

申允,夏成建,陈强,等. 2024. 基于转动摩擦铰阻尼器的干式装配梁-柱节点抗震性能试验[J]. 地震研究, 47(1): 105-113, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0028.

Shen Y, Xia C J, Chen Q, et al. 2024. Experimental investigation on seismic performance of dry-connected beam-to-column joint based on rotational friction hinge damper[J]. *Journal of Seismological Research*, 47(1): 105-113, doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0028.

基于转动摩擦铰阻尼器的干式装配梁-柱节点 抗震性能试验*

申允¹, 夏成建¹, 陈强¹, 王昊祥²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 2. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044)

摘要: 基于转动摩擦铰阻尼器 (RFHD), 提出了转动摩擦耗能干式装配梁-柱节点 (DRFDBJ)。为了验证 DRFDBJ 结构对于实现预期力学性能的可行性和合理性, 以施加在摩擦片表面的螺栓预紧力 (P_c) 为变量, 开展了 2 个工况下的 DRFDBJ 试件低周往复拟静力试验研究。结果表明: DRFDBJ 结构的力学性能主要由 RFHD 提供并控制, 试验中节点呈现了稳定的承载力和理想的变形、耗能能力, 并实现了预期的损伤集中; 2 个不同 P_c 水准下节点承载力的试验值与理论值误差不超过 5%, 通过调整 P_c 可实现节点承载力的调控, 为 DRFDBJ 结构承载力的可调控提供了支撑。

关键词: 装配式框架结构; 干式装配梁-柱节点; 转动摩擦阻尼器; 摩擦阻尼器

中图分类号: TU317 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2024)01-0105-09

doi:10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2024.0028

0 引言

干式装配梁-柱节点是指装配施工时无需现场浇筑混凝土或灌浆料的装配式混凝土梁-柱节点。这类节点可以充分体现装配式建筑绿色高效的特点, 因此已成为装配式建筑发展的重要趋势和研究热点之一 (吴刚, 冯德成, 2018)。实现节点的装配构造简洁和力学性能可靠是干式装配梁-柱节点发展的重要目标。

在改进和优化装配构造方面, 学者们提出了形式各异的干式装配梁-柱节点: 如黄祥海 (2014) 提出了一种基于暗牛腿和焊接连接的全干式装配节点; 丁克伟等 (2021) 基于牛腿和螺栓连接, 提出了一种半刚性梁-柱节点; 郭震等 (2021) 基于螺栓和焊接连接提出了插接式梁-柱节点, 这种节点具有装配效率高的特点。值得注

意的是, 大量学者 (Hong, 2019; 黄炜, 胡高兴, 2022; Esmaeili, Marsono, 2020; Li et al, 2020a; Moghadasi et al, 2014) 在干式装配梁-柱节点中采用了螺栓连接, 这些节点通常采用钢制预埋件或接头, 装配方式与螺栓连接的钢结构节点类似, 施工效率具有显著优势。此外, 机械铰连接也具有构造简洁和传力路径明确的特点, 同样被应用于干式装配梁-柱节点 (叶建峰等, 2021; 谢鲁齐等, 2020; Li et al, 2020b)。可见, 干式装配梁-柱节点的构造通常由一种或多种基本的连接形式组合发展形成, 合理选择基本连接形式是保证节点装配效率的关键。

在保证和提升力学性能方面, 干式装配梁-柱节点构造形式灵活, 可实现良好的变形能力, 基于这一特性, 可通过在节点中设置阻尼器, 形成高性能的干式装配梁-柱节点。如基于机械铰连接的节点可释放梁柱间的转动约束, 一些学者

* 收稿日期: 2023-07-30.

基金项目: 中国中铁二院工程集团有限责任公司科研项目 (KYY2019019 (19-22)).

第一作者简介: 申允 (1981-), 高级工程师, 主要从事建筑工程设计和研究工作. E-mail: 13553028@qq.com.

基于这一特点,结合钢板屈服阻尼器,提出了具有高性能、损伤可控的节点(叶建峰等,2021;谢鲁齐等,2020;Li *et al.*,2020a)。Hu 等(2020)基于螺栓连接和金属屈服耗能梁端,提出了具有震后可更换特性的干式节点。除金属屈服阻尼器外,其它类型的阻尼器也被用于提升干式节点的抗震性能,如 Song 等(2015)在钢质接头干式装配梁-柱节点中设置了腹板摩擦阻尼器和预应力筋,形成了具有良好耗能能力和自复位能力的节点;Morgen 和 Kurama(2008)提出的干式梁-柱节点中,预制梁和预制柱间通过腋式摩擦阻尼器和预应力筋连接,充分利用了摩擦阻尼器的高耗能能力。

根据上述装配梁-柱节点的发展需求和趋势,基于机械铰连接、螺栓连接和转动摩擦铰阻尼器(Rotational Friction Hinge Damper,简称 RFHD),杨参天和李爱群(2023)提出了转动摩擦耗能干式装配梁-柱节点(Dry-connected Rotational Friction Dissipative Beam-to-column Joint,简称 DRFDBJ),这种结构预期具有耗能能力强、性能可调控和损伤集中可控的特点。杨参天等(2022)在前期研究中验证了该类节点对于提升装配式框架结

构抗震性能的有效性。为了在节点构件层次验证实现 DRFDBJ 力学性能的可行性和合理性,本文以施加在摩擦片表面的螺栓预紧力(P_c)作为变量,开展了2个工况下的 DRFDBJ 试件低周往复拟静力试验研究,探究了装配工法对 DRFDBJ 力学性能的影响。

