

引用本文:许巍,梁书亭.错层板柱结构体系振动台试验与分析[J].建筑科学与工程学报,2022,39(2):44-51.

XU Wei, LIANG Shu-ting. Shaking Table Tests and Analysis for Staggered Slab-column Structure System[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2022, 39(2): 44-51.

DOI:10.19815/j.jace.2021.09013

错层板柱结构体系振动台试验与分析

许巍¹, 梁书亭²

(1. 东南大学建筑设计研究院有限公司, 江苏 南京 210096; 2. 东南大学 土木工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要:为研究错层板柱结构的抗震性能, 对一个缩尺比例为 1 : 7 的结构模型进行了振动台试验。试验选取 2 条天然波和 1 条人工波, 对结构模型的自振频率、结构阻尼比、楼层加速度、楼层位移、构件的应变和楼层剪力进行分析, 研究了在不同烈度地震作用下错层板柱结构损伤的发展情况及最终的破坏形态。结果表明:在地震作用下, 错层板柱结构柱端和梁端出现裂缝, 且随着地震烈度的不断增加, 裂缝继续发展, 直至柱端出现塑性铰, 最终在 8 度罕遇地震工况下结构发生了整体倒塌; 错层部位的框架柱受力最为复杂, 且应变水平较高, 在试验过程中破坏最为严重; 随着输入的地震加速度持续增加, 主体结构的损伤不断累积, 结构自振频率不断降低, 结构阻尼比呈增大的趋势; 地震烈度不同时, 错层板柱结构加速度响应的峰值沿楼层分布规律差别较大, 且随着地震烈度的增加, 结构动力放大系数有降低的趋势; 错层板柱结构抗侧刚度较小, 在较低烈度的地震作用下结构层间位移角已经不能满足规范要求; 建议在高烈度区域尽量避免采用错层板柱结构。

关键词:错层; 板柱结构; 振动台试验; 地震响应; 抗震性能

中图分类号: TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2022)02-0044-08

Shaking Table Tests and Analysis for Staggered Slab-column Structure System

XU Wei¹, LIANG Shu-ting²

(1. Architects & Engineers Co., Ltd. of Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China;

2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the seismic performance of staggered slab-column structure, shaking table tests were carried out on a structural model with a scale of 1 : 7. Two natural waves and one artificial wave were selected to analyze the natural frequency, structural damping ratio, acceleration, displacement, member strain and floor shear force of the structural model. The development of damage and final failure mode of staggered slab-column structure under different earthquake intensities were studied. The results show that under the action of earthquake, cracks appear at the column end and beam end of staggered slab-column structure, and with the continuous increase of seismic intensity, the cracks continue to develop until plastic hinges appear at the column end, and finally the whole structure collapses under the condition of 8 degree earthquake. The stress of the frame column at the staggered floor is the most complex, the strain

收稿日期: 2021-09-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(59878013)

作者简介: 许巍(1975-), 男, 江苏盐城人, 工程师, 工学博士, E-mail: 745982556@qq.com。

level is high, and the damage is the most serious in the experimental process. With the continuous increase of the input seismic acceleration, the damage of the main structure accumulates, the natural frequency of the structure decreases, and the damping ratio of the structure increases. When the seismic intensity is different, the peak value of acceleration response of staggered slab-column structure varies greatly along the floor, and the structural dynamic amplification factor tends to decrease with the increase of seismic intensity. The lateral stiffness of staggered slab-column structure is small, and the interlayer displacement angle of the structure can not meet the requirements of the code under the action of low intensity earthquake. Therefore, it is suggested that staggered slab column structure should be avoided to applying in high intensity areas.

Key words: staggered floor; slab-column structure; shaking table test; seismic response; seismic performance

0 引 言

将“板柱”和“错层”2种结构形式组合应用在停车库建筑中,可以有效地提高空间的利用率,产生较大的经济效益。然而这2种结构形式在中国的设计规范中均属于限制使用范围的结构类型^[1-2],错层结构楼板不连续,地震作用在竖向构件之间的分配不满足刚性楼板假定,且由于楼板错层导致错层位置的框架柱为短柱或极短柱,地震作用下易导致框架柱脆性破坏;板柱结构常见于地下室结构,其抗侧刚度较弱,应用于上部结构时在地震作用下也极易发生破坏^[3-6]。

板柱结构的研究重点主要是在竖向荷载作用为主的工作下板柱节点的抗冲切能力^[7-12]以及力学模型提取^[13-17],板柱结构作为上部结构的抗侧力结构体系的研究较少。错层结构的研究重点主要是错层部位的梁柱节点^[18-19]和错层结构在不同应用场景下的抗震性能^[20-28]。

