

网格式框架的等效抗侧刚度分析

吴琴¹,张华刚^{1†},李富江³,张鑫¹,魏艳辉¹,马克俭^{1,2}

(1. 贵州大学 空间结构研究中心,贵州 贵阳 550003;2. 湖南大学 土木工程学院,湖南 长沙 410082;
3. 贵州建工监理咨询有限公司,贵州 贵阳 550081)

摘要:为了解网格式框架抵抗水平荷载作用的能力,基于 D 值法,假定轴力在结构横截面上呈线性分布,且考虑弯曲变形和剪切变形的影响,得到了在倒三角形分布荷载、均布荷载和顶点集中荷载等作用下结构的等效抗侧刚度公式,并用有限元法及试验做了对比.结果表明:结构侧移以剪切变形为主,但弯曲侧移的影响随结构高度的增加而增加,因此应考虑弯曲侧移对总侧移的影响;中柱的轴向变形对结构抗侧刚度及侧移的影响较小;与有限元法及试验结果的折算抗侧刚度相比,本文的等效抗侧刚度公式具有理想的计算精度,可用于预估结构的抗侧能力.

关键词:网格式框架;等效抗侧刚度;D 值法;有限元分析;试验研究

中图分类号:TU313.1

文献标志码:A

Analysis of Equivalent Lateral Resisting Stiffness for Grid Frame Structure

WU Qin¹,ZHANG Huagang^{1†},LI Fujiang³,ZHANG Xin¹,WEI Yanhui¹,MA Kejian^{1,2}

(1. Space Structures Research Center, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. Guizhou Construction Supervision & Consulting Co., Ltd, Guiyang 550081, China)

Abstract: In order to understand the resistance of grid frame structure under horizontal loads, based on D-value method, assuming that axial force is linearly distributed on structural cross section and considering the influence of bending and shear deformation, this study deduced the equivalent lateral resisting stiffness formula under inverted triangular load, uniformly distributed load and vertex concentrated load. The results were compared with that of finite element method and experiment. The results show that lateral displacement of this structure is given priority to shear deformation, and with the increase of structure height, the influence of bending displacement becomes larger, so that the effect of bending displacement on the total lateral displacement should be considered. The influence of axial deformation of middle column on structural lateral resisting stiffness and displacement is smaller. Compared with the calculated lateral stiffness by finite element method or test results, the equivalent lateral stiffness formula in this paper has reliable calculation accuracy, and can be used to estimate the capability of resisting lateral deformation.

Key words: grid frame structure; equivalent lateral stiffness; D-value method; finite element analysis; experimental study

* 收稿日期:2019-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51168008), National Natural Science Foundation of China(51168008)

作者简介:吴琴(1989—),女,湖北潜江人,贵州大学博士研究生

† 通讯联系人, E-mail: zhg0618@163.com

我国的磷矿资源较为丰富,对湿法生产磷酸后排放的磷石膏进行资源化利用,是综合治理磷石膏污染的有效途径.鉴于当前对磷石膏应用的领域主要集中在化工、建材、农业和矿山回填等这一现状^[1-2],马克俭等^[3]提出现浇磷石膏-混凝土网格式框架组合墙结构,可将磷石膏作为承重材料现浇应用于建筑结构中;张华刚、吴琴等^[4-5]系统测定了现浇磷石膏的抗压强度和本构关系,并在小高层结构中成功进行了组合墙的工程实践^[6];卢亚琴等^[7]开展了低周往复水平荷载作用下的缩尺模型试验,表明这种组合墙破坏时主要表现为剪切型破坏,这是因为网格式框架是在普通框架基础上增设了中间柱和层间梁,从而形成密柱密梁框架,并使框架和现浇磷石膏互为有效约束的缘故.姜忻良等^[8-9]对混凝土密排内框架-纤维石膏板组合墙所做的低周往复荷载试验表明,内框架仅在层高处设混凝土梁连接密排芯柱,因此结构破坏时密排芯柱表现为弯曲型破坏,结构的受力性能类似于带竖缝的剪力墙,可见设置层间梁将改变结构的受力性质.

