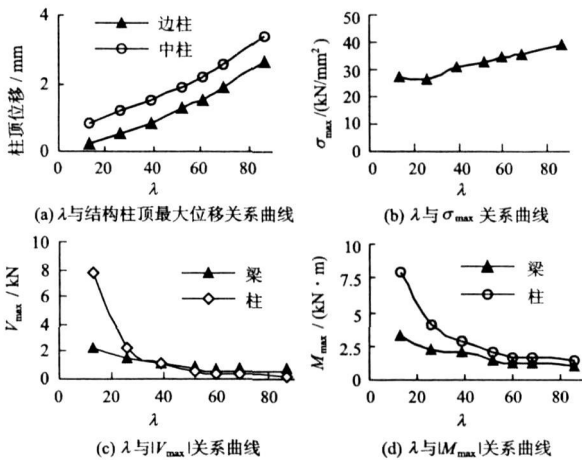


图5 长细比 λ 与结构侧移、应力及内力关系曲线

Fig. 5 The influence of different λ to the structure

2.2.2 长细比对结构应力的影响

有蒙皮的框架结构,屋顶蒙皮承担了大部分的荷载并将荷载传递给山墙。在这种情况下,框架柱长细比虽然被调大,但由于荷载没有改变,蒙皮承担的荷载量也不会发生显著变化,故结构应力值增大的幅度较为缓慢,从 25 N/mm^2 逐渐增加到 40 N/mm^2 ,虽然也呈增加的趋势,但幅度并不大。应力最大值仍然出现在山墙蒙皮底部。

2.2.3 框架柱长细比对结构内力的影响

由于屋顶蒙皮与框架梁有着良好的连接,使蒙皮板和框架梁紧密连接,形成一个整体,加强了屋顶结构的整体刚度,因此,对框架柱有着较强的约束作用。在柱顶水平荷载作用下,若假定柱顶转角 $\varphi = 0$,且通过试验验证了这个假定的可行性,则结构变形将如图 6所示。在柱脚弯矩 $M_{AC} = -6 \Delta / l = -6 EI \Delta / l^3$ 的计算公式中,随着柱长细比的增加,侧移 Δ 虽然有所增加,但幅度不大(图 5(a));而柱高 l 的增加幅度相比之下却较大,且呈平方项增大。在这种情况下,随着长细比的增加,出现在中柱柱底的最大弯矩值反而有所减小,如图 5(d)所示。同理,梁

端弯矩 M_{CD} 和 M_{DC} 也逐渐减小。此外,框架梁柱的最大剪力值也将随长细比的增大而逐渐减小,如图 5(c)所示。因为从剪力计算公式 $Q_{CD} = \frac{M_{CD} + M_{DC}}{l} + Q'$ (Q' 为杆件在相应简支梁情况荷载作用下的剪力)可以看出,虽然柱高 l 逐渐增加,但梁的跨度 l 和 Q' 却没有变化,因此,剪力 Q_{CD} 随着梁端弯矩 M_{CD} 和 M_{DC} 的减小而减小。而对于框架柱,从剪力计算公式 $Q_{AC} = \frac{M_{AC} + M_{CA}}{l} + Q'$ 中可以看出,柱高 l 逐渐增加时,柱端弯矩 M_{AC} 和 M_{CA} 将逐渐减小,且 Q' 随柱高度的增加也将逐渐减小,因此,柱最大剪力值逐渐减小。

需要注意的是,此处为了简化计算并重点考虑长细比变化对结构的影响,分析中没有考虑由于结构增高而引起的荷载量的变化,但从计算结果中可以看出,由于有屋顶和山墙蒙皮,使结构的整体性加强,结构承载力和抗变形能力均有较大提高,结构在最大荷载作用下,变形、应力及内力值均较小,因此,当荷载量的增加在一定的范围内时,对结构受力后承载力和变形的发展规律影响不大。

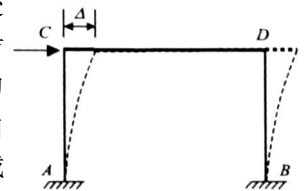


图6 横向框架变形
Fig. 6 The deformation graph of the prototype

2.3 山墙支撑截面面积

山墙支撑对屋面压型钢板蒙皮效应的发挥有着重要的影响,为了解山墙支撑对结构的影响,可在山墙处加十字支撑,支撑与构件为铰接。分别取支撑构件截面面积为 15, 30, 45, 60 (cm^2)及无支撑的情况,通过计算分析支撑构件截面面积对结构变形和内力的影响。

2.3.1 山墙支撑面积对结构侧移的影响

从图 7(a)可以看出,随着支撑面积由无到有,由小到大,中柱和边柱的柱顶最大位移将逐渐减小,且发展趋势基本一致。当支撑面积为零或较小时,随着支撑面积的加大,结构的柱顶位移减小幅度较大,当支撑面积继续增大时,结构柱顶位移值的减小幅度趋于平缓。因此,山墙加支撑可以增大山墙的刚度,从而使蒙皮效应发挥更加充分,减小结构侧移。但其面积应合理确定,才能达到设计出既有效又经济的良好效果。

