

文章编号:1673-2049(2012)02-0083-06

# 冷弯薄壁型钢住宅结构整体扭转效应分析

刘向斌<sup>1</sup>, 周天华<sup>2</sup>, 何鑫<sup>3</sup>, 吴函恒<sup>2</sup>

(1. 长安大学 基建处, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061;  
3. 中信建筑设计研究总院有限公司, 湖北 武汉 430014)

**摘要:**为了研究冷弯薄壁型钢住宅结构平面质量中心、楼层形心与刚度中心偏差较大时, 结构整体扭转效应的不利影响, 将楼层平面内水平荷载(风、地震)作用下结构位移分解为平动和转动 2 种状态, 得到相应状态下各组合墙体所承担的剪力, 然后将其效应进行叠加, 推导出了结构的线弹性层间扭转角及组合墙体剪力和侧移变形计算公式。对某冷弯薄壁型钢多层住宅结构在水平荷载作用下的层间扭转效应进行了简化计算, 并运用 ANSYS 进行了数值模拟分析。结果表明: 水平扭转效应对该类结构影响显著, 简化计算公式和有限元程序数值模拟所得结果具有较好的一致性, 简化计算公式可供实际工程中对这类结构整体扭转效应的计算分析时参考。

**关键词:**冷弯薄壁型钢; 住宅结构; 扭转效应; 简化计算; 有限元分析

**中图分类号:** TU392

**文献标志码:** A

## Analysis of Torsional Effect of Cold-formed Thin-walled Steel Residence Structure

LIU Xiang-bin<sup>1</sup>, ZHOU Tian-hua<sup>2</sup>, HE Xin<sup>3</sup>, WU Han-heng<sup>2</sup>

(1. Infrastructure Projects Office, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

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

3. CITIC General Institute of Architectural Design and Research Co., Ltd, Wuhan 430014, Hubei, China)

**Abstract:** In order to study the disadvantageous influence of torsional effect of cold-formed thin-walled steel structure, whose deflections among the structural stiffness center, mass center and geometry center existed, the structural total displacements were divided into parallel displacement and rotational displacement, and the parallel shear and the rotational shear of composite walls were accordingly obtained, then the effect would be superposed. Finally, the calculation formulae of the structural linear-elasticity storey torsion angle, shear force and lateral displacement of composite walls were derived. The storey torsional effect of cold-formed thin-walled steel residence structure under horizontal load was calculated by the simplified formula, and the numerical result was analyzed by ANSYS finite element program. Results show that the calculated results using two methods are close to each other, and the structure response by torsional effect under horizontal load is distinct. The simplified formula can be used as reference on calculation of torsional effect of cold-formed thin-walled steel residence structure in engineering.

**Key words:** cold-formed thin-walled steel; residence structure; torsional effect; simplified calculation; finite element analysis

收稿日期: 2012-01-16

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2012TD012)

作者简介: 刘向斌(1983-), 男, 陕西凤翔人, 工学硕士, E-mail: lbx\_818@163.com。

## 0 引言

冷弯薄壁型钢住宅结构体系近年来在各国得到了较为广泛的运用,中国编制的相关规程<sup>[1]</sup>也已出台,这种组合轻钢结构体系的构件受力性能已有了一些较为系统的研究<sup>[2-4]</sup>,对组合墙体抗剪承载力、抗剪刚度等进行了探讨,但目前为止,因对冷弯薄壁型钢住宅结构整体受力性能的研究较少,各国相关规范对结构整体变形计算方面均无相应规定,以致实际工程设计中无直接可用的方法。

本文中笔者在总结已有研究基础上,采用简化静力计算方法,将结构的总位移与总剪力分解为平动和转动 2 种状态,再将其效应进行叠加,推导水平荷载(风、地震)作用下冷弯薄壁型钢住宅结构整体侧移及扭转变形的计算方法。利用得到的计算方法对某冷弯薄壁型钢多层住宅结构在水平荷载作用下的层间扭转效应进行了简化计算,运用 ANSYS 有限元程序进行数值模拟分析,并将分析结果进行对比,供实际工程中对这类结构整体扭转效应的计算分析时参考。

