

文章编号:1673-9469(2009)01-0010-04

中高强度钢材钢框架组合节点滞回模型研究

奥晓磊,石永久,王元清,施刚

(清华大学土木工程系,清华大学结构工程与振动教育部重点实验室,北京 100084)

摘要:钢框架节点在低周往复荷载作用下的滞回曲线是评价其抗震性能的重要指标,为了得到中高强度钢材钢框架梁柱组合节点滞回模型,本文通过4个足尺组合节点试件在往复荷载作用下的破坏试验,获得了节点滞回曲线的骨架曲线和包络图,分析了混凝土楼板配筋率和加载方式对节点承载和延性的影响,并由此得到考虑组合节点承载能力和刚度退化的三线型恢复力模型。由分析结果可以看出,楼板配筋率主要影响节点延性;正对称加载会明显提高节点的初始刚度和正弯矩极限承载力;恢复力模型可用于弹塑性地震时程反应分析。

关键词:中高强度钢材;梁柱组合节点;滞回性能;恢复力模型

中图分类号: TU393.2

文献标识码: A

Research on hysteretic models of composite connections in middle - high strength steel frame structures

AO Xiao-lei, SHI Yong-jiu, WANG Yuan-qing, SHI Gang

(Key Laboratory of Structural Engineering and Vibration of China Education Ministry,
Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to investigate the hysteretic characteristics of beam - to - column composite connections in middle - high strength steel frame, four full - scale composite specimens are subjected to destructive test under the low - cyclic reciprocating load. Then the skeleton and the envelope of hysteretic curve are obtained, and the impact of reinforcement ratio and loading mode on the bearing capacity and ductility of the connection are analyzed. Based on the test results and analysis, the three linear restoring force model of the composite connection in consideration of bearing capacity and stiffness degradation is gained. From the analysis results, it can be concluded that the reinforcement ratio mainly affects the connection ductility; symmetric loading can provide higher initial stiffness and ultimate strength in sagging moment; the restoring force model can be used in elasto - plastic seismic time - history analysis.

Key words: middle - high strength steel; beam - to - column composite connection; hysteretic characteristics; restoring force model

在1994年的美国Northridge地震和1995年的日本Kobe地震中,在往复荷载作用下,钢框架节点连接部位发生了脆性断裂破坏。地震后研究者的焦点集中于以下几个方面:一、地震中节点连接脆性断裂机理的分析;二、钢框架混凝土楼板组合作用对节点钢梁下翼缘处应力集中,以及节点变形能力的影响;三、节点破坏对结构整体受力的影响。由于使用中高强度钢材可以有效地减轻结构

重量、提高结构可靠性,并且组合节点中混凝土楼板对钢框架抗震性能的影响不能忽略^[1,2],在试验和理论的支持下,中高强度钢材和组合节点的结合逐渐被应用于工程实践。

在强烈的地震作用下,结构进入塑性阶段后的弹塑性地震响应呈现很强的滞回特征,导致结构的地震反应分析带有明显的非线性特征,复杂而难以模拟。因此,为了分析中高强度钢材组合

收稿日期:2008-09-23

基金项目:国家自然科学基金项目(50578083,50708051)

作者简介:奥晓磊(1984-),男,山西兴县人,硕士,从事中高强度钢材钢框架组合节点抗震性能研究。

节点抗震性能,更好地探讨其滞回特性,本文通过四个中高强度钢材组合节点足尺试件的低周往复荷载试验,分析了组合节点试验滞回曲线的特点,并从中拟合出节点的三折线恢复力模型,为钢框架梁柱节点的抗震设计、弹塑性地震时程反应分析提供了理论参考。

1 组合节点滞回模型

通过试验研究,研究者提出的组合节点滞回模型通常为非线性模型和线性模型。其中,非线性模型^[3]可以考虑包辛格效应、应变强化效应、强度退化等,虽然一些模型可以较为准确地模拟节点滞回性能,但由于其影响因素多而复杂、计算量较大,使得从实际应用方面考虑不可取。对于双线型、三线型和退化多线型等线性模型,由于可不考虑节点非线性刚度退化且表达直观、简便,较为适用于结构振动循环次数不多,位移较小时。通过对折线拐点进行适当的处理,可以得到比较好的模拟结果。试验^[1,4]证明,对于普通的钢框架节点,双线型和三线型模型已能较为准确地模拟节点抗震反应,且能描述出节点试验中表现出的滞回特性。如果假定梁柱组合连接的卸载刚度与初始刚度相同如图 1,则节点连接弯矩-转角关系的三线型滞回模型如图 2 所示^[5]。

