

文章编号:1673-2049(2016)02-0084-07

螺栓灌胶节点对螺栓钢板加固钢筋混凝土连梁 抗震能力影响的试验

程蓓¹, 史聪¹, 雷廷尉²

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 100044; 2. 香港大学 土木工程系, 香港)

摘要:为了提高小跨高比既有连梁的抗震性能,提出了一种新型的螺栓钢板加固法和一种新型的钢板屈曲控制装置。按照1:2比例制作3个钢筋混凝土连梁试件,通过低周往复荷载试验研究了螺栓灌胶节点对钢板加固钢筋混凝土连梁的影响。结果表明:未采用螺栓钢板法加固的连梁呈现出脆性剪切破坏;采用螺栓钢板法进行普通高强螺栓加固的连梁,其强度和延性并没有提高;采用螺栓钢板法进行螺栓灌胶节点加固的连梁,其强度、延性和耗能能力得到大幅度提高。

关键词:连梁;螺栓灌胶节点;抗震性能;变形能力

中图分类号:TU392.5 **文献标志码:**A

Experiment on Effects of Adhesive Bolt Connections on Seismic Performance of Reinforced Concrete Coupling Beams Strengthened by Bolt Steel Plate

CHENG Bei¹, SHI Cong¹, LEI Ting-wei²

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil Engineering, University of Hong Kong, Hong Kong, China)

Abstract: To improve the seismic performance of reinforced concrete (RC) coupling beams with low shear span ratio, a new bolt steel plate reinforcement method and a new steel plate buckling controlled device were proposed. Three RC coupling beams with the ratio of 1:2 were made and low cyclic loading test was done to study the effects of adhesive bolt connections on the seismic performance of RC coupling beams. The results show that the RC coupling beam without being strengthened by bolt steel plate reinforcement method presents brittle shear failure. When the RC coupling beam is strengthened by bolt steel plate reinforcement method with common high-strength bolt connections, the ductility and strength of the beam is not increased obviously. When the RC coupling beam is strengthened by bolt steel plate reinforcement method with adhesive bolt connections, the strength, deformability and energy dissipation can be increased greatly.

Key words: coupling beam; adhesive bolt connection; seismic performance; deformability

0 引言

钢筋混凝土连梁是抗侧力剪力墙或核心筒结构

中的一个重要构件,一般在风荷载和地震荷载的作用下,连梁的内力往往很大。为了使整个剪力墙体系达到良好的抗震性能,其连梁除了满足强度和刚

收稿日期:2015-09-22

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(51208023)

作者简介:程蓓(1978-),女,北京市人,讲师,工学博士,E-mail:chengbei@bucea.edu.cn。

度要求外,还必须具有良好的延性以及变形能力^[1]。在部分工程实际中,由于洞口尺寸有限,连梁剪跨比较小,小跨高比连梁属于两端被约束,反弯点在跨中的反对称弯曲深梁,其剪切变形占总变形的主要部分。试验研究表明,配有普通纵筋和箍筋的小跨高比连梁的破坏形态多为脆性剪切破坏^[2],若再用对框架梁的抗震设计方法去设计剪力墙连梁,不能使其延性和变形能力满足规范要求^[3]。通过研究1964年 Alaska Earthquake 地震记录^[4]以及中国的汶川地震^[5]发现,已有建筑中的连梁在强烈地震作用下往往会出现脆性剪切破坏,这种剪切破坏对整个结构的抗震性能是非常不利的,所以针对既有剪力墙连梁的加固是抗震设计中亟待解决的问题。

然而,对传统提高配筋的钢筋混凝土连梁延性和变形能力的研究相对较少。目前对于普通梁的加固已经有很多成熟的方法,常见的有增大截面法、粘贴FRP^[6]或钢板法、用螺栓固定钢板法等。由于受力机理的不同,这些适用于普通梁的加固方法并不适用于连梁。比如若将粘贴FRP或普通钢板法应用于连梁,在侧向反复荷载作用下,FRP或钢板容易发生分层或剥离现象。

