

一种新型连梁拟静力加载方案及其试验验证

侯 炜^{1,2}, 陈 彬^{1,2}, 柴振岭^{1,2}, 郭子雄^{1,2}

(1. 华侨大学土木工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 连梁作为剪力墙结构和核心筒的重要耗能构件, 在房屋抵抗地震中起到第一道防线的作用。由于模拟连梁真实的边界条件和受力状态较难实现, 所以连梁低周反复加载试验成为最难的结构试验之一。针对实现试件平动以及对中加载等问题, 各国学者也提出了不同的加载方案。本文首先对已有加载方案和试验装置进行综述, 借此考察和分析现有试验条件的优缺点, 并自行加工制作了一套可实现连梁边界条件和受力形式的加载装置。该加载装置在试件一侧布置两个竖向作动器从而能够保证连梁保持上下转角一致, 并监控作动器受力情况, 结果表明两个竖向加载器对试验的受力影响较小。通过对内嵌钢板混凝土组合连梁的低周反复荷载试验, 验证了该加载装置的可行性和适用性, 试验结果达到预期目标, 数据可靠, 该试验方案可供选择使用。

关键词: 连梁; 边界条件; 拟静力试验; 加载装置

中图分类号: TU398

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)02-0207-08

A new pseudo-static loading program of coupling beams and its test verification

HOU Wei^{1,2}, CHEN Bin¹, CHAI Zhenlin^{1,2}, GUO Zixiong^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Key Laboratory for Structure Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

Abstract: As an important energy dissipation component of coupling shear wall system and core tube, the coupling beam played the first seismic line function in the building. Simulating the real boundary condition and the stress state of the coupling beam is difficult to accomplish, so the reversed cyclic loads test of the coupling beam is to become the one of the most difficult structural tests. Scholars of different countries have put forward different loading method to address such issues as keeping the specimen horizontal, aligning to load and soon. This paper summarized the previous loading method and test device, and took the investigation and analysis of the advantages and disadvantages of previous tests, then designed and manufactured a suitable loading device to realize the boundary condition of the coupling beam. Loading device was installed at both sides of the two vertical actuator to ensure the both side of the coupling beam to keep some angle. Load of the vertical actuator is recorded in the process, to analyze the change of loading. Two vertical factors have less influence on the force of test. The reversed cyclic loading test of embedded steel plate reinforced concrete coupling beams was conducted using this loading program. The feasibility and applicability of the loading device are proved. The test results is shown that the loading device can achieve the expected goal and that the data are reliable. The new loading program is an alternative program.

Key words: coupling beam; boundary condition; pseudo-static test; loading device

在高层剪力墙结构中, 当受到地震及风荷载作用时, 连梁起到了重要作用, 通过传递到连梁的弯矩及剪力能够有效抵抗荷载和耗散地震能量。连梁抗震性能研究也成为高层建筑抗震的热点和难点^[1]。抗震性能试验研究是工程结构分析的重要手段, 各实验室为实现结构模拟提供必要的技术支持。为了真实模拟连梁的受力状态, 通过试验

装置实现其边界受力条件, 研究者根据自身试验能力和场地, 对加载装置进行设计和改进, 以达到预期试验目的。对试验装置进行设计时, 需要遵循以下几个原则: (1) 连梁的边界条件能够在试验装置上得到真实的反应和可操作的模拟实现; (2) 在单调或往复加载过程中试件可实现较大的水平变形; (3) 加载装置应具备足够的强度防止达到

收稿日期: 2016-06-25

修改稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51308236); 福建省自然科学基金资助项目(2014J05061); 厦门市建设科技基金资助项目(XJK2015-1-3)

作者简介: 侯炜(1981—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事新材料、新型结构及抗震研究。E-mail: houwei302@163.com

最大荷载前自身达到屈服。同时,需要足够大的刚度以防止在加载过程中产生较大变形。应避免由于荷载过大或试件破坏而导致加载设备脱离,保证在试件突然或者脆性破坏情况下的安全性;(4)在试验过程中,试件应固定牢固,从而使水平剪力直接传递至试件上;(5)保证试验过程中试件不发生平面外失稳和破坏。

首先对现有试验装置进行简单介绍,并分析装置特点,在此基础上,根据现有试验条件,提出改进连梁加载试验装置,验证其有效性和合理性,为连梁试验加载提供新的可选方案。

1 连梁拟静力试验特点

1.1 剪力墙连梁受力特点

在水平荷载作用下,双肢剪力墙体系变形及连梁受力变形情况如图1所示。剪力墙受到轴力、剪力和弯矩,使剪力墙产生弯曲变形。在高层建筑中,由于连梁两端墙肢不均匀压缩,也会使连梁产生内力^[2]。剪力墙刚度远远大于连梁刚度,使之相连的连梁产生因剪力墙变形而带来的转动,在墙肢和连梁的相互作用下,连梁产生约束弯矩,剪力梁跨保持不变,并且梁两端产生大小相等方向相反的弯矩,反弯点位于跨中位置。由于连梁受力特点不同于竖向荷载作用下的框架梁,且连梁一般跨度较小,截面高度大,使连梁对剪力十分敏感,在往复荷载作用下,连梁极易形成交叉裂缝,导致连梁剪切破坏。