现浇磷石膏具有高度脆性性质^[4],在将组合墙应用于高层建筑而现浇磷石膏又开裂后,混凝土网格式框架将成为结构的主要承重骨架^[7],而网格式框架的面外刚度又相对较弱.张华刚等^[10]对其开展了稳定承载力研究,获得了弹性临界力的解析解.在组合墙自身平面内,网格式框架的抗侧刚度将成为影响结构抗侧性能的关键因素,王其明等^[11]、刘阳等^[12]主要基于有限元分析,讨论了梁柱线刚度比值等因素对抗侧刚度的影响.上述研究工作对推动这种组合墙的工程应用是有益的.

水平荷载对高层建筑的影响往往起控制作用,设计时需经过多轮计算才能合理确定结构的承载力.在现浇磷石膏-混凝土网格式框架组合墙中,地震作用下现浇磷石膏可作为结构抵抗水平荷载的安全储备,因此有必要提供网格式框架抗侧刚度的等效计算公式,以便预估结构的抗侧能力,提高结构设计效率.本文基于 D 值法,综合考虑剪切变形和弯曲变形的影响来推导网格式框架的等效抗侧刚度,并采用有限元法和试验结果加以验证,以期结构的工程应用提供参考.

1 网格式框架的等效抗侧刚度

1.1 结构的剪切刚度

如图 1 所示,由 D 值法可得网格式框架第 j 列

第 i 行柱的抗侧刚度为^[13]:

$$D_{ij} = \alpha_{ij} \frac{12i_{cij}}{h_{ci}^2}. \quad (1)$$

式中: α_{ij} 为梁柱线刚度比值对柱剪切刚度的影响系数; h_{ci} 为结构第 i 行网格的高度; i_{cij} 为柱的线刚度.则结构第 i 行网格的抗侧刚度为:

$$D_i = \sum_{j=1}^{2n} D_{ij}. \quad (2)$$

式中: $2n$ 为结构的柱总数.水平荷载作用下结构第 i 行网格的侧移为:

$$\delta_i = V_i / D_i. \quad (3)$$

则其剪切变形为:

$$\gamma_i = V_i / (h_{ci} D_i). \quad (4)$$

式中: V_i 为结构第 i 行网格的总剪力.当 $\gamma_i = 1$ 时,可得其剪切刚度为:

$$C_{ki} = h_{ci} / D_i. \quad (5)$$

可见,当梁柱的线刚度改变时,网格式框架的剪切刚度随即会变,为简化计算,可采用加权平均值来表征其剪切刚度:

$$C_k = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^m C_{ki} / h_{ci}. \quad (6)$$

式中: H 为结构总高度; m 为结构的竖向网格数.

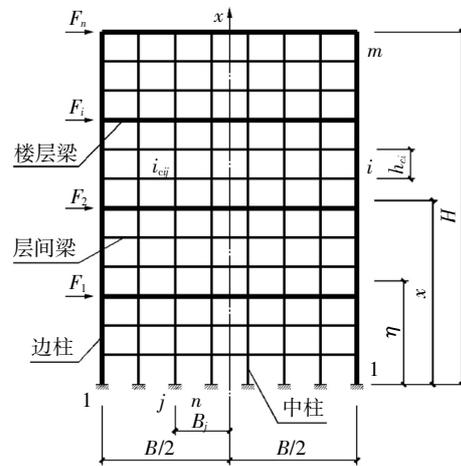


图 1 计算简图

Fig.1 Calculation diagram

1.2 结构的侧移计算

1.2.1 侧移计算原理

将结构整体看作悬臂立柱,则水平荷载引起的侧移将由弯曲侧移和剪切侧移叠加而成,其中弯曲侧移由柱的拉伸和压缩引起,剪切侧移由梁柱自身的弯曲变形引起,均可由虚功原理计算^[14].

在图 1 上从某行网格的柱中点截断结构后,水平荷载引起的结构总弯矩 $M(x)$ 将由柱轴力合成的

弯矩来平衡,如图2所示.假设柱的轴力在水平截面上按线性分布,则第 j 列柱的轴力 $N_j(x)$ 与边柱轴力 $N_b(x)$ 的关系见式(7).

