

# 悬挂式楼梯参与框架结构整体空间受力的计算分析

孙传智<sup>1,2</sup>, 李爱群<sup>1,2</sup>, 缪长青<sup>1,2</sup>, 乔 燕<sup>3</sup>

(1 东南大学土木工程学院, 南京 210096; 2 东南大学混凝土及预应力混凝土结构教育部重点实验室, 南京 210096; 3 宿迁学院建筑工程系, 宿迁 223800)

[摘要] 《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010) 第 3.6.6 条规定在进行结构设计时, 应考虑楼梯构件的影响。其实质就是通过“抗”来减小地震对构件的影响。根据悬挂式结构受力特点, 提出一种新的楼梯受力体系, 并利用有限元软件采用时程分析法进行计算, 分析比较了普通楼梯和悬挂式楼梯对框架结构整体空间受力的影响。研究表明, 悬挂式楼梯框架结构的周期与振型相比较普通楼梯框架结构有明显改善, 能够明显降低楼梯梁、楼梯板及楼梯间附近框架柱的受力, 保证结构构件在地震作用下的安全。

[关键词] 悬挂式楼梯; 框架结构; 空间受力; 动力特性

中图分类号: TU375.4 文献标识码: A 文章编号: 1002-848X(2013)01-0041-03

## Calculation and analysis on the space force of frame structure with suspended stairs

Sun Chuazhi<sup>1,2</sup>, Li Aiqun<sup>1,2</sup>, Miao Changqing<sup>1,2</sup>, Qiao Yan<sup>3</sup>

(1 College of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2 Key Laboratory for Concrete and Prestressed Concrete Structures of Education Ministry, Southeast University, Nanjing 210096, China; 3 Department of Architecture Engineering, Suqian College, Suqian 223800, China)

**Abstract:** Provision 3.6.6 in *Code for seismic design of buildings* (GB 50011—2010) stipulates that the stair should be considered during the structural design. The essence of this provision is to reduce the impact of earthquakes on structures through the method of “resistance”. A new force system of the structure with suspended stairs was proposed based on characteristics force of suspended structure and the finite element method was used to analyze the overall force impact of frame structure with common stairs and suspended stairs using the method of time history analysis. The results show that suspended stairs can significantly improve the period and mode of frame structure compared with the case of common stairs, and significantly reduce the force of stair beams, stair slabs and columns near staircases. The above can ensure the safety of structure under earthquake.

**Keywords:** suspended stairs; frame structure; space force; dynamic characteristics

## 0 引言

2008年5月12日14时28分,我国四川省汶川县发生了里氏8.0级特大地震,从5.12汶川特大地震中房屋建筑所受到的破坏来看,承担逃生角色的楼梯,无论是板式还是梁式的,均没有在自然灾害中发挥其所应有的功能。国内学者对汶川大地震的楼梯破坏进行了大量的研究<sup>[1-5]</sup>,大量震害表明:楼梯往往于主体结构破坏前产生种种严重破坏,影响应急使用。而且在有些主体结构基本完整的情况下,楼梯结构也遭到了严重的破坏,这同样没有达到设计时所赋予的要求。

对于楼梯对框架结构受力的影响,国内学者利用有限元软件分析研究了地震作用下楼梯对于框架结构整体性能和受力性能的影响<sup>[6-10]</sup>,对楼梯进行了空间受力分析,研究表明楼梯对钢筋混凝土框架结构整体受力性能和楼梯间附近的构件影响很大。针对楼梯间对框架结构受力的影响,《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)第3.6.6条规定在进行

结构设计时,应考虑楼梯构件的影响。其实质就是通过“抗”来减小地震对结构的影响,理论上是可以保证结构安全的,但是从结构整体受力角度来看,将增大构件截面尺寸和配筋面积,而构件截面尺寸增大又导致楼梯间的局部刚度增大,从而使得构件在水平地震作用下分配到更大的地震力。

