

文章编号:1673-2049(2017)03-0039-08

两跨非规则预应力型钢高强混凝土框架 静力性能分析与设计

计 静^{1,2}, 陈晓坤^{1,2}, 张文福³, 张云峰^{1,2}, 刘迎春^{1,2}, 卢召红^{1,2}

(1. 东北石油大学 黑龙江省防灾减灾工程与防护工程重点实验室, 黑龙江 大庆 163318;

2. 东北石油大学 土木建筑工程学院, 黑龙江 大庆 163318;

3. 南京工程学院 建筑工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要:为研究基于套建增层的两跨非规则预应力型钢高强混凝土框架(PSRCF)静力受力性能,以高强混凝土强度等级、框架柱轴压比和长细比、框架梁跨高比、框架柱角钢含钢率以及预应力筋的张拉控制应力为主要参数,设计了15组单层两跨PSRCF体系;基于简化力学模型和材料本构关系,利用ABAQUS软件建立PSRCF的有限元模型,开展了单跨非规则预应力和非预应力框架的滞回分析,对通过仿真分析获得的滞回曲线和骨架曲线与拟静力试验结果进行对比,以验证有限元模型的合理性;基于此开展15组单层两跨PSRCF在竖向轴力及水平荷载作用下的静力分析,得到框架的单调荷载-位移曲线,考察了荷载-位移曲线随主要参数的变化规律,给出结构体系的塑性铰出现顺序和两跨PSRCF在套建增层工程中的设计建议。结果表明:柱的轴压比和长细比是影响框架静力性能的主要因素,塑性铰依然按照强柱弱梁的顺序出现,两跨非规则框架结构体系设计是合理的,可为该类新型结构体系在地震区的推广应用奠定基础。

关键词:非规则预应力型钢高强混凝土框架;套建增层;静力性能;塑性铰;设计建议

中图分类号:TU311.1

文献标志码:A

Static Performance Analysis and Design of Two-span Irregular Prestressed Steel Reinforced High-strength Concrete Frames

Ji Jing^{1,2}, CHEN Xiao-kun^{1,2}, ZHANG Wen-fu³, ZHANG Yun-feng^{1,2},

LIU Ying-chun^{1,2}, LU Zhao-hong^{1,2}

(1. Heilongjiang Key Laboratory of Disaster Prevention, Mitigation and Protection Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 2. School of Civil Engineering and Architecture, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, Heilongjiang, China; 3. School of Architecture Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the static performance of two-span irregular prestressed steel reinforced high-strength concrete frames (PSRCF) based on outer-jacketing adding-story structure, the high-strength concrete grades, axial compression ratio and slenderness ratio of frame columns, span-height ratio of frame beams, steel ratio of frame columns and tension

收稿日期:2016-12-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51578120);中国石油科技创新基金项目(2016D-5007-0608);

黑龙江省领军人才梯队后备带头人资助项目(RCHB-6);黑龙江省自然科学基金项目(E201336);

东北石油大学培育基金项目(NEPUPY-1-16);东北石油大学校级研究生创新科研项目(YJSCX2016-031NEPU);

黑龙江省教育厅科研专项经费东北石油大学优势科研方向凝练基金项目(2016YSFX-02)

作者简介:计 静(1977-),男,黑龙江五常人,教授,工学博士,E-mail:jijing1977@163.com.

control stress of prestressed tendons were taken as the main parameters, 15 groups of single-floor two-span PSRCF were designed. Based on simplified mechanical model and constitutive relationship of materials, the finite element models of PSRCF were established using ABAQUS software, and the hysteretic analyses of single-span irregular prestressed and non-prestressed frames were carried out. The hysteresis and skeleton curves of simulation analysis and pseudo-static test were compared to verify the rationality of finite element modeling. The static performance analysis of 15 groups of single-floor two-span PSRCF under vertical axial force and horizontal load were carried out. The monotonic load-displacement curves were obtained, and the variation laws of the load-displacement curves with main parameters were investigated. The order of plastic hinge and design recommendations of the two-span PSRCF in outer-jacketing adding-story project were presented. The results show that the axial compression ratio and slenderness ratio of the columns are the main factors influencing the static performance of frame. The plastic hinges still appear in the order of strong column and weak beam, and the design of this kind of irregular frame structure is reasonable. The conclusions can lay the foundation for the popularization and application of the new structure in seismic region.