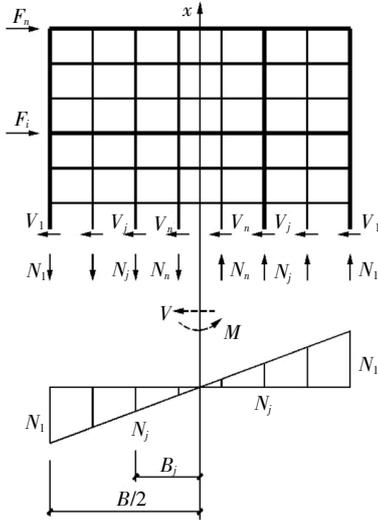


图2 结构内力平衡

Fig.2 Structural internal force balance

$$N_j(x) = 2B_j N_b(x)/B. \quad (7)$$

式中: B 为网格格式框架的宽度; B_j 为第 j 列柱与 x 轴的距离,则由力矩平衡关系可得边柱的轴力为:

$$N_b(x) = M(x)B/\left(4\sum_{j=1}^n B_j^2\right). \quad (8)$$

式中: n 为网格格式框架 $B/2$ 宽度内的柱数,因此结构的弯曲侧移可按式(9)计算.

$$y_M(x) = 2\int_0^x \frac{N_b(\eta)\bar{N}_{bl}(\eta)}{EA_b} d\eta. \quad (9)$$

式中: $N_b(\eta)$ 为结构在 η 高度处由荷载引起的边柱轴力; $\bar{N}_{bl}(\eta)$ 为在 x 高度处施加单位水平力后引起 η 高度处的边柱轴力; EA_b 为单侧边柱的轴向刚度,近似采用加权平均值表示:

$$EA_b = \frac{1}{H} \sum_{i=1}^m EA_w h_{ci}. \quad (10)$$

剪切变形引起的侧移按虚功原理为:

$$y_V(x) = \int_0^x \frac{V(\eta)\bar{v}_1(\eta)}{C_k} d\eta. \quad (11)$$

式中: $V(\eta)$ 为 η 高度处结构的总剪力; $\bar{v}_1(\eta)$ 为在 x 高度处施加单位水平集中力后引起的 η 高度处的结构总剪力.

叠加式(9)、式(11)得网格格式框架的总侧移为:

$$y(x) = y_M(x) + y_V(x). \quad (12)$$

1.2.2 结构侧移计算

1) 倒三角形分布荷载作用

在倒三角形分布荷载 q 作用下,由式(8)可得网格格式框架的边柱在任意高度 x 处的轴力为:

$$N_b(x) = \frac{BM_0}{4\sum_{j=1}^n B_j^2} \left[1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{x}{H} + \frac{1}{2} \left(\frac{x}{H} \right)^3 \right]. \quad (13)$$

其中 $M_0 = qH^2/3$,为倒三角形分布荷载作用下结构的柱脚总弯矩.在结构 x 高度处施加单位水平集中力后,边柱在结构高度 η 处的轴力为:

$$\bar{N}_{bl}(\eta) = B(x-\eta)/\left(4\sum_{j=1}^n B_j^2\right). \quad (14)$$

引入相对坐标 $\xi = x/H$ 后,由式(9)可得结构的弯曲侧移为:

$$y_M(x) = \frac{B^2 M_0 H^2}{16EA_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2} \left[\xi^2 - \frac{1}{2} \xi^3 + \frac{1}{20} \xi^5 \right]. \quad (15)$$

由式(11)可得结构的剪切侧移为:

$$y_V(x) = \frac{qH^2}{2C_k} \left[\xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right]. \quad (16)$$

当 $\xi = 1$ 时,由式(12)可得结构的顶点侧移为:

$$\Delta = \frac{M_0}{C_k} \left[1 + \frac{11B^2 H^2 C_k}{320EA_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2} \right]. \quad (17)$$