文献[7]采用在连梁两侧用螺栓固定钢板的加固方法,通过试验证实了螺栓连接外侧钢板加固连梁的方式能够大幅增加连梁的强度和变形能力,且延性性能不降低。文献[8]为了解决文献[7]中钢板的屈曲问题,采用在连梁跨中螺栓固定的方式,但是试验发现跨中分布的螺栓连接会对混凝土造成较大破坏,从而影响加固梁的强度及耗能。在文献[9]~[11]提出的新型螺栓钢板加固钢筋混凝土连梁的方法中,采用了一种全新钢板屈曲控制装置,该加固方法旨在用跨中区域钢板的剪切屈曲变形来消耗连梁的能量,并且屈曲控制装置在有效约束钢板屈曲的同时不增加连梁的刚度。基于上述文献的研究,本文进一步研究螺栓灌胶节点对钢板加固钢筋混凝土连梁的影响。螺栓灌胶节点是在螺栓与混凝土孔洞的孔隙间灌注胶水,使螺栓、钢板和混凝土连梁三者牢固结合,协同工作。试验结果表明,采用螺栓灌胶节点的试件,其强度、变形能力和耗能能力与采用普通高强螺栓连接的试件有很大不同。

1 试验概况

1.1 试件设计及加固方案

本文试验采用如图1所示的加载设备,该加载设备通过液压千斤顶进行加载,最大的加载能力为

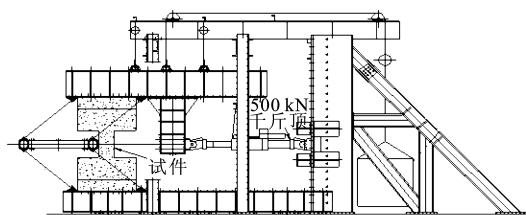


图1 加载设备

Fig. 1 Loading Setup

500 kN。

试验所用的3个试件的尺寸与钢筋骨架布置完全相同,而各自采用的加固方案不同。DCB8为原型对比连梁[如图2(a)],未进行螺栓钢板加固。根据加载设备的尺寸,最终确定的连梁尺寸为:高450 mm,宽120 mm,净跨度500 mm,跨高比为1.1。各试件钢筋布置:连梁的抗剪箍筋为4根直径为8 mm,间距为125 mm的箍筋。连梁的纵向受力钢筋为4根直径为12 mm的钢筋。这种钢筋布置使得连梁的剪切破坏先于弯曲破坏,从而体现了工程实际中连梁抗剪承载能力的不足。连梁DCB9和DCB10分别在原有连梁侧面用螺栓钢板法进行加固[图2(b),(c)]。钢板长度为1 500 mm(两侧锚固长度与连梁跨度相同),高度为450 mm,厚度为4.5 mm,并通过在钢板焊接X形加劲肋(即2根直径为10 mm的钢筋)来控制钢板的面外屈曲。混凝土采用商品混凝土,试验当天测试混凝土强度为60 MPa左右。

1.2 锚固设计

螺栓钢板加固方法中钢板采用的是螺栓固定而不是粘贴固定,主要是基于以下原因:螺栓连接简单,可靠,持久;在循环荷载作用下,粘贴钢板易于从混凝土表面脱落,而用螺栓固定钢板可以避免出现这个问题;与粘贴钢板相比,螺栓连接能提供更高的承载力;进行加固时,现场不需要临时支撑,也不需对混凝土表面做准备工作。

钢板通过螺栓连接到连梁上,螺栓对整个加固体系的受力性能有重要影响。本文试验采用2种不同形式的螺栓连接进行研究。一种是普通高强摩擦型螺栓(M20),一种是灌胶高强螺栓(M20)。在DCB9试件中,采用了普通高强螺栓连接,而在DCB10试件中,采用了灌胶高强螺栓,胶水采用喜利得RE500植筋胶,如图3所示。通过比较可以看出2种不同形式的螺栓连接对构件性能的影响。