Key words: PSRCF; outer-jacketing adding-story structure; static performance; plastic hinge; design recommendation

0 引言

既有建筑套建增层改造已经成为土木工程界关注的热点话题^[1],近十几年,随着东北老工业基地改造的进行,陆续开展了一些工程实例的增层,如哈尔滨医科大学第一临床医学院实验楼^[2]原为 4 层砌体结构房屋,套建了 11 层跨度为 32 m 的分离式预应力混凝土框架。外套框架柱截面尺寸为 1 500 mm×2 500 mm,框架梁截面尺寸为 800 mm×1 600 mm。尽管该工程设计满足建筑规范的要求,但结构选型有待优化。哈尔滨工业大学动力楼^[3]原为 2 层砌体结构房屋,采用了外套预应力混凝土巨型框架,内含 2 层子结构。前 3 层柱截面尺寸为 1 000 mm×1 300 mm,4~6 层柱截面尺寸为 600 mm×900 mm。4 层楼面的巨型框架梁截面尺寸为 900 mm×1 800 mm,6 层楼面的巨型框架梁截面尺寸为 600 mm×900 mm。该工程预应力混凝土巨型框架抗侧刚度大,抗震性能较好,但该工程的造价偏高。预应力型钢高强混凝土框架结构可有效进行解决实际增层工程中存在的几点问题:①既有建筑的屋盖一般难以承受套建增层施工时楼盖流态混凝土的自重荷载,施工时可在型钢下悬挂模板实现楼盖自承重;②梁中钢骨和预应力筋可在柱中空腹式角钢的空隙中穿过,预应力筋可实现在柱端张拉和锚固,避免了对柱中钢骨的削弱;③通过施加预应力筋可以减小梁截面的高度,大幅降低建筑层高^[4-7]。为加大该类

框架体系在 seismic 区的推广应用,开展适用于套建增层的预应力型钢高强混凝土框架结构力学性能分析是十分必要的。

王琨等^[8]利用有限元软件 ABAQUS 建立某单层单跨预应力混凝土框架模型,其计算结果与试验结果吻合较好,能够准确反映框架的破坏形态,为同类结构的仿真分析提供了参考。熊学玉等^[9]采用 Pushover 分析方法并通过算例对大跨预应力混凝土框架结构的塑性铰出铰顺序进行了研究,完成了 2 榀框架的静力试验,基于试验结果提出该结构承载力计算公式。傅传国等^[10]开展了一榀非预应力型钢混凝土框架及 1 榀预应力型钢混凝土框架的拟静力试验分析,试验得出的滞回曲线表明该结构抗震性能良好,同时根据试验数据回归得出该结构的三线性恢复力模型,具有一定的实用价值。

本文利用 ABAQUS 软件对单层单跨角钢混凝土柱-型钢预应力和非预应力混凝土梁框架进行拟静力仿真分析,利用获得的滞回曲线、骨架曲线与已有试验结果进行对比,以验证有限元建模方法的正确性;以高强混凝土强度等级、框架柱轴压比和长细比、框架梁跨高比、框架柱角钢含钢率以及张拉控制应力大小为参数,开展 15 组两跨非规则预应力型钢高强混凝土框架 (PSRCF) 在竖向轴力及水平荷载作用下的静力分析,获得水平荷载下框架的荷载-位移曲线,给出试件水平峰值位移和极限承载力,最后给出此类框架的设计建议。

1 试件设计

1.1 试件几何参数

以试件 PSRCF-1 为例,框架设计的跨度为 9 000 mm,梁截面尺寸为 300 mm×200 mm。柱高度 3 300 mm,框架柱截面尺寸为 400 mm×400 mm。H 型钢的强度等级为 Q345,规格为 I16a,翼缘厚度为 9.9 mm,腹板厚度为 6 mm,截面高度为 160 mm,整体布置于截面正中心位置。角钢采用 L80×80×10,强度等级均为 Q345,四肢角钢保护

层厚度为 25 mm,缀板与所用型钢的厚度、缀材相同,宽度为 30 mm,间距为 100 mm,支托梁内 H 型钢的缀板宽度为 90 mm。预应力筋每束采用 1670 级 ϕ^*5 级钢丝,对称布置于 H 型钢两侧,张拉控制应力为 $0.75f_{\text{ptk}}$ (f_{ptk} 为预应力钢筋强度标准值, $f_{\text{ptk}}=1\,670\text{ MPa}$)。梁内纵筋采用 HRB335 级钢筋,直径均为 12 mm,型钢两侧各布置 1 根,保护层厚度为 30 mm。箍筋采用双肢 HPB235 级钢筋,直径为 10 mm,间距为 100 mm。框架的具体参数设计如表 1 所示。图 1 为试件 PSRCF-1 几何尺寸。

