

文章编号:1671-6833(2010)01-0020-03

框架-剪力墙结构的侧向刚度分析

郭乐工^{1,2}, 郭乐宁³

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072; 2. 郑州大学 土木工程学院, 郑州 450001; 3. 上海师范大学 建筑工程学院, 上海 200234)

摘 要: 框架-剪力墙结构受力特征与水平荷载的分配不同于框架结构和剪力墙结构, 框架与剪力墙各自承受的横向水平荷载合理分配要求必须对框架-剪力墙结构进行侧向刚度分析。本文基于框架-剪力墙之间结构侧移柔度, 进行了框架-剪力墙结构侧向刚度分析, 对于框架-剪力墙结构中框架与剪力墙各自承受水平荷载合理分配给出一种基于链杆内力离散化分布模式新的计算方法, 其物理概念明确, 计算简便, 更较符合实际, 可应用于平面框架-剪力墙结构情况。

关键词: 框架-剪力墙结构; 结构侧移柔度; 刚度分析

中图分类号: TU435 **文献标识码:** A

0 引言

在框剪结构中, 框架剪力墙之间通过作为链杆的水平平面内刚性无限大的楼板结构相联系, 在同一楼层平面上, 二者必须变形协调, 即水平侧移保持相等。它们各自的变形曲线不再与纯框架结构和剪力墙结构时一样。因此, 框架-剪力墙结构受力特征与水平荷载的分配均不同于纯框架结构和剪力墙结构, 需要对框剪结构进行刚度分析, 以合理分配框架与剪力墙各自承受的横向水平荷载。迄今为止, 各类框架-剪力墙结构刚度分析方法均假设框架与剪力墙之间链杆内力连续化分布, 采用微分方程方法计算求解^[1]。笔者基于框架与剪力墙的侧移柔度分析^[2-4], 提出了框架与剪力墙之间链杆内力离散化分布的刚度分析方法, 更较符合实际, 可用于框架-剪力墙结构中框架与剪力墙各自承受水平荷载合理分配。

1 框架结构的刚度

在进行框架柔度分析时, 由于框架每一楼层的侧移是与各构件的变形几何相关的, 所以框架侧移柔度的确定需要考虑楼层的侧移、梁柱节点的转角和柱的轴向变形的影响。

1.1 考虑楼层侧移和梁柱结点转动效应的侧移柔度系数

由单跨对称高层刚架侧移分析^[2-4], 受侧向

集中力 $P_i = 1, P_j = 0 (i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, n)$ 作用的框架楼层相对侧移如下求得:

$$[D]_i \{\Delta\}_i + \{B\}_i = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

$$[D]_j = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & & 0 \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & \\ & d_{n-1 \ n-2} & d_{n-1 \ n-1} & d_{n-1 \ n} \\ & 0 & d_{n \ n-1} & d_{n \ n} \end{bmatrix}$$
$$\{\Delta\}_i = \begin{bmatrix} \Delta_{1i} \\ \vdots \\ \Delta_{ji} \\ \vdots \\ \Delta_{ni} \end{bmatrix} \quad \{B\}_i = \begin{bmatrix} b_{1i} \\ \vdots \\ b_{ji} \\ \vdots \\ b_{ni} \end{bmatrix}$$

式中: $[D]_i$ 为结构特征矩阵; $\{\Delta\}_i$ 为层间相对侧移列阵; $\{B\}_i$ 为常数项列阵。当 $p = 1$ 作用于各楼层时的 d_{ij}, b_{ji} 表达式详见文献[2-4]。

由式(1)求得 $\{\Delta\}_i$ 后, 再由计算相对刚度的基本值求出长度单位的层间相对侧移 $\{\delta\}_i$, 而后由 $\{\delta\}_i$ 集成侧移柔度系数列阵 $\{f\}_i$, 则考虑楼层侧移和梁柱结点转动效应的框架总侧移柔度矩阵:

$$[f] = [\{f\}_1, \{f\}_2, \dots, \{f\}_n] \quad (2)$$

1.2 考虑柱轴向变形的框架侧移

考虑柱轴向变形影响, 可采用简化方法。假设反弯点位于梁跨中和柱中点, 在水平荷载作用下, 框架外柱所受轴向力较内柱为大, 轴向变形影响亦大。当仅某一楼层作用 $P = 1$ 时, 第 j 楼层柱轴

收稿日期: 2009-08-21; 修订日期: 2009-10-15

作者简介: 郭乐工(1955-), 男, 山东广饶人, 郑州大学教授, 天津大学博士研究生, 主要从事工程结构分析方面的研究。

向力为 N_{qj} , 其轴向变形 δ_{qj} , 框架节点中心线竖向转角为 α_j , 由第 j 层柱轴向变形引起的第 i 楼层框架侧移为 f_{qj} , 则第 i 楼层由外柱轴向变形产生的侧移为

$$f_{ci} = \sum_{j=1}^i f_{qj} = \sum_{j=1}^i a_j \left(\frac{h_j}{2} + \sum_{k=j+1}^i h_k \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: $a_j = \frac{2\delta_{qj}}{L}$; $\delta_{qj} = \frac{N_{qj}h_j}{E_c A_{qj}}$; L 为外柱间距离. 这样,