## 1 楼层形心、质心、刚心及扭转偏心距

以图 1 所示的单层冷弯薄壁型钢住宅结构为例进行说明:在计算水平地震作用引起的扭转效应时,将水平力  $F$  平移至刚心  $C$ ,则作用于结构的静力扭矩为  $M=Fe_x$ ,  $e_x$  为偏心距,此扭矩将使结构绕刚心发生平面转动,而移至刚心的水平力  $F$  使结构发生沿  $y$  方向的平移。

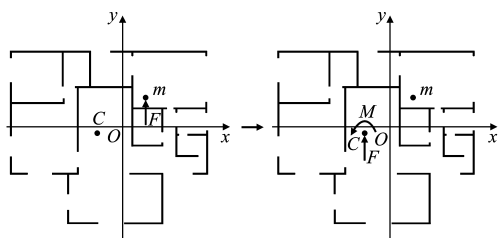


图 1 水平地震作用下结构扭转效应简化计算

Fig. 1 Simplified Calculations of Structural Torsional Effect Under Horizontal Earthquake Action

当风荷载作用下的建筑物立面轮廓不对称或者建筑物的抗侧力体系不对称分布时,风荷载亦将产生一个扭转效应,该效应是风力的中心即楼层形心和抗侧力刚度中心不重合的结果,这将给结构的部分构件带来附加内力。

### 1.1 计算假定

(1)楼板平面内刚度无穷大。即楼板各点间没

有相对位移,可将承受水平荷载的结构整体等效为悬臂杆件进行受力分析。

(2)冷弯薄壁型钢住宅结构骨架及龙骨两侧采用自攻螺钉与结构板材连接,结构板材对冷弯薄壁型钢骨架构件形成较强的扭转约束,构件的扭转效应可以忽略。在线弹性范围内,构件的抗扭刚度对构件总位移的影响较小<sup>[5]</sup>。因此,在计算楼层抗扭刚度时忽略各构件抗扭刚度的影响。

### 1.2 楼层形心

计算风荷载引起的扭转效应时,楼层形心即为与建筑立面、体型有关的风荷载合力作用点。以楼层平面内任一点  $O$  为原点建立参考坐标系  $x'O'y'$ ,第  $i$  层的形心坐标  $S(x'_f, y'_f)$  为

$$\left. \begin{aligned} x'_f &= \sum (A_{xi} x'_i) / \sum A_{xi} \\ y'_f &= \sum (A_{yg} y'_g) / \sum A_{yg} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:  $A_{xi}$ ,  $A_{yg}$  分别为  $x$ ,  $y$  轴方向风荷载作用立面上第  $i$  个和第  $g$  个图形的面积;  $x'_i$ ,  $y'_g$  分别为第  $i$  个和第  $g$  个图形的形心水平位置坐标值。

### 1.3 楼层质心

质心为竖向荷载合力的作用点。第  $i$  层的质心位置与本层及其以上所有层的质量分布有关。以楼层平面内任意点  $O$  为原点建立参考坐标系  $x'O'y'$ ,第  $i$  层的质心坐标  $m(x'_m, y'_m)$  为

$$\left. \begin{aligned} x'_m &= \sum (m_{xj} x'_j) / \sum m_{xj} \\ y'_m &= \sum (m_{yk} y'_k) / \sum m_{yk} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:  $m_{xj}$ ,  $m_{yk}$  分别为同一楼层内  $x$  轴方向第  $j$  个和  $y$  轴方向第  $k$  个构件自身及所承担的楼层质量;  $x'_j$ ,  $y'_k$  分别为  $x$  轴方向第  $j$  个和  $y$  轴方向第  $k$  个构件的质心坐标值。

