

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.019

# 钢梁贯通型装配式混凝土框架梁柱 节点恢复力模型研究

陈丽华<sup>1,2</sup>, 张天奇<sup>1,2</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 土木工程结构与材料安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**为研究装配式混凝土干连接节点在地震作用下的动力特性,文章设计制作了6个新型装配式节点,通过改变面承板厚度、钢环箍厚度、面承板宽度和钢梁翼缘厚度进行试验,研究不同变量对节点抗震性能的影响。基于试验结果及加载过程中的试验现象,结合三折线模型对数据进行处理,拟合出计算骨架曲线,并在此基础上,结合滞回规则拟合出计算滞回曲线。将拟合所得计算骨架曲线和计算滞回曲线与试验所得曲线进行对比,吻合度均较好。结果表明:根据三折线模型拟合出的计算骨架曲线可以较好地反映该节点的受力特征;根据滞回规则得到的计算滞回曲线可以有效反映该节点的滞回性能。该恢复力模型可为该类装配式节点的抗震性能分析提供参考。

**关键词:**装配式节点;贯通钢梁;三折线模型;滞回规则;恢复力模型

**中图分类号:**TU375.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)10-1419-08

## Research on restoring force model of steel beam-through prefabricated concrete frame beam column joint

CHEN Lihua<sup>1,2</sup>, ZHANG Tianqi<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Key Laboratory of Civil Engineering Structures and Materials, Hefei 230009, China)

**Abstract:** In order to study the dynamic characteristics of prefabricated concrete dry-connected joints under earthquake, six new prefabricated joints are designed and manufactured in this paper. The influence of different variables on the seismic performance of the joint is studied by changing the thickness of the surface bearing plate, the thickness of the steel hoop, the width of the surface bearing plate and the thickness of the steel beam flange. Based on the test results and the test phenomena during the loading process, the data are processed and fitted to calculate the skeleton curve by combining with the tri-line model. On this basis, the hysteretic curve is calculated according to the hysteretic rule. The calculated skeleton curve and hysteretic curve obtained by fitting are compared with the curve obtained by test, and the coincidence is good. It shows that the calculated skeleton curve fitted by the tri-line model can well reflect the stress characteristics of the joint; the calculated hysteretic curve obtained according to the hysteretic rule can effectively reflect the hysteretic performance of the joint. The restoring force model proposed in this paper can be used as a reference for the seismic performance analysis of this type of prefabricated joints.

**Key words:** prefabricated joint; steel beam-through; tri-line model; hysteretic rule; restoring force model

收稿日期:2023-02-23;修回日期:2023-04-14

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2017YFC0703606)

作者简介:陈丽华(1972—),女,安徽亳州人,博士,合肥工业大学教授,硕士生导师。

## 0 引言

改革开放以来,全国人民生活水平不断提高,在住房方面人们更加注重绿色环保。装配式建筑在保证建筑结构质量的前提下,不仅能节约社会劳动力、缩短施工周期,而且环保高效,符合绿色施工的可持续发展理念。装配式建筑最大的特点是构件在工厂预加工,然后将成品构件拉到施工现场完成组装,因此预制构件之间的连接组装尤为重要。

从过往的装配式建筑在地震中的损害情况来看,预制的混凝土梁和柱在地震中不会发生较严重损坏,建筑结构的失效往往是由于连接节点处的破坏所导致<sup>[1-2]</sup>,故合理有效的节点连接方式对装配式建筑的抗震性能有很大影响。装配式混凝土构件之间的连接方式分为湿连接和干连接<sup>[3]</sup>,采用湿连接的装配式结构整体性较好,但依旧需要在现场完成灌浆、浇筑等操作。采用干连接的装配式结构往往只需在现场完成焊接或螺栓连接等操作,施工便利,周期短。因此开发一种兼顾良好抗震性能和短施工周期的干连接节点是一项重要课题。

恢复力模型的研究对于装配式节点有重要意义,可为其抗震性能分析提供理论依据。建立精确的恢复力模型十分繁琐,国内外学者提出了简化的恢复力模型(如双折线模型<sup>[4]</sup>、三折线模型<sup>[5-6]</sup>和四折线模型<sup>[7]</sup>等),并对不同形式的梁柱节点进行了研究。文献[8]制作 12 榀钢骨混凝土柱-混凝土梁节点进行试验,通过回归分析建立该节点形式的恢复力模型;文献[9]设计研究 18 个型钢混凝土柱框架节点的抗震性能,其中平面节点和空间节点各 9 个,根据试验结果拟合出三折线骨架曲线模型,进一步建立恢复力模型;文献[10]通过低周往复试验研究 3 个异形柱 T 形节点,通过对试验数据的分析处理建立该节点形式的恢复力模型;文献[11]设计 8 个高强混凝土高强钢筋的空间梁柱节点,通过试验研究其抗震性能,根据试验数据拟合出恢复力模型,与试验结果对比较为吻合。