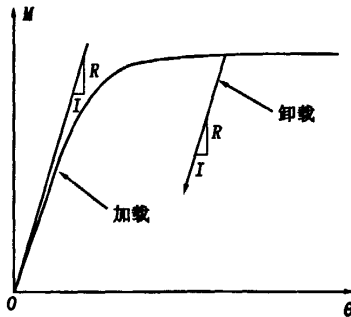


图1 卸载刚度示意
Fig.1 Unloading rigidity

图中 M_i - 节点的初始屈服弯矩; M_p - 节点的

塑性弯矩; k_e - 节点的初始刚度; k_p - 节点的强化刚度; k_a - 节点的折线刚度,可取为连接初始刚度和强化刚度的平均值。

本文为了反应中高强度钢材组合节点抗震受力特性,选用较为精确和物理意义更加明确的三线型模型对节点试验滞回曲线试验结果进行拟合。

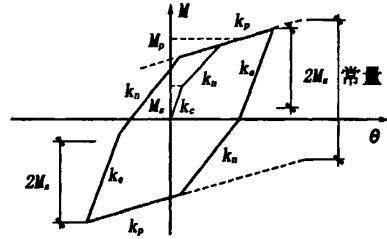


图2 三折线滞回模型
Fig.2 Trilinear hysteretic model

2 试验概况

本文用剪力连接件将十字型钢框架节点与压型钢板组合楼板相结合,四个试件梁柱尺寸都相同,所用钢材为 Q345 - D 结构钢,混凝土楼板采用 C60 级混凝土,具体试件参数见表 1。梁柱连接为标准型栓焊连接,连接构造参照《建筑抗震设计规范》^[6],梁腹板采用 4 个 10.9 级 M20 高强度螺栓通过剪切板与柱翼缘连接。

试验布置如图 3,加载以及测量方案见文献 [7],限于加载条件,没有施加柱轴向荷载,梁端由上下各一 60t 千斤顶施加反对称压力(HCJ - 3 采用正对称加载),以模拟地震中出现的低周往复荷载。

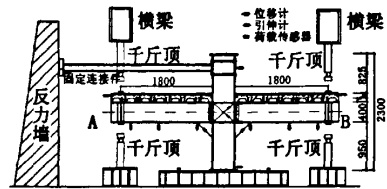


图3 试验布置图
Fig.3 Test setup

表 1 构件参数表

Tab.1 The parameter of component

编号	梁柱截面/mm	纵筋	配筋率	分布筋	栓钉数	加载方式
HCJ - 1	梁:	φ12@110	1.08%	φ8@100	12	反对称
HCJ - 2	400 × 150 × 8 × 14	φ12@80	1.13%	φ8@100	24	反对称
HCJ - 3	柱:	φ12@110	1.08%	φ8@100	12	正对称
HCJ - 4	450 × 250 × 12 × 16	φ12@80	1.13%	φ8@100	24	反对称

3 滞回曲线骨架曲线

滞回曲线就是在低周反复荷载作用下,结构作用力和结构变形之间的关系曲线,本试验弯矩转角滞回曲线详见文献[7]。将滞回曲线各次循环的力的峰值点连接起来就形成了骨架曲线见图4。由图4可以看出:

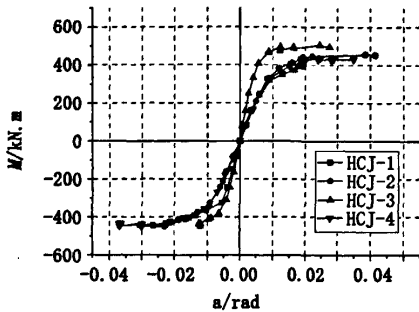


图4 节点弯矩-转角骨架曲线

Fig. 4 The moment-rotation skeleton curve of the connections

1) 骨架曲线均呈斜S型,反应出试件在低周往复荷载作用下所经历的弹性、塑性和极限破坏三个受力阶段,但四条曲线均没有明显的下降段,刚度退化严重,塑性发展比较充分。

2) 正对称加载时,节点区实际承受弯矩较反对称加载时小,所以,HCJ-3的骨架曲线在承受正弯矩时较其他三个节点有明显抬升,刚度较大。由于混凝土的退出工作,负弯矩作用时不同加载方式差别没有正弯矩作用明显。

