

钢筋混凝土框架结构与楼梯构件协同 抗震性能研究

李碧雄,吴德民,王旋

(四川大学建筑与环境学院,四川成都610065)

摘要 目的 研究地震中楼梯构件的存在及其布设位置对钢筋混凝土框架结构整体抗震性能、楼梯间周边主体结构构件及楼梯构件自身的受力状态的影响. 提出减小楼梯间对框架结构不利影响的设计方法. 并对其进行评估. 方法 通过 MIDAS/GEN 有限元分析软件进行静力 Pushover 分析和动力弹塑性时程分析,并与实际震害现象进行了对比. 结果 楼梯构件能增大结构的抗侧刚度和结构的扭转效应;楼梯间周围主体结构梁柱内力受楼梯构件的影响较大;楼梯构件及与之相连的框架梁柱较早地出现塑性铰;楼梯间布设在结构中部对结构抗震性能影响最大. 结论 楼梯间对框架结构的刚度分布、框架构件的内力分布有较大的影响,采用滑动支座弱化楼梯间和主体框架结构的连接,能明显减小楼梯构件对框架结构的不利影响.

关键词 楼梯间;抗震性能;框架结构;塑性铰;有限元分析;时程分析

中图分类号 TU375.4

文献标志码 A

The Anti-seismic Performance of Reinforced Concrete Frame Structure Combined with Stairs

LI Bixiong, WU Demin, WANG Xuan

(College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu, China, 610065)

Abstract: In order to study the impact of the presence of stair components and its placement on the overall seismic performance of the reinforced concrete frame structure, and on the stress state of the surrounding main structural members and the stair components themselves, the design method is proposed to reduce the adverse effect of the staircase on the frame structure and evaluated. Static Pushover analysis and dynamic elastoplastic time history analysis were carried out by MIDAS/GEN finite element analysis software and its results with the actual earthquake damage was compared. It shows that the stair component can increase the lateral stiffness and the torsional effect of the structure, the internal force of the main structure girders and columns around the staircase is greatly affected by the stair components, the stair components and the frame beams and columns

收稿日期:2018-12-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC1508802);国家自然科学基金项目(51678379);四川省学术带头人培养基金(川人社办发[2016]183-2)

作者简介:李碧雄(1970—),女,教授,主要从事结构抗震和固体废物资源化利用方面研究.

connected with them appear plastic hinge earlier comparing with other frame structure components. The arrangement of stairwells in the middle of the structure has the greatest impact on the seismic performance of the structure. The stairwells has a great influence on the stiffness distribution and internal force distribution of the frame structure. The use of slipping-foot, to weaken the connection between the stairwell and the frame structure, can obviously reduce the adverse influence of the stair components on the frame structure.

Key words: stairwell; anti-seismic performance; frame structure; plastic hinge; finite element analysis; time-procedure analysis

在建筑物遭受破坏时,楼梯间是人员疏散逃生的重要通道。在汶川地震、青海玉树地震及雅安芦山地震中,钢筋混凝土框架结构房屋的楼梯间及其周边主体结构构件的震害特别严重,引起了业界的广泛关注。实际震害现象表明^[1-3],楼梯间周边构件破坏相较于建筑物其他部位更为严重,楼梯构件的震害形式多种多样。2008年汶川地震后修订的《建筑抗震设计规范》(GB 50011—2010)提出了新的规定,即“计算模型的建立、必要的简化计算与处理,应符合结构的实际工作状况,计算中应考虑楼梯构件的影响”,但是具体如何考虑,规范中并未给出明确方法。汶川地震前,国内外对楼梯间的抗震问题关注较少。曹万林等^[4]开展过楼梯间的小结构缩尺实验。汶川地震后对楼梯间的研究逐渐增多。代红军等^[5]研究了楼梯构件与框架梁柱的连接情况对整体抗震性能的影响;张翠强等^[6]、张耀庭等^[7]对楼梯间位置对整体框架结构的抗震影响进行了研究;冯远等^[8]分析了楼梯间对不同开间、不同跨数的框架结构抗震性能的影响;刘家欢等^[9]就楼梯间对平面不规则框架结构抗震影响进行了研究。马进等^[10]进行了带楼梯构件的钢筋混凝土框架结构的单向推覆试验,以研究水平地震荷载作用下钢筋混凝土框架结构与楼梯构件的协同受力变形破坏过程,研究表明,楼梯构件对整体结构侧向刚度贡献很大,且导致明显的扭转效应,平台梁和梯板受力复杂。为了深入探讨地震中楼梯构件的存在对钢筋混凝土框架结构整体抗震性能、对楼梯间周边主体

结构构件及楼梯构件自身的受力状态的影响,笔者考虑设置楼梯间和不设置楼梯间两种情况,采用 MIDAS/GEN 有限元分析软件,从模态分析、弹塑性时程分析和静力弹塑性(Pushover)分析等3种途径进行对比研究。同时,提出减少楼梯构件与框架结构相互作用的方法,为规范中明确楼梯间的分析、设计方法提供参考。

1 结构模型的建立

为研究楼梯间对框架结构抗震性能的影响,设计了一栋4层现浇钢筋混凝土框架结构。混凝土的强度等级为C20,开间方向(X 方向)柱距为4.5 m,共10跨总长度为45 m。 Y 方向为3跨,总长度为14.4 m,各层的层高均为3.6 m,结构的平面图如图1所示。沿 X 方向框架梁的截面尺寸为250 mm × 500 mm,沿 Y 方向框架梁长跨为250 mm × 600 mm、短跨为250 mm × 400 mm,框架柱的截面尺寸为400 mm × 400 mm,梯梁的截面尺寸为200 mm × 400 mm,梯柱的截面尺寸为250 mm × 250 mm。抗震设防烈度为7度(0.1 g),设计的地震分组为第一组,场地类别为II类,基本风压0.45 kPa,场地的粗糙类别为B类,抗震等级为三级。模型中未考虑填充墙的作用。

为了对比研究设置楼梯间和不设置楼梯间整体框架结构在地震作用下的反应,分别建立了带楼梯间和不带楼梯间两个模型(见图2)。楼梯类型为双跑板式,框架梁、柱用杆单元模拟,梯板和楼板用壳单元来模拟。笔者

