

带 PEC 柱的钢框架结构 Pushover 分析

夏远洋, 孙海峰, 王延凯

(中国市政工程西北设计研究院有限公司, 兰州 730030)

摘要:对于多高层建筑而言,部分外包混凝土柱(PEC 柱)是非常理想的边缘约束构件。为探究带 PEC 柱钢框架结构的力学性能,采用 OpenSees 有限元软件建立 8 层及 12 层共 12 个带 PEC 柱钢框架结构模型算例并进行 Pushover 分析。通过软件模拟分析,得到 PEC 柱内填混凝土等级和型钢板件的厚度变化对整体结构力学性能各个指标的影响。分析表明,在型钢钢柱中灌入混凝土提高了结构的抗侧刚度、延性及承载能力,PEC 柱相关参数的变化对结构底部的影响程度大于结构顶部。

关键词:PEC 柱;多层钢结构;Pushover 分析;力学性能

中图分类号:TU392.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2023)06-0180-07

对于多高层建筑而言,PEC 柱是非常理想的边缘约束构件,通过将钢框架中的型钢柱外包上混凝土形成 PEC 柱,不仅能提高其承载力,而且防火、抗腐蚀能力得到显著增强,这种通过部分外包混凝土柱加固既有钢结构的方式,可以让原有的钢结构抗震性能显著提高,使用寿命大大延长,故研究其抗震性能具有一定的意义,这正是本文研究任务的实际工程背景。

关于带 PEC 柱组合结构的性能研究,专家学者们以实验研究和数值模拟分析居多。赵根田等^[1]采用 PKPM 中的 SATWE 模块对 PEC 柱-钢梁组合框架结构的各项性能指标进行分析,验证了 PEC 柱在竖向荷载及偏心受压荷载作用下的安全稳定性。曹亚楠^[2]对带 PEC 柱组合剪力墙进行抗震性能试验及数值模拟研究,分析了组合剪力墙试件的滞回性能、承载能力、刚度退化、延性、耗能等抗震性能指标。张宇鸣^[3]通过试验研究的手段,考虑了 PEC 柱的破坏形式、滞回性能、强度、延性、耗能能力等,并对其轴压比限值进行研究。李补拴等^[4]通过缩尺试验,以轴压比、钢材等级及加载方式为参数,分析了试件的力学性能,发现单纯提高钢构件的强度并不能有效提高 PEC 柱的承载力。殷占忠等^[5]利用 ANSYS 有限元软件,对 H 型钢 PEC 组合柱进行数值模拟,分析了试件的强度承载力、稳定性承载力及刚度等力学性能。赵根田等^[6]以混凝土工作系数

为参数,通过试验研究部分包裹高强混凝土柱(PEC 柱)的抗震性能,分析 PEC 柱的耗能能力和抗震性能。银英姿等^[7]通过轴压试验考虑了含钢率、翼缘宽厚比、横向系杆间距等对 PEC 柱的极限承载力的影响,发现含钢率大小直接影响柱极限承载力。Wang 等^[8]利用 ABAQUS 软件考虑了 PEC 柱-钢梁组合框架体系的破坏机理,分析了多种性能指标,没有考虑各种因素变化的影响。Zhao 等^[9]通过低周反复荷载试验,研究端板和柱翼缘厚度对端板连接部分外包混凝土柱-钢梁框架抗震性能的影响,得出增加柱翼缘厚度可以显著提高框架的承载力。赵根田等^[10]利用试验的方式,研究了柱轴压比和螺栓边距对 PEC 柱-型钢梁半刚性框架的受力特点、滞回性能、延性和破坏模式的影响。

前人对 PEC 柱的研究,一部分是通过单个构件试验或模拟的手段进行,这样对结构而言,漏失了整体协调变形,容易造成分析结果不准确;另一部分的分析对象是整体结构,并考虑各相关因素变化对各性能指标的影响,但未能计入结构层数变化的影响。

根据以上分析,本文采用 OpenSees 有限元软件建立了 8 层及 12 层共 12 个带 PEC 柱钢框架结构模型算例,并进行 Pushover 分析,以此来分析混凝土等级和型钢板件的厚度变化对整体结构力学性能各个指标的影响。

收稿日期:2022-10-26

作者简介:夏远洋(1982—),男,甘肃兰州人,中国市政工程西北设计研究院有限公司,高级工程师,硕士,研究方向为结构工程;孙海峰(1975—),男,甘肃兰州人,中国市政工程西北设计研究院有限公司,教授级高级工程师,硕士,研究方向为结构工程;王延凯(1996—),男,甘肃景泰人,中国市政工程西北设计研究院有限公司,助理工程师,硕士,研究方向为结构工程。

