傅朱奕,李双江,田石柱.基于混合试验边界条件的高层钢框架结构反弯点变化规律研究[J].地震工程学报,2026,48(6):1349-1357.DOI:10.20000/j.1000-0844.20250409002
Fu Zhuyi, LI Shuangjiang, Tian Shizhu. Variation in inflection point positions in high-rise steel frame structures based on hybrid test boundary conditions[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2026, 48(6): 1349-1357. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20250409002

基于混合试验边界条件的高层钢框架结构反弯点变化规律研究

傅朱奕[1], 李双江[2], 田石柱[1]
(1.苏州科技大学 土木工程学院,江苏 苏州 215011;
2.苏州科技大学 地震工程研究中心,江苏 苏州 215011)

摘要:针对振动台子结构混合试验中边界条件模拟的复杂性,基于反弯点法开展高层钢框架结构强非线性阶段反弯点位置变化规律研究。通过建立基于SAC-Benchmark模型的钢框架有限元模型,结合核密度估计方法,系统分析地震动参数(峰值加速度、波形特征、时域加载历程)对框架柱反弯点高度比的影响机制。结果表明:随地震动强度增大,底层角柱反弯点高度呈现显著上移趋势,而中高层柱体迁移幅度较小且符合规范预测规律;不同波形特征对反弯点分布规律产生差异化影响,短时强震波会加剧数据离散性并引发位置波动;时域加载过程中高频脉冲分量显著改变反弯点集中特性,导致多峰分布现象。研究揭示了强震作用下结构非线性阶段反弯点动态迁移规律,为振动台混合试验中基于反弯点的边界条件简化方法提供理论依据,有效降低了试验系统对复杂边界条件的控制需求。

关键词:抗震混合试验;振动台混合试验;高层钢框架;OpenSees;反弯点
中图分类号:TU973+13,TU317 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-0844(2026)06-1349-09
DOI:10.20000/j.1000-0844.20250409002

Variation in inflection point positions in high-rise steel frame structures based on hybrid test boundary conditions

Fu Zhuyi[1], LI Shuangjiang[2], Tian Shizhu[1]
(*1.School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China;*
2.Earthquake Engineering Research Center, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, China)

Abstract: To address the complexity of boundary condition simulation in shaking table substructure hybrid tests, this study investigates the variation in inflection point positions in high-rise steel frame structures during the strongly nonlinear stage using the inflection point method. A finite element model of a steel frame based on the SAC Benchmark model was established, and the kernel density estima-

收稿日期:2025-04-09
第一作者简介:傅朱奕(2001-),男,硕士,主要从事抗震混合试验研究。E-mail: 18962981093@163.com。
通信作者:田石柱(1962-),男,博士,教授,主要从事结构实验方法与技术、结构振动控制研究。
E-mail: tianshizhu@mail.usts.edu.cn。

tion method was employed to systematically analyze the influence of seismic ground motion parameters (peak acceleration, waveform characteristics, and time-domain loading history) on the height ratio of inflection points in frame columns. The results show that with increasing seismic intensity, the inflection point height of corner columns on lower floors exhibits a pronounced upward migration trend, whereas the migration amplitude of mid- to high-rise columns is relatively small and conforms to code-predicted patterns. Different waveform characteristics exert differentiated effects on the distribution of inflection points: short-duration strong-motion waves exacerbate data dispersion and induce positional fluctuations. During time-domain loading, high-frequency pulse components markedly alter the concentration characteristics of inflection points, leading to multimodal distribution phenomena. This study reveals the dynamic migration pattern of inflection points in the nonlinear stage of structures under strong earthquakes, providing a theoretical basis for the simplified boundary condition method based on inflection points in shaking table hybrid tests and effectively reducing the control requirements of the test system for complex boundary conditions.

Keywords: seismic hybrid test; shaking table hybrid test; high-rise steel frame; OpenSees; inflection point

0 引言

振动台子结构混合试验方法[1-3]将混合试验理论应用于地震模拟振动台试验中,将大型结构在地震动下破坏较为严重的强非线性部分置于振动台上进行大比例模型试验,而其余破坏较小的线弹性部分则实时计算结构振动响应,两者耦合进而形成完整的混合试验。该方法能显著拓展振动台试验能力,缩小尺寸效应、配重不足等负面因素对试验结果真实性的影响,是当今前沿的抗震试验研究方向。