1.3 钢板屈曲控制装置

本文试验采用的加固方法特点是使用了一种新

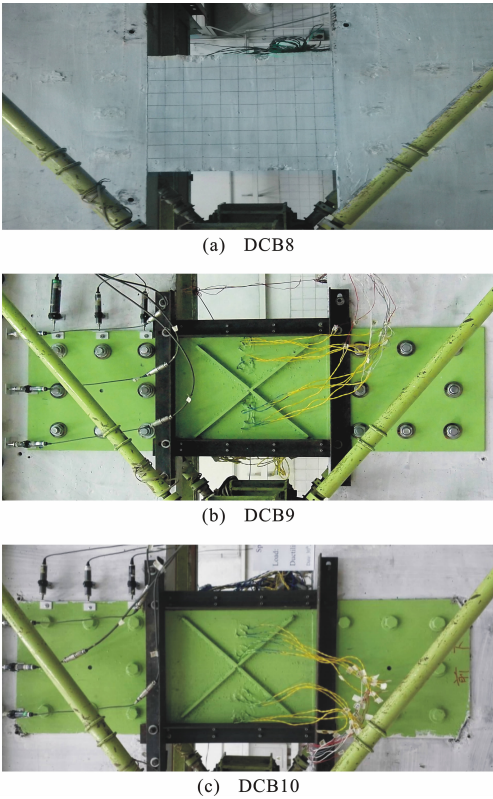


图 2 试件加固方案

Fig. 2 Strengthening Schemes of Specimens

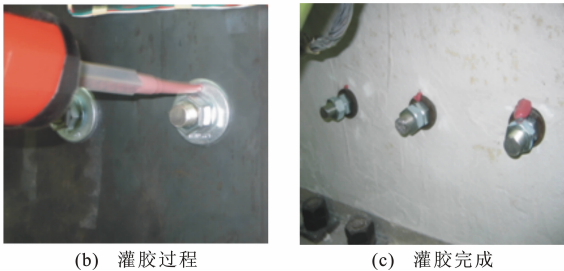
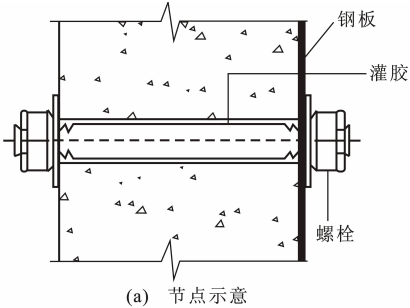


图 3 螺栓灌胶节点

Fig. 3 Adhesive Bolt Connection

型钢板屈曲控制装置(图 4)。该装置是由 4 个角钢(L70×70×5)通过螺栓连接而成。螺栓孔采用长圆孔,这样允许 2 个纵向的角钢自由转动和移动。采用这个装置而不是在钢板四边直接焊接加劲肋来控制屈曲的原因是,增加这个装置对构件的刚度影响很小。如果采用厚度较大的钢板或者焊接很多加

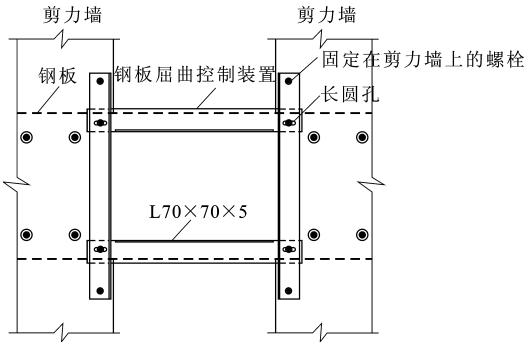


图 4 钢板屈曲控制装置

Fig. 4 Steel Plate Buckling Controlled Device

劲肋,有可能导致加固后的连梁刚度比原来增大很多,而连梁刚度的增大会吸收更多的地震能量,也会对“强墙肢弱连梁”的设计造成一定的不利影响。

1.4 试验方法

采用低周反复荷载试验方法,加载过程分为 2 个阶段:第 1 阶段是荷载控制阶段,第 2 阶段是位移控制阶段。第 1 阶段包括 3 次循环加载,每次所加荷载分别为试件的理论抗剪承载力的 50%,75%和 100%。第 2 阶段采用位移控制方式,直到试件发生破坏。