1 钢结构模型设计

1.1 模型概况

钢框架结构模型为单跨,开间和进深均为 6 m,层高为 3.6 m。假设分析结构所在地区为甘肃省兰州市七里河区,抗震设防烈度为 8 度,设计地震分组为第三组,基本地震加速度为 0.2*g*(*g* 为重力加速度),II 类场地,地面粗糙度为 B 类。设计恒荷载为 5 kN/m²,活荷载为 2 kN/m²,基本风压 $\omega_0=0.30$ kN/m²。依据钢柱 H 型钢不同板件宽厚比设计了 8 层和 12 层两种系列的钢框架空间结构。

1.2 几何参数

为了对采用 PEC 柱加固的既有钢框架结构建筑抗震性能进行研究,层数相同的结构模型 H 型钢梁截面尺寸均保持相同。钢构件材料均采用 Q235B,对结构构件尺寸进行初选后,采用建筑设计软件盈建科“YJK”对钢框架结构进行内力计算以及抗震性能分析,通过不断调整构件截面等设计参数使之符合现行规范。钢框架构件的几何参数见表 1。

表 1 钢框架模型构件的几何参数

模型系列	构件	H 型截面尺寸(高度×宽度×腹板厚度×翼缘厚度)/mm
8 层	框架柱	H500×500×15×20
		H500×500×18×20
		H500×500×18×24
	框架梁	H500×200×10×16
12 层	框架柱	H650×650×16×20
		H650×650×20×20
		H650×650×20×25
	框架梁	H600×300×14×23

1.3 物理力学参数

PEC 柱内填混凝土材料参数均按照《混凝土结构设计规范》[GB 50010—2010(2015 年版)]^[11]进行取值。材料强度按照平均值进行计算,混凝土强度等级分别为 C30、C40、C50,具体取值见表 2。

表 2 混凝土材料参数取值

材料等级	C30	C40	C50
E_c /MPa	30 000	32 500	34 500
f_c /MPa	28.03	36.05	42.92
ϵ_c	0.001 61	0.001 73	0.001 82
α_c	1.24	1.71	2.09
σ_{cu} /MPa	14.02	18.03	21.46
ϵ_{cu}	0.003 85	0.003 65	0.003 60

注: E_c 为混凝土弹性模量; f_c 、 ϵ_c 分别为混凝土单轴抗压强度及峰值应变; α_c 为混凝土受压应力-应变曲线下降段参数; σ_{cu} 、 ϵ_{cu} 分别为极限点对应的应力和应变。

2 有限元模型建立

OpenSees 作为一种在国内外具有一定影响力的有限元分析程序,已广泛应用于结构工程领域等科研项目。在非线数值模拟结构和岩土等工程的地震反应中具有较高的精度,并且可以完成静力非线性及复杂的动力非线性分析。根据上文中钢框架结构的设计参数,采用 OpenSees 软件开放的单元及材料数据库建立结构有限元分析模型。

带 PEC 柱钢框架结构结构模型的杆件采用 OpenSees 单元库中基于刚度法的梁柱单元(displacement-based beam-column)进行非线性分析计算。该单元允许刚度沿杆件长度变化,模型分析使用位移类型插值函数从结构的节点位移计算相应的杆端位移后获得构件横截面的变形,然后利用截面本构得到截面的切线刚度矩阵以及截面抗力,最后沿杆长积分从而得到整个模型单元的切线刚度矩阵与抗力。因此,可以更好地实现对于部分外包混凝土柱组合截面的模拟。

2.1 有限元模型参数

根据表 1 确立的带 PEC 柱钢框架各钢构件的截面尺寸,在 OpenSees 程序中建立 8 层和 12 层两种系列的算例模型,主要考虑 PEC 柱内填混凝土强度、型钢腹板宽厚比以及翼缘宽厚比等设计参数,见表 3。

为方便表达各模型的设计参数,将算例模型逐一进行编号。将编号统一化为 KJ*i*MjX,其中:KJ 为模型名称编号,表示“框架”;*i* 代表结构层数;Mj 表示相同层数带有不同型钢截面的 PEC 柱的结构模型编号(用以区分 PEC 柱不同型钢截面);X 代表框架柱类型或 PEC 柱内填混凝土等级。8 层和 12 层钢框架结构各包括 6 个模型,纯钢框架结构也包含在其中。

