

自复位 RC 框架柱脚抗震性能模拟分析研究

杨 溥¹, 洪基豪¹, 杨熠明¹, 高浩杰², 蔡 森³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044; 2. 华润置地(湖南)有限公司, 湖南 长沙 410000;
3. 香港华艺设计顾问(深圳)有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 针对一种带钢套靴的自复位 RC 框架柱脚, 在分析其受力机理的基础上, 采用有限元模型对不同轴压比下柱脚的抗震性能进行了模拟分析, 并与试验结果对比分析, 结果表明: 模拟分析和试验所得的滞回曲线在各加或卸载段、峰值特征点和柱脚开口情况均吻合较好, 验证了本文有限元模型的有效性. 最后通过参数分析, 对比研究了不同初始预应力筋面积、预应力筋初始应力、耗能元件面积、轴压比对自复位柱脚抗震性能的影响规律, 为该节点的抗震设计提供参考.

关键词: 自复位柱脚; 抗震性能; 非线性分析; 轴压比; 残余变形

中图分类号: TU399

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0775-09

Simulation analysis of self-centering RC column base joints

YANG Pu¹, HONG Jihao¹, YANG Yiming¹, GAO Haojie², CAI Sen³

(1. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. China Resources Land(Hunan)Ltd., Changsha 410000, China;

3. Hong Kong Huayi Design Consultants(Shenzhen), Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Point at a kind of self-centering RC column base joints with steel shoes, based on the structure and mechanics performance of the joints, seismic behavior of the column base joints under different axial compression ratio was simulated and analyzed by finite element method, and compared with the test results. The results indicated that in the aspects of hysteretic curve, peak value point at each level and opening situation of column base, analysis results were consistent with experimental results which proved the validity of the finite element model. Finally, seismic behavior of self-centering RC column base joints under different area of prestressed bar, initial stress of prestressed bar, area of energy dissipative element, axial compression ratio was researched by parameter analysis, which also provided reference for seismic design of the joints.

Key words: self-centering column base; seismic behavior; nonlinear analysis; axial compression ratio; residual deformation

在地震中, 传统钢筋混凝土框架结构通过梁柱构件的塑性变形来耗散地震能量, 但常常导致结构产生较大且不可恢复的塑性残余变形, 特别是当柱脚发生较大变形时, 结构修复成本将大大增加或无法修复, 最终不得不拆除重建, 造成巨大的经济损失及资源浪费. 针对这些问题, 有学者提出一种新型结构形式—自复位结构, 该结构体系能有效减小甚至消除结构的残余变形.

国内外对自复位结构研究成果日渐丰硕. Priestley 和 Tao 等^[1]最早提出自复位预应力混凝土框架结构(Self-Centering Post-Tensioned Precast Concrete Frames), 该结构梁柱为预制构件, 未现浇到一起, 仅通过张拉预应力筋使梁端与柱接触

并连接, 地震过程中通过接触面开口与闭合耗散地震能量. 之后, Cheok 和 Lew 等^[2]通过缩尺模型的低周往复荷载试验对此节点进行研究, 试验中表现出的破坏为: 梁柱接触面张开, 预应力筋受拉屈服, 接触面混凝土压碎. El-Sheikh 等人通过静力弹塑性分析及弹塑性时程分析计算一个 6 层自复位混凝土框架结构, 表明在大震作用下, 该自复位框架结构具有良好的强度、刚度及延性, 表现出较好的自复位性能和耗能能力. 郭彤等^[3-5]提出一种腹板摩擦式自复位混凝土框架梁柱节点, 在梁端加钢套靴, 柱上预埋钢板防止节点处产生应力集中混凝土压碎, 并专门设置摩擦片来耗散地震能量, 试验表明了该腹板摩擦式自复位预应力混凝土框架梁柱节点具有较好的自复位性能和

收稿日期: 2019-02-24

修改稿日期: 2019-11-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51578093); 重庆市自然科学基金项目(cstc2018jcyjAX0061)

第一作者: 杨 溥(1969—), 男, 博士, 教授, 主要从事结构工程研究. E-mail: Yangpu@cqu.edu.cn.

耗能能力。在此基础上,为进一步研究该节点在结构中的性能,郭彤等对一榀腹板摩擦式自复位预应力混凝土平面框架结构(4跨6层)进行弹塑性时程分析,验证了该自复位结构良好的自复位性能和耗能能力。蔡小宁等^[6-7]设计出一种自复位钢筋混凝土预制节点,梁端通过预应力筋、耗能角钢及高强螺栓与柱相连,并对该节点进行低周往复试验,随后,对该节点进行数值模拟分析,通过与试验对比,抗震性能较好。清华大学潘振华等^[8]利用 ABAQUS 有限元软件模拟足尺自复位钢框架梁柱节点,并进行参数分析,得出当选取适当参数,自复位梁柱节点具有良好的强度、刚度及延性,并表现出预期的自复位能力和耗能能力。蒋成良等^[9]利用 ANSYS 有限元软件模拟自复位钢框架结构,通过改变预应力筋初始应力建立不同模型分析,得出随着初始预应力增大,钢框架的刚度、承载力及自复位能力增加,但耗能能力有所降低。Mirzaie 等^[10]提出一种新型自复位钢框架柱脚节点,将变形集中于 T-stubs 耗能装置,有效避免柱脚塑性铰出现,并采用 OpenSEES 软件模拟,精确预测了该自复位柱脚在低周往复加载下与普通自复位相似的特征行为。郭佳等^[11-13]针对桥墩提出了一种自复位桥墩柱节点,通过低周往复试验研究及拟静力分析和动力时程分析,表明该复位桥墩节点具有良好的自复位及耗能能力,且承载力不低于传统桥墩。Eatherton M R 等^[14]提出一种自复位受控摇摆框架结构,并通过试验及模拟分析研究给出此结构的设计方法。Maurya A^[15]通过试验及计算研究一种自复位钢梁,表明该自复位钢梁具有良好自复位能力,同时便于震后修复。Guo T 等^[16]通过对半缩尺单层两跨自复位混凝土框架进行试验研究,表明该框架具有与传统框架相当的抗侧能力和变形能力,同时残余位移可以忽略。杨溥等^[17-18]提出一种新型自复位钢桁架梁,通过理论及模拟计算分析,表明该自复位钢桁架梁具有良好的自复位性能及耗能能力,并提出其设计计算方法。

