

文章编号:1673-9469(2009)03-0026-05

冷弯薄壁型钢梁的滞回性能研究

谢兆平¹,宗周红²,林晓东¹

(1.莆田学院 土木建筑工程系,福建 莆田,351100;2.福州大学 土木工程学院,福建 福州,350108)

摘要:进行了八片方形冷弯薄壁型钢梁在反复荷载作用下的试验研究和非线性有限元分析,研究不同跨高比和截面宽厚比对冷弯薄壁型钢梁的滞回性能、延性和耗能能力等的影响。结果表明:冷弯薄壁型钢梁的荷载-位移滞回曲线比较饱满,没有明显的捏缩现象,具有很好的延性和耗能能力;跨高比和宽厚比会严重影响冷弯薄壁型钢梁的滞回性能和延性。建立的非线性有限元模型能够预测冷弯薄壁型钢梁的弹塑性行为和抗震性能,计算结果与实测结果基本吻合。

关键词:冷弯薄壁型钢梁;非线性有限元分析;滞回性能;试验研究;反复荷载作用

中图分类号: TU328

文献标识码: A

Study on the hysteretic behavior of cold - formed thin - walled steel tube beams subjected to low - cycle reversed loading

XIE Zhao-ping¹, ZONG Zhou-hong², LIN Xiao-dong¹

(1. Department of Civil Engineering and Architecture, Putian University, Fujian Putian 351100, China;

2. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fujian Fuzhou 350108, China)

Abstract: In this paper, 8 pieces of cold - formed thin - walled steel tube beams subjected to low - cycle reversed loading were tested, and nonlinear finite element analysis were also conducted to explore the effects of span to height ratios and width to thickness ratios of cross - section on the hysteretic behavior, ductility, and the ability of energy dissipation. Some important conclusions can be extracted from the experiments and the nonlinear analysis and listed as follows: (1) The cold - formed thin - walled steel tube beams exhibited stable hysteresis behavior up to local buckling and then showed considerable good ductility and the good ability of energy dissipation. The pinch - crinkle phenomena didn't occur in the hysteresis loops of load - displacement. (2) The hysteresis behavior and ductility of cold - formed thin - walled steel tube beams depended on the span to height ratios and width to thickness ratios. (3) The proposed nonlinear FE model could accurately predict the overall seismic behavior and the inelastic performance of the cold - formed thin - walled steel tube beams. The hysteresis loops from nonlinear FE models under low - cycle reversed loading agreed well with those from the low - cyclic reversed loading tests.

Key words: cold - formed thin - walled steel tube beams; nonlinear finite element analysis; hysteresis behavior; experimental study; low - cycle reversed loading

冷弯薄壁型钢是一种轻型材料,由于具有卓越的结构性能和延性而广泛地运用于房屋建筑^[1-3]。近年来,随着生产能力的提高和技术进步,部分冷弯型钢厂家已能生产尺寸较大的空心型钢产品,如方形型钢钢管边长可以达到500mm,矩形型钢钢管的最大尺寸已达400mm×600mm,且

钢管的最大壁厚可达到16mm,新增冷弯型钢钢管的尺寸能够满足一般建筑结构的要求。关于冷弯薄壁型钢结构的研究很多,但总的说来对圆钢管研究多而对方钢管研究少,理论研究多而试验研究少。目前对方钢管冷弯薄壁型钢梁在往复荷载

收稿日期:2009-04-07

作者简介:谢兆平(1975-),女,四川内江人,讲师,从事建筑钢结构方面的研究。

作用下的滞回性能的研究还很少,因此进行方钢管冷弯薄壁型钢梁在低周反复荷载作用下的研究,将有利于对其进行深入的理论研究,这对冷弯型钢结构弹塑性地震反应分析有重要意义。本文以跨高比、宽厚比为主要参数,进行方钢管冷弯薄壁型钢梁纯弯构件滞回性能的研究。

