

文章编号: 1001-4888(2018)03-0428-07

多铰联动加载装置对钢筋销栓作用承载性能的影响^{*}

李鹏飞¹, 陈宸², 何世钦²

(1. 重庆交通大学 港口航道与海岸工程系, 重庆 400074; 2. 北方工业大学 土木工程学院, 北京 100144)

摘要: 国内外学者针对钢筋的销栓作用开展了较多的研究, 但采用钢筋直接剪切试验方法的研究较少, 难以获取钢筋变形和混凝土破损的直观数据。主要是由于加载装置复杂, 荷载边界条件难以模拟。本文针对钢筋销栓作用的剪切承载性能试验方法中存在的问题, 设计了可同时进行竖向与水平双向加载的直接剪切试验方法, 研究了作动器、竖向连接件与钢筋夹具的连接方式对试验结果的影响, 并对试验误差的原因进行了分析。试验结果表明, 采用本文提出的多铰联动的加载装置, 水平方向可对钢筋施加轴向约束, 竖直方向可以始终保证垂直钢筋施加荷载, 并能有效地消除因作动器自身刚体位移所造成的试验误差, 能够真实地反映出钢筋销栓作用的承载性能, 可为钢筋销栓作用试验研究中的试验装置设计提供参考。

关键词: 多铰联动加载装置; 钢筋销栓作用; 承剪性能

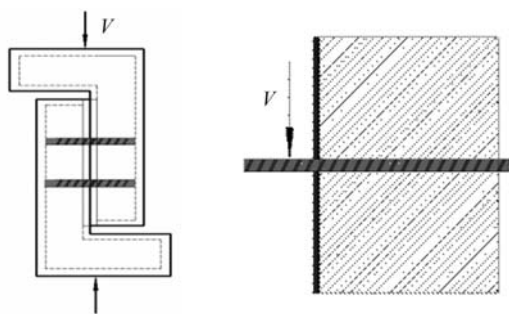
中图分类号: TU317.9

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-058

0 引言

随着建筑结构形式和施工工法的创新, 施工缝已成为整体结构的一部分, 并起到传递拉力、压力和剪力的作用, 其中对施工缝而言最重要的剪力传递能力由钢筋完成, 钢筋承担剪力的效应即称之为钢筋的销栓作用。特别对于预制装配式结构的拼装界面等未经过表面处理的施工缝, 钢筋的销栓作用是剪力的主要传递机制^[2-4]。因此, 研究钢筋销栓作用的承载性能对于保障钢筋混凝土结构的安全有着重要的意义。



(a) 钢筋界面剪切试验方案, (b) 钢筋直接剪切试验方案

图1 钢筋剪切试验方案

Fig. 1 Design of test specimen

国内外诸多学者对钢筋的销栓作用进行了大量的试验研究, 其中钢筋销栓作用的承载性能试验主要通过向钢筋施加荷载以模拟建筑工程中钢混结构连接界面真正的受力状态, 因其加载方式的不同, 可将已有对钢筋的销栓作用的研究试验分为钢筋界面剪切试验^[5-10]和钢筋直接剪切试验^[11-13]两种, 如图1所示。

钢筋的界面剪切试验, 主要采用混凝土分期浇筑或对完整钢筋混凝土结构试件人工预制施工缝, 通过控制界面的切向与法向相对位移对钢筋间接施加荷载, 如图1(a)所示。钢筋的界面剪切试验重现截面处钢筋受力的边界条件, 但难以直接量测钢筋的变形和混凝土的局部损伤, 通常

^{*} 收稿日期: 2017-03-12; 修回日期: 2017-05-30

基金项目: 北京市教育委员会科技计划面上项目 KM201710009010

通讯作者: 何世钦(1969—), 女, 副教授, 主要研究领域: 钢筋混凝土结构及其耐久性研究。Email: heshiqin@mail.ncut.edu.cn