1 DRFDBJ 结构

DRFDBJ 结构如图 1 所示,其力学性能主要由 RFHD 提供并控制,如图 1b 所示。RFHD 的构造是在机械铰的耳板间设置环形摩擦片,同时采用预紧螺栓在机械铰的转动平面法线方向施加压力。RFHD 的工作原理与平动摩擦阻尼器基本一致(Santos *et al.*,2019;韩建强等,2018)。具体而言,当耳板间存在相对转动的趋势时,在预紧螺栓提供的压力作用下,摩擦片与耳板的接触面上存在静摩擦力,耳板与摩擦片间无法自由转动,此时 RFHD 处于弹性状态;当转动弯矩克服最大静摩擦力形成抵抗弯矩时,耳板与摩擦片会发生转动摩擦,此时 RFHD 进入摩擦耗能状态。

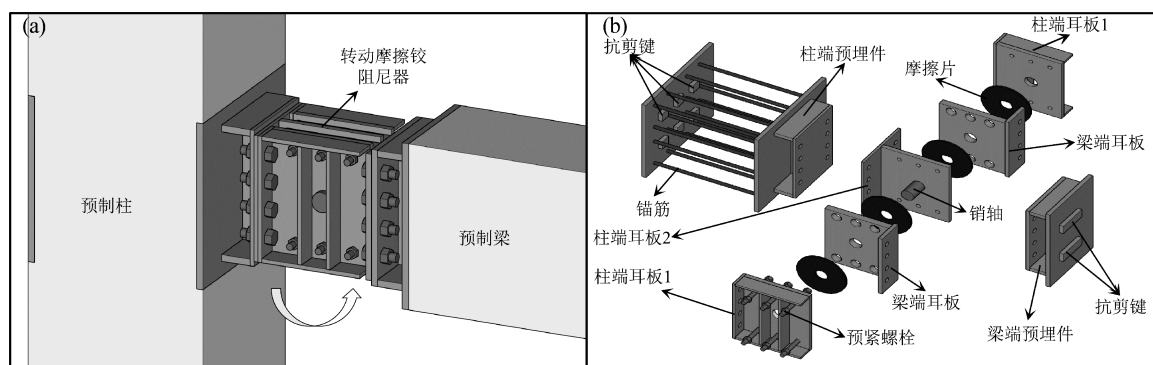


图 1 DRFDBJ 结构三维 (a) 和拆解 (b) 示意图

Fig. 1 3-dimensional (a) and disassembly (b) diagrams of the DRFDBJ

DRFDBJ 的预制柱端和预制梁端分别设置一组预埋件,预埋件通过锚筋与混凝土形成可靠连接,同时通过高强螺栓与 DRFDBJ 的关键组件 RFHD 形成干式连接。由上述构造和原理,得到基于 RFHD 的 DRFDBJ 的弯矩-转角理论曲线(图 2)。RFHD 启动之前,节点基本处于弹性状态,其初始刚度 k_e 由预埋件和 RFHD 的几何尺寸决定;随着节点转角的增长,当节点弯矩达到 RFHD 的起滑弯矩

时,RFHD 启动,此时节点屈服;由于摩擦型阻尼器的出力在启动后基本保持稳定,因此随着节点转动的进一步增长,节点弯矩基本稳定在 M_s 。由图 2 可见,DRFDBJ 的弯矩-转角曲线在理论上呈饱满的平行四边形,无下降段,其变形能力仅由几何尺寸决定。因此 DRFDBJ 具备良好的耗能、延性和变形能力。

为了保证 DRFDBJ 的力学性能由 RFHD 控制,

在设计时应保证梁端、柱端及各构件均保持弹性。基于这一前提, DRFDBJ 具有损伤集中可控的特点, 在地震作用下, 节点的非线性行为和损伤集中为摩擦面的磨损, 可在震后快速修复。

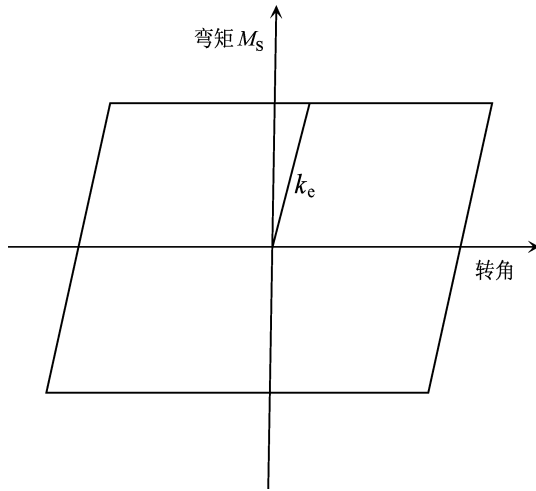


图2 DRFDBJ 弯矩-转角理论曲线

Fig. 2 Theoretical moment-rotation curve of the DRFDBJ

2 试验方案

2.1 试件设计与制作

为了验证 DRFDBJ 对于实现其预期性能的可行性, 本文设计并加工了一套 DRFDBJ 试件。RFHD 中施加在摩擦片表面的螺栓预紧力 P_e 是影响 DRFDBJ 力学性能的关键参数, 因此本文以 P_e 作为试验变量, 对 DRFDBJ 试件进行 2 个工况的加载, 分别为工况 1 和工况 2, 对应 P_e 分别为 302 和 483 kN, 摩擦面上的压应力分别为 7.1 和 11.4 MPa。本文研究的压应力范围与相关研究中摩擦阻尼器的压应力水准基本相当。

