引用格式：马斐，王学宁，宋良龙，等. 双肢冷弯C型钢吊架系统受力性能的试验研究[J]. 工业建筑，2026，56(1)：55-60. MA Fei，WANG Xuening，SONG Lianglong，et al. Experimental Research on the Mechanical Properties of Double-Limb Cold-Framed C-Shaped Steel Hanger Systems[J]. Industrial Construction，2026，56(1)：55-60 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25032601

双肢冷弯C型钢吊架系统受力性能的试验研究*

马　斐[1]　王学宁[1]　宋良龙[2]　郭　彤[3]

（1. 中国电子系统工程第二建设有限公司，江苏无锡　214111；2. 河海大学土木与交通学院，南京　210024；3. 东南大学土木工程学院，南京　210096）

摘　要　为研究冷弯薄壁构件应用于高大工业厂房吊架系统的可行性，提出了一种双肢冷弯C型钢吊架系统。考虑不同的吊架梁跨度、荷载设计值和C型钢腹板间连接缀板的数量，对6个实尺双肢冷弯C型钢吊架系统模型进行了静力加载试验，研究了吊架系统模型在设计均布荷载作用下和二次集中荷载作用下的变形模式和力学性能。试验结果表明，所有吊架系统模型在设计均布荷载作用下均满足承载力要求，在二次集中荷载作用下的整体和局部破坏模式分别为吊架梁的整体弯扭失稳和受压翼缘板的局部屈曲；在双肢冷弯C型钢腹板之间设置连接缀板能够提高吊架系统的刚度、极限承载力和变形能力。

关键词　冷弯薄壁C型钢；吊架梁；破坏模式；极限承载力

Experimental Research on the Mechanical Properties of Double-Limb Cold-Framed C-Shaped Steel Hanger Systems

MA Fei[1]　WANG Xuening[1]　SONG Lianglong[2]　GUO Tong[3]

(1. *China Electronics System Engineering No. 2 Construction Co., Ltd., Wuxi* 214111, *China*; 2. *College of Civil Engineering and Transportation, Hohai University, Nanjing* 210024, *China*; 3. *School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing* 210096, *China*)

Abstract: In order to study the feasibility of applying cold-formed thin-walled members in the hanger system of tall industrial plants, a double-limb cold-formed C-shaped steel hanger system was proposed. Considering different spans of the hanger beams, design load values, and the number of connecting batten plates between the webs of the C-sections, static load tests were conducted on six full-scale double-limb cold-formed C-shaped steel hanger system models to investigate their deformation patterns and mechanical properties under the design uniformly distributed loads and the successive concentrated loads. The test results indicated that all hanger system models met the bearing capacity requirements under the design uniformly distributed loads. The global and local failure modes under the successive concentrated loads were overall flexural-torsional buckling of the hanger beam and local buckling of the compressive flange plate, respectively. The installation of connecting batten plates between the double-limb cold-formed C-section steel webs enhanced the stiffness, ultimate bearing capacity and deformation capacity of the hanger system.

Keywords: cold-formed thin-walled C-shaped steel; hanger beam; failure mode; ultimate bearing capacity

* 中国电子系统工程第二建设有限公司企业研发项目(824093116)。

第一作者：马斐，硕士研究生，高级工程师，主要从事结构工程研究。

电子信箱：mafei@cese2.com

收稿日期：2025-03-26

© 2026 工业建筑

0　前　言

随着全球科技的不断进步和能源结构的深刻变革，新能源产业已成为推动经济增长和技术创新的重要力量之一，与其相关的工业厂房的吊架系统的设计优化需求逐渐增加。冷弯薄壁型钢构件具有轻质高强、运输安装方便、节能环保、经济高效、截面形状灵活等优点[1-2]，在吊架系统的结构设计中具有极大的开发及优化潜力。