需要基于理论公式进行推测计算,精度难以得到保障。

钢筋的直接剪切试验,将钢筋预埋至混凝土内浇筑试件,待试件标准养护后通过加载装置对钢筋直接施加荷载,在加载过程中控制竖直与水平方向的荷载以实现钢筋混凝土结构连接界面钢筋的荷载边界条件。钢筋直接剪切试验通常采用矩形试件,如图1(b)所示。相较界面剪切试验,钢筋直接剪切试验方案可直接测量出钢筋承受的实际荷载。目前国内外采用直接剪切试验对销栓作用的研究相对较少,已有的试验研究或者试验装置十分复杂^[13],或者不能较为准确重现钢筋混凝土结构连接界面钢筋真实的边界条件,试验中对于直接作用于钢筋上的实际荷载也不能准确采集^[11],易对试验结果产生影响。

本文采用钢筋直接剪切试验,就试验加载装置对钢筋销栓作用承剪性能的影响进行研究,通过水平与竖向双向加载的方式较为准确地模拟钢筋在实际结构中复杂的受力状态,并且通过多铰联动试验加载装置,将钢筋连接部位设计成可在平面内自由转动的铰接装置,实现施加荷载始终垂直钢筋,能够真实地反映出钢筋销栓作用的承载性能。

1 钢筋销栓作用的直接剪切试验方案

1.1 试验方案设计

共设计了3组6个钢筋混凝土试件,如图2所示。试件尺寸为 $400\text{mm}\times 300\text{mm}\times 250\text{mm}$,其中,钢筋采用直径为20mm的HRB400级钢筋,混凝土设计强度等级为C50。本试验采用LVDT位移计测量位移,布置在距试件外表面30mm处加载点位置的钢筋上,用于采集钢筋的竖向位移,同时在试件上表面加载端左右角点处布置LVDT位移计采集混凝土的竖向位移。

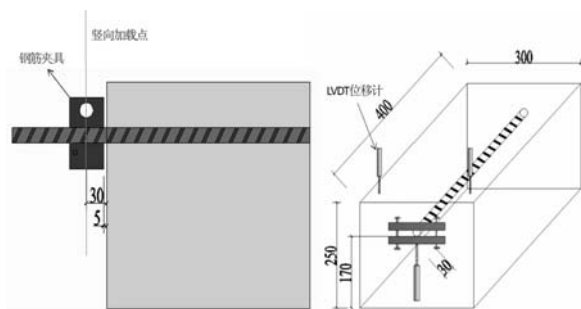


图2 试件设计

Fig. 2 Design of test specimen

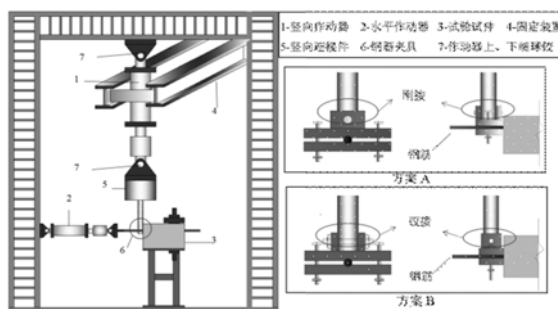


图3 试验加载方案

Fig. 3 The loading scheme of test

为研究加载装置对钢筋销栓作用承剪性能的影响,试验采用两种加载方案,如图3所示,一种是混凝土梁试验中常采用的固定作动器加载方式,以下简称方案A;另一种为自行设计的多铰联动加载方案,以下简称方案B。两种加载方案均将钢筋混凝土试件通过丝杠、横梁等构件固定于试验加载平台。通过竖直与水平方向同时对钢筋施加荷载以模拟预制装配式混凝土结构连接界面的复杂受力方式,其中竖直方向的剪力由25t伺服液压作动器直接对钢筋施加,水平方向在钢筋自由端通过套筒与带有球铰的15t伺服液压作动器一端相连,通过对钢筋施加轴向约束,模拟实际结构中钢筋承受的轴向力。