本文共完成 6 个面承板与钢环箍结合形式的钢梁贯通型装配式混凝土框架梁柱节点试验,基于试验结果,进一步探究其在地震作用下全过程的抗震性能,建立该装配式节点的恢复力模型,包括骨架曲线模型和滞回曲线模型。对试验所得数据进行无量纲化处理,提取出各试件骨架曲线无

量纲化后的散点数据,根据三折线模型分段拟合得到计算骨架曲线。拟合出各试件正负向加载卸载过程中的刚度退化规律,根据滞回规则,在计算骨架曲线的基础上绘制计算滞回曲线,完成恢复力模型的建立,以为该类装配式节点的抗震性能分析提供理论参考。

## 1 试验概况

### 1.1 试件设计

试件的节点区钢结构主要由贯通钢梁、面承板、钢环箍、横向短梁和栓钉构成,通过焊接连接,由于钢环箍的存在,栓钉的主要作用为加强节点处的连接。预制梁与预制柱之间的连接方式为栓焊连接,节点区钢结构示意、具体截面尺寸及构件配筋如图 1 所示。

本文设计完成了 6 个试验构件,主要研究面承板厚度、钢环箍厚度、面承板宽度及钢梁翼缘厚度对新型装配式节点抗震性能的影响,具体试件参数见表 1 所列。

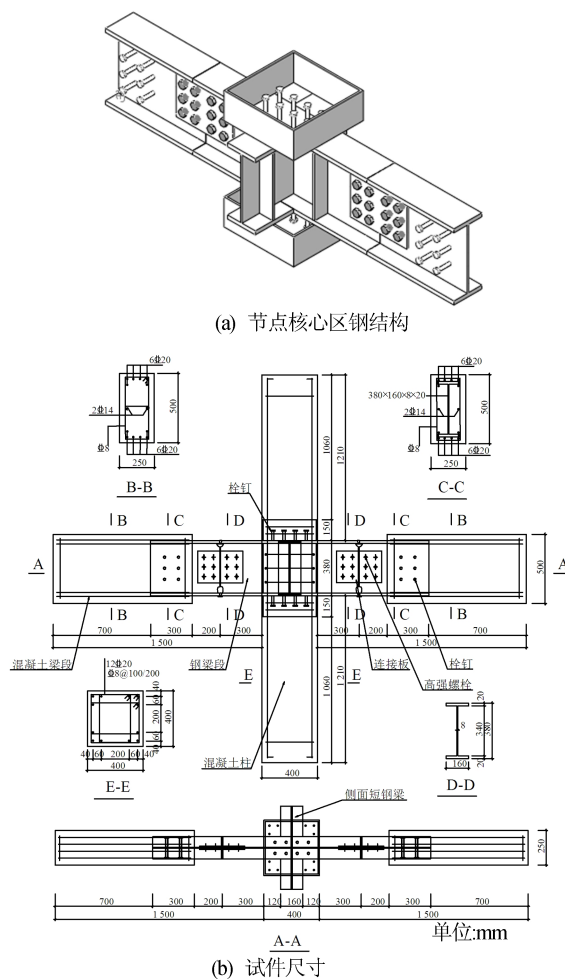


图 1 节点示意图及其尺寸

表 1 节点试件参数

试件编号	面承板尺寸 ( $b \times h \times t$ )	钢环箍尺寸 ( $b \times h \times t$ )	柱截面 ( $B \times H$ )	钢梁截面 ( $h \times b \times t_w \times t_f$ )
J1-1	76×340×10	400×400×10	400×400	380×160×8×20
J1-2	76×340×14	400×400×14	400×400	380×160×8×20
J1-3	76×340×18	400×400×18	400×400	380×160×8×20
J1-4	96×340×14	400×400×14	400×400	380×160×8×20
J1-5	116×340×14	400×400×14	400×400	380×160×8×20
J1-6	76×340×14	400×400×14	400×400	380×160×8×10

注: $b, h, t, B, H, t_w, t_f$  单位均为 mm。

## 1.2 材性试验

试件所采用的钢材强度均为 Q345, 钢筋强度均为 HRB400, 材料性能试验依据规范《金属材料拉伸试验》<sup>[12]</sup> 进行。尺寸不同的钢板和钢筋均取标准试样进行 3 次试验, 材料性能取 3 次试验的平均值, 弹性模量为试样在拉伸过程中处于弹性变形阶段时应力与相应应变的比值, 测得数值大

小为  $2.06 \times 10^5$  MPa, 其余指标见表 2 所列。

试件所采用的混凝土强度均为 C40, 制作构件时预留 3 个边长为 100 mm 的混凝土立方体试块, 根据规范《普通混凝土力学性能试验方法标准》<sup>[13]</sup> 中的要求进行养护和强度测试, 弹性模量根据《混凝土结构设计规范》<sup>[14]</sup> 计算所得, 大小为  $2.98 \times 10^4$  MPa, 其余参数见表 3 所列。