DRFDBJ 试件尺寸与配筋如图 3 所示, 柱子高为 3 m, 截面为 500 mm × 500 mm, 梁长度为 2 m, 截面为 300 mm × 500 mm。柱端预埋件、RFHD 和梁端预埋件形成的连接区段长度为 580 mm, 预埋件、柱端耳板和梁端耳板所用钢板厚度分别为 12 mm、18 mm 和 20 mm。为保证预埋件与混凝土共同工作, 在梁端和柱端预埋件端板与混凝土的接触面均焊接了抗剪键, 在柱端预埋件的两块端板间焊接了锚筋, 梁端预埋件的端板与梁纵筋通过穿孔塞焊连接。

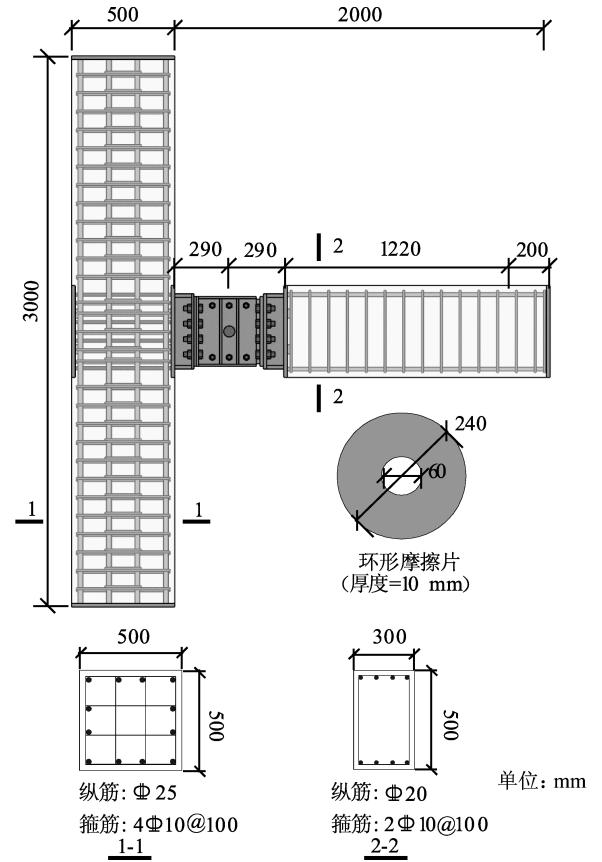


图3 DRFDBJ 试件尺寸与配筋图

Fig. 3 Dimension and reinforcements of the DRFDBJ specimen

DRFDBJ 试件中的 RFHD 采用了“3+2”的耳板形式, 即 3 块柱端耳板与 2 块梁端耳板形成机械铰连接。耳板上设置 6 个螺栓孔, 用于安装 M20 预紧螺栓, 施加摩擦片表面的压力。为保证 RFHD 的转动变形能力不受预紧螺栓限制, 梁端耳板的螺栓孔直径 (48 mm) 需大于柱端耳板的螺栓孔直径 (20 mm)。为避免外侧的柱端耳板在螺栓预紧力作用下发生面外变形, 导致摩擦片表面压应力分布不均匀, 在位于外侧的柱端耳板 1 上焊接了如图 1 所示的 12 mm 厚钢板作为加劲肋, 提升柱端耳板 1 的面外刚度。RFHD 的销轴直径为 60 mm, 环形摩擦片的内径、外径和厚度分别为 60、240 和 10 mm。RFHD 中螺栓预紧力的稳定性是保证 DRFDBJ 试件力学性能可靠的关键, 为此, M20 预紧螺栓设置了碟簧组作为垫片, 该措施可有效控制螺栓预紧力的衰减, 两个工况试验全过程中螺栓预紧力衰减均小于 5%, 为 RFHD 出力性能稳定、可调控提供了重要保障 (Sano *et al.*, 2019; 杨

参天等, 2022)。

为了验证 DRFDBJ 试件对于预制加工和现场装配的可行性, 对试验试件的各个组件分别加工, 并在试验场地装配。试件的装配步骤如图 4 所示, 主要包括: ①组装 RFHD。试件找装柱端耳板、梁

端耳板、环形摩擦片和销轴, 施加 P_c 至预定值。②安装预制柱, 将 RFHD 与预制柱通过端板螺栓连接。③将预制梁与 RFHD 通过端板螺栓连接。采用上述装配顺序的目的是尽可能保证螺栓预紧力全部转化为摩擦面压力。

