

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.201904014

## 约束屈曲纵筋摇摆柱滞回性能研究\*

李 钢, 周重阳, 李荣华

(大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

**摘要:**提出了一种新型约束屈曲纵筋摇摆柱构造,即在传统钢筋混凝土柱中采用约束屈曲纵筋代替普通钢筋并放松柱与基础的约束而形成的一种新型摇摆柱,并提出了相应的恢复力模型。对约束屈曲纵筋进行了单调受压试验和数值模拟,验证了约束屈曲装置对纵筋的约束功能并研究了钢筋直径、约束屈曲装置与钢筋间空隙对其约束功能的影响;对约束屈曲纵筋摇摆柱进行了数值模拟,研究纵筋直径以及轴压比对其滞回性能的影响。结果表明:约束屈曲纵筋摇摆柱的滞回曲线为典型旗帜型,其强度为混凝土部分强度和纵筋部分强度叠加,柱的摇摆发生在受拉侧纵筋屈服之后。通过设计可使结构在小震阶段不摇摆,中震阶段柱纵筋屈服结构发生摇摆。轴压比以及纵筋直径的增加都可以在不同程度增加约束屈曲纵筋摇摆柱的侧向承载能力。

**关键词:** 摇摆柱; 约束屈曲; 滞回性能; 数值模拟

**中图分类号:** TU375.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2021)03-0531-09

## Analysis of Hysteretic Behavior of a New Type of Rocking Column with Buckling-restrained Longitudinal Reinforcements

LI Gang, ZHOU Chongyang, LI Ronghua

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**Abstract:** In this paper, a new type of rocking column with buckling-restrained longitudinal reinforcements is proposed. It is a new kind of rocking column formed by using the buckling-restrained longitudinal reinforcements, instead of ordinary steel bars in traditional reinforced concrete columns, and by relaxing the constraint of the column and the foundation. The corresponding resilience model is proposed and verified through analyses. The monotonic compression tests and numerical simulation of the buckling-restrained device were carried on. The restraining function of the buckling-restrained device was verified and the effects of the reinforcement diameter and the space between the buckling-restrained device and the reinforcement on its restraint function were studied. The numerical simulation of the column was carried out, and the effects of the reinforcement diameter and the axial compression ratio on the hysteretic behavior were investigated. The results show that the hysteresis curve of the rocking column with buckling-restrained longitudinal reinforcements is a typical flag type, and its strength is the superposition of the strength of the rocking column and the longitudinal reinforcements. The rock of the column occurs after the longitudinal reinforcement yields. A rational design can make the structure not rock in the small earthquake stage, and rock in the moderate earthquake stage when

\* 收稿日期:2019-04-08;修回日期:2019-05-17

基金项目:国家自然科学基金项目(51878112)、大连市高层次人才创新支持计划项目(2017RD04)资助

作者简介:李钢(1979—),男,教授,博士。主要从事结构抗震性能研究。E-mail:gli@dlut.edu.cn

the longitudinal reinforcement yielding occurs. Also, the increase of the axial compression ratio and the reinforcement diameter can increase the lateral bearing capacity of the rocking column with buckling-restrained longitudinal reinforcement.

**Keywords:** rocking column; buckling-restrained; hysteretic behavior; numerical simulation

## 引言

1963年 G. W. Housner<sup>[1]</sup>第一次提出了“摇摆结构”的概念,1977年, A. A. Huckelbridge等<sup>[2-3]</sup>分别对3层和9层摇摆钢框架模型结构进行了模拟地震振动台试验,证明了结构摇摆对于减小钢框架强度和延性需求的有益作用。M. J. N. Priestley等<sup>[4]</sup>于1978年对一摇摆模型结构进行了模拟地震振动台试验,验证了 G. W. Housner提出的摇摆结构的耗能机理。学者们除了放松基础约束构成摇摆结构外,也研究了放松构件间约束的结构,如摇摆墙、摇摆桥墩、摇摆柱等。如 H. Roh等<sup>[5-9]</sup>基于“弱化”结构能够降低结构在地震作用下的最大加速度响应,从而减小结构构件破坏这一想法,放松了构件柱上下端的约束从而提出了摇摆柱,并对摇摆柱做了一系列的试验和理论研究。

近十年来,研究人员加大了对摇摆整体结构的抗震性能研究,结构类型也扩展至框架结构、剪力墙结构、框架-核心筒结构等。M. J. N. Priestley等<sup>[10]</sup>首先提出了自复位框架的概念,进行了自复位钢筋混凝土框架节点的抗震性能试验研究,并对一个5层足尺预制钢筋混凝土框架的推覆试验。C. Christopoulos等<sup>[11]</sup>将自复位体系延伸至钢框架中,并证明了该类结构良好的耗能能力和自复位能力。J. M. Ricles等<sup>[12]</sup>对9个大比例节点和后张预应力自复位钢框架进行了抗震试验研究,结果表明后张预应力钢框架在试验刚开始的一段时间内能够达到传统刚接的钢框架的性能,并且结构在试验后没有残余变形。吕西林等<sup>[13]</sup>对一个1:2的两层自复位RC框架结构做了振动台试验,结果表明在大震作用后,结构基本没有残余变形并且有较好的变形能力及延性。鲁亮等<sup>[14-17]</sup>提出了一种受控摇摆式钢筋混凝土框架结构体系,节点摇摆运动由无黏结后张预应力筋提供弹性回复力,并对其做了试验和理论研究。已有研究表明,摇摆结构在地震作用下仅发生局部破坏或耗能部件失效而不致倒塌,地震