2) 顶点集中荷载作用

在顶点水平集中荷载 F 作用下,由式(8)可得结构边柱的轴力为:

$$N_b(x) = F(H-x)B/\left(4\sum_{j=1}^n B_j^2\right). \quad (18)$$

在高度 x 处施加单位水平集中力后,引起边柱在结构高度 η 处的轴力为:

$$\bar{N}_{bl}(\eta) = (x-\eta)B/\left(4\sum_{j=1}^n B_j^2\right). \quad (19)$$

则由式(9)和式(11)可分别得结构的弯曲侧移和剪切侧移为:

$$y_M(x) = \frac{M_0 B^2 H^2}{48EA_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2} (3\xi^2 - \xi^3); \quad (20)$$

$$y_V(x) = \frac{M_0}{C_k} \xi. \quad (21)$$

其中 $M_0 = FH$,为顶点集中力引起的柱脚总弯矩.同样由式(12)可得结构的顶点侧移为:

$$\Delta = \frac{M_0}{C_k} \left[1 + \frac{C_k B^2 H^2}{24EA_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2} \right]. \quad (22)$$

3)均布荷载作用

由式(8)可得到均布荷载 q 作用下结构边柱轴力为:

$$N_b(x) = q(H-x)^2 B / \left(8 \sum_{j=1}^n B_j^2 \right). \quad (23)$$

在结构高度 x 处施加的单位水平力引起结构高度 η 处的边柱轴力为:

$$\bar{N}_{bi}(\eta) = (x-\eta) B / \left(4 \sum_{j=1}^n B_j^2 \right). \quad (24)$$

因此由式(9)和式(11)分别得结构的弯曲侧移和剪切侧移为:

$$y_M(x) = \frac{M_0 B^2 H^2}{96 E A_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2} (6\xi^2 - 4\xi^3 + \xi^4); \quad (25)$$

$$y_V(x) = \frac{M_0}{C_k} (2\xi - \xi^2). \quad (26)$$

其中 $M_0 = qH^2/2$, 为均布荷载引起的结构柱脚总弯矩. 则由式(12)可得结构的顶点侧移为:

$$\Delta = \frac{M_0}{C_k} \left[1 + \frac{C_k B^2 H^2}{32 E A_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2} \right]. \quad (27)$$

1.3 结构的等效抗侧刚度

比拟荷载作用下悬臂梁的位移计算, 可由式(17)、式(22)和式(27)得到网格式框架的等效抗侧刚度, 并统一表述为:

$$EJ_k = \beta C_k H^2 (1 + \gamma). \quad (28)$$

式中: β 为计算系数, 倒三角形分布荷载作用时取为 1/3.64, 顶点集中荷载作用时取 1/3, 均布荷载作用时取 1/4; γ 为柱轴向变形的影响系数, 按以下公式计算.

1)倒三角形分布荷载作用

$$\gamma = \frac{11 B^2 H^2 C_k}{320 E A_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2}. \quad (29a)$$

2)顶点集中荷载作用

$$\gamma = \frac{B^2 H^2 C_k}{24 E A_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2}. \quad (29b)$$

3)均布荷载作用

$$\gamma = \frac{B^2 H^2 C_k}{32 E A_b \sum_{j=1}^n B_j^2 \sum_{j=1}^n B_j^2}. \quad (29c)$$

当不计中柱轴向变形对弯曲侧移的影响时, γ 可简化为:

1)倒三角形分布荷载作用

$$\gamma = \frac{11 H^2 C_k}{20 E A_b B^2}. \quad (30a)$$

2)顶点集中荷载作用

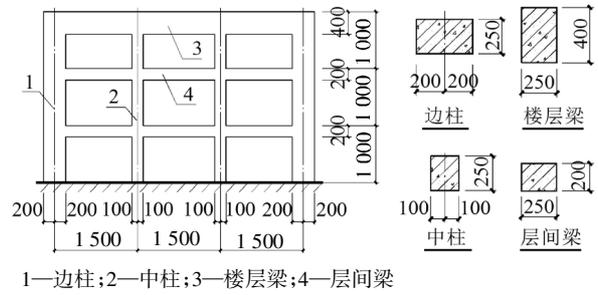
$$\gamma = \frac{2 H^2 C_k}{3 E A_b B^2}. \quad (30b)$$

3)均布荷载作用

$$\gamma = \frac{H^2 C_k}{2 E A_b B^2}. \quad (30c)$$

2 有限元验证

此处基于有限元基本原理来验证前述式(28)的计算精度. 算例情况如图 3 所示, 混凝土的强度等级为 C30.