对于自复位混凝土框架柱脚节点的研究,柱脚节点边缘混凝土易发生局部破坏,目前的研究对不同轴压比下节点性能关注不够,且对震后耗能元件更换方面研究较少。因此,本文针对一种柱脚带钢套靴并可更换耗能元件的自复位柱脚节点,采用 OpenSEES 软件建立有限元模型,将模拟结果与低周往复试验结果进行对比分析,验证了本文有限元的有效性。在此基础上,针对不同

预应力筋初始应力和面积、耗能元件面积及轴压比等参数,对比研究了不同参数对自复位柱脚抗震性能,主要是自复位能力及耗能性能的影响规律。

1 自复位 RC 框架柱脚的构造及理论分析

1.1 自复位 RC 框架柱脚的构造

自复位 RC 框架柱脚的柱身与基础断开,柱底部设置一钢套靴与预埋在基顶钢板接触,此构造有效避免柱底及基顶混凝土局部压溃。在基顶与柱身相接处设置抗剪元件,防止在水平荷载下柱身侧移。在柱中部设置一贯穿柱身直至基底的无粘结预应力钢绞线,当柱发生侧移,柱底部转动接触面开口,钢绞线拉力增大,利用钢绞线的拉力实现柱脚的自复位功能。

耗能元件由耗能钢筋和防屈曲外套管组成,设置于柱底侧面,两端分别铰接于基础顶面和钢套靴侧面上部,当柱底转动时,一侧耗能钢筋受拉屈服,另一侧耗能钢筋受压屈服,实现耗能。如图 1 所示。

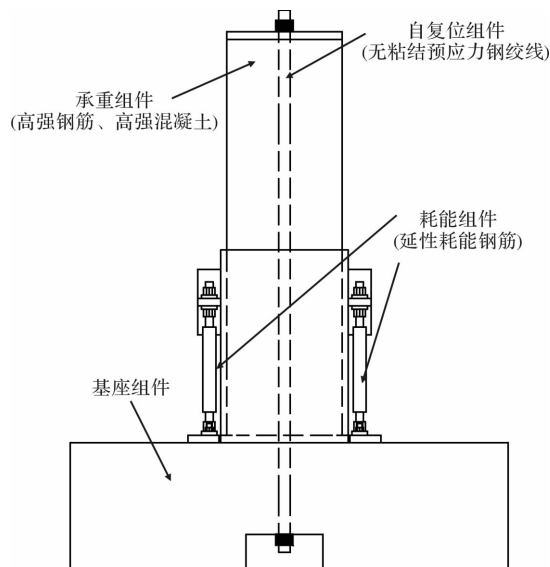


图 1 自复位 RC 框架柱脚结构示意图

Fig. 1 Self-centering RC frame column base joints

1.2 自复位 RC 框架柱脚受力机理

自复位 RC 框架柱脚的力学性能主要由预应力筋、耗能元件以及 RC 柱三部分决定。在整个受力过程中,预应力钢绞线均处于弹性状态,耗能元件及 RC 柱会产生塑性变形。框架柱脚整个受力过程可分为 6 个阶段,具体的荷载-位移关系如图 2 所示。

(1)OA 段: O 点柱脚仅受轴力作用,不受水

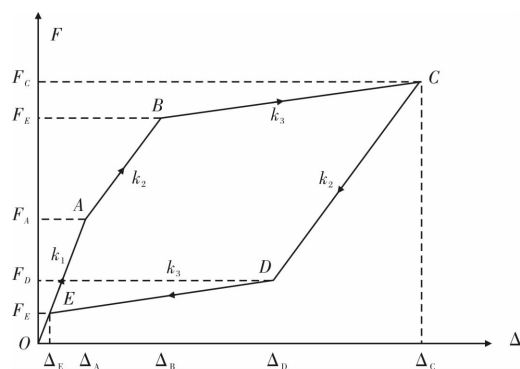


图 2 自复位 RC 框架柱脚的水平荷载-位移曲线

Fig. 2 Horizontal load-displacement curves of self-centering RC column base joints

平荷载作用。随着水平位移的增加, 柱所受的弯矩增大, 柱脚底部的混凝土受压区高度逐渐增大。当达到 A 点时, 柱身与基础处于开口分离的临界状态。此阶段柱的抗弯刚度 K_1 主要由混凝土柱自身提供。

(2)AB 段: 水平位移继续增加, 柱底部与基础在 A 点发生开口。开口后柱的抗侧刚度 K_2 由钢绞线和耗能元件共同提供。柱身绕柱脚一侧转动, 预应力钢绞线和耗能元件在弹性范围内开始受拉伸长。当到达 B 点时, 耗能元件开始屈服。

(3)BC 段: 在 B 点处, 耗能元件已经屈服。当水平位移继续增大到 C 点时, 耗能元件一直处于受拉强化状态, 其为柱提供的抗弯刚度减小。此阶段预应力钢绞线仍处于弹性状态, 其为柱提供的抗弯刚度大小不变。因此, 此阶段的柱身抗弯刚度 K_3 主要由预应力筋提供, 要小于 AB 段。

(4)CD 段: 水平荷载卸载过程, 耗能元件和预应力钢绞线均处于弹性卸载状态。由于预应力钢绞线的复位作用, 耗能元件会从 C 点的受拉状态开始卸载, 直至到达 D 点时受压屈服。因此, 此阶段柱身抗弯刚度与 AB 段相同。