后只需对损坏部位进行检查更换,可很快恢复正常使用<sup>[18]</sup>。但现有研究成果仍存在较多问题,如摇摆梁柱节点或摇摆柱脚节点在较大变形时破坏严重,震后难以修复;地震作用下柱根部会有提离运动,从而产生应力集中,结构位移控制比较困难<sup>[19]</sup>;小震即发生摇摆影响用户体验等。

伍云天等<sup>[20]</sup>针对由于纵筋发生屈曲失稳破坏引起的结构竖向倒塌机制,对框架柱中的纵筋引入屈曲约束技术,开发出在高轴压下不会发生屈曲失稳破坏的屈曲约束纵筋。本文在此基础上,通过在传统钢筋混凝土柱中采用约束屈曲纵筋代替普通钢筋并放松柱与基础间的约束,提出了一种新型约束屈曲纵筋摇摆柱构造形式,并设计了新型约束屈曲装置约束纵筋屈曲,为纵筋提供平稳受力段。对约束屈曲纵筋进行了单调受压试验和数值模拟并对约束屈曲纵筋摇摆柱进行了数值模拟,研究约束屈曲纵筋摇摆柱的滞回性能,并提出了约束屈曲纵筋摇摆柱的恢复力模型。

## 1 约束屈曲纵筋摇摆柱构造设计

本文提出了一种新型约束屈曲纵筋摇摆柱构造形式如图1所示,约束屈曲纵筋摇摆柱由混凝土柱、纵筋和约束屈曲装置三部分组成。

在侧向荷载作用下,纵筋和混凝土柱共同为摇摆柱提供弹性恢复力直到纵筋屈服,纵筋屈服后柱底面可发生抬起,实现摇摆功能,此时纵筋进入弹塑性并与上层结构提供的轴压力一起为摇摆柱提供恢复力。约束屈曲装置约束纵筋屈曲,为纵筋提供稳定受力段,一方面提供剪力防止柱摇摆过程中纵筋底部发生局部破坏;另一方面纵筋屈服后发生变形,约束屈曲装置可在柱摇摆过程中约束纵筋防止其发生局部破坏。

伍云天等<sup>[20]</sup>对采用屈曲约束纵筋的钢筋混凝土短柱试件进行了试验研究,证明柱内的屈曲约束套管可以起到保护纵筋不发生屈曲失稳的效果。本文在此基础上放松柱与基础的约束,由此可能出

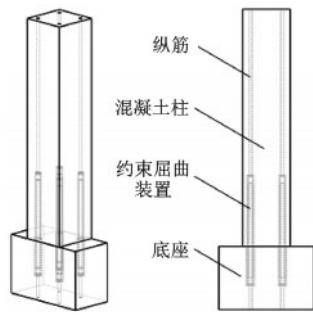


图1 约束屈曲纵筋摇摆柱构造

Fig.1 Configuration of the rocking column with buckling-restrained longitudinal reinforcements

现的问题是柱发生整体滑移以及柱与基础接触处的纵筋产生应力集中并发生破坏,为解决这些问题并更好地实现柱的摇摆功能,设计了一种新型约束屈曲装置构造。

约束屈曲装置由内管和外管两部分钢管组成,内管包含主管和副管两部分,其构造模型如图2所示,外管套在内管的主副管之间。约束屈曲装置若提供过大的纵向约束则会使约束屈曲纵筋刚度过大,影响柱整体的摇摆性能,为避免这一现象发生,在外管与内管的顶面之间预留空隙并且在钢管之间不加连接以实现钢管的相对抽动。约束屈曲装置套在柱脚处纵筋外与纵筋焊接在一起,焊接位置分别为外管的上端与内管的下端,随着纵筋的压缩或拉伸,钢管可进行竖向相对移动,这样可以通过纵筋的变形和钢管的相对移动来更好地实现柱的摇摆。在内管与纵筋间预留空隙,既可以防止纵筋和约束装置等效为加粗钢筋并发生整体屈曲的现象,也可以为纵筋的变形提供保护,避免接触面处的纵筋在柱摇摆过程中由于应力集中而产生破坏。

混凝土柱和底座之间无连接,加约束屈曲装置的纵筋贯穿混凝土柱和底座并分别与这两部分浇筑在一起,约束屈曲装置可以为柱提供一定的抗剪强度,使柱在承受水平荷载时不发生整体的滑移。约束屈曲装置插入底座的深度为副管的长度,副管与底座混凝土浇筑在一起,外管的露出部分与混凝土柱浇筑在一起,这样可以避免纵筋发生变形时钢管之间的抽动导致钢管周围混凝土发生剥落破坏。约束屈曲纵筋摇摆柱除约束屈曲纵筋外其制造过程与普通钢筋混凝土柱相似,而约束屈曲装置则由三根普通钢管焊接组成,造价低