3) 比较 HCJ-1 和 HCJ-2 不同配筋率节点,节点的极限承载力差异比较小,但高配筋节点具有更为出色的延性。另外,低配筋节点骨架曲线具有较为明显的屈服点。

4 滞回曲线包络图

图5为试验中得到的节点滞回曲线的相对包络图。图中横坐标为相对塑性转动能力,定义为转角 α 与弹性极限转角 α_e 的比值, α 为节点连接处梁柱轴线之间夹角在荷载作用下相对于无荷载时的改变值, α_e 为荷载达到弹性极限时的转角;纵坐标为相对弯矩,定义为连接处梁弯矩 M 与其弹性极限弯矩 M_e 的比值。为得到准确的节点屈服数据,本文借用钢筋混凝土框架结构常用的图解法^[6],利用滞回曲线的骨架曲线来确定各屈服参数。

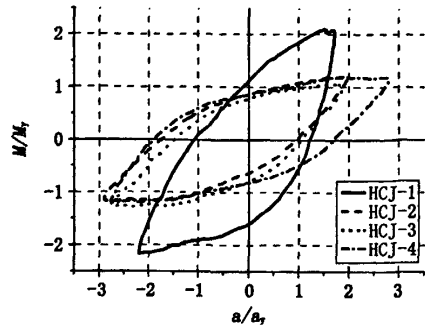


图5 节点弯矩转角滞回曲线包络图

Fig. 5 The moment-rotation hysteretic envelope curve

对于每个试件,包络线面积大致代表了在加载到极限位移的一个加载循环中,节点所吸收的能量。由图5可以看出:

1) 四个节点的曲线均呈饱满梭形,无明显捏拢现象,说明在考虑混凝土楼板的组合作用后,钢框架节点的刚度变化较平缓,没有出现突然的裂缝开裂或闭合造成的刚度变化,仍然具有良好的抗震变形能力。

2) 高配筋节点(HCJ-2/HCJ-4)较低配筋节点(HCJ-1)具有更饱满的曲线,延性系数 α_u/α_e 也较高,但承载力储备系数 M_u/M_e 要小一些,说明对于中高强度钢材组合节点,提高楼板配筋率可相对提高节点延性但相应会降低节点的可利用屈服后承载力。

3) 对于各个反对称加载节点,正负弯矩区的包络线从形式和值上均类似,具有相似的延性系数和承载力储备系数,而对于正对称加载节点 HCJ-3,正弯矩部分所包络面积要明显小于负弯矩部分,并且可以发现负弯矩部分塑性发展要更为充分,包括承载力和延性。这与组合节点加载方式的影响有关,负弯矩作用时混凝土很快就会被拉裂,从而使受力筋成为主要的受拉构件,钢筋的延性得到充分发挥,可以有效地耗能,正弯矩作用时混凝土裂缝合上并可以继续承载,具有一定的脆性特征,而正对称加载时节点域两侧受弯矩相等且方向相反,上述现象之间的差别将表现得更加明显。

5 组合节点恢复力模型

本文采用三折线型模型如图6,横坐标取值范围为 $(-\alpha_u/\alpha_e, \alpha_u/\alpha_e)$;纵坐标取值范围为 $(-M_u/M_e, M_u/M_e)$ 。需要确定的控制点包括:弹性极限弯矩 M_e 和转角 α_e ,塑性极限弯矩 M_u 和转角 α_u 。

