

## 2种不同刚度模型下框架结构扭转性能分析

郭健<sup>1,2</sup>, 何益斌<sup>2</sup>, 酆世平<sup>3</sup>

- (1. 湖南大学设计研究院, 湖南长沙, 410082;
2. 湖南大学土木工程学院, 湖南长沙, 410082;
3. 上海汉沙杨建筑工程设计咨询公司, 上海, 200001)

**摘要:** 基于传统框架结构扭转近似计算中, 框架柱抗侧刚度是采用  $D$  值法计算的, 其计算较复杂、烦琐, 为简化计算, 引用 Smith & Coull 法计算框架柱抗侧刚度。为保证计算方法可靠, 对框架结构算例在这 2 种刚度计算模型下得出的扭转性能进行对比分析。研究表明, 在 2 种刚度计算模型基础上得到的框架结构总扭转角、层间相对扭转角、楼层剪力等扭转性能结果非常相近, 而 Smith & Coull 法较  $D$  值法计算更为简便, 故在框架结构的扭转近似计算中可优先选用。

**关键词:** 框架结构;  $D$  值法; Smith & Coull 法; 扭转性能

中图分类号: TU375.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-7207(2008)02-0400-05

## Torsion performance of tall building structures based on torsion stiffness of elements

GUO Jian<sup>1,2</sup>, HE Yi-bin<sup>2</sup>, LI Shi-ping<sup>3</sup>

- (1. Institute of Design and Research, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
3. Norindar-hamzah-yeang Architectural Engineering Design Company Ltd., Shanghai 200001, China)

**Abstract:** Based on the fact that in the proximate calculation of torsion effect of the traditional frame structures, the column push-resistant stiffness is calculated by  $D$  value method which is more complex and difficult. The Smith & Coull method was proposed to make the calculation easier. To ensure the reliability of the calculated method, torsion performances in frame structure is contrasted with the two stiffness models. The torsion performance results such as the total angel of torsion on the basis of two stiffness model are close to each other, and Smith & Coull method is simpler which has the priority in the proximate calculation of torsion effect of the frame structures.

**Key words:** frame structures;  $D$  value method; Smith & Coull method; torsion performance

地震时, 地面不但有平动, 而且有转动, 因此, 高层建筑结构在地震作用下不仅有平移, 还会有绕刚度中心的扭转。当布置高层建筑结构平面时, 扭转效应更为明显。震害分析结果表明, 扭转是一个很重要的致害因素<sup>[1-5]</sup>。目前, 有关规范增加了对结构偏

心扭转的限制, 对楼层竖向构件的最大水平位移与层间位移的比值, 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<sup>[6]</sup>。

对结构扭转效应进行近似计算时, 一般以层间扭转角为参数对构件的位移与剪力进行调整。无论是质

收稿日期: 2007-07-20; 修回日期: 2007-09-25

基金项目: 湖南省杰出青年基金资助项目(05JJ10009)

通信作者: 郭健(1970-), 男, 湖南长沙人, 博士研究生, 高级工程师, 从事混凝土结构及组合结构设计理论研究; 电话: 0731-8821068; E-mail: GJ\_GC@163.com

心与刚心间偏心距的偏心距计算, 还是结构扭转刚度的计算都涉及构件的抗侧刚度, 因此, 构件的抗侧刚度计算是结构扭转计算的关键。有关框架柱抗侧刚度计算的研究, 梁启智等<sup>[7]</sup>提出了关于断层等特殊情况下框架柱抗侧刚度计算方法, 谢强等<sup>[8-9]</sup>对轻板框架和组合结构等框架柱的抗侧刚度计算进行研究, 然而, 我国工程界广泛采用的仍然是  $D$  值法<sup>[10-12]</sup>, 国外大都采用 S-C 法。目前, 人们对这 2 种方法之间的对比研究较少。为此, 本文作者给出框架结构扭转效应的计算公式, 分别用  $D$  值法与 Smith & Coull 法计算柱抗侧刚度, 对比分析 2 种刚度模型下框架结构扭转性能, 对它们进行综合对比, 并提出合理化建议。

### 1 楼层质心、刚心及扭转偏心矩

以楼层平面内任意点  $O'$  为原点建立参考坐标系  $x'O'y'$ , 由文献[13]可知第  $i$  楼层的质心坐标  $(x'_m, y'_m)$  和刚心坐标  $(x'_D, y'_D)$  为:

$$\begin{cases} x'_m = \sum m_j x'_j / \sum m_j, \\ y'_m = \sum m_k y'_k / \sum m_k; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x'_D = \sum D_{yj} x'_j / \sum D_{yj}, \\ y'_D = \sum D_{xk} y'_k / \sum D_{xk}. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $m_j$  和  $m_k$  分别为同一楼层内第  $j$  个和第  $k$  个构件的质量;  $x'_j$  和  $y'_j$  分别为第  $j$  个和第  $k$  个构件的质心坐标;  $D_{yj}$  和  $D_{xk}$  分别为同一楼层内与  $y'$  或  $x'$  轴方向平行的第  $j$  根和第  $k$  根柱的抗侧刚度。

