

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20231124003

# 含错层节点钢管混凝土柱-钢梁框架结构 抗整体性倒塌能力分析\*

许成祥<sup>1,2,3</sup>, 孙少雨<sup>1</sup>, 刘晓强<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学城市建设学院,湖北 武汉 430065; 2. 城市更新湖北省工程研究中心,湖北 武汉 430065;  
3. 武汉科技大学高性能工程结构研究院,湖北 武汉 430065)

**摘要:** 为了研究含错层节点钢管混凝土柱-钢梁框架结构抗整体性倒塌能力,基于已有试验,采用OpenSees分别建立了不同错层高度钢管混凝土柱-钢梁框架结构数值分析模型。对模型进行20条地震动记录下的增量动力分析(IDA),得到结构倒塌阶段的易损性曲线,并利用结构抗倒塌安全储备系数评估结构的抗整体性倒塌能力。结果表明:地震动强度较低时,错层高度对结构的承载力和变形影响不大,增量动力分析曲线差异较小,地震动强度较高时,不同错层框架与普通框架的增量动力分析曲线差异十分显著,第三类错层框架和第一、二类错层框架以及普通框架相比,变形增长更快,后期退化程度更大;普通框架(KJ-1)、第一类错层框架(SKJ-1)、第二类错层框架(SKJ-2)和第三类错层框架(SKJ-3)的抗倒塌安全储备系数分别为3.53、2.75、2.2和1.8,SKJ-1、SKJ-2和SKJ-3相比KJ-1抗倒塌安全储备系数分别降低了22.1%、37.7%和49.0%,说明含错层节点框架结构抗整体性倒塌能力明显低于普通节点框架结构,且随着结构错层高度的增加其性能降低显著。

**关键词:** 方钢管混凝土柱-钢梁框架; 错层节点; 增量动力分析; 抗倒塌安全储备系数; 抗整体性倒塌能力

**中图分类号:** TU398 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)03-0611-09

## Analysis of Global Collapse Resistance in CFST Column-steel Beam Frame Structures with Staggered Joints

XU Chengxiang<sup>1,2,3</sup>, SUN Shaoyu<sup>1</sup>, LIU Xiaoqiang<sup>1</sup>

(1. School of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China;  
2. Hubei Provincial Engineering Research Center of Urban Regeneration, Wuhan 430065, China;  
3. Institute of High Performance Engineering Structures, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China)

**Abstract:** To investigate the progressive collapse resistance of concrete-filled steel tubular (CFST) column-steel beam frame structures with staggered joints, numerical models with varying staggered floor heights were developed in OpenSees based on existing experimental data. Incremental dynamic analysis (IDA) was conducted using 20 ground motion records to derive collapse fragility curves, and the structural global collapse resistance was evaluated using the safety reserve factor against collapse. Results indicated that at low ground motion intensities, the staggered joint height had minimal impact on structural bearing capacity and deformation, with slight differences in IDA curves. However, at high intensities, significant differences emerged between staggered frames and ordinary frames. The third

\* 收稿日期:2023-11-24;修回日期:2024-02-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51678457)资助

作者简介:许成祥(1965—),男,教授,博士。主要从事钢管-混凝土组合结构研究。E-mail: cx\_xu@sina.com

type of staggered frame exhibited faster deformation growth and greater late-stage degradation compared to the first and second types as well as the ordinary frame. Collapse Margin Ratio (CMR) values for ordinary (KJ-1), first-type staggered (SKJ-1), second-type staggered (SKJ-2), and third-type staggered (SKJ-3) frames were 3.53, 2.75, 2.2, and 1.8, respectively. SKJ-1, SKJ-2, and SKJ-3 showed 22.1%, 37.7%, and 49.0% reductions in CMR compared to KJ-1. These findings demonstrate that staggered joint frames have significantly lower global collapse resistance than ordinary frames, with performance decreasing as staggered joint height increases.

**Keywords:** CFST column-steel beam frame; staggered joints; incremental dynamic analysis; Collapse Margin Ratios; global collapse resistance

## 0 引言

由于钢管混凝土组合结构兼具混凝土较高的结构强度和钢结构的便捷施工,在其具有出色抗震性能的前提下,近些年来被广泛应用于现代建筑结构中<sup>[1-4]</sup>。随着结构形式的多样化发展以及空间使用功能需求的增加,异形节点的连接方式越来越多,其中错层节点常用于工业厂房和高层民用建筑等结构中,以满足特定功能需求和空间要求<sup>[5]</sup>。近年来学者对错层节点做了许多研究,刘玉姣<sup>[6]</sup>结合试验和非线性结果对钢筋混凝土框架结构不同错层高度节点进行了受力机理分析,提出了三类错层节点的受力模型。许成祥等<sup>[7]</sup>利用 OpenSees 开放平台对钢管混凝土柱-钢梁错层节点进行抗震性能分析,提出了三类错层节点的剪力计算公式。T. Kamimura 等<sup>[8]</sup>进行了 0.5 倍梁高和 2.5 倍梁高的钢筋混凝土错层节点的拟静力试验,结果表明错层节点后期性能下降更为显著且 2.5 倍梁高错层节点受力机理与边节点较为相似。