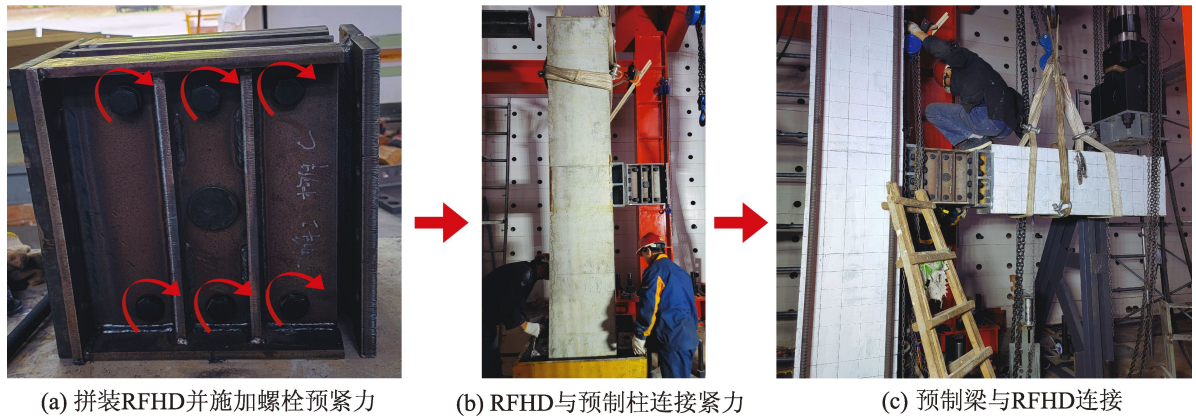


图 4 DRFDBJ 试件安装顺序

Fig. 4 Assembly steps of the DRFDBJ specimen

2.2 材料性能

DRFDBJ 试件采用 C30 等级混凝土。基于 6 个棱柱体试块的轴心抗压试验, 测得混凝土抗压强度的平均值为 30.36 MPa。预制梁柱和预埋件钢筋均采用 HRB400, 梁端、柱端预埋件和耳板均采用 Q345 钢板焊接而成。钢板和钢筋的力学性能参数见表 1。为了保证摩擦系数的稳定性, 采用纤维增强树脂基复合材料制作环形摩擦片, 杨参天等 (2022) 研究表明该材料可为转动摩擦铰阻尼器提供稳定的摩擦性能, 其与钢板的摩擦系数为 0.254。试件所用的 M20 和 M27 螺栓均为 12.9 级。RFHD 的销轴采用 40Cr 钢材制作。

表 1 钢板和钢筋力学性能参数

Tab. 1 Properties of steel plates and reinforcements

材料	厚度或直径/mm	屈服强度/MPa	极限强度/MPa
钢板	20	382.9	500.7
钢板	18	354.8	517.6
钢板	12	370.9	510.3
梁纵筋	20	425.1	630.3
柱纵筋	25	430.8	635.8
箍筋	10	420.2	610.7

2.3 加载和测量方案

试验采用的加载装置如图 5 所示。DRFDBJ 结构的柱子底部置于铰支座上, 铰支座固定于试验大厅地板, 因此可限制柱底的平动、平面外转动和扭转自由度。柱子顶部设置滑动支座, 以限制柱顶的水平移动、平面外转动和扭转自由度。该滑动支座是通过在机械铰支座的销轴连接处设置长圆孔实现的。滑动支座和铰支座的 4 个角部设有通孔, 用于安装精轧螺纹钢、千斤顶和力传感器, 从而在柱顶施加轴向压力 1 372 kN。DRFDBJ 的节点转动是通过 MTS 作动器在梁端施加竖向往复位移实现的, 作动器上端与试验室反力架通过铰支座连接。如图 5b 所示, 在梁端设置了一组面外约束装置, 避免加载时发生不可控的面外变形。2 个试验工况的梁端荷载均采用位移控制的低周往复拟静力加载制度, 试验过程中加载速率控制在 0.5 ~ 2 mm/s (图 6)。

为了准确测量试件的变形模式, 布置了如图 7a 所示的位移计。值得注意的是, 仅通过扭力扳手难以准确控制 RFHD 中的螺栓预紧力 (Cavallaro *et al*, 2018)。为了保证试验变量精准控制, 本文采用了如图 7b 所示的螺栓预紧力传感器, 实现了螺栓预紧力的准确施加和试验中预紧力衰减的监测。

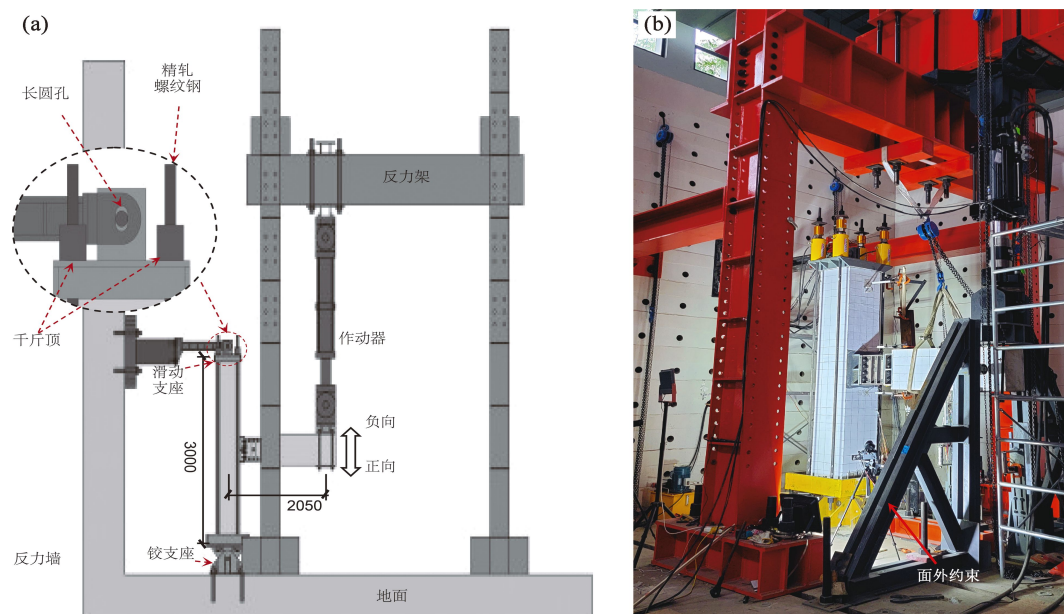


图5 试验加载装置示意图 (a) 及面外约束实景图 (b)
Fig. 5 Diagram of the loading device (a) and the external constraint (b)