目前，国内外许多学者对冷弯薄壁型钢梁构件进行了研究。张耀春等[3]通过纯弯和非纯弯试验研究了卷边形式对冷弯薄壁C型截面受弯构件破坏模式和承载力的影响，结果表明冷弯薄壁型钢C型截面构件的受弯承载力在非纯弯状态下相比纯弯状态有所提高，且提高幅度主要取决于屈曲模式，畸变屈曲时提高显著，局部屈曲时提高有限。周绪红等[4]对6个单肢冷弯薄壁C型钢梁和18个双肢冷弯薄壁C型钢梁进行了受弯性能试验，指出双肢C型钢梁的承载力大于2倍的单肢C型钢梁的承载力。石宇等[5-6]基于双拼冷弯薄壁C型钢梁的破坏性试验建立了双拼C型钢梁的有限元分析模型，通过参数化分析方法研究了梁长度、腹板高厚比、翼缘宽厚比、材料特性等因素对构件承载力的影响规律，并提出了计算双拼冷弯薄壁C型钢梁极限承载力的有效宽度法和折减强度法。杨志坚等[7]通过纯弯试验研究了双肢C型钢梁的承载能力、变形特征和破坏形态等，指出增大C型钢腹板之间的连接螺钉间距会降低试件的变形能力，但对承载力影响很小。袁焕鑫等[8]通过三点受弯试验研究了嵌套加强的LQ550高强冷弯薄壁C型钢连续檩条的承载性能和破坏形态，并采用非线性有限元模型分析了嵌套方式和嵌套长度对檩条承载力的影响规律。Wang等[9]对35个不同螺钉布置方式的双拼冷弯薄壁C型钢梁进行了试验和有限元分析，结果表明直接强度法设计方程可以很好地预测双拼冷弯薄壁C型钢梁的承载力设计值。Jeyaragan等[10]通过冷弯薄壁C型钢梁的受弯试验指出，与单肢C型钢梁相比，采用双肢C型钢梁可大幅提高构件的受弯承载力，并可减少畸变屈曲的发生。Roy等[11]对通过自攻螺钉拼合的双肢冷弯薄壁C型钢梁进行了12组试验，并通过有限元模型分析了螺钉间距对此类双拼C型钢梁抗弯承载力的影响，研究表明：螺钉间距对双肢C型钢梁抗弯承载力的影响较小。El-Taly等[12]研究了不同形式的腹板加劲肋对双肢冷弯薄壁C型钢梁受弯性能的影响规律，指出腹板加劲不能有效提高梁的极限承载力，但能增加梁的延性。此外，Roy等[13]通过试验和数值模拟研究了带间隙双肢冷弯薄壁C型钢梁的抗弯承载力，此类双肢C型钢梁由自攻螺钉和连接槽钢拼合而成，研究发现：连接槽钢间距对带间隙双肢C型钢梁的抗弯承载力的影响较小，但2个单肢C型钢间隙大小的影响较大。Wang等[14]研究了通过螺栓和连接钢板拼合而成的带间隙双肢冷弯薄壁C型钢梁的受弯性能，并通过参数化有限元分析方法考察了连接钢板螺栓布置方式、连接板间距、腹板高度比、C型钢间隙以及梁长度等参数对带间隙双肢C型钢梁受弯性能的影响。

实际工程中，冷弯薄壁C型钢梁已广泛应用于钢结构住宅的楼盖和屋盖系统中，但在工业厂房吊架系统中的应用和研究较少。为此，本文对6个实尺双肢冷弯C型钢吊架系统模型进行了静载试验，研究了吊架系统模型在设计均布荷载作用下的变形性能和二次集中荷载作用下的破坏模式和极限承载力，以推动冷弯薄壁型钢构件在高大工业厂房吊架系统中的发展与应用。

1　双肢冷弯C型钢吊架系统

本文所研究的双肢冷弯C型钢吊架系统如图1所示，包括结构钢梁、吊挂钢板、钢吊杆、檩托连接钢板和双肢冷弯C型钢吊架梁。钢吊杆的顶部通过吊挂钢板连接于结构钢梁的底部，钢吊杆的底部通过檩托连接钢板连接于双肢冷弯C型钢吊架梁。2个竖直吊杆的下吊点位于吊架梁两端，2个斜吊杆的下吊点位于吊架梁长度的三等分点处，4个钢吊杆将吊架梁分为2个边跨和1个中跨。钢吊杆的端部设有连接钢板，而在中部设有调节其长度的花篮螺丝张紧器。檩托连接钢板为倒T型钢板，其翼缘板托住双肢冷弯C型钢吊架梁的下翼缘，其腹板插入双肢冷弯C型钢吊架梁的腹板之间并伸出腹板外，倒T型钢板的腹板和C型钢的肢背之间采用螺栓固定连接。此外，双肢冷弯C型钢吊架梁的腹板之间可设置连接缀板以增加吊架梁的整体性。