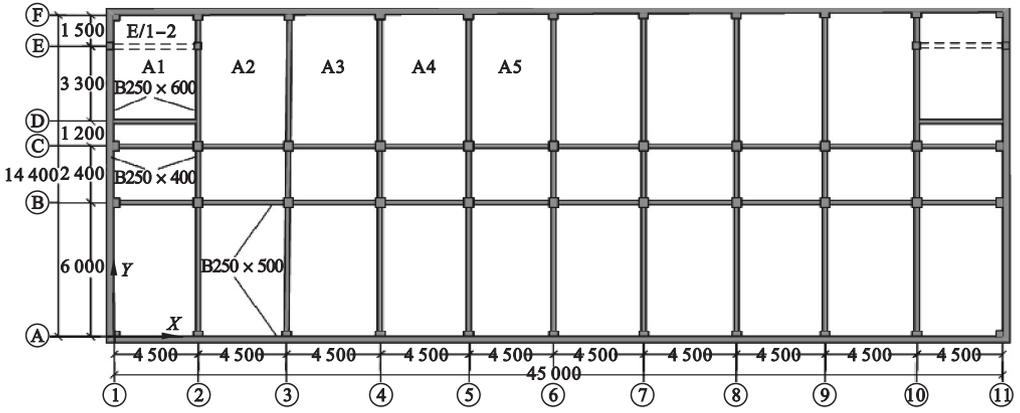
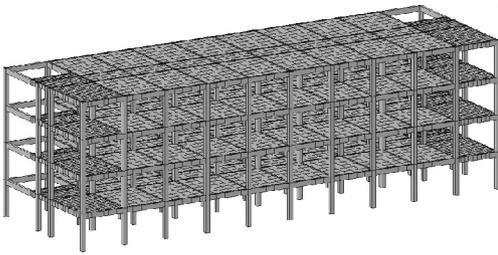


图1 框架结构平面图

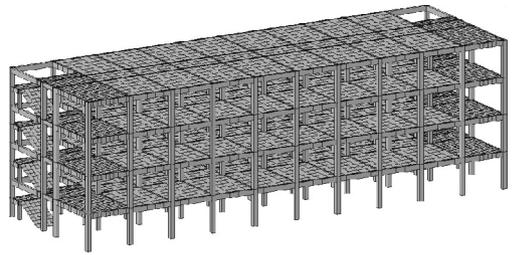
Fig. 1 The plan of the frame structure

研究了模型的振动模态,并在此基础上进行了弹塑性静力 Pushover 分析和动力时程分析,Pushover 分析采用模态加载方式,动力时程分析选用 EI Centro 地震波, Traft 地震波和 Hollywood 地震波.为了反映构件在弹塑性阶段的塑性性能定义了塑性铰,梁单元定义 MM 铰,柱定义 PMM 铰.铰的状态与构件的受损状态的对应关系如图 3 所示.①当构

件的铰处于 AB 段时,结构构件处在弹性阶段,无损伤;②构件铰状态处于 B-IO 阶段,构件的塑性发展程度较弱,构件出现轻微的损伤;③当构件铰状态处于 IO-LS 阶段时,构件进入屈服阶段,构件裂缝明显出现,为中等破坏;④构件铰状态处于 LS-CP 和 CP-C 阶段,构件处于严重破坏状态但不发生局部倒塌.



(a) 无楼梯间框架结构三维模型图



(b) 有楼梯间框架结构的三维模型图

图2 框架结构三维模型图

Fig. 2 Three dimensional model diagrams of the frame structure

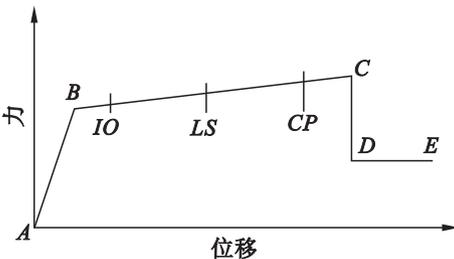


图3 构件特性曲线

Fig. 3 The characteristic curve of member
混凝土和钢筋采用纤维本构模型^[11].混凝土本构关系为

$$\sigma_c = \begin{cases} Kf'_c \left[2\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2 \right], & \varepsilon \leq \varepsilon_0; \\ Kf'_c [1 - Z(\varepsilon - \varepsilon_0)] \geq 0.2Kf'_c, & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u. \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε 为混凝土纤维的应变; σ_c 为混凝土纤维的应力; f'_c 为混凝土棱柱体抗压强度,MPa; K 为横向约束引起的刚度增大率, $K = 1 + \frac{\rho_s f_{yk}}{f'_c}$,其中 f_{yk} 为箍筋屈服强度,MPa; ε_0 为最大应力对应的应变,取 $\varepsilon_0 = 0.002 K$; ρ_s 为体积配筋率; Z 为应变软化的坡度,

$$Z = \frac{0.5}{\frac{3 + 0.29f'_c}{145f'_c - 1000} + 0.75\rho_s \sqrt{\frac{h'}{S_n}} - 0.002K}$$

h' 为从箍筋外边缘算起的核心混凝土宽度;
 S_n 为箍筋间距; ε_u 为极限应变,取 $\varepsilon_u = 0.004 + 0.9\rho_s \left(\frac{f_{yk}}{300}\right)$.

钢筋本构关系为

$$\hat{\sigma} = b\hat{\varepsilon} + \frac{(1-b)\hat{\varepsilon}}{(1+\hat{\varepsilon}^R)^{1/R}} \quad (2)$$

式中: $\hat{\varepsilon} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_r}{\varepsilon_0 - \varepsilon_r}$, $\hat{\sigma} = \frac{\sigma - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$, $R = R_0 - \frac{a_1\xi}{a_2 + \xi}$;
 $\hat{\varepsilon}$ 为钢纤维的应变; $\hat{\sigma}$ 为钢纤维的应力; $(\varepsilon_r, \sigma_r)$ 为卸载点,在初始弹性状态时假设为(0, 0); $(\varepsilon_0, \sigma_0)$ 为定义当前加载或卸载路径的两个渐进线的交点; b 为钢筋硬化段与弹性阶段的斜率比值,取 $b = 0.01$; R_0, a_1, a_2 为常数,取 $R_0 = 20, a_1 = 18.5, a_2 = 0.15$; ξ 为加载或卸载方向上的最大应变与 ε_0 的差值.