地震易损性分析作为结构抗震性能分析的常用方法,可以在建筑物震前灾害评估和震后损伤评估等方面提供科学依据。白国良等<sup>[9]</sup>选取不同周期地震动记录对结构进行增量动力分析得到不同周期地震动作用下的结构易损性;林天成等<sup>[10]</sup>使用 Abaqus 对六层 RC 框架结构进行不同主余震作用下易损性分析;M. Ahmadi 等<sup>[11]</sup>使用 OpenSees 评估了方钢管混凝土柱-钢梁框架结构的抗震性能;张淑云等<sup>[12]</sup>以地震动峰值加速度(PGA)作为地震动强度参数,研究了方钢管混凝土框架-钢板剪力墙(SP-SW)核心筒结构在不同强度地震下破坏概率。近年来钢管混凝土组合结构在现代建筑中的广泛应

用,对于钢管混凝土组合结构的抗震性能研究具有重要意义,且针对钢管混凝土组合结构的易损性分析研究较少,因此有必要对含错层节点的方钢管混凝土柱-钢梁结构进行抗整体性倒塌易损性分析。

本文基于方钢管混凝土柱-钢梁含错层节点框架的抗震试验<sup>[13]</sup>,通过 OpenSees 有限元软件分别建立含无错层节点和 0.5 倍梁高错层节点的方钢管混凝土框架精细化模型,对比试验结果验证了数值模型的准确性。在此基础上采用文献[6]中的分类,通过修改框架错层高度,分别建立含 1 倍梁高错层节点以及含 3 倍梁高错层节点的方钢管混凝土柱-钢梁框架结构有限元模型。

依据规范选取 20 条地震动记录,使用增量动力分析方法对数值模型进行倒塌易损性分析,得到不同结构在不同地震动强度下的倒塌概率,引用抗倒塌安全储备系数评估结构的抗整体性倒塌能力。

## 1 试验概况

如图 1 所示,试验模型为 2 榀两跨三层方钢管混凝土柱-钢梁框架。第一榀框架为无错层节点的普通框架,第二榀框架为含 0.5 倍梁高错层节点的不完全错层框架。环板式梁柱节点连接依据国家标准<sup>[14]</sup>设计,具体细节如图 2(a)~(d)所示;试件方钢管采用 Q235 级钢材,混凝土采用 C40,钢梁采用 H180×94×6×10.7 型钢。混凝土实测立方体抗压强度为 38.8 MPa,钢材的力学性能实测值见表 1。

如图 3 所示,试验采用拟静力试验方法,在框架中柱顶和边柱顶分别施加 500、300 kN 的竖向荷载,在柱端通过位移控制施加水平荷载,采用变幅等幅混合方式逐级加载,每级加载最大值按侧移率  $\Delta/H=0.1\%$  增加,直至试件破坏停止加载。