表 1 试件参数
Tab. 1 Parameters of Specimens

试件编号	混凝土强度等级	轴力/kN	框架柱轴压比	柱高度/mm	框架柱长细比	梁截面长度/mm	梁截面宽度/mm	框架梁跨高比	角钢规格	框架柱角钢含钢率/%	张拉控制应力
PSRCF-1	C60	440	0.1	3 300	8.25	300	200	13.3	L80×80×10	3.75	$0.75f_{\text{ptk}}$
PSRCF-2	C70										
PSRCF-3	C80										
PSRCF-4	C60	880	0.2	3 300	8.25	300	200	13.3	L80×80×10	3.75	$0.75f_{\text{ptk}}$
PSRCF-5		1 320	0.3								
PSRCF-6		1 760	0.4								
PSRCF-7		2 200	0.5								
PSRCF-8	C60	440	0.1	3 000	7.50	300	200	13.3	L80×80×10	3.75	$0.75f_{\text{ptk}}$
PSRCF-9				3 600	10.00						
PSRCF-10	C60	440	0.1	3 300	8.25	400	200	10.0	L80×80×10	3.50	$0.75f_{\text{ptk}}$
PSRCF-11						250	200	16.0			
PSRCF-12	C60	440	0.1	3 300	8.25	300	200	13.3	L75×75×10	4.25	$0.75f_{\text{ptk}}$
PSRCF-13									L90×90×10		
PSRCF-14	C60	440	0.1	3 300	8.25	300	200	13.3	L80×80×10	3.75	$0.45f_{\text{ptk}}$
PSRCF-15											$0.60f_{\text{ptk}}$

注:轴压比为设计轴压比,即高强混凝土强度均按设计强度值进行计算;含钢率为角钢截面面积总和与框架柱截面面积的比值(不包含缀条)。

1.2 简化力学模型

简化力学模型如图 2 所示,其中 P 为水平荷载,15 组模型均为 300 mm 位移加载, N 为竖向荷载,按设计轴压比及高强混凝土强度设计值进行换算。

$$\sigma_s=\begin{cases} E_s\epsilon & \epsilon\leqslant\epsilon_y \\ f_y & \epsilon>\epsilon_y \end{cases} \quad (1)$$

式中: E_s 为弹性模量; σ_s 为钢材应力。

预应力筋本构关系采用如图 4 所示的三折线模型。图 4 中 E_{p1} 为比例阶段对应的弹性刚度, E_{p2} 为非比例阶段对应的弹性刚度, E_{p3} 为条件屈服后对应的屈服刚度, f_{p1} , ϵ_{p1} 分别为预应力筋比例极限点的应力和应变, f_{p2} , ϵ_{p2} 分别为预应力筋屈服点的应力和应变, f_{p3} , ϵ_{p3} 分别为预应力筋极限点的应力和应变。预应力筋应力-应变关系表达式如式(2)所示

$$\sigma_p=\begin{cases} E_{p1}\epsilon_p & \epsilon_p\leqslant\epsilon_{p1} \\ f_{p1}+E_{p2}(\epsilon_p-\epsilon_{p1}) & \epsilon_{p1}<\epsilon_p<\epsilon_{p2} \\ f_{p2}+E_{p3}(\epsilon_p-\epsilon_{p2}) & \epsilon_{p2}\leqslant\epsilon_p<\epsilon_{p3} \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_p , ϵ_p 分别为预应力筋的应力和应变。

2 单榀框架有限元分析与验证

2.1 材料本构模型

本文高强混凝土本构关系采用文献[11],[12]提出的计算方法;角钢、工字钢、钢板箍、箍筋和纵筋均采用理想弹塑性模型,屈服准则采用 Mises 屈服准则,钢材简化本构模型如图 3 所示。图 3 中 σ 为应力, ϵ 为应变, f_y 为屈服强度, ϵ_y 为屈服应变。钢材应力-应变表达式见式(1)