1938年Williams提出了用悬挂原理建筑超高层的想法。20世纪50年代后期,国外悬挂建筑结构开始进入实用阶段<sup>[11]</sup>。20世纪70年代开始,国内学者对悬挂结构的静力行为和动力行为进行了广泛研究<sup>[12-44]</sup>,研究表明悬挂式结构能够满足建筑功能要求,并能够减小地震荷载及风荷载作用。本文首先提出了一种悬挂式楼梯结构系统,在此基础上进一步对工程算例进行了悬挂式楼梯参与结构空间受力的计算分析,为这种楼梯结构体系的工程应用奠定了理论基础。

作者简介:孙传智,博士研究生,讲师,Email: schzh\_xzh@163.com。

### 1 悬挂式楼梯结构方案

由于钢筋混凝土楼梯的斜撑效应,使得结构抗侧移刚度增加,减小了结构自振周期,地震作用增大。已有的研究表明<sup>[6-10]</sup>,在地震作用下普通楼梯结构传力体系为:楼板实际的受力状态为拉弯或压弯,楼梯柱除承受弯矩外,还将承担双向弯矩和剪力的作用,梯柱可能形成短柱效应,因此其在地震作用下更容易发生脆性破坏;楼梯梁成为弯剪扭构件,容易发生扭剪脆性破坏。汶川地震时的破坏情况也验证了上述问题的存在。

如何避免由于楼梯间受力体系复杂而引起的结构破坏,需要将问题转化为如何削弱楼梯的斜撑作用。图1为悬挂式楼梯结构方案,在此方案中吊杆固定于上层横向框架梁处,取消楼梯休息平台板处在纵向框架梁处的楼梯梁,从而使得普通楼梯在框架柱处引起的短柱效应不出现,同时休息平台不设置楼梯柱,楼梯板在楼面位置处采用一定的构造措施与主体结构铰接,如图1(b)所示。

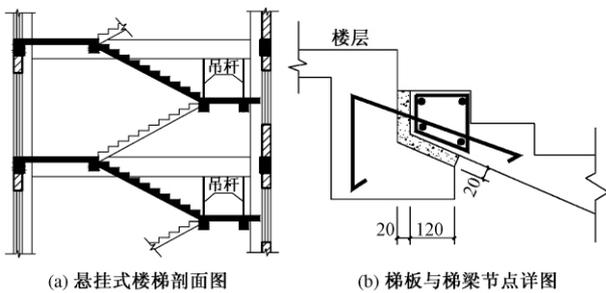


图1 悬挂式楼梯设计方案

### 2 工程算例

算例平面尺寸如图2所示,该工程共5层,楼梯间布置在建筑物的端部,框架柱的尺寸为600mm×600mm,横向框架梁的尺寸为250mm×600mm,纵向框架梁的尺寸为250mm×400mm,休息平台梁的尺寸为250mm×350mm,楼板厚度为120mm,楼梯板厚度为200mm,吊杆截面面积为544mm<sup>2</sup>,吊杆初始

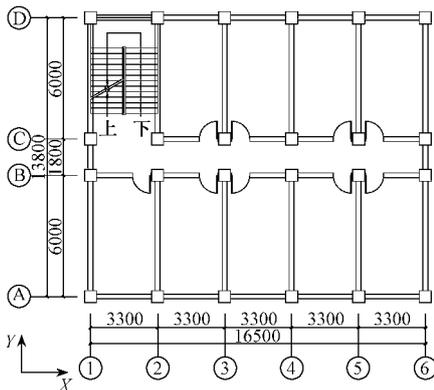


图2 平面布置图

内力为恒荷载+0.5活荷载作用下吊杆产生的内力。梁、柱混凝土强度等级均为C35。抗震设防烈度为8度(0.3g),设计地震分组为第一组,场地类别为Ⅲ类。楼面恒荷载为5.0kN/m<sup>2</sup>(含板自重),活荷载为2.0kN/m<sup>2</sup>;楼梯间恒、活荷载分别为7.5kN/m<sup>2</sup>和3.5kN/m<sup>2</sup>;楼面梁间填充墙荷载:外纵墙采用8.5kN/m,山墙和内墙均采用11.0kN/m;屋面恒荷载为6.0kN/m<sup>2</sup>,活荷载为2kN/m<sup>2</sup>,屋面外围框架梁上线荷载为3.0kN/m。采用有限元分析软件MIDAS/Gen进行分析,梁和柱采用空间杆单元,楼板采用板单元。

