

自复位梁-柱节点的耗能与复位能力 协调关系研究

阎石,杜若鸣,赵子豪

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘要 目的 研究自复位梁-柱节点(SCBCJ)的耗能与复位能力间协调关系,提出简化设计方法,从而实现 SCBCJ 耗能器与预应力筋的合理配置。方法 建立了 SCBCJ 的理论恢复力模型,对该类节点的复位与耗能能力协调关系展开研究,通过有限元分析验证了简化设计方法的可行性。结果 节点的耗能能力随着复位耗能比 R 的增大而增加,复位能力随着 R 的增大而减小;在循环荷载下,SCBCJ 滞回曲线呈“旗帜”型,无残余变形,耗能能力较强。结论 所建立的协调关系表达式可以表征 SCBCJ 耗能与复位能力的协调关系,提出的简化设计方法实现了 SCBCJ 的耗能与复位能力的合理匹配,解决了设计时耗能器与预应力筋配置问题。

关键词 自复位梁-柱节点;耗能能力;复位能力;恢复力模型;连接器

中图分类号 TU378

文献标志码 A

引用格式:阎石,杜若鸣,赵子豪.自复位梁-柱节点的耗能与复位能力协调关系研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(5):789-796.(YAN Shi, DU Ruoming, ZHAO Zihao. Research on coordination relationship between energy dissipation and recentering capacities of self-centering beam-column joints [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science),2024,40(5):789-796.)

Research on Coordination Relationship Between Energy Dissipation and Recentering Capacities of Self-centering Beam-Column Joints

YAN Shi, DU Ruoming, ZHAO Zihao

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

Abstract: The purpose of this study is to investigate the coordinated relationship between energy dissipation and recentering capacity of Self-Centering Beam-Column Joints (SCBCJs), and propose a simplified design method to achieve rational configuration of energy dissipaters and prestressing tendons in SCBCJs. A theoretical restoring force model of SCBCJs is established to explore the coordinated relationship between recentering and energy dissipation capacities of such joints. The

收稿日期:2023-11-02

基金项目:国家自然科学基金项目(52378357)

作者简介:阎石(1962—),男,教授,博士研究生导师,主要从事韧性结构等方面研究。

feasibility of the simplified design method is verified through finite element analysis. The energy dissipation capacity of the joint increases with the increase of the recentering-to-dissipation ratio R , while the recentering capacity decreases with the increase of R . Under cyclic loading, the hysteresis loop of SCBCJs exhibits a "flag" shape with no residual deformation, indicating strong energy dissipation capacity. The established expression of the coordinated relationship can characterize the energy dissipation and recentering capacities of SCBCJs. The proposed simplified design method achieves rational matching of energy dissipation and recentering capacities in SCBCJs, thereby addressing the issue of energy dissipater and prestressing bar allocation during design.

Key words: self-centering beam-column joints(SCBCJ); energy dissipation capability; recentering capability; restoring force model; connector

近年来,自复位梁柱节点(SCBCJ)作为一种新型结构形式在结构抗震设计中引起了广泛关注。SCBCJ具有在地震或其他外部荷载作用下发生变形和破坏后能够自复位的能力,从而保障结构的可靠性,因此许多学者对SCBCJ展开了一系列研究。D. Sun等^[1]为评估SCBCJ的滞回性能,建立了梁柱节点的 $M-\theta$ 模型,并通过理论计算与试验骨架曲线对比,验证了所提出 $M-\theta$ 模型的准确性,为该种自复位梁柱节点的工程设计提供了理论依据。G. S. Cheok等^[2-3]研究了不同预应力筋设计参数对自复位梁柱节点强度、位移延性以及节点耗能能力的影响。X. Lu等^[4]提出了一种自复位摩擦现浇梁-柱节点,并对其进行了循环荷载试验,结果表明,提出的节点具有优异的自复位特性,具有与普通RC节点相近的耗能能力。L. Ma等^[5]建立了一种新型自复位混凝土梁-柱节点的旗帜形滞回模型,并进行了模拟分析,结果表明,理论计算的滞回曲线与数值模拟结果吻合较好,证明了建立的滞回模型的有效性。蔡小宁等^[6]提出了一种安装顶底角钢的预制预应力自复位RC框架梁-柱节点,完成了往复加载试验^[7-10],对节点的恢复力特性展开了研究^[11],并提出了设计方法^[12]。