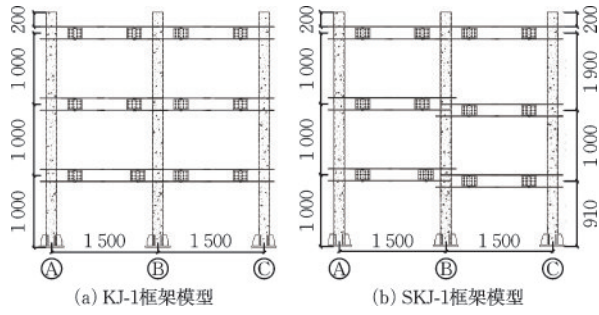


图1 框架详图

Fig.1 Diagrams of frame details

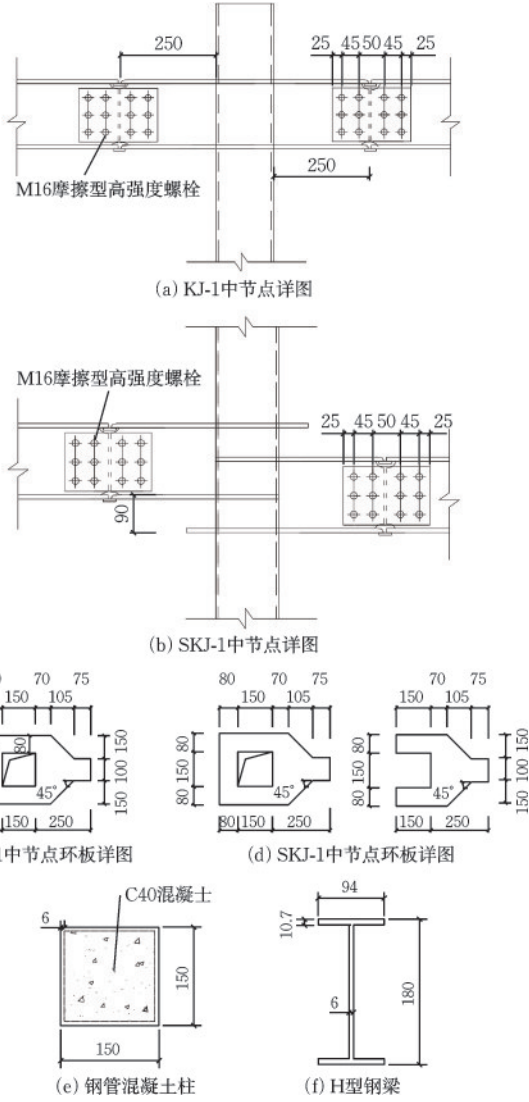


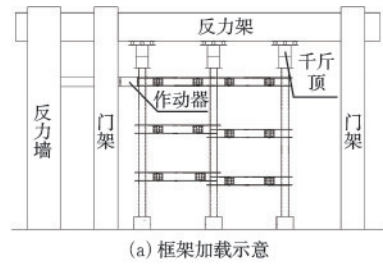
图2 框架节点详图

Fig.2 Diagrams of frame joint details

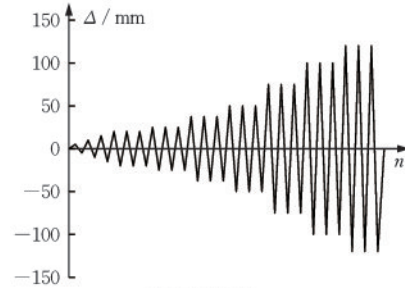
表1 钢材实测值

Table 1 Measured values of steel

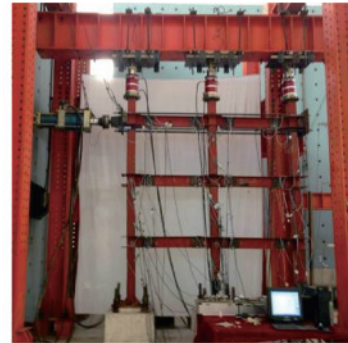
厚度 $t/\text{mm}$	屈服强度 $f_y/\text{MPa}$	极限强度 $f_u/\text{MPa}$	弹性模量 $E_s/\text{MPa}$
4	358.5	401.7	$2.03 \times 10^5$
6	385.4	458.8	$1.86 \times 10^5$
10	357.4	437.2	$2.01 \times 10^5$



(a) 框架加载示意



(b) 加载制度



(c) KJ-1试验加载现场



(d) SKJ-1试验加载现场

图3 试验加载

Fig.3 Test loading setup diagrams

## 2 有限元建模

### 2.1 材料本构

混凝土选用 OpenSees 中基于 Kent-Park<sup>[15]</sup> 的 Concrete 02 本构模型, 该本构模型计算方式简单易收敛, 具有较高的精度模拟滞回, 且能够体现混凝土往复受力下捏缩的同时考虑横向约束对核心混凝土

抗压强度的提高作用<sup>[16]</sup>,适用于方钢管混凝土柱组合结构的模拟。钢材选用基于 Giuffre-Menegotto-Pinto<sup>[17]</sup>的 Steel 02 本构模型,该模型同样表达方式简洁,可利用过渡曲线曲率参数使曲线在反向应变时减小刚度来考虑包辛格效应,且模拟结果符合试验试验结果,适用于含有钢材结构的模拟。其中 Steel 02 本构模型过渡参数根据文献[18]取为  $R0=17$ ,  $cR1=0.925$ ,  $cR2=0.15$ 。材料本构模型如图 4 所示。

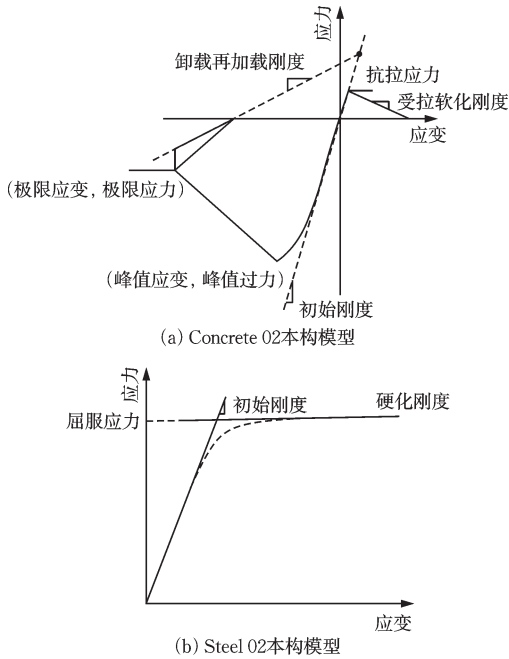


图 4 材料本构模型  
Fig.4 Material constitutive model

## 2.2 截面与单元选取

梁柱截面采用纤维截面划分,如图 5 所示,将钢管混凝土柱截面划分为外层钢管纤维和核心区混凝土纤维两部分,并分别定义各自本构关系,有利于提高模型的准确性。梁柱单元选取基于柔度法的非线性梁柱单元,该单元无需细化分区,通过设置合理的积分点就能更为精确地模拟梁柱单元受

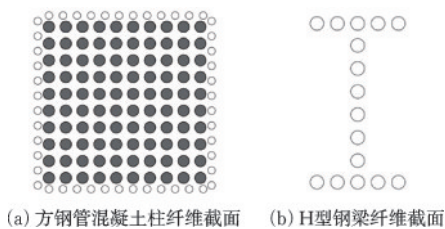


图 5 梁柱单元纤维截面划分  
Fig.5 Fiber section division of beam-column element

力机理,适用于方钢管混凝土柱。依据试验中梁铰发展破坏机制,在钢梁单元中加入塑性铰纤维单元,塑性铰单元的长度及物理参数根据栓焊连接部位和高强螺栓安装规范确定,中间弹性部分物理参数由钢梁截面计算确定。