2 计算结果及分析

2.1 楼梯间对框架结构整体影响

2.1.1 楼梯间对框架结构自振周期的影响

基于模态分析结果,有楼梯间和无楼梯间模型的前三阶自振周期如表1所示.

表1 自振周期比较

Table 1 The comparison of the natural vibration periods

阶数	方向	自振周期/s		周期减少值/%
		无楼梯间	有楼梯间	
一阶	Y向	0.712 0	0.606 9	14.76
二阶	X向	0.702 1	0.571 9	18.54
三阶	扭转	0.651 5	0.461 5	29.16

由于楼梯构件对整体结构的刚度贡献,有楼梯间模型比无楼梯间模型 X 方向的自振周期影响减小了 18.54%, Y 方向自振周期减小了 14.76%, 扭转周期减小了 29.16%, 与文献[12]研究结果类似,但 X 方向的自振周期影响减小程度比文献[12]中结果大. 钢筋混凝土框架结构在考虑了楼梯间的作用后,由于楼梯间的刚度对整个框架结构总刚

度的贡献,因此结构的基本自振周期会减小,由此可能增大结构的地震反应. 楼梯间刚度还会改变整体结构的刚度分布,进而增加了结构的地震扭转效应.

2.1.2 楼梯间对框架结构侧向位移的影响

考虑楼梯间梯板的“K”型支撑作用^[13],对框架结构在 Y 向施加静力进行静力弹性分析,有楼梯间和无楼梯间框架结构楼层位移与层间位移角如图4所示. 无楼梯间最大层间位移为 7.05 mm,有楼梯间的最大层间位移为 5.47 mm. 无楼梯间的层间位移角最大值为 1/1615,有楼梯间的层间位移角最大值为 1/2064. 再次说明楼梯构件对整体结构的抗侧刚度影响大,这与文献[6]层间位移角研究结果一致.

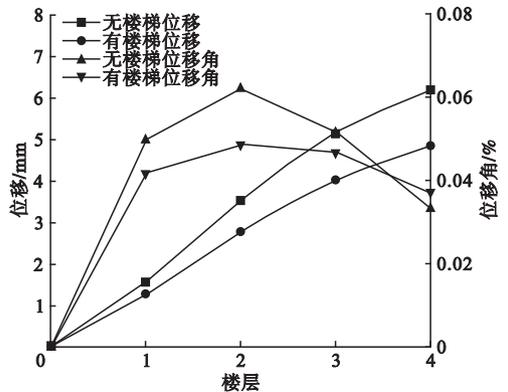


图4 框架结构楼层位移与层间位移角

Fig. 4 Floor displacement curves and inter-story displacement angle curves of the frame structure

沿 Y 向施加 EI Centro 地震波,波的持续时间为 15 s, EI Centro 地震波的加速度的最大值为 3500 mm/s^2 ,发生时间为 2.4 s,动力时程分析结果表明,两种模型 4 层位移峰值最大,两种模型 4 层时程曲线如图5所示. 无楼梯间模型 4 层负向的位移最大值约为 110 mm,发生的时刻在 3 s 左右,正向的位移最大值约为 100 mm,发生的时刻在 6 s 左右. 有楼梯间模型 4 层负向位移最大值发生在 3 s 左右约为 95 mm,正向位移最大值发生在 4 s 左右约为 80 mm. 这正说明楼梯构

件的存在增加了整体框架结构的刚度,改变了结构的动力特性.

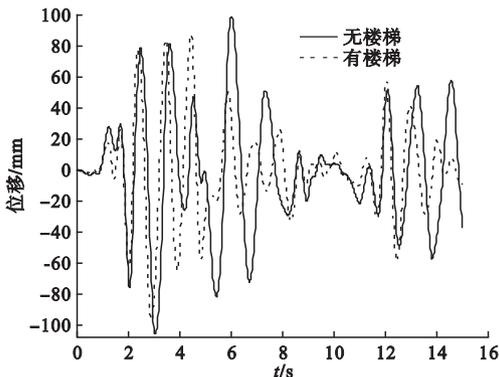


图5 4层位移时程曲线

Fig. 5 The time-history displacement curves of fourth floor

2.1.3 楼梯间对框架结构地震作用效应的影响

取 Y 方向振型,沿 Y 方向加载,进行 Pushover 分析,推覆曲线如图 6 所示.对比无楼梯间和有楼梯间模型,结构的地震反应有很大的区别.无楼梯间框架和有楼梯间框架达相同的水平位移,有楼梯间框架的基底剪力比无楼梯间框架的大很多,这又说明了楼梯间对框架结构的刚度影响很大.无楼梯间框架最大基底剪力为 3 406.79 kN,有楼梯间框架最大基底剪力为 4 169.10 kN,说明楼梯构件对框架结构地震作用影响较大,文献[13-14]基底剪力模拟结果也印证了此观点.

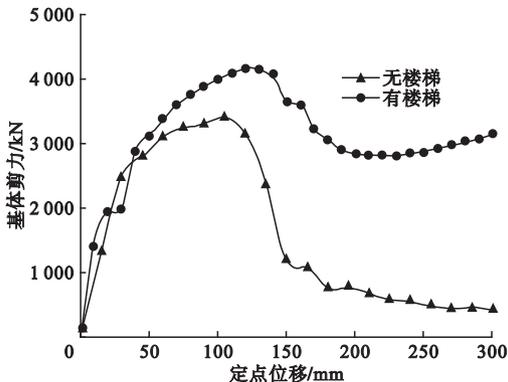


图6 框架结构的推覆曲线

Fig. 6 The pushover curves of the frame structure

2.2 无楼梯间和有楼梯间框架结构构件分析

2.2.1 楼梯间对框架梁、柱的内力的影响

沿 Y 向施加静力进行静力弹性分析,无楼梯间模型和有楼梯间模型框架结构底层框架柱轴力如图 7 所示.