试验时,通过放线仪对试件进行对中后固定。加载采用分级加载的方式,通过DH3820高速静态应变系统采集试件的荷载、位移。试验前期采用荷载控制施加荷载,每级荷载1kN,加载速率为2kN/min。当荷载—位移曲线出现软化段后,采用位移控制模式,每级加载0.5mm,加载速率为1mm/min。每级加载完成后,静置2min。待采集得到的荷载和位移的数据稳定后,继续下一级加载。若荷载传感器所采集的竖向荷载基本保持不变或开始下降,认定试件发生破坏,此时荷载记录为该试件的极限承载力。

1.2 竖向加载方案比选

本文所设计的两种对钢筋施加竖向剪力的加载方案,主要区别在于对钢筋施加荷载的夹具截然不

同,如图 2 所示。

(1)传统加载装置——方案 A

传统加载装置常用于钢筋混凝土梁试验,本文参考混凝土梁试验所设计的方案 A 主要由两部分组成:液压伺服作动器、钢筋连接装置。其中,钢筋连接装置包括竖向连接件和钢筋夹具,两者通过销钉固定于钢筋之上,使钢筋夹具与竖向连接件在平面内刚接。液压伺服作动器顶端通过球铰固定于加载钢架,作动器底端与竖向连接件则使用滚轴铰接相连。

(2)多铰联动加载装置——方案 B

多铰联动加载装置在方案 A 的基础上加以改进,将竖向连接件与钢筋夹具分开,通过滚轴铰接,以达到平行于纸面的自由转动,竖向加载装置其他部分连接方式不变,通过改变钢筋夹具与加工连接件的连接方式,使整个装置形成多铰联动,使作动器因油缸伸缩时整个装置可平行于纸面转动变形。

钢筋销栓作用直接承剪性能的试验研究中,关键的问题在于整个加载系统能够使施加在钢筋的荷载始终保持垂直,比较加载方案 A 和 B,传统的固定作动器加载方案虽然能够保证对钢筋垂直施加荷载,但当试验中钢筋受剪力作用发生变形时,作动器对钢筋的加载位置不能随钢筋的变形而变形,导致钢筋弯曲后所施加的剪力不再垂直于钢筋,使试验结果产生误差。相比较之下,多铰联动加载方案中竖向连接件与钢筋夹具铰接,钢筋产生变形时,保证整个试验过程中对钢筋施加的荷载始终垂直于钢筋,消除因钢筋变形时钢筋夹具所产生的试验误差。因此,本文认为多铰联动加载方案更加适合钢筋销栓作用直接剪切试验。

2 试验结果与误差分析

2.1 试验结果

A、B 两种加载方案对比试验结果详见表 1,其中前 4 个试件均采用竖向施加荷载,水平方向只通过伺服液压作动器起到水平固定作用而不施加荷载。从表 1 可以看出,由于采用的加载方案不同,造成试件的极限承载力不同,其中采用加载方案 A 的试件极限荷载偏大,是采用加载方案 B 试件极限承载力的 2.33 倍,这与已有研究结果不同^[13]。由此可知,加载方案 A 中通过刚接连接钢筋夹具,对试验结果有一定影响。在验证加载方案 B 可行性的基础上,再通过水平与竖向双向加载的试验结果进行进一步验证,试验结果见表 1,从表可以看出,预加 50kN 轴向力后,试件的极限承载力平均值为 26.79kN,是未预加轴向力试件极限承载力的 0.88,表明施加轴向力后,水平与竖向的耦合损伤导致钢筋的极限承载力降低。

表 1 试验结果

Tab. 1 Results of the test

试件编号	加载方式	混凝土立方体 抗压强度/MPa	极限荷载/kN	极限荷载 平均值/kN
D20-C50-A1	单一竖向加载	49.3	71.9	70.60
D20-C50-A2	单一竖向加载	50.3	69.3	70.60
D20-C50-B1	单一竖向加载	50.6	31.5	30.30
D20-C50-B2	单一竖向加载	50.2	29.0	30.30
D20-C50-B3-T50	双向加载	50.5	26.10	26.79
D20-C50-B4-T50	双向加载	51.2	27.48	26.79