试验过程中采用线性可变差动变压器(LVDT)设备对试验数据进行监测。图 5 为 LVDT 设备布置,通过测点 L3,L4 监测到的数值即可得连梁的转角,转角 θ 计算公式为

$$\theta = \frac{\Delta}{l} = \frac{L_3 - L_4}{600}$$

式中: Δ 为连梁两端位移的差值; l 为连梁的跨度; L_3, L_4 分别为测点 L3,L4 测得的位移。

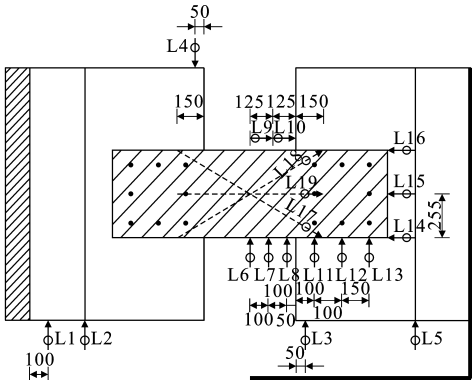


图 5 LVDT 设备布置(单位:mm)

Fig. 5 Arrangement of LVDT (Unit:mm)

2 试验结果分析

2.1 滞回曲线

试件 DCB8~DCB10 的滞回曲线如图 6 所示。

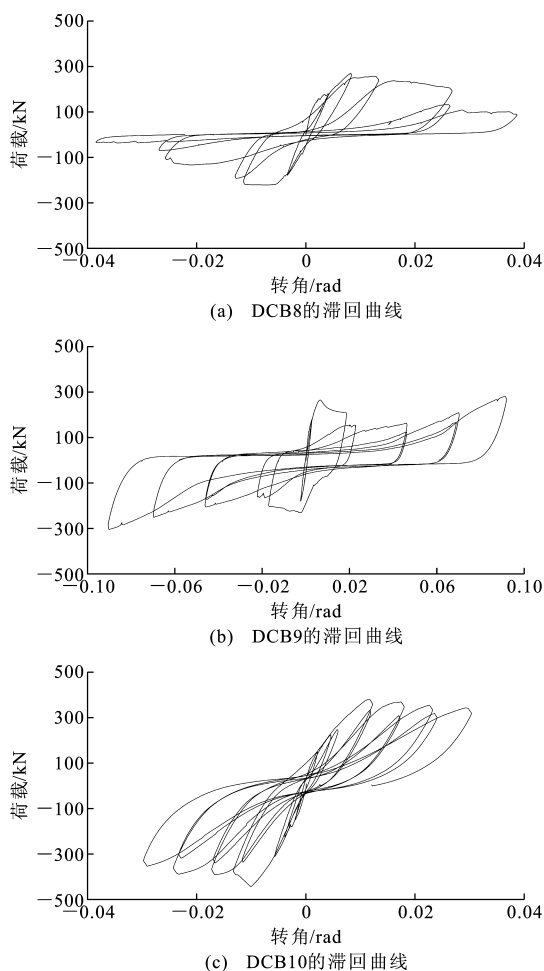


图 6 试件滞回曲线

Fig. 6 Hysteresis Curves of Specimens

从图 6(a)可以看出,DCB8 由于钢筋混凝土的主裂缝出现,其刚度、延性和耗能能力都下降很多。从图 6(b)可以看出,虽然 DCB9 加固了钢板,但是在位移初始阶段(0.04 rad 之前),构件的延性和耗能能力并没有提高很多。这是由于采用了普通高强螺栓连接,而螺栓和混凝土之间的孔隙使得钢板和混凝土连梁在初始阶段没有协同工作,只有混凝土连梁承受主要荷载,所以混凝土很快破坏。随着位移的增加,钢板中的拉力场逐渐增大,成为承受荷载和耗能的主力,所以从 DCB9 的滞回曲线可以看出,在转角达到 0.06 rad 以后,构件的强度和耗能能力逐渐增强,然而此时主体结构已经破坏。