### 3 悬挂式楼梯参与框架结构整体空间受力的分析

从普通楼梯和悬挂式楼梯对整体结构的振型、周期、层间最大剪力和节点位移等方面的影响进行比较分析,研究悬挂式楼梯对框架结构整体空间受力的影响。

#### 3.1 振型及周期的比较

通过对无楼梯框架结构、普通楼梯框架结构和悬挂式楼梯框架结构计算模型的振型及周期分析对比(表1)可以看出,计入与不计入楼梯,对框架结构有较大的地震作用效应差异。与普通楼梯框架结构的第1阶周期相比,无楼梯框架结构的第1阶周期提高6.36%,悬挂式楼梯的第1阶周期提高2.02%。普通楼梯的存在影响了结构的抗侧刚度,而悬挂式楼梯介于其他两种模型之间。无楼梯时,第1阶振型为X向平动,第2阶振型为Y向平动,第3阶振型为扭转;普通楼梯时结构第1~3阶扭振质量参与系数分别为21.82%,12.89%,46.15%;而悬挂式楼梯时结构第1~3阶扭振质量参与系数分别为10.45%,2.83%,68.12%。从以上数据可以看出,与普通楼梯相比较,悬挂式楼梯第1阶振型的扭转质量参与系数降低11.37%,第2阶振型的扭转质量参与系数降低10.06%,扭转效应明显降低。

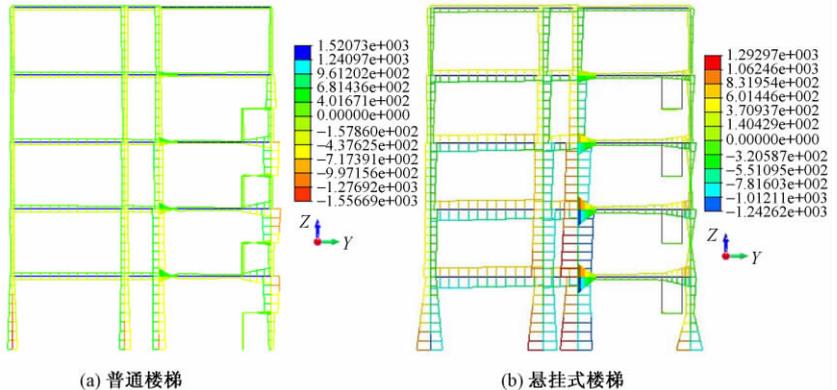


图3 楼梯边框架弯矩示意图/kN·m

各模型前 6 阶周期 /s 表 1

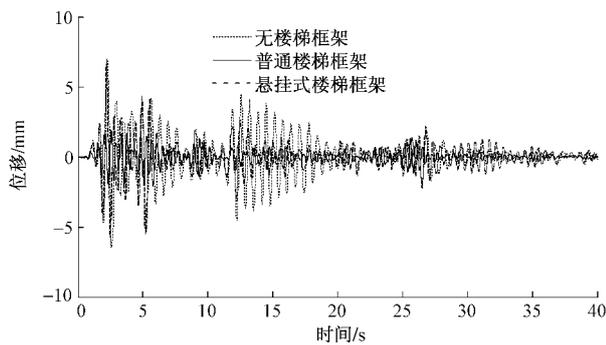
框架结构	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶	第 6 阶
无楼梯	0.666 821	0.646 081	0.597 130	0.204 038	0.201 806	0.186 277
普通楼梯	0.626 927	0.576 814	0.388 277	0.195 548	0.184 896	0.143 458
悬挂式楼梯	0.639 600	0.620 743	0.544 514	0.198 940	0.196 576	0.177 403