2.2 材料本构的选择

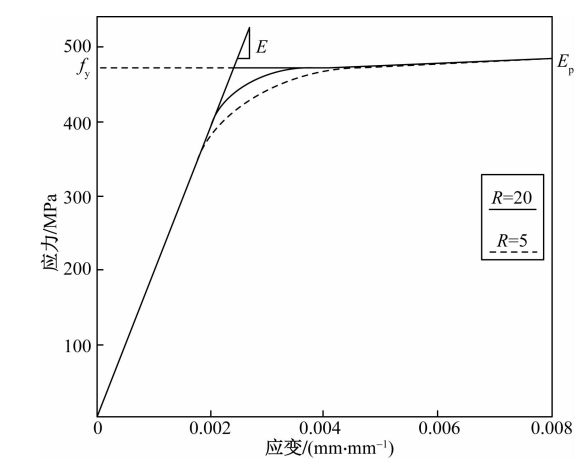
结构分析模型钢构件材料选用 OpenSees 材料库中单轴各向同性强化的 Giuffre-Menegotto-Pinto Steel 02 钢材本构,材料参数如图 1 所示。钢框架结构钢材为 Q235B,弹性模量 $E=2\times10^5$ MPa,屈服强度为 235 MPa,材料应变强化率 *b* 取 0.01, $R_0=18.5$,其余参数均取默认值。

OpenSees 有限元程序中提供了 Concrete 01、Concrete 02 以及 Concrete 03 三种具有代表性的混凝土本构关系,3 种材料在压力荷载下骨架线相同,均采用了 Hognested 模型。结构模型中 PEC 柱内填

混凝土均采用 Concrete01 材料进行分析,其本构关系与混凝土规范中相似,同样不考虑混凝土受拉,当应变超过极限点后,其骨架曲线保持水平,材料的本构关系如图 2 所示。

表 3 PEC 柱框架模型的几何参数

模型系列	编号	混凝土强度	PEC 柱型钢截面尺寸(高度×宽度×腹板厚度×翼缘厚度)/mm	框架梁型钢截面尺寸/mm
8 层	KJ8M1Steel	—	H500×500×15×20	H500×200×10×16
	KJ8M1C30	C30		
	KJ8M1C40	C40		
	KJ8M1C50	C50		
	KJ8M2C30	C30	H500×500×18×20	
	KJ8M3C30	C30	H500×500×18×24	
12 层	KJ12M1Steel	—	H650×650×16×20	H600×300×14×23
	KJ12M1C30	C30		
	KJ12M1C40	C40		
	KJ12M1C50	C50		
	KJ12M2C30	C30	H650×650×20×20	
	KJ12M3C30	C30	H650×650×20×25	



R 为控制从弹性段向塑性段过度的系数;E 为钢材的弹性模量;E_p为钢材的屈服强度对应的切线模量;f_y为钢材的屈服强度

图 1 Steel 02 本构应力-应变单调关系曲线

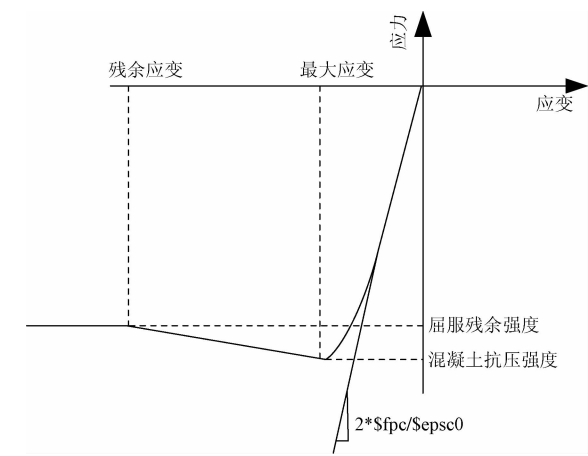


图 2 Concrete 01 本构应力-应变单调关系曲线

2.3 有限元模型建立及测点布置

2.3.1 模型建立

结构模型中梁柱构件截面均采用通过定义纤维的方式进行模拟,依据截面尺寸及所拟定的纤维数划分截面的纤维网格。梁柱型钢部分整体划分为腹板与翼缘两部分,由于截面的板件厚度较小,可在板件厚度方向只划分一个纤维;PEC 柱组合截面可整体划分为型钢和矩形内填混凝土两部分,然后分别进行纤维划分,梁柱截面纤维网格划分具体如图 3 所示。