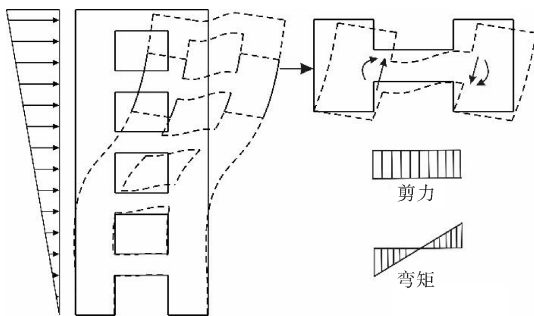


图1 连梁受力变形图

Fig. 1 Force and deformation of coupling beam

1.2 边界条件设定

由于连梁特殊变形和受力特点,在试验过程中采用合适的边界条件对于连梁研究具有重要的意义。通过缩尺试验,对联肢剪力墙进行整体试验加载,施加水平作用力,探究联肢剪力墙中连梁的性能,能够真实地反映连梁的受力及变形情况。但往往由于试验条件、试验研究对象、测试手段等因素常取一根连梁进行试验研究,因此需

要寻找等效于连梁在联肢剪力墙中变形及受力的边界条件。连梁符合一端固定,一端滑动的受力模式,所以在模拟连梁边界条件应满足以下两个条件以达到模拟连梁平剪工作条件:(1)保证连梁两端转角保持一致;(2)连梁弯矩反弯点位于跨中位置。

2 现有连梁试验加载装置

围绕实现连梁边界状态的两个必要条件,国内外研究人员根据自身试验条件研发了多种的试验加载装置。BARNEY^[3]通过对局部联肢剪力墙进行试验,两片剪力墙通过两跨连梁连接,作动器沿连梁试件的中心线进行加载,如图2所示。CIUHANDU和TUDOR^[4]采用如图3所示加载装置。在该方案中,由于多跨连梁共同变形形成平行四边形变形模式,使连梁两端转角保持一致,能够较好地模拟剪力墙连梁的边界条件。以上两种双跨连梁加载方案,由于两个连梁构件共同抵抗荷载,要求两根连梁受力情况一致且每个构件承担1/2的水平承载力才能得到准确的试验结果。若两根连梁由于破坏不同造成的受力不一致,则导致对于分配到每根连梁的承载力无法准确测定。此外,该加载方案试件制作也更为复杂。

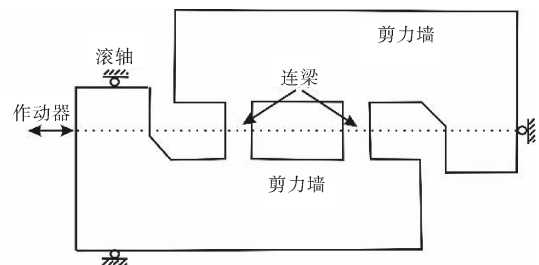


图2 加载装置图(Barney)

Fig. 2 Test setup of Barney

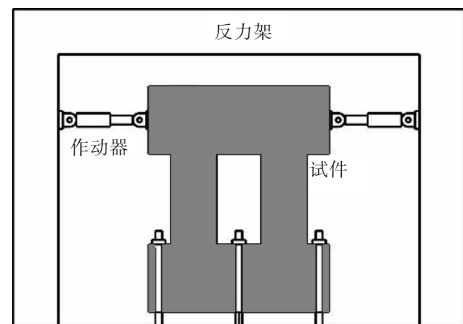


图3 加载装置图(Cinhandu)

Fig. 3 Test setup of Cinhandu

现有绝大部分方案采取针对单根连梁进行试验研究。如PAULAY等^[5]进行交叉斜筋连梁试验

研究的加载装置如图4(a)所示。装置中两个钢臂分别固定在墙肢一侧,而墙肢另一侧一端安设滚轴(滑动支座),另一端安设固定支座,液压作动器安设在两个钢梁之间,作动器的加载中心与连梁中心位置对齐,以保证连梁受力时反弯点在连梁跨中位置。当作动器伸长或缩短时,连梁变形如图4(b)所示。在加载工程中,需保证作动器力作用线在构件中心面内,防止作用线偏离面而使构件受扭。在加载工程中,整个作动器均处于运动状态,需保证作动器良好运作及安全。Galana^[6]采用如图5所示的试验装置进行加载试验,该加载装置存在着连梁端部转角无法保证相同。当试件处于弹性状态时,试件能够正常受力;当试件出现较大裂缝后,两端转角将有明显的不同,从而使拟静力试验后期产生的试验现象及数据不够准确。

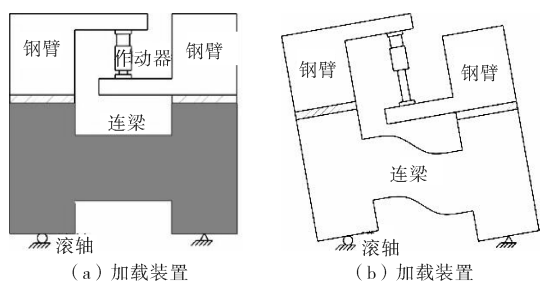


图4 加载装置(Paulay)