(5)DE 段: D 点处耗能元件已经受压屈服, 继续卸载至 E 点, 耗能元件受压强化。E 点时柱身与基础的开口闭合。此阶段耗能元件和预应力钢绞线为柱提供的抗弯刚度与 BC 段相等。

(6)EO 段: E 点处, 柱身与基础已经闭合, 柱的受力状态与普通钢筋混凝土柱相同, 其抗弯刚度与 OA 段相等。

2 自复位 RC 框架柱脚节点模拟分析

2.1 自复位 RC 框架柱脚有限元模型

自复位 RC 框架柱脚节点试验原型及有限元模

型如图 3 所示, 柱高 1.5 m, 加载点距基顶 1.3 m, 截面尺寸为 300 mm × 300 mm, 混凝土强度等级 C60, 预应力筋为两根 7 股直径 15.2 mm 的钢绞线, 极限强度标准值 f_{ptk} 为 1 860 MPa, 初始应力控制为 200 kN (约 0.4 f_{ptk}), 截面面积 A_{pt} 为 280 mm²。

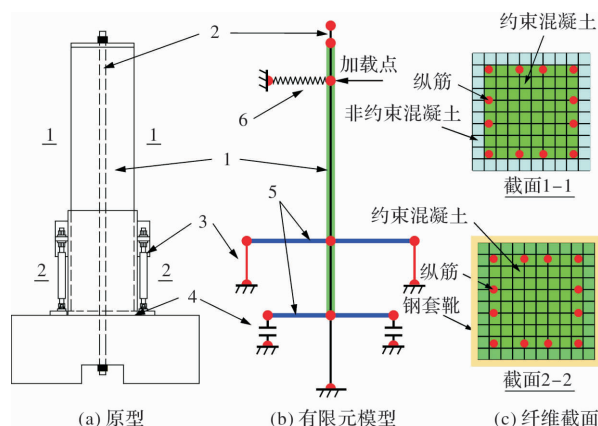


图 3 自复位 RC 框架柱脚节点有限元模型

Fig. 3 The finite element model of SCFC

本文基于有限元程序 OpenSEES 建立二维有限元模型, 其中, 混凝土本构采用 Concrete01 单轴材料模型, 该本构基于 Kent-Scott-Park 连续模型^[19], 加卸载采用 Karasan-Jirsa 准则, 滞回法则通过卸载段斜率衰减来考虑混凝土损伤, 并不考虑混凝土受拉性能。混凝土的应力-应变关系如图 4 所示; 模型中柱纵筋 (HRB500) 以及耗能元件中的耗能钢筋 (HPB300), 均采用 Steel02 单轴材料模型, 该材料采用 Giuffre-Menegotto-Pinto 模型^[20]。钢筋应力-应变关系如图 5 所示; 无粘结预应力筋则采用 steel01 单轴钢筋本构, 并通过带有初始应力材料 (Initial Stress Material) 来模拟预应力筋的初始应力。

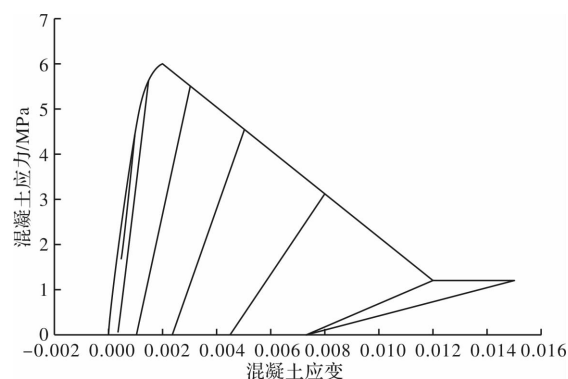


图 4 混凝土的应力-应变滞回关系

Fig. 4 Hysteretic stress-strain relation of concrete

模型采用的各个单元主要包括:

单元 1: 框架柱柱身, 采用基于位移的非线性

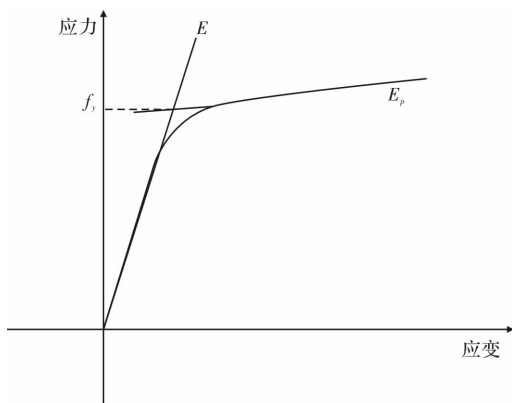


图5 钢筋的应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relation of steel

单元,分为上下两部分,上部为钢筋混凝土部分,下部为钢套靴包裹钢筋混凝土部分,都采用纤维截面模拟,如图3(c)所示,把框架柱截面划分纤维,每个纤维都具有相应的应力-应变关系,上部钢筋混凝土部分由纵筋、约束混凝土和非约束混凝土三种不同纤维组成,下部钢套靴包裹钢筋混凝土部分由钢板、纵筋和约束混凝土三种不同纤维组成,两部分纤维截面通过节点连接传递内力^[21]。

单元2:无粘结预应力钢绞线,采用弹性杆单元,并与框架柱纤维单元分离构建,顶部节点与框架柱顶部共享节点,底部节点与基座铰接。

单元3:耗能元件,采用HRB300级钢筋,并采用仅承受轴向作用的杆单元。

单元4:只受压不受拉弹性单元,采用零长度单元(Zero-Length Element)模拟框架柱与基础分开产生的缝隙。

单元5:刚臂单元,材料的弹性模量放大1000倍,保证刚臂单元不变形,有效的把耗能元件以及只受压不受拉单元与框架柱单元连接,可传递二维平面两方向的位移及平面内转角,可保证连接对象共同产生作用和变化。