错层板柱结构结合了2种抗震不利的结构类型,其在地震作用下的抗震性能应当引起足够的重视。多种不利因素的耦合也使得理论分析无法全面地把握错层板柱结构的抗震性能,因此对错层板柱结构的试验研究显得尤为重要。目前还未见国内外学者对此类结构类型进行试验研究的相关文献,本研究通过错层板柱结构缩尺模型的振动台试验,测试结构在地震作用下的力学响应和破坏情况,对结构的整体抗震性能展开评价,为此类结构的理论研究提供试验基础。

1 试验概况

1.1 试验模型设计

原型结构为24.0 m×24.0 m的3层错层框架

结构,柱网尺寸为6.0 m×6.0 m,层高2.80 m,错层部位高差为1.40 m,框架梁尺寸为250 mm×600 mm,框架柱尺寸为500 mm×500 mm,楼板厚度均为240 mm。错层部位为3轴线位置,错层部位两侧均为带边梁的板柱结构,板柱节点为45°柱帽,柱帽平面尺寸为1 000 mm×1 000 mm,柱帽高度为250 mm。所在地区的基本加速度为0.1g(g为重力加速度),设计地震分组为第一组,场地类别为Ⅱ类。

考虑试验场地条件,试验缩尺模型的相似常数为1:7,试验模型的结构平法施工图如图1所示。该试验模型的主要特点是在3轴线位置有较大的错层,错层的高差为层高的一半,在错层部位框架柱的剪跨比为0.8,属于极短柱,在地震作用下极易发生脆性破坏。本次试验区别于一般错层结构的另外一个特点是在垂直与错层部位的方向均为板柱结构(边跨除外),板柱结构的节点在水平地震作用下会产生不平衡弯矩,且抗侧刚度较弱。

根据相似理论,试验模型设计时预定参数采用了尺寸相似常数、重力相似常数和弹性模量相似常数。尺寸相似常数 $S_L=1:7$;缩尺试验采用的微粒混凝土弹性模量为7 034.5 MPa,普通混凝土弹性模量为 3×10^4 MPa,则弹性模量相似常数 $S_E=0.2345$;微粒混凝土抗压强度测试值为11.9 MPa,材料强度相似常数 $S_\sigma=0.383$ 。由以上3个参数推算应变相似常数 $S_\epsilon=S_\sigma/S_E=1.617$,因此本次试验缩尺模型属于应变失真模型。其他相似常数的计算结果见表1。

根据表1可知质量相似常数 $S_m=0.00776$,即模型的质量需要达到原始结构质量的0.776%。原始模型的质量为1 246.46 t,试验模型质量为3.146 5 t,因此确定的附加质量为6.527 t。根据原型结构恒载取值为1.5 kPa,活载取值2.5 kPa,按“恒载+

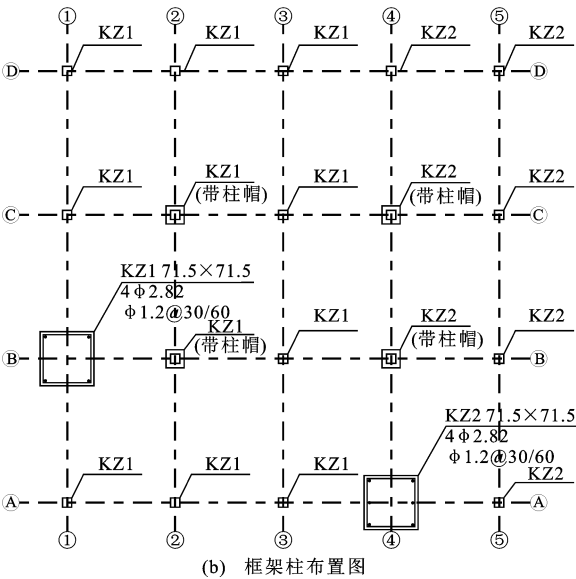
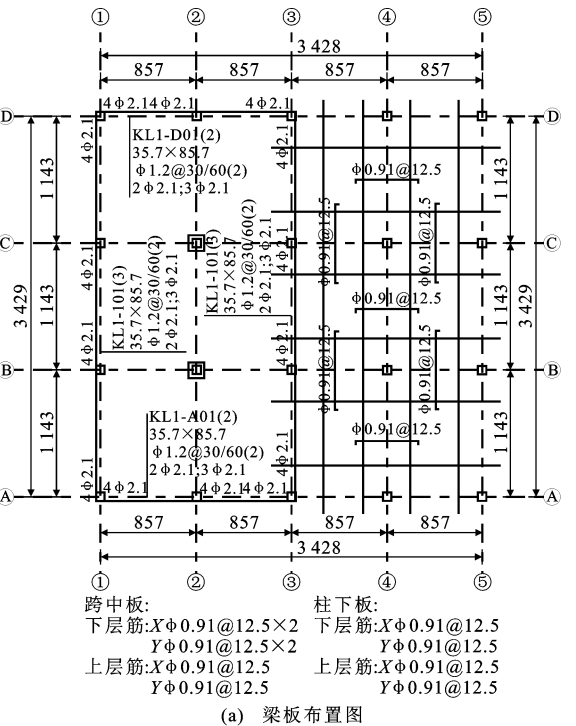


