

现浇楼板对混凝土框架结构耗能分布的影响^{*}

肖同亮¹, 刘如驰², 邱洪兴³

(1. 南京工程学院建筑工程学院 南京, 211167) (2. 南京市建筑设计研究院有限责任公司 南京, 210005)

(3. 东南大学土木工程学院 南京, 210096)

摘要 为了研究现浇楼板对混凝土框架结构各构件滞回耗能分布的影响, 基于多弹簧杆单元分别建立了矩形梁、考虑梁刚度、强度增强效应的矩形梁以及考虑楼板翼缘的 T 形梁共 4 个多层框架结构计算模型, 进行了 8 度罕遇地震作用下结构滞回耗能分布比较分析。计算结果表明: 梁强度增大使结构总滞回耗能增加, 而梁耗能占总耗能的比有所下降; 梁刚度增大使得结构总滞回耗能略有增加, 梁耗能占总耗能比例也有所上升。考虑楼板翼缘作用的 T 形梁对结构滞回耗能沿层分布、各层梁柱构件之间分布的影响主要体现在梁强度的增大, 梁刚度的增大则会使滞回耗能分布产生突变, 框架内梁滞回耗能小于外梁而边柱滞回耗能小于中柱。塑性铰的演化过程体现了结构耗能的转移过程, 楼板翼缘作用可使结构由“梁铰机制”转为按“柱铰机制”破坏, 这说明了楼板翼缘作用对于结构耗能分布的影响不可忽略。

关键词 钢筋混凝土框架; 抗震性能; 塑性铰; 现浇楼板; 滞回耗能

中图分类号 TU375.4; TH113.2⁺¹

引 言

近年来, 基于能量的抗震设计方法受到国内外工程界的广泛关注^[1]。相对于基于承载力和基于位移的抗震设计, 基于能量抗震设计思想更加注重从结构的损伤模式和耗能机制入手, 实现对结构耗能分布的控制, 这使基于能量抗震设计能更好地从整体上把握结构的抗震性能。文献[2]计算了发生损伤破坏时结构整体以及每层的累积非弹性滞回耗能。文献[3]研究认为地震总输入能由结构的动能、阻尼耗能和吸收能组成, 其中吸收能与结构抗震需求能量直接相关。文献[4]结合抗震设计规范提出基于能量概念的两阶段设计方法, 即结构在多遇地震作用下的弹性阶段抗震设计和以能量分析方法为基础的罕遇地震作用下的弹塑性阶段的抗震设计。

实际震害与众多国内外试验结果表明, 在钢筋混凝土框架结构中, 较多情况下塑性铰首先出现在了柱端, 结构的最终破坏形式为“强梁弱柱”, 与规范所要求的“强柱弱梁”的设计思想不相吻合, 不能很好实现延性耗能的目的。在结构设计及相关规范

中, 一般按刚性楼板假定来近似考虑楼板对于结构刚度的增大作用, 但是楼板对于框架梁抗弯性能的影响一直没得到较好的诠释。这样的设计方法改变了框架最终的屈服机制, 对结构在地震作用下的安全性带来极大的隐患^[5]。蒋永生等^[6]在有板和没有板的两种钢筋混凝土框架中节点受到低周往复荷载的对比试验基础上, 研究了整浇梁板对框架节点抗震性能的影响, 并给出了相应的计算方法。马千里等^[7]对一个 4×4 跨的 6 层钢筋混凝土框架结构进行了 pushover 分析, 研究表明, 楼板对框架梁的刚度和承载力, 特别是负弯矩承载力的影响很大, 建议可将带楼板框架梁等效为 T 形或者 Γ 形梁进行设计计算。阎红霞等^[8]应用有限元软件 ABAQUS 对汶川地震中都江堰市某典型“强梁弱柱”框架进行三维动力弹塑性时程数值模拟, 分析了现浇楼板对框架结构抗震性能的影响、探讨了负弯矩作用下梁端有效翼缘的取值。

研究者们对于“强柱弱梁”和“强梁弱柱”机制的耗能模式也多有研究, 主要考察梁柱强度比对结构滞回耗能分布的影响。研究表明, 梁柱强度比对结构滞回耗能分布影响很大^[9], 但这些研究的结构模

