

带开孔梁钢筋混凝土框架拟静力试验研究

吴炎海, 程浩德

(福州大学土木建筑工程学院, 福建 福州 350002)

摘要: 用 MTS 伺服加载系统对两榀带开孔梁钢筋混凝土框架进行低周反复荷载加载试验, 对试件的破坏形态、滞回曲线、延性、耗能能力等抗震性能进行初步研究。试验表明, 在合理设计的基础上, 梁上孔洞的存在并不会影响钢筋混凝土框架结构的抗震性能。

关键词: 钢筋混凝土; 框架结构; 开孔梁; 抗震性能; 拟静力试验

中图分类号: TU375.4

文献标识码: A

Pseudo - static test study on reinforced concrete frame with openings beam

WU Yan - hai, CHENG Hao - de

(College of Civil Engineering and Architecture, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: Using the MTS electro - hydraulic servo structure test system, the pseudo - static test of two reinforced concrete frames with openings beam have been carried out to research failure pattern, dynamic response, hysteresis curves, energy dissipation and rigidity degeneration of RC frame with openings. The results show that the openings do not affect the seismic behavior of reinforced concrete frame based on rational design.

Keywords: reinforced concrete; frame; opening beam; seismic behavior; pseudo - static test

近年来, 随着我国高层建筑的发展, 开孔梁结构已经开始广泛应用于实际工程。十多年来, 国内外已开展了大量的钢筋混凝土开孔梁的试验研究, 但以往主要集中在开孔梁构件(以简支梁为主)的受力性能上^[1, 2]。本研究对带开孔梁框架结构整体抗震性能作进一步探讨。

1 试件设计

进行两榀钢筋混凝土单层单跨带开孔梁框架的拟静力试验, 试件 TF1 梁上开有 2 个矩形孔, 柱顶没有施加轴向压力; 试件 TF2 梁上开一个矩形孔, 柱顶施加 100 kN 轴向压力。框架尺寸取实际平面框架尺寸的 1/2, 层高为 2.125 m, 轴线跨度为 3.5 m, 柱截面尺寸为 300 mm × 250 mm, 梁截面为 350 mm × 180 mm, 基础梁截面为 500 mm × 350 mm。试件的梁柱抗弯刚度比($EI_c/(EI_b)$)为 1.4, 柱的计算剪跨比为 $\lambda = H_a/(2h_0) = 3.35$ 。框架梁、柱、节点的配筋按文献[3]、[4]的有关规定进行, 梁上开孔部分的配筋设计按文献[1]、[2]的计算方法进行。试件的详细尺寸和配筋见图 1。

2 试验方法

试验在福州大学土建学院中心实验室的电液伺服加载系统上进行, 根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-96)^[5]规定, 采用拟静力试验方案进行钢筋混凝土带开孔梁框架在低周反复荷载作用下的抗震性能研究。低周反复水平荷载是由 MTS 伺服加载系统作动器施加, 而竖向荷载采用油压千斤顶施加。正式试验前, 先施加反复荷载 2 次, 以检查试验装置及各测量仪表的反应是否正常。根据规定, 正式试

收稿日期: 2003-12-18

作者简介: 吴炎海(1958-), 男, 副教授。

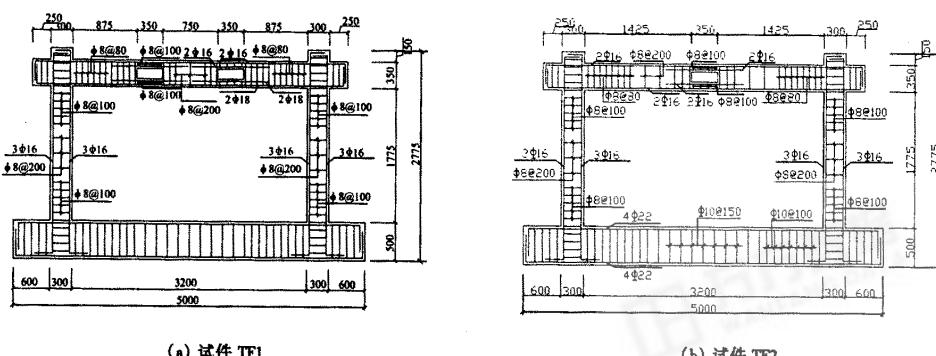


Fig.1 Dimension and steel parameter of model

验开始后, 加载应当采用荷载 - 位移双控制方法: 试件屈服前采用荷载控制并分级加载, 接近屈服荷载时减小级差, 循环 2~3 次; 试件屈服后采用位移控制, 位移值取屈服时试件的最大位移值, 并以该位移值的倍数为级差进行控制加载直至试件破坏。