可求得柱轴向变形引起的楼层侧移 $\{f_c\}_i$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$). 则这时每榀框架结构同时考虑楼层侧移、梁柱节点转动和柱轴向变形影响的总柔度矩阵为

$$[f] = [\{f\}_1 + \{f_c\}_1, \{f\}_2 + \{f_c\}_2, \dots, \{f\}_n + \{f_c\}_n] = [\{f\}_1, \{f\}_2, \dots, \{f\}_n] \quad (4)$$

1.3 框架结构的刚度

按上述方法求得每榀框架结构总柔度矩阵后, 每榀框架的刚度矩阵为

$$[k_f] = [f_f]^{-1} \quad (5)$$

2 剪力墙结构的刚度

剪力墙的侧移刚度分析应考虑墙体的弯曲变形和剪切变形. 对于整片墙和小开口墙, 可假设为竖向悬臂梁按材料力学公式求解. 当求得仅某一楼层施加单位集中力时墙体的弯曲变形和剪切变形引起的侧移, 则可逐次求得该片剪力墙的侧移柔度矩阵.

设 $P = 1$ 作用于第 i 楼层处, 该楼层楼面高度 H_i , $= \sum_{k=1}^i h_k$ ($i = 1, 2, 3, \dots, n$), 产生于各楼层处墙体的侧移为

$$f_{ji} = f_b + f_s = \frac{x^2}{6EI} (3H_i - x) + \frac{x}{GA} \quad (j = 1, 2, \dots, i) \quad (0 \leq x \leq h_i) \quad (6)$$

$$f_{ji} = \frac{h_i^2}{6EI} (3x - h_i) + \frac{h_i}{GA} \quad (j = i, \dots, n) \quad (h_i \leq x \leq H) \quad (7)$$

则 $\{f_w\}_i = [f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{in}]^T$ 即为仅 $P = 1$ 作用于第 i 楼层时该片剪力墙各楼层的侧移列阵. 该片剪力墙总柔度矩阵可由 $\{f_w\}_i$ 集成:

$$[f]_w = [\{f_w\}_1, \{f_w\}_2, \dots, \{f_w\}_n] \quad (8)$$

该片剪力墙的侧移刚度为

$$[k_w] = [f_w]^{-1} \quad (9)$$

3 横向水平荷载的分配

3.1 框架-剪力墙结构综合刚度矩阵求解

在进行框架-剪力墙结构横向水平荷载分配时, 假设楼层平面内的刚度无限大. 设 $\{\Delta\}$ 为框剪结构楼层的水平变位值. 由式(5)、(9)求得各榀框架、各片剪力墙的刚度矩阵 $[k_f]_k$ 、 $[k_w]_l$ 后, 其相应横向力列阵 $\{Q\}$ 为

$$\{Q_f\}_k = [k_f]_k \{\Delta\} \quad (k = 1, 2, \dots, s) \quad (10)$$

$$\{Q_w\}_l = [k_w]_l \{\Delta\} \quad (l = 1, 2, \dots, t) \quad (11)$$

式中: s 为框架榀数; t 为剪力墙数.

为了满足同一楼层平面内水平变形的协调, 有

$$\begin{aligned} [k_f]_1^{-1} \{Q_f\}_1 &= [k_f]_2^{-1} \{Q_f\}_2 = \dots = [k_f]_s^{-1} \{Q_f\}_s \\ &= [k_w]_1^{-1} \{Q_w\}_1 = [k_w]_2^{-1} \{Q_w\}_2 \\ &= \dots = [k_w]_t^{-1} \{Q_w\}_t = \{\Delta\} \end{aligned} \quad (12)$$

又由力的平衡, 作用于框架-剪力墙结构上每一楼层平面的水平荷载 $\{P\}$ 等于各榀框架与剪力墙在同一楼层平面上的横向力 $\{Q\}$ 之和, 即有

$$\begin{aligned} \{P\} &= \sum_{k=1}^s \{Q_f\}_k + \sum_{l=1}^t \{Q_w\}_l \\ &= \sum_{k=1}^s [k_f]_k \{\Delta\} + \sum_{l=1}^t [k_w]_l \{\Delta\} \end{aligned} \quad (13)$$

将式(12)关系代入式(13), 得

$$\begin{aligned} \{P\} &= \sum_{k=1}^s [k_f]_k [k_f]_k^{-1} \{Q_f\}_1 + \sum_{l=1}^t [k_w]_l [k_f]_1^{-1} \{Q_f\}_1 \\ &= \left[\sum_{k=1}^s [k_f]_k + \sum_{l=1}^t [k_w]_l \right] [k_f]_1^{-1} \{Q_f\}_1 \end{aligned} \quad (14)$$

$$\{Q_f\}_1 = [k_f]_1 \left[\sum_{k=1}^s [k_f]_k + \sum_{l=1}^t [k_w]_l \right]^{-1} \{P\} \quad (15)$$

同理可得

$$\{Q_w\}_1 = [k_w]_1 \left[\sum_{k=1}^s [k_f]_k + \sum_{l=1}^t [k_w]_l \right]^{-1} \{P\} \quad (16)$$

$$\text{若令 } [K] = \left[\sum_{k=1}^s [k_f]_k + \sum_{l=1}^t [k_w]_l \right] \quad (17)$$

则 $[K]$ 即为框架-剪力墙结构综合刚度矩阵.