从图 6(c)可以看出,随着试件加载循环次数的增多,各循环所围成的滞回环形状由“梭形”逐渐发展成“弓形”或者“反 S 形”。滞回环的捏缩程度与试件耗能性能有着重要联系,曲线的捏缩程度取决于受拉裂缝的开展宽度、受拉钢筋的塑性应变伸长、钢筋混凝土之间的粘结-滑移以及构件残余变形积累

等^[12]。一般认为,“弓形”滞回曲线的耗能性能要大于“反 S 形”。对比 DCB9 和 DCB10 可以发现,DCB9 的滞回曲线在后期已经明显呈现“反 S 形”,而 DCB10 的滞回曲线在后期依然呈现“弓形”,从这个方面也能看出采用螺栓灌胶节点的构件耗能性能要优于采用普通螺栓连接的构件。

2.2 强度、变形能力和延性

各试件的试验结果见表 1。从表 1 可以看出,试件 DCB9 虽然采用了螺栓钢板法加固,但是其强度和变形能力与 DCB8 相比没有提高,反而有所降低。这是因为试件 DCB9 采用的螺栓节点内并未灌胶,钢板与连梁协同工作能力差。刚开始加载时,连梁的大部分剪力由混凝土直接承担,钢板参与程度不大,因此在加载初始阶段混凝土连梁就发生了破坏。DCB10 采用了螺栓灌胶节点,其强度、变形能力和延性都有很大提高。由此可以看出,螺栓节点内是否灌胶对于螺栓钢板法加固的钢筋混凝土连梁的抗震性能有着重大影响。

2.3 连梁裂缝发展形态

图 7 给出了 3 个试件在第 2 个循环加载阶段(0.75 V_u)的破坏形式。笔者发现,在相同荷载作用下(200 kN 左右),DCB8 上出现了对角线方向斜裂缝,且主裂缝很明显,呈现典型的剪切破坏特征。试件 DCB9 虽然采用了螺栓钢板法进行加固,但是在第 2 个循环加载阶段也出现对角线方向斜裂缝,且主裂缝很明显。DCB8 和 DCB9 出现主裂缝的时间很接近,而试件 DCB10 在这个阶段没有产生明显的主裂缝。说明 DCB10 在加载过程中出现主斜裂缝时间比 DCB8 和 DCB9 晚,这是由于 DCB10 采用了螺栓灌胶节点,使得钢板和连梁在加载初始阶段可以协同工作,从而延迟了斜裂缝的发生。

从图 7 可以看出,由于在钢板上焊接了加劲肋和增加了钢板屈曲控制装置,钢板没有发生面外屈曲变形。

2.4 耗能能力

耗能能力是对抗震性能评价的重要指标之一^[13-15]。本文用耗能系数来评价 3 个试件的耗能性能。耗能系数的计算方式见图 8,其计算公式为:耗能系数 $C = S_{ABC}/S'_{O'BE}$, S_{ABC} , $S'_{O'BE}$ 分别为曲线 ABC, $O'BE$ 围成的面积。

通过比较 3 个试件加载全过程的耗能系数(图 8)可以发现,3 个试件的耗能系数在加载开始时的数值很小,这是因为开裂之前试件仍处于弹性状态,耗能较少。DCB8 和 DCB9 在加载初始阶段耗能系

表 1 各试件的试验结果
Tab. 1 Test Results of Specimens

试件编号	破坏模态	V_u/kN	$\Delta V_u/\%$	v_{\max}/MPa	θ_y/rad	θ_u/rad	$\Delta\theta_u/\%$	μ_u	$\Delta\mu_u/\%$
DCB8	脆性破坏	270		5.0	0.005 5	0.018 5		3.4	
DCB9	脆性破坏	266	-1	4.9	0.003 7	0.015 0	-19	4.1	21
DCB10	塑性破坏	381	41	7.0	0.009 3	0.040 0	116	4.3	26