1—边柱; 2—中柱; 3—楼层梁; 4—层间梁

(a)算例立面

(b)构件截面

图 3 算例简图

Fig.3 Example diagram

按前节理论, 由式(6)计算网格式框架加权剪切刚度的过程见表 1, 结构等效抗侧刚度及顶点位移的计算结果详见表 2, 其中弯曲侧移和剪切侧移分别按式(9)和式(11)计算. 结构顶点位移计算所用的荷载值分别为: 1)倒三角形分布荷载作用时, $q=225$ kN/m; 2)顶点集中力作用时, $F=100$ kN; 3)均布荷载作用时, $q=250$ kN/m.

有限元分析时, 由于楼层梁和层间梁的跨度较小而有可能成为深梁, 采用普通梁单元将不能估计梁的剪切变形影响, 故全部结构构件均采用了 8 节点弹性块体单元^[5], 柱脚节点均约束其三向线位移以模拟嵌固支承, 有限元模型如图 4 所示. 混凝土的弹性模量 $E_c = 3 \times 10^4$ N/mm², 泊松比 $\nu = 0.2$, 忽略钢筋的影响, 分别施加前述 3 种荷载进行计算, 顶点位移的结果详见表 2, 表中还给出了按顶点位移折算的结构抗侧刚度.

理论计算结果表明, 中柱的拉伸和压缩变形对结构等效抗侧刚度和顶点侧移的影响几乎可忽略. 在本算例的顶点总侧移中, 剪切侧移的占比在 98%

表 1 结构的加权剪切刚度计算

Tab.1 Weighted shearing stiffness calculation of the structure

网格	边柱		中柱		结构		
	影响系数 α	抗侧刚度 $D_{ij}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	影响系数 α	抗侧刚度 $D_{ij}/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	抗侧刚度 $D_i/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	剪切刚度 C_k/N	加权剪切刚度 C_k/N
底	0.28	134 400.0	0.55	33 000.0	334 800.0	334 800 000.0	
中	0.04	19 200.0	0.40	24 000.0	86 400.0	86 400 000.0	220 926 315.8
顶	0.16	75 789.5	0.75	45 000.0	241 579.0	241 579 000.0	

表 2 结构等效抗侧刚度及位移计算

Tab.2 Equivalent lateral stiffness and displacement calculation of the structure

水平荷载	中柱拉压变形	理论计算					有限元计算	
		影响系数 γ	等效抗侧刚度 $EJ_k/(10^{14} \text{ N}\cdot\text{mm}^2)$	顶点位移/mm			折算刚度 $EJ_k/(10^{14} \text{ N}\cdot\text{mm}^2)$	顶点位移/mm
				弯曲侧移 ΔM	剪切侧移 ΔV	总侧移 Δ		
倒三角形分布荷载	考虑	0.013 8	5.388	0.042		3.097		
	不计	0.018 0	5.366	0.055	3.055	3.110	5.704	2.929
顶点集中荷载	考虑	0.016 7	6.519	0.023		1.381		
	不计	0.021 8	6.486	0.030	1.358	1.388	7.151	1.259
均布荷载	考虑	0.012 5	4.909	0.064		5.156		
	不计	0.016 4	4.891	0.083	5.092	5.175	5.430	4.662

左右,因此结构在水平荷载作用下以剪切变形为主。与有限元结果相比,本算例在前述3种荷载作用下,理论计算的结构等效抗侧刚度约小于有限元计算结果折算抗侧刚度的5.0%~10.0%,倒三角形分布荷载的理论侧移值与有限元结果的误差均值为5.62%,均布荷载误差均值为9.745%,顶部集中荷载的误差均值为9.062%。可见式(28)的计算精度较为理想,且可不计中柱的拉伸和压缩变形对结构等效抗侧刚度的影响。