单元6:弹簧单元,采用Steel02单轴材料,单元采用桁架单元(Truss Element),用于模拟柱顶滑车与反力梁的滚动摩擦力,如图6,该摩擦力等效为水平加载点处设置弹簧单元产生的水平反力,图3(b)柱顶上相应位置。

2.2 加载制度

采用全程位移控制的低周往复加载模式,即柱顶最大水平位移为55 mm(转角约为0.04 rad),第一级加载位移幅值为5 mm,以后每级加载位移幅值增量为5 mm,每次循环包含一组正值和一组等大的负值。

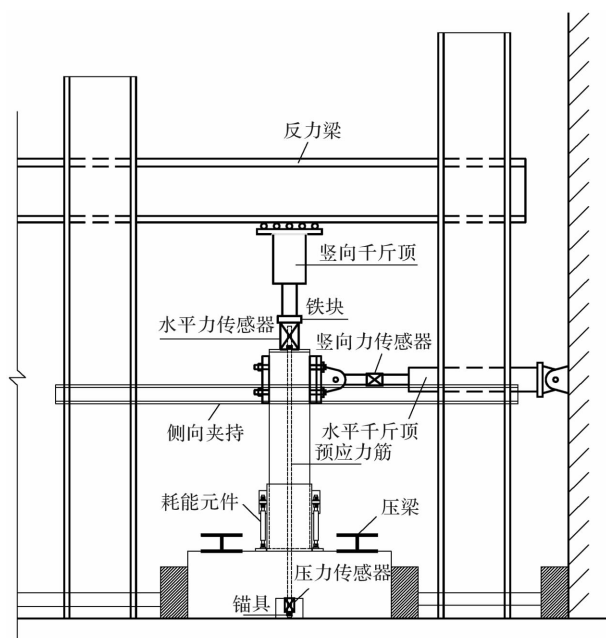


图6 试验装置示意图

Fig. 6 Test device diagram

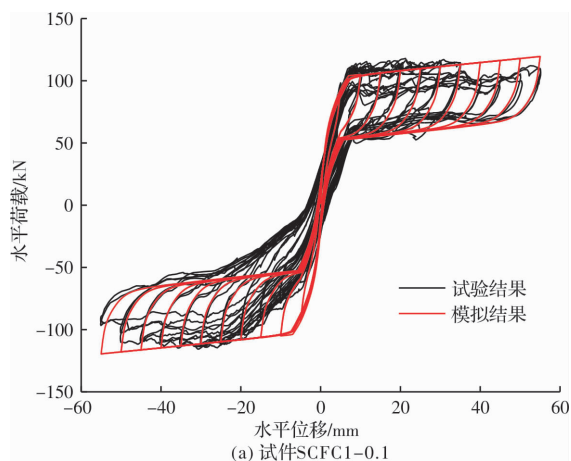
3 模拟与试验结果对比分析

3.1 滞回曲线对比

通过建立OpenSEES纤维有限元模型,将数值模拟结果与试验的荷载-位移曲线进行对比分析,如图7所示。其中,试件SCFC1-0.1施加400 kN竖向荷载(低轴压比),试件SCFC1-0.3施加1200 kN竖向荷载(高轴压比)。从对比结果看见:

(1)模拟分析和试验所得的滞回曲线均表现出自复位RC框架柱脚节点受力的典型6阶段,且荷载-位移滞回曲线吻合较好,都呈现出明显的“旗帜形”形状,表明本文建立的分析模型的有效性。

(2)对于试件SCFC1-0.1,当正向水平位移不超过35 mm时,模拟和试验的滞回曲线吻合基本一致,当水平位移超过35 mm时,模拟的极限承



(a) 试件SCFC1-0.1

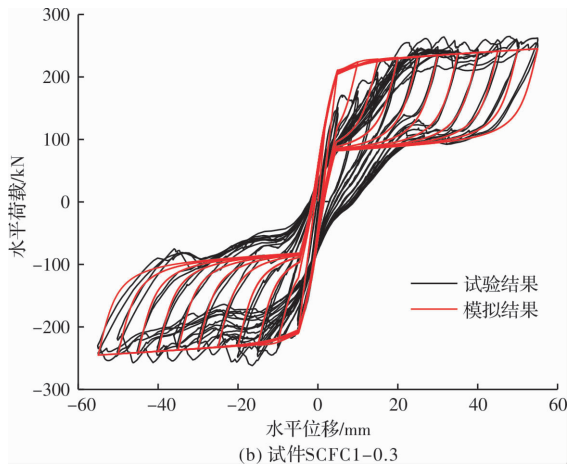


图 7 荷载-位移曲线对比分析

Fig. 7 The comparison of load-displacement curves

载力明显比试验的大, 主要因为试验中框架柱右端一个耗能元件由于多次拉压循环损伤积累导致断裂, 而此时软件模拟耗能元件在后期循环并未失效. 在水平位移为负时, 模拟和试验的滞回曲线区别较大, 原因是框架柱侧移时预应力筋拉长锚具损失较大以及柱身裂缝发展较充分等, 造成框架柱加卸载时抗侧刚度明显减少, 以及每一级水平位移下承载力明显降低, 而软件模拟时框架柱完好且预应力筋无损失, 模拟曲线正反向加卸载对称.

(3) 对于试件 SCFC1-0.3, 在水平位移为正时, 模拟和试验的滞回曲线卸载段区别较大, 原因是夹住耗能元件上部的两个螺母一个出现松动, 造成框架柱往正向加载时, 螺母受力, 耗能元件参与工作, 而卸载时松动螺母未受力, 耗能元件未工作, 从而使卸载刚度小于加载刚度. 而且试验结果存在较大的残余变形, 原因是框架柱与钢套靴之间出现裂缝, 而软件模拟时单元 1 保持弹性. 当水平位移为负, 在承载力方面, 软件模拟结果与试验结果相差不大.

(4) 试件 SCFC1-0.3 和 SCFC1-0.1 的模拟分析和试验结果对比可见, 试件 SCFC1-0.3 的残余位移大, 说明试件的轴压比越大, 造成框架柱残余位移越大, 复位能力降低.

