

引文格式:程卫红,肖从真,田春雨,等.部分无黏结螺杆连接梁柱节点的恢复力模型研究[J].建筑科学与工程学报,2024,41(3):98-107.  
CHENG Weihong, XIAO Congzhen, TIAN Chunyu, et al. Study of restoring force model on beam-to-column assembled joint connected with partially unbounded bar[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(3): 98-107.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05071

## 部分无黏结螺杆连接梁柱节点的恢复力模型研究

程卫红<sup>1,2</sup>, 肖从真<sup>1,2</sup>, 田春雨<sup>1</sup>, 李建辉<sup>1,2</sup>

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013)

**摘要:**为研究部分无黏结螺杆连接梁柱节点的抗震性能和恢复力特性,基于2榀高性能装配式框架结构的低周往复试验,分析典型边跨梁柱连接节点的破坏现象、滞回性能、骨架曲线、延性和变形能力等抗震性能指标;根据试验结果和理论分析,提出了四折线的节点弯矩-转角骨架曲线模型,并给出各特征点的计算方法;基于试验滞回曲线的特征分析,构建了节点的恢复力滞回规则,与骨架曲线构成节点的恢复力模型。结果表明:极限状态时,部分无黏结螺杆连接梁柱节点的节点区混凝土损伤程度较轻,节点的主要屈服机制为连接螺杆,节点整体工作状态良好;节点弯矩-转角滞回曲线捏拢明显,呈现出明显的转动变形滑移,节点耗能能力较差;节点转角位移延性系数介于3.94~6.21之间,2榀框架中节点的最大转角分别约为1/58和1/53,节点延性性能和变形能力良好;所提出的节点弯矩-转角骨架曲线模型和恢复力滞回模型与试验结果吻合良好,该恢复力模型可用于应用该类型连接节点的整体装配式框架结构的弹塑性分析。

**关键词:**部分无黏结螺杆;梁柱节点;抗震性能;滞回曲线;骨架曲线;恢复力模型

中图分类号:TU375.4

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)03-0098-10

### Study of restoring force model on beam-to-column assembled joint connected with partially unbounded bar

CHENG Weihong<sup>1,2</sup>, XIAO Congzhen<sup>1,2</sup>, TIAN Chunyu<sup>1</sup>, LI Jianhui<sup>1,2</sup>

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;

2. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to study the seismic performance and restoring force character of beam-to-column assembled joint connected with partially unbounded bar, two high-performance precast frames were tested under low cyclic loading. The seismic performance indexes such as failure phenomenon, hysteresis performance, skeleton curve, ductility and deformation capacity of typical side-span beam-to-column assembled joints were studied and analyzed. According to the experimental results and theoretical analysis, the moment-rotation skeleton curve model of four-fold line joints was proposed, and the calculation method of each feature point was given. Based on the analysis of the characteristics of the test hysteresis curve, the restoring force hysteresis rule of the joint was constructed, and the restoring force model of the joint was formed with the

收稿日期:2023-05-18

投稿网址:<http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:北京市自然科学基金项目(8212019)

作者简介:程卫红(1989-),男,工学博士,高级工程师,E-mail:chengweihong@cabrtech.com。

通信作者:肖从真(1967-),男,工学博士,研究员,博士生导师,E-mail:xiaocongzhen@cabrtech.com。

skeleton curve. The results show that concrete damage in the joint area of the beam-to-column assembled joints is relatively light under limit state. The integral working state of the joints is good while the main yield concentrated on the connecting bar. A significant pinch phenomenon and obvious rotational deformation slip of moment-rotation hysteresis curves of the assembled joints indicates poor energy dissipation capacity. The ductility coefficients of the assembled joints are between 3.94 and 6.21, and the maximum rotation angles of the two frames are about 1/58 and 1/53. The ductility performance and deformation capacity of the assembled joints are good. The proposed joint moment-rotation skeleton curve model and restoring force hysteretic model are in good agreement with the test results. The established restoring force model can be used for the elastoplastic analysis of integral precast frame structure using this type of assembled joints.

**Key words:** partially unbounded bar; beam-to-column assembled joint; seismic performance; hysteresis curve; skeleton curve; restoring force model

**Author resumes:** CHENG Weihong (1989-), male, PhD, senior engineer, E-mail: chengweihong@cabrtech.com; XIAO Congzhen (1967-), male, PhD, research fellow, E-mail: xiaocongzhen@cabrtech.com.

## 0 引言

装配式建筑是建筑行业助力实现“碳中和碳达峰”目标的必经之路,目前装配式混凝土结构是装配式建筑的主要发展方向之一,而混凝土梁柱连接节点一直是装配式混凝土结构研究的重点<sup>[1-2]</sup>。国内外学者对多种装配式梁柱节点连接形式进行试验和理论研究,取得了较多的研究成果<sup>[3-16]</sup>。研究表明:预应力拼接节点的自复位能力良好,但相对耗能能力低于现浇节点<sup>[3-4,14]</sup>;焊接连接节点、局部钢结构混合螺栓连接节点对于预制构件的施工精度要求很高,现场施工质量较难控制<sup>[5,13]</sup>;后浇整体式节点的抗震性能与现浇节点相当,但节点区现场施工复杂<sup>[8-10,12]</sup>;螺栓连接节点刚度相对较弱,整体性相对较差<sup>[15]</sup>;在连接节点设置其他耗能子系统(包括摩擦型消能器、黏弹性消能器、高延性钢材组件等)能够有效改善节点的耗能性能,并有利于控制节点区混凝土损伤发展,但对应节点构造过于复杂<sup>[6-7,11,16]</sup>。