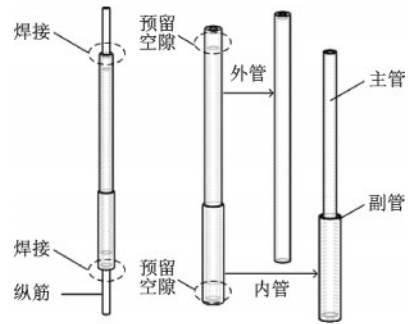


图2 约束屈曲装置构造

Fig.2 Configuration of the buckling-restrained device

廉且制作简单。

## 2 约束屈曲纵筋性能试验及数值模拟

### 2.1 试验概况及结果分析

为验证约束屈曲装置对纵筋的约束功能,对加约束屈曲装置的钢筋进行了单调受压试验,并对普通钢筋进行单调拉压试验。

钢筋长 540 mm,直径为 10 mm,采用 HRB335 型号钢。约束屈曲装置长 500 mm,采用 Q345 型号钢,内外管厚度均为 3 mm,内管与钢筋空隙为 2 mm,内外管顶面间空隙为 50 mm。外管上端与内管下端分别与钢筋焊接,焊接处距钢筋顶端距离均为 20 mm,试验机夹头仅固定钢筋露出部分以保证约束屈曲装置不提供轴向力,如图 3 所示。

加载前后试件实拍如图 4 所示。试验过程中钢管随着钢筋的受压变形产生相对移动,试验后约束屈曲纵筋未发生整体受压屈曲现象,拆卸装置后可观察到,钢筋出现波纹形变形,证明约束屈曲装置

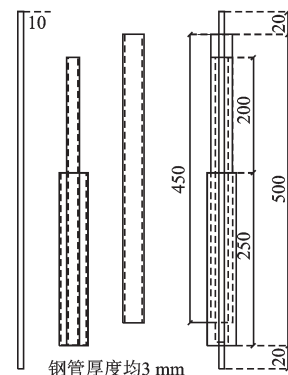


图3 约束屈曲纵筋试件

Fig.3 Schematic diagram of the buckling-restrained longitudinal reinforcement specimen



图4 约束屈曲纵筋试验前后实拍

Fig.4 Photograph of the buckling-restrained longitudinal reinforcement specimen

可有效约束纵筋屈曲,并且可以实现约束屈曲装置与钢筋的协同变形。

由图5可见,加约束屈曲装置后钢筋的受压性能与普通钢筋相比大幅度提升,且其受压力学性能接近普通钢筋受拉力学性能。

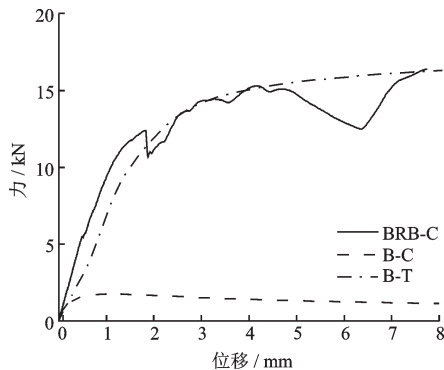


图5 试验结果对比

Fig.5 Comparison of test results

## 2.2 有限元模型的建立

使用ABAQUS有限元软件对约束屈曲纵筋进行数值模拟,采用C3D8R实体单元模拟钢筋及钢管,钢筋本构拟合试验结果,用双线性随动强化模型模拟钢筋弹塑性,钢材弹性模量取 $E=2.06 \times 10^5$  MPa,泊松比 $\nu=0.3$ 。通过编辑关键词imperfection添加初始缺陷,通过定义接触模拟钢管对钢筋的约束,接触面法向方向定义为“Hard contact”,切向方向定义为“Frictionless”,并设置线性阻尼系数增加模型收敛性。

建立约束屈曲纵筋模型进行单调受压加载与试验结果进行对比,并对约束屈曲纵筋建立加载模式为往复竖向加载的不同参数的模型,加载初始位

移为2 mm,位移每次往复增加2 mm,每个振幅循环加载1周,最大位移为12 mm。钢筋直径分别为18、24、30 mm,约束屈曲装置与钢筋空隙分别为1、2、3 mm,并建立了各直径下普通钢筋的模型进行对比,分析钢筋直径、约束屈曲装置与钢筋空隙对约束屈曲纵筋受力性能的影响。

## 2.3 数值模拟结果与分析

图6是试验结果和数值模拟结果的对比,从图中可以看出二者吻合较好。

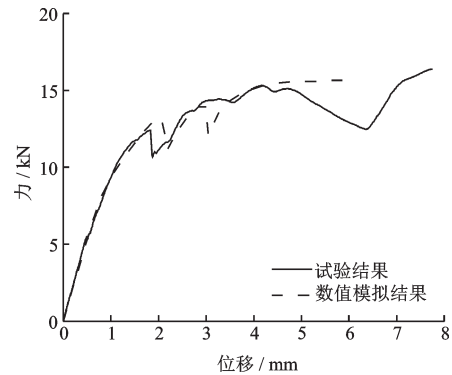


图6 约束屈曲纵筋试验及模拟结果对比

Fig.6 Comparison of experimental and simulation results

图7为约束屈曲装置内钢筋变形过程,可以看出钢筋在约束屈曲装置的约束下没有发生局部屈曲,而是逐步产生多段波纹形屈曲,与试验结果相吻合,说明有限元数值模拟可以有效模拟出约束屈曲纵筋的力学性能。