由于本次拟静力试验是在拟动力试验(作者已另文介绍)完全结束后进行的, 混凝土有一定程度的开裂, 柱脚处部分纵筋已屈服, 在试验过程中很难精确定试件的屈服荷载和屈服位移, 同时考虑到目前还没有一个确定屈服点的统一标准。一般较合理的确定方法是以整个试件的荷载 - 变形曲线出现拐点作为判定是否屈服。此时构件屈服, 主筋一般大多屈服。但是, 由于该判别方法在实际试验过程中的具体操作比较难于实现。因此, 试验是根据《建筑抗震试验方法规程》(JGJ101-96)^[1]规定, 以控制截面受拉主筋达到屈服时相应的位移作为屈服位移, 并采用位移控制来完成整个拟静力试验。每一级加载位移的循环次数, 屈服前为一次, 试件屈服后为 3 次。试验的加载制度见图 2, 图中延性系数为 Δ/Δ_c 。

3 试验结果及其分析

3.1 试件的开裂情况和破坏形态

3.1.1 试件 TF1

试件屈服前, 结构并没有出现新的裂缝, 原有裂缝也没有明显的发展。当伺服加载器所施加的水平位移为 15 mm 时, 试件 TF1 的柱脚处部分受拉钢筋屈服, 因此, 该位移确定为该试件的屈服位移 Δ_c 。由于试件在此前进行的拟动力试验中已产生了一定程度的破损, 考虑到可能出现的危险, 故在实际的加载过程中适当地降低了加载级差。当试件屈服时, 柱底的最大裂缝宽度达到了 1 mm, 柱顶的最大裂缝宽度也达到了 0.4 mm。当试件在 $2\Delta_c$ 作用时, 结构出现大量的新裂缝, 而且原有裂缝也发展迅速, 柱底最大裂缝宽度达到了 3 mm, 而梁端的裂缝宽度也达到了 1.5~2 mm。当加载位移达到了 $3\Delta_c$ 时, 结构开裂加剧, 柱底裂缝宽度已增至 6 mm。此后, 考虑到结构有随时破坏的可能, 则不便再观察裂缝。当加载位移达到了 $4\Delta_c$ 时, 梁端焊接的传感器脱落, 从而试验被迫结束。此时, 结构已严重破坏。

3.1.2 试件 TF2

当水平位移加至 10 mm 时, 试件 TF2 的柱脚处部分受拉钢筋屈服。由于试件 TF2 是在试件 TF1 试验

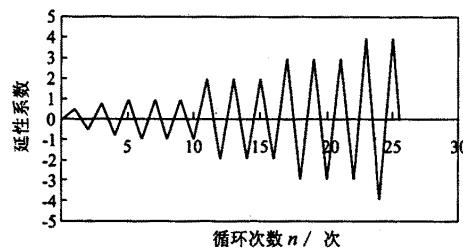


图 2 加载制度

Fig.2 Loading sequence

成功的基础上进行的，故在此后严格按照屈服位移值 Δ_y 的整数倍为加载级差来进行加载的控制。当试件在 $2\Delta_y$ 作用时，其柱底裂宽达到了 1.5 mm ，梁端裂宽宽度为 2 mm 。当加载位移达到了 $3\Delta_y$ 时，柱底裂宽达到了 3 mm ，梁端裂宽增至 4 mm 左右。当加载位移达到了 $4\Delta_y$ 时，梁端裂宽已增至 5.5 mm 。当加载位移达到了 $5\Delta_y$ 时，梁端混凝土开始压碎剥落。最后试件在加载位移为 $6\Delta_y$ 的第一个循环后时，以梁端出现塑性铰而宣告结构破坏。由于平面外缺乏支撑约束，试件产生一定的平面外倾斜。

3.1.3 二者比较

由于试件 TF1 没有轴力、试件 TF2 的轴压比较小，结构裂缝主要以正截面裂缝为主，均仍属于弯曲破坏。但是，很明显二者存在较大的差别。试件 TF1 破坏时是在柱底出现塑性铰，而试件 TF2 则由于在柱上施加了轴力，梁柱节点约束明显加强，因此该试件的梁端与柱底均出现了塑性铰。

3.2 试件的滞回特性

3.2.1 恢复力曲线

图 3 为试件 TF1 和试件 TF2 的实测荷载 - 位移曲线，即恢复力曲线。

从图 3 可以发现，当水平位移较小，即最初的几级位移加载时，试件基本上处于弹性阶段，荷载 - 位移关系呈线性变化。在试件达到屈服位移之前，加载和卸载刚度都无较大的变化。试件达到屈服荷载后，加载与卸载刚度逐步降低，并且这种刚度的降低随着加卸载循环次数的增加而加剧。这是由于受拉区混凝土不断退出工作，受压混凝土的有效工作面积逐渐减少。与此同时，混凝土在一拉一压的循环中累积的塑性变形逐渐增大，加之钢筋的包兴格效应（拉、压应力较大时变形模量逐步下降），从而导致了结构刚度的不断下降。