在图6中, K_e 为节点的相对弹性刚度, K_p 为屈服后的相对塑性刚度, K_s 为相对弹塑性刚度, K_r 为刚度退化后的相对剩余刚度。

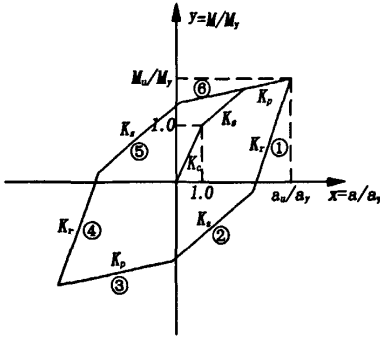


图6 节点恢复力模型示意图

Fig.6 The restoring force model of the connections

在试验研究数据基础上,本文从四个节点试验滞回曲线包络图中拟合出节点恢复力模型,各段如下式所示。

$$\text{方程 1: } M/M_y = 0.982\alpha/a_y - 1.479$$

$$\text{方程 2: } M/M_y = 0.427\alpha/a_y - 0.816$$

$$\text{方程 3: } M/M_y = 0.103\alpha/a_y - 0.963$$

$$\text{方程 4: } M/M_y = 0.982\alpha/a_y + 1.479$$

$$\text{方程 5: } M/M_y = 0.427\alpha/a_y + 0.816$$

$$\text{方程 6: } M/M_y = 0.103\alpha/a_y + 0.963$$

式中 M_y 和 a_y 的确定相对简单,可以参照文献[8]所提供的对骨架曲线的作图方法确定。 M_u 和 a_u 的确定需要综合考虑节点的实际承载能力、节点剩余强度和设计安全度等诸多因素的影响。因此,节点承载力储备系数 M/M_y 可以用来代表节点开始屈服后承载能力继续增加的能力,节点延性系数 α/a_y 可以用来衡量节点塑性变形能力。由以上分析可知:

1)承载力储备系数取值在 1.2 ~ 1.3 之间(HCJ-1 较大,为 2.1),转角延性系数取值在 2.8 ~ 3.0 之间,略低于纯钢节点的 3.0 值^[4],也说明了较之低强度纯钢节点,中高强度钢材组合节点可以在不降低延性的基础上提高节点的承载力。

2)由图6可以看出,各种节点的恢复力模型的卸载阶段的刚度 k_r 与节点弹性刚度 k_e 并不完全相等,所以不是理想的强化模型。对于中高强度钢材组合节点,模型中给出的斜率是 0.982,小于相对弹性刚度 1,可以说明,由于截面塑性发展、

混凝土板开裂,钢筋粘结滑移、高强螺栓滑移、焊缝开裂等因素影响,节点在往复荷载作用下发生刚度退化是不可避免的。另外,试验中节点梁下翼缘焊接孔处出现了较为明显的屈曲变形,并且伴随着一定程度的平面外扭转,往复荷载使得试件的残余塑性变形逐渐变大,从而造成节点刚度的降低。在节点设计中,应保证节点能承受足够次数的荷载循环而不出现明显的刚度退化。

6 结论

1)配筋率对节点滞回性能的影响主要集中在延性上,提高组合节点混凝土楼板配筋率可以较明显地提高节点的延性,但承载力提高不是很多,并且有可能造成承载力储备的降低。

2)对于不同的加载方式,反对称加载和正对称加载在低周往复荷载下都具有典型的斜“S”型骨架曲线和饱满的滞回曲线,但正对称加载会明显提高节点的初始刚度和正弯矩极限承载力,并且造成包络曲线正负弯矩区的显著不对称。

3)由试验滞回曲线包络图得到的三折线恢复力模型可以用于钢框架结构弹塑性地震时程反应分析,确定其控制点要综合考虑节点的实际承载能力、节点剩余强度和设计安全度等诸多因素的影响,从卸载曲线斜率上看,往复荷载作用造成的节点刚度的退化是不可避免的。

参考文献:

- [1] 石永久, 苏迪, 王元清. 混凝土楼板对钢框架梁柱节点抗震性能影响的试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(9): 26-31.
- [2] 奥晓磊, 石永久, 王元清, 等. 混凝土强度对钢框架梁柱节点承载性能的影响[J]. 山东建筑大学学报, 2008, 23(3): 195-199.
- [3] 李国强, 沈祖炎. 考虑节点剪切变形的钢框架弹塑性地震反应分析[J]. 同济大学学报, 1990, (1): 1-9.
- [4] 李兆凡. 钢结构梁柱节点抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2002.
- [5] STELMACK T W, MARLEY M J, GERSTLE K H. Analysis and tests of flexibly connected steel frames[C]. ASCE, ST 7, 1986.
- [6] GB50011-2001, 建筑抗震设计规范[S].
- [7] 奥晓磊. 中高强度钢框架梁柱组合节点抗震性能研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [8] CECS 43-92, 钢筋混凝土装配整体式框架节点与连接设计规程[S].

(责任编辑 刘存英)