楼层扭转偏心距即为楼层质心与刚心的距离,  $x$  和  $y$  方向偏心距的表达式为

$$\begin{cases} e_x = x'_m - x'_D, \\ e_y = y'_m - y'_D. \end{cases} \quad (3)$$

### 2 结构扭转时构件的位移与剪力

单向偏心力  $V_y$  作用下结构产生的层间扭转角  $\theta$  为<sup>[13]</sup>:

$$\theta = \frac{V_y e_x}{\sum (D_{yj} x_j^2) + \sum (D_{xk} y_k^2)}. \quad (4)$$

式中:  $x_j$  和  $y_k$  分别为沿  $y$  向第  $j$  根柱、沿  $x$  向第  $k$  根柱质心在结构刚度中心  $xOy$  中的坐标。

考虑构件的抗扭刚度时, 结构的抗扭刚度  $K_t$  为

$$K_t = [\sum (D_{yj} x_j^2) + \sum (D_{xk} y_k^2)] + \sum (GI_t / h). \quad (5)$$

式中:  $G$  为混凝土的剪切模量, 取  $G=0.4E$ ,  $E$  为混凝土的弹性模量;  $GI_t$  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<sup>[14]</sup>。

$K_t$  综合考虑了构件的抗侧刚度与抗扭刚度的影响, 且也能反映抗侧力构件的布置位置与楼层层高的影响。因此, 构件的总位移和总剪力分别为:

$$\begin{cases} \delta_{yj} = \frac{V_y}{\sum D_y} + x_j \theta, \\ \delta_{xk} = -y_k \theta; \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} V_{yj} = \frac{V_{yj}}{\sum D_y} V_y + (x_j \theta) D_{yj}, \\ V_{xk} = -(y_k \theta) D_{xk}. \end{cases} \quad (7)$$

### 3 计算柱抗侧刚度的 2 种方法

从以上推导可看出, 无论是质心与刚心间偏心距的计算, 还是结构扭转刚度的计算都涉及构件的抗侧刚度, 故框架柱的抗侧刚度计算是结构扭转计算的关键问题。

计算框架柱的抗侧刚度时, 较为精确的方法一般有  $D$  值法与 Smith & Coull 法, 国内工程界一般采用前者, 而国外大都采用后者。下面简单介绍此 2 种方法的计算思路。

#### 3.1 D 值法

$D$  值法又称修正反弯点法, 是对柱的抗侧刚度和柱的反弯点位置进行修正后的一种方法<sup>[15]</sup>。

$$D_i = \alpha_c \frac{12i_c}{h_i^2}. \quad (8)$$

式中:  $i_c$  为框架柱的线刚度;  $h_i$  为第  $i$  层层高;  $\alpha_c$  为柱抗侧刚度修正系数(见表 1), 它取决于柱两端的支承情况及两端被嵌固的程度, 与梁柱的线刚度比值即  $\bar{i} = \sum i_b / \sum i_c$  有关, 其中  $i_b$  为梁的线刚度。

表 1 柱抗侧刚度修正系数

**Table 1** Modified coefficients of column anti-side stiffness

柱的部位及固定情况	一般层	底层, 下端固定	底层, 下端铰支
$\bar{i}$	$\bar{i} = \frac{i_1 + i_2 + i_3 + i_4}{2i_c}$	$\bar{i} = \frac{i_1 + i_2}{2i_c}$	$\bar{i} = \frac{i_1 + i_2}{i_c}$
$\alpha_c$	$\alpha_c = \frac{\bar{i}}{2 + \bar{i}}$	$\alpha_c = \frac{0.5 + \bar{i}}{2 + \bar{i}}$	$\alpha_c = \frac{0.5\bar{i}}{1 + 2\bar{i}}$