1 试验概况

1.1 试验设计

本次试验的目的是研究两种典型截面的冷弯薄壁型钢梁在低周反复荷载作用下的滞回性能,主要考虑的因素有:梁跨高比、截面宽厚比。采用二分点加载,加载力学简图如图 1 所示。试件分为两组,每组四根,长度分别为 2m, 3m, 4m, 5m,试件编号尺寸情况见表 1,材料试验结果表略。

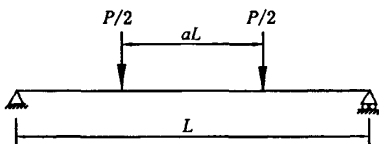


图1 加载力学简图
Fig.1 Mechanical diagram of loading

表 1 试件尺寸汇总表

Tab.1 Summary statement of specimen sizes

试件编号	截面 宽厚比	跨高比	长度	
			L/m	α
A-2		26.7	2	0.4
A-3	30	40.0	3	
A-4		53.3	4	
A-5		66.7	5	
B-2		22.5	2	
B-3	14.8	33.7	3	
B-4		44.9	4	
B-5		56.2	5	

注: A-截面尺寸为 75mm×75mm×2.5mm 的钢管,试件编号 A-2 中,A 为薄壁,2 为梁跨 2m。B-截面尺寸为 89mm×89mm×6mm 的钢管,试件编号 B-2 中,B 为厚壁,2 为梁跨 2m。

1.2 试验装置

采用 MTS 液压伺服加载系统进行进行反复荷载试验,加载作动器的最大作用力为 ± 250kN,加载通过分配梁两点对称加载,同时要保证梁端支座和加载点位置能够实现反向加载和相对滑动见图 2。

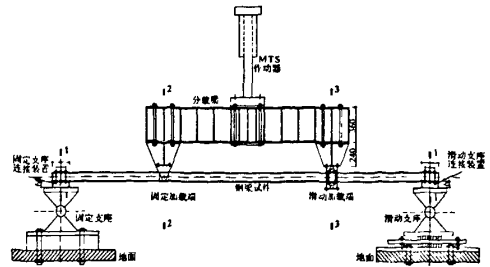


图2 加载装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of loading device

2 非线性有限元分析

2.1 材料本构模型

循环荷载作用下钢材的本构模型是由骨架曲线和加载、卸载准则两部分组成,为简化起见,假定如下:(1)骨架曲线可以采用单调加载时的应力-应变曲线,不考虑材料的 Baushinger 效应,受拉和受压可以认为是相同的;(2)其卸载、再加载按照直线路径,且平行于应力-应变曲线的初始直线段;(3)不考虑钢管壁的初始几何缺陷和残余应力等,假设钢管壁的腹板、弯角部分的本构关系为多线性等向强化弹塑性模型,屈服强度和极限强度均取试验值;(4)考虑几何非线性的重要影响,分析时打开大变形分析的开关^[4]。

本文对钢管壁部分的屈曲等复杂的物理现象,提出了带有下降段的循环本构模型见图 3,得到的结果吻合程度令人满意。

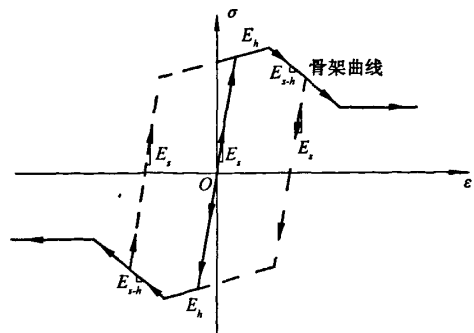


图3 循环荷载作用下钢材的计算模型

Fig.3 Calculation model of steel under the function of low-cycle reversed loading