3.2 弹性时程分析结果分析

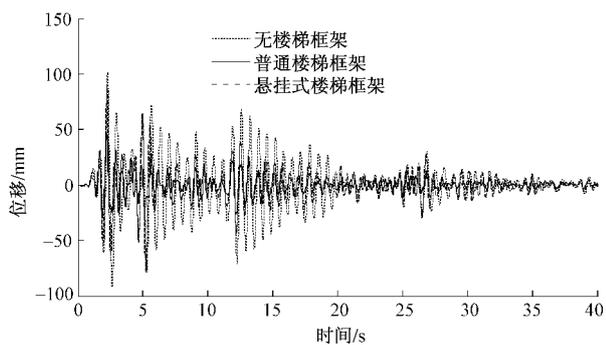
线性时程分析采用振型叠加和增量法相结合的方法,所有振型阻尼均取为 0.05,选取 El Centro 波,其加速度峰值为  $550\text{mm/s}^2$ ,取时间间隔 0.01s,持续时间 40s。

图 3(a) 为普通楼梯框架结构中靠近楼梯的边框架在地震荷载作用下的弯矩图,图 3(b) 为悬挂式楼梯框架结构中靠近楼梯的边框架在地震荷载作用下的弯矩图,从中可以看出,由于休息平台梁和柱的存在使得结构受力复杂,特别是和其相交的框架柱受力明显变大,悬挂式楼梯框架结构底层柱中间最大弯矩近似为零,而普通楼梯框架结构底层柱中间最大弯矩近似为  $873.2\text{kN}\cdot\text{m}$ ,两框架结构相应位置处的剪力分别为  $379.3\text{kN}$  和  $842.3\text{kN}$ 。

各种楼梯形式的框架结构底层 145 号节点(底层楼梯平台位置楼梯梁处柱子节点,即轴 ① 与轴 ④ 的交点)时程位移曲线如图 4(a) 所示,从图中可以看出,当采用悬挂式楼梯时,节点位移时程最大值与无楼梯的最大值基本吻合,此处框架柱刚度相比普通楼梯框架柱刚度明显变小。顶层 139 号节点(轴 ① 与轴 ④ 的交点)位移时程曲线如图 4(b) 所示。



(a) 145号节点



(b) 139号节点

图 4 节点横向位移时程曲线

表 2 为无楼梯、普通楼梯和悬挂式楼梯框架结构的层间最大剪力,从表中可以看出,虽然两种楼梯方式都对地震力有放大作用,但是程度却有所不同,由于悬挂式楼梯减弱了地震放大效果,悬挂式楼梯底层层间剪力比普通楼梯底层层间剪力减小了  $205.9\text{kN}$ ,而上部两层的层间剪力反而较普通楼梯的大。

图 5 为悬挂式楼梯和普通楼梯板底在地震荷载作用下的应力图。普通楼梯板底最大应力已远远超过了混凝土抗拉强度,极易导致混凝土楼梯板拉断破坏。而悬挂式楼梯板底最大应力较小,且在楼梯板交缝处应力值也大大减小,应力集中现象明显降低。从而看出悬挂式楼梯可以使楼梯板在地震荷载作用下受力明显减小,避免楼梯板在地震荷载作用下的破坏。