Fig. 4 Test setup of Paulay

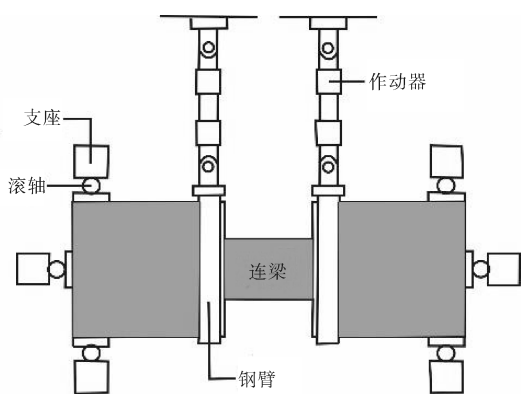


图5 加载装置图(Galano)

Fig. 5 Test setup of Galano

SHAHROOZ^[7]、HARRIS^[8]、PARK^[9]对组合连梁及钢连梁的试验研究中,考虑到钢连梁、组合连梁与墙肢连接锚固以及试件制作问题,往往仅取一半的连梁作为研究对象,采取了如图6所示的加载方式,这种悬臂梁式的加载方案利用连梁反弯点位置弯矩为零,将荷载直接施加于连梁跨中位置。但其得到的破坏形态与整体连梁模型

并不相同,验证节点区受力更为合适一些。

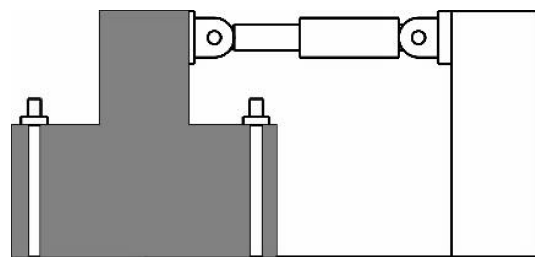


图6 加载装置(Shahrooz/Harries/Park)

Fig. 6 Test setup of Shahrooz

为了更好地实现连梁的安装和加载,更多方案将连梁旋转 90° ,如图7所示。TASSION^[10]、傅剑平等^[11]在小跨高比连梁抗震研究中采用了如图7(a)所示的加载装置。由于达到后期时图7(a)装置L形梁的变形及试件裂缝的发展已不能使L形梁保持平动,皮天祥^[12]采取在试件一侧设置千斤顶,从而限制L形梁发生转动由于连梁变形过程中需实时根据转角调整千斤顶轴力,操作较为复杂,且千斤顶产生的轴力传递至连梁后影响连梁试验结果。有研究人员采取试件两侧设置千斤顶^[13-14],从而保证L形梁保持平动,并平衡千斤顶产生轴力,如图7(c)和图7(d)所示。

在连梁及短柱等以剪切受力为主的构件拟静力加载装置中,最常见为日本“建研式”加载装置,该装置利用新增平行四边形连杆机构和L形加载梁,并将水平作动器安设位于试件 $1/2$ 高处,即为达到反弯点在连梁跨中位置,从而模拟出真实的边界条件。设计时对四连杆的要求较高,需要拥有足够的强度、刚度以及保证各个连接铰在试验过程中良好地工作。建研式的加载方式不仅能够进行纯剪切试验,对于有轴压的短柱剪切试验也能实现。清华大学张刚^[15]及香港大学LAM^[16]连梁加载试验均采用建研式加载方式。如图8所示,图中哑铃状阴影部分代表试件,试件轴线沿竖直方向,试件下端通过刚性地梁固定在试验台座上,为了防止L形加载钢架的平面外平动与转动,在L形加载钢架两侧分别在三个位置共安装了六套侧向约束辊轴,侧向约束辊轴与四连杆转动约束机构约束L形加载钢架的平面外平动与所有转动,从而使L形加载钢架只能在平面内发生平动。

由于建研式加载装置往往需要占据较大的工作场地,且连杆机构的拆卸工作也较为繁琐,因此西安建筑科技大学结构与抗震重点实验室^[17]对建研式加载方式进行了改进,将平行四边形连杆装置巧妙设计和布置,以满足不同的试验要求,