为促进装配式混凝土结构的进一步发展,有学者提出一种具有独立耗能系统的高性能装配式混凝土框架结构体系<sup>[17]</sup>,如图1所示,通过引入独立的耗能系统,弱化结构体系对梁柱连接节点的耗能需求,从而简化节点连接构造;其中耗能系统采用墙式连接剪切型金属消能器,梁柱连接节点采用部分无黏结螺杆连接节点,并进行了该装配式框架结构的抗震性能拟静力试验研究。该梁柱连接节点的构造特点为:框架柱贯通,梁端加宽设T型挑耳,梁端T型挑耳和框架柱对应预留波纹管孔道,螺杆穿过预

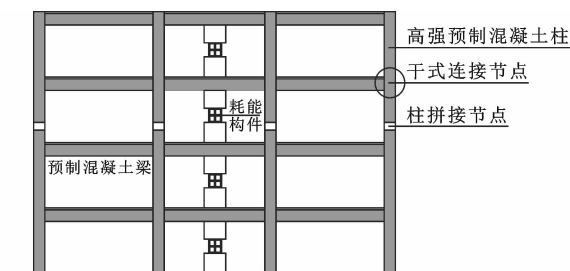


图1 高性能装配式框架结构体系

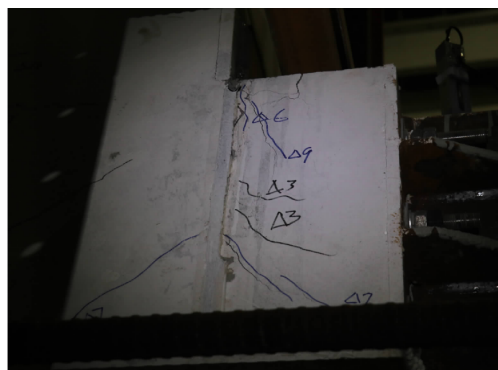
Fig. 1 High-performance precast frame structure system

留孔道后灌浆实现梁柱构件连接;为改善连接节点的变形能力,通过特定构造措施,保证螺杆在框架柱外侧指定长度区段实现无黏结。程卫红等<sup>[18]</sup>结合框架试验结果,通过理论分析和有限元模拟分析,对该节点的受力机理进行了详细的研究。为进一步研究该装配式混凝土框架结构的弹塑性地震响应,在试验研究和理论分析的基础上,本文对该类梁柱连接节点的弯矩-转角骨架曲线和滞回曲线特征进行分析,尝试建立该类节点的弯矩-转角恢复力模型。

## 1 试验概况

为探究高性能装配式框架结构的抗震性能,并验证梁柱连接节点的工作机理,完成了2榀足尺3跨2层装配式框架结构的拟静力试验研究<sup>[17]</sup>。框架标准层层高2.5 m,跨度5 m+3 m+5 m;框架柱截面450 mm×450 mm,框架梁截面250 mm×450 mm。框架梁柱混凝土等级分别为C40和C80,轴心抗压强度实测标准值分别为28.1、47.3 MPa;钢筋采用HRB400钢筋,实测屈服强度445 MPa,极

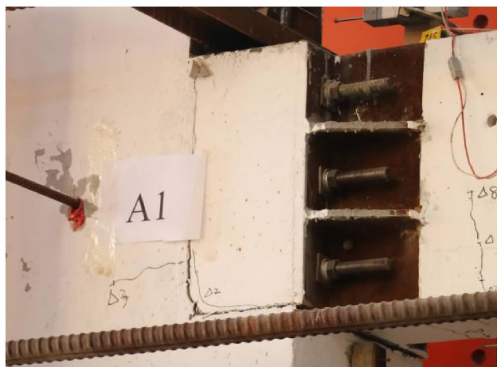




(a) KJ1-A1节点



(b) KJ1-D1节点



(c) KJ2-A1节点



(d) KJ2-D1节点

图 4 装配式节点的损伤形态和转动现象

Fig. 4 Damage morphology and rotation phenomenon of assembled joints

接节点区混凝土的整体损伤程度较轻,节点工作状态良好。该连接节点的破坏形态与现浇梁柱节点、

装配整体式梁柱节点的破坏形态<sup>[10]</sup>明显不同,连接螺杆为节点的主要屈服机制。根据试验现象,建议工程应用时进一步加强梁端 T 型挑耳区的配筋构造,并采取措施降低梁柱交界面的黏结力,从而更有效地控制预制构件的混凝土损伤,实现该类型连接节点的震后快速修复。

## 2.2 节点弯矩-转角滞回曲线

试验中框架梁端纵筋的最大应变小于  $2 \times 10^{-3}$ , 框架梁基本处于带微裂缝的弹性工作状态, 因此可通过纵筋应变得到纵筋拉力, 进而得到梁端连接节点各加载步的抵抗弯矩。典型的边柱连接节点的弯矩-转角滞回曲线如图 5 所示。可以看出, 部分无黏结螺杆连接节点的滞回曲线捏拢明显, 并且表现出明显的转动变形滑移现象, 说明该节点的耗能能力略差。根据节点的构造特点, 节点连接螺杆未施加预应力, 且螺杆无黏结段位于柱外侧, 无黏结段与紧固螺母相邻, 因此连接螺杆实际只承担拉力, 无法承担压力, 节点缺乏有效的耗能机制。往复加载过程中, 连接螺杆受拉屈服后, 节点弯矩卸载时, 连接螺杆的弹性变形归零, 塑性变形基本不恢复, 因此节点弯矩基本归零时, 节点有明显的残余转角变形; 当节点在该方向再次加载, 直至连接螺杆的变形需求大于历史残余变形后, 连接螺杆再次工作, 因此节点反向再加载时节点表现出明显的转角滑移。