## 2.3 有限元模拟与试验结果对比分析

对建立的有限元模型施加低周往复荷载得到有限元模拟的滞回曲线和骨架曲线,将试验数据和模拟数据对比得到图 6。由图 6 可知,模拟曲线和试验曲线随着水平位移的增大,结构刚度在屈服前后整体趋势相同,结构极限承载力和破坏荷载误差较小,证明该有限元模型合理考虑了材料的本构模型、参数设置和纤维截面划分。但模拟滞回曲线相较于试验曲线更为饱满,主要是由于建模过程中忽略了钢管与混凝土之间的滑移作用。

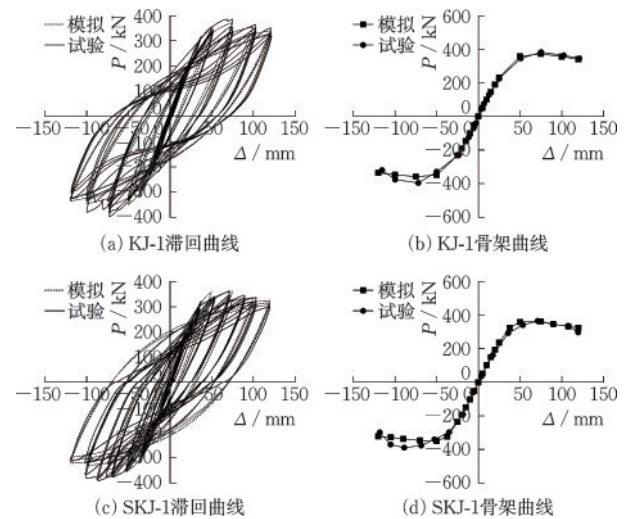


图 6 试验与模拟结果对比  
Fig.6 Comparison between test and simulation results

普通框架 KJ-1 不完全错层框架 SKJ-1 正向模拟和试验结果吻合度较高,但负向强度均低于试验结果,主要是由于试验过程中人工浇筑混凝土和试验夹具的安装误差以及加载过程中拉杆受力变形产生的误差,而有限元软件可以在更为理想状态下进行模拟分析,所以得出数据曲线相对实验结果更为对称。

综上所述,该模型能够较为准确地模拟试验过程和结果,验证了模型的准确性。

## 2.4 错层高度变化模拟

结构在地震作用下通常产生过大的层间侧移,

导致结构水平抗侧力构件的刚度、强度逐渐退化,引起更大的侧向位移,最终导致结构侧向失稳整体性倒塌<sup>[19]</sup>,本文选用与框架结构层间侧移有直接联系的错层高度为变量研究其抗整体性倒塌能力。由于常规节点与错层节点受力机理有较大差异,本文依据文献[6]将框架模型按照错层高度分为三类研究:第一类为错层高度小于1倍梁高( $H$ )的不完全错层框架;第二类为错层高度等于1倍梁高的完全错层框架;第三类为错层高度大于1倍梁高的完全错层框架。为研究不同错层类型对含错层节点方钢管混凝土柱-H型钢梁框架抗整体性倒塌能力影响,基于有限元模拟结果,继续对错层高度为 $1H$ (SKJ-2)框架和 $3H$ (SKJ-3)框架进行有限元模拟,骨架曲线对比如图7所示。

结果表明,在弹性阶段不同错层高度结构刚度几乎没有变化,骨架曲线无明显不同,但在强化阶段结构的极限承载力随着错层高度的增大有所下降,相对应破坏阶段的破坏荷载也有相同程度降低。

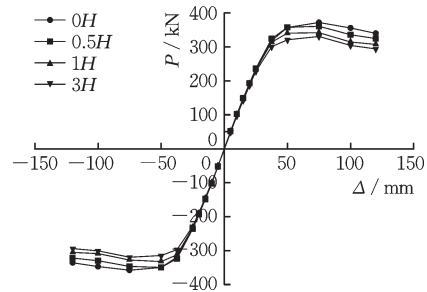


图7 错层高度骨架曲线对比

Fig.7 Comparison of skeleton curves for different staggered floor heights

### 3 抗整体性倒塌能力分析

#### 3.1 地震波选取

依据《建筑抗震设计规范》<sup>[20]</sup>,设定模型规范反应谱,在美国太平洋地震研究中心的强震数据库依照规范反应谱筛选出20条震中距小于30 km,震级为6.5~8级,剪切波速 $V_{30}$ 在260~550 m/s之间的地震波,见表2。