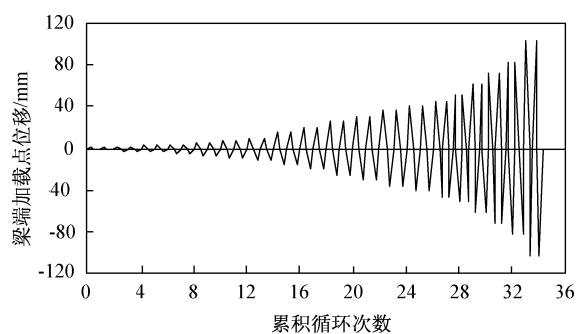


图6 试验加载制度
Fig. 6 Loading protocol

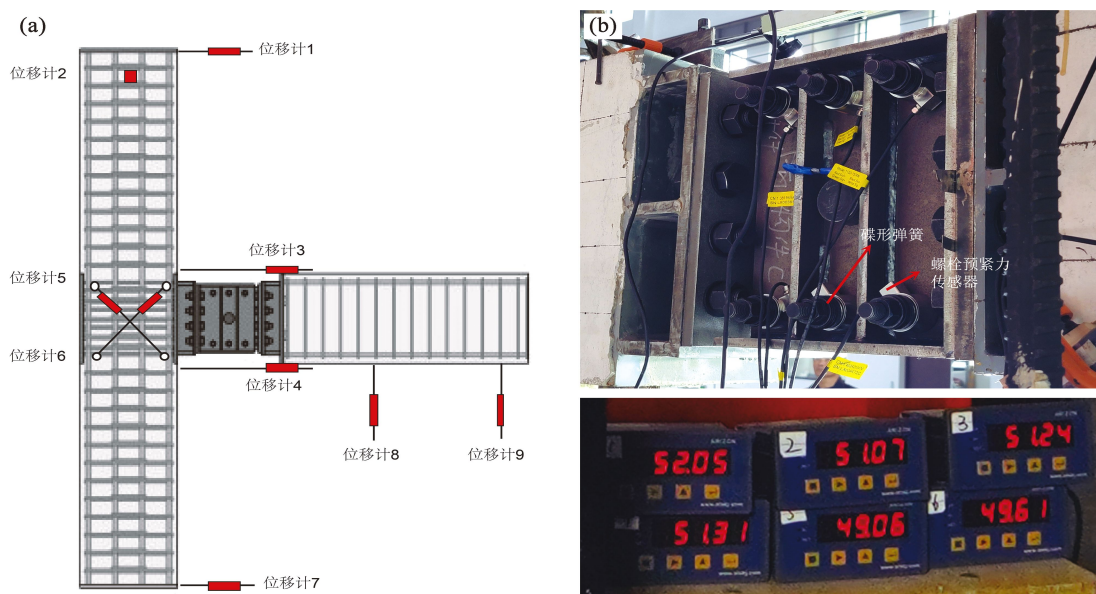


图7 位移计布设示意图 (a) 及螺栓预紧力测量实景图 (b)
Fig. 7 Arrangement of displacement meters (a) and measurement of bolt pretightening force (b)

3 试验结果

3.1 关键现象

DRFDBJ 试件的试验现象与传统现浇混凝土梁-柱节点具有显著区别, 关键现象如下:

(1) DRFDBJ 试件加载前和加载至正向最大位移如图 8 所示。由图可见, 预制柱、柱端预埋件和柱端耳板通过螺栓连接形成一个整体, 基本保持固定; 预制梁、梁端预埋件和梁端耳板通过螺栓连接形成另一个整体共同变形。上述两个整体以销轴为旋转中心形成了相对旋转。这一现象说明 DRFDBJ 试件试验呈现的变形模式与预期相符, 其构造合理。

(2) 由图 8 可见, 2 个加载工况试验全程中, DRFDBJ 试件的混凝土表面未出现任何肉眼可见裂缝。试验后预埋件、耳板、销轴和螺栓亦未呈现肉眼可见的残余变形, 说明经过合理设计, 有效控制了 DRFDBJ 的节点损伤。

(3) 如图 9 所示, 试验结束后, 摩擦片、柱端耳板、梁端耳板的接触区域内呈现明显的磨损痕迹。摩擦片表面经摩擦出现表层脱落的现象, 耳板表面经摩擦呈现金属光泽。这表明摩擦片与耳板间发生了转动摩擦, RFHD 发生了预设的工作模式, 即通过转动摩擦为 DRFDBJ 提供力学性能, 同时也表明 DRFDBJ 的非线性行为集中于摩擦片的磨损, 实现了预期的节点损伤集中可控。

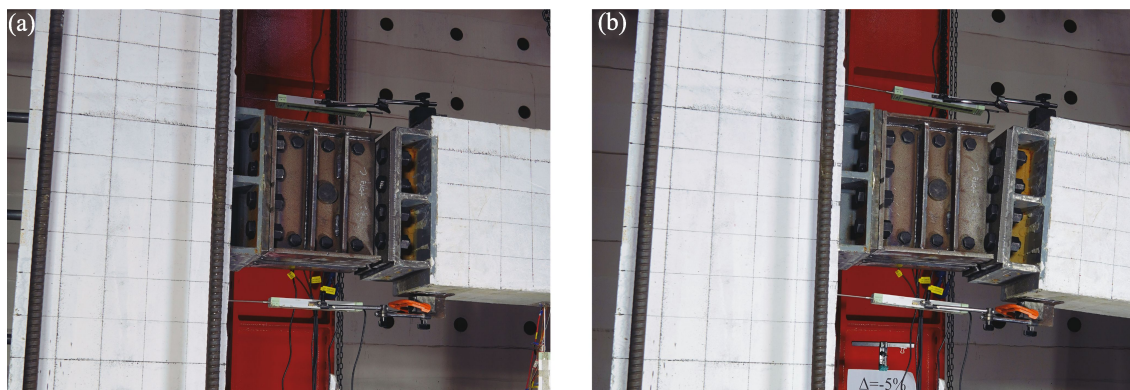


图 8 DRFDBJ 试件加载前 (a) 及加载至正向最大位移 (b) 示意图
Fig. 8 Deformation of the DRFDBJ specimen before (a) and after loading (b)