注: D20 表示钢筋的直径为 20mm, C50 表示混凝土的强度等级为 50MPa, A 表示加载方案 A, B 表示加载方案 B, T50 表示预加 50kN 的水平方向轴向力。

图 4(a)为两种加载方案下的荷载—位移曲线,可以看出,采用多铰联动加载方案的两个试件的荷载—位移曲线均呈现出典型的弹塑性趋势,且试件的刚度和承载能力较为接近。在弹性阶段,试件的刚

度呈线性增长,在荷载增大至 22kN 时,曲线出现明显的弹塑性分界点,曲线呈现非线性增长,曲率逐渐降低,试件的刚度逐渐减小,直至试件破坏。相较之下,采用传统固定作动器加载方案 A 的试件的荷载一位移曲线在荷载未达到 22kN 前,曲线呈线性增长,但当荷载超过 22kN 后,随荷载的增大,钢筋位移和曲率均继续增大。在荷载达到 31kN(即加载方案 A 下试件的极限荷载)时,试件刚度仍呈现出增大趋势,宏观观察试件也未出现明显的破坏特征,这与其弹塑性材料的破坏特征不符。采用双向加载试件的荷载一位移曲线如图 4(b)所示,从图中可以看出,预先分级加载至 50kN 的轴向力后再施加竖向荷载的试件的荷载一位移曲线也呈现出弹塑性增长趋势,且由于预加轴向荷载,钢筋和混凝土间产生粘结滑移,造成耦合损伤,使试件的极限承载力较未预加轴向力试件明显降低。

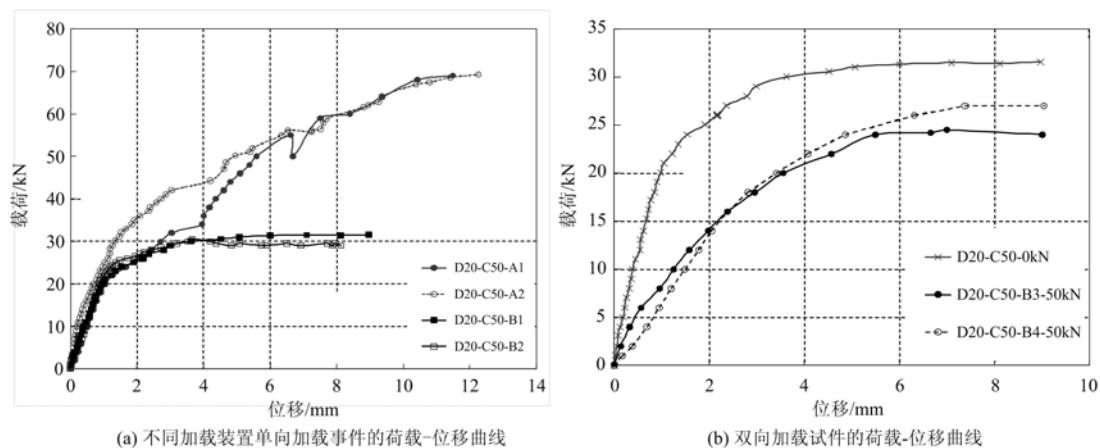


图4 试件的荷载一位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of test specimens

2.2 破坏形态对比

图 5 为分别采用 A、B 两种加载方式下试件的破坏形态,从图中可以看出试件 D20-C50-A 由于加载方案 A 中液压伺服作动器自身承担了一部分荷载,使试件在加载过程中荷载一位移曲线并未出现屈服阶段,荷载持续增加至试件劈裂破坏。而试件 D20-C50-B 的破坏形态较为正常,钢筋屈服后钢筋附近的混凝土被压碎脱落。两种破坏形态相比较下,加载方案 A 对试验结果有较大影响。