虽然目前对SCBCJ的相关研究较多,但大多是针对SCBCJ自复位性能方面,对SCBCJ内在的耗能与复位能力协调关系与

合理匹配的研究相对欠缺。SCBCJ的耗能与复位能力之间存在着一定的协调关系,对于结构的力学性能具有重要影响。复位能力过强可能导致节点的耗能能力减弱;而复位能力过弱则可能导致节点无法恢复到初始状态,从而影响结构的韧性性能。基于此,笔者建立了SCBCJ的理论恢复力模型,在此基础上研究了SCBCJ耗能与复位能力的协调关系,并提出了SCBCJ的简化设计方法。研究表明,设计的SCBCJ无残余变形,具有较强的耗能能力,给出的简化设计方法是可行的。

1 自复位梁柱节点恢复力模型

1.1 自复位梁柱节点的理想滞回模型

SCBCJ的可恢复系统是由两部分组成:一部分是由预应力钢绞线组成的复位系统;另一部分由是耗能器组成的耗能系统,两者共同工作使SCBCJ具备可恢复功能。所以,SCBCJ的理想滞回曲线可以由复位系统的线弹性滞回曲线和耗能系统的弹塑性滞回曲线叠加而成,形成SCBCJ的“双旗帜”型滞回曲线(见图1)。

1.2 模型的建立与求解

1.2.1 基本假定

SCBCJ标准理论滞回曲线具有“双旗帜”型的特点(见图2),笔者采用11个关键控制点对滞回曲线的特征进行描述。

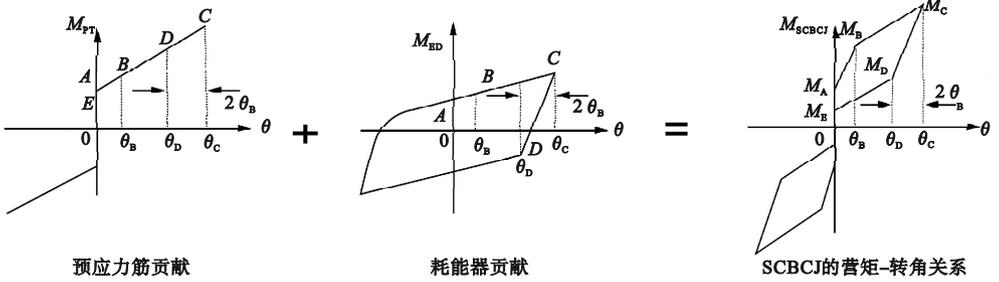


图1 SCBCJ的理想滞回曲线

Fig. 1 The ideal hysteresis curves of SCBCJ

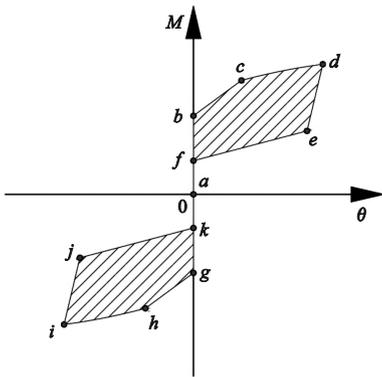


图2 标准型的弯矩-转角滞回关系曲线

Fig. 2 Standard moment-rotation angle hysteresis curve

在建立滞回模型时,作如下基本假定:

(1)将梁、柱视为刚体,在节点开合过程中,梁柱接触面只有全面接触和梁角点接触的情况,不考虑梁、柱的弯曲及剪切变形的影响,将梁体视为整体转动变形。

(2)预应力筋在结构变形过程中始终为弹性状态,耗能器为理想弹塑性材料。确保节点的耗能能力完全由耗能器提供,预应力筋不失效。

(3)梁-柱接触界面只有开合效应,无滑移现象。

1.2.2 理论滞回模型的建立

基于上述基本假定,在单周滞回弯矩作用下,建立 SCBCJ 的理论弯矩-转角滞回模型。SCBCJ 的初始状态、开合状态的受力示意图如图 3 和图 4 所示。

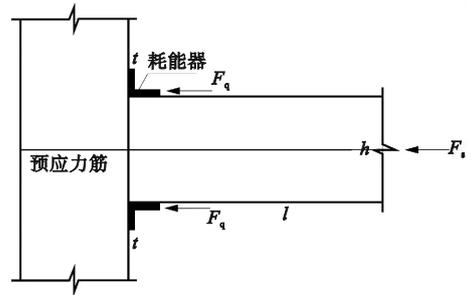


图3 梁柱节点初始状态示意图

Fig. 3 The schematic of initial state of SCBCJs

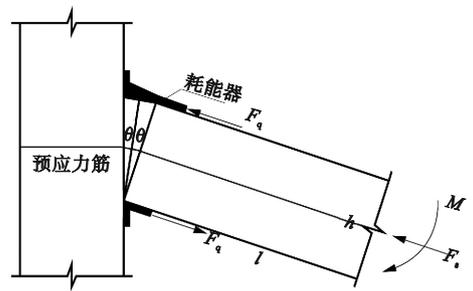


图4 梁柱节点开合状态示意图

Fig. 4 The schematic of opening and closing states of SCBCJs

设耗能器屈服提供的力为 F_a ,并假定 F_a 在节点受力过程中始终垂直于梁柱的接触面。预应力筋提供的合力为 F_t 。在梁柱接触面开合过程中,取接触面右侧的梁为脱离体并建立平衡方程。以耗能器变形以及预应力钢绞线最大伸长量为控制点,进行 SCBCJ 理论滞回曲线的推导。

(1) 初始状态(a点)

此时,SCBCJ 处于静置状态,对应图 2 中 a 点,外弯矩为零,则

$$M_a = 0. \quad (1)$$

$$\theta_a = 0. \quad (2)$$

式中: M_a 和 θ_a 分别为初始状态梁端弯矩和转角。

(2) 消压临界状态(b 点)

随着梁端弯矩的不断增大,左上侧梁角压力不断减小,梁柱界面即将分离,见图2中 b 点,则

$$M_b = \sigma_s A_s d_s = \sigma_s A_s h/2. \quad (3)$$

$$\theta_b = 0. \quad (4)$$

式中: M_b 和 θ_b 分别为消压临界状态梁端弯矩和转角; σ_s 、 A_s 和 d_s 分别为预应力筋的初始预应力、截面面积和到转动中心距离; h 为梁截面高度。

(3) 耗能器受拉屈服点(c 点)

随着梁端弯矩的不断增大,梁开始绕转动中心(底部接触点)转动,对应图2中 c 点,此时,梁仅在转动中心处与柱体接触,耗能器屈服。此时,

$$M_c = (\sigma_s A_s + \left(\frac{2}{L_s} \sin \frac{\theta_c}{2}\right) E_s A_s) \frac{h}{2} + M_q. \quad (5)$$

其中, $M_q = F_{q1} (h + \frac{t_q}{2}) + F_{q2} \frac{t_q}{2}$, $\theta_c = \varepsilon l_q / d_{q0}$ 。

式中: M_c 和 θ_c 分别为耗能器受拉屈服时梁端弯矩和转角; E_s 为预应力钢筋弹性模量; L_s 为预应力钢筋有效长度; M_q 为耗能器屈服弯矩; F_{q1} 为耗能器受拉屈服力, $F_{q1} = f_q A_q$, f_q 为耗能器屈服强度, A_q 为耗能器截面积; F_{q2} 为耗能器受压屈服力, $F_{q2} = 0.1 f_q A_q$ [14]; t_q 为耗能器厚度。

(4) 极限状态点(d 点)