为更精确地模拟模型中型钢构件屈曲的弹塑性特性,尤其考虑 PEC 柱中型钢部分的屈曲对杆件刚度的影响,同时减少模型中基于刚度法梁柱单元所采用的 Hermit 差值函数对于型钢屈服后的单元曲率分布反映不明显而带来的误差,对梁柱单元采用多点细分单元的方法进行建模。将钢框架梁细分为 7 个单元,柱构件细分为 4 个单元,详见图 4。

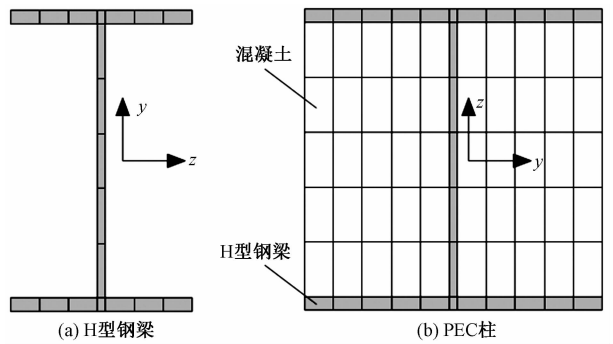


图 3 截面纤维划分

每个单元高斯积分点均设置为 5 个,同时 PEC 柱考虑 $P-\Delta$ 效应,并采用刚性楼板假定。两种系列框架整体模型如图 5 所示。

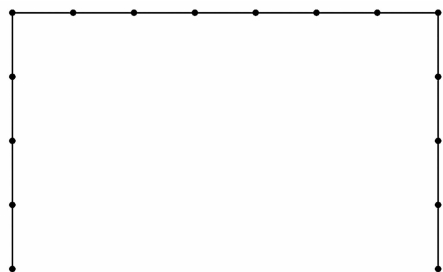


图 4 梁柱单元细分

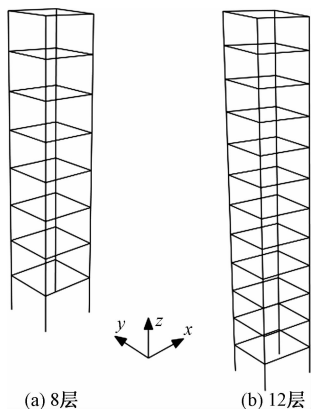


图 5 框架整楼模型

2.3.2 测点布置

在 OpenSees 程序中建立非线性有限元模型进行静力非线性 Pushover 及动力非线性分析,重点关注钢框架柱内填混凝土对结构建筑的加固效果,分析混凝土等级、型钢各板件宽厚比等参数的影响。因此,除了需要提取加固前后层间位移角、层间剪力比较常见的分析数据等,还需提取柱轴力、混凝土及型钢构件应变等数据进行分析。测点分布如图 6 所示。

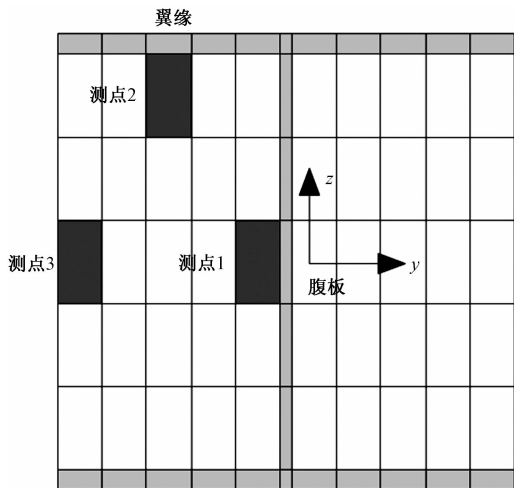


图 6 PEC 柱组合截面测点分布

3 力学性能分析

利用前文中设计的 8 层及 12 层钢框架结构,采用 OpenSees 有限元软件进行 Pushover 分析,采用结构层间侧移达到 $h/30$ (h 为层高)为位移加载控制点,分析过程中考虑了 PEC 柱内填混凝土等级、型钢板件宽厚比等参数,得到整体结构各层的层间位移、顶点位移值、基底剪力、层间剪力以及 PEC 柱力学参数等进行逐一分析。