2.2 有限元模拟

典型的有限元划分如图 4 所示。由于方钢管冷弯薄壁梁关于跨中和纵向弱轴对称,所以有

限元模型只模拟了四分之一。钢梁部分采用壳体单元 SHELL 181,该单元是四节点矩形壳体单元,可以考虑材料非线性与大应变、大挠度和大转动的几何非线性。加载点和支承点的加劲部分采用实体单元 SOLID 45,该单元是八节点块体单元,也可以考虑材料非线性和各种几何非线性^[5]。钢梁与加劲板之间的焊接采用节点耦合来做简化处理。节点耦合的是垂直于腹板的直线上的所有节点的 X、Y、Z 三个平动自由度。在计算模型的对称面上施加对称的约束条件,在支座约束 X、Y 方向的位移。

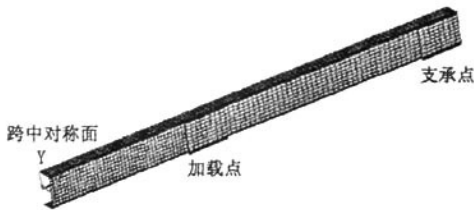


图4 有限元模型
Fig.4 FE model

3 计算结果分析

3.1 破坏形态

无论是薄壁还是厚壁的冷弯薄壁型钢梁,都是发生大变形破坏,破坏是型钢钢管的上下翼缘在正向(向下加载)和反向(向上加载)时分别在上翼缘和下翼缘发生局部屈曲,局部屈曲先在上翼缘出现,然后发展成为上下翼缘内凹,左右腹板外凸的典型捏缩破坏形态。实验的局部屈曲位置也是先发生在上翼缘;有限元模型的破坏也是局部屈曲,发生在集中荷载作用纯弯段靠近固定加载点位置,局部屈曲也是先发生在上翼缘(如图5所示)。

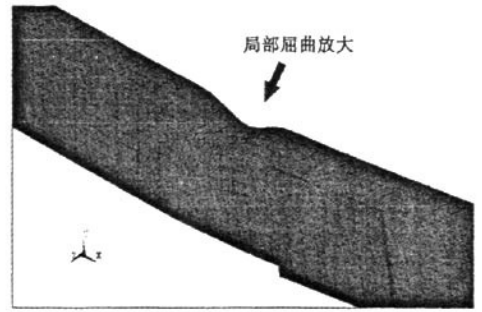


图5 试验与计算局部屈曲破坏模型比较

Fig.5 Model comparison of the test and calculation of local buckling

3.2 荷载-位移滞回曲线

模型梁实测的荷载-位移滞回曲线与有限元计算荷载-位移曲线、弯矩-曲率曲线的比较见下图6(以B-3为例),可以得出如下结论:(1)不论是薄壁还是厚壁构件,其荷载-位移滞回曲线均呈纺锤形,且没有明显的捏缩现象,具有良好的延性和耗能能力;宽厚比小的构件,其滞回曲线比较饱满;对相同截面的构件,跨高比越小,滞回曲线梭形越饱满;在每一级荷载的两个循环之间,曲线基本是重合的;破坏时宽厚比大的A类构件产生明显的下降段,出现显著的强度与刚度退化。(2)应用有限元软件 ANSYS,结合自定义材料本构模型,可以较准确地建立冷弯薄壁型钢梁的非线性有限元模型;非线性有限元计算的滞回曲线与实测结果基本吻合,其中有限元模型对钢管屈服前的滞回曲线模拟得较好,钢管壁屈服后,受模型限制,计算曲线与实测曲线尚有一定偏差。(3)除A-5、B-5两根由于试验条件的限制没有完全达到极限状态的钢梁外,其余试验的六根梁的滞回曲线基本吻合。A-5、B-5 构件实测的已有数据与非线性有限元分析结果的前部分数据吻合良好。