2　试验概况

2.1　试件设计

为了研究不同设计工况下双肢冷弯C型钢吊架系统的受力性能，对典型新能源行业工业厂房的吊

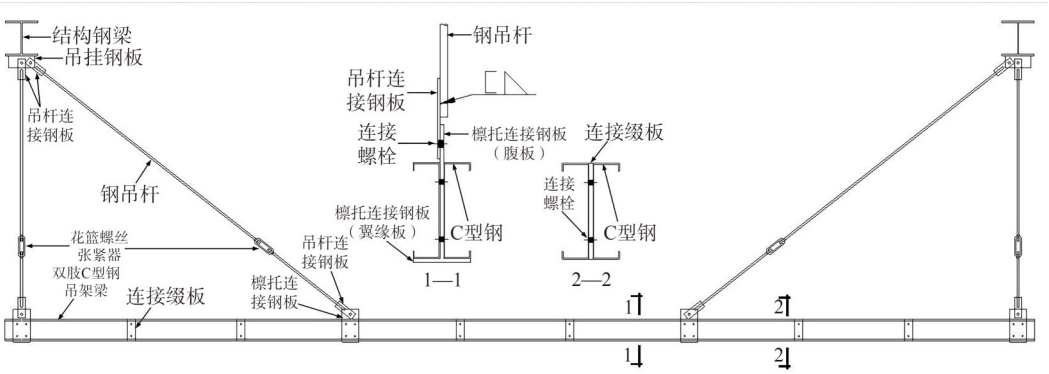


图 1　双肢冷弯 C 型钢吊架系统结构示意

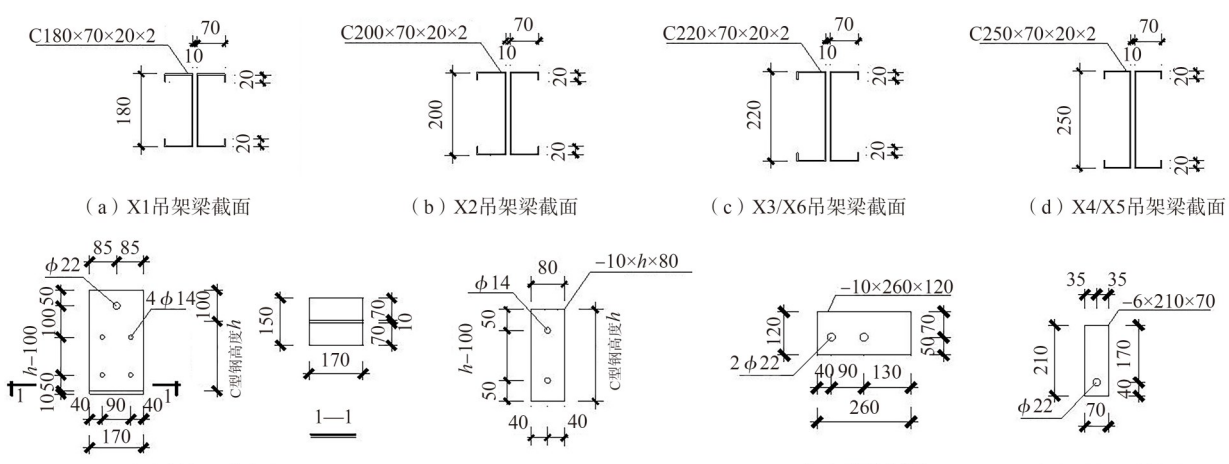
Fig. 1　Structural schematic diagram of double-limb cold-formed C-shaped steel hanger system