假设当预应力筋伸长量达到理论最大伸长量时,见图2中 d 点,结构处于临界破坏的极限状态,则

$$M_d = (\sigma_s A_s + \frac{2}{L_s} \sin \frac{\theta_d}{2} E_s A_s) \frac{h}{2} + M_q. \quad (6)$$

其中, $\theta_d = \frac{\Delta L}{h/2}$ 。

式中: M_d 和 θ_d 分别为极限状态的梁端弯矩和转角; ΔL 为预应力筋理论最大伸长量。

(5) 耗能器反向屈服点(e 点)

SCBCJ 在达到极限状态后开始卸载,在反向荷载和预应力的作用下,结构进入复位状态,对应图2中 e 点。该过程中的外包钢管由屈服状态卸载至内力为零,再达到反向屈服状态,则

$$M_e = (\sigma_s A_s + \frac{2}{L_s} \sin \frac{\theta_e}{2} E_s A_s) \frac{h}{2} - M_q. \quad (7)$$

其中, $\theta_e = \theta_d - 2\theta_c$ 。

式中: M_e 和 θ_e 分别为耗能器反向屈服时梁端弯矩和转角。

(6) 转角恢复至零(f 点)

在反向荷载和预应力作用下,梁恢复至原位,梁柱界面闭合,梁端转角恢复至零,预应力钢绞线恢复原长,外包钢管仍处于反向屈服状态,对应图2中 f 点,则

$$M_f = \sigma_s A_s \frac{h}{2} - M_q. \quad (8)$$

$$\theta_f = 0. \quad (9)$$

式中: M_f 和 θ_f 分别为转角恢复至零时梁端弯矩和转角。

因为“双旗帜”型滞回曲线具有基于原点对称的特点,负向加载的弯矩-转角曲线与正向加载曲线关于原点对称,所以对负向加载曲线不再作推导。

2 自复位梁-柱节点复位及耗能能力协调关系

2.1 协调关系与取值范围

为使 SCBCJ 的耗能与复位能力协调关系不失一般性,笔者基于典型的弯矩-转角滞回曲线展开协调关系的研究(见图5)。

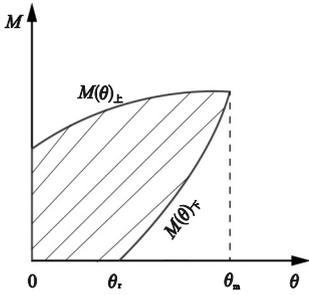


图5 典型弯矩-转角滞回曲线

Fig. 5 Typical moment-rotation angle hysteresis

定义耗能系数 γ , 即结构耗散的能量与加载过程中结构吸收的能量的比:

$$\gamma = \frac{S_d}{S_e + S_d} \quad (10)$$

式中: S_d 和 S_e 分别为加载曲线与卸载曲线所围面积和卸载曲线与 X 轴所围面积。

为了表征 SCBCJ 的复位与耗能能力协调关系, 提出一个指标, 即复位耗能比 R , 则

$$R = \frac{\gamma}{1 - \gamma} = \frac{S_d}{S_e} = \frac{\int_0^{\theta_m} M(\theta)_{上} d\theta}{\int_{\theta_r}^{\theta_m} M(\theta)_{下} d\theta} - 1 \quad (11)$$

式中: θ_m 和 θ_r 分别为最大转角和残余转角。

通过研究 R 的取值范围来分析 SCBCJ 的复位与耗能能力的协调关系, 具体过程如下:

(1) 当 SCBCJ 只具备复位能力时 - 双线性滞回状态。即当 SCBCJ 只具备复位能力而无耗能能力时, 其滞回曲线如图 6 所示, 此时为双线性滞回模型。然而, SCBCJ 应具有一定的耗能能力来抵抗地震作用, 所以进行结构设计时 R 应该大于零, 此时复位耗能比 R 为