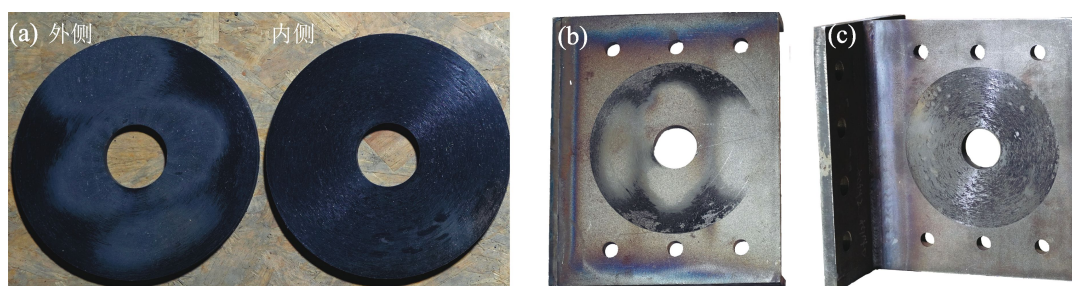


图 9 摩擦片 (a)、柱端耳板 (b) 和梁端耳板 (c) 的接触磨损痕迹
Fig. 9 Abrasion of the friction plate (a), the lug at column end (b), and the lug at beam-end (c) after the test

3.2 荷载-梁端位移滞回曲线

DRFDBJ 试件的荷载-梁端位移滞回曲线如图 10 所示。2 个不同 P_c 水准下的试验工况, 均实现了图 2 所示的理论滞回模型, 滞回曲线呈饱满的平

行四边形, 因此 DRFDBJ 具有理想的变形和耗能能力, 节点构造实现了预期的力学性能。试件承载力随着 P_c 的增长而提高, 验证了通过调整 P_c 对 DRFDBJ 力学性能调控的可行性。

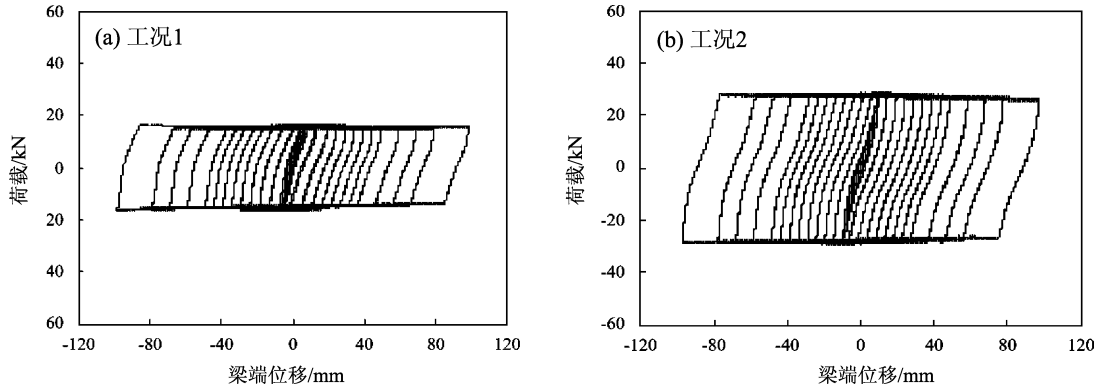


图 10 DRFDBJ 试件荷载-梁端位移滞回曲线

Fig. 10 Hysteretic curves of load vs displacement at beam-end of the DRFDBJ

3.3 骨架曲线与起滑荷载

根据滞回曲线得出了 DRFDBJ 试件的骨架曲线,如图 11 所示,DRFDBJ 试件的骨架曲线与传统现浇梁-柱节点具有显著区别,荷载在 RFHD 起滑后达到峰值,随后荷载基本保持稳定,因此其骨架曲线仅包括一个特征点,即起滑点,2 个 DRFDBJ 试件的起滑点见表 2。

从图 11 和表 2 可以看出:

(1) 在初始阶段,DRFDBJ 试件基本呈弹性,荷载随梁端位移线性增长,达到峰值时,荷载保持稳定,不再随梁端位移的增长而变化。因此

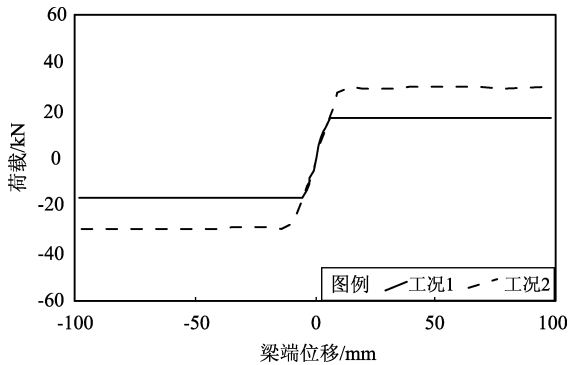


图 11 DRFDBJ 试件骨架曲线

Fig. 11 Skeleton curves of the DRFDBJ

表 2 DRFDBJ 试件骨架曲线特征点

Tab. 2 Characteristic points of the skeleton curves of DRFDBJ

工况	P_e /kN	Δ_s /mm	F_s /kN	$F_{s,t}$ /kN	$F_{s,t}/F_s$
工况 1	302	5.4	16.6	17.1	1.03
工况 2	483	9.2	28.5	27.3	0.96