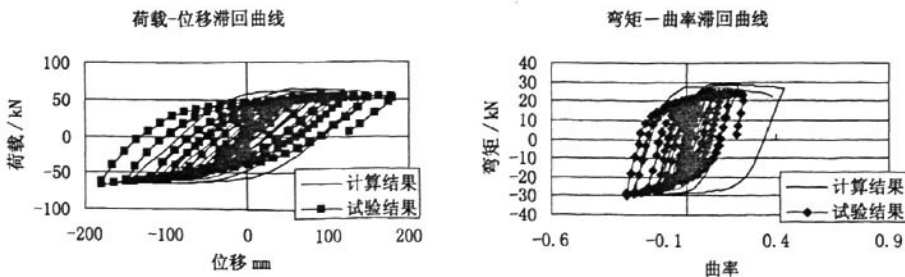


图6 B-3试件滞回曲线比较

Fig.6 Comparison of B-3specimen hysteresis curve

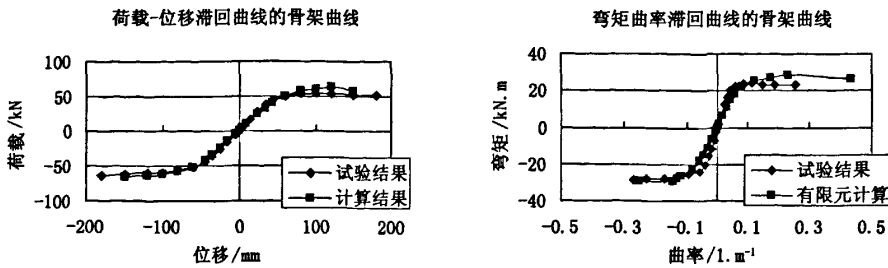


图 7 B-3 试件骨架曲线比较
Fig. 7 Comparison of B-3 specimen skeleton curves

表 2 A-3、B-3 截面正向特征荷载值比较

Tab. 2 Comparison of load values of the forward direction characteristics of A-3 and B-3 cross section

试件 编号	屈服荷载/kN		位移/mm		极限荷载/kN		位移/mm	
	试验结果	有限元计算	试验结果	有限元计算	试验结果	有限元计算	试验结果	有限元计算
B-3	44.02	39.3869	45.017	45	53.363	63.0548	100.05	120

试件 编号	屈服弯矩/kN.m		曲率/1.m ⁻¹		极限弯矩/kN.m		曲率/1.m ⁻¹	
	试验结果	有限元计算	试验结果	有限元计算	试验结果	有限元计算	试验结果	有限元计算
B-3	19.95	22.16	0.0410	0.0807	24.01	28.37	0.1129	0.231117

3.3 骨架曲线比较

图 7(以 B-3 为例)给出了非线性有限元分析结果与试验结果的加载点荷载-位移滞回曲线的骨架曲线、纯弯段弯矩-曲率滞回曲线的骨架曲线比较。除 A-5、B-5 两根由于试验条件的限制没有完全达到极限状态的钢梁外,其余试验的六根梁的骨架曲线吻合良好。A-5、B-5 构件实测的已有数据与非线性有限元分析结果的前部分数据吻合程度令人满意。

实测的加载点荷载与位移、弯矩与曲率特征值与非线性有限元计算的荷载与位移、弯矩与曲率特征值比较见表 2(以 B-3 截面正向特征荷载值比较为例)。除 A-5、B-5 两根由于试验条件的限制没有完全达到极限状态的钢梁外,其余试验的六根梁的屈服弯矩、极限弯矩实测值与计算值误差不大,但屈服弯矩对应的曲率计算值比实测值大比较多,极限弯矩对应的曲率也有一定误差;屈服荷载、极限荷载实测值与计算值误差不大,但极限荷载对应的位移计算值比实测值大比

较多,屈服荷载对应的位移也有一定误差。分析原因应该是非线性有限元计算分析方钢管初始缺陷如:初弯曲、加载初偏心等考虑不足所致。

3.4 延性与耗能能力

在现代工程抗震中,经常用等效粘滞阻尼系数大小来判别结构在地震中的耗能能力,等效粘滞系数定义为

$$\zeta_{eq} = \frac{1}{2\pi} \frac{Area(\text{环 } ABCD)}{Area(\triangle OFC + \triangle OEA)} \quad (1)$$