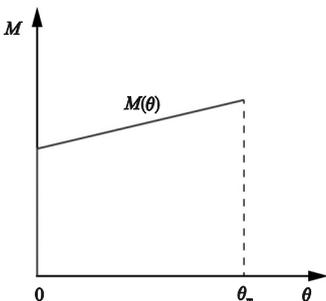


图6 双线性滞回曲线

Fig. 6 Bilinear hysteresis curve

$$R = \frac{\gamma}{1 - \gamma} = \frac{S_d}{S_e} = \frac{\int_0^{\theta_m} M(\theta)_{上} d\theta}{\int_0^{\theta_m} M(\theta)_{下} d\theta} - 1 = 0 \quad (12)$$

(2) 当 SCBCJ 恰好无残余变形时 - 复位临界状态。当 SCBCJ 滞回曲线中的卸载曲线经过坐标轴原点时, 即预应力筋初始预应力提供的复位弯矩与耗能器反向屈服提供的弯矩大小相等时, SCBCJ 恰好无残余变形, 滞回曲线如图 7 所示。此时复位耗能比 R 为

$$R_c = \frac{\gamma}{1 - \gamma} = \frac{\int_0^{\theta_m} M(\theta)_{上} d\theta}{\int_0^{\theta_m} M(\theta)_{下} d\theta} - 1 \quad (13)$$

SCBCJ 在滞回荷载作用下能够实现完全复位功能, 所以应满足无残余变形的要求。因此, 为使 SCBCJ 实现完全复位功能, 要求

$$R = \frac{\gamma}{1 - \gamma} \leq R_c = \frac{\int_0^{\theta_m} M(\theta)_{上} d\theta}{\int_0^{\theta_m} M(\theta)_{下} d\theta} - 1 \quad (14)$$

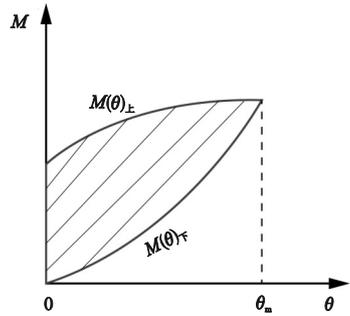


图7 复位临界状态滞回曲线

Fig. 7 Recentering critical state hysteresis curve

上述研究表明, 当 $0 < R \leq R_c$ 时, SCBCJ 可以实现复位功能, 同时具有一定的耗能能力。根据 R 的关系式可知, SCBCJ 的复位能力随着 R 的增大而减小, 耗能能力随着 R 的增大而增大。

2.2 自复位梁-柱节点的简化设计方法

SCBCJ 设计目标是如何解决复位与耗能能力的匹配问题, 使其在满足基本功能的前提下, 实现最大经济效益。笔者基于

SCBCJ“双旗帜”型滞回曲线的特点,以及关于 SCBCJ 复位与耗能能力协调关系,提出一种实现其复位与耗能能力合理匹配的简化设计方法。

根据对复位耗能比 R 可知,当 $R = R_c$ 时,结构在实现复位功能的前提下,具有最大的耗能能力。此时,滞回曲线的卸载曲线与 Y 轴相交于原点,该点与 SCBCJ“双旗帜”滞回曲线中“转角恢复至零点”相对应,其弯矩由预应力钢绞线初始预应力产生的弯矩和耗能器反向屈服产生的弯矩共同提供。即 $\theta = 0; M = M_{PT} - M_a$ 。当 R 取最大值时,滞回曲线中的卸载曲线经过原点, M 等于 0, 即 $M = M_{PT} - M_a = 0; M_{PT} = M_a$, 即预应力钢绞线初始预应力产生弯矩大小等于耗能器反向屈服时产生弯矩大小, SCBCJ 在实现复位功能的前提下,具有最大的耗能能力。

然而,由于预应力损失,需考虑该损失对 SCBCJ 复位效果的影响。根据黄林杰^[15]的研究成果,首次组装的结构预应力损失大约为初始预应力的 10.5%,所以在自复位结构设计过程中,在预应力相关参数确定后,令耗能器屈服弯矩 $M_a = 0.895 M_{PT}$ 进行耗能器的匹配设计。