振动台混合试验中的试验子结构常选取实际工程中易破坏的强非线性区域,子结构边界往往具有复杂的边界位移和内力条件,利用现有试验条件令其完全复现可能性极低,且暴露出的多个边界自由度也难以控制,需进行自由度缩减与边界条件简化。针对常规线弹性结构,Mosqveda等[4]首先利用反弯点法进行混合试验的边界条件加载,克服了控制边界处的刚性轴向和旋转变形的困难。在此基础上,Wang等[5]提出了重叠域的概念,将边界条件缩减后的反弯点区域称为重叠域,并在试验子结构与计算子结构中同时添加控制因子,实现两者之间的耦合。之后,Hashemi等[6]等在重叠域理论技术基础上提出一种改进的子结构技术,在减小作动器数量的同时增强传感器反馈,显著提升结构大变形阶段的模拟精度。王涛等[7]总结了基于重叠域概念的柔性加载方法,提出了一种力-位移混合控制加载方式,即一个系统中既有位移控制模式又有力控制模式,使得以线弹性结构为基准的反弯点边界自由度缩减方法得到一定的研究支撑。针对结构非线性区域,王婧[8]基于反弯点法边界自由度缩减技术,通过试验单元转动自由度模拟与重叠域相互作用分析,实现了复杂边界条件的高效简化与协同加载验证。徐天鸿等[9]通过OpenSees数值模拟与振动台试验的双重验证,揭示了强震作用下反弯点高度比随结构损伤累积的演变规律。蔡泽文等[10]则是通过控制框架结构柱轴压比、长细比、梁柱线刚度比等因素,综合研究框架结构非线性阶段的反弯点位置变化规律。

以上应用反弯点简化边界条件的研究多针对试验设计结构模型,及结构线弹性小变形阶段,而对于复杂的实际工程结构模型,当其进入强非线性阶段时,尚缺乏强有力的研究支撑。将反弯点法系统应用于振动台混合试验中仍需解决以下因素带来的反弯点动态迁移问题,包括:随底部激励增大,结构逐步进入弹塑性带来的刚度退化;随边界选取位置变化带来的非线性增强;随加载时域变化带来的结构损伤积累。本文重点研究不同频谱特性、能量级别及加载时域变化下,大型工程结构地震时程加载时反弯点位置动态迁移规律,为振动台混合试验方法应用于实际复杂工程结构提供理论支撑。

1 基于反弯点的边界内力场简化法

当水平力作用于框架时,梁柱节点的刚性连接

形成连续弯矩传递路径，随着荷载沿结构高度方向逐层累加，柱体弯矩分布呈现线性变化特征，最终在柱高某一特定位置形成弯矩为0的点，称之为反弯点。根据规范规定，一般选取结构一层高度比0.6左右的位置，二层及以上选取柱中位置，如图1所示。

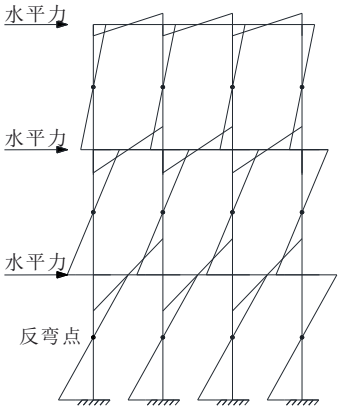


图1　框架结构反弯点示意图

Fig. 1　Schematic diagram of inflection points in a frame structure

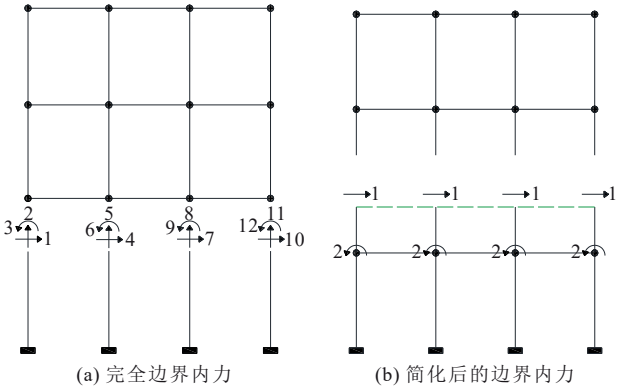
在振动台混合试验中，为了充分发挥地震模拟振动台的试验性能，常将试验子结构选取为塑性形变较为明显的结构底层区域，而余下结构的地震响应则通过边界条件施加在试验子结构上。结构边界采用轴力、剪力及弯矩的结构恢复力控制，为简化模拟，通过层间平面无限刚假定将各结构柱不同的内力简化为统一的层间内力。对于钢框架结构，由于柱的轴压比普遍较小，其恢复力特性主要由弯曲变形主导。在低轴压比条件下，结构柱的滞回曲线呈现较为稳定的双线性特征，轴向力对恢复力特性的影响相对有限，可合理忽略轴力模拟对试验结果的影响。对于剪力和弯矩的简化，则利用反弯点法，将层底柱端弯矩与剪力转化为反弯点处的剪力，利用弯矩传递特性简化对柱端弯矩的模拟，自由度简化过程如图2所示。

2　非线性结构及分析方法

2.1　高层框架结构选取

为研究实际工程结构非线性阶段反弯点变化规律，本文采用地震时程反应中结构底层非线性较为明显的高层钢框架结构。

结构模型参考了20层的Benchmark钢框架模型[11]进行分析，它是美国加利福尼亚结构工程师协会（Structural Engineers Association of California，SAC）在美国加州洛杉矶设计的真实结构，可以代表典型的中、高层钢框架建筑，Ⅲ类场地，设防烈度为8度。结构平面尺寸为36.6 m（长）×30.5 m（宽），总高为80.77 m，南北方向5跨，东西方向6跨，跨度均为6.1 m。原结构地上20层，除首层层高为5.49 m外，其它层均为3.96 m。地下2层，每层层高3.65 m，由于本研究不考虑土体相互作用，即忽略地下两层结构，将第一层柱底均改为固接，整体结构模型如图3所示。结构除角柱外均采用不同截面型号的宽翼缘工字钢，角柱为ASTM A500箱型柱。结构柱的钢材屈服强度均为345 MPa，框架梁的材料屈服强度为248 MPa。楼板选用钢-混凝土组合楼板，满足平面内刚度无穷大假定，梁柱连接均采用刚接。层间质量采用均布质量并施加在节点上，总的层间质量为：1层532 t、2层565 t、3～19层均为551 t、顶层屋面583 t。