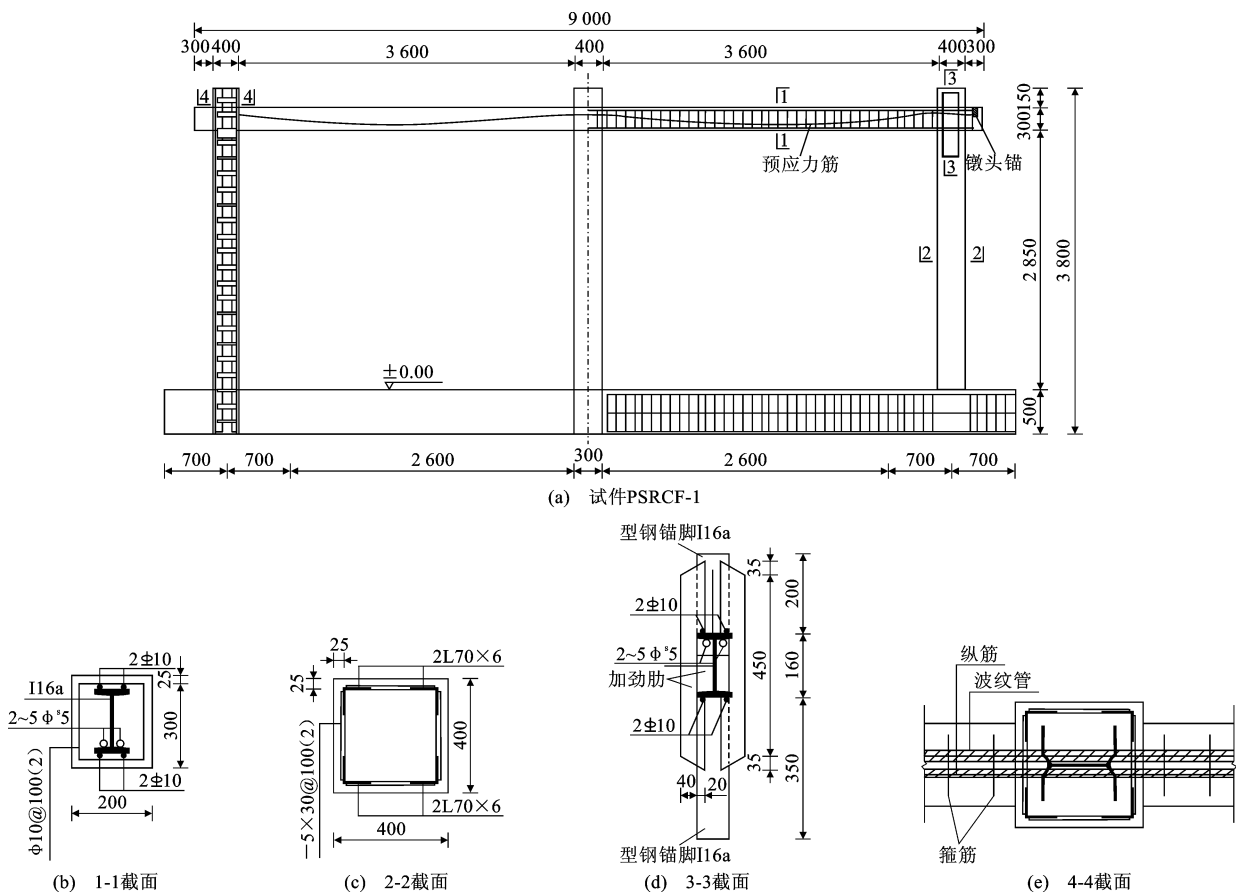


图 1 PSRCF-1 几何尺寸 (单位:mm)

Fig. 1 Geometry Size of Specimen PSRCF-1 (Unit:mm)

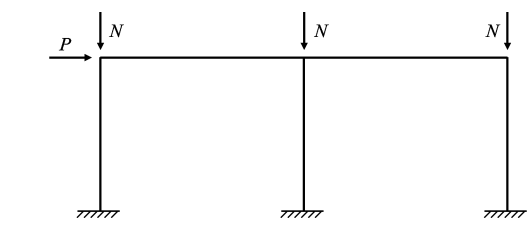


图 2 简化力学模型

Fig. 2 Simplified Mechanical Model

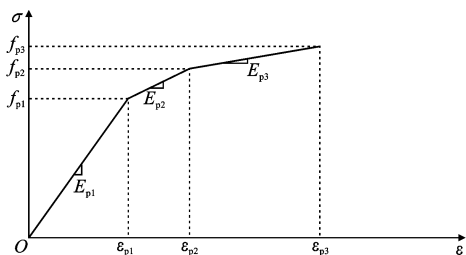


图 4 预应力筋本构关系

Fig. 4 Constitutive Relation of Prestressed Steel

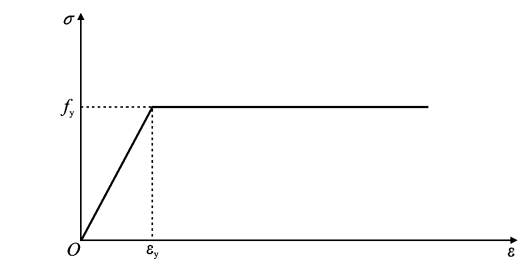


图 3 钢材简化本构模型

Fig. 3 Simplified Constitutive Model of Steel

2.2 力学模型与加载制度

框架体系可确保平面外的安全稳定,可简化为二维体系力学模型,柱底采用固接,约束 X 方向、Y 方向及转角的位移,梁柱交接处为刚性连接。单榀

框架力学模型见图 5。在柱顶施加恒定轴力,模拟由梁上传来的集中荷载;在梁端以位移约束的方式施加低周往复位移荷载(图 6),位移 Δ 加载增量取为 50.0 mm, n 为施加低周往复荷载的次数。

2.3 有限元模型建立

利用 ABAQUS 有限元软件建立单跨非预应力及预应力框架体系。采用 Wire 基本特征描述梁柱,在分析过程中共设置 4 个分析步,初始分析步中施加边界条件,分析步 1 中通过对预应力筋降温施加预应力,分析步 2 中对结构施加竖向荷载,分析步 3 中对结构施加水平位移荷载。

