

框架 - 剪力墙结构扭转计算方法*

沈蒲生, 刘 杨, 孟焕陵

(湖南大学 土木工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要: 以往高层框架 - 剪力墙结构扭转计算模型, 均根据结构抗扭刚度的定义 (即使楼层产生单位扭转角时所需要作用的扭矩值) 来确定楼层刚心位置, 但由于框架与剪力墙的变形特征和剪力分配机理都不相同, 导致这些模型的刚心计算位置与常理不符。文中引入的新刚度模型, 在同时考虑框架与剪力墙抗侧刚度的基础上获得楼层抗扭刚度, 由此计算框架 - 剪力墙结构的刚心和扭转偏心距, 并在计算扭转效应时, 让构件充分参与抗扭, 考虑构件的抗扭刚度。算例表明, 本文刚度模型概念清晰, 计算简单准确, 可为扭转近似计算提供参考。

关键词: 框架 - 剪力墙; 刚度模型; 扭转效应

中图分类号: TU375.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006 - 7329(2007)01 - 0061 - 04

Calculation Method of Torsion Effect in Frame - Shear Wall Structures

SHEN Pu - sheng, LU Yang, MENG Huan - ling

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, P. R. China)

Abstract: In earlier calculation models, the stiffness centers in frame - shear wall structures have been located by the structural torsion stiffness. However, the results are illogical owing to the difference between the distortion character and the shears distribute mechanism of the frames and shear walls. In this paper, a new formula for calculating story stiffness is introduced, which can consider the stiffness of the frames and shear walls at the same time. The structural stiffness centers, the torsion eccentric distances and torsion effect are calculated, and the stiffness of elements is considered also. It is shown that the concept of the presented stiffness model is clear and the results are reasonable, which can be used to calculate the appreciative torsion effect.

Keywords: frame - shear wall structures; stiffness model; torsion effect

采用协同工作原理分析框架 - 剪力墙结构, 将空间结构简化为平面结构进行简化计算, 概念清楚, 计算简便, 对于规则的结构可以取得较好的效果^[1]。但是, 当平面布置或剪力墙的设置较复杂且不对称时, 框架 - 剪力墙结构不仅有平移, 还会有绕刚度中心的扭转。震害分析表明, 扭转是一个很重要的致坏因素。我国《高层建筑混凝土结构技术规程》(JGJ 3 - 2002) 也增加了对结构偏心扭转的限制, 对楼层竖向构件的最大水平位移与该层位移平均值之比, 以及结构扭转为主的第一自振周期与平动为主的第一周期之比均有明确规定^[2]。因此, 当结构刚度中心与质量中心偏差较大时, 应考虑框架 - 剪力墙结构扭转的不利影响。

各国规范对结构地震作用下扭转都提出了相应的

方法^[3]。本文将采用方法是: 先用矩阵位移法等方法求出整个结构各阶振型下的楼层内力与位移 (当只考虑基本振型时可用底部剪力法等求解), 然后用 CQC 法对层剪力和位移进行组合, 最后用考虑扭转因素的系数修正楼层剪力和位移^[4]。在此方法中, 刚度模型的选取直接关系到刚度中心的确定, 从而影响扭转偏心距与扭转效应的计算。

鉴于框架 - 剪力墙结构中, 不能直接由框架柱的抗扭刚度与剪力墙的等效抗弯刚度来计算刚心, 文献 [4] 根据结构抗扭刚度的定义 (即使楼层产生单位扭转角时所需要作用的扭矩值) 来确定刚心位置。实际上, 框架与剪力墙的变形特征明显不同, 各自剪力分配的机理也不相同, 有必要根据构件抗侧刚度来获得楼

* 收稿日期: 2006 - 08 - 10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50378035)

作者简介: 沈蒲生 (1939 -), 男, 江西新淦人, 教授, 博士生导师, 主要从事混凝土结构基本理论及高层建筑结构分析与设计研究。

层的抗扭刚度。在文献 [5], [6] 的基础上, 引入了考虑构件抗扭的楼层新抗扭刚度, 它可同时考虑框架与剪力墙的抗侧刚度, 在此基础上按前述计算步骤计算框架 - 剪力墙结构的刚心、扭转偏心距及扭转效应。最后通过算例将两种刚度模型所得结果进行对比发现, 在提出的新刚度模型基础上, 框架 - 剪力墙结构的扭转计算, 概念清晰, 计算更简单准确。

1 楼层质心、刚心及扭转偏心距

1.1 楼层质心

以楼层平面内任意点 o 为原点建立参考坐标系 x, y , 第楼层的质心坐标为:

$$\left. \begin{aligned} x_m &= \sum m_j x_j / \sum m_j \\ y_m &= \sum m_k y_k / \sum m_k \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: m_j, m_k 为同一楼层内第 j 个、第 k 个构件自身及所承担的楼层质量; x_j, y_k 为第 j 个、第 k 个构件的质心坐标。