(a) 完全边界内力　　(b) 简化后的边界内力

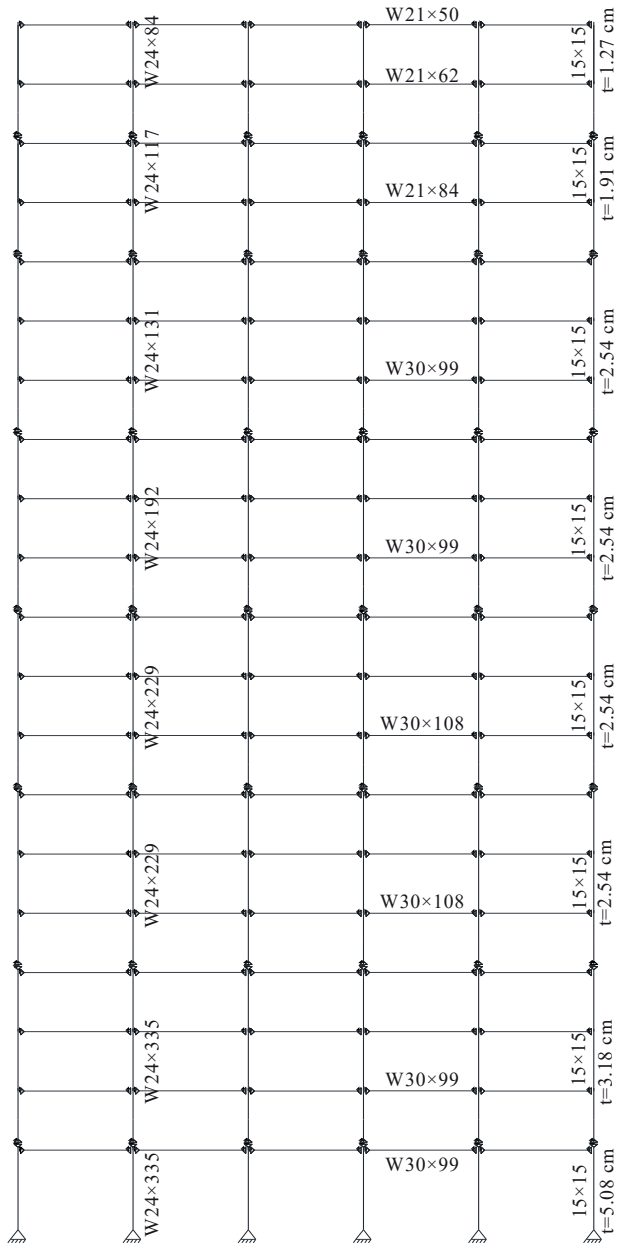
图2　边界内力简化过程

Fig. 2　Simplification process of internal forces at boundaries

2.2　有限元建模

建模软件采用OpenSees软件进行地震时程分析，弹塑性梁柱单元采用nonlinearBeamColumn单元模型，每个单元有9个高斯积分点，截面采用纤维截面划分，具体的划分细节如图3所示。在有限元分析流程中，先利用商业建模软件ETABS进行整体结构线单元建立与结构质量定义，将结构每层的质量作为质量源赋予模型，之后将整体结构模型参数录入OpenSees软件中。

钢材采用Filippou等[12]修正的Giuffré-Menegotto-Pinto钢筋滞回本构模型（简称MP模型），材料参数列于表1。MP模型滞回曲线方程为：



(a) 南北向竖剖面图

(b) 层间平面图 (c) 箱型截面 (d) 工字型截面

图 3 竖剖面图、平面图及纤维截面图

Fig. 3 Longitudinal section, plan view, and fiber section

$$\sigma^* = b\varepsilon^* + \frac{(1-b)\varepsilon^*}{[1+(\varepsilon^*)^R]^{1/R}} \tag{1}$$

式中：$b=E_1/E_0$表示应变硬化率，E_0和E_1分别表示钢材的初始弹性模量和硬化模量；σ^*和ε^*分别为正则化钢材应力和应变；R为过度参数，表达如下：

$$R = R_0 - \frac{a_1\xi}{a_2+\xi} = R_0\left(1-\frac{CR_1\xi}{CR_2+\xi}\right) \tag{2}$$

式中：R_0、a_1和a_2为根据试验测定的材料参数，在OpenSees软件中一般采用$R_0=10\sim20$，$CR_1=0.925$，$CR_2=0.15$；ξ为循环应变差。

$$\sigma^* = \frac{\sigma-\sigma_r}{\sigma_0-\sigma_r} \tag{3}$$

$$\varepsilon^* = \frac{\varepsilon-\varepsilon_r}{\varepsilon_0-\varepsilon_r} \tag{4}$$