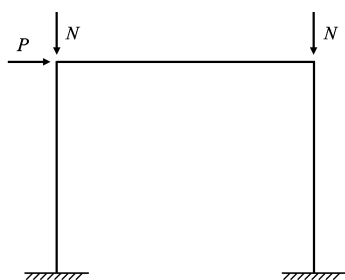


图 5 单榀框架力学模型

Fig. 5 Mechanical Model of Single-frame

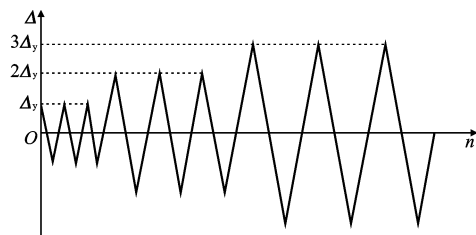


图 6 水平荷载加载制度

Fig. 6 Horizontal Loading System

钢筋骨架、型钢骨架、预应力筋与混凝土之间均采用 Embedded Region 约束命令(嵌入区域)嵌入整个模型中。垫块与混凝土之间采用 Tie 约束命令(绑定),为避免应力集中,在加载垫块上方设置参考点,采用耦合约束(Coupling 命令)将参考点与垫块上表面耦合在一起,选择运动耦合方式,约束 6 个自由度。通过布置大小 0.05 的种子(单元边长为 0.05 m)实现梁柱网格划分形成单元,以满足求解要求。

2.4 荷载-位移滞回曲线与骨架曲线对比

图 7 为滞回曲线对比。由图 7 可以看出,有限元计算曲线与试验曲线^[13]在最大承载力及滞回环形状等方面总体上基本吻合,从而验证了有限元模型的正确性。

图 8 为骨架曲线对比。由图 8 可以看出,二者初始刚度较接近,从承载力比较来看,总体上计算结果与试验结果较接近,再次验证了有限元模型的合理性。

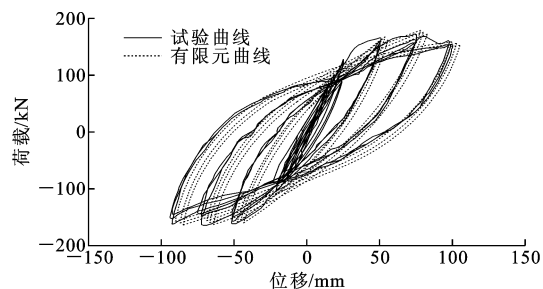
3 PSRCF 静力分析结果

3.1 扩展参数分析

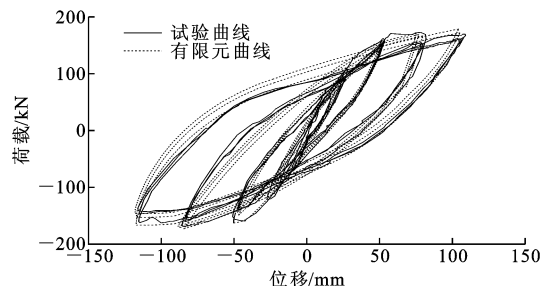
3.1.1 混凝土强度等级

试件 PSRCF-1, PSRCF-2, PSRCF-3 对应的高强混凝土强度等级分别为 C60, C70, C80, 其荷载-位移($P-\Delta$)曲线如图 9 所示。

由图 9 可以看出,随着高强混凝土强度等级的



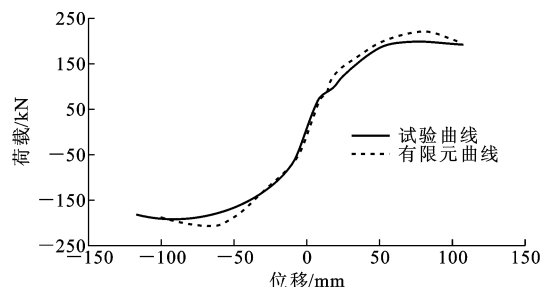
(a) 单跨非预应力框架



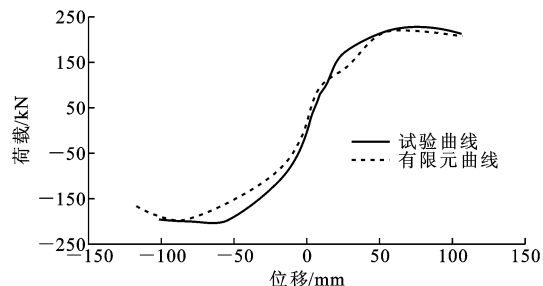
(b) 单跨预应力框架

图 7 滞回曲线对比

Fig. 7 Comparisons of Hysteresis Curves



(a) 单跨非预应力框架



(b) 单跨预应力框架

图 8 骨架曲线对比

Fig. 8 Comparisons of Skeleton Curves

增加,结构水平承载力不断上升,延性却不断降低,当混凝土强度等级达到 C80 时,框架体系延性降低较明显,这是由混凝土材料自身特性所决定的。

3.1.2 轴压比

试件 PSRCF-1, PSRCF-4, PSRCF-5, PSRCF-6, PSRCF-7 对应的轴压比分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5。不同轴压比时的 $P-\Delta$ 曲线如图 10 所示。