1.2 楼层刚心

所谓刚度中心, 在近似计算中是指各片抗侧结构的抗侧刚度中心。计算方法与质量中心计算方法类似, 把抗侧力单元的抗侧刚度作为假想面积, 则此假想的面积中心就是刚度中心。

$$\left. \begin{aligned} x_D &= \sum K_j x_j / \sum K_j \\ y_D &= \sum K_k y_k / \sum K_k \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: K_i, K_k 为同一楼层内第 i 个、第 k 个构件的抗扭刚度。

1.3 扭转偏心距

楼层扭转偏心距即为楼层质心与刚心的距离, x, y 方向偏心距的表达式为

$$\left. \begin{aligned} e_x &= x_m - x_D \\ e_y &= y_m - y_D \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

2 刚度模型

根据结构体系的不同, 结构抗扭刚度的计算也不相同, 对于框架 - 剪力墙结构, 框架柱的抗扭刚度和剪力墙的等效抗弯刚度都不能直接使用, 必须间接来求结构的刚度中心。

2.1 原有模型

以刚度中心为原点建立新坐标系, 文献 [4] 根据抗扭刚度的定义, 即使楼层产生单位扭转角时所需要作用的扭矩值, 给出了框架 - 剪力墙结构的刚心具体表达式:

$$\left. \begin{aligned} x_D &= \frac{\sum [(V_{yi} / y) x_i]}{\sum (V_{yi} / y)} = \frac{\sum V_{yi} x_i}{\sum V_{yi}} \\ y_D &= \frac{\sum [(V_{xk} / x) x_k]}{\sum (V_{xk} / x)} = \frac{\sum V_{xk} y_k}{\sum V_{xk}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: V_{yi} 与 V_{xk} 是框架 - 剪力墙结构 y 方向与 x 方向平移变形下协同工作计算后, 各片抗侧力单元所分配到的剪力; x 与 y 为该结构在 x 方向和 y 方向的层间位移; x_j, y_k 为新坐标系 xoy 下第 j 个、第 k 个构件的质心坐标。

由协同工作原理可知, 即使各楼层平面布置相同的框架 - 剪力墙结构, 框架部分与剪力墙部分的剪力沿高度方向也是变化的 (如图 1 所示), 则通过式 (4) 计算的各层刚度中心亦不相同, 这与常理不符, 故需寻求新的刚度模型来计算楼层的刚度中心。

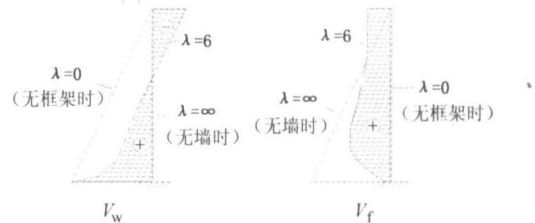
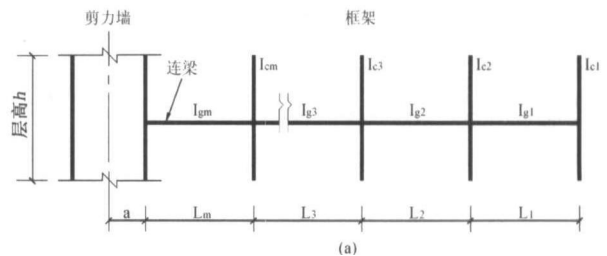


图 1 框架 - 剪力墙结构剪力分布示意图

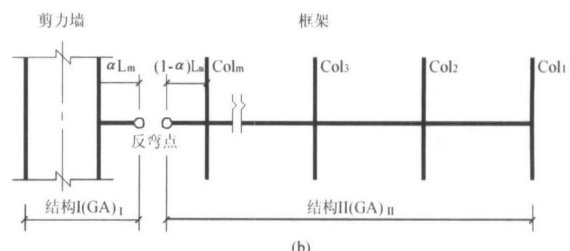
注: 图中 λ 为框架 - 剪力墙结构刚度特征值; V_w, V_f 分别为剪力墙、框架所分担的剪力。

2.2 新建模型

框架 - 剪力墙结构同一楼层内单榀单元的剪切刚度 GA 的含义为楼层发生单位转角时所需的外力^[5], 可近似取为框架部分与剪力墙部分的剪切刚度的叠加 (如图 2 所示)。



a) 有连梁的层间平面框架 - 剪力墙结构



b) 等效框架 - 剪力墙子结构

图 2 框架 - 剪力墙结构剪切刚度计算示意图

$$GA = (GA) + (GA) \quad (5)$$

式中: (GA) 为剪力墙部分抗剪刚度,可取两个相似的墙组成的连肢墙 (GA) 的一半,其形心轴距离为 $2(a + L_m)$,即

$$(GA) = \frac{1}{2} \frac{12EI_g(2a + 2L_m)}{(2L_m)^3 h} \quad (6)$$

对一般结构,取值如下:

当连梁数目 $m = 1$ 时, $= 0.566 + 0.024 \ln(\quad) + 0.0424$, 当连梁数目 $m > 1$ 时, $= 0.55 \ln(\quad) + 0.635$

其中, $= L_m$, $= EI_g/EI_c$ 。

(GA) 为框架部分抗剪刚度,即

$$(GA) = \frac{12E}{h_i \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{C} \right)_i} \quad (7)$$

式中: h_i 为本层层高; G 对应本层中单榀结构跨度 L 的

横向所有梁, $G = \sum \frac{I_b}{L}$; C 对应本层中单榀结构所有柱,

$$C = \sum \frac{I_c}{h_i}$$

将之引入到结构刚度中心的计算中可得:

$$\left. \begin{aligned} x_D &= \frac{\sum (GA_{yj}) x_i / \sum (GA_{yj})}{\sum (GA_{yk}) y_i / \sum (GA_{yk})} \\ y_D &= \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3 地震作用下的结构扭转计算

单向偏心力 V_y 作用下结构第 n 楼层产生的层间扭转角 θ_n 为:

$$\theta_n = \frac{V_y e_n}{K_i} \quad (9)$$

对于高层框架-剪力墙结构,需要考虑多振型的影响。此时,可以采用振型分解法,计算每一振型下的水平地震作用力及相应的扭转角,然后再用 CQC 法考虑各振型的平扭藕联组合^[7]。求出各层的扭转角。

结合 GA 定义有:

$$GA = h_i \sum D_i \quad (10)$$

根据式 (10) 和文献 [4] 得到考虑构件抗扭刚度的结构抗扭刚度 K_i 为:

$$K_i = \left[\sum \left(\frac{(GA)_{yj}}{h_i} x_j^2 \right) + \sum \left(\frac{(GA)_{xk}}{h_i} y_k^2 \right) \right] + \sum (\bar{G} I_t / h) \quad (11)$$

式中: $\frac{(GA)_{yj}}{h_i}$ 、 $\frac{(GA)_{xk}}{h_i}$ 为框架-剪力墙结构的抗侧移刚度,类似于文献 [4]、[8] 的抗侧刚度 (V_{yi}/y_i) 、 (V_{xk}/x_k) ; \bar{G} 为混凝土的剪切模量,取 $\bar{G} = 0.4E$, E 为混凝土的弹性模量; $\bar{G} I_t$ 称为构件的弹性抗扭刚度; h 为结构层高;

I_t 为截面的抗扭惯性矩^[9]。

它综合考虑了构件的抗侧刚度与抗扭刚度的影响,且亦能反映出抗侧力构件的布置位置与楼层层高的影响。将 K_i 代入式 (9) 得到层间扭转角,于是第 n 楼层扭转角为:

$$= \sum_{n=1}^n \theta_n \quad (12)$$

于是构件的总位移和总剪力分别为式 (13) 和 (14)^[6]:

$$\left. \begin{aligned} y_j &= \frac{V_y}{\sum (GA)_{yj}/h_i} + x_j \\ x_k &= -y_k \\ V_{yj} &= \frac{(GA)_{yj}}{\sum (GA)_{yj}} V_y + (x_j) \frac{(GA)_{yj}}{h_i} \\ V_{xk} &= - (y_k) \frac{(GA)_{xk}}{h_i} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} V_{yj} &= \frac{(GA)_{yj}}{\sum (GA)_{yj}} V_y + (x_j) \frac{(GA)_{yj}}{h_i} \\ V_{xk} &= - (y_k) \frac{(GA)_{xk}}{h_i} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式 (13)、(14) 均由两部分组成,即不考虑扭转时的位移与剪力,以及扭转引起的位移与剪力。由于本文是采用的修正扭转算法,故 K_i 的影响只隐含在式中里。

4 算例

某现浇楼板 12 层空间框架,平面结构简图如图 3 所示,结构特征值如下:总体信息:底层层高 5.0 m,其余层层高 3.2 m,采用 C40 混凝土。截面尺寸:横梁: $250 \times 600 \text{ mm}^2$;边柱 Z_1 : $600 \times 600 \text{ mm}^2$;中柱 Z_2 : $700 \times 700 \text{ mm}^2$,楼板 200 mm。荷载条件:7 度设防,类场地第一组。活荷载 2.0 kN/m^2 ,雪荷载 0.35 kN/m^2 。