能量耗散系数为

$$E = 2\pi\zeta_{eq} \quad (2)$$

计算与实测结果的比较见表 3。可以看出,除 A-5、B-5 两根由于试验条件的限制没有完全达到极限状态的钢梁外,其余试验的六根梁的延性比 μ 实测值比计算值大比较多,计算偏安全。等效粘滞系数 ζ_{eq} 及能量耗散系数 E 基本吻合,误差小于 20% 内。总体来说,有限元模型能较为准确地计算冷弯薄壁型钢梁在反复荷载作用下的特征值。

表3 构件的延性比和耗能比比较

Tab.3 Comparison of components' ductivity ratio and ability of energy dissipation

构件	加载点/MTS 屈服位移/mm		加载点/MTS 极限位移/mm		延性比 μ		等效粘滞系数 ζ_{eq}		能量耗散系数 E	
	试验	有限元	试验	有限元	试验	有限元	试验	有限元	试验	有限元
	结果	计算	结果	计算	结果	计算	结果	计算	结果	计算
A-2	21.88	30	50	55	2.28	1.83	0.38	0.47	2.36	2.93
A-3	49.32	52.5	80	120	1.62	2.29	0.47	0.38	2.97	2.42
A-4	88.40	95	180	200	2.04	2.11	0.45	0.45	2.84	2.84
A-5	136.03	150	195	310	1.43	2.07	0.11	0.52	0.71	3.27
B-2	20	25	80	76.6	4	3.06	0.36	0.39	2.27	2.48
B-3	45	45	180	180.4	4	4.01	0.34	0.33	2.14	2.07
B-4	72.50	87.5	180	225	2.48	2.57	0.25	0.26	1.56	1.66
B-5	120	140	195	187.5	1.63	1.34	0.14	0.23	0.86	1.47

4 结论

1)冷弯薄壁型钢梁的荷载-位移滞回曲线、弯矩-曲率滞回曲线比较饱满,没有明显的捏缩现象,发生大变形破坏,破坏时在上下翼缘出现局部屈曲,具有很好的延性和耗能能力。

2)同等条件下,跨高比越大的构件,屈服荷载值、极限荷载值越小,但所对应的位移值越大;随跨高比的增大,梁的延性比、等效粘滞系数、能量耗散系数会逐渐减小。

3)同等条件下,跨高比对相同截面的方钢管冷弯薄壁型钢梁的屈服弯矩影响不大,极限弯矩也较接近;但跨高比越大,屈服弯矩、极限弯矩所对应的曲率增大。

4)同等条件下,宽厚比大的构件,屈服荷载值、极限荷载值小,极限荷载所对应的位移值也较小;随宽厚比的增大,其延性比、等效粘滞系数及能量耗散系数比一般会逐渐减小。

5)建立的冷弯薄壁型钢梁非线性有限元模型能够预测冷弯薄壁型钢梁在反复荷载作用下的荷载-位移滞回性能和骨架曲线,计算结果与实测结果基本吻合,可以进一步应用冷弯薄壁型钢梁的参数影响分析计算。

参考文献:

- [1] GB 50018 - 2002,冷弯薄壁型钢结构技术规范[S].
- [2] 钟国辉.冷弯薄壁型钢在房屋建筑中的研究与发展[J].建筑钢结构进展,2006,4(4):31-38.
- [3] MACDONALD M, HEIYANTUDUWA M A, RHODES J. Recent developments in the design of cold-formed steel members and structures[J].Thin-Walled Structures, 2008(46):1047-1053.
- [4] 葛继平.循环荷载作用下方钢管混凝土柱与钢梁连接节点的非线性有限元分析[D].福州:福州大学,2004.
- [5] 方圣恩.冷弯薄壁槽钢腹板压屈及弯压有限元分析和设计[D].福州:福州大学,2004.