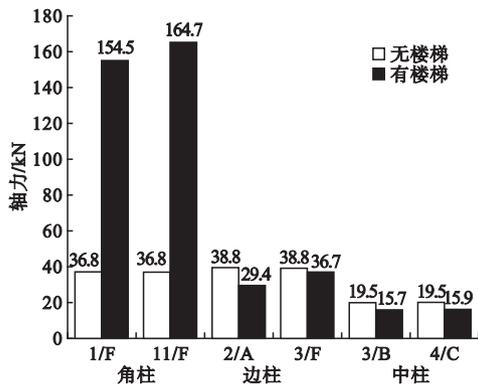


图7 底层框架柱轴力图

Fig. 7 The axial force diagrams of the bottom frame columns

有楼梯间模型 1/F 柱底轴力比无楼梯间模型增加了 319.84%, 11/F 柱增加了 347.55%; 2/A 柱底轴力有楼梯间模型比无楼梯间模型减少了 24.23%, 3/F 柱减少了 5.41%; 有楼梯间模型 3/B 柱底轴力比无楼梯间模型减小了 19.49%, 3/F 柱减小了 18.46%. 进行分析,1/F 柱因为是楼梯间框架柱还是框架结构的角柱,所以轴力比无楼梯间的大很多^[6];楼梯间放大结构的扭转效应^[10],导致 11/F 柱的轴力增大很多.总之,楼梯构件的存在会改变一些框架柱的轴力,对框架结构的角柱轴力影响较大,对边柱和中柱的轴力影响较小.

对结构进行动力弹性时程分析,采用 EI Centro 地震波, Traft 地震波和 Hollywood 地震波,按比例将 3 条地震波峰值加速度值调为 2 200 mm/s²,分析结果表明楼梯间改变了 2 轴框架的弯矩分配,靠近楼梯间框架构件的弯矩相比无楼梯间模型的明显减小.

为了说明楼梯间对框架结构弯矩的影响,在 Y 向施加静力,分析 2 轴一榀框架的梁柱弯矩.无楼梯间模型和有楼梯间模型框架

结构2轴梁柱弯矩如图8所示。①有楼梯间模型的楼梯间框架柱各层柱底弯矩比无楼梯间模型的弯矩大;②有楼梯间模型的楼梯间框架柱各层柱顶弯矩比无楼梯间模型的弯矩小;③有楼梯间模型楼梯间外的框架柱、框架梁的弯矩相对无楼梯间模型均有明显的减小;④楼梯间休息平台处,有楼梯间模型的框架柱在该处弯矩明显增大,而无楼梯间模型的框架柱在该处的弯矩很小。楼梯间分担了更多的地震作用,楼梯间沿竖向的刚度分布

不均匀,梯板的“K”型支撑作用,这些原因导致了有楼梯间模型楼梯间框架柱柱底弯矩增大,柱顶弯矩减小。楼梯构件的存在改变了框架结构的内力分布,由于楼梯间的刚度较大,分担的地震作用较大,楼梯构件相连的主体结构梁柱的弯矩较无楼梯间模型大,远离楼梯间的框架梁柱弯矩有一定的减小。休息平台与框架柱相连限制框架柱的位移,使框架柱在休息平台处内力增大。