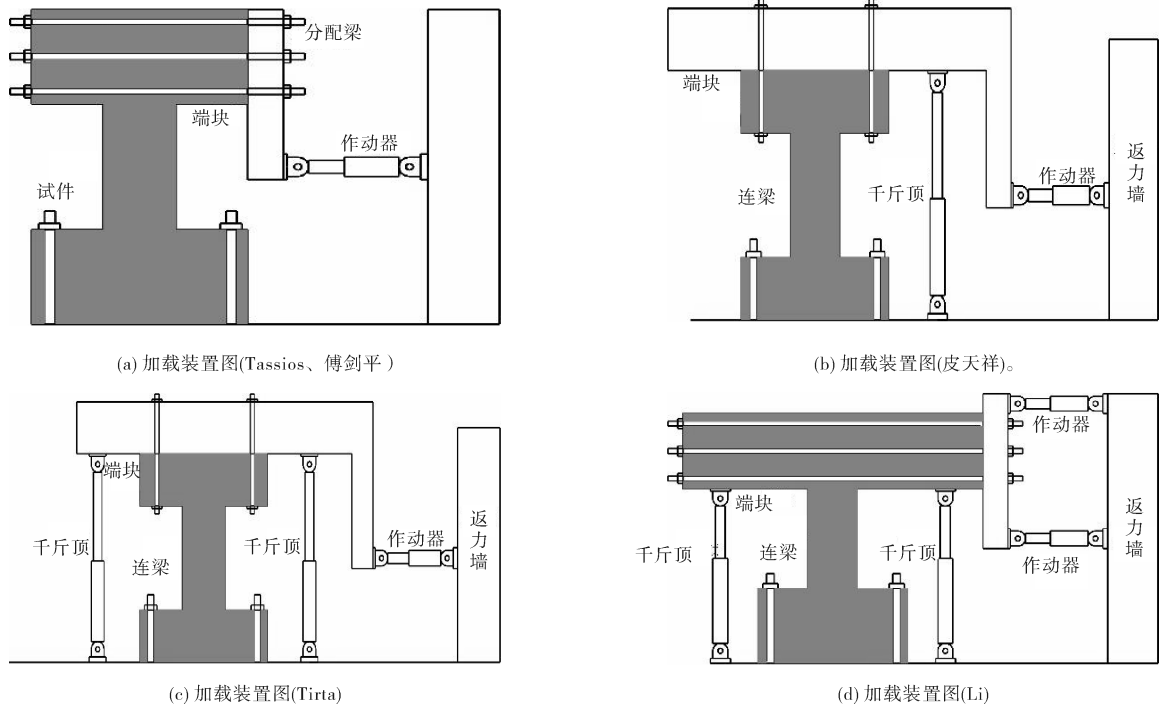


图 7 安设竖向作动器加载装置图

Fig. 7 Test setup of installing the vertical actuators

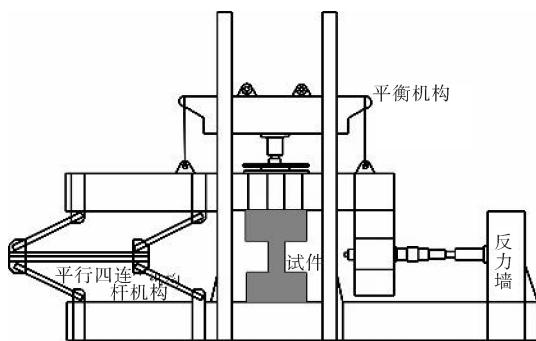


图 8 加载装置图(Lam)

Fig. 8 Test setup of Lam

节约试验场地及安装便利的优势,如图 9 所示.改进装置不仅能够实现纯剪切的大型试验,并且能够完成压弯型试验.然而,该装置由于减小了平行四边形的尺寸,使得试验能力有限,荷载较大加载时可能由于连杆刚度和强度不足造成机构损坏.

SANG^[18]进行对角暗柱预制连梁试验中提出了新型的加载方法(如图 10 所示),通过在竖向钢梁上设置滚轴使 L 型钢梁在设置高度内保持平动,并且具有较大刚度,能够较好的模拟墙肢变形.

随着试验经验和技术的进步,各种不同的加载方案被设计并实施.但由于各科研单位试验条件、能力及场地均有较大差别,加载方案的适用性也不同.现有连梁的试验加载和研究还存在以

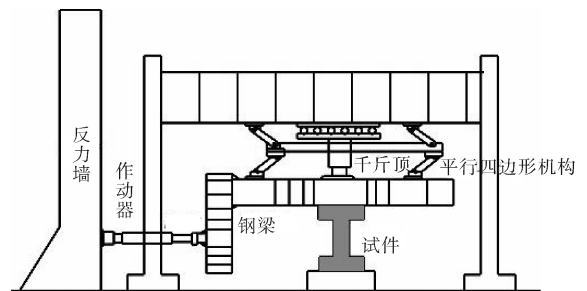


图 9 加载装置图(张兴虎)

Fig. 9 Test setup of Zhang xinghu

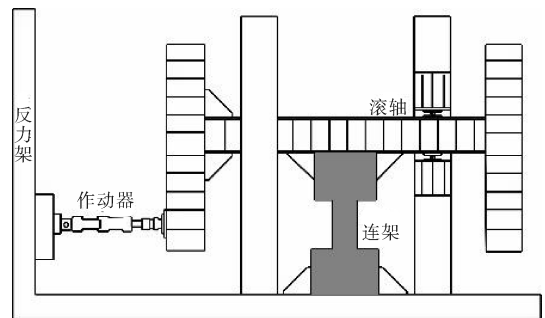


图 10 加载装置图(Sang)

Fig. 10 Test setup of Sang

下几个问题:

(1)现阶段试验,较多进行为单跨连梁的拟静力研究,缺乏对于多跨连梁进行试验研究,进行多跨连梁试验装置需要考虑更多因素作用,尤其是连梁的测点测试方案.