(责任编辑 刘存英)

冷弯薄壁型钢梁的滞回性能研究

作者: [谢兆平](#), [宗周红](#), [林晓东](#), [XIE Zhao-ping](#), [ZONG Zhou-hong](#), [LN Xiao-dong](#)
作者单位: [谢兆平, 林晓东, XIE Zhao-ping, LN Xiao-dong \(莆田学院土木建筑工程系, 福建, 莆田, 351100\)](#), [宗周红, ZONG Zhou-hong \(福州大学土木工程学院, 福建, 福州, 350108\)](#)
刊名: [河北工程大学学报 \(自然科学版\)](#) 
英文刊名: [JOURNAL OF HEBEI UNIVERSITY OF ENGINEERING \(NATURAL SCIENCE EDITION\)](#)
年, 卷(期): 2009, 26 (3)

参考文献(5条)

1. GB 50018-2002. 冷弯薄壁型钢结构技术规范
2. 钟国辉. 冷弯薄壁型钢在房屋建筑中的研究与发展[期刊论文]-[建筑钢结构进展](#) 2006 (04)
3. MACDONALD M; HEIYANTUDUWA M A; RHODES J Recent developments in the design of cold-formed steel members and structures[外文期刊] 2008 (46)
4. 葛继平. 循环荷载作用下钢管混凝土柱与钢梁连接节点的非线性有限元分析 2004
5. 方圣恩. 冷弯薄壁槽钢腹板屈服及弯压有限元分析和设计 2004

本文读者也读过(10条)

1. [谢兆平](#). [Xie Zhao-ping](#) 冷弯薄壁型钢梁的弯矩-曲率滞回性能试验研究[期刊论文]-[广东工业大学学报](#) 2009, 26 (3)
2. [赵金城](#). [房庆强](#). [李亚明](#) 上海科技馆主楼模型风洞试验研究[期刊论文]-[工业建筑](#)2001, 31 (10)
3. [车松岩](#). [赵金城](#) 钢结构工程中的“冷桥”及其处理方法[期刊论文]-[钢结构](#)2004, 19 (4)
4. [李博](#). [李瑞峰](#). [白凤娟](#). [Li-Bo](#). [Li Rui-feng](#). [Bai Feng-juan](#) 门式刚架梁柱端板斜放螺栓连接节点抗震性能试验研究[期刊论文]-[重庆建筑](#)2010, 09 (6)
5. [罗旗帜](#). [刘光栋](#). [杜嘉斌](#). [LUO Qi-zhi](#). [LIU Guang-dong](#). [Du Jia-bin](#) 薄壁曲线箱梁剪力滞效应的梁段有限元法[期刊论文]-[湖南大学学报 \(自然科学版\)](#) 2006, 33 (5)
6. [赵金城](#). [许洪明](#) 上海科技馆单层网壳结构节点受力分析[期刊论文]-[工业建筑](#)2001, 31 (10)
7. [刘飞](#). [李元齐](#). [张继承](#). [LIU Fei](#). [LI Yuan-qi](#). [ZHANG Ji-cheng](#) 低层冷弯薄壁型钢结构抗震性能分析[期刊论文]-[长江大学学报 \(自科版\)理工卷](#)2009, 6 (1)
8. [苏庆](#). [孙凌玉](#). [Su Qing](#). [Sun Lingyu](#) 闭口帽型薄壁梁压溃历程的精确仿真[期刊论文]-[农业机械学报](#)2007, 38 (7)
9. [林晓东](#). [宗周红](#) 冷弯薄壁方钢管混凝土梁的荷载-位移滞回性能研究[期刊论文]-[韶关学院学报](#)2009, 30 (9)
10. [乔磊](#). [杨庆山](#). [杨娜](#). [QIAO Lei](#). [YANG Qingshan](#). [YANG Na](#) 门式刚架柱滞回性能研究[期刊论文]-[北京交通大学学报](#)2010, 34 (4)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_hbjzkjxyxb200903008.aspx