注: P_e 为螺栓预紧力; Δ_s 为起滑位移; F_s 为试件的起滑荷载; $F_{s,t}$ 为试件的起滑荷载理论值。

DRFDBJ 呈现的力学特性与摩擦型消能减震装置一致,这是因为 DRFDBJ 的力学性能是由 RFHD 起控制作用。

(2) DRFDBJ 试件的起滑荷载公式为:

$$F_s = \frac{n_f \cdot P \cdot \mu_f}{l_e} \cdot \frac{2(R_2^3 - R_1^3)}{3(R_2^2 - R_1^2)} \quad (1)$$

式中: n_f 为单个试件包含的摩擦片数量; μ_f 为摩擦片与耳板之间的名义摩擦系数; l_e 为试件加载点到转动中心(即销轴中心)的水平距离; P 为螺栓预紧力; R_1 、 R_2 分别为摩擦片的内、外半径。基于式(1)计算得到 2 个不同 P_e 水准下 DRFDBJ 试件的起滑荷载理论值 $F_{s,t}$ 。由表 2 可见,2 个工况下起滑荷载试验值与理论值的误差分别为 3%、-4%,精度良好。这表明基于式(1),通过调整螺栓预紧力即可实现 DRFDBJ 承载力的灵活设计与调整。

3.4 耗能能力

基于滞回曲线计算了 DRFDBJ 试件在各位移等级下的滞回耗能,如图 12 所示,由图可见:①起滑前,由于节点基本处于弹性,DRFDBJ 的滞回耗能较小;起滑后,RFHD 转动摩擦为节点提供了可观的耗能能力,滞回耗能显著大于起滑前。②起滑后,滞回耗能随梁端位移增大基本呈线性增长的趋势,这是由摩擦型滞回特性决定的。因此,DRFDBJ 的滞回耗能具有稳定可预测的特征。基于这一特性,可将节点耗能需求转化为承载力需求和设计参数(Lu, Guan, 2021),因此 DRFDBJ 节点与基于能量的设计方法具有良好的适配性。

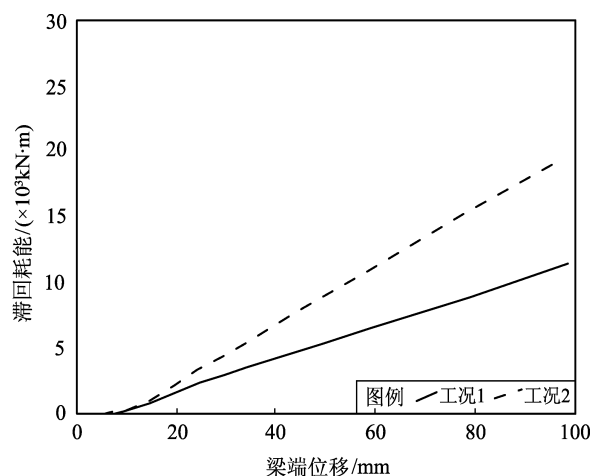


图 12 各梁端位移等级下 DRFDBJ 试件的滞回耗能

Fig. 12 Hysteretic dissipated energy of the DRFDBJ vs different values of displacement at beam-end

4 结论

本文基于转动摩擦铰阻尼器 (RFHD) 提出了一种转动摩擦耗能干式装配梁-柱节点 (DRFDBJ) 结构, 以施加在摩擦片表面的螺栓预紧力 P_c 作为变量, 开展了 2 个工况下的 DRFDBJ 试件低周往复拟静力试验研究, 主要得出以下结论:

(1) DRFDBJ 结构的力学性能和可行性得到了验证。节点的力学性能由 RFHD 提供并控制, 呈现了稳定的承载力和理想的变形、耗能能力。DRFDBJ 试件实现了预期的损伤集中可控。

(2) DRFDBJ 结构的承载力可控性得到了验证。2 个不同 P_c 水准下节点承载力的试验值与理论值误差不超过 5%。

参考文献:

- 丁克伟, 刘建华, 马巍, 等. 2021. 新型装配式半刚性节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 54(4): 1-7, 56.
- Ding K W, Liu J H, Ma W, et al. 2021. Experimental study on seismic performances of a new type of fabricated semi-rigid beam-to-column connection[J]. China Civ Eng, 54(4): 1-7, 56. (in Chinese)
- 郭震, 贾笑岩, 丁嘉慧, 等. 2021. 插接装配式混凝土梁柱节点抗震性能[J]. 中国矿业大学学报, 50(2): 256-264.
- Guo Z, Jia X Y, Ding J H, et al. 2021. Seismic behavior of plug-in assembly concrete beam-column connections[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 50(2): 256-264. (in Chinese)
- 韩建强, 张会峰, 乔杨. 2018. 滑动长孔高强螺栓摩擦阻尼器滞回性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 39(S2): 315-320.