式中：σ_r和ε_r分别为应变反转点的应力和应变；σ_0和ε_0分别为弹性渐近线和屈服渐近线交点的应力和应变。

表 1 MP模型选用的结构钢材参数

Table 1 Structural steel parameters adopted in MP model

构件	v	$E/(\times10^5$ MPa)	F_y/MPa	b	R_0	CR_1	CR_2
梁	0.30	2.06	248	0.01	18	0.925	0.15
柱	0.30	2.06	345	0.01	18	0.925	0.15

在仅考虑X方向平动模态的情况下，ETABS线弹性铁木辛柯梁柱单元结构参数、OpenSees非线性梁柱单元结构参数及参考资料原结构[13]参数列于表2。由于对原结构层数与层间质量的改动，修改后的结构模态参数产生了一定的变化。原Benchmark模型结构的结构柱在上下段接头处为变截面，接头位置距下层楼板1.83 m，接头处抵抗水平力产生的弯矩与竖向荷载。本文为研究混合试验边界模拟反弯点法，参考模型忽略变截面的影响，每层结构柱均为等截面，设置接头位置于每层楼板处，且为刚性连接，带来了一定的模型刚度变化。ETABS模型与OpenSees模型模态参数之间有5%左右的差异，误差来源于前者基于位移法且采用集中塑性铰模型，后者基于柔度法且采用分布塑性模型。由于OpenSees的非线性模型更接近真实情况，因此可认为所带来模态参数差在合理范围内。

2.3 反弯点高度比分析方法

通过有限元软件进行地震时程分析，得到构件杆端弯矩，以此计算无量纲的反弯点高度比y_0，计算公式为：

$$y_0 = \frac{M_{bi}}{M_{bi}+M_{ai}} \tag{5}$$

式中：M_{bi}为第i层柱底部弯矩；M_{ai}为第i层柱顶部弯矩。

表 2　结构模态参数对比（单位：Hz）

Table 2　Comparison of structural modal parameters (unit: Hz)

	1阶	2阶	3阶	4阶	5阶	6阶
文献[13]	0.261	0.753	1.30	1.83	2.40	2.8
ETABS	0.308	0.844	1.40	2.13	2.66	3.10
OpenSees	0.323	0.886	1.47	2.06	2.82	3.34

由于地震时程反应及OpenSees数据处理的特殊性，结构的恢复力将以每个时间步对应参量的形式输出，这将导致y_0值在一定范围内波动，本文利用核密度估计来表示每一地震波步长累计下的结构反弯点高度比变化，其中核密度峰值对应的y轴坐标值表示数据集中程度，x轴坐标值表示最大集中度下的y_0值。

核密度估计（Kernel Density Estimation，KDE）是一种非参数方法，用于估计随机变量的概率密度函数。它的核心思想是用核函数平滑数据点的分布，从而得到连续的概率密度估计，数学表达式为：

$$f(x)=\frac{1}{nh}\sum_{i=1}^{n}K\left(\frac{x-X_i}{h}\right) \tag{6}$$

式中：X_i为独立同分布观测样本（$i=1,\cdots,n$）；$K(\cdot)$为核函数（需满足$\int K(u)\mathrm{d}u=1$且对称）；h为控制平滑程度的带宽参数且大于0。

在本文使用的核函数类型为高斯核，数学表达式为：

$$K(u)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}}\mathrm{e}^{-\frac{u^2}{2}} \tag{7}$$

3　框架柱反弯点位置影响因素分析

由于SAC-Benchmark模型本身结构设计合理，且符合《建筑抗震设计规范（GB 50011—2001）》[14]中对结构轴压比、长细比等设计参数的规定，各层梁柱线刚度比遵循“强柱弱梁”的基本抗震理念，因此仅从与振动台混合试验中强相关的试验控制因素进行研究分析。框架柱反弯点位置与线弹性假定下的预测值发生偏差，主要以下列三方面因素作为研究方向：（1）试验子结构选取带来的边界位置差异；（2）地震模拟振动台施加基底加速度带来的地震波波形差异和能量差异；（3）结构时变刚度特性导致的非线性响应累积，具体表现为随试验进程发展的塑性损伤演化对构件刚度产生的退化效应。

3.1　边界位置

以El-Centro波为基准进行峰值地面加速度（Peak Ground Acceleration，PGA）调幅（以下简称El波），调幅准则依据振动台混合试验需求。为保持原始波频谱特征，且逐步放大或缩小振动的能量级，按照幅值线性调幅方法，将一倍的El波峰值加速度及以下认为是线弹性的多遇小震作用，而大于一倍El波的时程加载认为是结构部分进入弹塑性的罕遇大震作用，图4为结构一层角柱在不同PGA下的弯矩-曲率图。