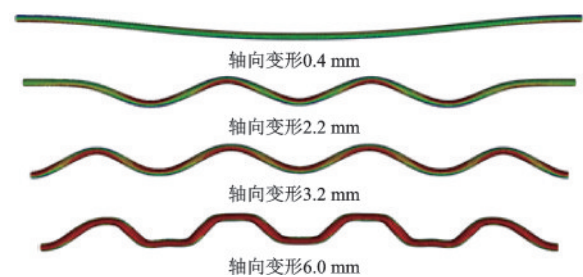


图7 钢筋多段屈曲变形

Fig.7 Multi-wave buckling and deformation diagram

在上述基础上分析参数的影响,模拟结果如图8和图9所示,按照钢筋类型-钢筋直径-约束屈曲装置与钢筋间空隙的格式命名各模型,其中BRB代表约束屈曲纵筋,B代表普通钢筋。

对比相同钢筋直径不同空隙的结果表明,约束屈曲装置与钢筋间空隙的增大会导致钢筋受压时

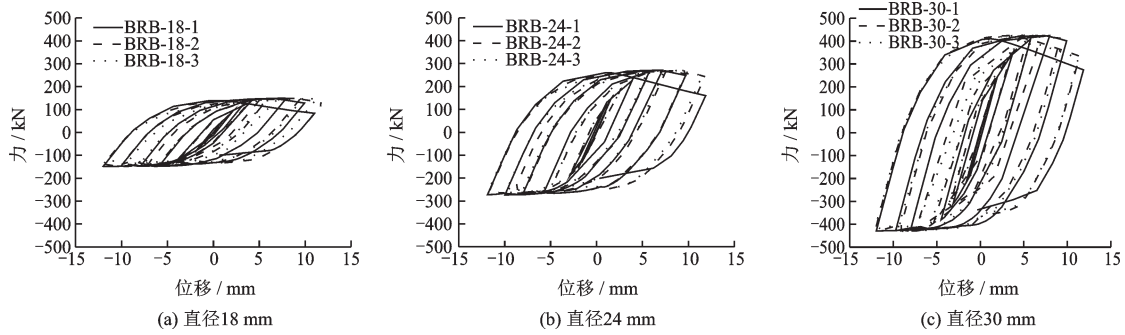


图8 不同参数下约束屈曲纵筋荷载—位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves of the buckling-restrained longitudinal reinforcements under different parameters

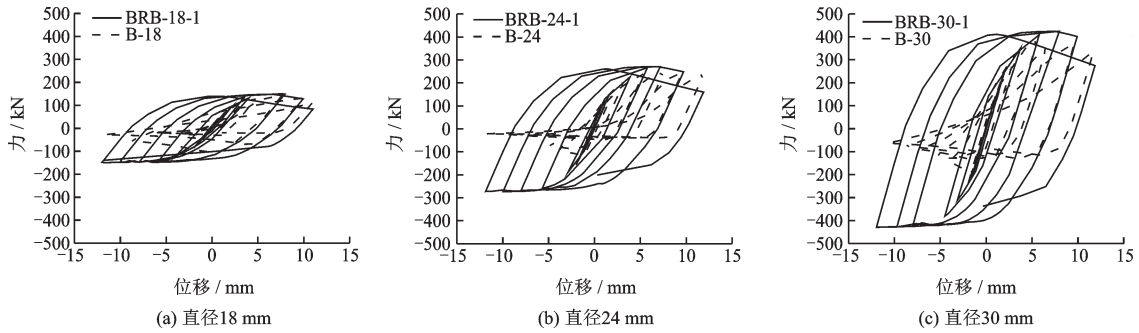


图9 约束屈曲纵筋与普通钢筋荷载—位移曲线对比

Fig.9 Comparison of load-displacement curves between regular reinforcements and buckling-restrained longitudinal reinforcements

抗侧力出现波动,分析表明在屈曲模态转变过程中会发生钢筋的一部分弹性势能转化为动能释放的现象。随着空隙的增大,释放的动能增加,即能量损耗增大,会相应降低钢筋的最大承载力。对比约束屈曲钢筋与普通钢筋的荷载-位移曲线发现,受拉时,约束屈曲钢筋与普通钢筋的承载能力基本相同;受压时,普通钢筋发生屈曲后承载力大幅度下降,而约束屈曲纵筋的拉压强度基本一致。不同纵筋直径及空隙情况下的约束屈曲纵筋均具有良好的滞回性能,说明约束屈曲装置可以有效约束钢筋屈曲,使钢筋强度达到拉压一致。

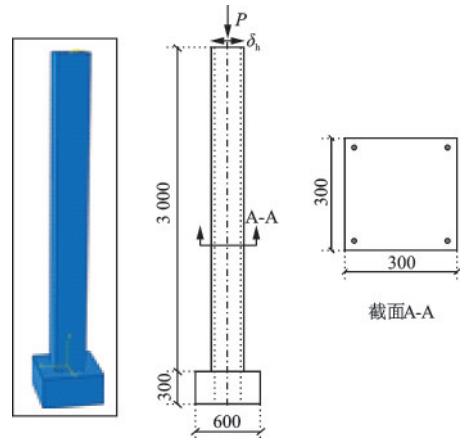


图10 模型示意

Fig.10 Schematic model

### 3 约束屈曲纵筋摇摆柱滞回性能分析

#### 3.1 有限元模型的建立

使用ABAQUS有限元软件对加约束屈曲纵筋摇摆柱进行数值模拟,柱尺寸为 300 mm×300 mm×3 000 mm,底座尺寸为 600 mm×600 mm×300 mm,保护层厚度为 25 mm,如图 10 所示。