^{*} “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAJ14B02); 国家自然科学基金资助项目(51078077); 江苏省高校自然科学基金资助项目(17KJB560005); 南京工程学院校级基金资助项目(YKJ201511)

收稿日期: 2016-11-23; 修回日期: 2017-03-05

型并没有严格模拟楼板翼缘作用,只是抽象的考虑其强度的影响。现浇楼板与框架梁共同工作不仅提高了框架梁强度,同时也较大程度提高了梁的刚度。笔者以规则的多层钢筋混凝土框架结构算例,从强度和刚度两个方面研究现浇楼板对于结构滞回耗能分布的影响。

1 能量反应方程

多自由度结构在水平地震作用下的振动方程为

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + F(t) = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

其中: M 为质量矩阵; C 为阻尼矩阵; $F(t) = Kx(t)$ 为随时间变化的结构恢复力; K 为刚度矩阵; \ddot{x}_g 为相对坐标体系的加速度。

将式(1)两边同时左乘 $\dot{x}dt$,并对时间积分可得

$$E_K + E_D + E_A = E_I \quad (2)$$

其中: E_K 为体系相对位移的动能; E_D 为体系的阻尼耗能; E_A 为体系的变形成能; E_I 为地震输入能。

结构变形成能可分为弹性应变能 E_s 和滞回耗能 E_H ,在结构地震能量反应时程中,结构动能与弹性应变能相互转化,并在振动结束时都趋近于零。因此,从能量方程平衡的角度来说,对于弹性体系地震输入的能量 E_I 将由阻尼耗能 E_D 全部耗散;对于弹塑性体系地震输入的能量将由累积滞回耗能 E_H 和阻尼耗能 E_D 两部分来共同耗散。

2 结构计算模型

该算例为 6 层 3 跨钢筋混凝土框架结构,按照 8 度 0.2g 区,II 类场地进行抗震设计^[10]。框架截面所有的梁均为 300 mm×600 mm,所有柱均为 500 mm×500 mm,结构平面如图 1 所示。采用 PKPM 计算,其计算参数是:框架梁、柱、楼板均现浇,混凝土强度等级为 C30;板厚取 100 mm;结构的楼面活荷载为 3.5 kN/m²,屋面活荷载为 2.0 kN/m²,楼面恒载为 4.0 kN/m²,屋面恒载为 6.0 kN/m²,其余的荷载按规范有关规定进行计算。纵向主框架的框架梁荷载按实际传至横向主框架上,不考虑填充墙的作用。女儿墙的砖容重取 19kN/m³,墙高为 1.5m,外墙填充墙的线载取为 9.0 kN/m。不考虑风载作用,考虑活载的不利布置,考虑梁端负弯矩调幅系数为 0.85,结构阻尼比取为 0.05。

取中间一榀横向框架进行分析,框架纵筋配筋如图 2 所示。框架梁柱端部加密区箍筋配置和楼板

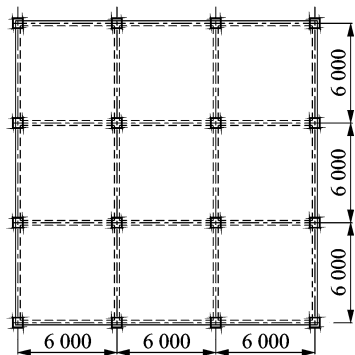


图 1 结构平面图(单位:mm)

Fig. 1 Structure layout (unit: mm)

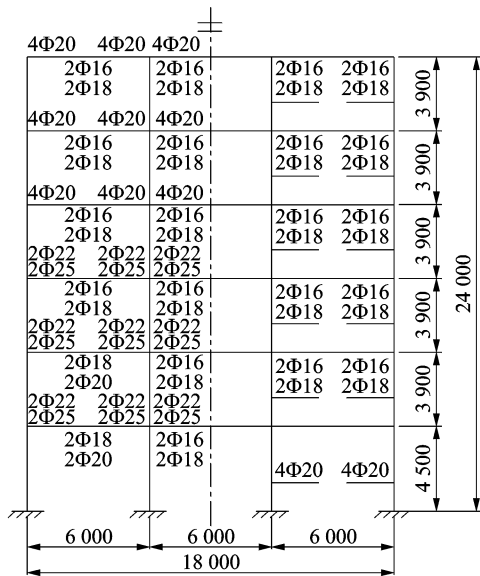


图 2 框架纵筋配筋图(单位:mm)