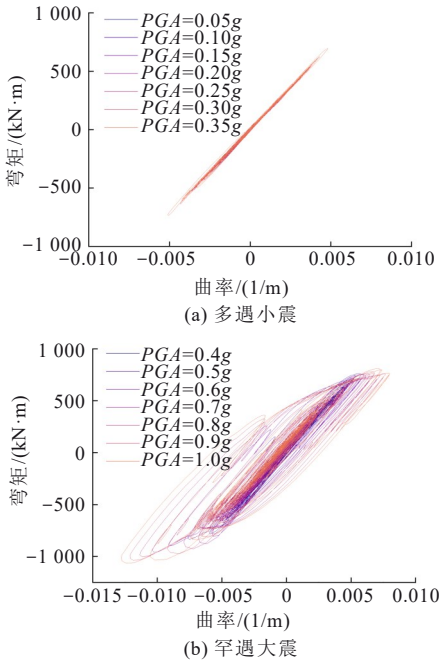


图4　一层角柱弯矩-曲率图

Fig. 4　Moment-curvature diagram of first-story corner column

将$PGA=0.3g$作为多遇小震标准，$PGA=0.8g$作为罕遇大震标准，进行反弯点高度比的核密度估计。

在小震情况下，概率密度数据集中程度极高，且符合抗震规范中结构处于线弹性状态时，反弯点高度比一层趋近0.6、其余层趋近0.5的规律（图5）。而在大震情况下，一层反弯点峰值位置向柱顶移动，且数据集中程度出现明显的下降，说明构件进入弹塑性后反弯点高度出现波动，塑性累积明显。二层反弯点峰值位置向柱底移动，相比于构件线弹性阶段，该工况下出现了明显的双峰现象。三层及以上虽同样出现数据集中程度下降的情况，但相较于一二层变化幅度较小，其峰值位置仍集中在0.5左右，可认为随结构层数的提高，构件进入弹塑性

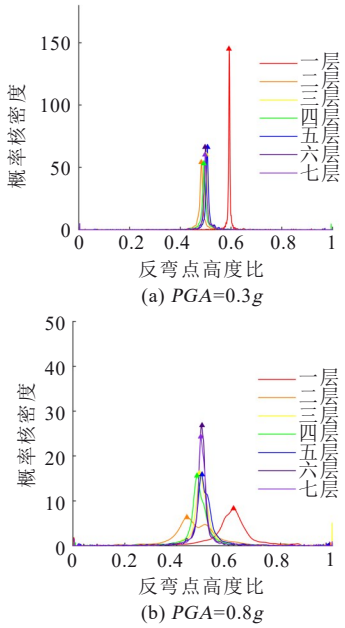


图 5 不同地震情况下角柱反弯点高度比核密度图

Fig 5 Kernel density plots of inflection point height ratio of corner columns under different ground motions

程度越小，角柱反弯点高度比变化程度越小。

图 6 为结构角柱、边柱及内柱在不同 PGA 下的各层反弯点高度比峰值图，其中边柱与内柱截面型号相同，仅所处位置不同，具体划分参考图 3(b)。根据表 3 所列数据，自二层开始，反弯点高度比核密度峰值 y_0^{max} 层间差值随着层数提高而下降，6～7 层的层间差值趋近于 0，认为在结构总层数 1/3 及以上时可忽略边界选取高度对反弯点位置变化的影响。各层内柱在不同 PGA 情况下整体变化幅度较小，角柱及边柱受地震波峰值加速增大的影响较大，横向对比达到 5% 以上。

3.2 波形与能量大小

选取三种具有不同波形特征的实测地震波加速度记录，分别为：峰值加速度 0.348g 的 El 波，峰值

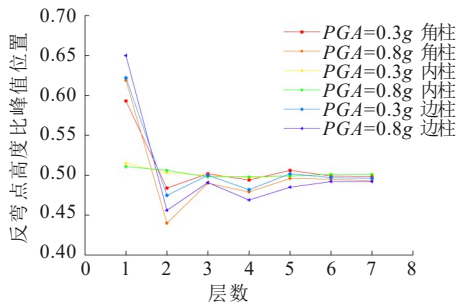


图 6 不同构件各层反弯点高度比概率峰值图

Fig. 6 Peak probability of inflection point height ratio of different members at each story

表 3 各结构柱层间反弯点位置峰值变化率

Table 3 Inter-story variability of inflection point peak locations in structural columns

层间	角柱(PGA)/%		内柱(PGA)/%		边柱(PGA)/%	
	0.3g	0.8g	0.3g	0.8g	0.3g	0.8g
2-3	3.71	11.3	0.60	1.58	5.26	7.68
3-4	1.59	2.24	0.60	0	3.60	4.48
4-5	2.42	3.54	0.40	0.20	4.15	3.41
5-6	1.38	0.20	0.40	0.40	1.00	1.44
6-7	0.20	0.40	0	0	0.20	0

加速 0.155g 的 Taft 波，峰值加速度 0.672 7g 的清平波。以下分别简称 Taft 波、清平波为 TF 波和 QP 波。El 波中长周期丰富，TF 波中周期突出，QP 波短周期能量集中，三个波的加速度反应谱覆盖了短周期、中周期和长周期，能够全面评估结构在不同周期段的响应。地震波数据间隔为 0.02 s，加载步统一为 2 500 步，原始波形如图 7 所示。对上述三种波进行 PGA 线性调幅，并以此进行地震动时程分析，分析对象选取大震下弹塑性明显的一二层角柱。