使用 C3D8R 实体单元模拟混凝土柱及底座,混

凝土强度等级为 C30,使用 T3D2 桁架单元模拟约束屈曲纵筋来模拟出约束屈曲装置为纵筋提供的稳定受力段,可以模拟出约束屈曲纵筋的拉压强度一致。钢筋本构采用双线性随动强化模型,本构关系为拟合试验结果。钢筋单元埋置在整体模型中,这种嵌入方式不考虑钢筋与混凝土之间的滑移。

加载方式采用位移加载,加载模式为往复水平加载,初始位移为 2 mm,每次循环增加 2 mm,最大

位移为 50 mm。往复水平加载的位移加载制度如图 11 所示。通过定义混凝土柱底面与底座的接触定义摇摆柱开缝,接触面法向方向定义为“Hard contact”,允许接触后产生分离;切向方向定义为“Rough”接触使接触后不产生相对滑移。

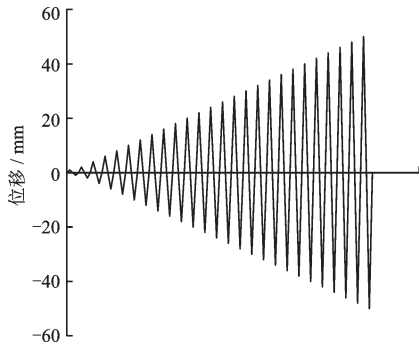


图 11 往复水平荷载位移加载制度  
Fig.11 Loading system of horizontal cyclic load

本文考虑的参数主要为轴压比和纵筋直径,轴压比分别为 0.1、0.2 和 0.4,纵筋直径分别为 14、20、24 mm,建立各轴压比下的普通摇摆柱模型进行对比分析。按照摇摆柱类型-轴压比-钢筋直径的格式命名各模型,其中 BRC 代表约束约束屈曲纵筋摇摆柱、RC 代表普通摇摆柱。分析约束屈曲纵筋摇摆柱的抗弯模式以及轴压比和纵筋直径对其最大抗弯承载力、刚度及起摇位移等的影响。

### 3.2 数值模拟结果及分析

#### 3.2.1 恢复力模型

本文提出的约束屈曲纵筋摇摆柱的恢复力模型如图 12 所示,为普通摇摆柱的双折线恢复力模型和约束屈曲纵筋的弹塑性恢复力模型的叠加。

在摇摆前,纵筋与混凝土共同抗弯,其抗侧能力由混凝土和纵筋弹性段共同提供,纵筋屈服后柱子开始发生摇摆,塑性段强度和轴压力共同为其提

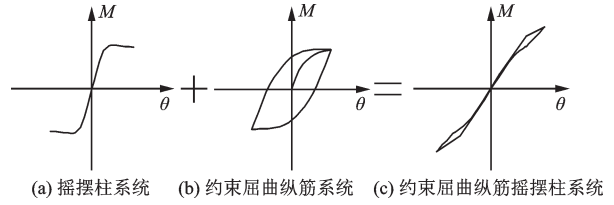


图 12 约束屈曲纵筋摇摆柱恢复力模型

Fig.12 Hysteretic model of rocking column with buckling-restrained longitudinal reinforcement

供恢复力,其最大抗弯强度应为摇摆柱最大抗弯强度和纵筋提供的最大弯矩的叠加。约束屈曲纵筋摇摆柱的滞回曲线为典型的旗帜型曲线。

约束屈曲纵筋摇摆柱在摇摆前的受力形式与普通钢筋混凝土柱相同,在发生摇摆后转换为摇摆柱,可以实现柱子先抗弯后摇摆的机制转换。与传统摇摆柱相比,约束屈曲纵筋摇摆柱在摇摆前具有更高的抗侧刚度,在摇摆后可以依靠纵筋实现复位功能,具有更好的耗能能力和滞回性能。

不同钢筋直径下约束屈曲纵筋摇摆柱的滞回曲线对比如图 13 所示,不同轴压比下约束屈曲纵筋摇摆柱的滞回曲线对比如图 14 所示,由模拟结果可知其滞回曲线均为典型旗帜型曲线,与提出的恢复力模型吻合。

#### 3.2.2 摇摆模式分析

选取模型 BRC-4-14 来观察柱在水平循环荷载作用下摇摆前后纵筋的受力情况,由图 15 可知该模型在侧向位移 30 mm 时开始发生摇摆。

侧向位移 28 mm 和侧向位移 30 mm 时摇摆柱内纵筋的应力状态如图 16 所示。由图可知,侧向位移为 28 mm 时,受压侧纵筋已经屈服,但受拉侧纵筋尚未屈服,此时柱刚度未发生变化,未发生摇摆;侧向位移为 30 mm 时,受压侧纵筋屈服且受拉侧纵筋发生屈服,此时柱刚度下降,柱底面抬升开始发生摇摆。