表 2 钢材性能试验结果

试件	厚度/mm	屈服强度 $f_y$ /MPa	极限强度 $f_u$ /MPa	$f_u/f_y$	伸长率
钢环箍 1	10	346	490	1.416	0.32
钢环箍 2	14	402	576	1.433	0.23
钢环箍 3	18	385	516	1.340	0.26
梁翼缘板 1	10	472	613	1.299	0.26
梁翼缘板 2	20	401	561	1.400	0.26
梁腹板	8	466	595	1.277	0.28
纵筋	20	505	653	1.293	0.34
箍筋	8	416	591	1.421	0.25

表 3 混凝土材性试验结果

试块 编号	抗压强度实测值 $f_{cu,0}$ /MPa	抗压强度标准值 $f_{cu,k}$ /MPa	轴心抗压强度标准值 $f_{ck}$ /MPa
1	47.41	45.04	30.12
2	47.52	45.14	30.19
3	47.40	45.03	30.12
均值	47.44	45.07	30.14

## 1.3 加载装置及加载制度

试验于合肥工业大学结构实验室进行, 试验加载装置如图 2 所示。为更好地研究节点核心区抗剪, 试验根据规范《建筑抗震试验规程》<sup>[15]</sup> 中所提供的加载方式, 采用梁端加载。试件底部铰接在一固定箱型钢梁上, 顶端通过 150 t 千斤顶来施加轴向压力以保证轴压比恒为 0.2, 梁端低周反复荷载由倒置在反力架上的 2 个液压伺服加载装置提供。加载制度采用美国混凝土协会中的控制位移角法, 位移角为加载点在梁端的位移与其距柱中心点的距离比。



图 2 试验加载装置图

在保证柱顶轴向压力保持不变的前提下,先进行预加载,确保加载装置无故障。然后进行正式加载,位移角按照 0.20%,0.25%,0.35%,0.50%,0.75%,1.00%,1.50%,2.00%,2.50%,3.50%,...,85.00%进行加载,每级循环 3 次,在试件的承载力下降到峰值承载力的 85.00%时停止加载,视其为极限荷载。

## 2 恢复力模型的建立

### 2.1 骨架曲线模型

试件主体结构为装配式混凝土框架,骨架曲线模型需根据该特征进行合理选择,以确保模型的准确性。双折线模型本身具有一定的局限性,无法表达强度和刚度的退化,因此该模型并不适合多循环加载次数的试件,一般常用于纯钢框架结构。三折线模型可以表达出由于混凝土开裂或钢材损伤导致的强度和刚度的降低,具有清晰的屈服点,因此本文试件的骨架曲线考虑采用三折线模型。

通过拟静力试验得到 6 个试验构件的骨架曲线如图 3 所示。由于试件的循环加载级数不同,为得到统一的计算公式,将试件的骨架曲线无量纲化处理。图 3 中:骨架曲线横坐标采用  $\Delta/\Delta_m$ ,  $\Delta_m$  表示峰值位移;纵坐标采用  $P/P_m$ ,  $P_m$  表示峰值荷载。

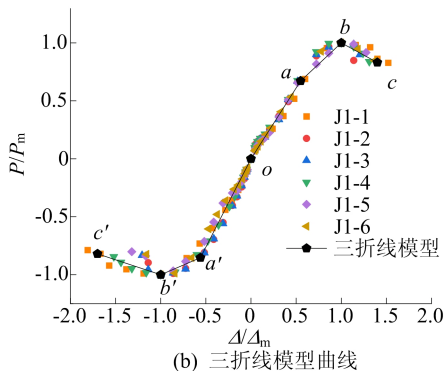
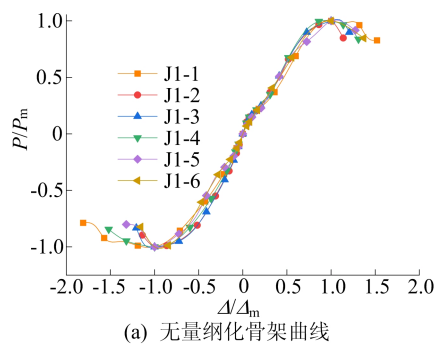


图 3 骨架曲线和三折线模型曲线

根据骨架曲线的变化趋势,结合试验现象及三折线模型,将其分为 3 个阶段。

1) 弹性阶段。该阶段节点核心区混凝土部分产生了细微裂缝,但试件始终处于弹性状态,骨架曲线的斜率保持不变,刚度未发生退化,即为初始刚度。

2) 强化阶段。该阶段试件开始屈服,节点核心区混凝土部分裂缝逐渐增多并且宽度增加,骨架曲线斜率降低,刚度显著退化。

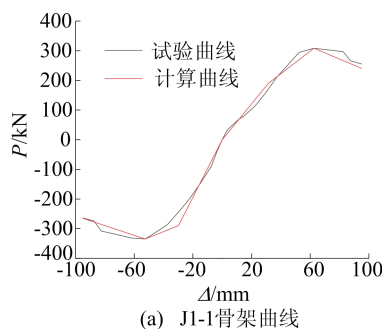
3) 退化阶段。该阶段为试件达到峰值荷载之后,节点核心区混凝土部分开裂并逐渐脱落,承载力开始下降直至降为峰值荷载的 85%时试件破坏。