图1 试验模型结构布置(单位:mm)

Fig. 1 Layout of Test Model Structure (Unit:mm)

0.5倍活载”计算附加质量,每一楼层需要配重1 742 kg。附加质量块采用水泥砂浆将质量块固定在模型上,如图2所示。在施加附加质量块后,测量试验模型测点的应力,将其作为振动台试验的初始应力。

1.2 试验测点布置

将7个位移传感器分别布置在错层板柱结构的每一楼层上,编号为D1~D7;在缩尺模型的各楼层以及模型顶部共布置了11个加速度传感器,编号为A1~A11;根据本试验的目的,并综合考虑测量仪

表1 试验模型相似常数

Table 1 Similarity Constant of Test Model

物理特性	物理指标	应力失真强度模型	相似常数
材料特性	应力 σ	S_σ	0.383
	应变 ϵ	S_σ/S_E	1.617
	弹性模量 E	S_E	0.234 5
	质量 m	$S_E S_\epsilon S_L^3$	7.76×10^{-3}
几何特性	长度 l	S_L	0.142 86
	位移 x	$S_L S_\epsilon$	0.231
	角度 θ	1	1
荷载特性	加速度 a	1	1
	速度 v	$S_L^{1/2} S_\epsilon^{1/2}$	0.297 233
	阻尼系数 C	$S_E S_\epsilon^{1/2} S_\epsilon$	0.020 519



图2 振动台试验模型

Fig. 2 Shaking Table Test Model

器的测点数量等因素,共设置了34个镀锌铁丝应变片(SG)测点以及30个微粒混凝土表面(SH)测点。测点具体布置位置及柱编号详见图3。

2 地震波选取及工况设置

2.1 地震波选取

综合考虑试验目的和模型的结构特点等因素,本次试验分别选取El Centro波、Taft波和人工波SHW4三条地震波,地震波参数见表2。

2.2 试验工况设置

试验基本进程为:采用白噪声对模型进行扫频,测出结构的频谱特性;依次输入3条地震波;重新进行白噪声扫频,对比结构试验前后的动力特性,检测模型损伤程度,继续输入下一个工况;如此反复,直至结构破坏倒塌。工况设置如表3所示。

3 试验过程及结果分析

3.1 试验现象

在7度多遇(0.035g)及6度基本(0.05g)地震作用下,试验模型未出现明显的整体晃动,构件表面无裂缝,频谱分析自振频率没有改变。8度多遇

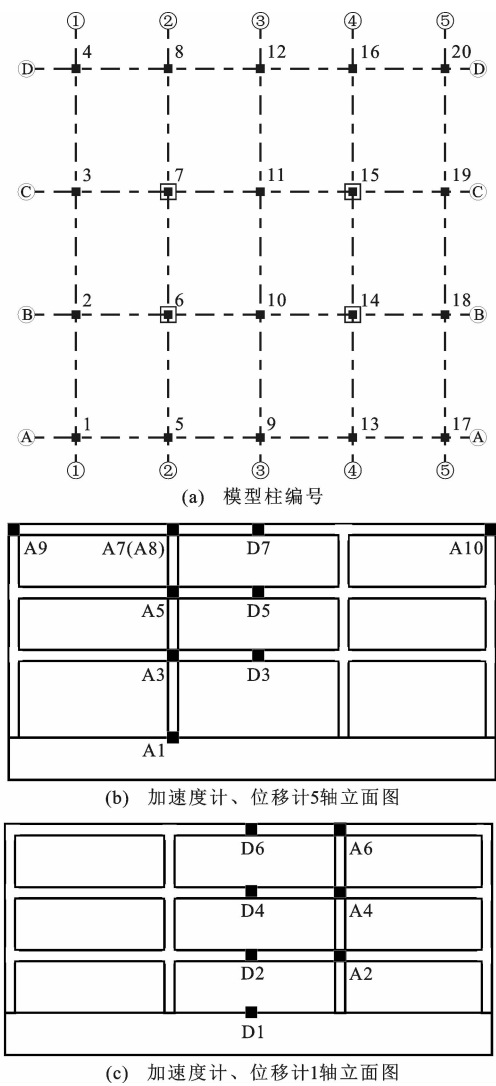


图 3 测点布置

Fig. 3 Arrangement of Measuring Points

表 2 地震波参数

Table 2 Parameters of Earthquake Waves

地震波	持时/s	峰值加速度/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-2}$)	
		X 向	Y 向
El Centro 波	53.73	210.0	341.7
Taft 波	54.38	175.9	152.7
SHW4	50.00	100.0	80.0