3.2 框架-剪力墙结构横向水平荷载的分配

由式(10)~(12)确定每榀框架与每片剪力墙所分配的横向水平荷载如下:

$$\begin{aligned} \{Q_f\}_k &= [k_f]_k \left[\sum_{k=1}^s [k_f]_k + \sum_{l=1}^t [k_w]_l \right]^{-1} \{P\} \\ &= [k_f]_k [K]^{-1} \{P\} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \{Q_w\}_l &= [k_w]_l \left[\sum_{k=1}^s [k_f]_k + \sum_{l=1}^t [k_w]_l \right]^{-1} \{P\} \\ &= [k_w]_l [K]^{-1} \{P\} \quad (l = 1, 2, \dots, n) \end{aligned} \quad (19)$$

3.3 实例分析

图 1 所示 16 层框架-剪力墙结构,梁 L-1 跨度 2.4 m, $b \times h = 250 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$;梁 L-2 跨度 6.4 m, $b \times h = 250 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$;底层框架柱高 5.30 m,其余层柱高 3.05 m;底层柱截面 $700 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$,2-4 柱截面 $600 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$,其余层柱截面 $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$.底层墙 1、墙 2 层厚 200 mm.其余层墙厚 160 mm.混凝土强度等级 C20-C40.顶部集中水平力 $P = 250 \text{ kN}$,均布水平荷载 $q = 0.7 \text{ kN/m}^2$.采用本文方法与连续化内力假设微分方程方法计算剪力结果见表 1.

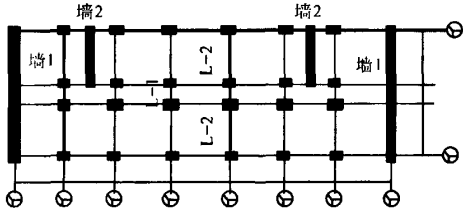


图 1 框架-剪力墙结构平面图
Fig. 1 Frame-shear wall structure plan

4 结论

笔者提出的基于框架-剪力墙链杆内力离散化分布进行横向水平荷载分配计算的刚度分析方法公式(18)、(19),物理概念明确,计算简便,更符合实际,可应用于平面框架-剪力墙结构情

表 1 剪力计算结果比较

Tab. 1 Comparison of calculation values of shear force

层数	kN		
	墙 1 剪力 $V_{\text{墙1}}$	中柱剪力 $V_{\text{中柱}}$	边柱剪力 $V_{\text{边柱}}$
16	-46.88(-48.21)	19.24(19.77)	10.74(11.17)
14	25.22(39.00)	16.60(19.09)	12.44(11.07)
12	127.87(139.26)	19.42(18.89)	12.48(11.91)
10	250.63(241.76)	22.92(19.32)	11.38(10.93)
8	354.19(348.39)	20.62(18.30)	10.74(10.40)
6	464.20(461.58)	15.89(16.53)	9.32(9.36)
4	600.17(581.33)	10.46(13.77)	8.55(7.39)
2	717.07(697.46)	7.68(9.22)	5.54(4.95)

注:括号内数字为连续化方法计算结果.

况.对于无扭转效应的空间框架-剪力墙结构,可按两个正交方向化为平面结构,应用本文方法计算各自水平横向荷载,进行结构设计计算.

参考文献:

[1] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2009.
[2] 郭乐工.一种高层框架振动分析新方法[J].世界地震工程,2004,20(2):91-94.
[3] 郭乐工.高层框架实用振动分析[C].武汉:第二届全国地震工程学术会议论文集,1987:662-666.
[4] 王寿康.变刚度框架-剪力墙结构的力法及其简化[J].建筑结构,2001,31(4):61-63.

Lateral Stiffness Analysis on Frame-Shear Wall Structures

GUO Le-gong^{1,2}, GUO Le-ning³

(1. College of Construction Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. College of Construction Engineering, Shanghai Normal University, Shanghai 200234, China)

Abstract: In the paper, the lateral stiffness analysis on frame-shear wall structures is made on the basis of dispersed inner force distribution of links between frame-shear wall structures and the flexibility of frame-shear walls structures. And a new calculating method distributing transverse horizontal loads between frames and shear walls respectively in frame-shear wall structures are suggested. The physical concept of those formulas is clear, and the results of calculation comparatively match the real working situation of frame-shear wall structures under horizontal loads.

Key words: frame-shear wall structure; lateral flexibility of structure; stiffness analysis