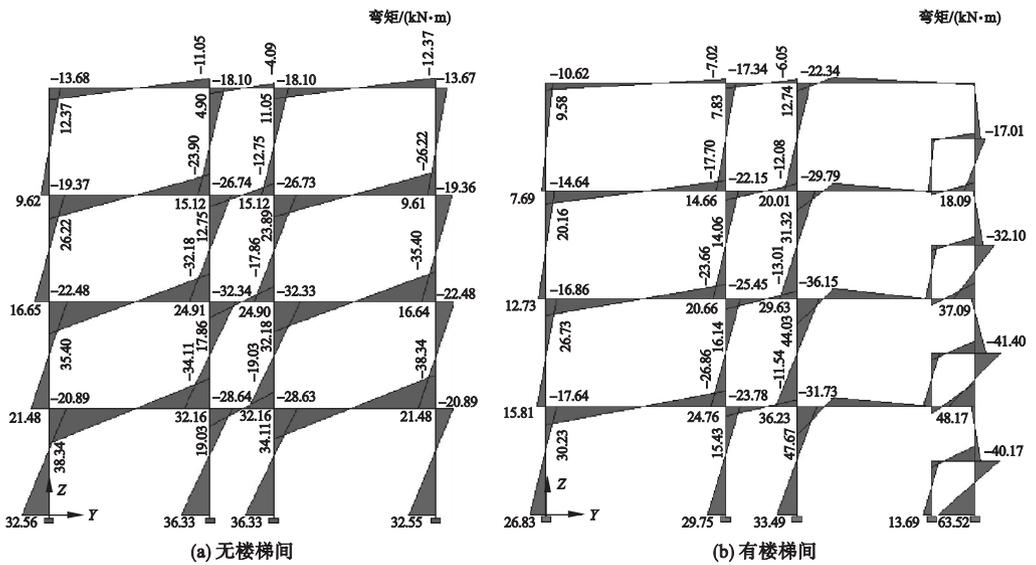


图8 一榀框架结构弯矩图

Fig. 8 The bending moment diagrams of one frame structure

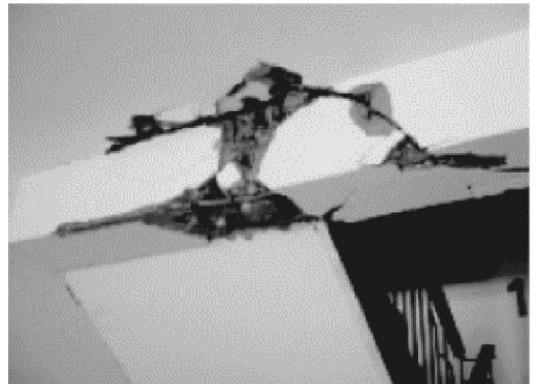
2.2.2 楼梯构件的受力破坏特征

楼梯构件主要包括梯柱、梯梁、梯板和平台板。震害现象表明^[1-3]楼梯构件在地震中

破坏严重,各构件在地震作用下受力非常复杂。楼梯构件破坏形式如图9所示。



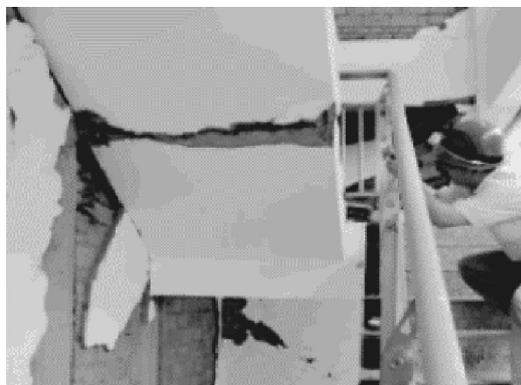
(a) 梯柱上端破坏



(b) 梯梁中部破坏



(c) 休息平台破坏



(d) 梯板拉压破坏

图9 楼梯构件破坏形式

Fig. 9 Four destruction forms of the stair components

表2为有楼梯间模型梯柱和梯梁在地震作用下的最大内力。

表2 楼梯构件地震作用下最大内力

Table 2 Maximum internal forces and moments of the stair components under seismic action

梯柱最大 拉力/kN	梯梁最大 剪力/kN	梯梁最大扭 矩/(kN·m)
40.95	24.68	1.84

梯柱在地震作用下承受较大的拉力,在柱端呈现受拉破坏特征,图9(a)为地震中梯柱出现上端破坏,实际地震中出现此类破坏的原因主要是:①梯柱的截面尺寸较小,钢筋的锚固措施不能满足规范的要求;②节点的混凝土强度达不到强度要求;③设计时未考虑实际地震过程中柱分配的内力;④梯柱在地震力作用下极易发生短柱破坏。

梯梁在地震荷载的作用下,受到弯剪扭共同作用,梯梁破坏大多在跨中和两端发生破坏,图9(b)为地震中梯梁在跨中剪扭破坏。实际地震中梯板对平台梁产生很大的水平推力作用,使梯梁不仅在平面内受弯、受剪而且在平面外也受弯和受剪^[15],还会受到扭矩的作用。梯梁的截面尺寸通常较小,平面外抗弯和抗剪的能力较低,所以地震灾区的梯梁通常在跨中和两端发生破坏。

底层梯板受力最大,沿Y向对结构施加静力进行静力弹性分析。结果表明,下梯板主

要受拉,上梯板主要受压。下梯板板顶1/3处最大拉应力值为1.41 MPa,下梯板板底1/3处最大拉应力值为2.28 MPa,都已经大于C20混凝土的开裂强度1.10 MPa。根据震害现象调查,梯板板底1/3处留有施工缝^[2],梯板的负筋在1/4~1/3跨切断^[3],因此梯板板顶1/3处和板底1/3处为梯板受拉薄弱部位。由于混凝土的抗拉强度很低,在地震作用下,梯板薄弱部位应力达到混凝土的抗拉强度,混凝土出现裂缝,开裂后拉应力主要由钢筋来承担,在反向地震力的作用下原受拉的钢筋变为受压状态,在拉压反复作用下钢筋出现屈曲,使得混凝土保护层剥落。

2.2.3 结构构件塑性开展情况分析

取Y方向振型,沿Y方向加载,进行Pushover分析,无楼梯间模型和有楼梯间模型各阶段出铰情况如表3所示。各阶段有楼梯间框架结构比无楼梯间框架结构塑性铰开展更多。

表3 各阶段塑性铰比较

Table 3 The comparison of plastic hinge at each stage

铰状态	无楼梯间出铰率/%	有楼梯间出铰率/%
B-IO阶段	3.4	4.6
IO-LS阶段	1.0	1.6
LS-CP阶段	0.8	1.0

无楼梯间和有楼梯间框架结构严重屈服时塑性铰如图10所示。

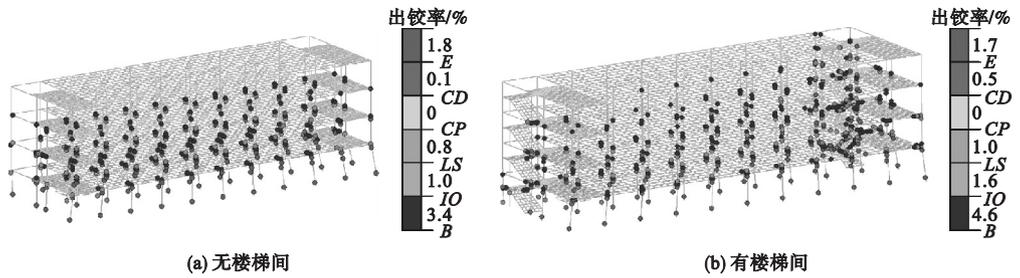


图 10 框架结构严重屈服时塑性铰图

Fig. 10 The plastic hinge figures when the frame structure was severely yield

塑性铰出现情况与文献[16]类似,无楼梯间框架结构底层塑性破坏最严重,主体结构由于底层各柱的柱端进入塑性状态而失去承载能力,此时一层、二层和三层的框架梁梁端已经进入塑性屈服状态,结构的延性比较理想;有楼梯间框架结构平台梁和梯柱首先屈服,其次是底层框架柱和框架梁,楼梯间先与主体结构破坏,楼梯构件及与之相连的框架构件出现塑性铰的时间早,分布多,发展快^[16].

由于静力的弹塑性分析只是沿结构的一

个方向施加荷载,不能得到构件的滞回耗能关系曲线,因此笔者采用动力时程分析方法对无楼梯间模型和有楼梯间模型框架柱塑性铰的屈服情况作分析,无楼梯间和有楼梯间框架结构 2/C、2/F 底层柱底的弯矩转角关系如图 11 所示.无楼梯间框架结构,框架柱的滞回曲线呈倒 S 形、呈现比较典型的“捏缩”效应,而且滞回环的面积较小,表明构件还没有完全的屈服.有楼梯间的框架结构,其框架柱的滞回环的面积相对较大,说明有楼梯间框架柱的塑性开展程度大.