3.1 各结构的性能曲线

采用位移控制的方式对各结构算例进行推覆分析,以层间侧移达 $h/30$ 时终止加载,得到带不同参数 PEC 柱的 KJ8 和 KJ12 系列两组结构模型的性能曲线,如图 7 所示。带 PEC 柱钢框架结构算例的性能曲线近似为三折线模型,均具有明显的弹性、强化以及塑性阶段。

从图 7 可以看出,带 PEC 柱的结构模型相比裸钢柱结构模型拥有更高的延性且屈服荷载更高,这主要是由于 PEC 柱在获得峰值载荷后,型钢及混凝土组合截面具有相对更高的后屈曲强度,提升了结构的延性。对比图 7(a)和图 7(b),带 PEC 柱钢框架结构的延性随着层数的增加而增

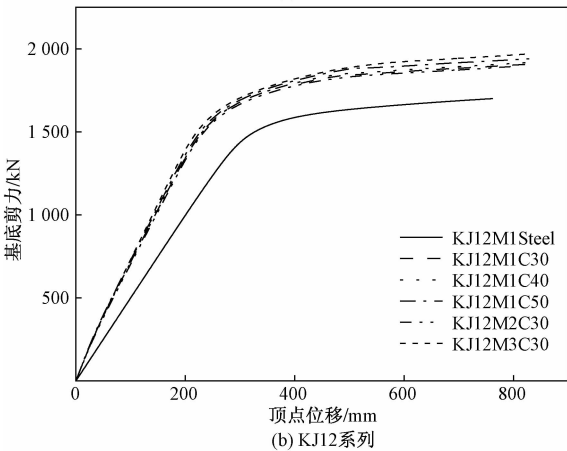
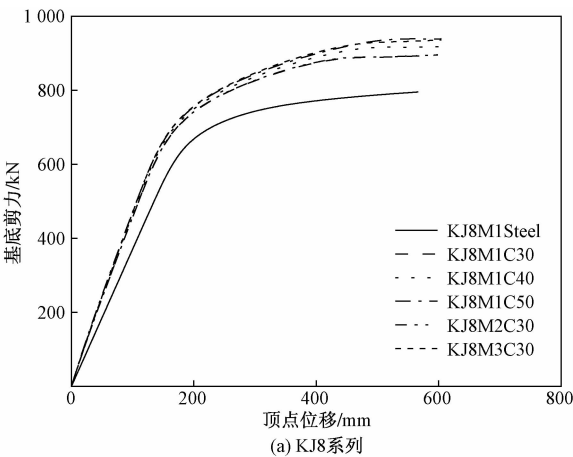


图 7 KJ8、KJ12 系列结构基底剪力-顶点位移曲线

加,表明将 PEC 柱作为钢框架结构的抗侧力构件应用在高层结构中其具有更好的延性及抗倒塌能力。

从图 8 可以看出,纯钢框架模型的初始刚度与极限承载力显著低于带 PEC 柱的钢框架模型,故在型钢钢柱中灌入混凝土,对结构在单向荷载作用下的初始刚度和承载能力具有很大影响。

观察图 9 可以发现,带 PEC 柱的结构模型相比裸钢柱结构模型拥有更高的延性,这主要是由于 PEC 柱在获得峰值载荷后,型钢及混凝土组合截面具有相对更高的后屈曲强度,提升了结构的延性。

结合以上图表,可以分析混凝土等级和板件宽厚比对结构性能的影响。①就混凝土等级而言,结构的初始刚度和极限承载力都随混凝土等级的提高而增大;8 层结构的延性随混凝土等级的提高延性略有降低,主要原因在于随着混凝土等级的提高,PEC 柱中约束混凝土变脆,从而导致混凝土延性变差,而 12 层结构混凝土及钢构件对结构参与塑性发展的贡献均有增加,结构的延性呈逐渐增长趋势。②就板件宽厚比而言,PEC 柱与框架强轴连接