3.2 每级加载水平力峰值 F_c 对比

为了进一步详细对比软件模拟结果和试验结果荷载-位移曲线的力学性能, 在每一级水平位移控制下, 取滞回曲线上每一级水平控制位移下的水平力峰值 F_c , 汇总于表 1 和表 2 中.

表 1 试件 SCFC1-0.1 模拟值与试验值 F_c 的对比

Tab. 1 Comparison of simulation and test result, F_c , for Specimen SCFC1-0.1

水平位移 /mm	理论值 /kN	模拟值 /kN	试验值 /kN	偏差率 /%
5	75.11	82.96	79.66	4.14
10	87.33	94.30	91.16	3.44
15	91.96	101.35	98.60	2.79
20	113.49	108.12	107.91	0.19
25	115.02	109.80	111.98	-1.95
30	116.55	111.44	113.59	-1.89
35	118.07	113.06	111.66	1.25
40	119.60	114.68	103.33	10.98
45	121.13	116.28	105.70	10.01
50	122.66	117.89	103.05	14.40
55	124.19	119.50	102.06	17.08

注: 偏差率=(模拟值-试验值)/试验值, 下同

表 2 试件 SCFC1-0.3 模拟值与试验值 F_c 的对比

Tab. 2 Comparison of simulation and test result, F_c , for Specimen SCFC1-0.3

水平位移 /mm	理论值 /kN	模拟值 /kN	试验值 /kN	偏差率 /%
5	151.92	173.35	165.42	4.80
10	179.47	200.11	191.09	4.72
15	227.80	223.98	213.91	4.71
20	236.14	230.30	223.19	3.19
25	234.48	232.63	223.30	4.18
30	232.82	234.87	229.20	2.47
35	231.15	237.01	232.28	2.03
40	229.49	239.08	234.75	1.85
45	227.83	241.11	242.29	-0.49
50	226.17	243.11	234.21	3.80
55	224.50	245.08	245.41	-0.13

从表 1 中可知: 当水平位移不超过 35 mm 时, 每级水平最大荷载 F_c 的软件模拟值与试验值的偏差率基本都在 5% 以内, 当水平位移超过 35 mm 时, 偏差率较大, 原因为试验时框架柱脚耗能元件有一个被拉断, 而理论计算和软件模拟没有考虑这种情况; 从表 2 中可知: 每级水平最大荷载

F_c 的软件模拟值与试验值的偏差率基本都在5%以内,说明软件模拟值与试验值吻合较好。

3.3 每级加载耗能元件轴向变形对比

为了对比模拟和试验时两试件左右端耗能元件屈服耗能情况,做出耗能钢筋拉伸位移-加载步曲线,如图8所示

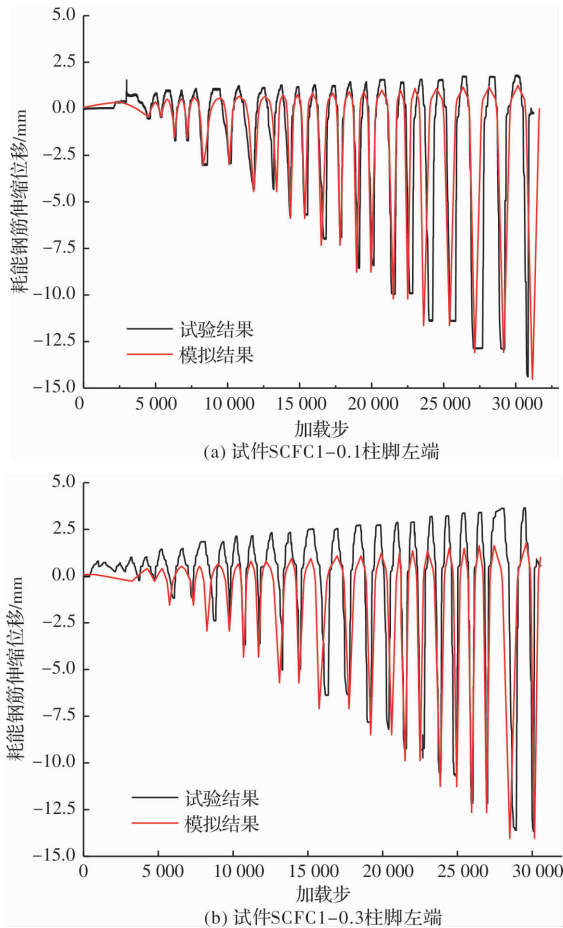


图8 试件耗能钢筋伸缩位移-加载步曲线对比分析

Fig. 8 The comparison of energy dissipation bars displacement versus loading-steps curves

从图8可知:每一级水平位移加载控制下,对于试件SCFC1-0.1和SCFC1-0.3柱脚左端耗能钢筋伸缩位移-加载步曲线,其试验结果与模拟结果基本相同,说明软件模拟与试验中试件左右端耗能元件屈服耗能相差不大,验证了该分析模型的准确性。值得说明的是,试验中,在高轴压比下,柱身产生向左的初始偏心,使得向左加载时,左侧耗能元件轴向压缩变形比模拟值大。