表2 选取20条地震动记录

Table 2 20 selected ground motion records

编号	地震波名称	站台名称	年份	$M_w$	$PGA/g$
GM1	Chi-Chi_Taiwan	CHY046	1999	7.62	0.145 24
GM2	Chi-Chi_Taiwan	TCU060	1999	7.62	0.200 77
GM3	Imperial Valley-06	Cerro Prieto	1979	6.53	0.168 29
GM4	Imperial Valley-06	Parachute Test Site	1979	6.53	0.112 67
GM5	Landers	North Palm Springs Fire Sta #36	1992	7.28	0.138 91
GM6	Chuetsu-oki_Japan	Nagaoka Kouiti Town	2007	6.8	0.162 02
GM7	Chuetsu-oki_Japan	NIGH11	2007	6.8	0.131 77
GM8	Iwate_Japan	IWT011	2008	6.9	0.219 4
GM9	Iwate_Japan	Kami_Miyagi Miyazaki City	2008	6.9	0.155 77
GM10	Iwate_Japan	Semine Kurihara City	2008	6.9	0.141 66
GM11	Iwate_Japan	Yokote Masuda Tamati Masu	2008	6.9	0.133 11
GM12	El Mayor-Cucapah_Mexico	El Centro-Meadows Union School	2010	7.2	0.198 43
GM13	San Fernando	LA-Hollywood Stor FF	1971	6.61	0.224 76
GM14	Darfield_New Zealand	RKAC	2010	7	0.166 71
GM15	Darfield_New Zealand	SBRC	2010	7	0.148 88
GM16	Spitak_Armenia	Gukasian	1988	6.77	0.200 26
GM17	Loma Prieta	Coyote Lake Dam (Downst)	1989	6.93	0.160 43
GM18	Landers	Desert Hot Springs	1992	7.28	0.171 23
GM19	Landers	Mission Creek Fault	1992	7.28	0.126 2
GM20	Landers	North Palm Springs	1992	7.28	0.136 01

### 3.2 增量动力分析

增量动力分析(IDA)是一种用于评估结构抗震性能的参数分析方法,以弹塑性时程分析为基础,指定地震动强度指标并对每条地震波作归一化调幅,记录在各个强度级别地震波作用下结构的响应数据,对结果进行数据分析能够准确评估地震作用下结构的整体强度和变形能力。本文基于表2中的

20条地震动记录对结构进行增量动力分析<sup>[21]</sup>。本文数值模型均为一榀两跨三层框架,计算得出自振周期小于1s,属于短周期结构,依据文献[22]可选用与该结构地震响应参数相关性较高的地面峰值加速度(PGA)为地震动强度指标,最大层间位移角 $\theta_{max}$ 为工程需求参数,采用等步长调幅,调幅步长取0.1g,调幅范围为0~2.0g。得到结构IDA曲线如图8所示。