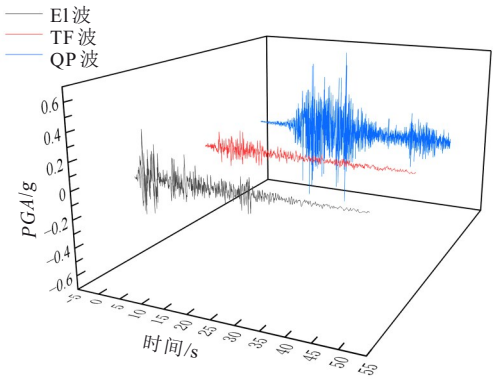


图 7 原始地震波波形图

Fig. 7 Waveforms of original ground motions

由图 8 可知，随着 PGA 的增大，反弯点高度比 y_0 的数据集中程度出现明显的减小，且变化规律呈线性发展。当 PGA 大于 0.6g 时，y_0 的峰值概率核密度小于 10，y_0 数据在 0.4～0.6 之间波动，认为此时规范所规定的反弯点规律已不适用。

由图 9 可知，波型不同对反弯点变化影响差异较大，其中 El 波下一层角柱(1SZJ)y_0^{max} 随 PGA 增大而增长，由 0.6 增至 0.63，同比变化 5%；二层角柱(2SJZ)由 0.473 降至 0.447，同比减小 5.5%。TF 波在二层角柱上则表现出与 El 波相反的变化率，y_0^{max} 同比增大 2.9%。QP 波在一层角柱上反弯点随

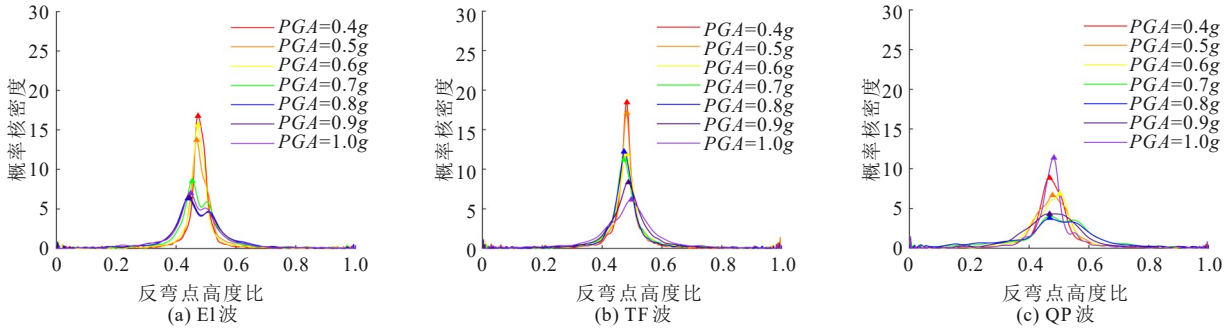


图 8　不同地震波下二层角柱反弯点高度比核密度图

Fig. 8　Kernel density plots of inflection point height ratio of the second-story corner column under different ground motions

PGA 同比变化小于 1%，可忽略不计。根据表 4，PGA 的增大会放大波形产生的差异，在 $PGA=0.4g$ 时波型横向差异均在 2% 附近，当 PGA 放大到 1 时，差异普遍达到 5% 以上，最大差异率达到 12.44%。

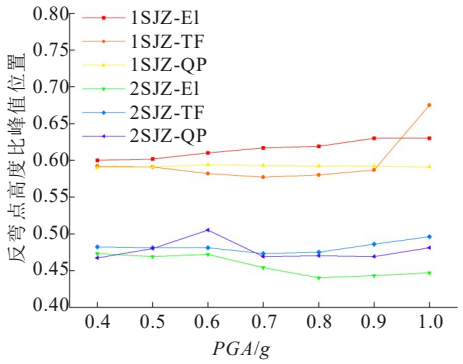


图 9　不同地震波下反弯点高度比概率峰值图

Fig. 9　Peak probability of inflection point height ratio under different ground motions

表 4　同 PGA 下波与波之间反弯点位置峰值差

Table 4　Differences in peak inflection point locations between ground motions under the same PGA

PGA/g	一层角柱/%			二层角柱/%		
	El-TF	TF-QP	QP-El	El-TF	TF-QP	QP-El
0.4	1.33	0.34	1.69	1.90	3.11	1.28
0.5	1.83	0.00	1.86	2.46	0.21	2.29
0.6	4.59	2.06	2.69	1.91	4.99	6.53
0.7	6.48	2.77	4.05	4.19	0.85	3.2
0.8	6.30	2.07	4.56	7.95	1.05	6.38
0.9	6.83	0.85	6.42	9.71	3.50	5.54
1.0	7.14	12.44	6.60	10.96	3.02	7.07