(2)通常,连梁加载方案中不考虑轴力的影

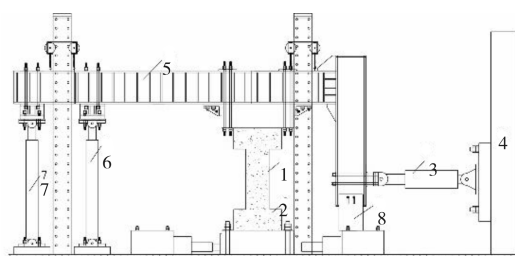
响,如需考虑施加竖向荷载(类似短柱的剪切试验)则更为麻烦。此外,装置本身的各种因素对于连梁试件产生的内力和变形的影响仍需进行进一步探讨。

(3)随着结构工程的发展,测试模型比例也越来越大,越来越复杂(如双连梁、桁架连梁等),对于实验室试验能力的挑战也越来越大,要求试验装置的刚度和强度均应满足测试对象的要求。

3 新型连梁加载方案

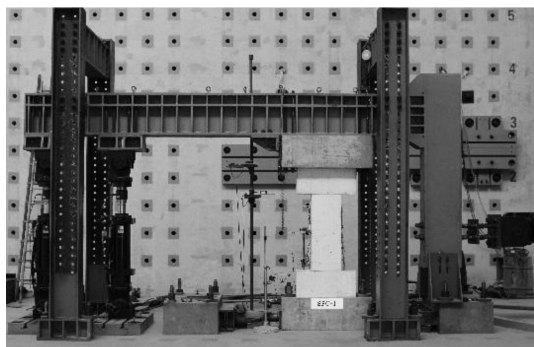
3.1 试验装置

由于连梁抗震性能的试验研究的需要,根据实验室现有条件和能力,课题组改进加工了一套连梁拟静力试验加载装置。试验装置包括反力墙、L型加载梁、两个门式框架、2套500 kN级MTS作动器、1套1000 kN级MTS加载系统,如图11所示。加载装置通过将两个500kN作动器竖立后分别连接地面及L型钢梁,从而形成平行四边形机构。试件承受的水平剪力由1000 kN级MTS水平作动器提供,作动器对准连梁试件中心,保证弯矩反弯点位于连梁跨中位置。在安装或移除试件过程中,通过调节两个竖向作动器的长度保持L型梁水平段水平。



1-连梁;2-墙楼;3-水平作动器;4-反力墙;5-L形加载梁
6-竖向作动器A;7-竖向作动器B;8-侧向约束构件

(a)装置立面示意图



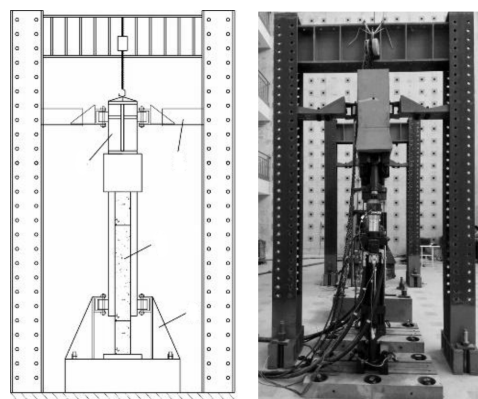
(b)加载装置立面照片

图11 加载装置

Fig. 11 Schematic of test setup

在试验过程中,由于试件制作、加载装置安装误差等因素,容易导致平面外失稳,造成试件

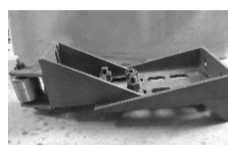
受扭破坏。为了消除平面外扭动,保证试件平面内平动,设计制作了一套侧向支撑装置,如图12所示。支撑由辊轴和连接件组成,可根据需要调整支撑长度。分别在两个门架处及L形加载梁的竖向钢梁处布置,防止L形加载梁出现水平和竖向扭转情况。



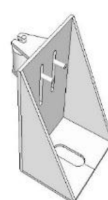
1-试件;5-L型加载梁;
8-侧向约束构件

(a)侧向支撑示意图

(b)侧向支撑照片



(c)梁顶侧向约束构件



(d)加载梁底侧向约束构件

图12 侧向支撑

Fig. 12 Lateral support

3.2 新型试验装置工作原理

将各构件简化为杆件进行结构的力学分析。试件与L形钢梁连接为刚铰,竖向作动器与L形钢梁及地面连接为转动铰支座。集中力施加载至L形竖向拐臂位置。从图13中可得试件受力情况符合连梁实际受力情况。竖向作动器与地面、L形钢梁形成的平行四边形机构,能够使L形钢梁水平段保持平动。在试验过程中水平位移变化使平行四边形机构发生形变,竖向作动器在过程中保持不变,即认为刚度较大杆件,当连梁发生转动时,产生较小的轴向变形,两竖向杆为使L形钢梁保持水平,而产生轴力。根据力学分析,该改进型加载装置能够模拟出连梁的边界及受力情况。