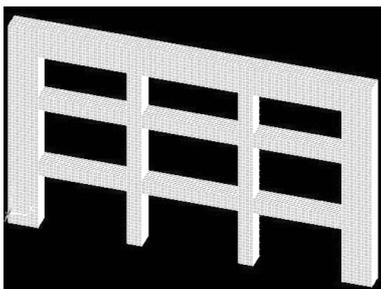


图 4 有限元模型

Fig.4 Finite element model

3 试验验证

3.1 试验概况

试验数据来源于现浇磷石膏-混凝土网格式框架组合墙低周往复荷载试验的对比结构,相关试验结果将另文介绍,此处以3榀网格式框架在混凝土开裂前的试验结果来验证等效抗侧刚度计算公式的精度。

试件情况如图5所示,试件编号为KJQ-1、KJQ-2、KJQ-3,结构厚度均为50 mm。混凝土的实测弹性模量为25 463 N/mm²,立方体抗压强度标准值为20.09 N/mm²。试验加载装置如图6所示,在试件顶部采用50 t的千斤顶施加有水平可滑动的竖向荷载,并保持恒定,水平荷载通过25 t的MTS作动器以位移控制、并往复施加在结构顶部的梁轴上。

图7所示为混凝土开裂前在水平荷载为1 kN时3个试件的楼层梁水平位移测试结果,图8所示

为试件在单调加载时的顶点荷载-位移曲线. 可见 3 个试件在相同水平荷载作用下的侧移结果较为接近, 且近似呈线性关系.