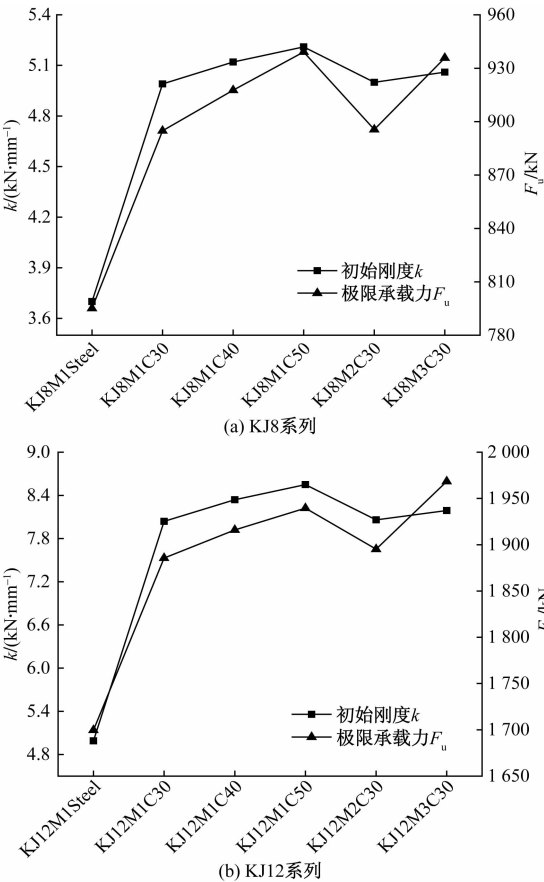


图 8 KJ8、KJ12 系列结构初始刚度 k 及极限承载力 F_u

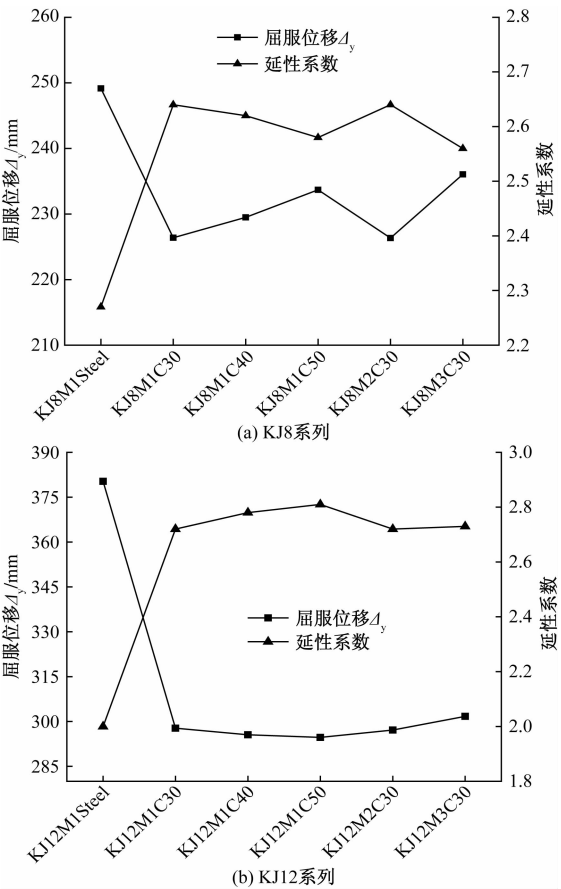


图 9 KJ8、KJ12 系列结构屈服位移 Δ 及延性系数

时腹板宽厚比的增大对结构性能基本无影响,而翼缘宽厚比的增大,结构的初始刚度和极限承载力也随之增大。

3.2 自振周期

模型中取 C30、C40 以及 C50 三种在工程中常见等级的混凝土作为 PEC 柱型钢部分的填充材料,分析不同强度等级的混凝土对结构抗震性能的影响。

从图 10 可以看出,型钢截面中内填混凝土的增加,提升了结构的弹性刚度,导致结构的自振周期变小,结构受到的地震力变大。随着混凝土等级的提高,结构的基本周期逐渐变小,而型钢板件宽厚比的变化对结构自振周期基本无影响。

3.3 柱中最大轴力

在 8 层和 12 层各结构模型中,提取选定柱的各层柱中最大轴力进行分析。

对比 KJ8 系列结构和 KJ12 系列结构结果(图 11),分析可得,结构总层数的增大使结构自振周期变小,增大了结构所受的地震力,因此轴力会相应增加,混凝土受翼缘的约束作用也会

增强。

3.4 最大楼层剪力

在 8 层和 12 层各结构模型中,提取选定柱的最大楼层剪力进行分析。

从图 12 可以看出,层间剪力随着结构层数的升高逐渐递减,呈现“抛物线”形状。混凝土等级的提升对结构底部的影响大于结构顶部,但提升幅度有限,主要原因还是翼缘对混凝土起到了一定的约束作用;腹板宽厚比的变化对层剪力基本无影响,而翼缘宽厚比的增大对层剪力有一定的提升作用,层数越低效果越显著。

