

文章编号: 1000-5013(2007)03-0313-03

一种新型的分析框剪结构的单元——层单元

方德平, 王全凤

(华侨大学 土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 构造一种能模拟一层框-剪结构的新型分析方法——层单元. 采用杆单元法、层单元法和解析公式, 分别计算不同结构刚度特征值的等刚度框-剪结构, 在不同的外荷载作用下的内力和位移; 采用杆单元法和层单元法, 计算不同结构刚度特征值的变刚度框-剪结构, 在均布荷载作用下的内力和位移. 与杆单元法比较, 层单元法能显著地减少输入、输出数据和计算量, 计算误差小于 3.5%.

关键词: 层单元; 框-剪结构; 杆单元; D 值法; 变形协调

中图分类号: TU 398⁺. 201; TU 973⁺. 230; TU 973⁺. 16

文献标识码: A

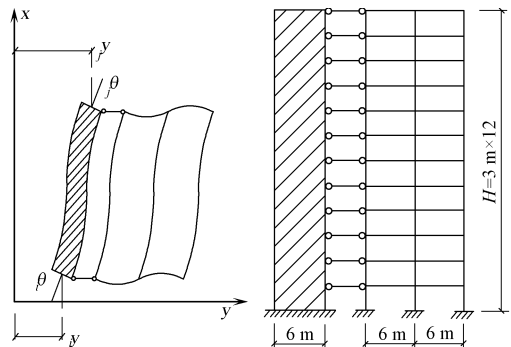
框-剪结构协同工作的计算方法主要有两大类: (1) 由计算机求解^[1]的杆单元法. 这是一种数值方法, 也是一种较精确的方法, 但其存在输入和输出数据繁多, 计算量大的缺点. (2) 将框架和剪力墙之间的链杆在剪力墙高度范围内进行连续化处理^[2], 框-剪结构的计算简化为常系数线性微分方程的求解, 是一种解析方法, 也是近似的方法. 但它存在只能求解常刚度框-剪结构和某些特定外荷载的局限. 在初步设计阶段, 人们总希望用简明的且有相当精度的力学模型分析结构, 避免一般有限元分析自由度过多的缺陷, 以及解析法过严的适用条件, 提出了离散-连续化方法^[3]. 把一层作为一个计算单元, 在单元内对框架和剪力墙变形进行连续化的处理, 构造了单元刚度矩阵. 这一单元显著地减少了输入、输出数据和计算量, 同时可处理变刚度框-剪结构和各种外荷载, 对于常刚度框-剪结构的特定外荷载, 其计算结果与解析法相同.

1 分析方法

本文构造了一种新型的, 分析框-剪结构的层单元, 如图 1(a) 所示. 把一层作为一个计算单元, 用 D 值法计算框架的侧移刚度 D , 与文[3]不同的是, 在单元内不要求框架和剪力墙变形的连续. 其优点是更具有接近于框-剪结构的原计算模型(图 1b), 计算精度较好, 刚度矩阵有简明的物理意义. 实际上, 对框架和剪力墙变形进行连续化处理是为了建立微分方程, 既然用有限元方法离散结构, 宜放弃框架和剪力墙变形的连续化假设, 恢复本来面目. 图 1 的层单元的刚度方程(未列入剪力墙的轴力作用项)为:

$$K^e \delta^e = F^e$$

式中, $\delta^e = \{y_i, \theta_i y_i, \theta_j\}^T$, $F^e = \{F_{si}, M_i, F_{sj}, M_j\}^T$, 位移 δ^e 正向如图 1 所示, 内力 F^e 的正向与位移 δ^e 的正向相同, 弯矩作用在剪力墙上, 剪力为剪力墙剪力与框架剪力之和.



(a) 层单元 (b) 计算模型

图 1 框剪结构的层单元

Fig. 1 Storey element for frame shear wall structure

收稿日期: 2006-11-09

作者简介: 方德平(1965-), 男, 教授, 主要从事工程结构力学分析的研究. E-mail: fdp@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50578066); 福建省自然科学基金资助项目(E0410023, E0540005)

$$K^e = \begin{bmatrix} k_{11} + D & k_{12} & k_{13} - D & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} - D & k_{32} & k_{33} + D & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{bmatrix}.$$

上式中, k_{ij} 为剪力墙考虑剪切变形的杆单元刚度元素, 剪切变形通过系数 $\gamma = 6\mu EI/GAl^2$ 来体现, μ 为剪应力不均匀系数, 矩形截面取 1.2. EI, GA 为杆截面抗弯刚度、抗剪刚度. 实际上, 剪力墙的剪切变形是对整个剪力墙而言, 所以 γ 中的 l 应取剪力墙全高, 而不是层单元的长度, 否则将高估剪切变形, 且有时层单元的长度较小(图 1b 中的层单元长度只有 3 m), 使得 $\gamma > 1$, 导致某些刚度元素变号, 造成计算结果的失误. 只在剪力墙产生水平侧移时, 框架的侧移刚度 D 值才起作用, 且只产生剪力, 不影响剪力墙的杆端弯矩. 所以, 只要简单地在剪力墙杆单元刚度矩阵的相应元素中加上 D 值, 即可得层单元刚度矩阵, 方便编程, 物理含义简明. 确立了层单元刚度矩阵, 按杆件有限元法, 即可求得框-剪结构的位移和剪力墙内力与框架的剪力.