加载后期 KJ2 框架节点每级位移的第 2 和第 3 次循环加载的滞回环明显比 KJ1 框架节点的对应滞回环更饱满。KJ1 框架节点的无黏结段长度为 200 mm, 与梁端 T 型挑耳的厚度相同, 根据前述分析可知螺杆只承担拉力, 无法承担压力, 因此在每级位移的第 2 和第 3 次循环加载时, 节点基本呈非线性弹性工作状态, 滞回环接近完全捏拢状态。KJ2 框架节点的无黏结段长度为 150 mm, 连接螺杆临近螺母有 50 mm 的黏结段, 能够提供一定的黏结力, 该黏结力类似于摩擦力, 其作用方向与相互运动方向相反, 因此 KJ2 框架节点由于该黏结力的耗能贡献, 在第 2 和第 3 次循环加载时, 滞回环略微饱满。

滞回曲线表明该类型节点的正负向转动受力性能呈明显不对称性, 正向节点转角的发展明显慢于负向, 且正向转动的弯矩发展未出现下降段, 而负向转动的节点弯矩出现明显的峰值和下降段。干式连接节点的转动示意如图 6(a) 所示, 节点正向转动时, 梁底支承牛腿的灌浆料坐浆压紧, 梁顶抗剪角钢处于抗剪顶紧状态; 节点负向转动时, 梁底支承牛腿基本脱开, 梁顶抗剪角钢处于抗弯约束状态。节点

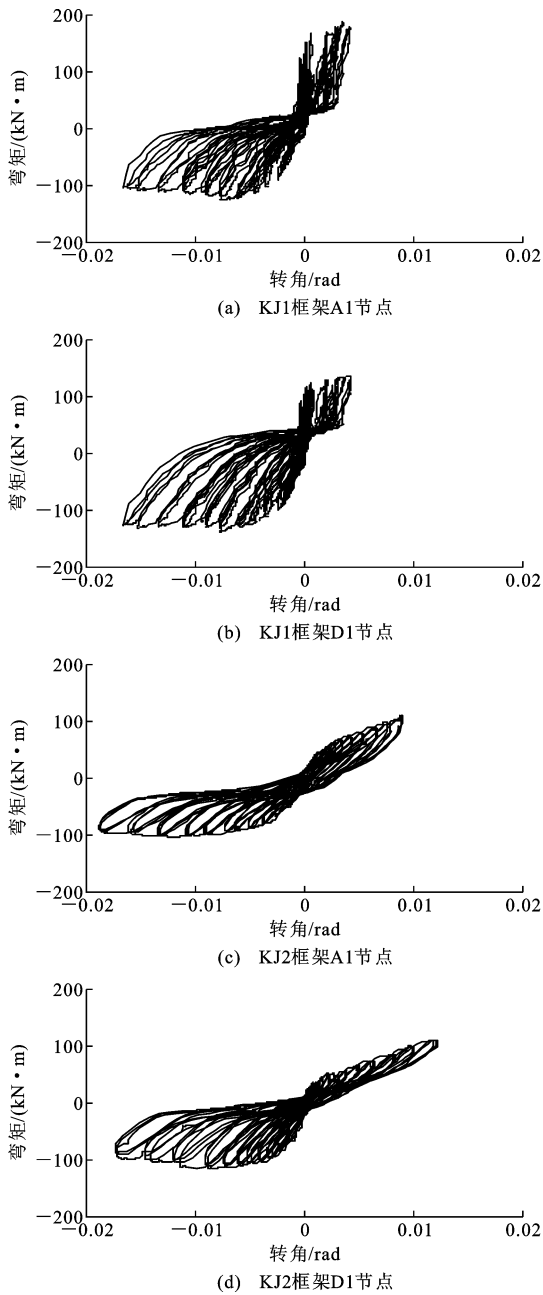


图5 典型边跨节点弯矩-转角滞回曲线

Fig. 5 Moment-rotation angle hysteresis curves of typical side-span joints

正向转动时,梁底支承牛腿和梁顶角钢共同提供的转动约束明显大于节点负向转动。这种约束差异与试验节点正负向转动时的受力性能差异吻合,也与框架梁端T型挑耳上剪切斜裂缝的单向发展现象相一致。因此KJ1框架节点和KJ2框架节点的正向转动性能差异较为复杂,可能与灌浆料的密实程度、梁顶抗剪角钢的顶紧程度均相关。