- Han J Q, Zhang H F, Qiao Y. 2018. Experimental study on hysteretic performance of friction dampers with sliding long hole and high strength bolt[J]. Journal of Building Structures, 39(S2): 315-320. (in Chinese)
- 黄炜, 胡高兴. 2022. 可恢复预制装配式 RC 梁柱节点抗震性能研究[J]. 工程力学, 39(12): 165-176, 189.
- Huang W, Hu G X. 2022. Seismic performance of earthquake-resilient precast RC beam-column joints[J]. Engineering Mechanics, 39(12): 165-176, 189. (in Chinese)
- 黄祥海. 2014. 新型全预制装配式框架体系研究[D]. 南京: 东南大学.
- Huang X H. 2014. Research on the new-type full precast concrete frame [D]. Nanjing: Southeast University. (in Chinese)
- 吴刚, 冯德成. 2018. 装配式混凝土框架节点基本性能研究进展[J]. 建筑结构学报, 39(2): 1-16.
- Wu G, Feng D C. 2018. Research progress on fundamental performance of precast concrete frame beam-to-column connections[J]. Journal of Building Structures, 39(2): 1-16. (in Chinese)
- 谢鲁齐, 吴京, 章锦洋, 等. 2020. 可更换耗能连接力学机理及变形性能研究[J]. 工程力学, 37(6): 186-195.
- Xie L Q, Wu J, Zhang J Y, et al. 2020. Study on the mechanical and deformation properties of replaceable energy dissipation connectors[J]. Engineering Mechanics, 37(6): 186-195. (in Chinese)
- 杨参天, 李爱群, 贾军波. 2022. 含转动摩擦型干式梁-柱节点的新型装配式混凝土框架结构抗震性能研究[J]. 工程力学, 39(8): 223-231.
- Yang C T, Li A Q, Jia J B. 2022. The seismic performance of precast concrete frame structures with dry-connected rotational friction beam-column joints[J]. Engineering Mechanics, 39(8): 223-231. (in Chinese)
- 杨参天, 李爱群. 2023. 转动摩擦铰阻尼器力学性能试验研究[J]. 工程力学, 40(7): 75-81.
- Yang C T, Li A Q. 2023. Experimental investigation on mechanical performance of rotational friction hinge damper[J]. Engineering Mechanics, 40(7): 75-81. (in Chinese)
- 叶建峰, 郑莲琼, 颜桂云, 等. 2021. 装配式可更换耗能铰滞回性能试验研究[J]. 工程力学, 38(8): 42-54.
- Ye J F, Zheng L Q, Yan G Y, et al. 2021. Experimental study on hysteretic performance of replaceable energy-dissipating prefabricated hinges[J]. Engineering Mechanics, 38(8): 42-54. (in Chinese)
- Cavallaro G F, Latour M, Francavilla A B, et al. 2018. Standardized friction damper bolt assemblies time-related relaxation and installed tension variability[J]. Journal of Constructional Steel Research, 141: 145-155.
- Esmaili J, Ahooghalandary N. 2020. Introducing an easy-install precast concrete beam-to-column connection strengthened by steel box and peripheral plates[J]. Engineering Structures, 205: 110006.
- Hong W K. 2019. Hybrid composite precast systems: Numerical investigation to construction[M]. London: Woodhead Publishing.
- Hu G X, Huang W, Xie H Q. 2020. Mechanical behavior of a replaceable

- energy dissipation device for precast concrete beam-column connections[J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 164:105816.
- Li S F, Zhao D, Li Q N, *et al.* 2020a. Research on prefabricated concrete beam-column joint with high strength bolt-end plate[J]. *Structural Engineering and Mechanics*, 74(3):395–406.
- Li Z H, Qi Y H, Teng J. 2020b. Experimental investigation of prefabricated beam-to-column steel joints for precast concrete structures under cyclic loading[J]. *Engineering Structures*, 209:110217.
- Lu X Z, Guan H. 2021. Earthquake disaster simulation of civil infrastructures; From tall buildings to urban areas(2nd edition)[M]. Berlin: Springer.
- Moghadasi M, Marsono A K. 2014. Comparative experimental study of full-scale H-subframe using a new industrialized building system and monolithic reinforced concrete beam-to-column connection[J]. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 23(8):563–579.
- Morgen B, Kurama Y. 2008. Seismic response evaluation of posttensioned precast concrete frames with friction dampers[J]. *Journal of Structural Engineering*, 134(1):132–145.
- Sano T, Shirai K, Suzui Y, *et al.* 2019. Loading tests of a brace-type multi-unit friction damper using coned disc springs and numerical assessment of its seismic response control effects[J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 17(9):5365–5391.
- Santos A F, Santiago A, Rizzano G. 2019. Experimental response of friction dampers under different loading rates[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 132:103316.
- Song L L, Guo T, Gu Y, *et al.* 2015. Experimental study of a self-centering prestressed concrete frame subassembly[J]. *Engineering Structures*, 88:176–188.

Experimental Investigation on Seismic Performance of Dry-connected Beam-to-column Joint Based on Rotational Friction Hinge Damper

SHEN Yun¹, XIA Chengjian¹, CHEN Qiang¹, WANG Haoxiang²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

(2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract

Based on rotational friction hinge damper (RFHD), the dry-connected rotational friction dissipative beam-to-column joint (DRFDBJ) is proposed. Such a joint is expected to feature a good energy-dissipation capacity, adjustable performance as well as concentrated damage. To validate the feasibility and rationality of the DRFDBJ for achieving the expected mechanical performance, two load cases of pseudo-static cyclic experimental tests are carried out. The pre-tension force applied on the surface of the friction pads (P_c), which is a critical parameter of DRFDBJ, is selected as the test variable. The results indicate that the mechanical properties of DRFDBJ are mainly provided and determined by RFHD. Stable strength, stable deformation and energy dissipation capacities are exhibited in the tests. The expected damage-concentration feature of the joint is achieved. The errors between the experimental value and the theoretical value of the joint bending moment strength with two P_c -values are not more than 5%. The strength of DRFDBJ could be adjusted by varying P_c -value, thus laying a foundation for the strength adjustment of DRFDBJ. The results could serve as a reference for relative investigations on dry-connected precast concrete structures and frictional energy dissipation devices.

Keywords: precast concrete frame structure; dry-connected precast beam-to-column joint; rotational friction damper; friction damper