3.4 预应力筋应力对比

由于试验中存在各种不确定因素,造成框架柱脚预应力筋受力不对称,将软件模拟结果与试验结果的预应力筋应力进行对比分析,以探究其原因,如图9所示。

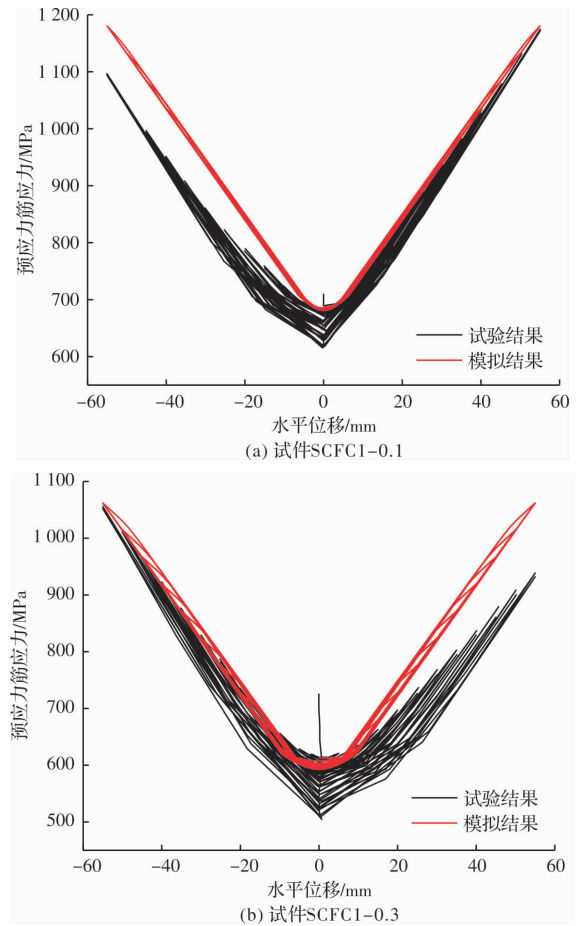


图9 预应力筋应力对比分析

Fig. 9 The comparison of prestressed tendon stress

软件模拟的预应力筋应力曲线基本成直线且对称较好,与试验中预应力筋应力曲线对比可知,试验时预应力筋出现了明显的损失;预应力筋应力试验值不对称,原因是构件制作有偏差,框架柱脚在水平低周往复荷载作用下,荷载偏心,柱脚左右端开口并不相同,造成框架柱中部预应力筋受拉程度不同。

4 不同参数对自复位柱脚抗震性能影响对比分析

根据试验和模拟分析得知,影响因素有预应力筋、耗能元件和轴压比,以此对自复位柱脚抗震性能进行分析。

4.1 预应力筋初始应力和面积及耗能元件面积的影响

研究预应力筋初始应力 σ_0 ,预应力筋面积 A_{PT} ,阻尼器面积 A_{ED} 对自复位柱脚抗震性能的影响,将模拟算例列于表3。预应力筋极限强度标准值 $f_{pk} = 1\ 860\ \text{MPa}$,耗能元件屈服强度 $300\ \text{MPa}$ 。

表 3 模拟算例编号

Tab. 3 Specimens number of numerical simulation

编号	SC01	SC02	SC03	SC11	SC12	SC13
σ_0/MPa	372	372	372	744	744	744
A_{PT}/mm^2	860	860	860	860	860	860
A_{ED}/mm^2	500	1 000	1 500	500	1 000	1 500
编号	SC21	SC22	SC23	SC31	SC32	SC33
σ_0/MPa	1 116	1 116	1 116	372	372	372
A_{PT}/mm^2	860	860	860	1 720	1 720	1 720
A_{ED}/mm^2	500	1 000	1 500	500	1 000	1 500
编号	SC41	SC42	SC43	SC51	SC52	SC53
σ_0/MPa	744	744	744	1 116	1 116	1 116
A_{PT}/mm^2	1 720	1 720	1 720	1 720	1 720	1 720
A_{ED}/mm^2	500	1 000	1 500	500	1 000	1 500

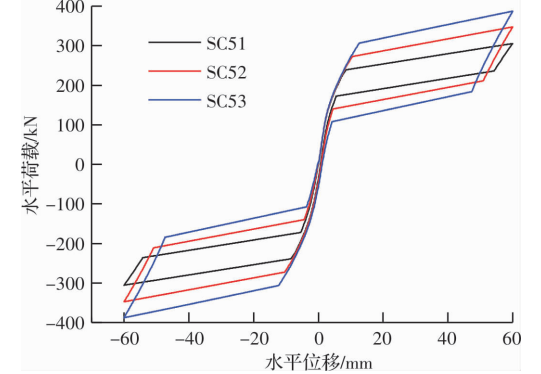
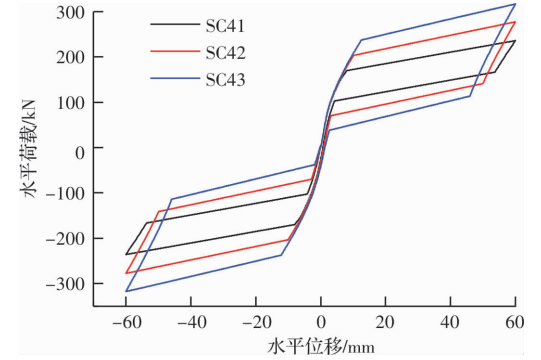
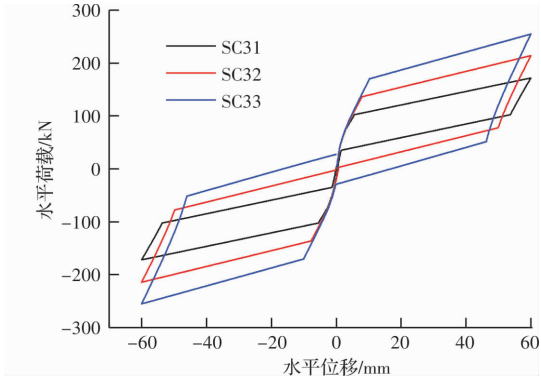
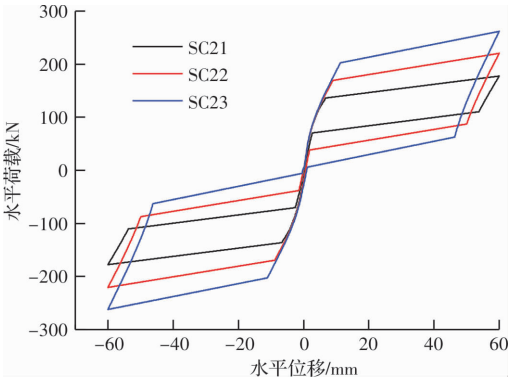
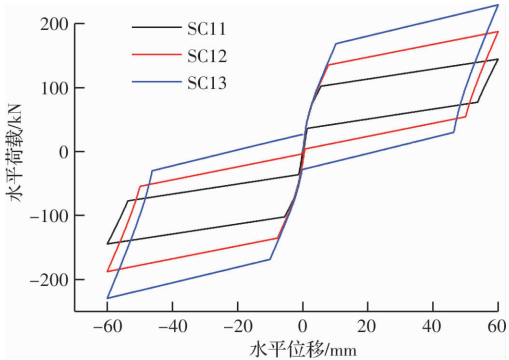
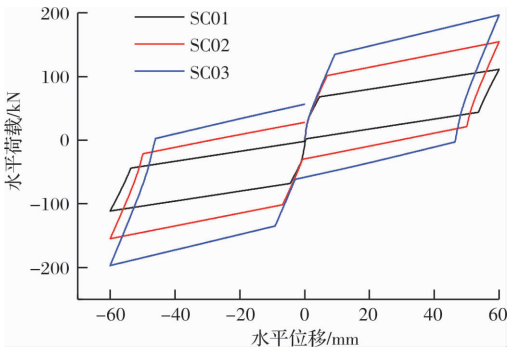