2 计算结果

算例如图 1(b) 所示, 梁截面为 $0.25\text{ m} \times 0.6\text{ m}$, 柱截面为 $0.45\text{ m} \times 0.45\text{ m}$, 剪力墙截面为 $0.2\text{ m} \times 6.0\text{ m}$, 材料的弹性模量 $E = 0.325\text{ EN} \cdot \text{m}^{-2}$. 求出各层的 D 值, 以及各层的框架抗剪刚度 C_{Fi} , 沿高度加权平均得到总框架的抗剪刚度 C_F , 抗剪刚度 $C_{F0} = C_F \times \Delta_M / (\Delta_M + \Delta_N)$, 考虑了框架柱轴向变形的影响. 其中, Δ_M 为框架梁柱弯曲变形产生的侧移, Δ_N 为框架柱轴向变形产生的侧移, 按框架顶部作用水平集中力 F 计算, $\Delta_M = FH/C_F$, $\Delta_N = 2FH^3/3EAB^2$, H 为结构总高, A 为边柱面积, B 为两边柱间距. 考虑了剪切变形对剪力墙抗弯刚度的影响, 等效刚度 $I_{eq} = I_W / (1 + 9I_W/H^2A_W)^{1/2}$, I_W, A_W 分别为剪力墙的轴惯性矩和面积, 框-剪结构刚度特征值 $\lambda = H \sqrt{C_{F0}/EI_{eq}}$, 计算得 $\lambda = 1.183$. 一般希望, 框架承担的剪力(最大的一层)不宜小于 $0.2V_0$ (V_0 为底部总剪力), 也不大于 $0.4V_0$, 相应的 λ 值在 $1.1 \sim 2.2$ 之间^[4]. 相应计算结果, 如表 1, 2 所示. 表 1, 2 中, ① ② ③ 分别表示杆单元法、层单元法和解析法的计算值, 括号内的数值为层单元计算值和解析值与精确值的误差百分比; $M_{\max}, F_{s, \max}, f_{\max}$ 分别为剪力墙底部的弯矩、剪力和顶部的水平位移; λ 值为 $0.75 \sim 2.5$, 涵盖了大部分的框-剪结构. 在计算中, 保持 C_{F0} 不变, 保持剪力墙的宽度 6 m 不变, 改变其厚度, 求得 I_{eq} , 进而得到不同的 λ 以杆件有限元的计算结果为精确值, 层单元计算的 D 值取所在层的数值, 表 1 中的集中力 100 kN 作用在结构的顶点, 均布荷载 $10\text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 沿结构全高分布, 顶点集度为 $12\text{ kN} \cdot \text{m}^{-1}$ 的倒三角形分布荷载沿结构全高分布. 表 2 中的变刚度剪力墙为 1~6 层的剪力墙, 其刚度保持不变, 7~9 层的刚度为 1~6 层的 75%, 10~12 层的刚度为 1~

表 1 不同剪力墙刚度和不同荷载的 12 层框-剪结构的计算结果

Tab. 1 Calculation results of 12-storey frame-shear wall structure with different shear wall stiffness and loads