综上所述,在进行 SCBCJ 设计时,以预应力筋初始预应力产生弯矩大小等于耗能器反向屈服产生弯矩大小为原则,先进行预应力钢绞线的设计,再依据简化匹配设计方法进行耗能器的匹配设计。

3 自复位梁柱节点有限元分析

为验证笔者提出 SCBCJ 简化设计方法的可行性,首先利用本课题组的试验数据进行有限元模型验证,然后选取一个基于简化设计方法设计的 SCBCJ,并对该节点进行低周循环往复加载,最后分析其复位能力和耗能能力。

为简化有限元建模过程,提高计算效率,采用线单元进行梁、柱构件的有限元模型建

立,采用两个 Hinge 连接器并联的方法实现自复位节点的“双旗帜”型滞回特性。其中一个连接器设置成非线性弹性参数来模拟耗能器弹塑性滞回性能,另一个连接器通过设置线弹性参数模拟预应力钢绞线的滞回特性,两者叠加,模拟出 SCBCJ 的“双旗帜”型滞回特性。

3.1 有限元模型验证

为验证 ABAQUS 有限元分析方法的可行性与准确性,选取文献[16]完成的自复位摇摆墙 RW-2 试件的试验结果进行对比,墙体高 \times 宽 \times 厚为 2 800 mm \times 1400 mm \times 160 mm,高宽比为 2,混凝土强度等级为 C35,钢筋采用 HRB335 级钢筋,材料参数见表 1。墙体顶部设置配筋加密区作为加载梁,并于顶部及两端预埋钢板,墙体下端预留底座。

表 1 材料性能试验结果

Table 1 Material performance test results

| 材料 | 直径/ mm | 弹性模量/ GPa | 屈服强度/ MPa | 极限强度/ MPa |
|-------|-----------|--------------|--------------|--------------|
| 钢筋 | 12 | 2 | 352.60 | 477.51 |
| | 14 | 2 | 343.16 | 486.11 |
| | 16 | 2 | 447.89 | 624.73 |
| 预应力钢筋 | 12.7 | 1.95 | 1400 | 1520 |

模拟结果如图 8 所示。图中, F_w 为构件的水平承载力, Δ_w 为墙顶点位, θ 为不同墙顶点位移对应的转角。

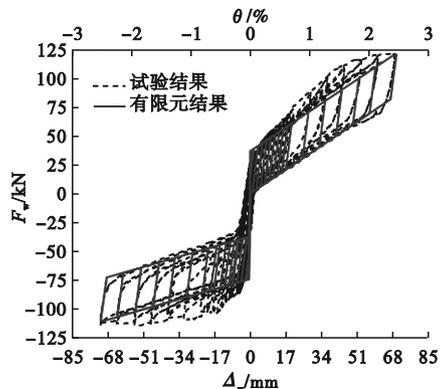


图 8 试验 - 模拟滞回曲线对比

Fig. 8 Comparison of experimental and simulation hysteretic curves

从图8中可以看出,有限元与试验结果均表现出该摇摆墙具有较好复位性能,同时具有一定的耗能能力,滞回曲线符合自复位结构的“双旗帜”型滞回特性。有限元模拟与试验在试件屈服点和极限状态点吻合较好,正向加载时,屈服荷载误差为8.8%,极限荷载误差为1.1%;负向加载时,屈服荷载误差为13.4%,极限荷载误差为4.1%。有限元模拟精准度良好,证明采用并联Hinge连接器的方法可以模拟出自复位节点在关键性能点的力学性能及耗能能力,可应用到SCBCJ的拟静力分析中。

虽然笔者基于的是摇摆墙模型进行的有限元模型验证,但其建模方法和自复位节点的模拟与SCBCJ原理相通。所以,可以证明采用Hinge连接器并联模拟SCBCJ的方法是可行的。