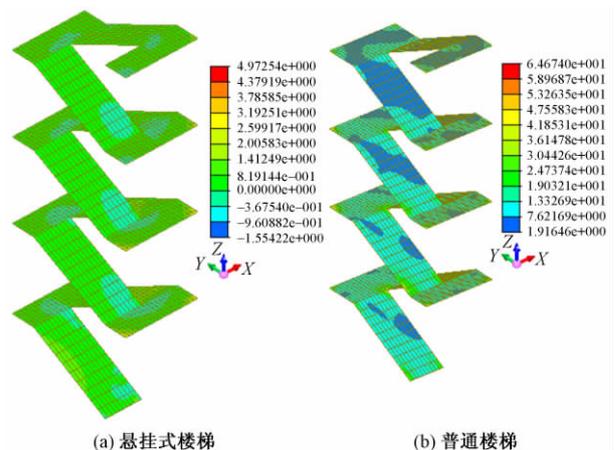


图 5 楼梯板底应力图 /N/mm<sup>2</sup>

各模型层间最大剪力 表 2

楼层	无楼梯层间剪力 $V_1/\text{kN}$	普通楼梯层间剪力 $V_2/\text{kN}$	悬挂式楼梯层间剪力 $V_3/\text{kN}$	$\frac{V_2 - V_1}{V_1}/\%$	$\frac{V_3 - V_1}{V_1}/\%$
1	9 082.5	10 837.1	10 631.2	19.3	17.1
2	9 191.1	10 484.5	10 314.2	14.1	12.2
3	8 447.3	9 212.3	9 193.3	9.1	8.8
4	6 441.2	6 748.3	6 771.1	4.8	5.1
5	3 466.9	3 539.4	3 577.2	2.1	3.2

4 结论

(1) 悬挂式楼梯框架结构的动态特性介于无楼梯框架结构和普通楼梯框架结构之间。相比普通楼梯框架结构,悬挂式楼梯框架结构的周期与振型有明显改善,扭转质量参与系数降低较多,扭转效应明显降低。

(2) 悬挂式楼梯能够削弱普通楼梯的斜撑作用,楼梯梁、楼梯板及楼梯间附近框架柱的受力明显降低,能够保证结构构件在地震作用下的安全,避免这些构件在地震作用下的破坏。

(下转第 53 页)

箍筋配置;对于不等肢 Z 形柱,两肢长比及腹板高也有一定的影响,随着两肢长比的增大,其截面曲率延性下降,随腹板的增大,截面曲率延性提高,为了保证截面具有足够的延性,建议 Z 形柱腹板的净高 ( $h-2b$ ) 不宜小于 200mm。

(2) 对于等肢 Z 形柱,当轴压比不大于 0.3 时,单向加载时延性最好的弯矩作用方向角为  $112.5^\circ$ ,最差角为  $135^\circ$ ;对于不等肢 Z 形柱,随着两肢长比及腹板高的变化,延性最好和最差的弯矩作用方向角是变化的;当轴压比大于 0.3 时,弯矩作用方向角对 Z 形柱截面曲率延性影响较小。

(3) 一般情况下,增大纵筋直径,可使 Z 形柱延性有所提高,但纵筋对其延性的影响是跟箍筋的横向约束共同产生影响。因此选用纵筋直径的同时需合理考虑箍筋间距。

(4) 随着混凝土强度等级的提高, Z 形柱截面延性下降,但随着轴压比的增大,混凝土强度等级影响很小,基本可以忽略其影响。混凝土强度对 Z 形柱延性的影响主要反映于轴压比的变化之中,在相同的轴压比下,其对柱截面延性的影响很小。

(5) 箍筋对 Z 形柱延性的影响主要是体现在对混凝土的横向约束能力和对受压纵筋压曲失稳应变;经分析,当体积配箍率  $\rho_v$  相同时,采用较小的箍筋直径  $d_v$  及箍筋间距  $s$  比采用较大箍筋直径  $d_v$  及箍筋间距  $s$  得到的柱截面延性好;不同箍筋间距  $s$  和箍筋直径  $d_v$  时,只有合理地确定箍筋间距  $s$  与纵筋直径  $d$  的比值,增大体积配箍率  $\rho_v$  才能达到提高 Z 形柱截面延性的目的。