(0.07g)及7度基本(0.10g)地震作用下,模型开始出现晃动,自振频率略微降低,模型未见裂缝。7度罕遇(0.22g)地震作用下,模型多处出现裂缝,主要集中在柱端水平方向和梁端垂直方向。随着不同烈度地震波的输入,裂缝逐渐延伸,部分梁端裂缝贯通,出现塑性铰,结构第1阶自振频率持续下降,结构出现明显损伤。为保证测试仪器安全,在8度罕遇(0.4g)地震作用时取下位移传感器,此烈度下结构晃动幅度明显增大,柱端开始出现塑性铰,中间板

表 3 试验加载工况

Table 3 Loading Cases of Test

工况编号	地震波	峰值加速度
1	白噪声	0.020g
	El Centro 波、Taft 波、SHW4	0.035g
2	白噪声	0.020g
	El Centro 波、Taft 波、SHW4	0.050g
3	白噪声	0.020g
	El Centro 波、Taft 波、SHW4	0.070g
4	白噪声	0.020g
	El Centro 波、Taft 波、SHW4	0.100g
5	白噪声	0.020g
	El Centro 波、Taft 波、SHW4	0.140g
6	白噪声	0.020g
	El Centro 波、Taft 波、SHW4	0.220g
7	白噪声	0.020g
	El Centro 波、SHW4	0.400g
8	白噪声	0.020g
	El Centro 波	0.620g

柱节点的柱端和外周框架均出现混凝土剥落,底层边柱出现一处钢丝鼓曲。在8度罕遇(0.4g)烈度加载前撤除了全部测试设备,此时结构晃动幅度巨大,底层柱顶全部出现塑性铰,随后底层柱底出现塑性铰,结构整体倒塌。结构破坏形态如图4所示。

3.2 试验结果分析

3.2.1 结构动力特性

采用白噪声对缩尺模型进行扫频得到各级加载前结构自振频率和阻尼,如图5所示。随着结构损伤不断累积,结构刚度减小,自振频率逐渐降低,结构阻尼提高。第4个工况加载前结构自振特性变化不大,结构虽然已出现裂缝,但损伤不大。第6个工况加载后,第1阶自振频率出现较大变化,说明结构出现了明显的损伤。最后一个工况开始前,结构模型的自振频率下降到了3.5 Hz,相比初始自振频率下降了44%。

3.2.2 结构加速度

根据各楼层在不同烈度地震作用下的加速度响应值,可以计算出各楼层的加速度放大系数,其结果见图6,其中,a为峰值加速度。由图6可知:相同烈度的地震作用时,人工波下结构的加速度响应明显要大于其他地震波所引起的结构加速度响应。各楼层峰值加速度a随地震烈度的增加不断增加,但加速度放大系数增长不明显,甚至有所降低。主要原因是随着地震烈度增加,结构进入塑性,阻尼比增加,减小了结构的动力响应。结构模型第2层的峰