相关精细有限元分析表明:通过支承牛腿斜切角构造,减小梁底支承牛腿的水平有效支承长度[图6(b)],能够有效释放梁底支承牛腿和梁顶角钢对

梁端的转动约束<sup>[18]</sup>。优化牛腿构造后的节点模拟滞回曲线如图7所示,可以看出节点的正负向工作性能实现基本对称。

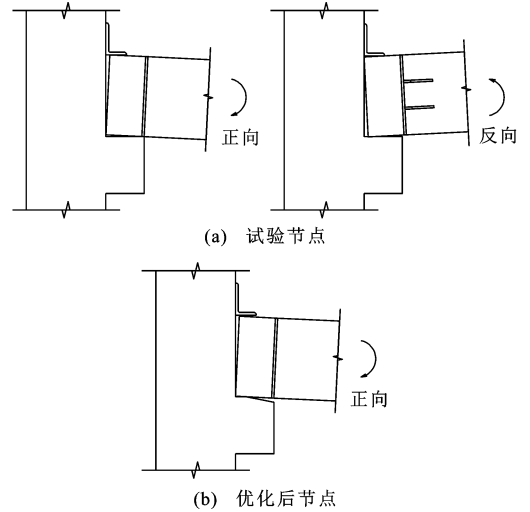


图6 装配式节点转动变形

Fig. 6 Rotation deformation of assembled joints

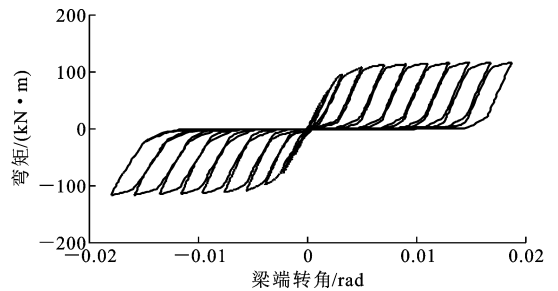


图7 优化牛腿构造后的节点模拟滞回曲线

Fig. 7 Simulated hysteresis curves of joints after optimizing corbel structure

### 2.3 节点弯矩-转角骨架曲线

将滞回曲线各次循环加载的峰值点相连得到骨架曲线,KJ1框架和KJ2框架典型边柱节点的弯矩-转角骨架曲线如图8所示。显然,节点正负向转动的骨架曲线也呈明显不对称性。

节点正向转动时,KJ1框架节点的转动弯矩发展至约80%峰值弯矩时,才观测到较明显的节点转角,且随后的节点转角发展缓慢;KJ2框架节点的初始阶段骨架曲线基本呈弹性,随后骨架曲线斜率略有降低,节点抗弯刚度有所下降。试验过程中节点正向转动时节点转动弯矩均未出现下降段,说明正向的节点转动弯矩直接受梁底支承牛腿和梁顶角钢的转动约束影响。

节点负向转动时,初始阶段骨架曲线基本呈直线,节点呈弹性工作状态;随着连接螺杆逐渐屈服,梁柱交界面出现张开闭合现象,骨架曲线斜率出现

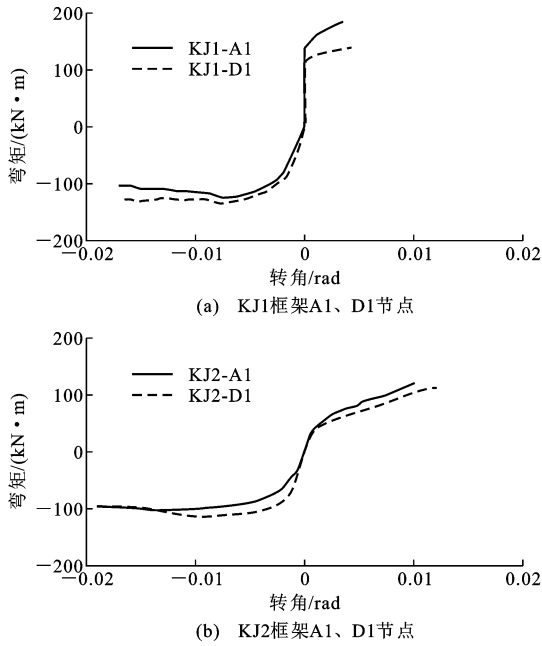


图 8 典型边柱节点弯矩-转角骨架曲线

Fig. 8 Moment-rotation angle skeleton curves of typical side column joints

明显的变化,节点抗弯刚度不断降低;节点转角接近  $1/120 \sim 1/100$  时,节点转动弯矩达到峰值;随后节点转角继续增大,节点转动弯矩略有下降。

基于通用屈服点法求解骨架曲线屈服点,得到 KJ1 框架和 KJ2 框架各节点的屈服弯矩和峰值弯矩,如表 1 所示。节点正向转动特征点弯矩的离散性明显大于节点负向转动,与节点正向转动的复杂约束条件相关。

表 1 连接节点的屈服弯矩和峰值弯矩

Table 1 Yield moment and peak moment of connection joints

节点编号	屈服弯矩 $M_y / (\text{kN} \cdot \text{m})$		峰值弯矩 $M_u / (\text{kN} \cdot \text{m})$	
	正方向	负方向	正方向	负方向
KJ1-A1	140	-108	185	-126
KJ1-D1	115	-105	138	-137
KJ2-A1	77	-80	120	-104
KJ2-D1	62	-94	112	-115

## 2.4 节点延性性能和变形能力

基于通用屈服点法求解的骨架曲线屈服点,得到 KJ1 框架和 KJ2 框架各节点负向转动时的屈服位移、破坏位移和位移延性系数,如表 2 所示,为便于与其他节点试验结果对比,破坏位移取节点转动弯矩下降至 85% 峰值弯矩时对应的特征点转角。节点正向转动的性能影响因素较为复杂,不再做延性性能和变形能力分析。