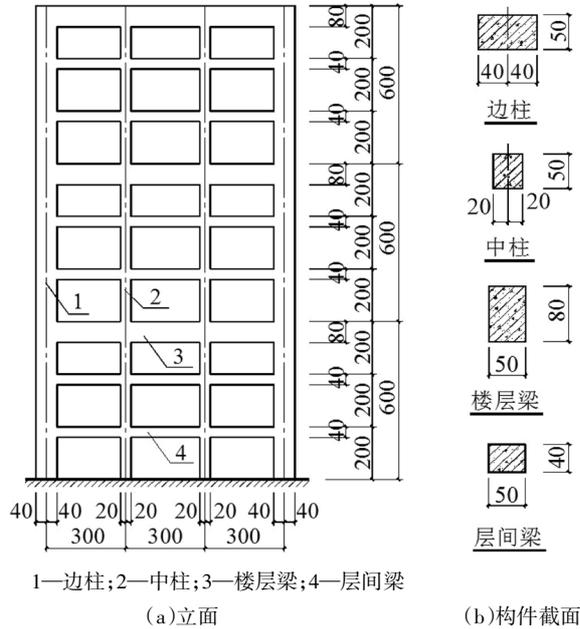


图 5 网格式框架试件
Fig.5 Grid frame structure specimen

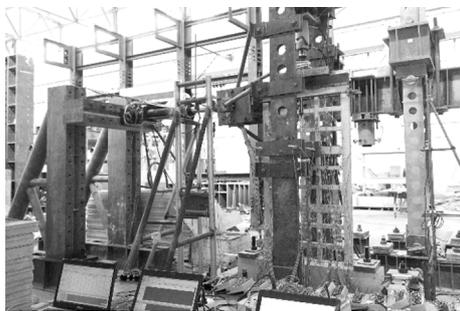


图 6 试验装置
Fig.6 Test equipment

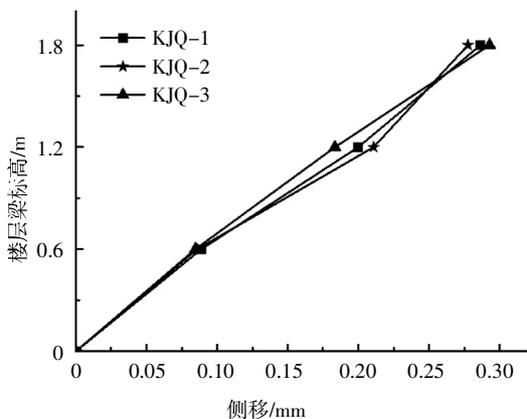


图 7 楼层梁水平位移测试结果
Fig.7 Horizontal displacement test results of floor beam

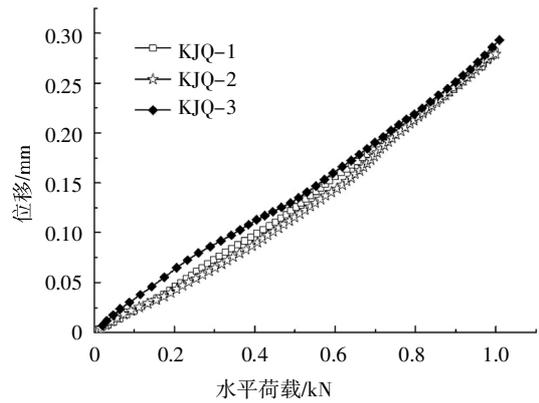


图 8 单调加载的荷载-位移曲线
Fig.8 Load-displacement curves of monotonic loading

3.2 计算结果验证

表 3 给出了有限元计算的位移结果及 3 个试件楼层梁位移的平均测试值, 测试结果与有限元计算结果较为接近.

根据前节分析, 不计中柱轴向变形对弯曲侧移的影响, 按式(20)和式(21)计算的理论侧移值与试验值相比, 最大侧移约大 10.5%; 当不计弯曲变形时, 最大侧移约小 10.6%. 理论侧移值与有限元计算的结果相比, 当考虑弯曲侧移时, 最大侧移约大 14.5%; 当不计弯曲侧移时, 最大侧移约小 14.8%, 这是与前节算例的不同之处, 因为从表 3 可看出, 结构高度的增加将使弯曲侧移在总侧移中的占比增大, 故结构侧移计算应考虑弯曲变形的影响.

表 3 结构侧移结果的验证

Tab.3 Verification of structural lateral displacement results

楼层梁标高 <i>h/m</i>	结构侧移 Δ/mm		
	理论值	试验值	有限元值
0.6	考虑弯曲侧移	0.095	0.086
	不计弯曲侧移	0.088	
1.2	考虑弯曲侧移	0.201	0.198
	不计弯曲侧移	0.177	
1.8	考虑弯曲侧移	0.312	0.286
	不计弯曲侧移	0.265	

不计中柱的拉伸和压缩变形影响, 按式(28)计算的等效抗侧刚度见表 4, 大体与有限元方法折算的抗侧刚度相当, 但与试件折算的平均抗侧刚度相比, 约小 8.6%, 可见式(28)具有理想的计算精度.

表4 结构等效抗侧刚度的验证

Tab.4 Verification of equivalent lateral stiffness of structure

等效抗侧刚度 /(10^{12} N·mm ²)	试验折算抗侧刚度 /(10^{12} N·mm ²)	有限元折算抗侧刚度 /(10^{12} N·mm ²)
6.232	6.820	6.255