3.2 自复位梁柱节点有限元分析

3.2.1 SCBCJ的构造形式

新型SCBCJ的示意图如图9所示。该节点采用T型外包钢管进行连接,外包钢管与预制混凝土梁、柱之间通过螺栓连接,混凝土梁、柱与外包钢管和螺栓间的空隙填充高强灌浆料。柱截面宽×高为600 mm×600 mm,梁截面宽×高为300 mm×600 mm。混凝土强度等级为C40,钢筋强度等级为HRB400。外包钢管选取Q235型钢,预应力钢绞线选取Φ^{15.2},预应力钢绞线强度标准值 $f_{ptk} = 1\ 860\ \text{MPa}$,预应力钢绞线弹性模量 $E_{pt} = 1.95 \times 10^5\ \text{MPa}$ 。

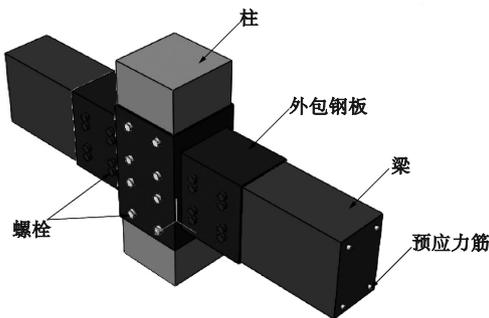


图9 新型SCBCJ构造图

Fig. 9 Structure schematic of a new type of SCBCJ

3.2.2 SCBCJ 韧性性能分析

根据SCBCJ的设计参数,建立该节点的有限元模型。其中,梁和柱均采用B31单元;SCBCJ通过Hinge连接器并联的方法模拟。混凝土采用PQ-Fiber中UConcrete02^[17]本构关系;钢筋采用USteel03^[18]本构关系;预应力钢绞线为理想弹性材料,外包钢管采用双折线随动硬化模型。柱顶和柱脚设置铰接约束,并在柱顶施加竖向荷载。通过位移控制的方式在梁端施加竖向往复荷载,有限元模型见图10。

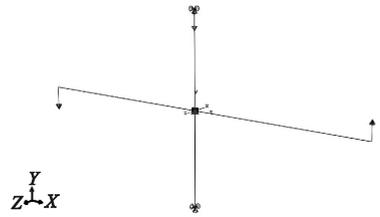


图10 SCBCJ有限元模型

Fig. 10 FE model of SCBCJ

数值模拟所得的新型SCBCJ的滞回曲线如图11所示,其中 F_0 为梁端荷载, Δ_0 为梁端位移。从图中可以看出,基于简化设计方法设计的SCBCJ的滞回曲线饱满,呈“双旗帜”型特征,结构无残余变形,且具有较大的耗能能力。同时,因为考虑实际工程中预应力损失的影响,所以滞回曲线中卸载曲线与Y轴未相交于坐标原点,交点略有提高。

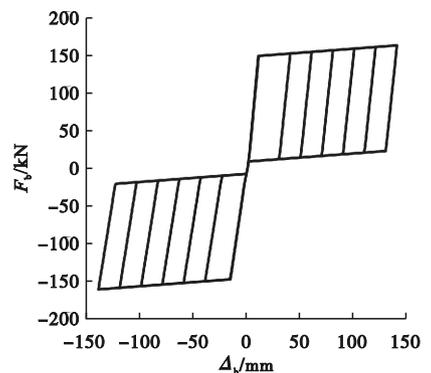


图11 新型SCBCJ有限元分析结果

Fig. 11 FEA results of a new type of SCBCJ

4 结 论

(1)所建立的理想状态下的 SCBCJ 理论滞回曲线,可以反映出 SCBCJ 在受到外荷载作用下,梁截面弯矩与转角之间的关系,为提出简化设计方法和复位与耗能能力协调关系奠定了基础。

(2)SCBCJ 的耗能与复位能力协调关系表明,结构的耗能能力随着复位耗能比 R 的增加而增加,复位能力随着 R 的增大而减小。

(3)所提出的简化设计方法可以实现 SCBCJ 复位与耗能能力的匹配设计,使其在实现复位的前提下,具有较大的耗能能力。

参考文献

[1] SUN D, YANG Y, MIAO J, et al. Hysteretic behavior and moment-rotation model of self-centering beam-column connection with angle steel [J]. Journal of constructional steel research, 2024, 213: 108410.