由表 2 可知,干式连接节点的位移延性系数介

表 2 连接节点的屈服位移、破坏位移和位移延性系数

Table 2 Yield displacement, failure displacement and displacement ductility coefficient of connection joints

节点编号	屈服位移/rad	破坏位移/rad	位移延性系数
KJ1-A1	1/252	1/64	3.94
KJ1-D1	1/343	1/61	5.62
KJ2-A1	1/305	1/53	5.75
KJ2-D1	1/404	1/65	6.21

于 3.94~6.21 之间。相关研究表明,现浇框架节点与装配整体式混凝土框架节点的位移延性系数为  $3.7 \sim 4.3^{[10]}$ ,由此说明该连接节点的位移延性性能良好。试验终止时,KJ1 框架节点的最大转角约为  $1/58$ ;KJ2 框架节点的最大转角约为  $1/53$ ;节点转动变形能力良好,且节点区混凝土的整体损伤程度较轻,节点整体工作状态良好。

## 3 滞回恢复力模型

在高性能装配式结构体系中连接节点的预设工作性能为连接节点抗弯先于框架梁屈服,且节点具有良好的转动变形能力<sup>[17]</sup>,以此实现预制框架梁柱的构件损伤控制。因此该类节点在工程应用时,应采用优化后的牛腿构造,有效释放梁底支承牛腿和梁顶角钢对梁端的正向转动约束,故后续按节点正向工作性能与负向基本对称进行恢复力模型研究。

### 3.1 弯矩-转角骨架曲线模型

试验现象观察和实测节点滞回曲线的分析表明,试验过程中无明显的混凝土开裂点与节点曲线转折点对应,部分无黏结螺杆连接节点的主要屈服机制在连接螺杆,可以将初始屈服点(节点受拉侧最边排螺杆屈服)和全截面屈服点(节点受拉侧螺杆全部屈服)作为骨架曲线的 2 个屈服转折点。根据试验节点负向转动骨架曲线的特征,骨架曲线有明显的峰值点和下降段,因此可将该连接节点的骨架曲线简化为带下降段的四折线形式,由此得到的弯矩-转角( $M-\theta$ )骨架曲线如图 9 所示。其中 A 点为初始屈服点,对应节点转角为  $\theta_{y1}$ ,节点弯矩为  $M_{y1}$ ;B 点为全截面屈服点,对应节点转角为  $\theta_{y2}$ ,节点弯矩为  $M_{y2}$ ;C 点为骨架曲线峰值点,对应节点转角为  $\theta_u$ ,节点峰值弯矩为  $M_u$ ;D 点为节点破坏点,对应的节点极限转角为  $\theta_t$ ;  $k_1$  为节点初始弹性段刚度;  $k_2$ 、 $k_3$ 、 $k_4$  分别为 AB 段、BC 段、CD 段节点刚度。

#### 3.1.1 初始屈服点 A 和全截面屈服点 B

初始加载时梁柱混凝土基本处于弹性工作状态,根据连接节点构造特点,在弯矩作用下受拉侧螺

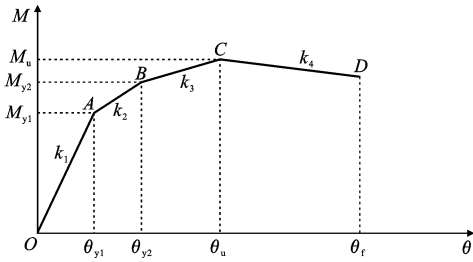


图9 连接节点弯矩-转角骨架曲线形式

Fig. 9  $M-\theta$  skeleton curve model of connection joints

杆承担拉力,受压侧混凝土接触面承担压力,其受力状态可直接基于平截面假定进行分析。

节点转动中和轴的位置可由计算受压区高度确定,为简化推导过程,将节点转动中和轴的位置离散化至各排螺杆中心。当计算受压区高度超过假定转动中和轴位置 0.5 倍螺杆间距时,相应内移更新转动中和轴,重新复核计算受压区高度和转动中和轴的关系。当受压侧的第一排螺杆中心为节点的转动中和轴时,节点受力简图如图 10 所示,其中  $F_2$ 、 $F_i$ 、 $F_n$  分别为第 2 排、第  $i$  排和第  $n$  排螺杆的轴向拉力, $n$  为螺杆总排数, $i$  为介于 2~ $n$  之间的自然数。

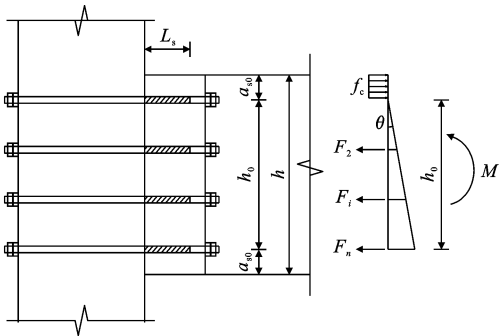


图10 连接节点受力简图

Fig. 10 Force diagram of connection joints

对应初始屈服点 A 的转角  $\theta_{y1}$  和弯矩  $M_{y1}$  的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \theta_{y1} &= \frac{f_y L_s}{E_s h_0} \\ M_{y1} &= \frac{f_y A_s h_0}{n} \sum_{i=2}^n \left( \frac{i-1}{n-1} \right)^2 + f_c b_T x \left( a_{s0} - \frac{x}{2} \right) \end{aligned} \right\} (1)$$