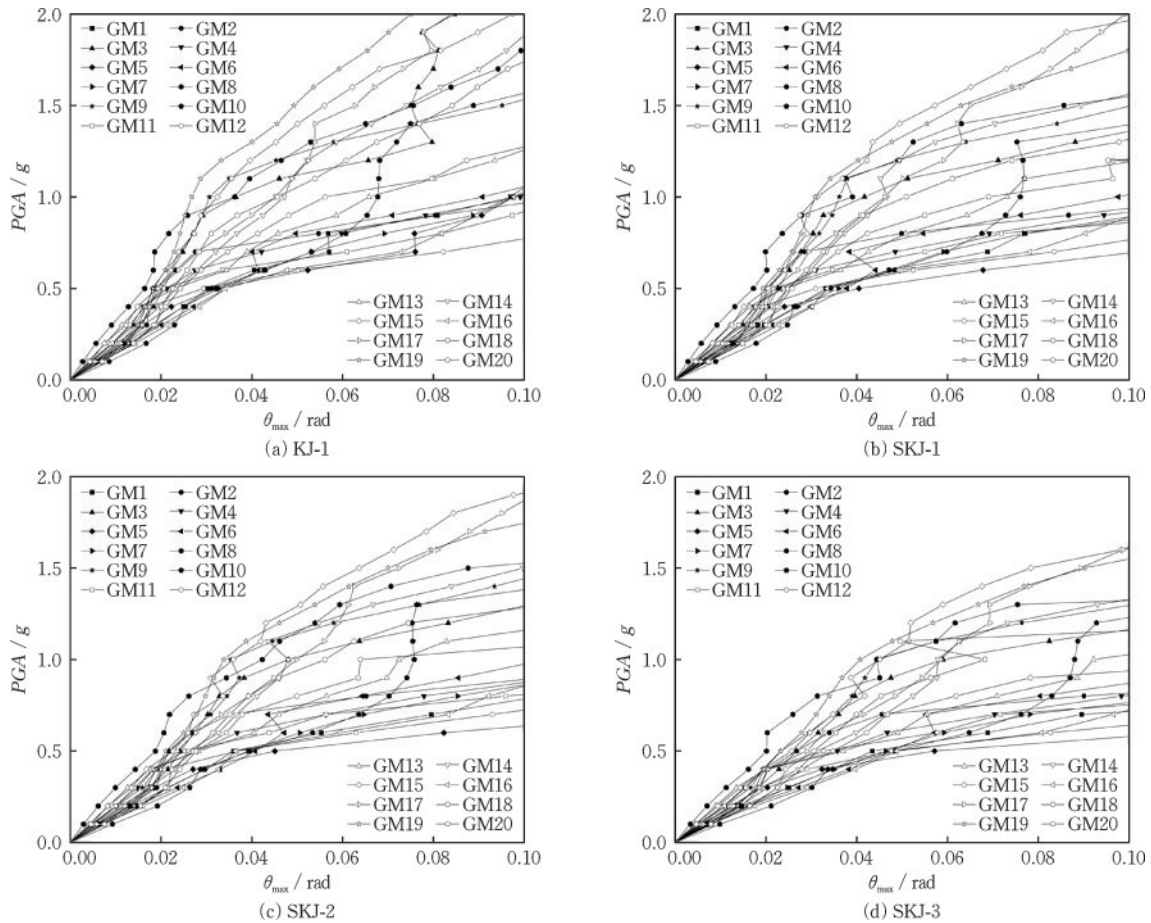


图8 结构IDA曲线

Fig.8 Structural IDA curves

如图8所示,(1)地震动强度小于0.25g时,四种模型分析得到的IDA曲线基本呈线性增长,在相同地震动强度下,随着错层高度的增高,结构的层间位移角增大,但增大的程度不明显。表明地震动强度较小时,错层高度的增加会减弱结构的抗震性能,但抗震性能减弱的幅度不大;(2)地震动强度大于0.25g时,相同的地震动强度下随着错层高度的增加结构层间位移角明显增大。表明地震动强度较大时,错层高度的增加使得结构抗震性能明显降低;(3)模型层间位移角 $\theta_{max}$ 达到0.1,即认为结构倒

塌时,框架错层高度从低到高对应的最大PGA从2.0g逐渐降低至1.6g,表明错层框架后期退化程度随着错层节点高度增高而增大。

综上所述,在低强度地震动作用下,错层高度对框架结构的抗震性能影响较弱;在高强度地震动作用下第三类错层框架相比第一、二类错层框架以及普通框架变形增长更快,且后期退化程度更大。

### 3.3 抗整体性倒塌易损性分析

结构易损性是指不同地震动强度下,结构达到

或者超过某一指定性能状态的可能性。本文指定结构性能为整体倒塌时的状态,选用地面峰值加速度(PGA)作为地震动强度指标(Intensity Measure,  $IM$ )以及最大层间位移角( $\theta_{max}$ )作为结构损伤指标(Damage Measure,  $DM$ )。假定地震动强度指标服从对数正态分布, $IM$ 和 $DM$ 关系式为(1),分别对不同的 $IM$ 和 $DM$ 取自然对数得到关系式(2),按照式(3)进行线性回归拟合,得到结构的地震概率需求模型。

$$DM = \alpha(IM^\beta) \quad (1)$$

$$\ln(DM) = a + b \ln(IM) \quad (2)$$

式中, $\alpha, \beta, a, b$ 均为回归系数。

$$p_f = \Phi \left[ \frac{\ln(DM/IM)}{\sqrt{\beta_c^2 + \beta_b^2}} \right] \quad (3)$$

$$\beta_s = \sqrt{\beta_c^2 + \beta_b^2} \quad (4)$$

式中, $\Phi[\ ]$ 为标准正态分布函数; $\beta_s$ 为标准平均差,依据文献[23]取0.5。

依据文献[24],当结构刚度退化至初始刚度的20%或最大层间位移角超过10%时,认为钢框架结构发生倒塌。即以20%初始斜率对应的PGA和最大层间位移角 $\theta_{max}=0.1$ 构成的 $IM-DM$ 混合准则作为结构抗整体性倒塌的判定准则,通过式(3)计算出不同PGA下方钢管混凝土柱-钢梁含错层节点框架结构的倒塌概率 $P_f$ 。以地面峰值加速度(PGA)为横坐标, $P_f$ 为纵坐标建立坐标系,得到结构破坏阶段的倒塌易损性曲线,如图9所示。

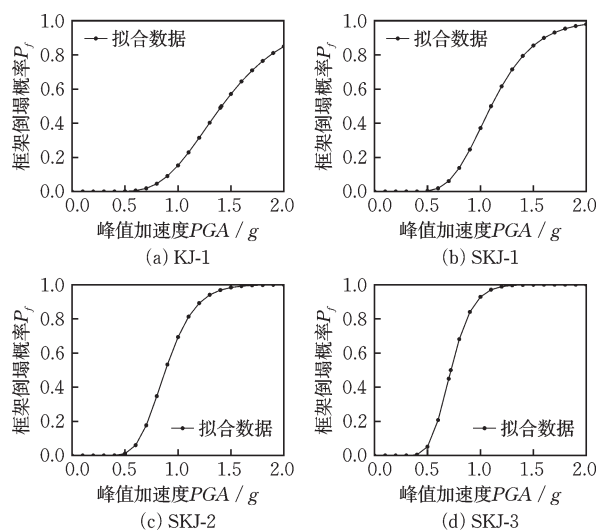


图9 结构倒塌易损性曲线

Fig.9 Structural collapse fragility curves

如图9所示,(1)地震波峰值加速度小于0.4g时曲线近似为一条水平线,结构倒塌概率几乎为0,表明结构处于安全状态;(2)当地震波峰值加速度大于0.4g时曲线斜率明显增大,结构的倒塌概率随着地震波峰值加速度的增加而增大,表明结构的安全性随着地震波峰值加速度的增大出现显著下降;(3)当地震波峰值加速度继续增大达到某一较大值如图9(c)中的1.5g或图9(d)中的1.2g时,曲线斜率急剧降低至接近水平,结构倒塌概率接近1,表明结构处于危险状态,几乎完全倒塌。