注: 表中  $i_1 \sim i_4$  为梁的线刚度,  $i_c$  为柱的线刚度,  $\alpha_c$  为结点转动影响系数。

3.2 Smith & Coull 法<sup>[16]</sup>

Smith 和 Coull<sup>[16]</sup>认为, 水平荷载作用下的框架层间侧移由 3 部分组成: 第 1 部分是由于梁的双曲弯曲变形引起的节点转动产生的侧移  $\delta_b$ ; 第 2 部分是由柱的双曲弯曲变形引起的侧移  $\delta_c$ ; 第 3 部分是由于柱子轴向变形使结构整体弯曲而引起的侧移  $\delta_N$ , 即层间总侧移  $\delta = \delta_c + \delta_b + \delta_N$ , 当框架高宽比小于 4 时, 可忽略最后 1 项, 即  $\delta = \delta_c + \delta_b$ 。

除底层外的其余各层, 假定反弯点在柱高的一半及梁的跨中, 则总层间侧移为

$$\delta_i = \frac{V_i h_i^2}{12} \left( \frac{1}{\sum i_b} + \frac{1}{\sum i_c} \right)_i \quad (9)$$

故其等效抗侧刚度为

$$\sum D_i = \frac{12}{h_i^2 \left( \frac{1}{\sum i_b} + \frac{1}{\sum i_c} \right)_i} \quad (10)$$

底层的柱基底一般为固结端, 反弯点层间中部的假定不符合实际, 总层间侧移应为

$$\delta_i = \frac{V_i h_i^2}{12} \frac{\left( \frac{2}{3\sum i_b} + \frac{1}{\sum i_c} \right)_i}{\left( 1 + \frac{\sum i_c}{6\sum i_b} \right)_i} \quad (11)$$

故底层柱等效抗侧刚度为

$$\sum D_i = \frac{12}{h_i^2} \frac{\left( 1 + \frac{\sum i_c}{6\sum i_b} \right)_i}{\left( \frac{2}{3\sum i_b} + \frac{1}{\sum i_c} \right)_i} \quad (12)$$

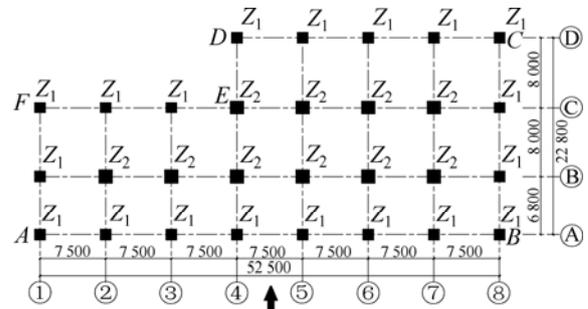
4 算 例

某现浇楼板 12 层空间框架, 平面结构简图如图 1 所示, 结构特征值如下:

a. 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。

b. 截面尺寸: 横梁为 250 mm×600 mm(宽×高); 边柱  $Z_1$  为 600 mm×600 mm(宽×高); 中柱  $Z_2$  为 700 mm×700 mm(宽×高), 楼板厚 200 mm。

c. 荷载条件: 风荷载按 0.4 kN/m<sup>2</sup> 计算, 地面粗糙度为 C 类。7 度设防, 二类场地为第 1 组。活荷载为 2.0 kN/m<sup>2</sup>, 雪荷载为 0.35 kN/m<sup>2</sup>。



单位: mm

图 1 结构平面布置示意图

Fig.1 Structural sketch of plane collocation

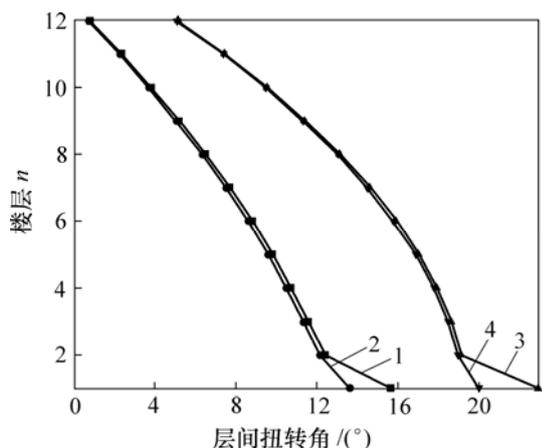
以下将分别采用 D 值法与 Smith & Coull 法(简称 S-C 法)计算结构的质心、刚心与偏心距(见表 2)。结构的层间扭转与总扭转对比分析分别见图 2 和图 3; 角柱的总侧移与总剪力分别见图 4 和图 5。

表 2 结构的质心、刚心与偏心距

Table 2 Structural mass, rigidity center and prejudicial distance

楼层	质心坐标/m	刚心坐标/m		偏心坐标/m	
		D 值法	S-C 法	D 值法	S-C 法
其他层	(27.94, 10.01)	(28.64, 9.47)	(28.64, 9.74)	(0.70, 0.54)	(0.70, 0.27)
底层	(27.94, 10.01)	(28.51, 9.75)	(28.51, 9.85)	(0.57, 0.26)	(0.57, 0.16)