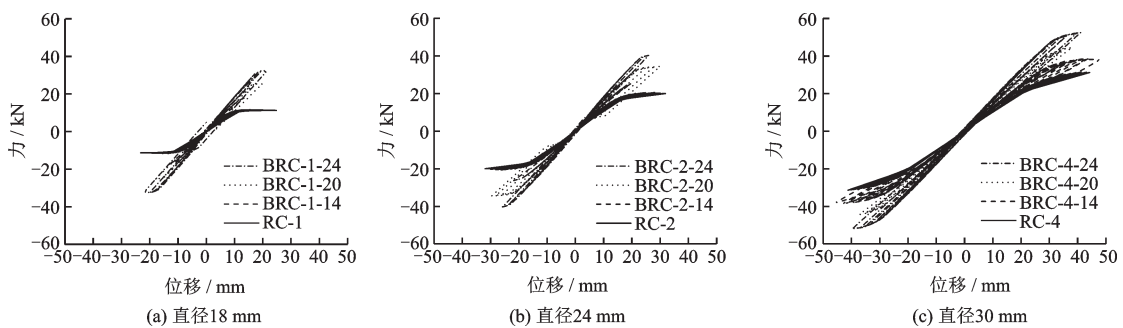


图 13 不同钢筋直径滞回曲线对比

Fig.13 Comparison of hysteresis curves of different reinforcement diameters

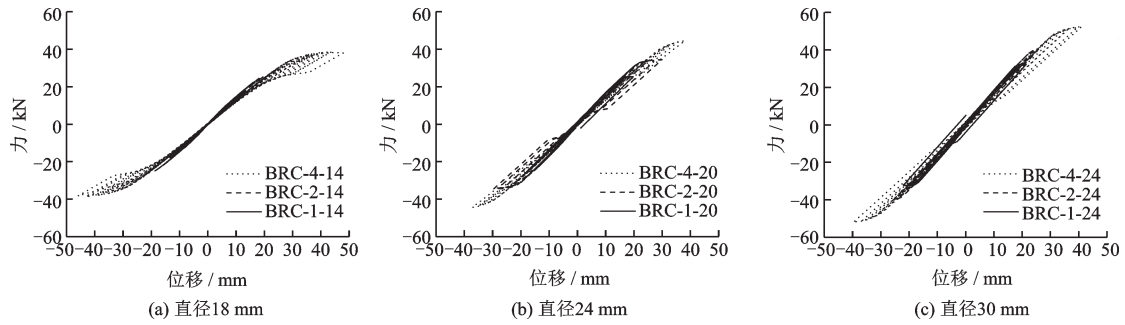


图14 不同轴压比滞回曲线对比

Fig.14 Comparison of hysteresis curves of different axial ratios

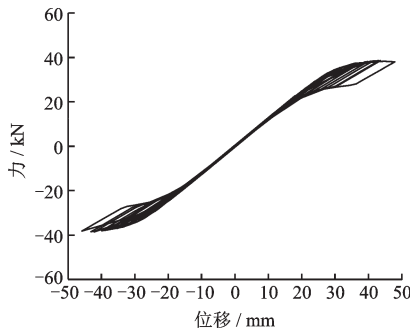


图15 模型BRC-4-14滞回曲线

Fig.15 Hysteresis curve of BRC-4-14

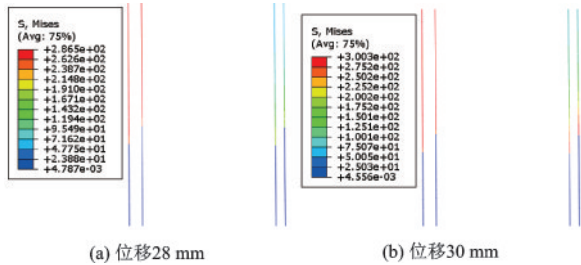


图16 模型BRC-4-14摇摆模式分析

Fig.16 Rocking analysis of BRC-4-14

由此可知,约束屈曲纵筋摇摆柱发生摇摆的侧向位移由纵筋的受力状态决定,纵筋全部屈服后柱开始摇摆,与前文所提出的约束屈曲纵筋摇摆柱恢复力模型相吻合。

### 3.2.3 最大受弯承载力

约束屈曲纵筋摇摆柱的受弯承载力 $M$ 可分解为混凝土部分和“纯钢筋截面”部分之和,第一部分为混凝土部分的受弯承载力 $M_1$ ;第二部分为受压钢筋与受拉钢筋组成的“纯钢筋截面”部分的受弯承载力 $M_2$ ,这部分弯矩与混凝土无关。 $M_1$ 与相同工况下的普通摇摆柱受弯承载力相同,可由模拟结果得到。 $M_2$ 达到受弯承载力极限状态时的计算公式为:

$$M_2 = f_y A_s \left( \frac{T}{2} - a \right) + f'_y A'_s \left( \frac{T}{2} - a \right) \quad (1)$$

式中, $T$ 为柱宽; $a$ 为保护层厚度; $f_y$ 为钢筋最大受拉应力; $A_s$ 为受拉钢筋面积; $f'_y$ 为钢筋最大受压应力; $A'_s$ 为受压钢筋面积。