由图 3b 可知,骨架曲线的三折线模型由分段拟合所得,各段数据分别为试件试验骨架曲线中弹性、强化和退化阶段的所有数据,即各段的端点处为对应特征点。 $a$  点和  $a'$  点表示正向和负向的屈服点; $b$  点和  $b'$  点表示正向和负向的峰值点; $c$  点和  $c'$  点表示正向和负向的极限点,将各试件的峰值荷载及对应峰值位移分别代入到模型中即可得到各特征点的具体数值。各阶段的回归方程和斜率见表 4 所列。

表 4 骨架曲线模型回归方程

阶段	回归方程	斜率
$oa$	$P/P_m^+ = 1.222\Delta/\Delta_m^+$	1.222 0
$ab$	$P/P_m^+ = 0.728 4\Delta/\Delta_m^+ + 0.271 6$	0.728 4
$bc$	$P/P_m^+ = -0.421 3\Delta/\Delta_m^+ + 1.421 3$	-0.421 3
$oa'$	$P/P_m^- = 1.523 2\Delta/\Delta_m^-$	1.523 2
$a'b'$	$P/P_m^- = 0.334 1\Delta/\Delta_m^- - 0.665 9$	0.334 1
$b'c'$	$P/P_m^- = -0.257 1\Delta/\Delta_m^- - 1.257 1$	-0.257 1

根据拟合出的骨架曲线模型,将每个试件的峰值荷载及对应峰值位移回代即可得到计算骨架曲线,如图 4 所示。由图 4 可知,试验与计算所得骨架曲线吻合度较高,能够反映出位移与荷载之间的关系,同时也验证了三折线模型对于本文装配式节点的适用性。



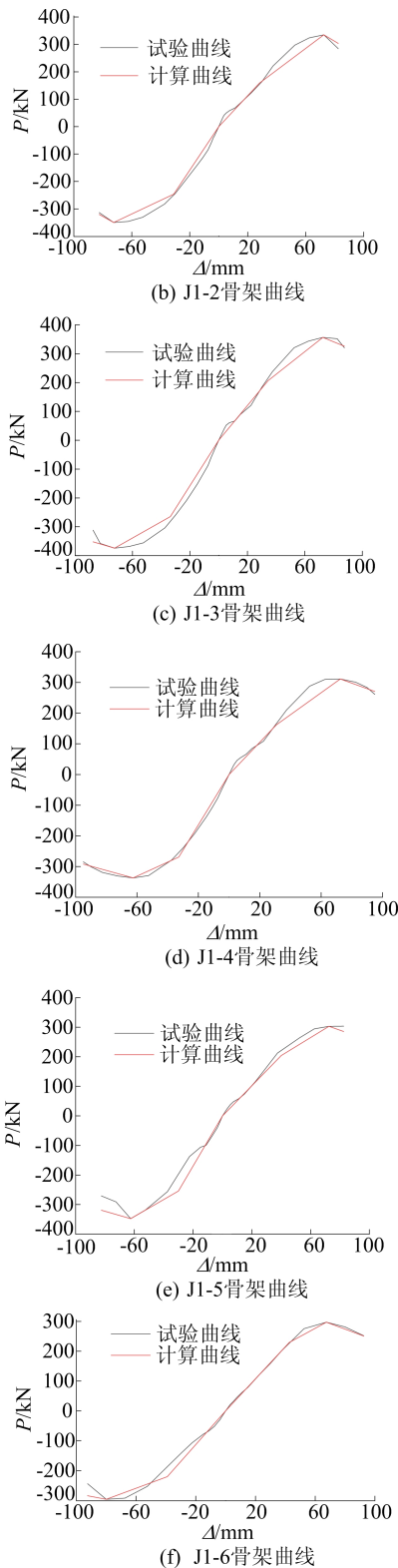


图 4 骨架曲线的试验与计算结果对比

### 2.2 刚度退化规律

从图 4 可以看出,随着试验加载位移的不断增加,试件刚度会发生退化。可以通过  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  分别表示试件正向卸载、反向加载、反向卸载和正向加载时的刚度,以此观察试件在不同阶段的刚度变化规律,如图 5 所示。 $K_0$  表示试件