架系统进行了荷载统计，并相应设计了 6 个实尺吊架系统，试验模型的主要参数见表 1。模型 X1~X3 的吊架梁跨度均为 10 m，用于研究不同的荷载设计值和吊架梁截面尺寸时吊架系统的受力性能；模型 X3 和 X6 的吊架梁截面尺寸相同，但吊架梁跨度和相应的荷载设计值不同，用于对比研究不同吊架梁跨度对吊架系统受力性能的影响；模型 X1~X4 的吊架梁腹板之间均未连接缀板，而模型 X5 在模型 X4 的基础上设置了 6 个连接缀板并沿着吊架梁长度方向均匀布置，用于研究连接缀板对吊架系统受力性能的影响。所有吊架系统模型的竖直吊杆长度均为 2 m，吊杆直径为 20 mm。檩托连接钢板、吊挂钢板、吊杆连接钢板和连接缀板的尺寸如图 2 所示。檩托连接钢板和连接缀板分别采用 4 个和 2 个 M12 螺栓与吊架梁连接。吊杆连接钢板与吊挂钢板，以及吊杆连接钢板与檩托连接钢板的连接均采用 1 个 M12 螺栓。钢板和 C 型钢吊架梁均采用 Q235B 级钢。

表 1　吊架系统试验模型参数

Table 1　Parameters of hanger system test models

模型编号	吊架梁截面/mm	吊架梁跨度/m	荷载设计值/（kN·m^{-1}）	缀板总数
X1	2C180×70×20×2	10	0.864	0
X2	2C200×70×20×2	10	1.080	0
X3	2C220×70×20×2	10	2.970	0
X4	2C250×70×20×2	10	3.726	0
X5	2C250×70×20×2	10	3.726	6
X6	2C220×70×20×2	8	4.658	0



（a）X1吊架梁截面　（b）X2吊架梁截面　（c）X3/X6吊架梁截面　（d）X4/X5吊架梁截面

（e）檩托连接钢板　（f）连接缀板　（g）吊挂钢板　（h）吊杆连接钢板

图 2　吊架系统试验模型的组件尺寸　mm

Fig. 2　Test model components dimensions of the hanger system

2.2　试验加载与量测方案

试验加载装置如图 3 所示，吊架系统模型通过 4 个钢吊杆悬吊于反力架立柱侧面钢牛腿的下部。考虑吊架梁主要承受管线荷载，管线通常沿构件长度方向均匀铺设，因此管线荷载可近似为均布荷载。为了在试验中模拟施加设计均布荷载，分别在