4 结论

1) 本文等效抗侧刚度公式考虑了结构弯曲变形和剪切变形的影响,可用于预估结构抗侧能力。

2) 应用本文等效抗侧刚度计算公式时,网格式框架的侧移及等效抗侧刚度计算可不考虑中柱轴向变形的影响。

3) 与有限元法及试验结果的折算抗侧刚度相比,本文等效抗侧刚度具有理想的计算精度。

4) 在结构总侧移中,本文等效抗侧刚度计算的弯曲变形占比随着结构高度的增加而增加,结构侧移计算应考虑弯曲变形的影响。

参考文献

- [1] 刘虹利,张均,王永卿,等.磷矿固体废弃物资源化利用问题及建议[J].矿产综合利用,2017(1):6—11.
LIU H L,ZHANG J,WANG Y Q,*et al.* Problems and proposals of solid waste utilization of phosphate [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2017(1):6—11. (In Chinese)
- [2] TAHER M A. Influence of thermally treated phosphogypsum on the properties of Portland slag cement [J]. Resources, Conservation and Recycling,2007,52(1):28—38.
- [3] 马克俭,高国富,张华刚,等.节能与结构一体化新型钢筋混凝土结构体系[J].贵州工业大学学报(自然科学版),2008,37(4):34—43.
MA K J,GAO G F,ZHANG H G,*et al.* Energy-saving and structure integration of new reinforced concrete structure system [J]. Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition),2008,37(4):34—43. (In Chinese)
- [4] 张华刚,吴琴,贾晓飞,等.现浇磷石膏抗压强度的试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(3):127—134.
ZHANG H G,WU Q,JIA X F,*et al.* Experimental investigation on compressive strength of cast-in-situ phosphogypsum [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2016,43(3):127—134. (In Chinese)
- [5] 吴琴,张华刚,贾晓飞,等.现浇磷石膏应力-应变曲线试验研究[J].建筑结构学报,2015,36(5):150—157.
WU Q,ZHANG H G,JIA X F,*et al.* Experimental investigation of stress-strain curves of cast-in-situ phosphogypsum [J]. Journal of Building Structures,2015,36(5):150—157. (In Chinese)
- [6] 张华刚,梁凡凡,罗瑒,等.基于现浇磷石膏的节能与结构一体化新型墙体结构及其应用[J].贵州大学学报(自然科学版),2013,30(1):104—110.
ZHANG H G,LIANG F F,LUO Y,*et al.* Energy-saving and structure integration of new-type wall structure based on cast-in-situ phosphogypsum and its application [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences),2013,30(1):104—110. (In Chinese)
- [7] 卢亚琴,胡岚,马克俭,等.新型RC网格式框架结构墙体试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2013,40(4):8—14.
LU Y Q,HU L,MA K J,*et al.* Test research on the wall of new type RC grid frame structure [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences),2013,40(4):8—14. (In Chinese)
- [8] 姜忻良,刘康,谷岩,等.混凝土密排内框架-纤维石膏板低周往复试验研究[J].建筑结构学报,2004,25(4):50—54.
JIANG X L,LIU K,GU Y,*et al.* Experimental research on behavior of closely spaced concrete frames-fiber reinforced plasterboard under low cyclic loading [J]. Journal of Building Structures,2004,25(4):50—54. (In Chinese)
- [9] 姜忻良,辛磊方,姜南,等.具有保温功能的混凝土密柱石膏外墙板低周往复试验研究[J].工业建筑,2015,45(12):104—109.
JIANG X L,XIN L F,JIANG N,*et al.* Experimental research on heat-reservation fiber-plasterboard wall reinforced with in-filled RC columns under low cyclic loading [J]. Industrial Construction,2015,45(12):104—109. (In Chinese)
- [10] 张华刚,吴琴,宋玲玲,等.网格式框架的整体稳定分析[J].空间结构,2015,21(2):55—59.
ZHANG H G,WU Q,SONG L L,*et al.* Overall stability analysis of grid frame structure [J]. Spatial Structures,2015,21(2):55—59. (In Chinese)
- [11] 王其明,李晨,陈志华,等.钢筋混凝土网格式框架侧移刚度研究[J].建筑结构,2015,45(10):61—64.
WANG Q M,LI C,CHEN Z H,*et al.* Study on lateral stiffness of reinforced concrete grid frame [J]. Building Structure,2015,45(10):61—64. (In Chinese)
- [12] 刘阳,张华刚,吴琴,等.混凝土网格式框架抗侧性能影响因素分析[J].贵州大学学报(自然科学版),2016,33(2):102—105.
LIU Y,ZHANG H G,WU Q,*et al.* Influence factor analysis of the anti side performance of concrete frame structure [J]. Journal of Guizhou University (Natural Sciences),2016,33(2):102—105. (In Chinese)
- [13] 包世华,方鄂华.高层建筑结构设计[M].北京:清华大学出版社,1985:131—134.
BAO S H,FANG E H. High-rise building structure design [M]. Beijing: Tsinghua University Press,1985:131—134. (In Chinese)
- [14] 杨菲康,李家宝.结构力学:上册[M].北京:高等教育出版社,1983:138—143.
YANG F K,LI J B. Structural mechanics: I [M]. Beijing: Higher Education Press,1983:138—143. (In Chinese)
- [15] 朱伯芳.有限单元法原理与应用[M].3版.北京:中国水利水电出版社,2009:177—182.
ZHU B F. The finite element method theory and applications [M]. 3rd ed. Beijing: China Water Power Press,2009:177—182. (In Chinese)