的初始刚度,由于试件在加载初期处于弹性阶段,刚度几乎不发生改变,因此将  $K_0$  视为常数。

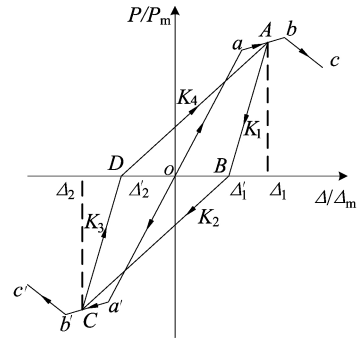


图 5 刚度退化规律

1) 正向卸载刚度  $K_1$ 。同循环的滞回环上由正向卸载点卸载至荷载为 0 的点之间连线的斜率。对试件加载过程中所有循环的数据进行回归分析,得到  $K_1/K_0^+$  与  $\Delta_1/\Delta_m^+$  的关系,如图 6a 所示。其中: $K_0^+$  表示试件正向加载时的初始刚度; $\Delta_1$  表示正向卸载点对应的位移; $\Delta_m^+$  表示正向峰值点对应的位移。正向卸载刚度  $K_1$  的循环方程如下:

$$K_1/K_0^+ = -0.1493 \ln(\Delta_1/\Delta_m^+ + 0.0088) + 0.6573 \quad (1)$$

2) 反向加载刚度  $K_2$ 。同循环的滞回环上由正向卸载至荷载为 0 的点加载至反向卸载点之间连线的斜率。对试件加载过程中所有循环的数据进行回归分析,得到  $K_2/K_0^-$  与  $\Delta_1'/\Delta_m^+$  的关系,如图 6b 所示。其中: $K_0^-$  表示试件反向加载时的初始刚度; $\Delta_1'$  表示正向卸载至荷载为 0 时的残余位移。反向加载刚度  $K_2$  的循环方程如下:

$$K_2/K_0^- = -0.2451 \ln(\Delta_1'/\Delta_m^+ + 0.0304) + 0.1106 \quad (2)$$

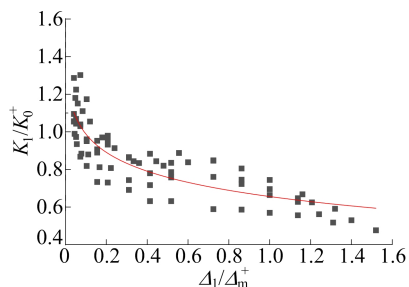
3) 反向卸载刚度  $K_3$ 。同循环的滞回环上由反向卸载点卸载至荷载为 0 的点之间连线的斜率。对试件加载过程中所有循环的数据进行回归分析,得到  $K_3/K_0^-$  与  $\Delta_2/\Delta_m^-$  的关系,如图 6c 所示。其中: $\Delta_2$  表示反向卸载点对应的位移; $\Delta_m^-$  表示反向峰值点对应的位移。反向卸载刚度  $K_3$  的循环方程如下:

$$K_3/K_0^- = 1.8967 \times \exp\left(-\frac{\Delta_2/\Delta_m^-}{4.1537}\right) - 0.7849 \quad (3)$$

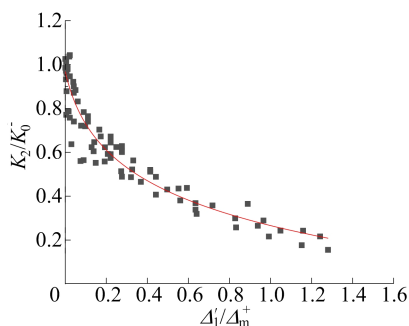
4) 正向加载刚度  $K_4$ 。同循环的滞回环上由反向卸载至荷载为 0 的点加载至正向卸载点之间连线的斜率。对试件加载过程中所有循环的数据

进行回归分析,得到  $K_4/K_0^+$  与  $\Delta_2'/\Delta_m^-$  的关系,如图 6d 所示。其中,  $\Delta_2'$  表示反向卸载至荷载为 0 时的残余位移。正向加载刚度  $K_4$  的循环方程如下:

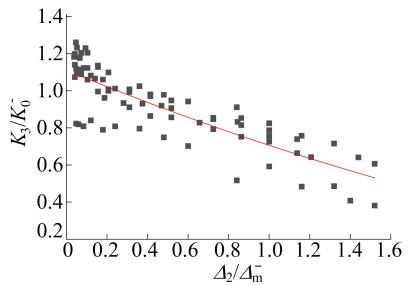
$$K_4/K_0^+ = -0.0955 \ln(\Delta_2'/\Delta_m^- - 0.0001) + 0.2362 \quad (4)$$