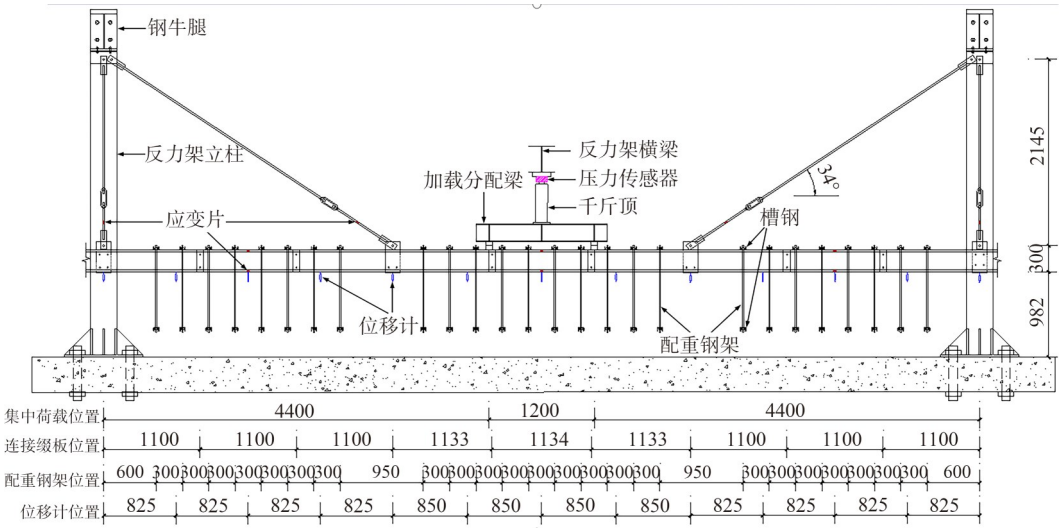


图3　试验加载装置示意　mm

Fig. 3　Schematic diagram of loading devices

吊架梁的边跨和中跨上沿长度方向均匀布置配重钢架,每个配重钢架由上下2个槽钢通过2个螺杆连接而成。配重钢架的上部槽钢吊挂于吊架梁的上翼缘,在下部槽钢放置配重钢筋。

试验采用两阶段分级加载方案:第一阶段(加载阶段Ⅰ),通过在配重钢架上放置配重钢筋来模拟设计均布荷载;第二阶段(加载阶段Ⅱ),在第一阶段荷载基础上,采用液压千斤顶在吊架梁中跨施加两点对称集中荷载,直至吊架系统发生破坏不能继续承载为止。试验过程中记录吊架梁沿长度方向的位移、吊架梁各跨的跨中上下翼缘处应变和吊杆应变等数据,集中荷载采用轮辐式压力传感器测定,采用直线位移传感器进行位移测量,所有测点数据均由高速静态应变测试分析系统进行数据采集。



(a)集中荷载加载点附近处的受压翼缘局部屈曲



(b)集中荷载加载点处的受压翼缘局部屈曲

图4　吊架梁的局部屈曲破坏模式

Fig. 4　Typical local failure modes of hanger beams

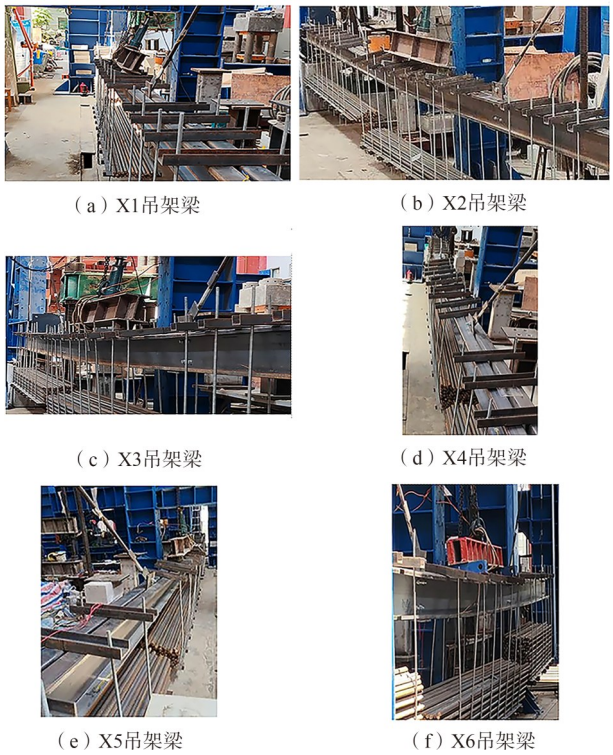
3　试验结果及分析

3.1　破坏模式

在加载阶段Ⅰ,随着配重钢筋数量的不断增加,吊架梁竖向位移均持续增大,但所有吊架系统模型均未出现整体或局部破坏;吊架梁未发生整体和局部失稳,吊架梁和吊杆的最大应变分别为784×10^{-6}和550×10^{-6},均小于钢材的屈服应变(1150×10^{-6})。在加载阶段Ⅱ,随着荷载的增大,在集中荷载加载点及附近处的受压翼缘板件首先出现局部屈曲(图4);当集中荷载达到极限荷载时,吊架梁发生整体弯扭失稳(图5)。

3.2　吊架梁位移和荷载-位移曲线

吊架梁在加载阶段Ⅰ和Ⅱ的试验结果如表2所示。在加载阶段Ⅰ,吊架梁在设计均布荷载作用下沿吊架梁长度方向的竖向位移曲线如图6所示。由图6(a)、表2可见,对于跨度均为10 m的试验模型X1~X3,吊架梁截面尺寸和对应的设计荷载作用逐渐增大,相应的吊架梁跨中竖向位移也逐渐增加,分别为17.6,25.49,44.2 mm;减小跨度能够显著减小吊架梁的竖向位移,如模型X6和X3的截面尺寸相同,但模型X6的跨度为8 m,所受到的设计均布荷载作用比试件X3增加了56.81%,其跨中竖向位移比模型X3降低了18.78%,为35.90 mm。图6(b)考察了C型钢腹板之间的连接缀板数量对吊架梁在设计均布荷载作用下竖向位移曲线的影响规律。