### 1.4 楼层刚心

在刚性楼板的假定下,结构第  $i$  层刚心的定义为:当结构仅在第  $i$  层受到水平力作用时,第  $i$  层不发生转动只发生平动而允许其他层同时发生转动及平动的力作用点。在近似计算中是指各片抗侧力构件的抗侧刚度中心。第  $i$  层的刚心坐标为

$$\left. \begin{aligned} x'_K &= \sum (K_{yj} x'_l) / \sum K_{yj} \\ y'_K &= \sum (K_{xk} y'_n) / \sum K_{xk} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中:  $K_{yj}$ ,  $K_{xk}$  分别为同一楼层内  $y$  轴方向的第  $j$  个和  $x$  轴方向的第  $k$  个抗侧力构件的抗侧刚度;  $x'_l$ ,  $y'_n$  均为对应抗侧力构件的形心坐标值。

### 1.5 组合墙体抗侧刚度

冷弯薄壁型钢组合墙体的抗剪性能与很多因素

有关,如自攻螺钉的大小、间距、墙面板的厚度、墙体高宽比以及材料特性等。文献[4]中给出了组合墙体在弹性阶段的面内抗侧刚度  $D$  的计算公式为

$$D = L^2 / \left[ \frac{HL}{Gt} + (HL + L^2) \frac{2S_\theta}{n_N f_N} \right] \quad (4)$$

式中:  $H, L$  分别为计算组合墙段墙体高度和长度;  $t$  为组合墙体墙面板厚度;  $G$  为组合墙体墙面板剪切弹性系数;  $S_\theta$  为组合墙体抗剪承载力设计值时自攻螺钉的滑移量;  $n_N$  为宽度方向自攻螺钉数目;  $f_N$  为自攻螺钉连接件的抗剪承载力设计值。

## 1.6 扭转偏心距

风荷载和水平地震作用下,各层  $x, y$  方向的扭转偏心距  $e_{xw}, e_{yw}, e_{xq}, e_{yq}$  分别由式(5), (6)计算

$$\left. \begin{aligned} e_{xw} &= x'_f - x'_k \\ e_{yw} &= y'_f - y'_k \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} e_{xq} &= x'_m - x'_k \\ e_{yq} &= y'_m - y'_k \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

## 2 楼层扭转角及侧移

### 2.1 扭矩计算

以  $n$  层建筑结构的第  $i$  层刚心为原点  $O$  建立坐标系  $xOy$ 。设该层以上沿  $y$  方向的总水平剪力为  $V_{yi} = \sum_{k=i}^n F_k$ ,  $F_k$  为作用在第  $k$  层沿  $y$  方向的水平力(图2)。若第  $i$  层的总剪力  $V_{yi}$  不通过该层的刚度中心,偏心距为  $e_x$ ,将  $V_{yi}$  平移至刚心后则要附加一个楼层扭矩  $T_i$ ,即

$$T_i = V_{yi} e_x \quad (7)$$

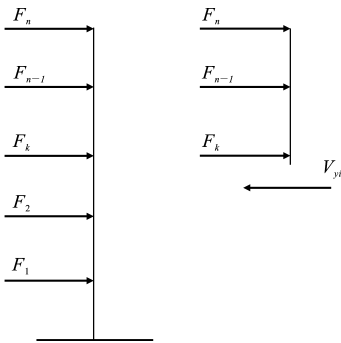


图2 楼层水平剪力

Fig. 2 Horizontal Shear Forces of Floors

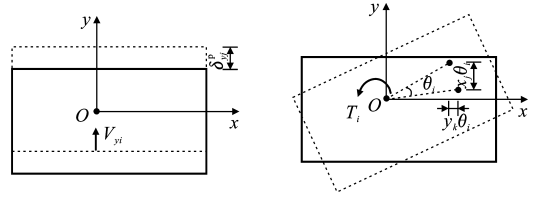
### 2.2 扭转角及侧移计算

设第  $i$  层在  $y$  方向单向偏心水平剪力  $V_{yi}$  作用下产生的层间扭转角为  $\theta_i$  (以逆时针方向为正),为讨论方便,以下省去下标  $i$  的书写。此时第  $j$  个  $y$  方向的抗侧力构件的总位移  $\delta_{yj}$  包含结构整体平动