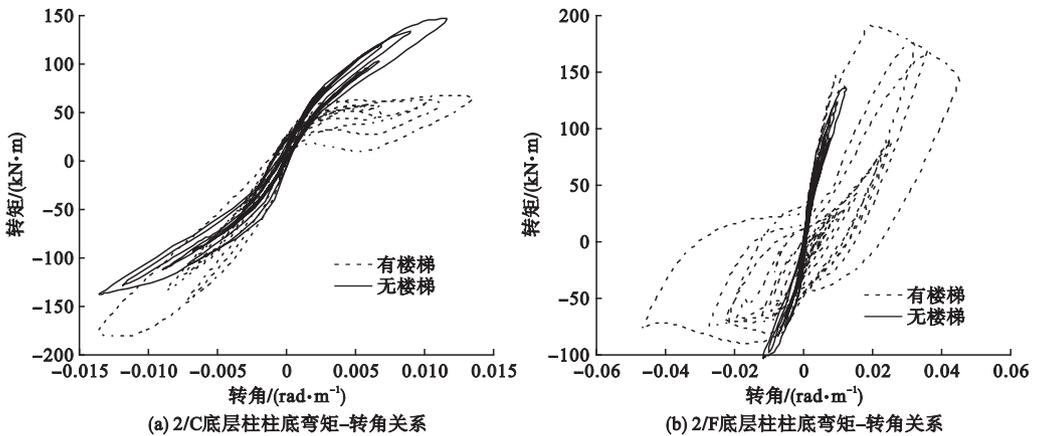


图 11 框架柱的弯矩 - 转角关系图

Fig. 11 The moment-rotation relationship curves of the frame columns

2.3 楼梯间布设位置对框架结构的影响

为进一步研究楼梯构件对框架结构性能的影响,将楼梯间设在框架结构的不同的位置.考虑 5 种不同楼梯间位置 A1、A2、A3、A4、A5(见图 1),在结构 Y 向施加静力进行静力弹性分析,5 种楼梯间位置的层间位移和层间位移角如图 12 所示.从图 12 可知,楼梯间布置的位置不同对结构的位移和层间位

移角存在不同的影响,楼梯间的位置在 A1 时,楼层的层间位移最大,当楼梯间的位置在 A5 时,楼层的层间位移最小.楼层的层间位移角也有相同的规律.因此楼梯构件不仅对框架结构的动力性能有影响,而且楼梯间布设的位置不同,结构的动力特性也不同,楼梯间布设在结构中部,结构的抗侧刚度最大,楼梯间对结构的影响最大.

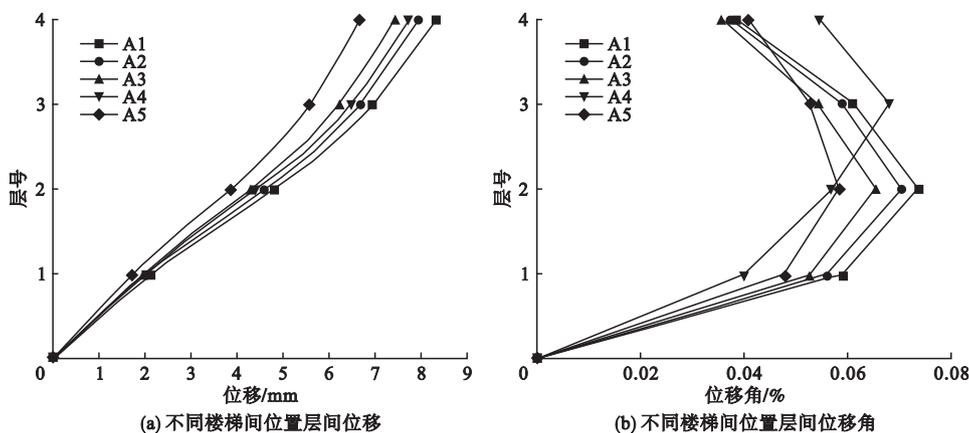


图12 不同楼梯间位置层间位移和层间位移角

Fig. 12 Floor displacement curves and inter-story displacement angle curves of different staircase locations

2.4 减小楼梯间和主体框架结构相互作用的措施

楼梯间主要是通过与框架结构接触作用对结构产生影响,可以设法减少楼梯间与框架接触来减轻楼梯间对框架结构造成的不利影响.笔者分析不同形式楼梯模型(见图13)

3种不同楼梯形式对框架结构抗震的影响.模型1为普通楼梯间,模型2为滑动支座方法(见图13(a)),模型3为休息平台悬挑方法(见图13(b)).在Y方向施加静力进行静力弹性分析,比较各模型楼梯构件及周边框架构件内力,以便得出较合理的楼梯形式.

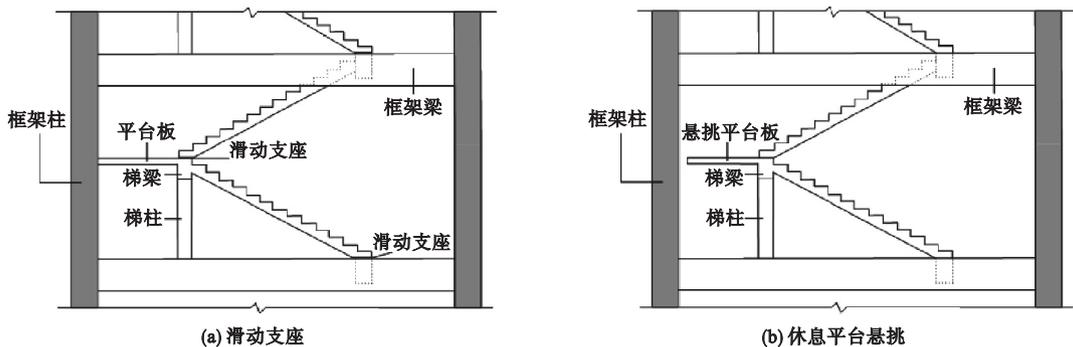


图13 不同形式楼梯模型

Fig. 13 Stair models of the different form

各模型底层 E/1 ~ 2 梁和 1/F 柱最大弯矩和剪力如表4所示.从表4可以得出,滑动表4 底层梯梁和框架柱最大内力

Table 4 The maximum internal forces and moments of ladder beam and frame column at the bottom layer