（a）X1吊架梁　（b）X2吊架梁

（c）X3吊架梁　（d）X4吊架梁

（e）X5吊架梁　（f）X6吊架梁

图 5　吊架梁的整体弯扭失稳破坏模式

Fig. 5　Overall torsional-flexural buckling failure modes of hanger beams

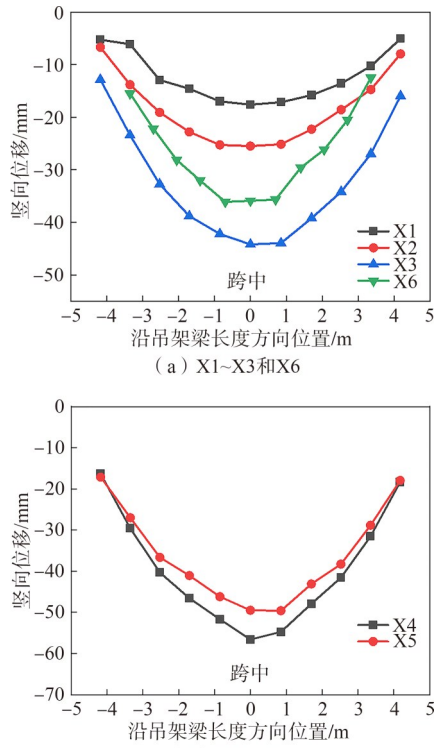
表 2　吊架系统模型试验结果

Table 2　Test results of hanger system models

模型编号	加载阶段Ⅰ	加载阶段Ⅱ	
	跨中竖向位移/mm	最大荷载/kN	最大荷载对应位移/mm
X1	17.60	26.08	64.81
X2	25.49	20.69	48.15
X3	44.20	20.96	42.56
X4	56.60	8.05	20.39
X5	49.50	9.71	22.06
X6	35.90	25.41	33.18

可以看出，对于无缀板的模型X4，其在设计均布荷载作用下的跨中竖向位移为56.60 mm。与模型X4相比，模型X5的截面尺寸、跨度和所受到的设计均布荷载作用均相同，但模型X5在C型钢腹板之间共设置了6个连接缀板来增加构件截面的整体性，其跨中竖向位移比模型X4降低了12.54%，为49.50 mm。

在加载阶段Ⅱ，吊架梁的竖向荷载-跨中竖向位移曲线如图7所示。由图7(a)可知，对于未设置连接缀板的吊架梁试验模型，其破坏前的荷载-位移曲线均基本呈直线；试验模型X1~X3和X6的二次加载极限承载力分别为26.08，20.69，20.96，25.41 kN，对应的跨中竖向位移分别为64.81，48.15，42.56，33.18 mm，在二次加载的荷载值达到

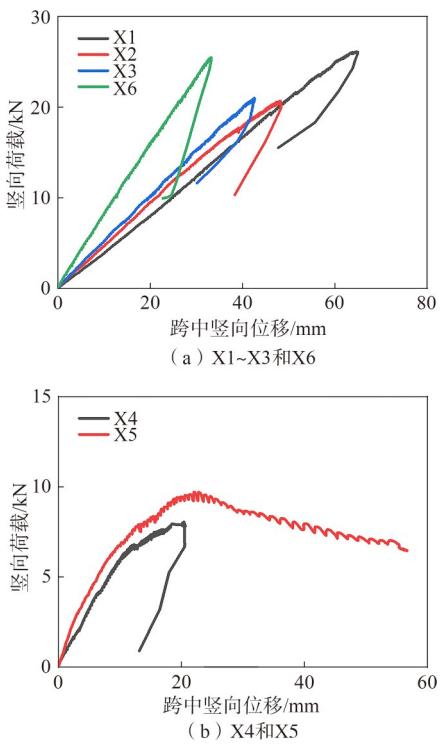


（a）X1~X3和X6

（b）X4和X5

图 6　加载阶段Ⅰ设计均布荷载作用下吊架梁的竖向位移

Fig. 6　Vertical displacement curves of hanger beams under the design uniformly distributed loads during loading stage Ⅰ



（a）X1~X3和X6

（b）X4和X5

图 7　加载阶段Ⅱ吊架梁竖向荷载-跨中竖向位移曲线

Fig. 7　Vertical load versus mid-span vertical displacement curves of hanger beams during loading stage Ⅱ