Fig. 2 Frame structure size and reinforcement drawing (unit: mm)

配置正负双向钢筋都是直径为 8 mm、间距为 100 mm。

笔者选取的框架梁完全等效为 T 形梁进行能量分析。楼板的有效翼缘宽度随着框架梁变形的增大而增大,目前,研究者对于确定楼板翼缘长度还没有取得一致意见。笔者按照《混凝土结构设计规范(GB 50010-2010)》规定确定翼缘计算宽度为

$$b'_f = \min\{l_0/3, b + s_n, b + 12h'_f\} = 1500 \text{ mm} \quad (3)$$

图 3 为按照式(3)计算得到的 T 形截面。根据图示尺寸,不考虑钢筋作用,计算出 T 形截面相对矩形截面刚度增大系数为 1.85。

根据文献[6]的建议方法,假定翼缘板内负筋完全均匀参与受力,并且不考虑横向钢筋的拉结作用,计算出负弯矩区 T 形截面相对矩形截面强度增大系数为 1.3。为了比较矩形截面梁与 T 形截面梁在

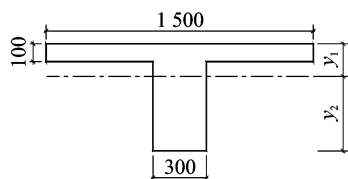


图 3 T 形截面(单位: mm)

Fig. 3 T shape section (unit: mm)

能量分布上的差异,同时分析刚度和强度对结构能量分布的影响,笔者选择 4 个计算模型进行计算分析。模型 R_1 为按照规范设计的矩形截面框架梁;模型 R_2 为矩形截面框架梁,刚度增大系数为 1.85,但无强度增大;模型 R_3 为矩形截面框架梁,通过增加负弯矩区配筋面积使强度增大系数为 1.3;模型 T_4 为 T 形截面框架梁,翼缘长度为 1.5m,翼缘钢筋 148。

笔者采用 Canny 程序中的多弹簧单元模型对框架结构进行能量分析。由于多弹簧单元能够模拟变轴力以及双向反复侧向荷载作用下杆件的弯曲性能,杆端弹簧的恢复力模型取决于材料应力应变的恢复力模型,因此能够细致地考虑截面配筋和箍筋约束等信息。本研究中混凝土材料模型选用 CS3 单轴拉压本构模型,并且考虑箍筋约束混凝土作用,可以较好地反映强度退化和卸载刚度衰减等特征。钢筋材料模型选用 SS3 三线性材料模型^[11],考虑钢筋强化。模型材料力学性能采用《混凝土结构设计规范(GB 50010-2010)》中对应材料强度标准值。结构阻尼采用经典 Rayleigh 阻尼,阻尼比为 5%。对结构进行弹塑性时程分析,得到杆两端弯矩-转角的滞回曲线,分别计算曲线包含的面积,得出的值即为杆件两端的滞回耗能,两端的滞回耗能相加即为杆件的滞回耗能。

3 结构能量分布

3.1 梁、柱耗能占总耗能耗比

选用 EL Centro 波对结构进行 8 度罕遇地震作用下能量时程分析,得到各模型梁、柱单元滞回耗能。表 1 为各模型梁柱总耗能占总耗能耗的比例。

由表 1 可知,考虑楼板作用使得结构总滞回耗能增加,各模型梁耗能都占结构总耗能的大部分,但是 R_3 、 T_4 模型较 R_1 、 R_2 模型梁耗能占比例要小, R_3 、 T_4 模型梁的强度比 R_1 、 R_2 模型强度要高 30%,说明梁强度增加使得梁耗能占总耗能比例下降。

表 1 各模型梁柱总耗能占总耗能耗比

Tab. 1 The percentage of beam and column to total energy dissipation

模型	总滞回耗能/ (kN · m)	梁总耗能 占比	柱总耗能 占比
R_1	257.945	0.710	0.290
R_2	270.086	0.742	0.258
R_3	468.835	0.637	0.363
T_4	472.910	0.671	0.329