图 10 不同参数下的荷载-位移关系

Fig. 10 Load-displacement curves with different parameters

不同参数下的荷载-位移关系如图 10 所示, 预应力筋面积、预应力筋初始应力、阻尼器面积增加, 自复位柱脚屈服强度和承载力随之增加; 预应力筋面积和预应力筋初始应力增加, 自复位柱脚残余变形减小; 耗能元件面积增加, 自复位柱脚耗能能力显著增大, 但残余变形也随之增大. 控制预应力筋初始应力不小于 $0.4f_{ptk}$, 同时预应力筋初始张拉力与耗能元件屈服力之比不小于 2 时, 结构具有理想的自复位能力, 基本无残余变形.

4.2 轴压比的影响

研究轴压比对自复位柱脚抗震性能的影响, 将模拟算例列于表 4. 预应力筋用 1 860 级, 初始预应力取为 $0.4f_{ptk}=744\text{ MPa}$, 耗能元件屈服强度 300 MPa , 阻尼器面积 $A_{ED}=720\text{ mm}^2$.

表4 模拟算例编号

Tab. 4 Specimens number of numerical simulation

编号	NF00	NF01	NF02	NF03	NF04
n	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3
A_{PT}/mm^2	860	860	860	860	860
编号	NF05	NF06	NF07	NF08	NF09
n	0.15	0.2	0.25	0.3	0.35
A_{PT}/mm^2	1 720	1 720	1 720	1 720	1 720

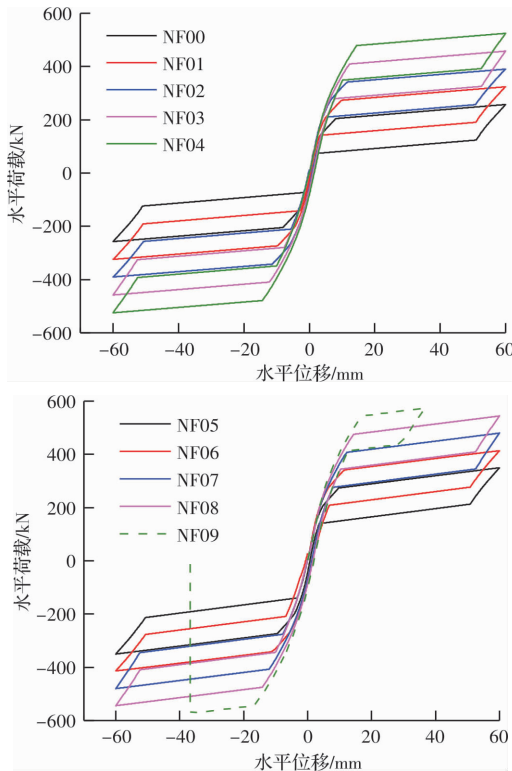


图11 不同轴压比下的荷载-位移关系

Fig. 11 Load-displacement curves with different axial compression ratio

不同轴压比下的荷载-位移关系如图11所示,轴压比越大,自复位柱脚承载力越大,较大轴压比下,柱脚底部进入非线性,自复位柱脚自复位能力降低,残余变形增大。

5 结论

通过对自复位RC框架柱脚节点建立有限元模型进行非线性分析,在不同轴压比下自复位RC框架柱脚节点模拟的滞回耗能能力及自复位性能与试验结果进行对比,得出以下结论:

(1)在不同轴压比下,模拟分析和试验所得的滞回曲线在主要加/卸载段吻合较好,自复位效果较好。对于主要特征点对应的水平荷载,数值模拟与试验结果相差在5%以内;对于自复位RC框

架柱脚的开口情况,在每一级水平位移加载下,模拟和试验结果相差多数在5%以内,个别不超过10%,说明本文所建立的模型及有限元模拟结果的有效性。

(2)通过预应力筋应力对比,由于锚具内缩及试验误差等原因,试验中预应力筋应力不对称,并且有明显的预应力损失,而模拟无法考虑预应力损失带来的影响,这是后期模拟有待优化改进之处。

(3)自复位柱脚屈服强度及承载力随预应力筋面积、预应力筋初始应力、耗能元件面积、轴压比增大而增大;耗能元件面积显著影响自复位柱脚耗能能力;预应力筋初始应力不小于 $0.4f_{ptk}$,预应力筋初始张拉力与耗能元件屈服力之比不小于2时,自复位效果显著,结构基本无残余变形;大轴压比使柱脚进入非线性,残余变形增大。