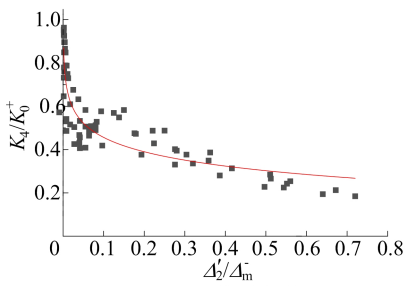
(a)  $K_1$ 退化规律



(b)  $K_2$ 退化规律



(c)  $K_3$ 退化规律



(d)  $K_4$ 退化规律

图 6 刚度退化拟合曲线

### 2.3 滞回曲线模型

根据试验数据拟合出的骨架曲线模型和刚度退化规律,在此基础上提出适用于本文钢梁贯通型装配式混凝土框架梁柱节点的滞回曲线模型,其滞回规则如图 7 所示。

从图 7 可以看出:当在屈服点  $a$  之前卸载时,加卸载路径沿线段  $aoa'$  进行,刚度为初始刚度  $K_0$  保持不变;当在屈服点  $a$  之后但未到峰值点  $b$  之间卸载时,正向卸载路径沿线段  $AB$  进行,  $B$  点为其与横轴的交点,卸载刚度为  $K_1$ ;由荷载为 0 的  $B$  点反向加载时,加载路径沿线段  $BC$  进行,  $C$  点为其与骨架曲线的交点,加载刚度为  $K_2$ ;由  $C$  点反向卸载时,卸载路径沿线段  $CD$  进行,  $D$  点为其与横轴的交点,卸载刚度为  $K_3$ ;由荷载为 0 的  $D$  点正向加载时,加载路径沿线段  $DA$  进行,  $A$  点为其与骨架曲线的交点,即为初始卸载点,加载刚度为  $K_4$ 。

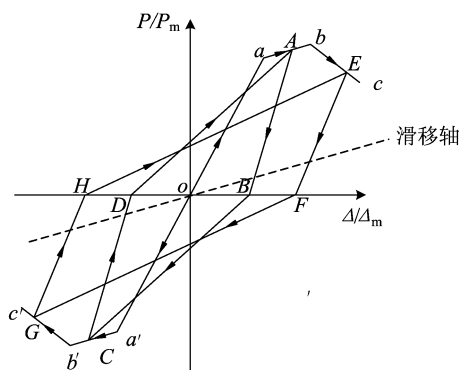


图 7 滞回规则

当在峰值点  $b$  之后卸载时,其滞回规则与在  $a$  点与  $b$  点之间卸载时相同,但是加卸载路径由  $ABCD$  变为  $EFGH$ 。在此基础上,加入滑移轴以考虑捏缩效应,捏缩点为滑移轴与卸载段的交点。滑移轴为通过原点的直线,斜率为  $(1-\lambda)$  倍的初始刚度,  $\lambda$  为平均捏缩系数,其值取为试件各滞回环面积  $S_i$  与对应菱形面积(无捏缩)  $S_i'$  总和的比值,计算公式如下:

$$\lambda = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{\sum_{i=1}^N S_i'} \quad (5)$$

### 3 恢复力模型验证

在图 4 得出的计算骨架曲线基础上,将试件各级加载位移回代到拟合所得的正负向加卸载刚度退化曲线中,所得数值再根据滞回规则,代入到各试件的计算骨架曲线中,以此绘制出试件的计算滞回曲线。试件的试验滞回曲线和计算滞回曲线对比如图 8 所示。由图 8 可知,试验与计算所得滞回曲线基本吻合,个别试件由于卸载段所用刚度退化拟合散点较为离散,导致计算滞回曲线的卸载刚度与试验滞回曲线有少许差异,但总体来说提出的恢复力模型可以较好地模拟出本文装配式节点的滞回性能。