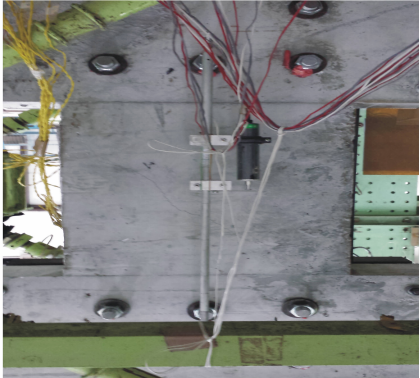
注： V_u 为试件的最大抗剪承载力； ΔV_u 为 V_u 增加量； v_{\max} 为试件的最大剪应力； θ_y 为试件的屈服转角； θ_u 为连梁最大转角（ $0.8V_u$ 所对应的转角）； $\Delta\theta_u$ 为 θ_u 增加量； μ_u 为连梁的延性系数，是最大转角 θ_u 与屈服转角 θ_y 的比值； $\Delta\mu_u$ 为 μ_u 增加量。



(a) DCB8



(b) DCB9

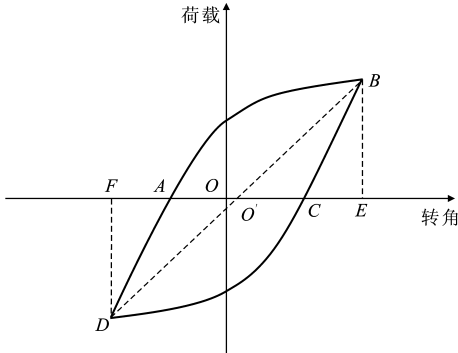


(c) DCB10

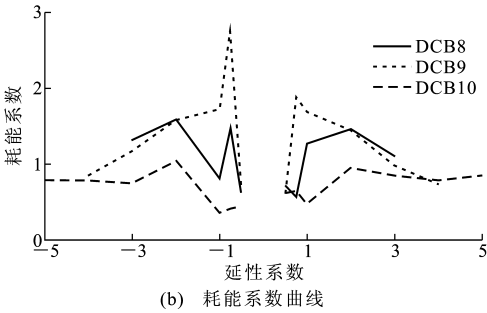
图 7 连梁裂缝形态

Fig. 7 Cracking Patterns of Coupling Beams

数急剧增长,因为在这一阶段试件都逐渐形成主裂缝,临近破坏时裂缝发展得非常宽,在这个过程中试件产生了较大的塑性耗能。试件短时间吸收大量的能量而导致破坏,体现在 DCB8 和 DCB9 试件发生脆性破坏。试件 DCB9 虽然采用了螺栓钢板法加



(a) 滞回曲线



(b) 耗能系数曲线

图 8 试件的耗能系数

Fig. 8 Energy Dissipation Coefficients of Specimens

固,但是其螺栓节点内并未灌胶,所以在加载过程中螺栓会产生滑移,钢板和连梁没有形成整体工作,故 DCB9 的耗能能力未能得到明显改善,并且随着位移的增大,其耗能能力呈现明显的下降趋势。对于 DCB10,其耗能系数在延性系数大于 1 以后有所提高,说明试件在这一阶段形成了主裂缝。在开裂之后的每一个位移循环中,耗能系数随着位移的增大有增加的趋势,说明 DCB10 在加载中后期有很好的耗能能力。

2.5 钢板的受力性能

钢板中心的剪应力可以通过连接到钢板表面的应变计所测数据得出,图 9 为 DCB9 与 DCB10 跨中的剪应力。由图 9 可知,钢板的剪应力具有随转角增大而增大的趋势,这表明钢板还可以提供更多剪应力。对于 DCB9 来说,钢板仍处于弹性阶段,这是由于采用了普通的螺栓连接,钢板与混凝土连梁协同工作性能不好,螺栓滑移较大。在加载前期剪力