R_2 模型梁刚度比 R_1 模型梁刚度增加了 85%,梁滞回耗能占总滞回耗能比例略有增加; T_4 模型梁强度与 R_3 模型相同,但是 T_4 模型比 R_3 模型刚度要大,使得梁滞回耗能占总滞回耗能的比增加。

可见,考虑楼板作用,降低了梁滞回耗能占总滞回耗能的比,这主要是由于楼板翼缘对于梁端强度提高的作用。

3.2 梁、柱滞回耗能沿层间的分配

仅依靠梁、柱滞回耗能耗比无法准确反映结构特别是典型构件的塑性发展情况,因此必须深入研究构件耗能耗分配与耗能耗机制,综合判定结构抗震性能。

结构滞回耗能耗沿层间的分布如图 4 所示。总的来看,结构滞回耗能耗沿层间分布大体呈线性分布规律,底层最大,顶层最小,说明底层为本结构的薄弱层。 R_1 、 R_2 、 R_3 、 T_4 各模型底层耗能耗占总耗能耗的比例分别为 32.5%、29.4%、44.5%和 37.4%。从耗能耗角度看,梁强度增加的 R_3 模型与带有楼板翼缘的 T_4 模型较 R_1 和 R_2 模型底层能量集中明显,容易形成柱铰。4 个模型在顶层耗能耗比例都在 1%左右,说明顶层耗能耗作用不明显,顶层构件强度富余较多,因此可以适当减小顶层框架的截面配筋。 R_3 模型与 T_4 模型在上部三层耗能耗比例基本相同,但是下部三层耗能耗比例差别较大,说明下部三层非线性发展较充分,刚度作用产生影响较大。

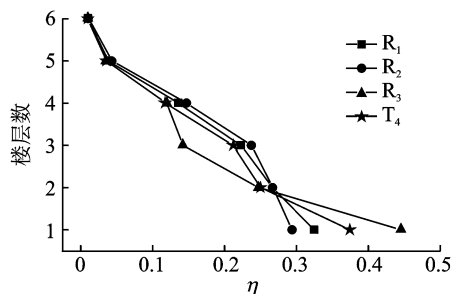


图 4 各层滞回耗能耗占总耗能耗比

Fig. 4 Comparison of energy-dissipation along layers

图 5 为各模型各层柱与梁滞回耗能比值的比较。各模型在上部两层柱滞回耗能明显大于梁,即在结构非线性发展不充分阶段,柱耗能起主导作用。 R_3, T_4 模型各层柱与梁滞回耗能比值比 R_1, R_2 模型要大,是由于梁强度增大引起柱耗能相对增加导致的。除了上部两层外, R_2 模型各层柱滞回耗能与梁滞回耗能比值比 R_1 模型要小,这是由于梁刚度增大,梁耗能相对增大所导致的。同理, R_3 模型比 T_4 模型刚度小,因此 R_3 模型柱耗能比 T_4 模型要大。楼板翼缘对于结构滞回耗能沿层分布的影响主要体现在刚度与强度上,强度影响相对规律也较明显,刚度会使滞回耗能沿层的分布产生突变,因此不能忽视刚度对结构滞回耗能沿层分布的影响。

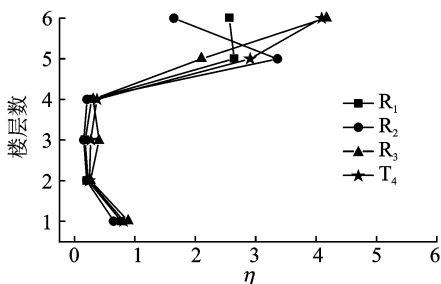


图 5 各层柱与梁滞回耗能比

Fig. 5 The ratio of column to beam hysteretic energy-dissipation along layers

图 6 为各模型梁层滞回耗能与梁总滞回耗能比值的比较, R_1, R_2 模型梁总滞回耗能沿层的分布存在能量集中层,其能量集中并不在底层,而在第 2 层; R_3, T_4 模型底层梁滞回耗能最大,基本呈上小下大形式。 R_1, R_2, R_3, T_4 模型底层梁耗能占梁总耗能的比例分别为 25.8%, 24%, 37%, 30.8%, 各模型的强度作用体现明显,这直接导致梁总耗能沿层分布的差异。带有楼板翼缘的 T_4 模型相对 R_1, R_2 模型,上部三层梁耗能占比差不多,主要差别体现在底层梁耗能和三层梁耗能。 R_3 模型相对 R_1, R_2 模型梁总耗能沿层的分布趋势与 T_4 模型相似,但是 T_4 模型相对 R_3 模型分布较均匀,说明刚度作用有可能使梁总耗能沿楼层的分布产生突变。