通过对比可知,KJ-1和SKJ-1在PGA为2.0时倒塌概率分别为0.85和0.98,而SKJ-2和SKJ-3分别在PGA为1.7g和1.3g时倒塌概率已经达到1.0。由此可知,随着错层高度的增加,结构在地震作用下的倒塌概率逐渐增大,即第三类错层框架的抗整体性倒塌能力明显低于普通框架以及第一、第二类错层框架。

### 3.4 抗倒塌安全储备系数

依据ACT-63报告<sup>[25]</sup>建议,本文使用抗倒塌安全储备系数(Collapse Margin Ratios,  $CMR$ )作为结构抗整体性倒塌能力指标。抗倒塌安全储备系数( $CMR$ )定义为50%结构倒塌概率对应的地震动强度指标与结构设防大震对应的地震动强度指标之比,具体计算公式如下:

$$CMR = IM_{50\% \text{倒塌}} / IM_{\text{设防大震}} \quad (5)$$

式中, $IM_{50\% \text{倒塌}}$ 为50%倒塌概率对应的地震动强度指标,见表3; $IM_{\text{设防大震}}$ 为设防大震对应的地震动强度指标,依照规范<sup>[20]</sup>,8度设防地震对应的地震动强度指标取0.4g; $CMR$ 计算结果见表3。

表3 抗倒塌安全储备系数  
Table 3 Collapse Margin Ratios

结构编号	KJ-1	SKJ-1	SKJ-2	SKJ-3
$IM_{50\% \text{倒塌}}$	1.41	1.1	0.88	0.72
$CMR$	3.53	2.75	2.2	1.8

由表3可知,随着错层高度的增加,框架结构的 $CMR$ 值显著降低,其中,SKJ-1相比KJ-1降低了22.1%,SKJ-2和SKJ-3相比KJ-1分别降低了37.7%和49.0%。结构为第一类错层框架时,由于不完全错层节点核心区产生了较大的应力值和明显剪切变形<sup>[13]</sup>,错层节点成为结构薄弱环节;当结构为第二、三类错层框架时,完全错层节点的上下梁间形

成短柱<sup>[26]</sup>,其延性较差、应力集中和易造成剪切破坏等特性将会进一步削弱结构的抗震性能。

综上所述,框架结构的抗整体性倒塌能力随着错层高度的增大显著下降,普通无错层方钢管混凝土柱-钢梁框架结构抗整体性倒塌能力明显优于含错层节点的方钢管混凝土柱-钢梁框架结构。

## 4 结 论

利用OpenSees有限元软件,以试验结果为依据对方钢管混凝土柱-钢梁含错层节点框架结构进行了数值模拟,并以此模型为基础建立了不同错层类型的框架结构模型。基于IDA方法分析了结构的倒塌易损性,并依据ACT-63报告引入抗倒塌安全储备系数评估了结构的抗整体性倒塌能力。主要结论如下:

(1) 地震动强度小于0.25g时,结构变形小,错层高度对结构的承载力和变形影响不大,IDA曲线差异较小;地震动强度大于0.25g时,结构变形增大,第三类错层框架和第一、二类错层框架以及普通框架相比,IDA曲线差异显著,结构变形增长更快,且后期退化程度更大。

(2) 以抗倒塌安全储备系数(CMR)作为结构抗整体性倒塌能力指标,第一类错层框架、第二类错层框架和第三类错层框架相比于普通框架抗整体性倒塌能力分别下降22.1%、37.7%和49.0%。表明结构错层越高,其抗整体性倒塌能力越弱,且随着结构错层高度的增加性能降低显著。

### 参考文献:

[1] Wang J X, Sun Y H, Gao S, et al. Anti-collapse mechanism and reinforcement methods of composite frame with CFST columns and infill walls[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2023, 208: 108022.

[2] Rong B, Zhang Y, Sun J, et al. Experimental and numerical research on hysteretic behavior of CFST frame with diaphragm-through connections [J]. Journal of Building Engineering, 2022, 45: 103529.

[3] 蔡新江, 巩牧华, 田石柱. 异形柱组合框架结构力学性能有限元对比分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2017, 37(6): 1001-1007.