结构	E/1 - 2 梁		1/F 柱	
	弯矩/(kN·m)	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	剪力/kN
模型1	24.7	29.8	55.1	21.2
模型2	1.1	2.9	36.8	21.2
模型3	16.0	21.2	39.7	18.1

支座模型和休息平台板悬挑模型都可以减小平台梁和框架柱的弯矩和剪力,滑动支座模型减小的幅度更大.因此框架结构楼梯间设置滑动支座能够很好地减轻楼梯构件对框架结构抗震的不利影响.底层下梯段板网格单元轴力图如图14所示.每个单元格从上到下依次是模型1、模型2、模型3在该区域最大的轴力值.楼梯间的梯板采用滑动支座后,楼梯板的轴向作用力明显减小.休息平台板悬挑的结构模型能够使梯板局部轴力减小,但是也能够使梯板局部轴力增加.

轴力/kN				
183.9	51.5	-1.5	-30.3	120.4
-221	1.9	2.8	3.3	4.7
21.8	0.7	-22.6	-38.1	1.638
147.7	76.1	20.1	20.2	62.1
-11.2	-4.6	2.5	3.9	4.1
-3.2	-7.6	-11.6	27.9	119.6
128.0	85.5	48.8	35.0	27.5
-7.2	-4.1	2.0	3.3	4.8
-24.1	-9.7	10.7	51.1	97.4
122.2	92.0	61.8	37.1	-11.6
-5.2	-3.2	1.2	2.8	4.6
-37.3	-8.4	21.8	57.3	92.1
124.1	95.9	66.0	35.8	-8.9
-3.9	-2.4	-0.8	2.2	3.9
-44.4	-9.0	25.4	60.2	93.5
128.9	99.1	66.9	-33.8	-14.4
-2.8	-1.7	-0.5	1.6	2.9
-49.0	-11.1	26.2	62.5	97.0
135.0	102.3	65.7	-32.0	-21.4
-2.0	-0.8	-0.3	0.7	2.1
-52.7	-13.7	25.7	65.0	101.3
146.2	99.1	63.4	-30.3	-28.8
-1.8	-3.2	-3.7	-3.3	1.8
-56.6	-13.9	24.7	63.0	108.3

图14 梯板轴力图

Fig. 14 Axial forces of the gangboard

3 分析结论与学者研究成果对比

笔者只针对一种框架的结构做了分析,为使分析结果具有普适性,对现有多层框架结构的研究成果进行对比分析.学者研究成果与笔者分析结果基本吻合,楼梯间的存在使结构的抗侧刚度变大,且楼梯间布置数量越多,结构抗侧刚度越大.金来建等^[17]、汪梦甫等^[18]、孙飞飞等^[19]对不同开间不同跨度的框架结构形式进行了数值模拟分析,其结果也表明楼梯间能增大结构的抗侧刚度,楼梯间布置数量越多,结构的自振周期越小,抗侧刚度越大.张耀庭等^[7]、常亚峰等^[20]考虑楼梯间在不同位置结构构件的内力分析,结果也表明楼梯间处,构件的内力有一定的增大,远离楼梯间结构构件内力减小.汪平等^[21]、段连蕊等^[22]、蒋欢军等^[23]对带楼梯间框架结构进行了弹塑性分析,结果也表明楼梯间构件率先屈服,楼梯间构件受损严重.

4 结论

(1)楼梯间增大了结构的刚度,减小了结构的侧移,改变了平面上的刚度分布,增加了结构的扭转效应,增大了结构的地震作用.

(2)楼梯构件的存在会改变框架梁柱的内力状态,其中对角柱内力的影响尤为明显,且楼梯间周边的主体梁柱的内力受楼梯构件的影响较为显著,楼梯构件及与之相连的框

架梁柱较其他部位更早地出现塑性铰.

(3)楼梯间布置的位置不同,结构的层间侧向位移和位移角相应不同,楼梯间布置在结构中部结构的刚度最大,楼梯间对结构的影响最大.

(4)滑动支座模型和悬挑休息平台板的方法,可以弱化楼梯间和主体框架结构的连接,从而减小楼梯构件对框架结构的影响,滑动支座模型减小的程度更大.