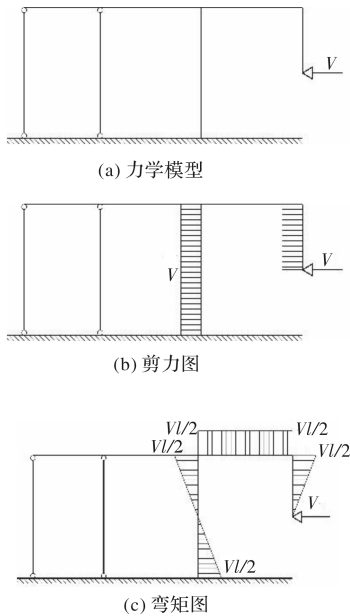


图 13 试验加载装置内力示意图

Fig. 13 Internal force model of test setup

4 连梁试验装置测试及应用实例

4.1 试验概况

对 1 个交叉斜筋钢筋混凝土(CCB)连梁和 5 个钢板混凝土组合(SPRC)连梁进行低周反复荷载试验. 试件平面尺寸为 $2\,500\text{ mm} \times 1\,200\text{ mm}$, 其中连梁截面尺寸为 $160\text{ mm} \times 400\text{ mm}$, 跨度为 $1\,000\text{ mm}$, 跨高比均为 2.5. 如图 11(a)所示, 阴影部分代表拟加载的试件, 试件由连梁、剪力墙及端块组成. 试件下部端块通过螺栓固定在试验台座上, 左右两端用地锚铁块和千斤顶固定, 防止试件滑动. 试件上部端块用 8 根螺栓固定在 L 型钢梁, 两侧通过三角形顶架固定, 使钢梁和端块形成一体, 从而将作动器的荷载更有效地传递到连梁上.

4.2 水平位移与荷载关系

两个竖向作动器分别与实验室台座和 L 型钢梁连接, 目的为保证试件上下两端转角相同, 图 14 为加载过程中装置的受力变形情况. 通过实时监控两作动器的荷载变化, 取其中一个试件试验中两作动器荷载随着位移变化曲线如图 15 所示, A 作动器在整个加载过程成均受拉作用, 最大荷载为 120 kN , B 作动器在加载过程中均受压, 最大荷载达到 160 kN . 在位移荷载图中可以表明在正向加载过程中, AB 作动器均较大受力, 而负方向加载时力较小. 产生的原因主要由于作动器 A、B 放置过近及 L 型钢梁自重引起的. 分别对节点的受力分析, 作动器对连梁有一定的影响, 位移较

大时, 两者合力在竖向方向上产生 40 kN 荷载, 经计算轴压比仅为 0.03, 可以忽略不计; 在水平方向产生 10 kN 荷载, 对水平剪力影响小. 实验过程中观测到 L 形钢梁平动行为良好, 并未产生转动.

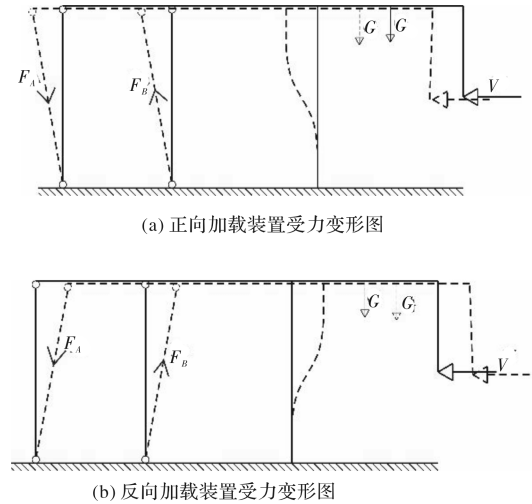
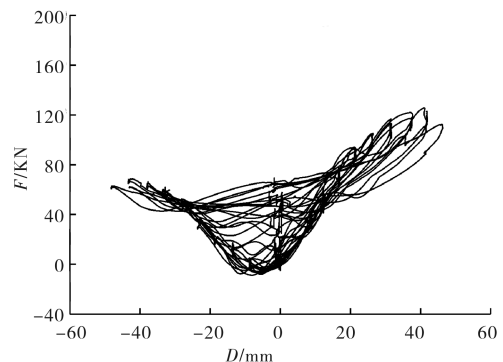
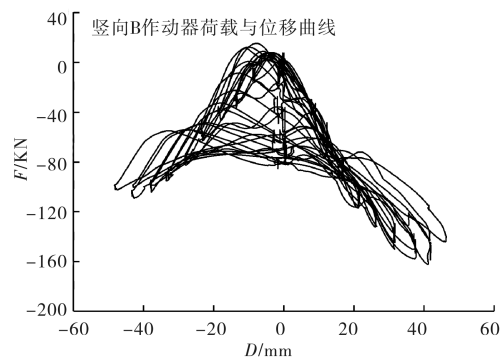


图 14 装置受力与变形

Fig. 14 Loading and deformation of test setup



(a) 作动器A荷载-水平位移关系曲线



(b) B作动器荷载水平位移关系曲线

图 15 作动器荷载-水平位移关系曲线

Fig. 15 Hysteretic curves of vertical actuators

4.3 试验加载结果

以试件 CCB 和试件 SPRC-2 为例进行试验结果说明^[19]. 2 个试件的最终破坏如图 16 所示. 从图 16 中破坏可以看出, 2 个试件均发生弯曲破坏,

两者的塑性铰区域混凝土剥落严重,混凝土剥落分布左右较为对称.在正负方向加载过程中,试件CCB斜向裂缝相互交叉,均衡发展.试件SPRC-2连梁沿纵筋方向两侧均出现钢筋滑移裂缝.右侧裂缝宽度较宽,由于试件制作过程中表层混凝土不密实所致.从图16中可以看出,2个试件的斜向裂缝较为对称,整个试验过程中试件保持平动,验证了加载装置的可行性.