对应全截面屈服点 B 的转角  $\theta_{y2}$  和弯矩  $M_{y2}$  的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} \theta_{y2} &= \frac{(n-1) f_y L_s}{E_s h_0} \\ M_{y2} &= \frac{f_y A_s h_0}{2} + f_c b_T x \left( a_{s0} - \frac{x}{2} \right) \end{aligned} \right\} (2)$$

式中: $h_0$ 、 $b_T$  分别为梁截面有效高度、梁端 T 型挑耳的总宽度; $E_s$ 、 $f_y$  分别为螺杆材料的弹性模量、屈服

强度; $L_s$  为螺杆的无黏结长度; $n$  为沿梁高方向的螺杆排数; $a_{s0}$  为边排螺杆中心点至梁顶(底)的距离; $A_s$  为连接螺杆总面积; $f_c$  为梁混凝土的轴压强度标准值; $x$  为对应不同屈服状态时梁端混凝土的受压区高度。

考虑螺杆锚固滑移的影响,按均匀锚固黏结进行简化分析,螺杆达到屈服强度时沿锚固长度的总滑移变形相当于 0.5 倍锚固长度  $l_s$  的自由变形。因此在节点转角计算时,取  $0.5l_s + L_s$  对螺杆无黏结长度  $L_s$  进行修正。节点转动中和轴为其他位置时,屈服特征点转角和弯矩的详细推导详见相关文献[18]。

### 3.1.2 峰值点 C 和下降段

随着受拉侧螺杆全部屈服,连接节点的梁端受压侧混凝土的工作状态与钢筋混凝土受弯构件类似,随着节点转角增大,受压区混凝土的塑性损伤不断积累,节点转动中和轴不断下移,节点受弯承载力达到峰值。

《建筑结构抗倒塌设计标准》(T/CECS 392—2021)[19]中给出的框架梁塑性铰峰值点对应转角的建议取值为 0.015 rad。显然,试验连接节点的梁端 T 型挑耳区域的混凝土约束状态差于框架梁端部箍筋加密区,根据本文试验数据统计分析,部分无黏结螺杆连接节点的峰值点对应转角  $\theta_p$  可取 0.008 rad。

骨架曲线峰值点的极限弯矩通过对应转角  $\theta_p$  和节点屈服后强化段刚度  $k_3$  确定,骨架曲线下降段行为通过下降段刚度  $k_4$  确定。参照其他类型节点的恢复力模型研究,认为强化段刚度、下降段刚度均与初始刚度存在一个比例关系,按式(3)计算。

$$\left. \begin{aligned} k_3 &= \beta_1 k_1 \\ k_4 &= \beta_2 k_1 \end{aligned} \right\} (3)$$

式中: $\beta_1$ 、 $\beta_2$  分别为强化段刚度折减系数和下降段刚度折减系数。

根据本文试验数据进行回归分析, $\beta_1$ 、 $\beta_2$  与螺杆的等效无黏结长度有关,可按式(4)计算。

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= 0.32 - 0.714(0.5l_s + L_s) \\ \beta_2 &= 0.067 - 0.26(0.5l_s + L_s) \end{aligned} \right\} (4)$$

### 3.2 弯矩-转角骨架曲线模型验证

根据提出的部分无黏结螺杆连接节点的骨架曲线模型,对本文 4 个边柱节点进行计算,并与试验的负向骨架曲线对比,结果如图 11 所示。可以看出,本文提出的骨架曲线模型与试验结果吻合良好,说明本文提出的骨架曲线模型合理。

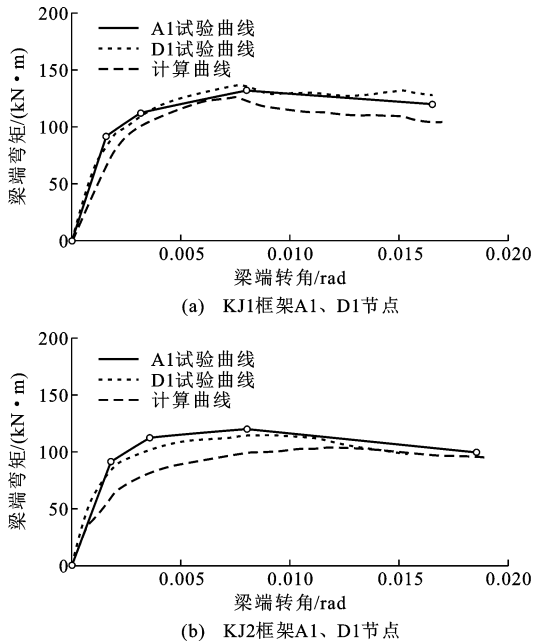


图 11 节点弯矩-转角骨架计算模型与试验曲线对比  
Fig. 11 Comparison of moment-rotation angle skeleton calculation model and test curve of joints

### 3.3 弯矩-转角滞回规则

试验结果表明,部分无黏结螺杆连接节点的滞回曲线表现出明显的转角变形滑移。由于螺杆端部采用螺母紧固连接且不施加预应力,螺杆只承担拉力而不承担压力,螺杆屈服后塑性应变处于单向增加状态。节点卸载时螺杆弹性变形首先归零,随后螺杆塑性变形维持不变,节点弯矩基本归零;当节点再加载的螺杆变形大于历史残余塑性变形时,螺杆再次弹性受力,再加载刚度与卸载刚度基本一致,且节点卸载刚度无明显退化,因此该类节点的滞回规则接近于剪切滑移滞回模型。