由图 10 可以看出,轴压比由 0.1 增加到 0.4 时,承载力不断增大,当轴压比由 0.4 增大到 0.5

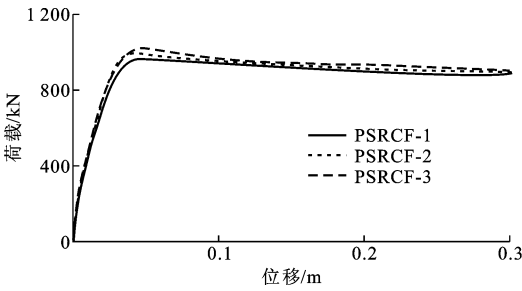


图 9 不同混凝土强度等级时的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 9 $P-\Delta$ Curves with Different Concrete Strength Classes

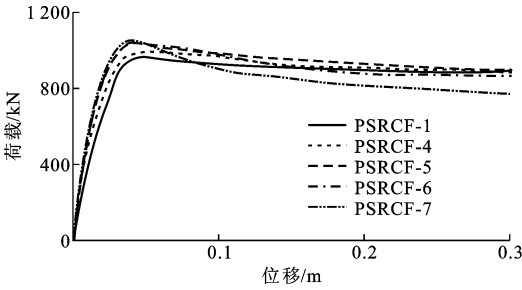


图 10 不同轴压比时的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 10 $P-\Delta$ Curves with Different Axial Compression Ratios

时,极限承载力几乎没发生变化。随着轴压比的增加,二阶效应越来越明显,延性逐渐降低,当轴压比为 0.4 或 0.5 时,与其他 3 组曲线相比下降段非常明显,安全系数降低且受力性能较差。

3.1.3 长细比

试件 PSRCF-1, PSRCF-8, PSRCF-9 对应的框架柱长细比分别为 8.25, 7.5, 10。不同长细比时的 $P-\Delta$ 曲线如图 11 所示。

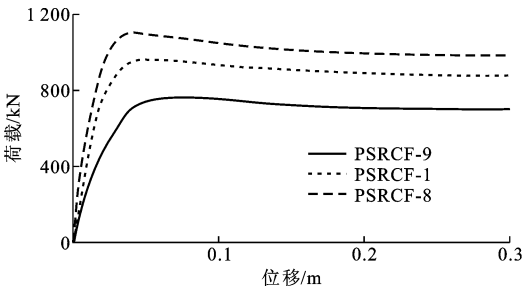


图 11 不同长细比时的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 11 $P-\Delta$ Curves with Different Slenderness Ratios

由图 11 可以看出,当长细比增大时,弹性阶段刚度降低非常明显,且水平承载力也越来越低。曲线下降段更加平缓,说明长细比大的结构延性更好,这是由于长细比较大时,框架柱的层高较高,使得框架的侧向刚度有所降低。

3.1.4 跨高比

试件 PSRCF-1, PSRCF-10, PSRCF-11 对应的

框架梁跨高比分别为 13.3, 10, 16。不同跨高比时的 $P-\Delta$ 曲线如图 12 所示。

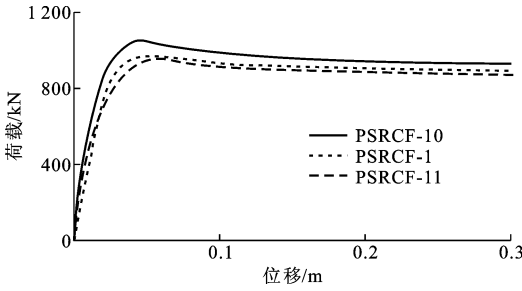


图 12 不同跨高比时的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 12 $P-\Delta$ Curves with Different Span-height Ratios

由图 12 可知,跨高比对结构初始刚度影响并不明显,在位移达到 25 mm 以后随着跨高比的增加,结构刚度略微增大。跨高比越小,结构水平承载力越高,延性也显现出较好的优势。

3.1.5 框架柱角钢含钢率

试件 PSRCF-1, PSRCF-12, PSRCF-13 对应的框架柱角钢含钢率分别为 3.75%, 3.5%, 4.25%。不同含钢率时的 $P-\Delta$ 曲线如图 13 所示。

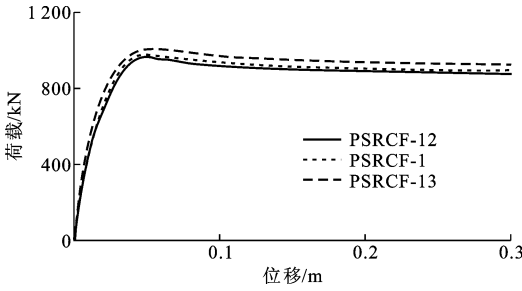


图 13 不同含钢率时的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 13 $P-\Delta$ Curves with Different Steel Contents

由图 13 可以看出,3 组曲线在位移小于 30 mm 时刚度几乎一致,当位移继续增大时,刚度越大,承载力明显上升。曲线下降段逐渐平缓,说明含钢率大的模型延性有所增强,结构设计也越加安全。

3.1.6 张拉控制应力

试件 PSRCF-1, PSRCF-14, PSRCF-15 对应的张拉控制应力分别为 $0.75f_{ptk}$, $0.45f_{ptk}$, $0.6f_{ptk}$ 。不同张拉控制应力时的 $P-\Delta$ 曲线如图 14 所示。