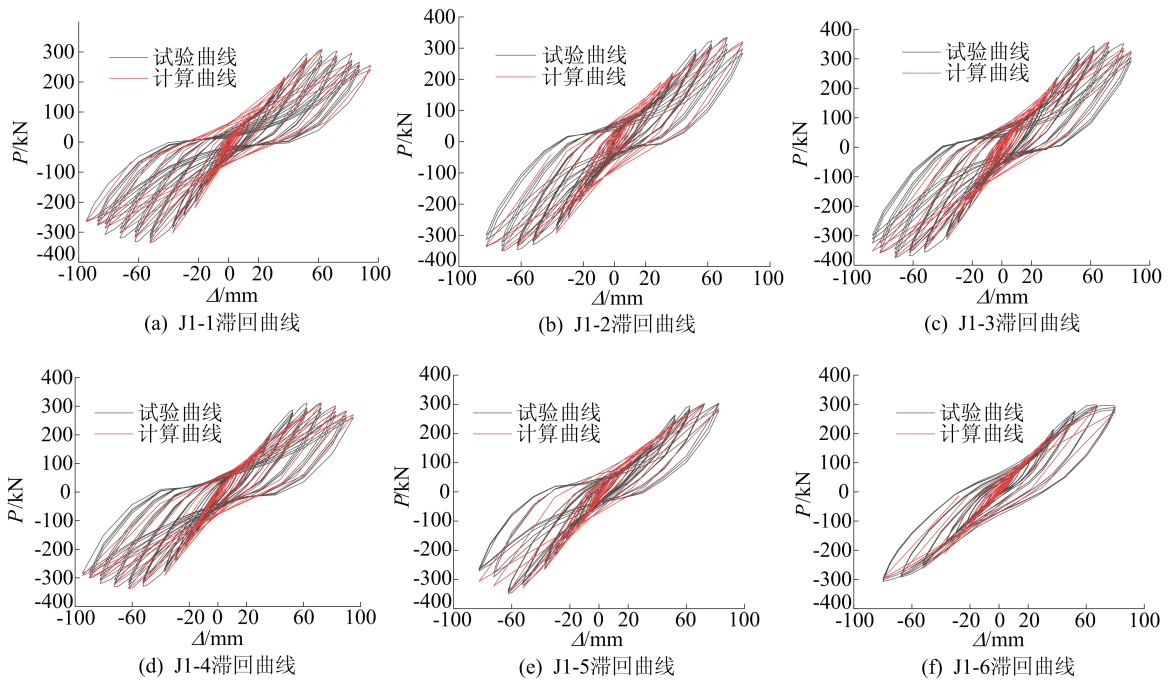


图 8 滞回曲线的试验与计算结果对比

为检验本文恢复力模型的通用性,本文将采用内置方钢管形式的钢梁贯通型装配式混凝土框架梁柱节点的试验数据进行验证,该节点形式如图 9 所示。

除节点形式不同,材料强度及试件中混凝土梁柱部件尺寸及配筋均与本文节点相同,该节点的试件参数见表 5 所列。

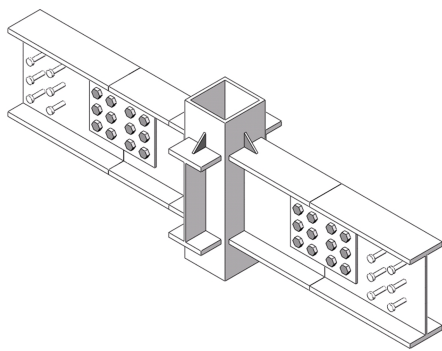


图 9 内置方钢管节点示意图

表 5 内置方钢管节点试件参数

试件编号	内置方钢管尺寸 ( $b \times h \times t$ )	钢梁截面尺寸 ( $h \times b \times t_w \times t_f$ )
J2-1	200×200×10	380×160×8×20
J2-2	200×200×14	380×160×8×20
J2-3	200×200×18	380×160×8×20
J2-4	200×200×18	380×160×8×10

注: $h$ 、 $b$ 、 $t$ 、 $t_w$ 、 $t_f$  单位均为 mm。

运用本文提出的恢复力模型得到该节点形式的计算滞回曲线,并与试验滞回曲线进行对比,结果如图 10 所示。

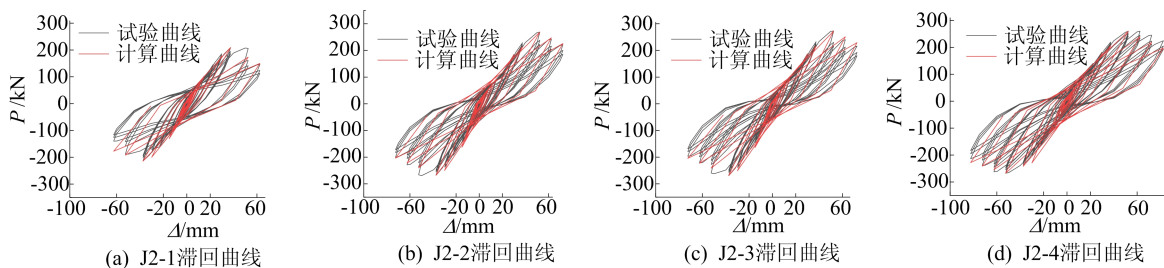


图 10 内置方钢管节点滞回曲线的试验与计算结果

从图 10 可以看出,试验滞回曲线与计算滞回

曲线吻合程度较高,即本文提出的恢复力模型对

钢梁贯通型装配式混凝土框架梁柱节点具有一定的通用性。

#### 4 结 论

1) 将新型钢梁贯通型装配式节点 6 个试件的骨架曲线无量纲化处理,结合试验现象可以将其分为 3 个阶段,分别为仅节点核心区混凝土出现细微裂缝的弹性阶段、试件开始屈服的强化阶段和到达峰值荷载后节点核心区混凝土破坏脱落的退化阶段。

2) 根据无量纲骨架曲线所划分的 3 个阶段,结合三折线模型对其进行分段拟合,拟合结果较好,与试验吻合度高。

3) 根据试验数据分别拟合出试件在正负向加卸载过程中的刚度退化方程,在由三折线模型拟合出的计算骨架曲线基础上,结合滞回规则,拟合出计算滞回曲线。与试验滞回曲线进行比较,吻合程度较高,即本文恢复力模型可为该类装配式节点的抗震性能分析提供理论参考。

4) 采用另一种钢梁贯通型装配式节点对本文恢复力模型进行验证,所得计算滞回曲线与试验滞回曲线吻合程度较高,即本文恢复力模型对该类节点具有一定的通用性。

#### [参 考 文 献]

[1] IVERSON J K, HAWKINS N M. Performance of precast/prestressed concrete building structures during northridge earthquake[J]. *Pci Journal*, 1994, 39(2): 38-55.  
 [2] NORTON J A, KING A B, BULL D K, et al. Northridge earthquake reconnaissance report[J]. *Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering*, 1994, 27(4): 235-344.