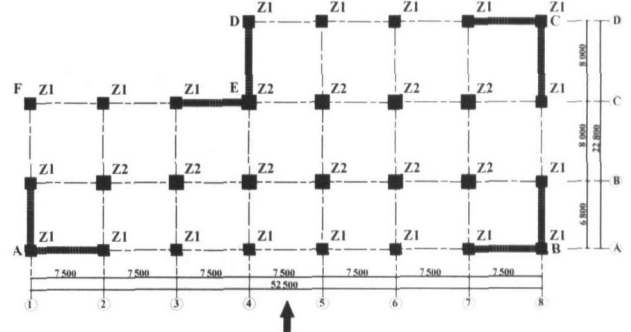


图 3 结构平面布置示意图

解:根据质心计算公式 (1),在中各层的质心坐标为 (29.55, 10.01),单位。底层刚心坐标为 (28.10, 9.65),其他层刚心坐标为 (29.38, 10.09),于是,底层偏心距 $e_c = 1.45$,其他层偏心距 $e_c = 0.17 \text{ m}$ 。

结构转角计算见表 1,再采用原有刚度模型计算结构的转角,并与通用有限元程序 SAP2000 计算的结果进行对比 (见表 2)。

表 1 结构转角计算

层数	V_j/kN	水平位移 $Y(\cdot)/\text{mm}$	层间转角 $/10^{-5}\text{rad}$	总转角 $\theta_i/10^{-5}\text{rad}$
12	508.01	21.55	0.03	1.16
11	256.58	20.99	0.04	1.13
10	234.39	20.14	0.06	1.08
9	212.20	19.03	0.07	1.03
8	190.01	17.68	0.08	0.96
7	167.82	16.13	0.09	0.87
6	145.63	14.39	0.10	0.78
5	123.44	12.48	0.11	0.68
4	101.25	10.44	0.11	0.58
3	79.06	8.29	0.12	0.47
2	56.86	6.05	0.12	0.35
1	41.47	3.75	0.23	0.23

表 2 转角计算比较

层数	层间转角 $/10^{-5}\text{rad}$			总转角 $\theta_i/10^{-5}\text{rad}$		
	原模型	新模型	SAP2000	原模型	新模型	SAP2000
12	0.05	0.03	0.02	1.45	1.16	1.06
11	0.06	0.04	0.03	1.40	1.13	1.04
10	0.07	0.06	0.06	1.34	1.08	1.01
9	0.09	0.07	0.06	1.27	1.03	0.95
8	0.10	0.08	0.07	1.18	0.96	0.89
7	0.09	0.09	0.08	1.08	0.87	0.82
6	0.11	0.10	0.09	0.99	0.78	0.74
5	0.13	0.11	0.11	0.88	0.68	0.65
4	0.15	0.11	0.10	0.75	0.58	0.54
3	0.16	0.12	0.11	0.60	0.47	0.44
2	0.14	0.12	0.11	0.44	0.35	0.33
1	0.30	0.23	0.22	0.30	0.23	0.22

从表中可以看出,采用新刚度模型计算结构的扭转效应,操作简单,计算精确。

5 结语

引入一种新的计算楼层抗扭刚度的方法,应用该刚度模型来计算框架-剪力墙结构的扭转,可获得满意的计算精度,且概念清晰,无需事先计算框架-剪力墙结构的内力,计算量小,可为工程设计提供参考。

参考文献:

- [1] 颜永弟. 框架和框架-剪力墙结构的侧移估算 [J] 重庆建筑大学学报, 1997, 19(6): 86-92
- [2] JBJ 3-2002, 高层建筑混凝土结构技术规程 [S]
- [3] 梁莉军, 黄宗明, 杨溥. 各国规范关于结构地震下抗扭设计方法的对比 [J] 重庆建筑大学学报, 2002, 24(2): 52-56
- [4] 包世华. 新编高层建筑结构(第二版) [M] 北京: 中国水利水电出版社, 2005
- [5] B. S 史密斯, A. 库尔. 高层建筑结构分析与设计 [M] 北京: 地震出版社, 1993
- [6] 沈蒲生, 孟焕陵, 刘杨. 考虑构件抗扭刚度的高层建筑结构扭转性能研究 [J] 铁道科学与工程学报, 2006, 3(2): 21-25
- [7] GB 50011-2001, 建筑抗震设计规范 [S]
- [8] 方鄂华, 钱稼茹, 叶列平. 新编高层建筑结构 [M] 北京: 中国建筑工业出版社, 2003
- [9] 沈蒲生. 一级注册结构工程师考试手册(上册) [M] 北京: 中国建筑工业出版社, 2000