3.3　加载时域

由于振动台混合试验实时加载的特点，随着加载时域的变化，结构振动响应会使得恢复力实时发生变化。

选取时域波形差异化较大的 El、TF、QP 三个波，加载间隔 0.02 s，设 300 步为一个取样单位进行概率核密度估计。El 波强震段持续时间约 30 s，呈现明显的双脉冲型震荡，主峰后伴随多次高频衰减震荡；TF 波波形较平缓，能量分布均匀，主震段持续时间约 12 s，无明显脉冲尖峰；QP 波短时强震动特征显著，主震段前 10～30 s 内出现多个高频尖峰，峰值后能量迅速衰减。

根据图 10，在 $PGA=0.6g$ 时，QP 波由于短时强震和高频尖峰后能量衰减迅速的特点，使得整个加载过程中，结构二层角柱反弯点高度比概率核密度峰值波动明显，$y_0^{\max}$ 在 0.4～0.6 之间波动且出现明显的双峰特征。El 波与 TF 波下 $y_0^{\max}$ 波动较小，整体控制在 5% 以内，其中 TF 波在数据集中程度上变化较小，符合其波形平缓，能量分布均匀的特点。

依据图 11 和表 5，不同波形在不同 PGA 条件下，加载时域反弯点极差率差异较大，其中 QP 波的差异率普遍大于 10%，认为在整个加载过程中反弯点高度比变化明显。

4　结论

边界条件模拟的准确性是振动台混合试验能够成功进行的先决条件之一，完全复现实际结构的复杂边界条件对于试验设备及协调加载系统要求苛刻。

反弯点边界条件模拟方法通过水平荷载下框架结构柱存在反弯点为理论基础，合理简化边界内力场，大幅降低试验加载难度。本文通过 OpenSees 有限元模拟软件，建立基于实际工程的高层钢框架结构，利用概率核密度估计方法，研究不同边界位置、不同波形和能量大小、不同加载时域下结构柱反弯点位置变化规律，得出以下结论：

（1）结构底层角柱反弯点高度比随 PGA 增大

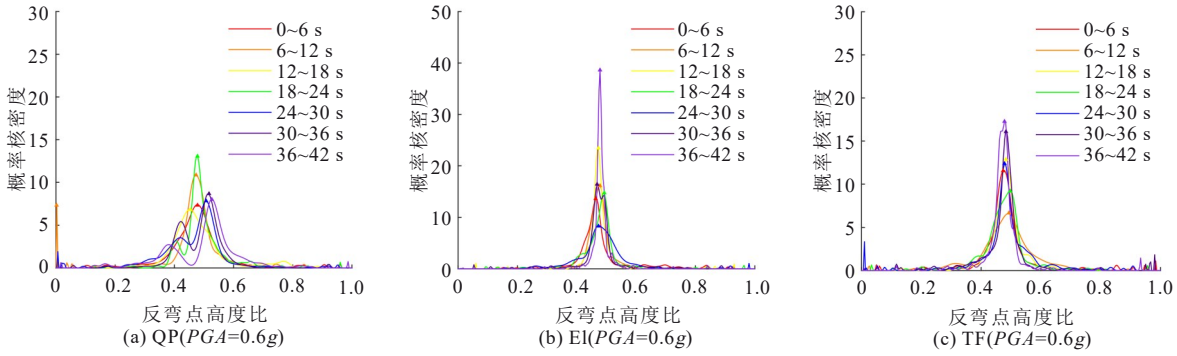


图 10 加载时域二层角柱反弯点高度比核密度图(向上取整)

Fig. 10 Kernel density plots of inflection point height ratio of the second-story corner column during loading time history (rounded up)

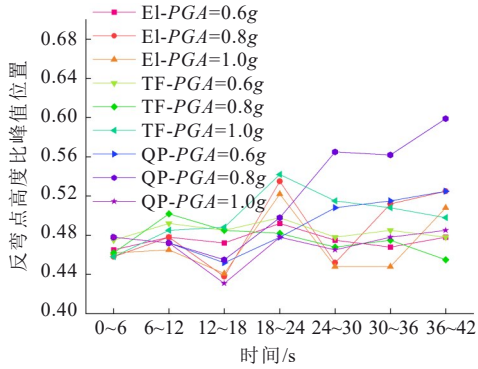


图 11 加载时域二层角柱反弯点高度比概率峰值图

Fig. 11 Peak probability of inflection point height ratio of the second-story corner column during loading time history

表 5 加载时域反弯点高度比极差率

Table 5 Range ratios of inflection point height ratio during loading time history

波形	El			TF			QP		
PGA/*g*	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0	0.6	0.8	1.0
Δ/%	5.5	18.1	15.5	4.6	9.4	15.5	13.9	24	11

呈现显著迁移特征,一层角柱呈向上迁移,二层及以上角柱呈向下迁移,数据离散程度同比显著增加;中高层反弯点位置迁移率较小,可沿用规范推荐值。

(2) 波形特征对反弯点位置变化规律影响较大,时域波形高频分量(如QP波)加剧数据离散程度,波峰高、能量衰减快的强震特征使结构出现短时大量塑性积累,反弯点高度比在0.4~0.6之间波动明显。

参考文献(References)

[1] 李海洋, 王向英, 田石柱. 地震模拟振动台子结构混合试验方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2009, 26(2): 75-80.
Li Haiyang, Wang Xiangying, Tian Shizhu. Real time dynamic hybrid testing method for seismic simulation shaking tables[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2009, 26(2): 75-80.