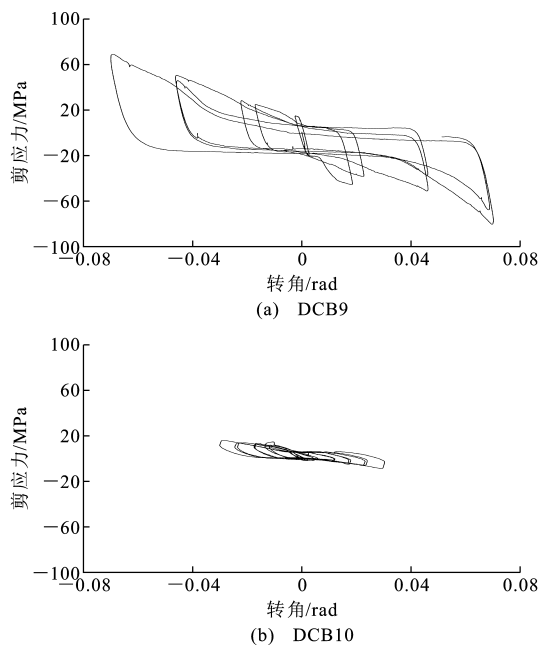


图 9 钢板的剪应力

Fig. 9 Shear Stress of Steel Plate

大部分由连梁承担。DCB10 采用螺栓灌胶节点连接后,钢板仍然处于弹性阶段,但是其变形能力和延性都远好于 DCB9。这是因为采用螺栓灌胶节点连接后,连梁与钢板协同工作性能较好,固定在钢板上的斜向加劲肋能有效抑制裂缝的开展。

2.6 螺栓群的滑移

螺栓的滑移情况是由 L6~L8 检测得到的,结果如图 10 所示,图 10 的纵坐标是螺栓群在纵向的转角,它是由 LVDT 的读数转化而来的。纵向转角越大,螺栓滑移越明显。对比 DCB9 与 DCB10 可以明显看出,采用普通螺栓连接,滑移较大,而采用螺栓灌胶节点的连接方式,螺栓群滑移较小。

3 结 语

(1)这种新型螺栓钢板加固法可以提高既有连梁的强度、变形能力和耗能能力。

(2)钢板屈曲控制装置在这种加固方法中发挥了重要作用,可以有效地约束钢板的屈曲,使钢板更有效地发挥其强度和变形能力,从而提高连梁的抗震能力。

(3)采用螺栓灌胶节点加固法能有效减少螺栓群的滑移,从而提高了这种加固方式的稳定性。

(4)螺栓灌胶节点对加固后的钢筋混凝土连梁抗震性能有着重要影响。采用螺栓灌胶节点,钢板与混凝土连梁的协同工作性能好,混凝土连梁不会很早地发生破坏,而且连梁在加载中后期阶段,仍能

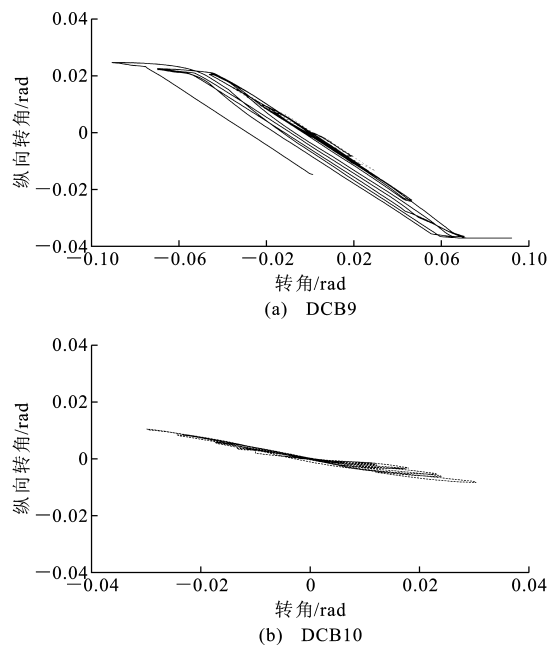


图 10 螺栓群的滑移

Fig. 10 Slipping of Bolt Group

保持较好的耗能能力,对提高现有连梁的抗震性能非常有效。

参考文献:

References:

- [1] PAULAY T. Coupling Beams of Reinforced Concrete Shear Walls[J]. Journal of the Structural Division, 1971,97(3):843-862.
- [2] 梁兴文,李方圆,张 涛,等. 新配筋方案小跨高比连梁抗震性能试验研究[J]. 工程力学,2009,26(12): 119-126.
LIANG Xing-wen,LI Fang-yuan,ZHANG Tao,et al. Experimental Study on Seismic Behaviour of New Reinforcement Scheme Deep Coupling Beams[J]. Engineering Mechanics,2009,26(12):119-126.
- [3] JBJ 3—2002,高层建筑混凝土结构技术规程[S].
JBJ 3—2002,Technical Specification for Concrete Structures of Tall Building[S].
- [4] MITCHELL D,DEVALL R H,SAATCIOGLU M, et al. Damage to Concrete Structures Due to the 1994 Northridge Earthquake[J]. Canadian Journal of Civil Engineering,1995,22(2):361-377.
- [5] WANG Y Y. Lessons Learned from the “5.12” Wenchuan Earthquake:Evaluation of Earthquake Performance Objectives and the Importance of Seismic Conceptual Design Principles[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2008,7(3):255-262.
- [6] 黄丽华,李宇婧,张耀烨,等. 不同种类 FRP 加固混凝土梁加固效果试验研究[J]. 大连理工大学学报,

- 2013,53(1):102-106.
- HUANG Li-hua, LI Yu-jing, ZHANG Yao-ye, et al. Test Research on Strengthening Effects of Various FRP on RC Beams[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2013, 53(1): 102-106.
- [7] 朱 勇, 周 云, 苏启亮. 钢筋混凝土连梁抗震加固的试验研究[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(3): 59-64.
- ZHU Yong, ZHOU Yun, SU Qi-liang. Experimental Study of Strengthened RC Coupling Beams for Earthquake[J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(3): 59-64.
- [8] 朱 勇, 苏启亮, 周 云. 连梁抗震加固中梁跨内有无螺栓连接的影响[J]. 工业建筑, 2009, 39(12): 42-44, 38.
- ZHU Yong, SU Qi-liang, ZHOU Yun. Effects on Seismic Strengthening of Coupling Beams with or Without Bolt Connections in Beam Span [J]. Industrial Construction, 2009, 39(12): 42-44, 38.
- [9] SU R K L, CHENG B. Plate-strengthened Deep Reinforced Concrete Coupling Beams[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Structures and Buildings, 2011, 164(1): 27-42.
- [10] CHENG B, SU R K L. Retrofit of Deep Concrete Coupling Beams by Laterally Restrained Side Plates[J]. Journal of Structural Engineering, 2011, 137(4): 503-512.
- [11] 程 蓓, 李世伟, 史 聪, 等. 新型螺栓钢板加固法提高既有钢筋混凝土连梁抗震性能的试验研究[J]. 建筑结构, 2014, 44(21): 86-90, 85.
- CHENG Bei, LI Shi-wei, SHI Cong, et al. Experimental Study on the Seismic Performance of Existing Reinforced Concrete Coupling Beams Strengthened by New Bolted Steel Plate[J]. Building Structure, 2014, 44(21): 86-90, 85.
- [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 Tian-xiang. 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] 窦祖融, 王 怡, 薛伟辰. 低周反复荷载下装配整体式混凝土框架边节点的抗震性能[J]. 建筑科学与工程学报, 2010, 27(2): 61-66.
- DOU Zu-rong, WANG Yi, XUE Wei-chen. Seismic Performance of Precast Monolithic Concrete Frame Exterior Connections Under Low Cyclic Loading[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010, 27(2): 61-66.
- [14] 许晓东, 李 泉. 桥梁钢结构的螺栓连接设计及工程验算[J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(9): 87-91, 95.
- XU Xiao-dong, LI Quan. Bolt Connection Design and Cheeking Computation in Steel Structure Bridge Engineering[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(9): 87-91, 95.
- [15] 鲍文博, 付亮华, 陆海燕, 等. 钢混框剪高层结构地震能量分布及耗散研究[J]. 建筑科学与工程学报, 2015, 32(3): 38-45.
- BAO Wen-bo, FU Liang-hua, LU Hai-yan, et al. Research on Seismic Energy Distribution and Dissipation of Reinforced Concrete Frame-wall High-rise Structure[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2015, 32(3): 38-45.