侧移  $\delta_{yj}^p$  [图3(a)]与构件绕刚度中心  $O$  扭转产生的扭转侧移  $\delta_{yj}^r$  [图3(b)],构件的最终剪力  $V_{yj}$  亦为参与抵抗平动的剪力  $V_{yj}^p$  与参与抵抗扭转的剪力  $V_{yj}^r$  的迭加,即

$$\delta_{yj} = \delta_{yj}^p + \delta_{yj}^r \quad (8)$$

$$V_{yj} = V_{yj}^p + V_{yj}^r \quad (9)$$



(a) 水平侧移

(b) 扭转侧移

图3 楼层总侧移

Fig. 3 Total Sideways of Floors

根据几何关系,可得

$$\left. \begin{aligned} \delta_{yj}^r &= x_j \theta \\ \delta_{xk}^r &= -y_k \theta \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

于是,结构扭转时构件产生的扭转附加剪力为

$$\left. \begin{aligned} V_{yj}^r &= x_j \theta D_{yj} \\ V_{xk}^r &= -y_k \theta D_{xk} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式中:  $D_{yj}, D_{xk}$  分别为同一楼层内第  $j$  个  $y$  方向抗侧力构件和第  $k$  个  $x$  方向抗侧力构件的抗侧刚度;  $x_j, y_k$  分别为同一楼层内第  $j$  个  $y$  方向抗侧力构件和第  $k$  个  $x$  方向抗侧力构件在以刚心为坐标原点的坐标系中的坐标值。

根据扭矩平衡  $\sum T = 0$ ,外力矩应与结构扭转时构件产生的剪力对刚心的抵抗矩相平衡<sup>[6]</sup>,即

$$V_y e_x = \sum (V_{yi} x_j) - \sum (V_{xk} y_k) \quad (12)$$

将式(11)代入式(12),得结构层间扭转角  $\theta^y$  为

$$\theta^y = \frac{V_y e_x}{\sum (D_{yj} x_j^2) + \sum (D_{xk} y_k^2)} \quad (13)$$

于是结构的抗扭刚度  $K_t$  为

$$K_t = \sum (D_{yj} x_j^2) + \sum (D_{xk} y_k^2) \quad (14)$$

式(14)反映出抗侧力构件的布置位置对楼层抗扭刚度的影响。结构平动侧移  $\delta_y^p$  为

$$\delta_y^p = \delta_{yj}^p = \frac{V_y}{\sum D_{yj}} \quad (15)$$

将式(15)与式(10)相加,可得构件的总位移  $\delta_{yj}, \delta_{xk}$  分别为

$$\left. \begin{aligned} \delta_{yj} &= \delta_{yj}^p + \delta_{yj}^r = \frac{V_y}{\sum D_{yj}} + x_j \theta^y \\ \delta_{xk} &= -y_k \theta^y \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

同理可得构件的总剪力  $V_{yj}, V_{xk}$  分别为

$$V_{yj} = \delta_{yj} D_{yj} = \frac{D_{yj}}{\sum D_{yj}} V_y + x_j \theta^y D_{yj}$$
$$V_{xk} = -y_k \theta^x D_{xk}$$

(17)

单向偏心水平剪力  $V_x$  作用下结构产生的层间扭转角  $\theta^x$  (以逆时针方向为正) 为

$$\theta^x = \frac{V_x e_y}{\sum (D_{yj} x_j^2) + \sum (D_{xk} y_k^2)}$$

(18)

构件的总位移  $\delta_{yj}, \delta_{xk}$  分别为

$$\delta_{yj} = -x_j \theta^x$$
$$\delta_{xk} = \frac{V_x}{\sum D_{xk}} + y_k \theta^x$$

(19)

构件的总剪力  $V_{yj}, V_{xk}$  分别为

$$V_{yj} = -x_j \theta^x D_{yj}$$
$$V_{xk} = \frac{D_{xk}}{\sum D_{xk}} V_x + y_k \theta^x D_{xk}$$