参考文献

- [1] LI Bixiong, MOSALAM K M. Seismic performance of reinforced concrete stairways during the 2008 Wenchuan earthquake [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2013, 27(6): 721-730.
- [2] 张令心,刘琛,刘洁平.芦山地震楼梯间震害调查及思考[J].地震工程与工程振动,2013, 33(4): 21-28.
(ZHANG Lingxin, LIU Chen, LIU Jieping. Investigation and consideration of the staircase damaged in Lushan earthquake [J]. Journal of earthquake engineering and engineering vibration, 2013, 33(4): 21-28.)
- [3] 尹保江,黄世敏,程绍革,等.汶川地震中建筑楼梯震害原因分析[R].北京:中国建筑科学研究院,2008.
(YIN Baojiang, HUANG Shimin, CHENG Shaoge, et al. Analysis on the causes of building damage of stairwells in Wenchuan earthquake [R]. Beijing: China Academy of Building Research, 2008.)
- [4] 曹万林,庞国新,李云霄.带楼梯框架弹性层刚度的试验研究[J].世界地震工程,1996(2): 29-32.
(CAO Wanlin, PANG Guoxin, LI Yunxiao. The test research on elastic floor rigidity of frame with staircase [J]. World earthquake engineering, 1996(2): 29-32.)
- [5] 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(自然科学版),2010,38(2): 259-265,285.
(DAI Hongjun, QI Ai. Analysis on seismic-response of reinforced concrete frame structure with staircase [J]. Journal of Fuzhou university, 2010, 38(2): 259-265, 285.)
- [6] 张翠强,周颖.楼梯对框架结构性能影响分析[J].结构工程师,2010,26(4): 36-41.
(ZHANG Cuiqiang, ZHOU Ying. Analysis of influence of stairs on frame structural properties [J]. Structural engineers, 2010, 26(4): 36-41.)
- [7] 张耀庭,段剑林.钢筋混凝土框架结构中楼梯间布置位置的研究[J].建筑结构学报,2013, 34(5): 72-79.
(ZHANG Yaoting, DUAN Jianlin. Research on location of stairwells in RC frames [J]. Journal of building structures, 2013, 34(5): 72-79.)
- [8] 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.
(FENG Yuan, WU Xiaobin, LI Congchun, et al. A study of the earthquake resistance performance of frames with staircases [J]. China civil engineering journal, 2010, 43(10): 53-62.)
- [9] 刘家欢, 巢斯. 现浇楼梯对平面不规则框架抗震性能影响分析[J]. 结构工程师, 2015, 31(1): 75-81.
(LIU Jiahuan, CHAO Si. Influence of cast-in-place staircases on seismic behaviors of complex-planar reinforced frames [J]. Structural engineers, 2015, 31(1): 75-81.)
- [10] 马进, 李碧雄, 王哲. 带楼梯构件框架结构静力推覆试验研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2012, 44(增刊1): 115-123.
(MA Jin, LI Bixiong, WANG Zhe. Study on the static pushover of frame structure with staircase [J]. Journal of Sichuan university: engineering science edition, 2012, 44(S1): 115-123.)
- [11] 王彬. 大震下钢筋混凝土框架结构塑性铰破坏机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
(WANG Bin. Study on failure mechanism of reinforced concrete frame structure's plastic hinge by rare earthquake action [D]. Changchun: Jilin University, 2009.)
- [12] 李进军, 于宁宁, 阮祎萌, 等. 不同形式楼梯对框架结构的抗震影响分析[J]. 建筑结构, 2013, 43(增刊1): 1138-1141.
(LI Jinjun, YU Ningning, RUAN Yimeng, et al. Comparison analysis of the earthquake-resistance performance of frames with different staircases [J]. Building structure, 2013, 43(S1): 1138-1141.)
- [13] 罗德章, 周云, 童博, 等. 楼梯间抗震性能研究及提高其抗震性能的方法[J]. 工程抗震与加固改造, 2016, 38(6): 32-47, 54.
(LUO Dezhang, ZHOU Yun, TONG Bo, et al. Studies concerning the seismic performance of staircases and methods to improve the seismic performance [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2016, 38(6): 32-47, 54.)
- [14] SUN H, ZHANG A, CAO J. Earthquake response analysis for stairs about frame structure[J]. Engineering failure analysis, 2013, 33: 490-496.
- [15] 王建强, 张艳玲, 张铭, 等. 楼梯对框架结构抗震性能的影响[J]. 世界地震工程, 2013, 29(4): 59-66.
(WANG Jianqiang, ZHANG Yanling, ZHANG Ming, et al. Effect of stairs on seismic performance of frame structure [J]. World earthquake engineering, 2013, 29(4): 59-66.)
- [16] 张望喜, 刘长洋. 考虑楼梯影响的5·12汶川地震灾区某典型教学楼弹塑性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2015, 35(5): 699-706.
(ZHANG Wangxi, LIU Changyang. Elastic-plastic analysis of typical teaching building in 5·12 Wenchuan earthquake disaster area with regard to the influence of stairs [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2015, 35(5): 699-706.)
- [17] 金来建, 景辉. 楼梯间不同做法对框架结构的抗震性能影响[J]. 建筑结构, 2012, 42(增刊2): 306-316.
(JIN Laijian, JING Hui. The influence of different methods of stairwells on the seismic performance of the frame structure [J]. Building structure, 2012, 42(S2): 306-316.)
- [18] 汪梦甫, 郭新华. 楼梯对教学楼框架抗震性能的影响[J]. 工程抗震与加固改造, 2011, 33(3): 20-28.
(WANG Mengfu, GUO Xinhua. Effects of staircase on seismic performance of school building of frame structure [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2011, 33(3): 20-28.)
- [19] 孙飞飞, 王述文, 宋晓伟, 等. 多层框架结构中摩擦减震楼梯减震性能目标研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2017, 39(4): 1-10.
(SUN Feifei, WANG Shuwen, SONG Xiaowei, et al. Research on energy dissipation performance objective of frictionally damped staircase in multi-story framed structures [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2017, 39(4): 1-10.)
- [20] 常亚峰, 梁兴文, 汪平, 等. 隔震防倒塌支座及楼梯间位置对框架结构抗震性能的影响研究[J]. 地震工程学报, 2017, 39(6): 996-1004.
(CHANG Yafeng, LIANG Xingwen, WANG Ping, et al. Influence of isolation and collapse prevention bearings and location of stairwells on the seismic performance of frame structures [J]. China earthquake engineering journal, 2017, 39(6): 996-1004.)
- [21] 汪平, 梁兴文, 常亚峰, 等. 梯段板构造及梯柱形式对框架结构及楼梯构件抗震性能的影响[J]. 工业建筑, 2018, 48(9): 99-104.
(WANG Ping, LIANG Xingwen, CHANG Yafeng, et al. Influence of stairway slab construction and ladder column form on seismic behavior of stair component and frame structures [J]. Industrial construction, 2018, 48(9): 99-104.)
- [22] 段连蕊, 张望喜, 刘精中, 等. 板式楼梯连接方式对RC框架结构的抗震性能影响[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(1): 54-61.
(DUAN Lianrui, ZHANG Wangxi, LIU Jingjin, et al. Research on RC frame structure seismic performance with different connecting methods of plate stairs [J]. Journal of disaster prevention and mitigation engineering, 2017, 37(1): 54-61.)
- [23] 蒋欢军, 王斌, 吕西林. 钢筋混凝土框架结构楼梯震害分析与设计建议[J]. 振动与冲击, 2013, 32(3): 22-28.
(JIANG Huanjun, WANG Bin, Lü Xilin. Seismic damage analysis and design suggestions for staircases in RC frame structures [J]. Journal of vibration and shock, 2013, 32(3): 22-28.)