Cai X J, Gong M H, Tian S Z. Comparative finite element analysis of mechanical properties of composite special-shaped column frame structure[J]. Journal of Disaster

Prevention and Mitigation Engineering, 2017, 37(6): 1001-1007. (in Chinese)

- [4] 惠存, 李永刚, 李克, 等. 多灾耦合作用下钢管混凝土柱承载性能研究进展[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(2): 259-268.
- Hui C, Li Y G, Li K, et al. Investigation on the load bearing capacity of concrete filled steel tube columns under the couple of multiple disasters[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(2): 259-268. (in Chinese)
- [5] 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 Z J, Han F X. Shearing force analysis of split-level region for a split-level structure with uniform mass distribution under earthquake[J]. Vibration and Shock, 2011, 30(7): 91-95.
- [6] 刘玉姣. 钢筋混凝土框架错层节点抗震性能及其设计方法[D]. 重庆:重庆大学, 2005.
- Liu Y J. Seismic behavior and design of step joints in a reinforced concrete frame [D]. Chongqing: Chongqing University, 2005. (in Chinese)
- [7] 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 C X, Guo X, Fan H B, 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. (in Chinese)
- [8] Kamimura T, Ishibashi K, Fujitsuka M. Mechanical behavior of reinforced concrete beam-column assemblage with different floor levels on both sides of column[C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: Proceedings.com, 2008: 12-17.
- [9] 白国良, 王世振, 成羽. 多类型地震动作用下高层结构的易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2018, 38(4): 669-676.
- Bai G L, Wang S Z, Cheng Y. Seismic fragility analysis for high-rise structures under multi-type ground motions[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2018, 38(4): 669-676. (in Chinese)
- [10] 林天成, 陈灯红, 刘云龙, 等. 主余震作用下典型六层RC框架结构易损性分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1046-1056.
- Lin T C, Chen D H, Liu Y L, et al. Vulnerability analysis of typical six-story RC frame structure under main-shock-aftershock ground motions [J]. Journal of Disaster

- ter Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1046-1056. (in Chinese)
- [11] Ahmadi M, Naderpour H, Kheyroddin A, et al. Seismic failure probability and vulnerability assessment of steel-concrete composite structures[J]. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 2017, 61(4): 939-950.
- [12] 张淑云, 李卓宇, 马尤苏夫, 等. 基于IDA的方钢管混凝土框架-SPSW核心筒结构地震易损性研究[J]. 世界地震工程, 2021, 37(1): 48-56.  
Zhang S Y, Li Z Y, Mayusuf, et al. Research on seismic vulnerability of concrete-filled rectangular tubular frame-SPSW core tube structure based on IDA method [J]. World Earthquake Engineering, 2021, 37(1): 48-56. (in Chinese)
- [13] Liu X, Xu C, Peng S, et al. Experimental study on seismic behavior of concrete filled square tubular frame with staggered beam-to-column joints [J]. Structures, 2021, 29: 286-293.
- [14] 钢管混凝土结构构造:06SG524[S].北京:中国计划出版社, 2016.
- [15] Wang K, Lu X F, Yuan S F, et al. Analysis on hysteretic behavior of composite frames with concrete-encased CFST columns[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 135: 176-186.
- [16] 赵金钢, 杜斌, 占玉林, 等. OpenSees中混凝土本构模型用于模拟结构滞回性能的对比[J]. 桂林理工大学学报, 2017, 37(1): 59-67.  
Zhao J G, Du B, Zhan Y L, et al. Comparison of constitutive concrete models in OpenSees for hysteretic behavior of structures e[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2017, 37(1): 59-67. (in Chinese)
- [17] Park R, Kent D C, Sampson R A. Reinforced concrete members with cyclic loading[J]. Journal of the Structural Division, 1972, 98(7): 1341-1360.
- [18] 陈建伟, 边瑾靓, 苏幼坡, 等. 应用OpenSEES模拟方钢管混凝土柱的抗震性能[J]. 世界地震工程, 2015, 31(3): 71-77.  
Chen J W, Bian J L, Su Y P, et al. Application of OpenSEES on calculating lateral force-displacement hysteretic curves of concrete-filled rectangular steel tubular columns [J]. World Earthquake Engineering, 2015, 31(3): 71-77. (in Chinese)
- [19] 韩建平, 杨军平. 考虑结构构件退化特性评估大震下RC框架抗整体性倒塌能力[J]. 地震工程与工程振动, 2012, 32(6): 53-64.  
Han J P, Yang J P. Investigation on global collapse resistant capacity of RC frame under severe earthquake considering deterioration characteristic of structural components [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2012, 32(6): 53-64. (in Chinese)
- [20] 建筑抗震设计规范:GB 50011—2010[S].北京:中国建筑工业出版社, 2010.
- [21] Vamvatsikos D, Cornell C A. Incremental dynamic analysis [J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2002, 31(3): 491-514.
- [22] 李雪红, 李晔暄, 吴迪, 等. 地震动强度指标与结构地震响应的相关性研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(23): 184-189.  
Li X H, Li Y X, Wu D, et al. Correlation between ground motion intensity and structural seismic response [J]. Vibration and Shock, 2014, 33(23): 184-189. (in Chinese)
- [23] Kircher C A, Whitman R V, Holmes W T. HAZUS earthquake loss estimation methods [J]. Natural Hazards Review, 2006, 7(2): 45-59.
- [24] Federal Emergency Management Agency. Recommended seismic design criteria for new steel moment-frame buildings FEMA350 [R]. Washington, DC: Federal Emergency Management Agency, 2000.
- [25] ACT-63 Quantification of building seismic performance factors[S]. Redwood City: Applied Technology Council, 2008.
- [26] 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 H. Seismic performance analysis of R. C frame structure with staggered floor [D]. Nanchang: Nanchang Aviation University, 2019. (in Chinese)

(本文编辑:周小潭)