(20)

3 算例分析

某 4 层冷弯薄壁型钢住宅结构, 结构平面见图 4, 其中 C1 洞口尺寸为 2 100 mm×1 500 mm, C2 洞口尺寸为 1 500 mm×1 800 mm, M 洞口尺寸为 900 mm×2 100 mm。结构层高 3 m, 内外墙组合墙体立柱规格为 C140×41×10×1.6, 间距为 400 mm; 墙体顶梁、底梁为 U140×41×1.6; C 型钢与 U 型钢之间采用 ST4.2 型自攻螺钉连接, 钢材为 Q235B, 屈服强度  $f_y = 235$  MPa。墙面采用 OSB 板, 厚度均为 12 mm, 采用 4819 型自攻螺钉连接, 自攻螺钉在墙体周边间距为 150 mm, 内部间距为 300 mm。楼面托梁规格为 C305×41×10×1.6, 间距为 400 mm, 边梁为 U305×41×1.6。荷载条件: 抗震设防烈度为 8 度, 二类场地, 设计地震分组为第 2 组, 地面粗糙度为 B 类。楼面恒载为 1.4 kPa, 活载为 2.0 kPa, 墙体自重取为 1.0 kPa, 基本风压为 0.45 kPa。对该结构进行水平荷载作用下的扭转效应计算。

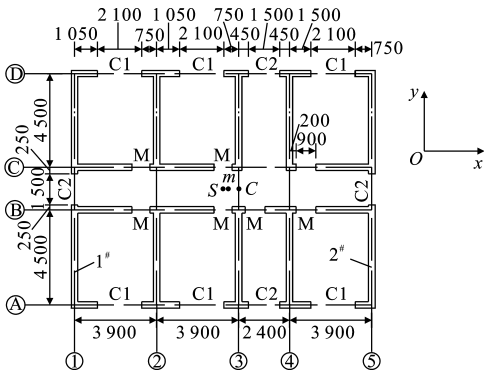


图 4 结构平面 (单位: mm)  
Fig. 4 Structural Plane (Unit: mm)

由式 (1), (2), (3) 计算可得, 结构在坐标系  $xOy$  中楼层形心点坐标为  $S(7\ 050, 5\ 500)$ , 质心点坐标为  $m(7\ 114, 5\ 500)$ , 刚心点坐标为  $C(7\ 800, 5\ 500)$ 。由式 (4), (14) 计算可得各层总抗侧刚度和抗扭刚度分别为  $96\ 650\ \text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$  和  $1.76 \times 10^{12}\ \text{N} \cdot \text{mm}$ 。由式 (5), (6) 可得风荷载和水平地震作用下结构在  $x$  方向的扭转偏心距分别为 750 mm 和 686 mm。

根据《建筑结构荷载规范》(GB 50009—2001)<sup>[7]</sup> 计算得结构各层在  $y$  方向上的风荷载为:  $F_1 = F_2 = F_3 = 25.98\ \text{kN}$ ,  $F_4 = 12.99\ \text{kN}$ 。等效水平地震力为:  $F'_1 = 41.95\ \text{kN}$ ,  $F'_2 = 83.9\ \text{kN}$ ,  $F'_3 = 125.85\ \text{kN}$ ,  $F'_4 = 114.41\ \text{kN}$ 。

根据式 (13), (15), (16), (17) 计算可得结构在  $y$  方向风荷载和水平地震作用下的层间扭转角及 1# 和 2# 组合墙体 (图 4) 的侧移和剪力见表 1, 2。

由表 1, 2 可知, 风荷载和水平地震作用下的结构扭转效应使其侧移分别增加了 27.8% 和 22.3%, 即墙体所受剪力分别增大了 27.8% 和 22.3%。考虑扭转效应后, 由于各组合墙体产生的扭转附加剪力的方向不同, 有的使总剪力增大有的使其减小, 结果取决于形心、质心和刚心的相对位置; 侧向变形最大的组合墙体扭转侧移所占比例较大。结果表明, 扭转效应对该结构在水平荷载作用下的结构响应影