值得注意的是图 3 的恢复力曲线有一些不对称。这是因为正反向加载时的结构受拉和受压刚度不相等，其正反向的裂缝也不对称。而且，在加载过程中总有一个方向先达到最大的加载值。

从图 3 还可以看出，试件 TF2 由于轴力效应的存在，恢复力曲线的凹陷现象有很明显减缓。而试件 TF1 的加卸载刚度明显大于试件 TF2，其曲线也相对较丰满，因此，试件 TF1 的耗能性能优于试件 TF2，这与该试件柱上无轴力作用有关。

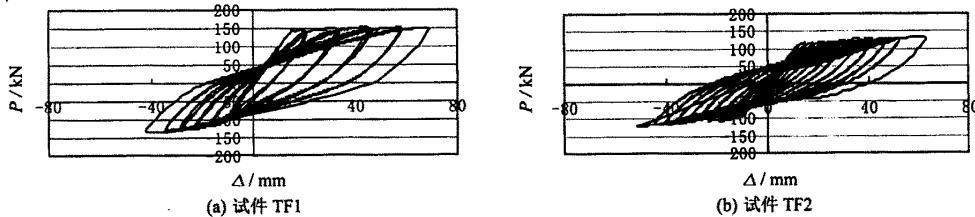


图 3 试件的荷载 - 位移滞回曲线

Fig.2 Load - displacement hysteresis curves of model

3.2.2 延性及耗能分析

为了定性地比较和衡量试件的抗震性能，由 2 个试件的实测荷载 - 位移滞回曲线得出的骨架曲线见图 4。2 个试件试验数据的对比详见表 1，表中延性系数 $\mu_\Delta = \Delta_u/\Delta_y$ ，功比系数 $I_w = \sum_{i=1}^n [P_i \Delta_i / (P_i \Delta_y)]$ 。其中： Δ_y 为试件屈服位移，以本文试验的骨架曲线拐点来确定； Δ_u 为极限位移，按文献[5]规定应取荷载下降到极限荷载的 85% 时所对应的变形值，但由于本文试验中，试件 TF1 尚未出现下降段，而试件 TF2 虽已开始出现下降段，但也未达到极限位移，故本文 2 试件的 Δ_u 均采用估计值。

从图 4 和表 1 可以看出，2 个试件在结构达到屈服之前刚度基本相同，但柱轴压比为 0.1 的试件 TF2，其承受反复荷载的强度很明显有所提高，其屈服荷载和屈服位移均有所提高，但延性却相应有所降低（由于没有下降段，均取估计值），耗能能力也有所下降。

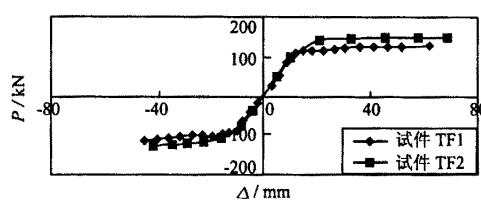


图4 试件TF1和TF2的骨架曲线

Fig.4 Framework of model TF1 and TF2

4 结语

通过试验来研究钢筋混凝土带开孔梁框架结构的抗震性能, 对两榀单层单跨钢筋混凝土带开孔梁框架进行了拟静力地震反应试验研究。根据试验结果, 并与无开孔梁框架的试验结果^[6, 7]比较, 得出下面几个初步结论:

1) 应用电液伺服加载系统对试件进行低周反复荷载试验, 集即时监控和数据采集、处理等功能于一身, 具有试验精度高、监控方便、节约人力等优点。试验基本上是成功的, 较好地反映了钢筋混凝土带开孔梁框架结构在模拟地震作用下的受力性能。

2) 试验表明, 框架结构梁上孔洞的存在并不影响结构的整体抗震性能。在合理设计的基础上, 该框架形式能够实现塑性铰首先在梁上出现。因此, 钢筋混凝土带开孔梁框架应当是可以满足抗震要求的。

3) 试验表明, 框架结构柱轴压比的大小对结构的抗震性能有一定程度的影响。柱轴压比越小, 框架结构的抗震性能越好, 即结构具有更好的延性和耗能能力。但是, 在框架结构达到屈服点之前, 轴压比的影响并不明显。

当然, 影响带开孔梁框架抗震性能的参数很多, 如孔洞的数量、孔洞的位置、柱轴压比大小、梁上荷载的大小及形式等, 由于本文仅进行两榀框架的试验, 上述参数的影响有所交叉、难以分离, 还未能一一讨论清楚, 有待进一步深入研究。