[2] CHEOK G S, LEW H S. Performance of precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading [J]. PCI journal, 1991, 36(3): 56-67.

[3] CHEOK G S, LEW H S. Model precast concrete beam-to-column connections subject to cyclic loading [J]. PCI journal, 1993, 38(4): 80-92.

[4] LU X, XU H, ZHANG X, et al. Experimental investigation on seismic performance of self-centering frictional cast-in-situ beam-column joints [J]. Engineering structures, 2023, 285: 116062.

[5] MA L, SHI Q, WANG B, et al. Research on design and numerical simulation of self-centering prefabricated RC beam-column joint with pre-pressed disc spring devices [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2023, 166: 107762.

[6] 蔡小宁. 新型预应力预制混凝土框架结构抗震能力及设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2012.
(CAI Xiaoning. Study on seismic capacity and design method of prestressed precast concrete frame [D]. Nanjing: Southeast University, 2012.)

[7] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍. 自复位预制框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2012, 45(12): 29-37.
(CAI Xiaoning, 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.)

[8] 蔡小宁, 孟少平, 孙巍巍. 自复位预制框架节点组件受力性能试验研究[J]. 工程力学, 2014, 31(3): 160-167.
(CAI Xiaoning, MENG Shaoping, SUN Weiwei.

Experimental study on performance of components of the exterior self-centering post-tensioned precast connections [J]. Engineering mechanics, 2014, 31(3): 160-167.)

[9] 蔡小宁, 孟少平. 预应力自复位预制框架中节点试验研究[J]. 建筑科学, 2016, 32(1): 76-80.
(CAI Xiaoning, MENG Shaoping. Experimental study of self-centering post-tensioned precast frame connections [J]. Building science, 2016, 32(1): 76-80.)

[10] CAI X, PAN Z, ZHU Y, et al. Experimental and numerical investigations of self-centering post-tensioned precast beam-to-column connections with steel top and seat angles [J]. Engineering structures, 2021, 226: 111397.

[11] 蔡小宁, 孟少平. 预应力自复位混凝土框架节点恢复力模型研究[J]. 工程力学, 2018, 35(1): 182-190.
(CAI Xiaoning, MENG Shaoping. Research on restoring force model of the prestressed self-centering concrete frame joints [J]. Engineering mechanics, 2018, 35(1): 182-190.)

[12] 蔡小宁, 孟少平, 徐建凯, 等. 预应力预制混凝土框架节点形式及设计方法[J]. 工业建筑, 2020, 50(1): 7-11.
(CAI Xiaoning, MENG Shaoping, XU Jiankai, et al. Research on form and design method of the prestressed self-centering concrete frame joints [J]. Industrial construction, 2020, 50(1): 7-11.)

[13] CHRISTOPOULOS C, FILIATRAULT A, FOLZ B. Seismic response of self-centering hysteretic SDOF systems [J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 2002, 31(5): 1131-1150.

[14] WELDON B, KURAMA Y C. Nonlinear behavior of precast concrete coupling beams under lateral loads [J]. Journal of structural engineering, 2007, 133(11): 1571-1581.

[15] 黄林杰. 顶底摩擦耗能自复位混凝土框架抗震性能与设计方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
(HUANG Linjie. Seismic performance and design method of self-centering prestressed concrete frames with top and bottom friction dampers [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.)

[16] SU X, YAN S, WANG T, et al. Whole-working history analysis of seismic performance state of rocking wall moment frame structures based on plastic hinge evolution [J]. Earthquakes and structures, 2024, 26(3): 175.

[17] MCKENNA F. Object oriented finite element programming: frameworks for analysis, algorithms and parallel computing [D]. California: Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 1997.

[18] CLOUGH R W. Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements. SESM 66-16 [D]. California: Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, 1966.
(责任编辑: 杨永生 英文审校: 刘永军)