表 1 风荷载作用下的结构响应

Tab. 1 Structural Responses Under Wind Loads

| 层数 | 层剪力<br>$V_i/\text{MN}$ | 层间扭转角<br>$\theta_i/10^{-5}\ \text{rad}$ | 层间平动<br>侧移 $\delta^p/\text{mm}$ | 1# 组合墙体                         |                              |                |               | 2# 组合墙体                         |                              |               |
|----|------------------------|---|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------|---------------|---------------------------------|------------------------------|---------------|
|    |                        |   |                                 | 层间扭转<br>侧移 $\delta^r/\text{mm}$ | 层间总侧<br>移 $\delta/\text{mm}$ | 扭转侧移<br>所占比例/% | 扭转附加<br>剪力/kN | 层间扭转<br>侧移 $\delta^r/\text{mm}$ | 层间总侧<br>移 $\delta/\text{mm}$ | 扭转附加<br>剪力/kN |
| 1  | 90.93                  | 3.9                                     | 0.94                            | 0.30                            | 1.24                         | 24.0           | 1.74          | -0.25                           | 0.69                         | -1.38         |
| 2  | 64.95                  | 2.8                                     | 0.67                            | 0.20                            | 0.87                         | 23.0           | 1.20          | -0.18                           | 0.49                         | -0.96         |
| 3  | 38.97                  | 1.7                                     | 0.40                            | 0.13                            | 0.53                         | 24.5           | 0.72          | -0.10                           | 0.30                         | -0.60         |
| 4  | 12.99                  | 0.6                                     | 0.13                            | 0.05                            | 0.18                         | 27.8           | 0.24          | -0.04                           | 0.09                         | -0.18         |

表 2 水平地震作用下的结构响应

Tab. 2 Structural Responses Under Horizontal Earthquake Actions

| 层数 | 层剪力<br>$V_i/\text{MN}$ | 层间扭转角<br>$\theta_i/10^{-4}\text{ rad}$ | 层间平动侧移<br>$\delta^p/\text{mm}$ | 1# 组合墙体                        |                             |            |                     | 2# 组合墙体                        |                             |                     |
|----|------------------------|--|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|---------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------|
|    |                        |  |                                | 层间扭转侧移<br>$\delta^r/\text{mm}$ | 层间总侧移<br>$\delta/\text{mm}$ | 扭转侧移所占比例/% | 扭转附加剪力/ $\text{kN}$ | 层间扭转侧移<br>$\delta^r/\text{mm}$ | 层间总侧移<br>$\delta/\text{mm}$ | 扭转附加剪力/ $\text{kN}$ |
| 1  | 366.12                 | 1.4                                    | 3.8                            | 1.09                           | 4.89                        | 22.3       | 6.55                | -0.88                          | 2.92                        | -5.29               |
| 2  | 324.17                 | 1.2                                    | 3.4                            | 0.94                           | 4.34                        | 21.7       | 5.65                | -0.76                          | 2.64                        | -4.57               |
| 3  | 204.27                 | 0.9                                    | 2.5                            | 0.70                           | 3.20                        | 21.9       | 4.21                | -0.57                          | 1.93                        | -3.43               |
| 4  | 114.41                 | 0.4                                    | 1.2                            | 0.31                           | 1.51                        | 20.5       | 1.86                | -0.25                          | 0.95                        | -1.50               |

响显著,其不利影响不能忽略。

4 有限元模拟分析

文献[2]所做研究验证了有限元方法计算冷弯薄壁型钢结构组合墙体侧移变形正确性,在此基础上,本文中采用相同的建模方法利用通用有限元程序 ANSYS 9.0 对算例中的结构进行整体扭转效应分析,计算在风荷载和水平地震作用下房屋不同位置处组合墙体的位移,并与简化公式计算结果进行对比分析,来验证本文所推导出的简化计算公式的正确性。