极限承载力后吊架梁突然破坏，延性较差；模型二次加载时的刚度随着构件截面尺寸的增大和跨度

的减小而增大。由图7(b)可知,未设置连接缀板的试验模型X4在二次加载跨中竖向位移为20.39 mm时,达到极限承载力8.05 kN;与试验模型X4相比,设置6个连接缀板的试验模型X5的二次加载刚度和极限承载力均更大,二次加载极限承载力为9.71 kN,对应的跨中竖向位移为22.06 mm,且达到极限承载力后荷载随着二次加载位移的增大逐渐减小,直至最终破坏,延性较好。这主要是由于连接缀板可增强双肢C型钢梁的整体性和拼合效应,通过提高构件刚度和抑制局部屈曲来提高延性,其作用类似于双肢C型钢梁腹板之间的连接螺钉[4]或连接钢板[14]。

4　结　论

通过对双肢冷弯C型钢吊架系统试验模型的受力性能进行试验研究,得出以下结论:

1)所提出的双肢冷弯C型钢吊架系统在设计均布荷载作用下,吊架梁未发生整体和局部失稳,且吊架梁和吊杆的最大应变均小于钢材的屈服应变,能够满足承载力要求。

2)在设计荷载作用下,吊架梁的跨中竖向位移随截面尺寸及相应设计荷载的增大而增加;同时,减小跨度可有效降低跨中竖向位移。

3)双肢冷弯C型钢吊架系统的整体破坏模式均表现为弯扭失稳,局部破坏模式为集中荷载加载点及附近处的受压翼缘板屈曲。在整个试验过程中,吊架系统的钢吊杆及其连接节点均保持完好。

4)在双肢冷弯C型钢吊架梁腹板之间设置连接缀板能够一定程度地提高吊架系统的刚度、极限承载力和变形能力。

参　考　文　献

[1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 冷弯薄壁型钢结构技术规范:GB 50018—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003.

[2] YE J, MOJTABAEI S M, HAJIRASOULIHA I, et al. Strength and deflection behaviour of cold-formed steel back-to-back channels[J]. Engineering Structure, 2018, 177: 641-654.

[3] 张耀春, 王海明. 冷弯薄壁型钢C形截面构件受弯承载力试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(3): 53-61.

[4] 周绪红, 管宇, 高婷婷, 等. 双肢拼合冷弯薄壁型钢工字形截面梁受弯性能研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(8): 16-27.

[5] 石宇, 周绪红, 苑小丽, 等. 冷弯薄壁卷边槽钢组合工字梁极限承载力计算的有效宽度法[J]. 土木工程学报, 2011, 44(6): 8-17.

[6] 石宇, 周绪红, 聂少锋, 等. 冷弯薄壁卷边槽钢组合工字梁极限承载力计算的折减强度法[J]. 工程力学, 2011, 28(9): 174-182.

[7] 杨志坚, 魏顺利, 苏志华, 等. 双拼C型钢梁纯弯性能试验分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2022, 44(3): 355-360.

[8] 袁焕鑫, 房铭坤, 杜新喜, 等. 嵌套加强的LQ550高强冷弯薄壁C型钢连续檩条受力性能研究[J]. 建筑结构, 2024, 54(1): 66-71.

[9] WANG L P, YOUNG B. Behaviour and design of cold-formed steel built-up section beams with different screw arrangements [J]. Thin-Walled Structures, 2018, 131: 16-32.

[10] JEYARAGAN S, MAHEN M. Flexural behavior and design of the new built-up lite steel beams[C]// Proceedings of 19th International Specialty Conference on Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction. St. Louis: 2008.

[11] ROY K, LAU H H, TING T C, et al. Flexural behaviour of back-to-back built-up cold-formed steel channel beams: experiments and finite element modelling [J]. Structures, 2021, 29: 235-253.

[12] EL-TALY B, EL-SHAMI M. Structural performance of cold-formed steel face-to-face and back-to-back beams[J]. International Journal of Civil Engineering, 2021, 19(12): 1427-1444.

[13] ROY K, LAU H H, TING T C, et al. Flexural capacity of gapped built-up cold-formed steel channel sections including web stiffeners[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 172: 106154.

[14] WANG L, DAWUD M B, CAI Y. Flexural behavior and design of cold-formed steel gapped back-to-back built-up beams with discontinuous connecting plates [J]. Thin-Walled Structures, 2024, 205: 112548.