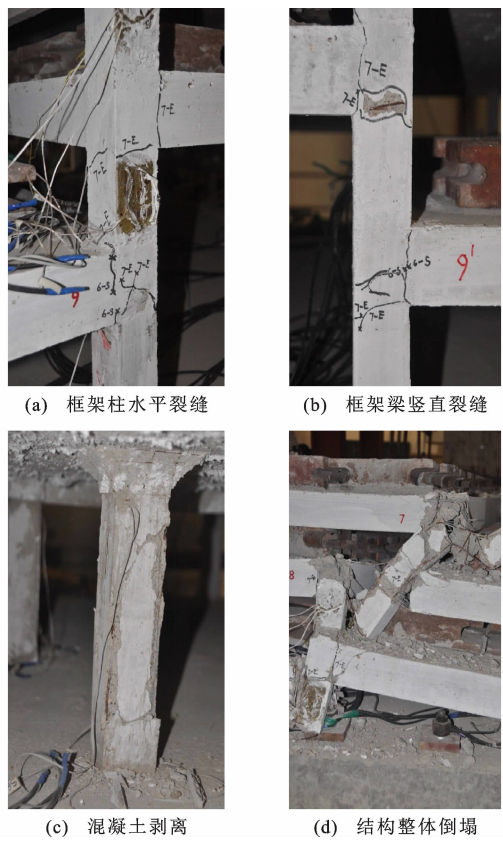


图 4 结构破坏形态

Fig. 4 Failure Patterns of Structure

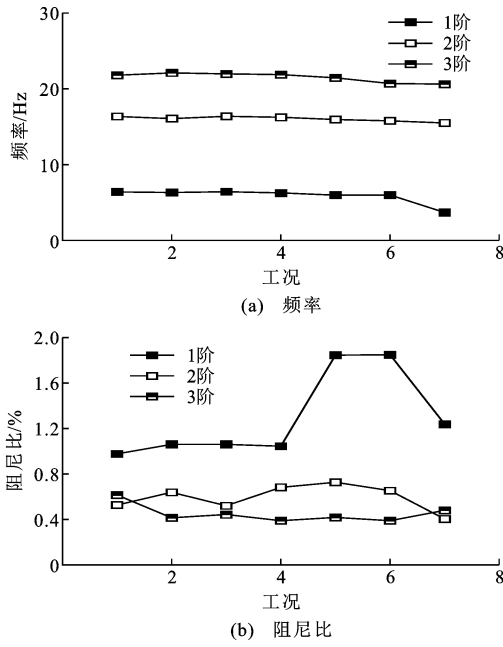


图 5 模型结构动力特性

Fig. 5 Dynamic Characteristics of Model Structure

值加速度要远高于上下两层,成为模型结构中加速度包络曲线的一个凸点,形成结构薄弱层。此现象的原因是由于错层柱的存在,结构错层两边的结构动力反应存在差别,而第 2 层的层高要高于其他楼

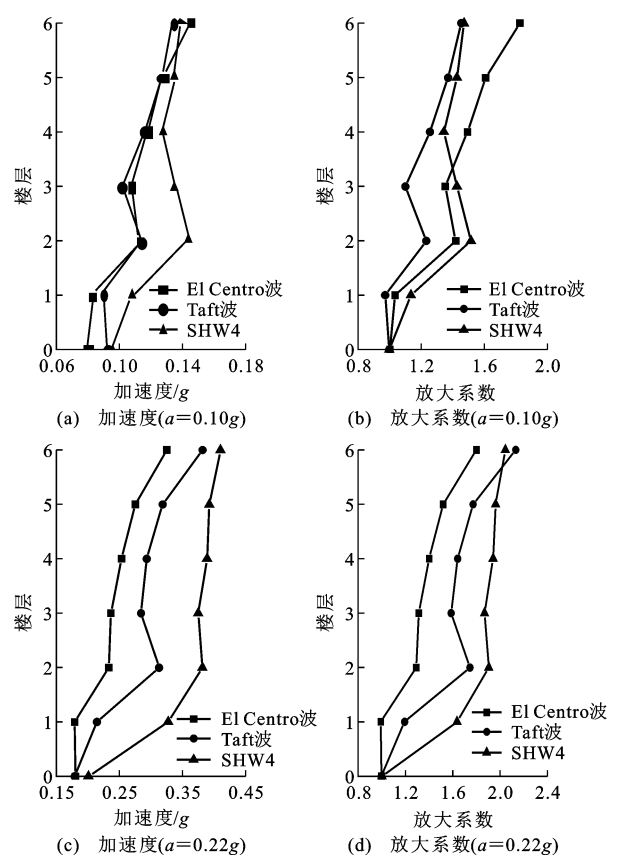


图 6 加速度包络图与加速度放大系数图

Fig. 6 Acceleration Envelope Diagram and Acceleration Amplification Coefficient Diagram

层,结构柱的长度较长,造成地震反应较大。

3.2.3 结构位移

图 7 为试验模型在不同烈度地震作用下的最大层间位移角。7 度基本($0.1g$)地震作用下,模型出现最大层间位移的位置从第 5 层变成了第 3 层,原因是由于模型下部楼层出现了较大的损伤,抗侧刚度降低造成了层间位移的突然增大。

由于错层的存在,错层两边结构各楼层最大位移出现的时间差距为 0.1 s 左右,此差异使得错层柱的受力更为复杂。7 度多遇($0.035g$)地震作用下结构的最大层间位移角已经超过《建筑抗震设计规范》中规定的层间位移角限值 $1/550$,主要原因是错层柱缺乏框架梁的约束,层间位移角峰值偏大。7 度罕遇($0.22g$)地震时,人工波作用下结构的层间位移角约为 $1/100$,小于弹塑性层间位移角限值 $1/50$,满足规范的要求。