4.1 有限元模型的建立

梁、柱采用梁单元 Beam188 模拟,利用 ANSYS 自定义截面形状和尺寸功能对不同截面形式的梁单元进行截面定义。墙面板、楼面板采用弹性壳单元 Shell181 模拟,结构有限元模型见图 5。

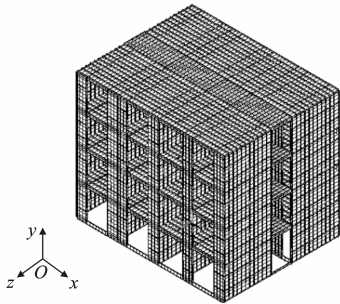


图 5 冷弯薄壁型钢住宅结构三维有限元模型

Fig. 5 3-D Finite Element Model of Cold-formed Thin-walled Steel Residence Structure

4.2 有限元结果及简化计算对比分析

通过对有限元模型施加合理的边界约束,分别模拟风荷载进行静力加载,模拟水平地震作用进行单点响应谱分析,所施加荷载大小与上述算例相同,求解得到结构的整体位移,见图 6,7。从图 6,7 可以看出,结构在水平荷载作用下表现出明显的扭转效应,比较图 4 中各层 1# 和 2# 组合墙体的各项位移指标,得到简化公式计算结果、有限元计算结果及

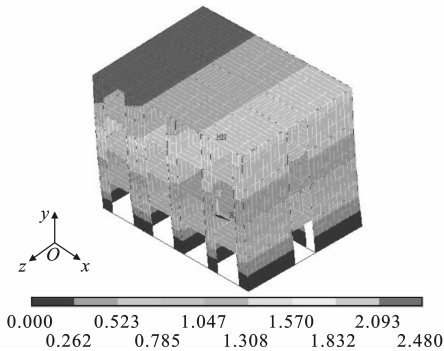


图 6 风荷载作用下结构整体位移(单位:mm)

Fig. 6 Structural Total Displacements Under Wind Loads (Unit:mm)

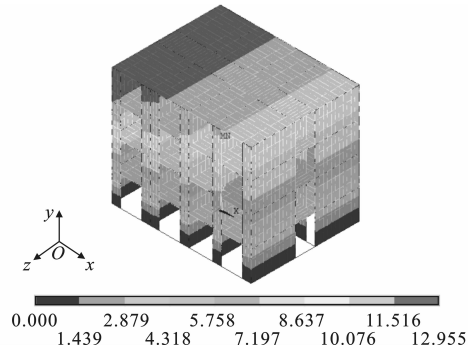


图 7 水平地震作用下结构整体位移(单位:mm)

Fig. 7 Structural Total Displacements Under Horizontal Earthquake Actions (Unit:mm)

两者的误差,见表 3,4。

比较表 3,4 可知,有限元模拟分析与简化计算公式所得结果有较好的一致性,有限元计算结果普遍比简化公式计算结果偏小,相对误差均在 15% 以内。分析产生误差的原因有:在进行冷弯薄壁型钢住宅结构扭转侧移简化计算时,假定忽略组合墙体自身的抗扭刚度对楼层整体抗扭性能的贡献作用,同时在计算结构整体抗侧刚度、抗扭刚度时未考虑纵、横向墙体的相互影响,而在进行有限元模拟分析时,上述 2 个因素均能通过合理的建模及边界约束的施加在程序计算时考虑进去。

表 3 风荷载作用下 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> 组合墙体层间位移

Tab. 3 Storey Displacements of 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> Composite Walls Under Wind Loads

| 楼层      |      | 1    |      | 2    |      | 3    |      | 4    |      | 4 层总和 |      |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 组合墙体编号  |      | 1    | 2    | 1    | 2    | 1    | 2    | 1    | 2    | 1     | 2    |
| 层间位移/mm | 简化公式 | 1.24 | 0.69 | 0.87 | 0.49 | 0.53 | 0.30 | 0.18 | 0.09 | 2.82  | 1.57 |
|         | 有限元  | 1.10 | 0.63 | 0.77 | 0.45 | 0.46 | 0.27 | 0.16 | 0.08 | 2.49  | 1.43 |
| 相对误差/%  |      | 12.7 | 9.5  | 13.0 | 8.9  | 15.0 | 11.1 | 12.5 | 12.5 | 13.3  | 9.8  |