荷载	λ	$M_{\max}/\text{kN} \cdot \text{m}^{-1}$			$F_{s, \max}/\text{kN}$			f_{\max}/mm		
		①	②	③	①	②	③	①	②	③
集中力	0.75	3 068	3 066(0.1)	3 049(0.6)	97.8	97.0(0.8)	100(2.3)	4.5	4.5(0.0)	4.4(3.1)
	1.18	2 540	2 547(0.3)	2 520(0.8)	95.0	93.9(1.1)	100(5.3)	8.8	8.9(0.3)	8.5(3.3)
	1.75	1 968	1 961(0.4)	1 937(1.6)	92.3	89.9(2.6)	100(8.4)	13.8	13.8(0.0)	13.2(4.4)
	2.50	1 439	1 435(0.3)	1 422(1.2)	88.0	85.2(3.2)	100(13.6)	18.1	18.3(1.1)	17.3(4.4)
均布荷载	0.75	5 752	5 751(0.0)	5 728(0.4)	355.7	354.6(0.3)	360(1.2)	6.1	6.1(0.0)	5.9(2.8)
	1.18	5 016	5 013(0.1)	5 003(0.3)	349.9	348.4(0.6)	360(2.9)	12.2	12.2(0.0)	11.6(4.9)
	1.75	4 190	4 192(0.1)	4 167(0.6)	342.8	339.2(1.1)	360(5.0)	19.2	19.3(0.5)	18.3(4.7)
	2.50	3 369	3 386(0.5)	3 376(0.2)	331.0	326.2(1.5)	360(8.8)	25.9	26.0(0.4)	24.5(5.4)
倒三角	0.75	4 547	4 545(0.0)	4 526(0.5)	212.6	211.7(0.4)	216(1.6)	5.4	5.4(0.0)	5.2(3.7)
	1.18	3 904	3 916(0.3)	3 888(0.4)	208.2	206.9(0.6)	216(3.8)	10.6	10.7(0.9)	10.2(3.8)
	1.75	3 185	3 190(0.2)	3 162(0.7)	202.7	199.9(1.4)	216(6.6)	16.7	16.8(0.6)	16.0(4.2)
	2.50	2 496	2 504(0.3)	2 494(0.6)	194.8	191.6(2.2)	216(10.9)	22.4	22.6(0.9)	21.3(4.9)

6层的50%, λ 值由1~6层的剪力墙的刚度求得. 对变刚度的框-剪结构^[5]而言, 没有相应的解析值, 本

文只比较杆单元和层单元的计算结果.从概念和表1结果可知,层单元的计算精度与 D 值法的精度直接相关,与外荷载基本无关,所以表2只计算 $10\text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 均布荷载的情况.

3 结论

根据上述的计算分析,得出以下3点结论.(1)与杆单元比较,层单元显著地减少了输入、输出数据和计算量,如图1(b)框-剪结构用杆单元法,有84单元、52个结点;用层单元法,只有12个层单元、13个结点.对于更多层数和更多跨数的框-剪结构而言,层单元的计算效应更为突出.(2)对不同荷载、不同 λ 值,常刚度或变刚度的框-剪结构,层单元的计算结果均有相当高的精度,计算误差小于3.5%.层单元中剪力墙的计算是没有误差,其误差是由 D 值法的误差产生的,计算误差随着 λ 值的增加而略有增大,因为 λ 值的增加意味着剪力墙的削弱, D 值法的误差就更加显现出来. M_{\max},f_{\max} 的误差要小于 $F_{s,\max}$ 的误差,因为 M_{\max},f_{\max} 与整体结构有关, D 值法的误差只起部分作用,所以误差较小;而 $F_{s,\max}$ 与底层的 D 值直接相关, D 值法的误差起重要作用,所以误差稍大.虽然 D 值法的计算精度并没有这么高,不过框架只是框-剪结构一个组成部分,剪力墙为主要受力构件,所以基于 D 值法的层单元的计算精度要高于 D 值法.(3)解析法的计算精度稍低于层单元,但能满足工程的5%要求.由于解析法的假设, $F_{s,\max}$ 等于水平外荷载,不计入底层柱的剪力,所以误差较大.

参考文献:

[1] 江见鲸. 建筑结构计算机分析及程序[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 36-64.
[2] 包世华. 新编高层建筑结构[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001: 150-181.
[3] 黄世敏, 魏 璉. 地震作用下沿高度变刚度框-剪结构的计算方法[J]. 建筑科学, 1997(4): 11-16.
[4] 赵西安. 高层建筑结构实用设计方法[M]. 3版. 上海: 同济大学出版社, 1998: 236-238.
[5] 王全凤, 王凌云, 刘强生. 含断层剪力墙的框架-剪力墙地震特性[J]. 华侨大学学报: 自然科学版, 1998, 20(4): 380-386.

A New Type of Element to Analyze Frame-Shear Wall Structures
——Storey Element

FANG De ping, WANG Quan-feng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: The storey element is established which can simulate one storey of the frame-shear wall structure. The internal forces and displacements of the frame-shear wall structures with the constant stiffness for various rigidity characteristics under various kinds of loads are calculated by beam elements method, storey elements method and analytical formulas. The internal forces and displacements of the frame-shear wall structures with the variable stiffness for various rigidity characteristics under uniformly distributed load are calculated by beam elements and storey elements. In comparison with beam elements methods, storey elements method can remarkably reduce the volume of input and output data and calculation, the error is less than 3.5%.

Keywords: frame-shear wall structure; storey element; beam element; D -value method; deformation compatibility

(责任编辑: 黄仲一)