2.3.2 山墙支撑面积对结构应力的影响

从图 7(b)可以看出,结构最大应力值仅在有无支撑时有较大的变化,当支撑面积逐渐增大时,结构

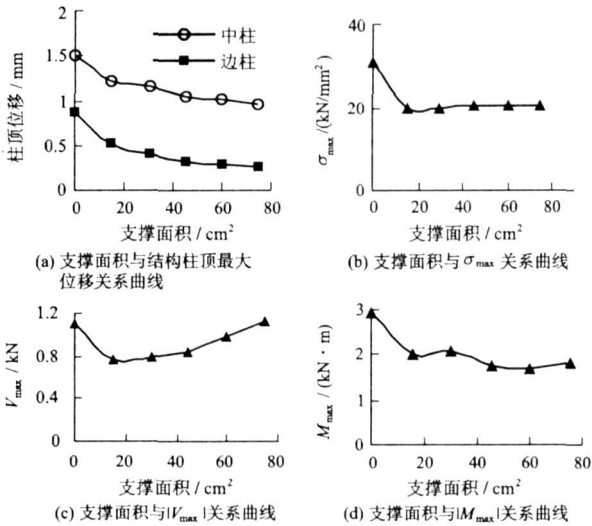


图 7 支撑面积与结构侧移、应力及内力关系曲线

Fig. 7 The influence of the areas of the brace to the structure

应力最大值变化不大。说明山墙支撑对减小结构应力有一定的作用,但支撑面积可根据需要选取。

2.3.3 山墙支撑面积对结构内力的影响

从图 7(d)可以看出,随着支撑面积的增加,弯矩最大值逐渐减小。由弯矩计算公式 $M_{Ac} = -6 \Delta / l$ (对节点而言,当杆端弯矩绕节点或支座逆时针旋转为正,反之为负)可以看出,随着侧移值 Δ 逐渐减小,柱端弯矩绝对值也逐渐减小,且减小趋势与柱顶位移减小趋势相近。

从图 8(a), (b)中可以看出,当支撑由无到有,由于支撑的作用,使山墙横梁的剪力分布发生变化,但这个时候支撑的面积还不大,因此,剪力最大值仍然出现在中间框架柱。而且,由于山墙支撑加上以后,整个结构刚度增大,侧移减小,中间框架弯

矩最大值减小,剪力最大值也随之减小,如图 7(c)所示。随着支撑面积的逐渐增大,剪力最大值出现在了山墙框架梁的端部,如图 8(c), (d)所示。而且,随着支撑面积的增大,支撑对该节点的约束逐渐增大,该处的剪力值也逐渐加大,如图 7(c)所示。

3 结论

考虑蒙皮效应可以改善轻钢框架结构的力学性能,也能较真实地反映其实际的工作状态。本文利用 ANSYS 软件对框架模型进行了有限元数值分析,并对蒙皮板的厚度、框架柱的长细比及山墙支撑截面面积等影响蒙皮支撑结构力学性能的若干因素进行了探讨性的分析。在本文所研究的参数范围内,可以得出以下初步结论:

(1) 结构在柱顶水平荷载作用下,考虑蒙皮效应的结构侧移明显减小。屋顶和山墙蒙皮的作用都十分重要,两者相辅相成,缺一不可。而纵墙对整个结构蒙皮效应的发挥,作用不大。

(2) 增加蒙皮板厚度对提高结构的整体刚度,从而增强结构的抗侧移能力是有效的,对减小结构应力及内力有一定的作用,但在工程常用的压型钢板厚度范围内,这种影响的幅度并不是很大,因此,应根据具体情况选用较为经济的厚度。

(3) 在结构允许的长细比范围内,由于蒙皮板的存在,将使结构在长细比增大的情况下,应力值有所增大,但幅度不大。

(4) 山墙支撑对结构的作用很大,可使结构的侧移、应力及内力明显减小。只是在支撑构件截面面积增大到一定程度后,其对结构的影响才相对减缓。因此,在实际工程中,应该考虑山墙支撑的作用,但支撑截面宜取较为经济合理的面积。

参考文献:

- [1] Davies JM, Bryan E R. Manual of Stressed Skin Diaphragm Design [M]. Granada Publishing New York N. Y. 1982.
- [2] 朱勇军, 张耀春. 蒙皮支撑的钢构件静力分析的有限元方法 [J]. 哈尔滨建筑大学学报, 1996, 29(2): 35-41.
- [3] GB 50009-2001 建筑结构荷载规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002.
- [4] British Standard BS5400 Steel concrete and composite bridges Part 9. Code of practice for stressed skin design [S]. British Standard Institution, 1994.
- [5] 史艳莉. 蒙皮效应对轻钢结构力学性能的影响研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2005.
- [6] 史艳莉, 王秀丽. 蒙皮支撑轴心受压构件静力性能的参数分析 [J]. 兰州理工大学学报, 2006, 32(2): 119-123.
- [7] GB 50017-2003 钢结构设计规范 [S].

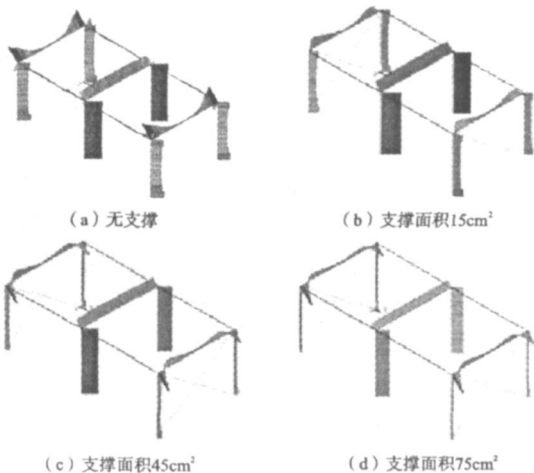


图 8 支撑变化时结构剪力

Fig. 8 Shear diagram of different areas of the brace of the structure