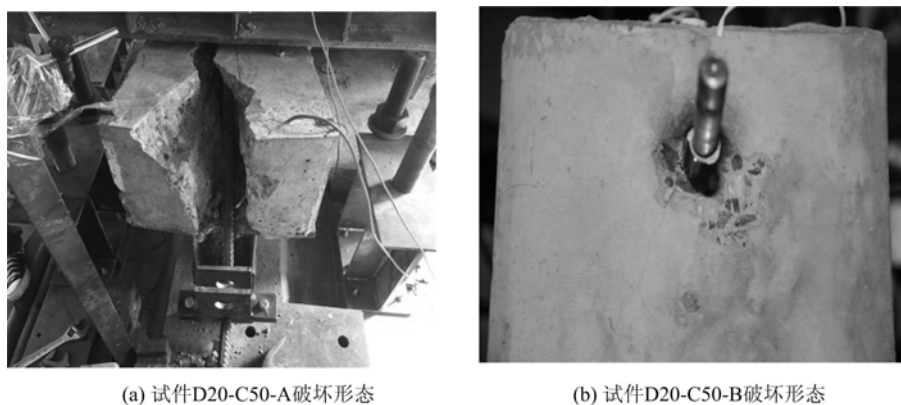


图5 试件破坏形态

Fig. 5 The failure mode of test specimen

2.3 误差分析

图 6 为两种加载方式下钢筋受力变形后夹具的变形图。从图中可以看出,加载方案 A 中通过栓钉将钢筋夹具与连接构件固定,在平行于纸面方向处于刚结,使整个竖向加载装置成为一个刚体,当钢筋受力变形如图中所示形状时,由于夹具与连接构件为刚性连接,不能平行于纸面转动,对钢筋产生约束