图 7 为各模型各层柱滞回耗能与柱总滞回耗能比值的比较。各模型柱层滞回耗能与柱总滞回耗能比值在底层最大,且与其他几层相比相差很大,其他各层柱耗能占柱总耗能的比例也较稳定。顶层柱耗能占柱总耗能比例在 2% 左右,二层柱耗能占柱总耗能的比例在 14%~17% 之间,二层与顶层之间基

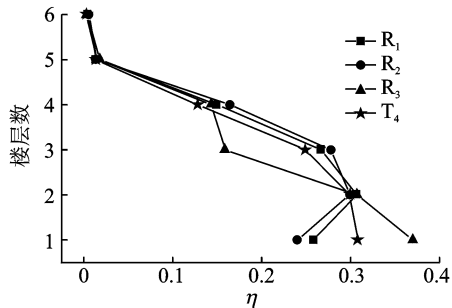


图 6 各层梁滞回耗能占梁总滞回耗能比

Fig. 6 The hysteretic energy dissipation ratio of each layer beams to total beams

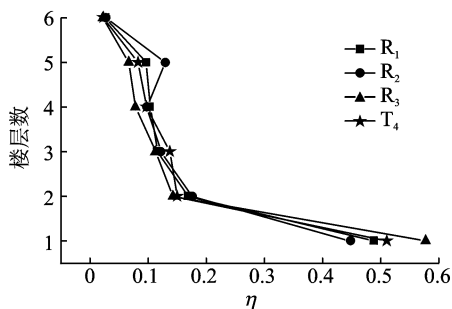


图 7 各层柱滞回耗能占柱总滞回耗能比

Fig. 7 The hysteretic energy dissipation ratio of each layer columns to total columns

本呈线性关系。底层柱耗能占柱总耗能比例随着梁强度增大而增大,随着梁刚度增大而减小。

3.3 层内梁、柱耗能水平分布

图 8 为各模型各层内梁与外梁滞回耗能比值的比较。总体来看,各模型各层内梁滞回耗能要小于外梁。 R_1 与 R_2 模型内梁与外梁滞回耗能比值沿楼层的分布趋势大体相同, R_3 与 T_4 模型内梁与外梁滞回耗能比值沿楼层的分布趋势大体相同,说明强度影响了能量在同层梁中的分布的大体趋势,但是局部楼层的差异是由刚度差异引起的。

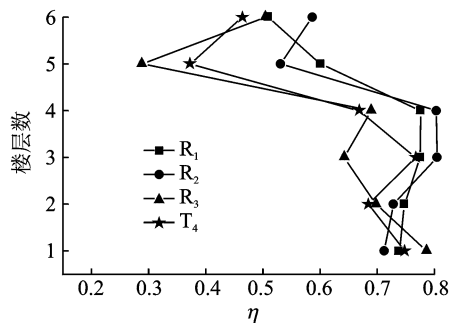


图 8 各层内梁与外梁滞回耗能比

Fig. 8 The ratio of interior to outside beam hysteretic energy dissipation along layers

图 9 为各模型各层边柱与中柱滞回耗能比值的比较。4 个模型各层边柱滞回耗能都小于中柱的滞回耗能,中间层边柱与中柱滞回耗能比值最小,底层边柱与中柱滞回耗能的比值最大。

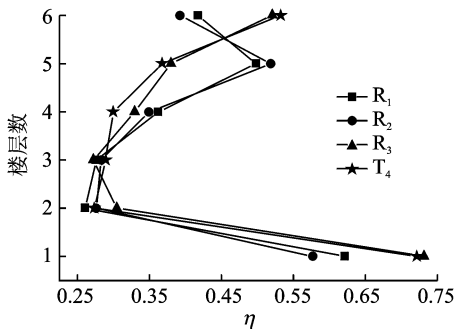


图 9 各层边柱与中柱滞回耗能比

Fig. 9 The ratio of side to central column hysteretic energy dissipation along layers