表 4 水平地震作用下 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> 组合墙体层间位移

Tab. 4 Storey Displacements of 1<sup>#</sup>, 2<sup>#</sup> Composite Walls Under Horizontal Earthquake Actions

| 楼层      |      | 1    |      | 2    |      | 3    |      | 4    |      | 4 层总和 |      |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| 组合墙体编号  |      | 1    | 2    | 1    | 2    | 1    | 2    | 1    | 2    | 1     | 2    |
| 层间位移/mm | 简化公式 | 4.89 | 2.92 | 4.34 | 2.64 | 3.20 | 1.93 | 1.51 | 0.95 | 13.94 | 8.44 |
|         | 有限元  | 4.52 | 2.71 | 4.05 | 2.49 | 2.96 | 1.79 | 1.39 | 0.87 | 12.92 | 7.86 |
| 相对误差/%  |      | 8.2  | 7.7  | 7.2  | 6.1  | 8.1  | 7.8  | 10.2 | 9.2  | 7.9   | 7.4  |

5 结 语

(1)运用简化静力计算方法,对冷弯薄壁型钢住宅结构在水平荷载作用下的层间扭转效应进行计算,推导出了该结构的楼层抗扭刚度及在水平荷载作用下的线弹性层间扭转角计算公式,得到了各抗侧力构件即组合墙体的位移和剪力计算公式。

(2)算例分析表明,风荷载和水平地震作用下结构扭转效应使其侧移分别增加了 27.8%和 22.3%,考虑扭转效应后,各组合墙体产生的扭转附加剪力对总剪力的大小影响不同,结果取决于形心、质心和刚心的相对位置;侧向变形最大的组合墙体扭转侧移所占比例较大。结果表明,扭转效应对该结构在水平荷载作用下的结构响应影响显著。

(3)运用大型通用有限元程序 ANSYS 对算例中的结构进行整体扭转效应分析,有限元模拟分析与简化公式所得结果一致性较好,相对误差均在 15%以内,精度符合工程设计要求,验证了简化公式计算结果的正确性。

参考文献:

References:

[1] 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-wall Steel Buildings[S].

[2] 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 Tian-hua,SHI Yu,HE Bao-kang,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.

[3] 聂少锋,周天华,周绪红,等.冷弯型钢组合墙体抗剪承载力简化计算方法研究[J].西安建筑科技大学学报:自然科学版,2007,39(5):598-604.  
NIE Shao-feng, ZHOU Tian-hua, ZHOU Xu-hong, et al. Research on the Simplified Method for Calculating Shear Resistance of Cold-formed Steel Composite Wall[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology; Natural Science Edition, 2007, 39(5): 598-604.

[4] 聂少锋,周天华,周绪红,等.冷弯型钢组合墙体抗侧刚度研究[J].重庆建筑大学学报,2008,30(2):75-79.  
NIE Shao-feng, ZHOU Tian-hua, ZHOU Xu-hong, et al. Research on Lateral Stiffness of Cold-formed Steel Composite Wall[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2008, 30(2): 75-79.

[5] 沈蒲生,孟焕陵,刘 杨.考虑构件抗扭刚度的高层建筑结构抗扭计算[J].铁道科学与工程学报,2006,3(2):21-25.  
SHEN Pu-sheng, MENG Huan-ling, LIU Yang. Calculation of Torsion Performance of Tall Building Structures Based on Torsion Stiffness of Elements[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2006, 3(2): 21-25.

[6] 包世华,张铜生.高层建筑结构与计算[M].北京:清华大学出版社,2005.  
BAO Shi-hua, ZHANG Tong-sheng. Design and Analysis of Tall-building Structures[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[7] GB 50009—2001,建筑结构荷载规范[S].  
GB 50009—2001, Load Code for the Design of Building Structures[S].