#### (上接第 1418 页)

[11] 杨阳,李飒,孙立强,等.半变异函数计算波动范围的方法研究[J].*武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(7): 618-626.  
 [12] 闫澍旺,朱红霞,刘润,等.关于土层相关距离计算方法的研究[J].*岩土力学*, 2007, 28(8): 1581-1586.  
 [13] 闫澍旺,朱红霞,刘润.天津港土性相关距离的计算研究和统计分析[J].*岩土力学*, 2009, 30(7): 2179-2185.  
 [14] 李新生,刘超.相关距离分析与勘察钻孔取样间距的合理确定[J].*水文地质工程地质*, 2011, 38(4): 74-77.  
 [15] 吴道祥,单灿灿,钟轩明,等.静力触探的发展及其在岩土工程中的应用[J].*合肥工业大学学报(自然科学版)*, 2008, 31(2): 211-215.  
 [16] 郭林坪,孔令伟,徐超,等.静力触探参数自相关距离确定方法与影响因素分析[J].*岩土力学*, 2017, 38(增刊 1):

[3] 阿热帕提·艾斯凯尔,陈国新.预制装配式混凝土结构节点连接方式研究综述[J].*结构工程师*, 2020, 36(5): 224-233.  
 [4] RODRIGUES H, ROMAO X, ANDRADE-CAMPOS A, et al. Simplified hysteretic model for the representation of the biaxial bending response of RC columns[J]. *Engineering Structures*, 2012, 44: 146-158.  
 [5] DU Y S, ZHANG Y T, CHEN Z H, et al. Seismic behavior of CFRP confined rectangular CFST columns using high-strength materials: numerical analysis and restoring force model[J]. *Structures*, 2021, 34: 4237-4253.  
 [6] 朱旦,李升才,朱永甫.不同轴压比 RCS 梁柱组合件恢复力模型研究[J].*世界地震工程*, 2021, 37(2): 143-152.  
 [7] 张鹏,孙仁中,邓宇,等.型钢混凝土受拉柱恢复力计算模型试验研究[J].*防灾减灾工程学报*, 2021, 41(3): 549-557.  
 [8] 杨勇,闫长旺,贾金青,等.钢骨超高强混凝土柱-混凝土梁节点恢复力模型[J].*土木工程学报*, 2014, 47(增刊 2): 193-197.  
 [9] 徐金俊,陈宗平,薛建阳,等.型钢混凝土 T 形柱框架节点恢复力模型研究[J].*应用基础与工程科学学报*, 2018, 26(3): 605-619.  
 [10] 武立伟,陈海彬,郭雪源,等.装配式内置钢管混凝土异形柱 T 形节点滞回性能及恢复力模型研究[J].*建筑结构学报*, 2021, 42(增刊 2): 117-124.  
 [11] 魏春明,温志坡,鞠彦忠,等.高强钢筋高强混凝土空间梁柱组合体抗震性能试验与恢复力模型研究[J].*建筑结构学报*, 2021, 42(11): 145-154.  
 [12] 中国建筑科学研究院.金属材料拉伸试验:GB/T 228. 1—2010[S].北京:中国计划出版社,2010:11-19.  
 [13] 中国建筑科学研究院.普通混凝土力学性能试验方法标准:GB/T 50081—2002[S].北京:中国建筑工业出版社,2002:15-20.  
 [14] 中国建筑科学研究院.混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010:286-288.  
 [15] 中国建筑科学研究院.建筑抗震试验规程:JGJ/T 101—2015[S].北京:中国建筑工业出版社,2015:10-16.

(责任编辑 吴 亮)

271-276.

[17] 闫澍旺,贾晓黎,郭怀志,等.土性剖面随机场模型的平稳性和各态历经性验证[J].*岩土工程学报*, 1995, 17(3): 1-9.  
 [18] STUEDLEIN A W, KRAMER S L, ARDUINO P, et al. Geotechnical characterization and random field modeling of desiccated clay[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2012, 138(11): 1301-1313.  
 [19] UZIELLI M, VANNUCCHI G, PHOON K K. Random field characterisation of stress-normalised cone penetration testing parameters[J]. *Geotechnique*, 2005, 55(1): 3-20.

(责任编辑 吴 亮)