与各层梁滞回耗能的水平分布一样,各层柱滞回耗能的水平分布规律主要受强度影响,如 R_1 与 R_2 模型梁强度相同、刚度不同,二者各层边柱滞回耗能占中柱滞回耗能的比值相近, R_3 模型与 R_1 、 R_2 模型相比,强度增大,各层柱滞回耗能的水平分布相差较大。在底层,带楼板翼缘的 T_4 模型与考虑强度增大的 R_3 模型比 R_1 、 R_2 模型边柱滞回耗能占中柱滞回耗能的比值要大。

3.4 结构塑性铰分布及出铰时间

研究结构塑性铰分布及出铰时间可以反映结构的耗能转移以及耗能分布。随着地震波的持续输入,结构构件相继屈服或破坏,在 8 度罕遇地震作用下,各模型出铰时间及分布见图 10 所示。

由图 10 可知,按照规范设计的梁柱配筋如果不考虑楼板翼缘作用(R_1 模型),结构梁铰出齐之后才出现柱铰,则按照典型的“梁铰机制”破坏形式;而增大梁刚度的 R_2 模型也按“梁铰机制”破坏,但是五层边柱上端产生了塑性铰,说明梁刚度改变可能产生新的薄弱层。考虑楼板翼缘作用的 T_4 模型在出现几个梁铰之后便在底层形成柱铰,可能按照“柱铰机制”破坏;考虑梁强度增大的 R_3 模型与 T_4 模型相似,很早便在底层形成柱铰,即形成了“强梁弱柱”。对比于表 1,“柱铰机制”表现为梁滞回耗能占总滞回耗能比减小。所有模型首先在底层梁端形成塑性铰,外梁相对于内梁更容易出铰,这是结构受力情况决定的,这也与能量分析的结果相同。塑性铰出铰顺序有从底层梁向上层梁发展的趋势,塑性铰

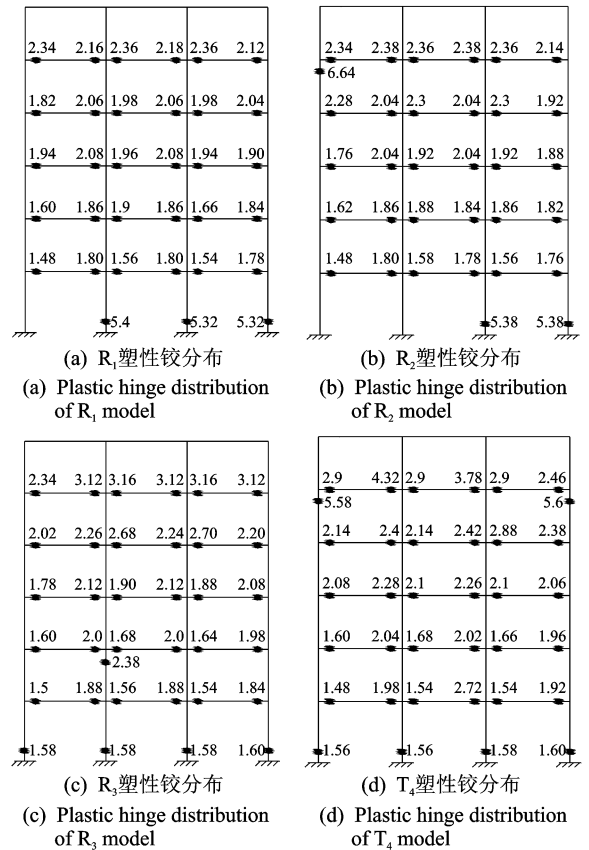


图 10 各模型出铰时间图(单位:s)

Fig. 10 Appearing times of plastic hinges(unit:s)

出铰顺序大体是某层外梁端先产生塑性铰,然后同层内梁端相继出现塑性铰,接着向上层梁发展。

4 结论

1) 考虑楼板翼缘作用使得结构总滞回耗能增加,梁滞回耗能在总耗能中占主导地位。梁刚度的增大使梁耗能占总耗能的比例增加,而梁强度的增大使梁耗能占总耗能比例有所下降;同时考虑楼板刚度和强度增强效应的 T 形梁模型的总滞回耗能最大。