由图 14 可知,张拉控制应力对荷载-位移曲线的影响并不明显,张拉控制应力较大时,结构的承载力较大。

3.2 极限承载力与对应的峰值位移

表 2 为 15 组模型的极限承载力和对应的峰值位移。由表 2 可以更直观地看出各参数对 PSRCF 承载力的影响,当轴压比较小时,达到极限承载力时

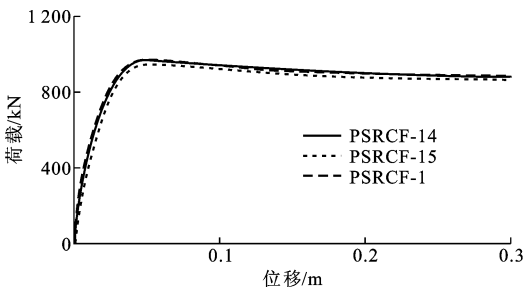


图 14 不同张拉控制应力时的 $P-\Delta$ 曲线

Fig. 14 $P-\Delta$ Curves with Different Tension Control Stresses

表 2 极限承载力与峰值位移

Tab. 2 Ultimate Bearing Capacities and Peak Displacements

试件编号	极限承载力/kN	峰值位移/mm
PSRCF-1	963.74	51.07
PSRCF-2	1 004.40	49.82
PSRCF-3	1 034.81	50.42
PSRCF-4	1 050.21	43.68
PSRCF-5	1 056.39	40.17
PSRCF-6	990.09	50.22
PSRCF-7	1 016.13	50.31
PSRCF-8	1 099.21	43.92
PSRCF-9	762.60	69.21
PSRCF-10	1 037.67	44.99
PSRCF-11	939.11	50.01
PSRCF-12	946.06	51.39
PSRCF-13	997.44	49.36
PSRCF-14	963.90	49.59
PSRCF-15	964.04	50.74

的位移很大,说明轴力对结构二阶效应影响最为明显,轴力越小结构延性越好。此外,长细比较大时,虽然承载力较小,但是达到极限承载力时的位移很大,说明长细比越大结构延性越好。

3.3 塑性铰出铰规律

当框架柱受拉一侧角钢进入屈服时,判定该位置产生塑性铰;当框架梁受拉一侧 H 型钢的翼缘屈服时,判定该位置梁产生塑性铰^[13]。图 15 为塑性铰出铰顺序。由图 15 可以看出,PSRCF 塑性铰首先出现在与中柱柱顶连接的梁端,然后是中柱柱底,再向两侧的梁端发展,最后到边柱的柱底。PSRCF 塑性铰整体服从强柱弱梁的规律,之所以中柱柱底产生塑性铰较早,可能由于框架柱较高,中柱受力较集中,在水平荷载作用下柱底所受弯矩较大。

4 框架设计建议

对于用于套建增层中的框架体系来说,底层属于结构的薄弱层,框架柱的轴压比较大,延性性能相

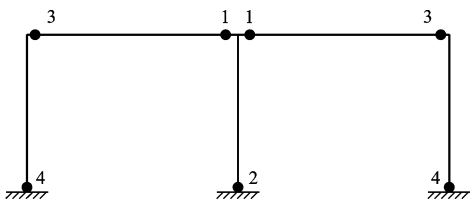


图 15 塑性铰出铰顺序

Fig. 15 Order of Plastic Hinge

对较差,因此应更加严格控制该类结构的轴压比。若轴压比超限,中柱可采用实腹式型钢组合柱或者带有芯柱的钢筋混凝土异强柱,型钢梁可以和实腹式型钢柱或者芯柱中的竖向套芯钢管实现可靠连接,形成强柱弱梁的大跨结构体系。

由于 PSRCF 在非抗震设防区及抗震设防区的新建和改建工程中有十分重要的应用,这就要求其结构底层框架层高较高,根据实际框架柱截面尺寸需要较大的长细比得以满足其使用要求,因此综合考虑建议长细比取值在 8~10 范围内。

随着跨高比的减小,结构极限承载力增大幅度较小,同时破坏过程中抗变形能力较为接近,说明 PSRCF 可以很好地应用于套建工程中的大跨结构。梁上可以布置横向加劲肋控制预应力筋的位置,同时对梁起到稳定作用。

为提高 PSRCF 的承载能力和稳定性能,可以采用节点加腋。对于跨度特别大的体系,可在框架柱之间设置防屈曲斜撑,提高底层大空间框架的抗侧性能。

5 结 语

(1)单层单榀预应力及非预应力框架的拟静力数值模拟结果与已有试验结果对比显示,框架的荷载-位移滞回曲线和骨架曲线整体吻合良好,验证了有限元模型的正确性。

(2)对于单层两跨预应力型钢高强混凝土框架,轴压比是影响框架静力性能的重要因素。当轴压比变大时,延性降低,轴力的二阶效应越明显,延性下降得越快,在实际工程中应严格控制框架柱的轴压比。