参考文献:

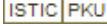
- [1] 蔡健, 陈眼云, 李静. 开有矩形孔的钢筋混凝土梁的承载力近似计算[J]. 华南理工大学学报, 1995, 23(3): 36-43.
- [2] 陈亚亮, 吴炎海. 钢筋混凝土开孔梁受力性能分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 1999, 27(3): 67-72.
- [3] GBJ 11-89, 建筑抗震设计规范[S].
- [4] GBJ 10-89, 混凝土结构设计规范[S].
- [5] JGJ 101-96, 建筑抗震试验方法规程[S].
- [6] 王雪芳, 郑建岚. 自密实高强混凝土框架的抗震性能研究[A]. 高强与高性能混凝土及其应用专题研讨会论文集[C]. 福州: [s.n.], 2002. 169-176.
- [7] 印文铎, 冯世平, 沈聚敏. 两层钢筋混凝土框架结构拟动力地震反应试验研究[J]. 土木工程学报, 1990, 23(3): 23-35.

表1 试验数据对比

Tab.1 The comparisons of test data

试件	屈服点		破坏点		延性系数 μ_d	功比系数 I_w
	Δ_y/mm	P_y/kN	Δ_u/mm	P_u/kN		
TF1	12	113	> 60	96	> 5	23.47
TF2	20	142	~ 60	120	~ 3	19.33

带开孔梁钢筋混凝土框架拟静力试验研究

作者: 吴炎海, 程浩德
作者单位: 福州大学土木建筑工程学院, 福建, 福州, 350002
刊名: 福州大学学报(自然科学版) 
英文刊名: JOURNAL OF FUZHOU UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE EDITION)
年, 卷(期): 2004, 32(6)
被引用次数: 1次

参考文献(7条)

1. 蔡健. 陈眼云. 李静. 开有矩形孔的钢筋混凝土梁的承载力近似计算 [期刊论文] - 华南理工大学学报(自然科学版) 1995(03)
2. 陈亚亮. 吴炎海. 钢筋混凝土开孔梁受力性能分析 [期刊论文] - 福州大学学报(自然科学版) 1999(03)
3. GBJ11-1989. 建筑抗震设计规范
4. GBJ10-1989. 混凝土结构设计规范
5. JGJ101-1996. 建筑抗震试验方法规程 1997
6. 王雪芳. 郑建岚. 自密实高强混凝土框架的抗震性能研究 2002
7. 印文铎. 冯世平. 沈聚敏. 两层钢筋混凝土框架结构拟动力地震反应试验研究 1990(03)

本文读者也读过(10条)

1. 柳炳康. 马克俭. 黄慎江. 不同加腋宽度下RC框架偏心节点受剪承载力计算 [会议论文] - 2002
2. 刘荣桂. 吕志涛. 预应力开孔梁模糊优化设计 [期刊论文] - 工程力学 2001, 18(6)
3. 李宏伟. 董猛. LI Hongwei. DONG Meng. 竖向开孔梁的初步探讨 [期刊论文] - 科技传播 2010(19)
4. 杨永华. 陈以一. YANG Yonghua. CHEN Yiyi. 连续开孔梁的抗弯刚度和挠度的等效计算 [期刊论文] - 结构工程师 2006, 22(3)
5. 刘荣桂. 预应力混凝土开孔梁回归分析与计算 [期刊论文] - 工业建筑 1998, 28(8)
6. 徐自祥. 苏军. 刘荣桂. Xu Zi-xiang. SU Jun. LIU Rong-Gui. 混凝土开孔梁变形的等效计算 [期刊论文] - 江苏理工大学学报(自然科学版) 2001, 23(2)
7. 刘红梅. 金江. 王海霞. Liu Hongmei. Jin Jiang. Wang Haixia. 钢筋混凝土开孔梁试件非线性有限元分析 [期刊论文] - 工业建筑 2005, 35(z1)
8. 陈亚亮. 吴炎海. CHEN Ya-liang. WU Yan-hai. 钢筋混凝土开孔梁受力性能分析 [期刊论文] - 福州大学学报(自然科学版) 1999, 27(3)
9. 刘荣桂. 吕志涛. Liu Ronggui. Lu Zhitao. 预应力开孔梁应力与变形分析的叠加方法 [期刊论文] - 工业建筑 1999, 29(9)
10. 王雪芳. 郑建岚. 自密实高强混凝土框架结构的抗震性能研究 [期刊论文] - 福州大学学报(自然科学版) 2004, 32(2)

引证文献(1条)

1. 崔宏剑. 王逢朝. 钢筋混凝土开孔梁的研究进展 [期刊论文] - 三明学院学报 2009(2)