3.2.4 结构应变

本次试验所测得的结构应变主要以镀锌铁丝和微粒混凝土应变为主(图 8)。由试验结果可以看出,在结构出现明显损伤之前,结构的应变基本没有

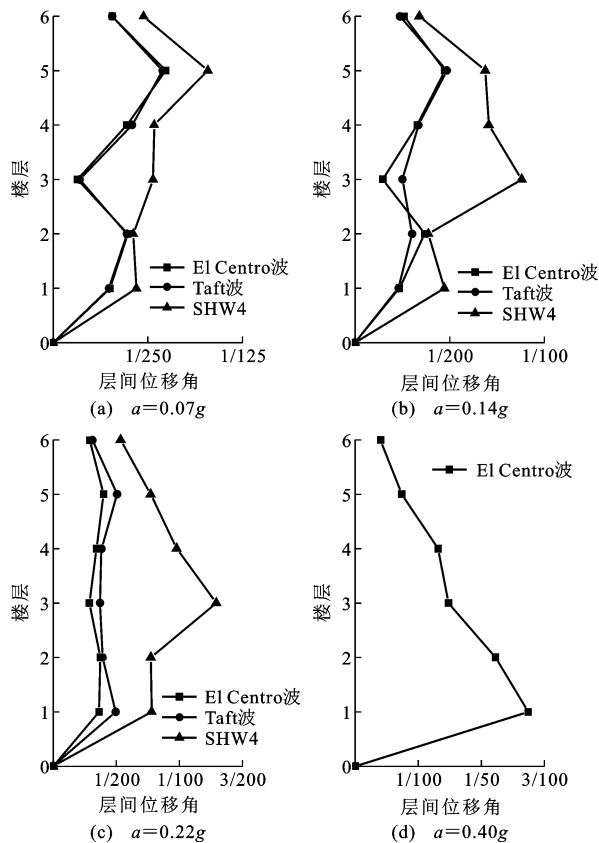


图 7 模型结构最大层间位移角响应

Fig. 7 Maximum Interlayer Displacement Angle of Model Structure

什么变化,7度罕遇(0.22g)地震时,Taft波加载完成后结构底层出现塑性铰,不同地震波下的最大应变变化趋势开始出现不一致。错层板柱结构中的普通框架柱的应变较小,其中框架中柱的应力略大于框架边柱,错层柱的受力最为复杂,其变形以弯曲变形为主,其应变也高于其他结构柱。板柱节点对应的结构柱底层应变最大,损坏最严重,设计中应重点关注。

3.2.5 结构剪力

根据试验中测得的加速度时程数据,可以计算出各楼层剪力的分布情况(图 9)。根据试验结果可以看出,在各加载工况作用下,人工波的楼层剪力均明显大于其他地震波作用下的楼层剪力。在 7 度罕遇(0.22g)地震工况作用下,3 条地震波的楼层剪力响应差别较大,这是因为 7 度罕遇地震作用时模型已经发生了较大的损伤,并且在 3 条地震波的先后作用下损伤持续积累,导致 3 条地震波分别加载时,结构已经发生的损伤程度并不相同,从而影响了模型的加速度响应,最终导致计算出的楼层剪力分布存在较大的差异。