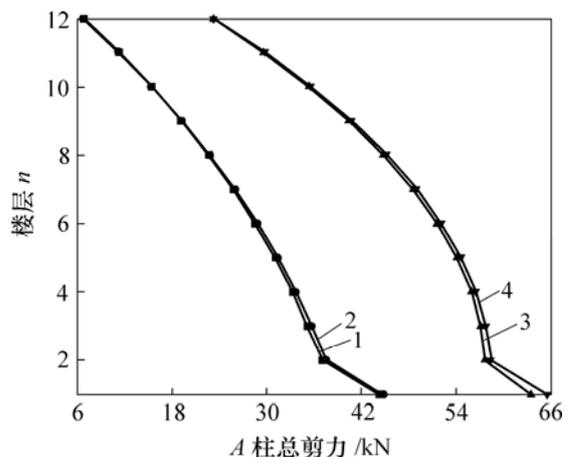
可以看出: 地震作用下的结构扭转效应比风荷载明显; 风荷载与地震作用下, 在结构第 2 层以下层间扭转角的计算 S-C 法与 D 值法有较大差别, 在其他楼



1—风荷载,  $D$  值法; 2—风荷载, S-C 法;  
3—地震荷载,  $D$  值法; 4—地震荷载, S-C 法

图2 结构层间转角与楼层的关系

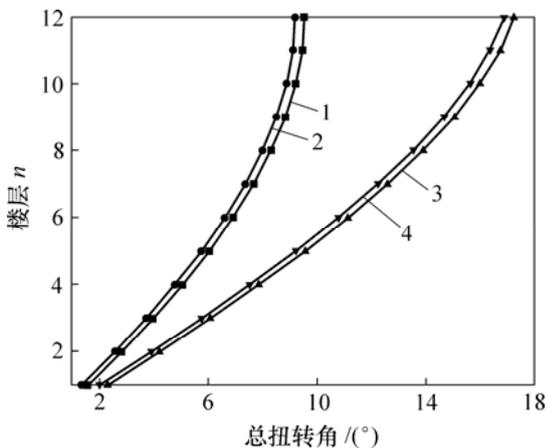
Fig.2 Relationship between structural corner of floors and storey



1—风荷载,  $D$  值法; 2—风荷载, S-C 法;  
3—地震荷载,  $D$  值法; 4—地震荷载, S-C 法

图5 A 柱总剪力与楼层的关系

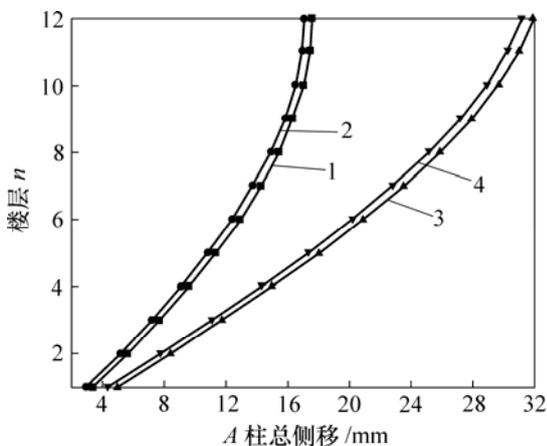
Fig.5 Relationship between total shear of column A and storey



1—风荷载,  $D$  值法; 2—风荷载, S-C 法;  
3—地震荷载,  $D$  值法; 4—地震荷载, S-C 法

图3 结构总转角与楼层的关系

Fig.3 Relationship between structural total corner and storey



1—风荷载,  $D$  值法; 2—风荷载, S-C 法;  
3—地震荷载,  $D$  值法; 4—地震荷载, S-C 法

图4 A 柱总侧移与楼层的关系

Fig.4 Relationship between total displacement of column A and storey

层则比较相近, 而对于总的扭转角、A 柱总侧移和总剪力, S-C 法与  $D$  值法的计算相近, 前者比后者略小。

## 5 结论

a. 计算框架柱抗侧刚度时, 由于  $D$  值法与 S-C 法均考虑了梁柱弯曲变形的影响, 故计算的结构扭转性能比较接近。

b.  $D$  值法是通过梁柱线刚度比  $\bar{i}$  来计算柱抗侧刚度修正系数  $\alpha_c$ , 其计算过程非常复杂; 而 S-C 法是单独计算由于梁的双曲弯曲变形引起的节点转动产生的侧移  $\delta_b$ , 来考虑梁对柱的抗侧刚度的影响, 只需要知道梁和柱的线刚度  $i_b$  和  $i_c$  就可直接求得柱的等效抗侧刚度, 故计算较简便。

c. 计算框架结构的柱抗侧刚度与扭转性能时, 推荐采用 S-C 法。

### 参考文献:

[1] 蔡健, 潘东辉, 黄炎生. 高层建筑结构扭转震动控制研究[J]. 工程力学, 2007, 24(7): 116-121.  
CAI Jian, PAN Dong-hui, HUANG Yan-sheng. Research on torsional vibration control of tall building structures[J]. Engineering Mechanics, 2007, 24(7): 116-121.