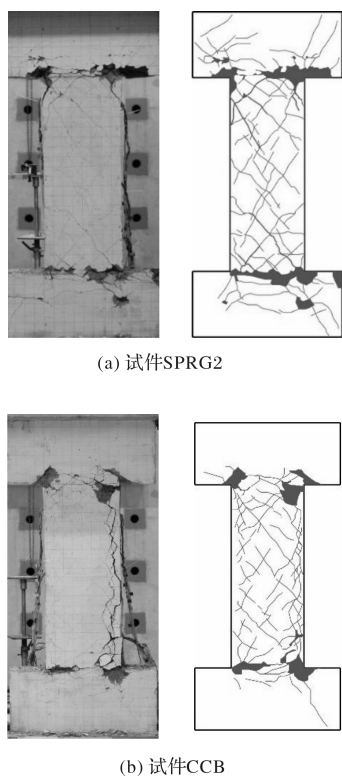


图16 试件破坏形态

Fig. 16 Failure modes of specimens

图17为2个试件的荷载-位移滞回曲线.其中, F 、 D 和 θ 分别为水平荷载、连梁水平位移和位移角.由图可知,试件CCB滞回曲线捏缩明显,而试件SPRC-2滞回曲线呈饱满的梭形,承载力稳定,表现出良好的变形性能和耗能能力.水平作动器荷载在正负方向上承载力大小基本一致,滞回曲线呈中心对称,因此竖向作动器产生的水平分力对于试验的结果影响较小.

4.4 新型加载装置的特点及问题

该装置利用实验室必备的作动器,不需额外制作平衡装置,节省制作成本,且安装简单易行,更具适用性.装置能够实现装置自身产生内力自平衡,在满足连梁平剪受力情况下,对现有设置竖向作动器的试验方案进行改进,从而达到试验目的.通过实时监控竖向作动器荷载,从而保证试验正常进行.由于竖向作动器及L形拐臂梁的

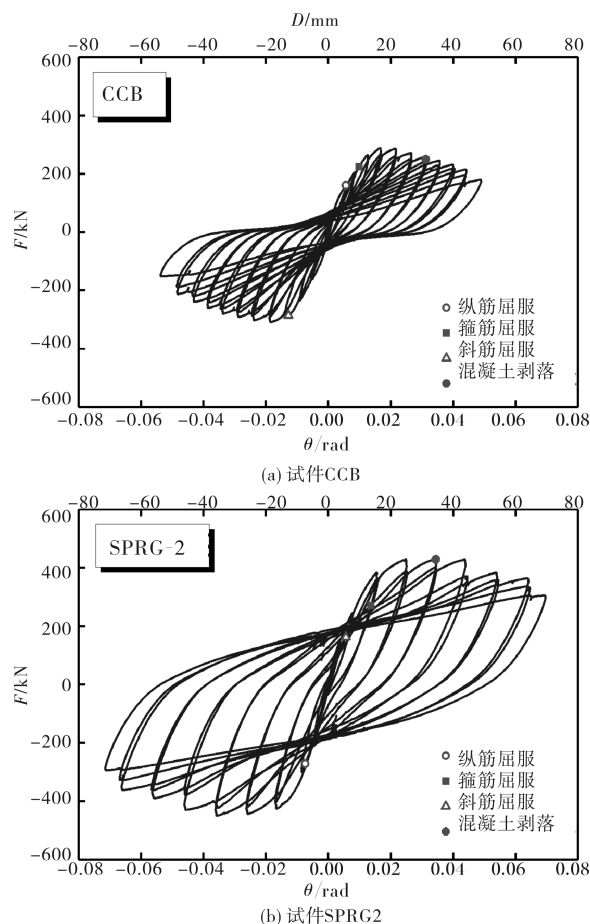


图17 试件滞回曲线

Fig. 17 Hysteretic curves of specimens

组合形式具有较大刚度,能够模拟连梁受到较大剪力墙变形影响,符合真实连梁受力及变形情况.

但该装置仍存在一定的问題:(1)两竖向作动器为使L型钢梁保持平动,施加一定荷载,虽然通过平衡,但仍存在差值,水平位移较小时,差值较小,可以忽略;当位移较大时,由于作动器刚度影响,竖向变形增加,相应差异变大.(2)当进行压剪试验时,该装置仍存在轴力施加困难,且需考虑竖向作动器对轴压的影响.(3)在安设两竖向作动器时,应尽量使两作动器距离相距较远,以减少L形钢梁自重影响,但因场地因素,两个作动器布置过近.