根据公式计算约束屈曲纵筋摇摆柱最大受弯承载力理论值结果见表1。

表1 最大受弯承载力理论值

Table 1 Theoretical values of maximum flexural capacity

单位:kN·m

模型编号	$M_{\max}$	模型编号	$M_{\max}$
RC-1	41.17	BRC-1-20	86.17
RC-2	79.19	BRC-2-20	124.19
RC-4	146.59	BRC-4-20	191.59
BRC-1-14	62.67	BRC-1-24	108.67
BRC-2-14	100.69	BRC-2-24	138.69
BRC-4-14	169.09	BRC-4-24	214.09

根据模拟结果计算约束屈曲纵筋摇摆柱受弯承载力,其弯矩由剪力和轴力两部分提供:

$$M = F_h (H - \delta_v) + P \cdot \delta_h \quad (2)$$

式中, $H$ 为柱高; $\delta_h$ 为水平位移; $\delta_v$ 为竖向位移; $F_h$ 为剪力; $P$ 为轴力; $M$ 为受弯承载力。

计算约束屈曲纵筋摇摆柱最大受弯承载力模拟值结果见表2。

表2 最大受弯承载力模拟值

Table 2 Simulation values of maximum flexural capacity

单位:kN·m

模型编号	$M_{\max}$	模型编号	$M_{\max}$
RC-1	41.17	BRC-1-20	81.91
RC-2	79.19	BRC-2-20	121.21
RC-4	146.59	BRC-4-20	178.86
BRC-1-14	57.21	BRC-1-24	103.19
BRC-2-14	88.23	BRC-2-24	136.51
BRC-4-14	171.41	BRC-4-24	206.46

计算最大受弯承载力的理论值和模拟值的误差均不超过10%，可见本文所推导的加约束屈曲纵筋摇摆柱的最大受弯承载力理论公式是适用的。由上可知，随着纵筋直径和轴压比的增加，约束屈曲纵筋摇摆柱的最大受弯承载力也随之增长。

### 3.2.4 初始刚度及摇摆后刚度

本文中柱的刚度用抗侧力与位移的比值来衡量。其计算公式为：

$$k = \Delta F_h / \Delta \delta_h \quad (3)$$

式中， $k$ 为刚度； $\delta_h$ 为水平位移； $F_h$ 为剪力。

分别计算各模型的初始刚度  $k_1$  与摇摆后刚度  $k_2$ ，见表3。

表3 初始刚度及摇摆后刚度

Table 3 Initial stiffness and stiffness after rocking

单位：kN/mm

模型编号	$k_1$	$k_2$	模型编号	$k_1$	$k_2$
RC-1	1.37	-0.04	BRC-1-20	1.62	0.14
RC-2	1.31	-0.03	BRC-2-20	1.55	0.17
RC-4	1.07	0.20	BRC-4-20	1.43	0.23
BRC-1-14	1.44	0.12	BRC-1-24	1.88	0.24
BRC-2-14	1.38	0.15	BRC-2-24	1.87	0.27
BRC-4-14	1.17	0.21	BRC-4-24	1.63	0.29

上述分析结果表明，加约束屈曲纵筋摇摆柱的初始刚度、摇摆后刚度均比普通摇摆柱高，且随着纵筋直径和轴压比的增加，柱的摇摆后刚度也随之增长。摇摆后刚度的增加会相应的增加柱子摇摆后的最大位移以及承载力。

### 3.2.5 起摇位移

通过观察模型顶部参考点的竖向位移得到各摇摆柱模型的起摇位移见表4。随着纵筋直径的增加以及轴压比的增加，柱的起摇位移也随之增长。对比普通摇摆柱和约束屈曲纵筋摇摆柱的结果发现，约束屈曲纵筋摇摆柱发生摇摆的时间要晚于普

表4 起摇位移

Table 4 Displacements when rocking begin

单位：mm

模型编号	起摇位移	模型编号	起摇位移
RC-1	10	BRC-1-20	15
RC-2	17	BRC-2-20	20
RC-4	24	BRC-4-20	35
BRC-1-14	12	BRC-1-24	17
BRC-2-14	18	BRC-2-24	24
BRC-4-14	30	BRC-4-24	36

通摇摆柱。通过设计可使带约束屈曲纵筋摇摆柱的结构在小震阶段不摇摆，中震阶段摇摆柱内纵筋屈曲，结构发生摇摆。

## 4 结论

(1)提出了一种新型约束屈曲纵筋摇摆柱构造，是采用约束屈曲纵筋代替普通钢筋并放松柱与基础间的约束而形成的一种新型摇摆柱，其中约束屈曲装置约束纵筋屈曲，为纵筋提供平稳受力段。提出并验证了相应的恢复力模型，约束屈曲纵筋摇摆柱的滞回曲线为典型旗帜型，其强度为混凝土摇摆柱和纵筋强度的叠加。

(2)通过试验研究和数值模拟验证了约束屈曲装置对纵筋的约束功能，分析了纵筋直径、约束屈曲装置与钢筋空隙对其约束能力的影响。结果表明，约束屈曲装置可以有效约束钢筋受压屈曲，使纵筋表现出拉压性能一致。且约束屈曲装置与纵筋间空隙越小，其对纵筋的约束能力越强，并建议在空隙中添加阻尼材料来减少屈曲模态转换过程中的能量损耗。