(6) 通过电算回归分析得到 Z 形柱各抗震等级下轴压比限值和箍筋加密区的最小配箍特征值的要求(表 3 A)。

#### 参 考 文 献

- [1] 王依群,许贻懂,陈云霞. 钢筋混凝土异形柱的轴压比限值与配箍构造[J]. 天津大学学报, 2006, 39(3): 295-300.
- [2] 徐海燕,薛海宏,袁志华. Z 形截面柱正截面承载力的试验与分析[J]. 华东交通大学学报, 2004, 21(1): 8-12.
- [3] PARK R, NIGEL PMMJ, WAYNE D G. Ductility of square-confined concrete columns [J]. Journal of the Structural Division, ASCE, 1982, 108(ST4): 929-950.
- [4] 高云海. 钢筋混凝土 T 形截面双向压弯构件正截面强度、延性的试验及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 1993.
- [5] 刘超. 钢筋混凝土 L 形截面双向压弯构件正截面强度、延性的试验及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 1994.
- [6] 何培玲. 钢筋混凝土十字形截面双向压弯构件正截面承载力、延性的试验及理论研究[D]. 天津: 天津大学, 1996.
- [7] 许贻懂,赵艳静,陈云霞,等. 不等肢异形柱延性性能及轴压比限值[C]//全国混凝土异形柱结构学术研讨会论文集, 2006: 32-41.
- [8] 赵艳静,陈云霞,王玲勇. 钢筋混凝土异形截面双向压弯柱延性性能的理论研究[J]. 建筑结构, 1999, 29(1): 2-7.
- [9] 赵艳静,陈云霞,于顺泉. 钢筋混凝土异形截面框架柱轴压比限值的研究[J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 600-604.
- [10] 建议[J]. 建筑结构, 2005, 35(11): 31-32.
- [8] 代红军,祁皓. 考虑楼梯影响的钢筋混凝土框架结构地震反应分析[J]. 福州大学学报, 2010, 38(2): 259-265.
- [9] 何世龙,宋吉荣. 钢筋混凝土框架结构中板式楼梯梯段板抗震分析及其设计对策[J]. 四川大学学报: 工学版, 2010, 42(S1): 177-182.
- [10] 冯远,吴小宾,李从春,等. 现浇楼梯对框架结构的抗震影响分析与设计建议[J]. 土木工程学报, 2010, 43(10): 53-62.
- [11] 刘郁馨,吕志涛,袁发顺. 多高层砼悬挂建筑结构体系及受力性质[J]. 工程力学, 1996(增刊): 542-546.
- [12] 涂文戈,邵银生. 悬挂结构动力特性的时频分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2006, 23(1): 78-84.
- [13] 曹万林,卢智成,张建伟,等. 核心筒部分悬挂结构振动台试验及分析[J]. 土木工程学报, 2007, 40(3): 40-44.
- [14] 王春林,吕志涛,涂永明. 半柔性悬挂结构体系的风振响应参数优化及阻尼控制[J]. 土木工程学报, 2009, 42(3): 1-7.

(上接第 43 页)

#### 参 考 文 献

- [1] 苏启旺,蔡宏儒,李力. 从“汶川大地震”引发对板式楼梯设计的思考[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(4): 165-167.
- [2] 王亚勇. 汶川地震建筑震害启示——抗震概念设计[J]. 建筑结构学报, 2008, 29(4): 20-25.
- [3] 霍林生,李宏男,肖诗云,等. 汶川地震钢筋混凝土框架结构震害调查与启示[J]. 大连理工大学学报, 2009, 49(5): 718-723.
- [4] 全学友,米伟,张智强. 汶川地震中楼梯结构的破坏现象及对策[J]. 建筑结构, 2009, 39(11): 75-77.
- [5] 沈靓,柳炳康,张瑜中,等. 汶川地震中框架楼梯典型震害分析与有限元计算[J]. 工程抗震与加固改造, 2010, 32(4): 114-119.
- [6] 王奇,马宝民. 钢筋混凝土现浇楼梯对整体结构的影响[J]. 建筑结构, 2002, 32(4): 27-29.
- [7] 胡庆昌. 钢筋混凝土结构楼梯间与楼梯的震害及设计