5 结论

(1)连梁受力性能试验是工程结构试验中最难的加载试验之一,要求连梁两端转角相同和连梁跨中位置弯矩为零两个边界条件.此外,应采取必要措施保证试件不发生平面外失稳.

(2)在总结连梁加载方案的基础上,通过力学模型的分析与设计,制作了一套新型连梁拟静力加载装置,该装置通过两个竖向作动器组成了平

行四边形机构, 保证力水平传递, 试件保持平动, 工作原理清晰。

(3) 通过连梁低周反复加载试验, 验证了新型加载装置的可靠性和准确性。该装置简单易行, 具有广泛适用性, 是一种可供选择的加载方案。

参考文献 References

- [1] KWAN A K H, ZHAO Z Z. Testing of coupling beams with equal end rotations maintained and local joint deformation allowed [J]. Structures & Buildings, 2002, 152(1): 67-78.
- [2] TEGOS I A, PENELIS G G. Seismic resistance of short columns and coupling beams reinforced with inclined bars [J]. Aci Structural Journal, 1988, 85(1): 82-88.
- [3] BARNEY G. B, SHIU K. N, RABBAT B G, et al. Earthquake resistance structure walls-test of coupling beams [R]. Skokie, Illinois: Portland Cement Association, 1975
- [4] CIUHANDU G C, TUDOR D. The effect of the restraint shrinkage on the behavior of coupling beams of shear walls, subjected to horizontal alternating loading in duma [C]//Proceedings of the 10th European conference on earthquake engineering. Vienna, Austria; Aa Balkema, 1994
- [5] PAULAY T, BINNY J R. Diagonally reinforced coupling beams of shear walls [J]. American Concrete Institute, Special publication, Farmington Hills, 1974, 42: 579-598
- [6] GALANO L, VIGNOLI A. Seismic behavior of short coupling beams with different reinforcement layouts [J]. Aci Structural Journal, 2000, 97(6): 876-885.
- [7] GONG B, SHAHROOZ B M. Concrete-steel composite coupling beams. I: component testing [J]. Journal of Structural Engineering, 2001, 127(6): 625-631.
- [8] HARRIES K A, MITCHELL D, COOK W D, et al. Seismic response of steel beams coupling concrete walls [J]. Journal of Structural Engineering, 1993, 119(12): 3611-3629.
- [9] PARK W S, YUN H D. Seismic behaviour of coupling beams in a hybrid coupled shear walls [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61(11): 1492-1524.
- [10] TASSIOS T P, MORETTI M, BEZAS A. On the behavior and ductility of reinforced concrete coupling beams of shear walls [J]. Aci Structural Journal, 1996, 93(6): 711-720.
- [11] 傅剑平, 皮天祥, 韦锋, 等. 钢筋混凝土联肢墙小跨高比复合斜筋连梁抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2011, 2(4): 57-64.
FU Jianping, PI Tianxiang, Wei Feng, et al. Experimental study on seismic behaviors of small-aspect-ratio coupling beams in RC structure walls proportioned with combined slanting reinforcements [J]. China Civil Engineering Journal, 2011, 2(4): 57-64.
- [12] 皮天祥. 钢筋混凝土剪力墙小跨高比连梁抗震性能试验和设计方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
PI Tianxiang. Experimental study on seismic behavior and design method study of small span-to-depth ratio coupling beams of seismic RC shear walls [D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [13] Li X, LV H L, ZHANG G C, et al. Seismic behavior of replaceable steel truss coupling beams with buckling restrained webs [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2015(104): 167-176.
- [14] HALIM T. cyclic behaviors of reinforced concrete coupling beams with and without axial restraint [D]. Taiwan: National Taiwan University of Science and Technology, 2012.
- [15] 张刚. 钢板混凝土连梁抗震性能的试验研究[D]. 北京: 清华大学, 2005
ZHANG Gang. Experimental study on seismic behavior of steel plate reinforced concrete coupling beams [D]. Beijing: Tsinghua University, 2005.
- [16] SU R K L, LAM W Y, PAM H J. Experimental study of plate - reinforced composite deep coupling beams [J]. Structural Design of Tall & Special Buildings, 2009, 18(3): 235-257.
- [17] 张兴虎, 赵建德, 史庆轩, 等, 一种多功能拟静力试验装置. 结构工程师, 2011, 27(S1): 249-254.
ZHANG Xinghu, ZHAO jiande, SHI Qingxuan, et al. A multifunction pseudo-static test device [J]. Structural Engineers, 2011, 27(S1): 249-254.
- [18] SANG W H, CHANG S L, SHIN M, et al. Cyclic performance of precast coupling beams with bundled diagonal reinforcement [J]. Engineering Structures, 2015(93): 142-151.
- [19] 侯伟, 陈彬, 郭子雄, 等. 内嵌钢板混凝土组合连梁抗震性能试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(2): 9-18.
HOU Wei, CHEN Bin, GUO Zixiong, et al. Experimental study on seismic behaviors of embedded steel plate reinforced concrete coupling beams [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(2): 9-18.

(编辑 沈波)