(3)分析了约束屈曲纵筋摇摆柱的摇摆模式，纵筋屈服前和混凝土柱共同为摇摆柱提供弹性恢复力，纵筋屈服后柱底面可发生抬起，实现摇摆功能。约束屈曲纵筋摇摆柱的起摇位移由纵筋的屈服强度决定，纵筋屈服后柱开始摇摆，可根据层间位移角限值设计带约束屈曲纵筋摇摆柱的结构，使其在小震阶段不摇摆，中震阶段纵筋屈曲，结构发生摇摆。

(4)通过数值模拟分析了纵筋直径以及轴压比对约束屈曲纵筋摇摆柱滞回性能的影响。结果表明轴压比以及纵筋面积的增加都可以在不同程度增加约束屈曲纵筋摇摆柱的侧向承载能力。

## 参考文献：

- [1] Housner G W. The behavior of inverted pendulum structures during earthquakes [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1963, 53(2): 403-17.
- [2] Hukelbridge A A, Clough R W. Preliminary experimental study of seismic uplift of a steel frame [R]. Berkely: University of California, 1977.
- [3] Hukelbridge A A. Earthquake simulation tests of a nine story steel frame with columns allowed to uplift [R].

- Berkely: University of California, 1977.
- [4] Priestley M J N, Evison R J, Carr A J. Seismic response of structures free to rock on their foundations[J]. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering, 1978, 11(3): 141-150.
- [5] Roh H. Seismic behavior of structures using rocking columns and viscous dampers[D]. Buffalo: the State University of New York, 2007.
- [6] Roh H, Reinhorn A M. Analytical modeling of rocking elements [J]. Engineering Structures, 2009, 31: 1179-1189.
- [7] Roh H, Reinhorn A M. Modeling and seismic response of structures with concrete rocking columns and viscous dampers [J]. Engineering Structures, 2010, 32: 2096-2107.
- [8] Roh M, Reinhorn A M. Nonlinear static analysis of structures with rocking columns[J]. Journal of Structural Engineering, 2010, 136(5): 532-542.
- [9] Roh M, Cimellaro G P. Seismic fragility evaluation of RC frame structures retrofitted with controlled concrete rocking column and damping technique [J]. Journal of Earthquake Engineering, 2011, 15(7): 1069-1082.
- [10] 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.
- [11] Christopoulos C, Filiatrault A, Uang C M, et al. Post-tensioned energy dissipating connections for moment-resisting steel frames[J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(9): 1111-1120.
- [12] Ricles J M, Sause R, Peng S W, et al. Experimental evaluation of earthquake resistant post-tensioned steel connections [J]. Journal of Structural Engineering, 2002, 128(7): 850-859.
- [13] 吕西林, 崔晔, 刘兢兢. 自复位钢筋混凝土框架结构振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(1): 19-26.  
Lyu X L, Cui Y, Liu J J. Shaking table test of a self-centering reinforced concrete frame[J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(1): 19-26. (in Chinese)
- [14] 鲁亮, 樊宇, 吕西林, 等. 受控摇摆式钢筋混凝土框架抗震机理研究[J]. 地震工程与工程振动, 2015, 35(1): 66-76.  
Lu L, Fan Y, Lyu X L, et al. Research on the seismic performance of a controllable rocking RC frame [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2015, 35(1): 66-76. (in Chinese)
- [15] 鲁亮, 徐颖超, 代桂霞. 一种受控摇摆式钢筋混凝土框架基于性能的抗震设计方法[J]. 土木工程学报, 2016, 49(增1): 142-147.  
Lu L, Xu Y Ch, Dai G X. Performance-based seismic design method of a controlled rocking reinforced concrete frame [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(Sup 1): 142-147. (in Chinese)
- [16] 鲁亮, 江乐, 李鸿, 等. 柱端铰型受控摇摆式钢筋混凝土框架抗震性能的振动台试验研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(4): 193-198.  
Lu L, Jiang L, Li H, et al. Shaking table tests for aseismic performance of a controllable rocking reinforced concrete frame with column-end-hinge joints [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(4): 193-198. (in Chinese)
- [17] 鲁亮, 李鸿, 刘霞, 等. 梁端铰型受控摇摆式钢筋混凝土框架抗震性能振动台试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 59-66.  
Lu L, Li H, Liu X, et al. Shaking table test on seismic performance of controlled rocking reinforced concrete frame [J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 59-66. (in Chinese)
- [18] 吕西林, 陈云, 毛苑君. 结构抗震设计的新概念——可恢复功能结构[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2011, 39(7): 941-948.  
Lyu X L, Chen Y, Mao Y J. New concept of structural seismic design: earthquake resilient structures [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, 39(7): 941-948. (in Chinese)
- [19] 周颖, 吕西林. 摇摆结构及自复位结构研究综述[J]. 建筑结构学报, 2011, 32(9): 1-10.  
Zhou Y, Lyu X L. State-of-the-art on rocking and self-centering structures [J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(9): 1-10. (in Chinese)
- [20] 伍云天, 潘毅, 陈博文, 等. 采用屈曲约束纵筋的钢筋混凝土短柱轴压性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2013, 46(增1): 190-194.  
Wu Y T, Pan Y, Chen B W, et al. Behavior of axially loaded RC columns with buckling restrained longitudinal rebars [J]. China Civil Engineering Journal, 2013, 46(Sup 1): 190-194. (in Chinese)

(本文责编: 赵霞)