[2] 王贞,王纯鹏,许国山,等. 采用运动量边界条件的振动台混合试验原理[C]//第26全国结构工程学术会议论文集. 长沙:中国力学学会,2017:221-225.
Wang Zhen, Wang Chunpeng, Xu Guoshan, et al. Principle of hybrid test using motion boundary conditions on the shaker table [C]//Proceedings of the 26th National Conference on Structural Engineering. Changsha: Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2017: 221-225.

[3] 田英鹏. 考虑复杂动力边界的振动台子结构试验技术研究[D]. 哈尔滨: 中国地震局工程力学研究所, 2022: 41-59.
Tian Yingpeng. Shaking table substructure testing considering complex dynamic boundary conditions[D]. Harbin: Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, 2022: 41-59.

[4] Mosqueda G, Cortes-Delgado M, Wang T. Substructuring techniques for hybrid simulation of complex structural systems [C]//Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering. Toronto, Ontario, Canada: University of British Columbia, 2010: 12-24.

[5] Wang T, Mosqueda G, Jacobsen A, et al. Performance evaluation of a distributed hybrid test framework to reproduce the collapse behavior of a structure[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2012, 41(2): 295-313.

[6] Hashemi M J, Mosqueda G. Innovative substructuring technique for hybrid simulation of multistory buildings through collapse [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2014, 43(14): 2059-2074.

[7] 王涛, 潘鹏. 子结构混合试验方法研究与应用[J]. 工程力学, 2018, 35(2): 1-12.
Wang Tao, Pan Peng. Study and application of substructure online hybrid test method[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(2): 1-12.

[8] 王婧. 框架结构抗震混合试验中子结构边界条件模拟方法研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2019: 51-70.
Wang Jing. Study on simulation method of substructure bound-

ary conditions for seismic hybrid test of frame structures[D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2019: 51-70.

[9] 徐天鸿, 王书琪, 田石柱. 反弯点高度比对强梁弱柱钢框架混合试验影响分析[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2022, 47(1): 22-30.
Xu Tianhong, Wang Shuqi, Tian Shizhu. Analysis of influence of height ratio of inflection points on hybrid test of SBWC steel frame[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2022, 47(1): 22-30.

[10] 蔡泽文, 刘晨光, 田石柱. 结构非线性阶段反弯点法抗震混合试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2024, 49(2): 280-290.
Cai Zewen, Liu Chenguang, Tian Shizhu. Inflection point method of seismic hybrid simulation study on structural nonlinear stage[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2024, 49(2): 280-290.

[11] Ohtori Y, Christenson R E, Spencer B F Jr, et al. Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(4): 366-385.

[12] Filippou F C, Popov E P, Bertero V V. Effects of bond deterioration on hysteretic behavior of reinforced concrete joints [R]. Earthquake Engineering Research Center, 1983.

[13] Powell G H, Allahabadi R. Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 1988, 16(5): 719-734.

[14] GB 50011—2001 建筑抗震设计规范[S].
GB 50011—2001 Code for seismic design of buildings[S].

(本文编辑:贾源源)

(上接第 1272 页)

[45] Pinkus A. Approximation theory of the MLP model in neural networks[J]. Acta Numerica, 1999, 8: 143-195.

[46] Cunningham H, Ewart A, Riggs L, et al. Sparse autoencoders find highly interpretable features in language models[EB/OL]. (2023-09-15) [2024-07-12]. https://arxiv.org/abs/2309.08600.

[47] Liu Z, Wang Y, Vaidya S, et al. Kan: Kolmogorov-arnold networks [EB/OL]. (2023-08-10) [2024-07-12]. https://arxiv.org/abs/2404.19756.

[48] Mozer M C. Induction of multiscale temporal structure[C]// NeurIPS Foundation. Proceedings of the 5th International Conference on Neural Information Processing Systems. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 1991: 275-282.

[49] Ferreira M A R, Higdon D M, Lee H K H, et al. Multi-scale and hidden resolution time series models[J]. Bayesian Analysis, 2006, 1(4): 294-314.

[50] Chakravarti I M, Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis forecasting and control[J]. Journal of the American Statistical Association, 1973, 68(342): 493-499.

[51] Vaca-Rubio C J, Blanco L, Pereira R, et al. Kolmogorov-Arnold Networks (KANs) for time series analysis[C]// 2024 IEEE. Globecom Workshops (GC Wkshps). Cape Town, South Africa: IEEE, 2024: 1-6.

[52] Chiou B, Darragh R, Gregor N, et al. NGA project strong-motion database [J]. Earthquake Spectra, 2008, 24(1): 23-44.

[53] Haddadi H, Shakal A, Stephens C, et al. Center for engineering strong-motion data [C]// Center for Engineering Strong-Motion Data. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing, China: [s. n.], 2008: 12-17.

(本文编辑:任　栋)