滞回曲线表明,达到屈服弯矩后节点卸载过程可大致分为 3 部分,分别为垂直卸载段、常规卸载段和水平滑移段。其中垂直卸载段对应的弯矩数值基本固定,判断为预制梁端与柱端各接触面的摩擦力共同组成的转动抵抗弯矩,根据本文试验结果,垂直卸载段对应的抵抗弯矩约为 15% 的节点峰值弯矩。常规卸载段则为螺杆弹性应变卸载过程,该区段的卸载刚度  $k_s$  可取全截面屈服点  $B$  对应的割线刚度。节点抵抗弯矩在常规卸载段归零,随后转角沿水平滑移归零。

综上所述,该类节点的滞回规则属于剪切滑移模型的一种变种,具体滞回规则如图 12 所示。图 12 中各折点的数字表示滞回规则的路径,从 0 开始至 34 结束。节点屈服前,节点处于弹性状态,加载

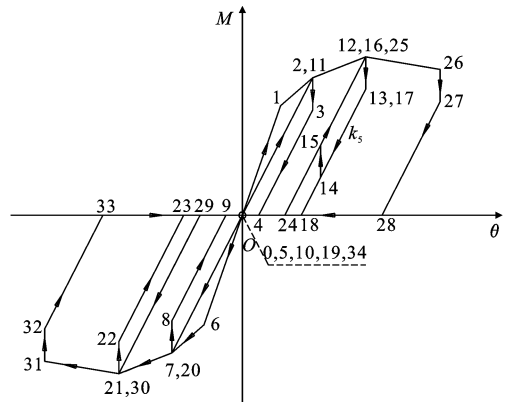


图 12 连接节点弯矩-转角滞回模型  
Fig. 12 Moment-rotation angle hysteretic model of connection joints

和卸载均沿着弹性段路径  $0 \rightarrow 1$  和  $5 \rightarrow 6$  行走;节点屈服后,卸载为三段式路径,如路径  $2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5$  和  $12 \rightarrow 13 \rightarrow 14 \rightarrow 15$ ;屈服后卸载归零的再加载,首先按照两段式路径加载至历史最大转角,然后沿骨架曲线继续加载,再加载刚度与卸载刚度一致,如路径  $10 \rightarrow 11 \rightarrow 12$  和  $0 \rightarrow 24 \rightarrow 25 \rightarrow 26$ ;屈服后卸载未归零再加载,则按“垂直再加载段+常规再加载段”路径加载至历史最大转角,如路径  $13 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16$ 。根据前述精细有限元分析结果可知,合理设计时该类节点的正负向滞回规则基本对称。

### 3.4 弯矩-转角滞回规则验证

采用文中提出的滞回模型对试验框架边柱节点进行计算,并与试验滞回曲线进行比较,结果如图 13 所示。可以看出,本文提出的滞回模型计算结果与边柱节点负向转动的试验结果总体吻合良好,验证了该模型的准确性。因此对于支承牛腿构造优化后,实现正负向工作性能基本对称的部分无黏结螺杆连接节点,可以采用本文建议的恢复力模型进行弹塑性模拟分析。

## 4 结语

(1)部分无黏结螺杆连接节点在试验过程中表现出良好的往复转动变形能力,且节点区混凝土的整体损伤程度较轻,节点的主要屈服机制为连接螺杆,节点整体工作状态良好。

(2)由于梁底支承牛腿和梁顶角钢共同组成的复杂转动约束影响,该连接节点正负向转动的滞回曲线呈明显的不对称性。连接节点的滞回曲线捏拢明显,且表现出显著的转角变形滑移现象,该类型节点的耗能能力较差,适用于具有独立耗能系统的装配式结构体系。

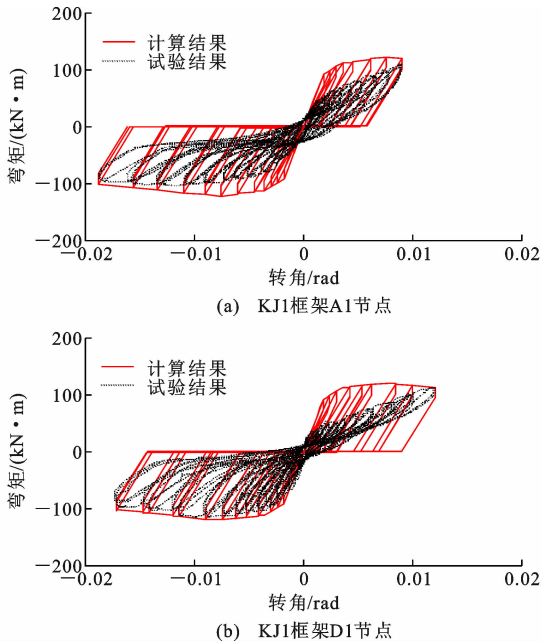


图 13 连接节点恢复力滞回模型计算结果与试验结果的对比

Fig. 13 Comparison of hysteretic model calculation results and test results of restoring force of connection joints

(3)部分无黏结螺杆连接节点的位移延性系数介于 3.94~6.21,位移延性性能优于现浇框架节点与装配整体式混凝土框架节点。试验终止时,KJ1框架和 KJ2 框架节点的最大转角分别约为 1/58 和 1/53,节点转动变形能力良好。