4 结论

以带 PEC 柱的钢框架结构为研究对象,采用有限元软件对两种不同层数的结构进行 Pushover 分析,研究了 PEC 柱内填混凝土等级和型钢板件的厚度变化对整体结构力学性能各个指标的影响,得出以下结论:

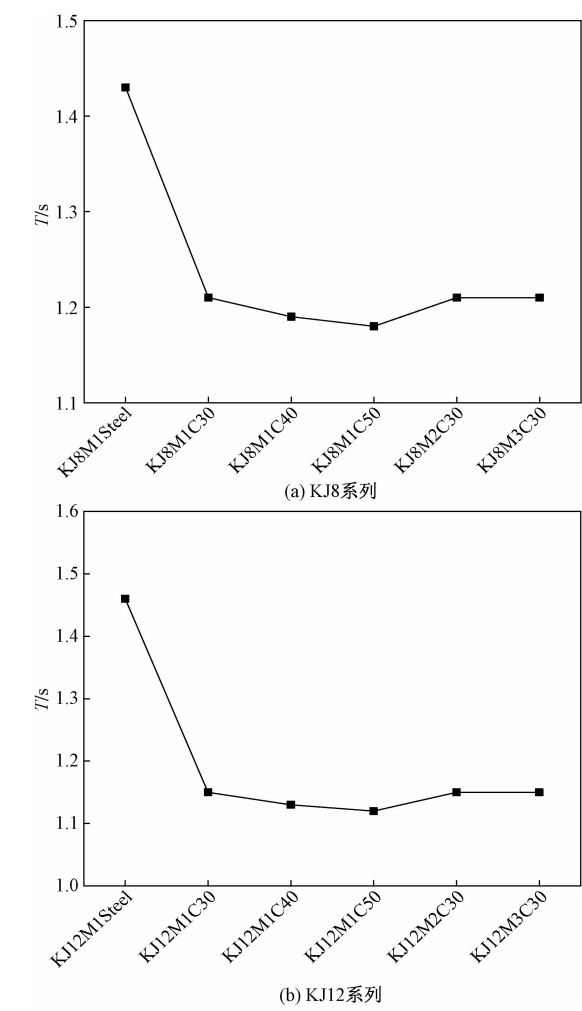


图 10 KJ8、KJ12 系列结构前三阶振型的
自振周期 T

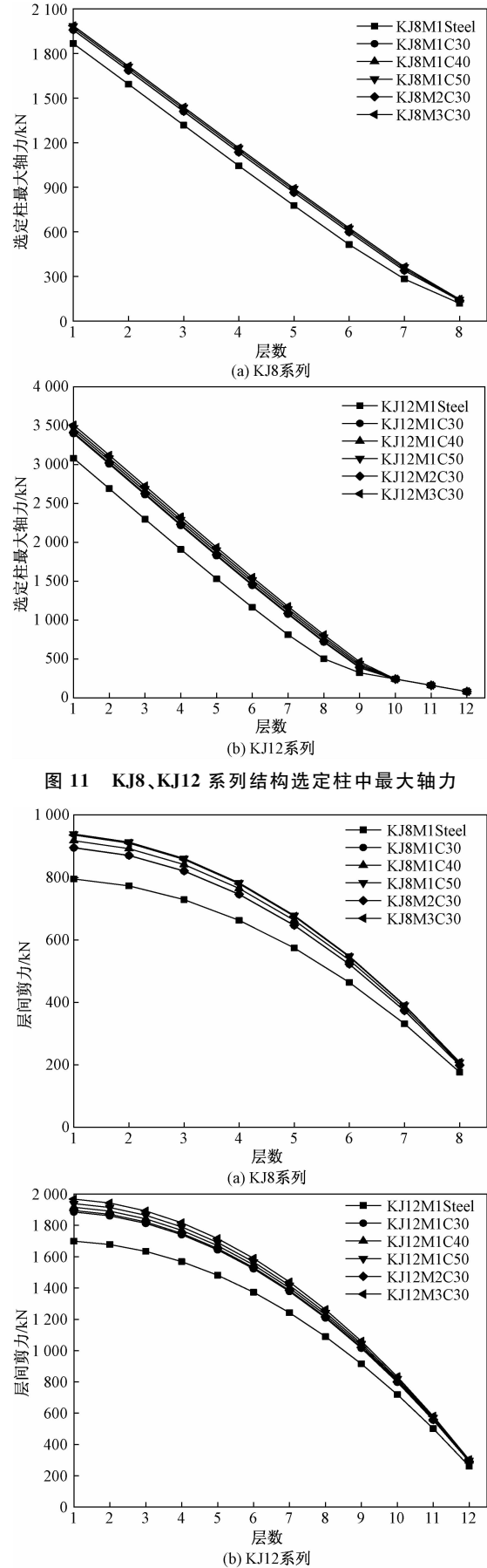


图 11 KJ8、KJ12 系列结构选定柱中最大轴力

图 12 KJ8、KJ12 系列结构选定柱的最大楼层剪力

1)随着混凝土强度等级的提高,结构的初始刚度和极限承载力都增大,而结构的自振周期略有减小;对柱中最大轴力和楼层最大剪力而言,混凝土强度等级的提升无明显影响,但相较纯钢柱,PEC 柱所受轴力和剪力明显提升。

2)随着 PEC 柱腹板宽厚比的增大,对结构的初始刚度、极限承载力以及延性影响不大;结合两种层数的钢框架结构来看,结构的自振周期波动不大,且对柱中最大轴力和楼层最大剪力的影响不明显。

3)随着 PEC 柱翼缘宽厚比的增大,结构的初始刚度和极限承载力也随之增大,结构延性增大,而结构的自振周期无明显变化。柱翼缘宽厚比的增大对柱中最大轴力和楼层最大剪力有明显的提升作用。对柱中最大轴力而言,结构层数越高影响越明显;对楼层最大剪力而言,层数越低效果越显著。

4)通过对两种不同层数的带 PEC 柱钢框架结构的分析表明,在型钢钢柱中灌入混凝土提高了结构的抗侧刚度、延性及承载能力,PEC 柱相关参数的变化对结构底部的影响程度大于结构顶部。

参考文献

[1] 赵根田,李雨颀,周伟. PEC 柱-钢梁组合框架结构分析与

设计[J]. 内蒙古科技大学学报,2021,40(2):191-200.
[2] 曹亚楠. 带 PEC 柱的组合剪力墙抗震性能研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2020.
[3] 张宇鸣. 不同轴压比下 PEC 柱的抗震性能试验研究[D]. 包头:内蒙古科技大学,2019.
[4] 李补拴,张宇鸣,赵根田,等. 不同加载方式下的 PEC 柱(强轴)抗震性能试验研究[J]. 建筑钢结构进展,2021,23(8):43-52.
[5] 殷占忠,陈生林,陈伟,等. 轴心受力 H 型钢 PEC 组合柱承载能力分析[J]. 广西大学学报(自然科学版),2015,40(2):307-316.
[6] 赵根田,张宇鸣,曹芙波,等. 焊接 H 形钢部分包裹高强混凝土柱抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(4):116-122.
[7] 银英姿,赵根田,申向东. 焊接 H 型 PEC 组合短柱轴心受压试验研究[J]. 工业建筑,2008,38(7):89-91,119.
[8] WANG C Y,DAI Y P,FANG Y Z,et al. Analysis on collapse mechanism of PEC column fabricated with thin-walled built-up section-reduced-section steel beam composite frame substructure[J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting,2015,37(4):36-45.