2) 楼板翼缘对于结构滞回耗能沿各层分布的影响主要体现在梁强度的增大,梁刚度的增加会使上层的滞回耗能分布产生突变,底层柱耗能占柱总耗能比例随着梁强度增大而增大,随着梁刚度增大而减小。在各层内内梁滞回耗能小于外梁而边柱滞回耗能小于中柱。

3) 楼板翼缘作用使结构由“梁铰机制”转为按“柱铰机制”破坏,外梁相对于内梁更早出现塑性铰,梁刚度变化可能形成新的薄弱层,使上部楼层柱耗能比例增加,这与结构的能量分析结果一致。

参 考 文 献

- [1] 李杰,刘章军. 随机脉动风场的正交展开方法[J]. 土木工程学报,2008(1):49-53.
Li Jie, Liu Zhangjun. Orthogonal expansion method of random fields of wind velocity fluctuations [J]. China Civil Engineering Journal, 2008(1):49-53. (in Chinese)
- [2] Benavent-Climent A, Zahran R. An energy-based procedure for the assessment of seismic capacity of existing frames: application to RC wide beam systems in Spain [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2010, 30(5): 354-367.
- [3] Lin J L, Tsai K C. Estimation of the seismic energy demands of two-way asymmetric-plan building systems [J]. Building of Earthquake Engineering, 2011, 9(2): 603-621.
- [4] 熊仲明,史庆轩,李菊芳. 框架结构基于能量地震反应分析及设计方法的理论研究[J]. 世界地震工程, 2005, 21(2): 141-146.
Xiong Zhongming, Shi Qingxuan, Li Jufang. Theoretical study on seismic response and design method of frame structures with energy method [J]. World Earthquake Engineering, 2005, 21(2): 141-146. (in Chinese)
- [5] 吕静静. 现浇楼板对钢筋混凝土框架结构抗震性能影响研究[D]. 南京:东南大学,2013.
- [6] 蒋永生,陈忠范,周绪平,等. 整浇梁板的框架节点抗震研究[J]. 建筑结构学报,1994,6:11-16.
Jiang Yongsheng, Chen Zhongfan, Zhou Xuping, et al. A seismic research on RC frame joint of monolithically casted slab [J]. Journal of Building Structures, 1994,6:11-16. (in Chinese)
- [7] 马千里,叶列平,陆新征,等. 现浇楼板对框架结构柱梁强度比的影响研究[C]//汶川地震建筑震害调查与灾后重建分析报告. 北京:中国建筑工业出版社,2008: 263-271.
- [8] 阎红霞,杨庆山,李吉涛. 现浇楼板对钢筋混凝土框架结构在地震作用下破坏形式的影响[J]. 振动与冲击, 2011(7):227-232.
Yan Hongxia, Yang Qingshan, Li Jitao. Influence of cast-in-place floor slab on damage style of frame structures under earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011(7):227-232. (in Chinese)
- [9] 马千里. 钢筋混凝土框架结构基于能量抗震设计方法研究[D]. 北京:清华大学,2009.
- [10] 肖同亮,邱洪兴,孙兰香. 钢-玄武岩纤维复合筋拉压力学性能试验研究[J]. 东南大学学报:自然科学版, 2014(4): 805-810.
Xiao Tongliang, Qiu Hongxing, Sun Lanxiang. Experimental and theory study on the basic tensile and compression mechanical properties of steel-basalt fiber composite bars[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2014(4):805-810. (in Chinese)
- [11] 雷阳,赵楠,魏利金,等. CANNY 软件在非线性动力弹塑性分析中的应用简介[J]. 建筑结构,2012(S2): 224-227.
Lei Yang, Zhao Nan, Wei Lijin, et al. Application of CANNY software in the nonlinear dynamic elasto-plastic analysis [J]. Building Structure, 2012(S2): 224-227. (in Chinese)



第一作者简介:肖同亮,男,1982年1月生,博士、讲师。主要研究方向为混凝土结构抗震性能和新型纤维复合材料等方向的研究。曾发表《钢-玄武岩纤维复合筋混凝土框架结构非线性地震反应分析》(《振动与冲击》2014年第33卷第23期)等论文。

E-mail: xtl@njit.edu.cn