(4)根据部分无黏结螺杆连接节点的试验结果,本文提出了以初始屈服点、全截面屈服点、峰值点和下降段为特征点的四折线形式骨架曲线,并给出了基于试验参数的特征点计算方法,通过对比表明理论骨架曲线与试验骨架曲线吻合良好。

(5)结合部分无黏结螺杆连接节点的受力机理分析和试验滞回曲线特征总结,本文提出了考虑加载历史的变种剪切滑移滞回模型,确定了详细的滞回规则,与骨架曲线模型构成了完整的连接节点恢复力模型。

(6)连接节点恢复力滞回模型计算结果与试验结果对比表明,本文提出的恢复力模型可较好地反映部分无黏结螺杆连接节点的滞回性能,可以用于该类型节点的弹塑性模拟分析。

## 参考文献:

## References:

[1] 周德恒,李爱群,贾洪,等. 预制钢筋混凝土框架结构抗震性能研究进展(I):节点性能研究[J]. 工业建筑,2014,44(6):95-100,121.

ZHOU Deheng, LI Aiqun, JIA Hong, et al. Progress of investigation on seismic behavior of precast concrete frame structures ( I ): study of joint property [J]. Industrial Construction, 2014, 44 ( 6 ): 95-100, 121.

[2] 吴刚,冯德成. 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,2018,39(2):1-16.  
WU Gang, FENG Decheng. Research progress on fundamental performance of precast concrete frame beam-to-column connections[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(2):1-16.

[3] NAKAKI S D, STANTON J F, SRITHARAN S S. An overview of the PRESSS five-story precast test building[J]. PCI Journal, 1999, 44(2):26-39.

[4] 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.

[5] ERSOY U, TANKUT T. Precast concrete members with welded plate connections under reversed cyclic loading[J]. PCI Journal, 1993, 38(4):94-100.

[6] MORGEN B G, KURAMA Y C. A friction damper for post-tensioned precast concrete moment frames [J]. PCI Journal, 2004, 49(4):112-133.

[7] ERTAS O, OZDEN S, OZTURAN T. Ductile connections in precast concrete moment resisting frames[J]. PCI Journal, 2006, 51(3):66-76.

[8] PARASTESH H, HAJIRASOULIHA I, RAMEZANI R. A new ductile moment-resisting connection for precast concrete frames in seismic regions: an experimental investigation [J]. Engineering Structures, 2014, 70:144-157.

[9] GUAN D Z, GUO Z X, XIAO Q D, et al. Experimental study of a new beam-to-column connection for precast concrete frames under reversal cyclic loading[J]. Advances in Structural Engineering, 2016, 19(3):529-545.

[10] 吴从晓,周云,赖伟山,等. 现浇与预制装配式混凝土框架节点抗震性能试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3):60-66.  
WU Congxiao, ZHOU Yun, LAI Weishan, et al. Experiment on seismic performance of cast-in-situ and prefabricated concrete frame structure joints[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3):60-66.

[11] 吴从晓,赖伟山,周云,等. 新型预制装配式消能减震混凝土框架节点抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2015, 48(9):23-30.  
WU Congxiao, LAI Weishan, ZHOU Yun, et al. Ex-

- perimental study on seismic behaviors of new energy-dissipative prefabricated concrete frame structure joints[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2015, 48(9):23-30.
- [12] GUERRERO H, RODRIGUEZ V, ESCOBAR J A, et al. Experimental tests of precast reinforced concrete beam-column connections[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2019, 125:105743.
- [13] YE M, JIANG J, CHEN H M, et al. Seismic behavior of an innovative hybrid beam-column connection for precast concrete structures[J]. *Engineering Structures*, 2021, 227:111436.
- [14] CAI X N, PAN Z F, ZHU Y Z, 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.
- [15] 丁克伟, 刘建华, 马 巍, 等. 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*, 2021, 54(4): 1-7, 56.  
DING Kewei, LIU Jianhua, MA Wei, et al. Experimental study on seismic performances of a new type of fabricated semi-rigid beam-to-column connection[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2021, 54(4): 1-7, 56.
- [16] 谢鲁齐, 吴 京, 章锦洋, 等. 基于可更换耗能连接的装配式混凝土梁柱节点力学性能试验研究[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(1):1-8.  
XIE Luqi, WU Jing, ZHANG Jinyang, et al. Experimental study on mechanical property of precast concrete frame with replaceable energy dissipation connectors[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2021, 51(1):1-8.
- [17] 肖从真, 李建辉, 程卫红, 等. 高强混凝土装配式高层框架结构体系研究[J]. *建筑结构*, 2021, 51(17): 54-58.  
XIAO Congzhen, LI Jianhui, CHENG Weihong, et al. Research on assembled high-rise frame structural system with high-strength concrete[J]. *Building Structure*, 2021, 51(17): 54-58.
- [18] 程卫红, 肖从真, 田春雨, 等. 梁柱部分无粘结螺杆连接装配式节点的受力机理分析研究[J]. *工程抗震与改造加固*, 2022, 44(2): 1-10.  
CHENG Weihong, XIAO Congzhen, TIAN Chunyu, et al. Analysis and research on the performance mechanism of beam-to-column assembled joint connected with partially unbounded steel bar[J]. *Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting*, 2022, 44(2): 1-10.
- [19] 建筑结构抗倒塌设计标准: T/CECS 392—2021[S]. 北京: 中国计划出版社, 2021.  
Standard for anti-collapse design of building structures: T/CECS 392—2021 [S]. Beijing: China Planning Press, 2021.