[9] ZHAO G T,WANG L N,DI H. Experimental research on frame seismic behavior of the PEC column-steel beam connected by end plate[J]. Building Structure,2018,48(6):68-75.
[10] 赵根田,周慧茹. PEC 柱-型钢梁半刚性框架抗震性能试验研究[J]. 科学技术与工程,2015,15(29):169-173.
[11] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

Pushover Analysis of Steel Frame Structure with PEC Columns

XIA Yuanyang, SUN Haifeng, WANG Yankai

(China Northwest Municipal Engineering Design & Research Institute Co.,Ltd.,Lanzhou 730030,China)

Abstract: For high-rise buildings, partially encased concrete columns (PEC columns) are ideal edge restraint members. In order to explore the structural mechanical properties of steel frame structure with PEC columns, 12 models of steel frame structure with PEC columns on 8 floors and 12 floors are established by using OpenSees finite element software, and Pushover analysis is carried out. Through software simulation analysis, the effects of the grade of concrete filled in PEC column and the thickness of section steel plate on the mechanical properties of the overall structure are obtained. The analysis shows that pouring concrete into the section steel column improves the lateral stiffness, ductility and bearing capacity of the structure, and the influence of the change of relevant parameters of PEC column on the bottom of the structure is greater than that on the top of the structure.

Keywords: PEC column; multi-storey steel structure; Pushover analysis; mechanical property