参考文献 References

- [1] PRIESTLEY M J N, TAO J. Seismic response of precast prestressed concrete frames with partially debonded tendons[J]. PCI Journal, 1993, 38(1): 58-69.
- [2] CHEOK G, LEW H. Model precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading[J]. PCI Journal, 1993, 38(4): 80-92.
- [3] 郭彤, 宋良龙, 张国栋, 等. 腹板摩擦式自定心预应力混凝土框架梁柱节点的试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 23-32.
- GUO Tong, SONG Lianglong, ZHANG Guodong, et al. Experimental study on beam-column connections of self-centering prestressed concrete frame with web friction devices[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 23-32.
- [4] 郭彤, 宋良龙. 腹板摩擦式自定心预应力混凝土框架梁柱节点的理论分析[J]. 土木工程学报, 2012, 45(7): 73-79.
- GUO Tong, SONG Lianglong. Theoretical analysis of beam-column connections of self-centering prestressed concrete frame with web friction device[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(7): 73-79.
- [5] 郭彤, 宋良龙. 腹板摩擦式自定心预应力混凝土框架基于性能的抗震设计方法[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(2): 22-28.
- GUO Tong, SONG Lianglong. Performance-based seismic design method of self-centering prestressed concrete frames with web friction devices[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(2): 22-28.
- [6] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍. 自复位预制框架边节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12):

- 29-37.
- CAI Xiaoling, MENG Shaoping, SUN Weiwei. Experimental study on behaviors of beam-column connections for self-centering post-tensioned precast frame [J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(12): 29-37.
- [7] 蔡小宁, 孟少平. 预应力自复位混凝土框架节点抗震性能数值模拟[J]. 工程力学, 2016, 33(3): 143-151.
- CAI Xiaoning, MENG Shaoping. Numerical analysis for seismic behavior of self-centering post-tensioned precast beam-to-column connections [J]. Engineering Mechanics, 2016, 33(3): 143-151.
- [8] 潘振华, 潘鹏, 叶列平, 等. 自复位钢框架节点有限元模拟及参数分析[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(3): 35-42.
- PAN Zhenhua, PAN Peng, YE Lieping, et al. Modeling and parametric study of beam-to-column connection for self-centering steel moment frames [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(3): 35-42.
- [9] 蒋成良, 李启才. 钢绞线预应力的改变对自复位钢框架性能影响[J]. 苏州科技学院学报(工程技术版), 2013, 26(3): 28-31.
- JIANG Chengliang, LI Qicai. Influence of prestress change in stand on seismic behavior of self-centering frame [J]. Journal of Suzhou University of Science and Technology (Engineering and Technology), 2013, 26(3): 28-31.
- [10] MIRZAIE M, BAHAAARI M R, EMAM S H. Numerical simulation of the new post tensioned column base with bolted T-stubs [J]. ISIJ international, 2014, 54(1): 179-187.
- [11] 郭佳. 基于性能的新型自复位桥墩抗震理论与试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- GUO Jia. Performance based research on the seismic theory and test of new self-centering pier [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [12] 何铭华, 辛克贵, 郭佳. 新型自复位桥梁墩柱节点的局部稳定性研究 [J]. 工程力学, 2012, 29(4): 122-127.
- HE Minghua, XIN Kegui, GUO Jia. Local stability study of new bridge piers with self-centering joints [J]. Engineering Mechanics, 2012, 29(4): 122-127.
- [13] 何铭华, 辛克贵, 郭佳, 等. 自复位桥墩的内禀侧移刚度和滞回机理研究 [J]. 中国铁道科学, 2012, 33(5): 22-27.
- HE Minghua, XIN Kegui, GUO Jia, et al. Research on the intrinsic lateral stiffness and hysteretic mechanics of self-centering pier [J]. China Railway Science, 2012, 33(5): 22-27.
- [14] EATHERTON M R, MA X, KRAWINKLER H, et al. Design concepts for controlled rocking of self-centering steel-braced frames [J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(11): 1-10.
- [15] MAURYA A. Experimental and computational investigation of a self-centering beam moment frame [D]. Blacksburg: Virginia Poly-technic Institute and State University, 2016.
- [16] GUO T, SONG L L, GU Y, et al. Large-scale tests on cyclic behavior of self-centering prestressed concrete frames. [J] ACI Structural Journal 2016, 113: 1263-1274.
- [17] 杨溥, 高浩捷, 蔡森, 等. 新型自复位钢桁架梁的受力机理及抗震性能 [J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(2): 12-18.
- YANG Pu, GAO Haojie, CAI Sen, et al. Analysis of stress mechanism and seismic behavior of a new self-centering steel truss beam [J]. Journal of Civil, Architectural and Environmental Engineering, 2018, 40(2): 12-18.
- [18] 杨溥, 沈培文, 黄诚, 等. 新型自复位钢桁架梁的设计及参数分析 [J]. 重庆大学学报, 2019, 42(1): 25-35.
- YANG Pu, SHEN Peiwen, HUANG Cheng, et al. Design and parameter analysis for new self-centering steel truss beam [J]. Journal of Chongqing University, 2019, 42(1): 25-35.
- [19] SCOTT B D, PARK R, PRIESTLEY M J N. Stress-strain behavior of confined concrete columns [J]. ACI Journal, 1982, 79(1): 13-27.
- [20] GIUFFRÉ A, MENEGOTTO M, PINTO P E. Method of analysis for cyclically loaded reinforced concrete plane frames including changes in geometry and non-elastic behavior of elements under combined normal force and bending [C]. Zurich: IABSE. 1973: 49-58.
- [21] 齐虎, 孙景江, 林淋. OPENSEES 中纤维模型的研究 [J]. 世界地震工程, 2007, 23(4): 48-54.
- QI Hu, SUN Jingjiang, LIN Lin. Research on fiber model of OPENSEES [J]. World Earthquake Engineering, 2007, 23(4): 48-54.

(编辑 吴海西 桂智刚)