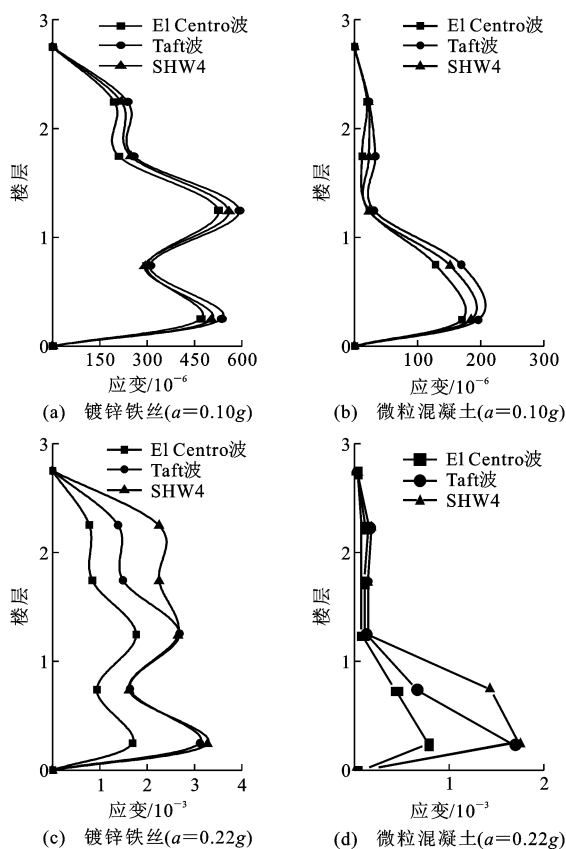


图 8 模型结构应变包络图

Fig. 8 Strain Envelope Diagram of Model Structure

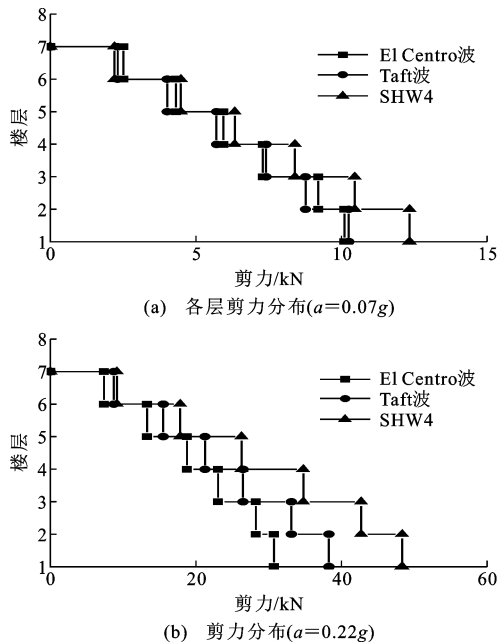


图 9 楼层剪力分布图

Fig. 9 Shear Forces Distribution of Floors

4 结 语

(1)7 度罕遇地震工况加载完成后,主体结构开

始出现损伤,结构的基频降低了 44%。8 度罕遇地震工况加载完之后,主体结构出现明显的损伤,部分结构柱被压碎,结构最终倒塌。因此在 8 度及更高的设防烈度区不建议采用错层板柱结构。

(2)不同烈度地震工况作用下,错层板柱结构的加速度响应随楼层分布规律不尽相同,随着地震烈度的不断增加,主体结构的损伤程度不断加剧,结构刚度降低,在地震作用下楼层加速度响应的放大系数不断减小。

(3)下部楼层的最大层间位移角在较小的地震烈度作用时已经超过了抗震规范的限值,应采取措施确保结构的刚度,比如增加剪力墙等抗侧力结构构件。

(4)普通框架柱发生的应变较小且中柱应力大于边柱,而错层柱受力复杂且应变较大。试验过程中,底层板柱节点对应的结构柱应力大且破坏最为严重,当其顶端也出现塑性铰后,结构柱发生了断裂,并最终导致结构出现倒塌。

参考文献:

References:

- [1] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
Code for Seismic Design of Buildings:GB 50011—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press,2010.
- [2] 谢靖中,李国强,屠成松. 错层结构的几点分析[J]. 建筑科学,2001,17(1):35-37,41.
XIE Jing-zhong, LI Guo-qiang, TU Cheng-song. Analytical Study on Staggered Floor Structure[J]. Building Science,2001,17(1):35-37,41.
- [3] ROBERTSON I,JOHNSON G. Cyclic Lateral Loading of Nonductile Slab-column Connections[J]. ACI Structural Journal,2006,103(3):356-364.
- [4] STEIN T,GHALI A,DILGER W. Distinction Between Punching and Flexural Failure Modes of Flat Plates[J]. ACI Structural Journal,2007,104(3):357-365.
- [5] RHA C,KANG T H K,SHIN M,et al. Gravity and Lateral Load-carrying Capacities of Reinforced Concrete Flat Plate Systems[J]. ACI Structural Journal,2014,111(4):753-764.
- [6] 毛蓉萍. 错层建筑在汶川地震中受损分析[J]. 工程力学,2010,27(增 1):118-121.
MAO Rong-ping. Split-level Building Damaged in Wenchuan Earthquake Analysis[J]. Engineering Mechanics,2010,27(S1):118-121.

- [7] 郭楠,郭轶宏,杨颖伟. 板柱-剪力墙结构适用高度研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2011,27(1):79-83.
GUO Nan, GUO Yi-hong, YANG Ying-wei. Study of Suitable Height of Slab-column and Shearwall Structure [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science),2011,27(1):79-83.
- [8] FICK D R,SOZEN M,KREGER M E. Cyclic Lateral Load Test and the Estimation of Elastic Drift Response of a Full-scale Three-story Flat-plate Structure [J]. ACI Special Publication,2014,296:1-14.
- [9] LIU J R,TIAN Y,ORTON S L,et al. Resistance of Flat-plate Buildings Against Progressive Collapse. I: Modeling of Slab-column Connections[J]. Journal of Structural Engineering,2015,141(12):04015053.
- [10] 赵晋,易伟建,朱泽华. 板柱节点冲切破坏后受力性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(7):35-42.
ZHAO Jin, YI Wei-jian, ZHU Ze-hua. Experimental Research on Post-punching Behavior of Slab-column Connections[J]. Journal of Building Structures,2015,36(7):35-42.
- [11] 扶长生,吕西林,康婧. 柱支承双向板及板柱节点的设计与研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(2):98-106.
FU Chang-sheng, LU Xi-lin, KANG Jing. Study and Design of Column-supported Slab and Its Connection [J]. Journal of Building Structures,2009,30(2):98-106.
- [12] RITCHIE M,GHALI A,DILGER W,et al. Unbalanced Moment Resistance by Shear in Slab-column Connections: Experimental Assessment [J]. ACI Structural Journal,2006,103(1):74-82.
- [13] CHOI K K,SHIN D W,PARK H G. Shear Strength Model for Slab-column Connections Subjected to Unbalanced Moment[J]. ACI Structural Journal,2014,111(3):491-502.
- [14] DRAKATOS I S,MUTTONI A,BEYER K. Internal Slab-column Connections Under Monotonic and Cyclic Imposed Rotations[J]. Engineering Structures,2016,123:501-516.
- [15] HAN S W,PARK Y M,KEE S H. Stiffness Reduction Factor for Flat Slab Structures Under Lateral Loads[J]. Journal of Structural Engineering,2009,135(6):743-750.
- [16] MIRZAEI Y. Post-punching Behavior of Reinforced Concrete Slabs [D]. Lausanne: Cole Polytechnique Fédérale de Lausanne,2010.
- [17] 吴强,程文灏. 水平力作用下板柱结构等代梁计算宽度的研究[J]. 工业建筑,2004,34(3):77-79.