[2] 徐培福, 黄吉锋, 韦承基. 高层建筑结构在地震作用下的扭转振动效应[J]. 建筑科学, 2000, 16(1): 1-6.  
XU Pei-fu, HUANG Ji-feng, WEI Cheng-ji. Response of torsional vibration of tall building structures Induced by seismic

- action[J]. *Building Science*, 2000, 16(1): 1-6.
- [3] 范重, 吴学敏. 带有双塔楼高层建筑结构动力特性分析[J]. *建筑结构学报*, 1996, 17(6): 11-18.  
FAN Zhong, WU Xue-min. Analysis of the dynamic properties of tall buildings with two towers[J]. *Journal of Building Structures*, 1996, 17(6): 11-18.
- [4] 吕西林, 李学平. 超限高层建筑工程抗震设计中的若干问题[J]. *建筑结构学报*, 2003, 24(2): 13-18.  
LU Xi-lin, LI Xue-ping. Some problems on seismic design of out-of-codes high rise building[J]. *Journal of Building Structures*, 2003, 24(2): 13-18
- [5] 赵西安. 我国高层建筑结构计算方法的进展[J]. *工程力学*, 1990, 7(1): 67-75.  
ZHAO Xi'an. Development on the methods of analysis of tall building structures in China[J]. *Engineering Mechanics*, 1990, 7(1): 67-75.
- [6] JBJ 3—2002, 高层建筑混凝土结构技术规程[S].  
JBJ 3—2002, Technical specification for concrete structures of tall building[S].
- [7] 梁启智, 梁平. 框架柱的侧移刚度[J]. *华南理工大学学报*, 1995, 23(1): 91-99.  
LIANG Qi-zhi, LIANG Ping. Lateral stiffness of columns in frame[J]. *Journal of South China University of Technology*, 1995, 23(1): 91-99.
- [8] 谢强, 姚谦峰. 高层轻板框架结构的刚度和承载力分析[J]. *西安建筑科技大学学报*, 2000, 32(3): 205-208.  
XIE Qiang, YAO Qian-feng. Analysis on lateral stiffness and shearing capacity of highrise lightweighted wall panel frame structure[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology*, 2000, 32(3): 205-208
- [9] 刘坚, 李开禧, 张利. 钢框架混凝土剪力墙混合结构的简化计算方法[J]. *四川建筑科学研究*, 2003, 29(2): 21-23.  
LIU Jian, LI Kai-xi, ZHANG Li. The simplified calculation approach of steel frames-reinforced concrete shear wall mixed structure[J]. *Building Science Research of Sichuan*, 2003, 29(2): 21-23.
- [10] 包世华, 方鄂华. 高层建筑结构设计[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 1990.  
BAO Shi-hua, FANG E-hua. Structural design of tall building structures[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 1990.
- [11] 李君如. 高层建筑结构分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.  
LI Jun-ru. Tall building structural analysis [M]. Beijing: People Communications Press, 1990.
- [12] 方鄂华, 钱嫁茹, 叶列平. 新编高层建筑结构[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
FANG E-hua, QIAN Jia-ru, YE Lie-ping. New edited tall building structures[M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2003.
- [13] 安伟刚, 李为吉, 彭佳扬. 利用模型管理框架求解多目标优化问题[J]. *中南大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(3): 562-566.  
AN Wei-gang, LI Wei-ji, PENG Jia-yan. Solving multi-objective optimization problem using model management framework[J]. *J Cent South Univ: Science and Technology*, 2006, 37(3): 562-566.
- [14] 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.  
SHEN Pu-sheng. Examination manual of superlative degree registered structure engineer: Volume I [M]. Beijing: China Architecture Industry Press, 2000.
- [15] 沈蒲生, 梁兴文. 混凝土结构设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.  
SHEN Pu-sheng, LIANG Xing-wen. Concrete structures design[M]. Beijing: Higher Education Press, 2002.
- [16] Smith B S, Coull A. Tall building structures: Analysis and design[M]. New York: J Wiley Interscience, 1991.