(3)柱的长细比是影响框架静力性能的主要因素之一。长细比不仅对 PSRCF 体系的稳定性起主导作用,对其延性性能也有较明显的影响。随着框架柱长细比的增加,弹性阶段的刚度越来越小,水平承载力越来越低,而结构的延性变得更好。

参考文献:

References:

- [1] 郑文忠,王英,刘铁,等.对既有房屋套建增层改造的认识与思考[J].工业建筑,2005,35(4):1-5,9.
ZHENG Wen-zhong, WANG Ying, LIU Tie, et al. Thoughts and Understanding of Remodeling of Adding Storeys Around Existing Building[J]. Industrial Construction, 2005, 35(4): 1-5, 9.
- [2] 来庆贵.哈医大实验楼套建增层选型与设计方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.
LAI Qing-gui. Jacketing Structure Model Selection and Design Method Research for Adding-story of Harbin Medical University Laboratory Building[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2004.
- [3] 郑文忠,周威,田石柱,等.哈工大动力楼巨型框架增层结构设计测试[J].建筑结构,2004,34(9):3-6,41.
ZHENG Wen-zhong, ZHOU Wei, TIAN Shi-zhu, et al. Mega-frame Adding-story Design and Test of Power Department of Harbin Institute of Technology[J]. Building Structure, 2004, 34(9): 3-6, 41.
- [4] SAADATMANESH H, ALBRECHT P, AYYUB B M. Experimental Study of Prestressed Composite Beams[J]. Journal of Structural Engineering, 1989, 115(9): 2346-2363.
- [5] 计静,李冰,戴建国,等.基于套建增层的单跨双层钢框架滞回性能分析与设计[J].东北石油大学学报,2014,38(5):111-120.
JI Jing, LI Bing, DAI Jian-guo, et al. Hysteretic Behavior Analysis and Design of the Single-span and Double Layer Steel Frame Based on the Outer-jacketing Storey-adding[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2014, 38(5): 111-120.
- [6] 计静,陈晓坤,张文福,等.预应力高强混凝土组合梁静力仿真分析与验证[J].工业建筑,2016,46(增):1443-1448.
JI Jing, CHEN Xiao-kun, ZHANG Wen-fu, et al. Static Analysis and Verification of Prestressed High-strength Concrete Composite Beams[J]. Industrial Construction, 2016, 46(S): 1443-1448.
- [7] JI J, ZHANG W F, YUAN C Q, et al. Prestressed Steel Reinforced Concrete Frame Applied to Outer-jacketing Structure and Its Restoring Force Model Based on IDARC[J]. Research Journal of Applied Science, Engineering and Technology, 2013, 6(11): 2045-2051.
- [8] 王琨,袁沈峰,郑文忠.水平荷载作用下型钢混凝土梁-角钢混凝土柱框架非线性有限元模拟[J].结构工程师,2011,27(6):41-47.
WANG Kun, YUAN Shen-feng, ZHENG Wen-zhong. Nonlinear Finite Element Simulation on a Frame Structure of Steel Reinforced Concrete Beam and Angle Steel Concrete Column Under Horizontal Loading[J]. Structural Engineers, 2011, 27(6): 41-47.
- [9] 熊学玉,李春祥,耿耀明,等.大跨预应力混凝土框架结构的静力弹塑性(Pushover)分析[J].地震工程与工程振动,2004,24(1):68-75.
XIONG Xue-yu, LI Chun-xiang, GENG Yao-ming, et al. Nonlinear Static Procedure (Pushover Analysis) of Large-span Prestressed Concrete Structures[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2004, 24(1): 68-75.
- [10] 傅传国,李玉莹,孙晓波,等.预应力及非预应力型钢混凝土框架受力及抗震性能试验研究[J].建筑科学学报,2010,31(8):15-21.
FU Chuan-guo, LI Yu-ying, SUN Xiao-bo, et al. Experimental Study on Seismic Performance of Prestressed and Non-prestressed Steel Reinforced Concrete Frames[J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(8): 15-21.
- [11] 余志武,丁发兴.混凝土受压力学性能统一计算方法[J].建筑科学学报,2003,24(4):41-46.
YU Zhi-wu, DING Fa-xing. Unified Calculation Method of Compressive Mechanical Properties of Concrete[J]. Journal of Building Structures, 2003, 24(4): 41-46.
- [12] 丁发兴,余志武.混凝土受拉力学性能统一计算方法[J].华中科技大学学报:城市科学版,2004,21(3):29-34.
DING Fa-xing, YU Zhi-wu. Unified Calculation Method of Mechanical Properties of Concrete in Tension[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Urban Science Edition, 2004, 21(3): 29-34.
- [13] 王琨.套建增层预应力钢骨混凝土框架抗震性能试验与分析[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.
WANG Kun. Test and Analysis on Seismic Performance of Jacketing Prestressed Steel Reinforced Concrete Frame[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.