- WU Qiang, CHENG Wen-rang. Study of Calculating Width of Equivalent Beam for Slab-column Structure Subjected to Horizontal Forces[J]. Industrial Construction, 2004, 34(3): 77-79.
- [18] 许成祥, 郭 骁, 樊鸿博, 等. 基于 OpenSees 的钢管混凝土柱-钢梁错层节点抗震性能有限元分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(11): 4478-4484.
- XU Cheng-xiang, GUO Xiao, FAN Hong-bo, et al. Finite Element Analysis on Seismic Behavior Column-steel Beam Staggered Joints of Concrete-filled Steel Tube Based on OpenSees[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(11): 4478-4484.
- [19] 曹 赫, 刘庆文. 错层框架结构节点垂直加腋抗震性能分析[J]. 南昌航空大学学报(自然科学版), 2019, 33(1): 80-85.
- CAO He, LIU Qing-wen. Seismic Performance Analysis of Staggered Floor Frame Structure with Vertical Haunch Connections [J]. Journal of Nanchang Hangkong University (Natural Sciences), 2019, 33(1): 80-85.
- [20] 魏 巍, 郭 喜, 喻德建. 错层框架结构考虑二阶效应的设计方法[J]. 重庆大学学报, 2019, 42(11): 29-37.
- WEI Wei, GUO Xi, YU De-jian. The Design Method of Staggered Frame Structure Considering the Second-order Effect [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(11): 29-37.
- [21] 龙锦添, 陈 瑶, 王 辉, 等. 局部错层框架结构混合减震分析[J]. 结构工程师, 2018, 34(5): 58-65.
- LONG Jin-tian, CHEN Yao, WANG Hui, et al. Seismic Performance Analysis of Staggered Floors in Frame Structures [J]. Structural Engineers, 2018, 34(5): 58-65.
- [22] 王 硕. 对错层处形成短柱的框架结构抗震性能分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- WANG Shuo. Analysis of the Seismic Performance of the Frame Structure of Short Column to Form Staggered[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [23] 毛莹莹. 错层结构动力特性及抗震性能研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
- MAO Ying-ying. The Research of Dynamic Characteristics and Seismic Performance of Split-level Structure [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2009.
- [24] 徐自国, 黄小坤, 高 杰, 等. 高烈度地区高层建筑错层剪力墙结构抗震性能分析[J]. 建筑结构, 2012, 42(4): 69-74.
- XU Zi-guo, HUANG Xiao-kun, GAO Jie, et al. Aseismic Performance Analysis on a Shear-wall High-rise Structure with Staggered Floors in High Earthquake Intensity Regions [J]. Building Structure, 2012, 42(4): 69-74.
- [25] 杨 彬. 高层建筑结构中极短柱抗震性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2016.
- YANG Bin. Research on Seismic Performance of High-rise Building Structure with Ultra Short Columns [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2016.
- [26] 徐张伟. 多高层错层结构受力性能研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2017.
- XU Zhang-wei. Research on Performance of High-rise Building with Staggered Floors [D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2017.
- [27] 曹 赫. 钢筋混凝土错层框架结构抗震性能分析[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2019.
- CAO He. Seismic Performance Analysis of RC Frame Structure with Staggered Floor [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2019.
- [28] 王志军, 韩风霞. 地震作用下考虑分布质量的错层框架错层区域剪力分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(7): 91-95.
- WANG Zhi-jun, HAN Feng-xia. Shearing Force Analysis of Split-level Region for a Split-level Structure with Uniform Mass Distribution Under Earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(7): 91-95.