阻止钢筋弯曲变形。钢筋与夹具相互约束,相互施加压力,随着钢筋变形的增大,两者间产生的作用力也增大,使夹具的钢板屈服发生变形。

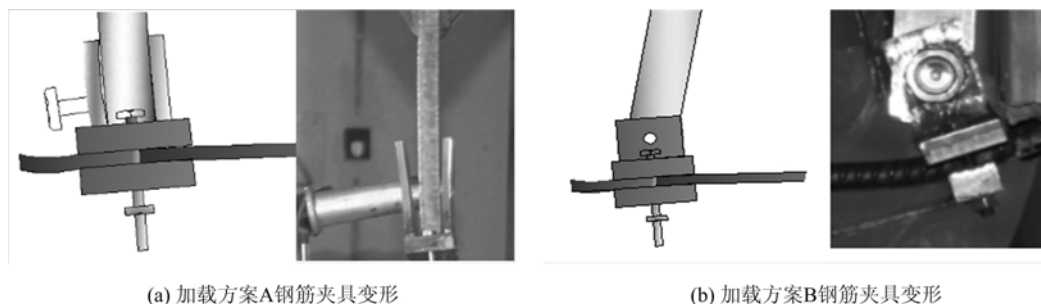


图 6 两种加载方式中的钢筋夹具变形

Fig. 6 Deformation of steel bar fixture in two loading ways

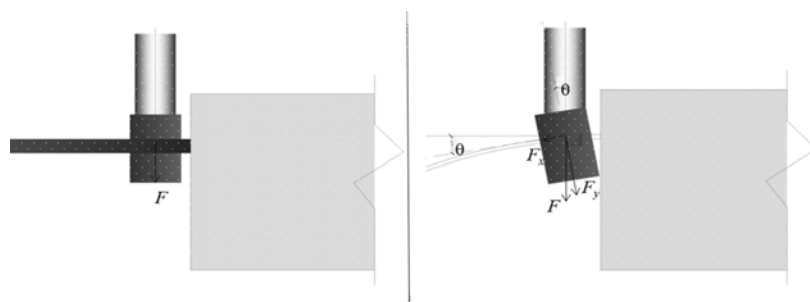


图 7 加载方案 A 中钢筋加载点受力分析

Fig. 7 Analysis of loading point of steel bar in loading scheme A

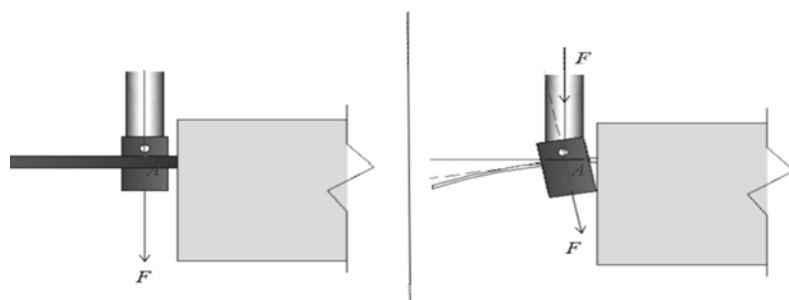


图 8 加载方案 B 中钢筋加载点受力分析

Fig. 8 Analysis of loading point of steel bar in loading scheme B

对试件加载过程中加载方案 A、B 的钢筋加载点 A 进行受力分析,如图 7 和图 8 所示。从图中可以看出,作动器施加的剪力 F 始终为竖直方向,在施加剪力较大后,钢筋发生弯曲变形,此时钢筋夹具也发生转动,与竖直方向呈角 θ ,此时 F 可分解为 F_x 与 F_y 。其中:

$$F_x = F \cdot \sin\theta$$

$$F_y = F \cdot \cos\theta$$

F_x 作用在钢筋夹具上, F_x 随转角 θ 的增大而增大,钢筋夹具变形也不断增大,当超过夹具钢材的屈服强度时,夹具钢板将发生大的变形,如图 6(a) 所示。加载方案 B 中的荷载始终能垂直于钢筋施加,不产生多余约束。

除此之外,对加载方案 A,钢筋在荷载的作用下发生弯曲变形产生转角 θ 后,作动器施加的剪力 F 最终传递到钢筋加载点的荷载为 F_y ,且 $F_y \leq F$,即试验过程钢筋实际所受剪力 F_y 远小于作动器施加的剪力 F ,因此采集系统所采集的荷载会持续增大,未达到屈服,出现如图 4(a) 所示的荷载一位移曲线,严重影响了试验结果,并使人误以为试件整体的抗剪能力较强。

综上所述,可明显看出加载方案 A 由于钢筋连接部位的刚接设计,产生多余约束,对试验结果造成

较大误差。相较之下,加载方案B中钢筋连接部位设计成可在平面内自由转动的铰接装置,使剪力始终垂直于钢筋传递,保证试验的准确性并能够真实地反映出钢筋销栓作用的承载性能,因此本文多铰联动加载装置更为符合钢筋销栓作用承载性能试验的要求。

3 结论

本文对已有钢筋销栓作用试验研究中所采用的钢筋直接剪切试验方案与钢筋界面剪切试验方案进行了分析比较,选取钢筋直接剪切试验方案研究钢筋的销栓作用。设计了可模拟抗剪钢筋真实荷载边界条件的加载方式,并对两种竖向加载装置的钢筋直接剪切试验进行了对比,试验结果表明传统的直剪试验中固定作动器的加载方式,由于伺服液压作动器自身的变形和钢筋夹具的设置对试验结果造成较大误差,而多铰联动加载方案较为符合钢筋销栓作用承载性能试验的要求,可以消除传统加载方案中的不足,并能够真实地反映出钢筋销栓作用的承载性能。

参考文献:

- [1] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003 (GUO Zhenhai, SHI Xudong. Reinforced concrete theory and analyse[M]. Beijing:Tsinghua University Press, 2003 (in Chinese))
- [2] Nakaki S D, Stanton J F, Sritharan S. An overview of the PRESSS five-story precast test building[J]. PCI Journal, 1999, 44(2):26—39.
- [3] Kulkarni S A, Li B, Yip W K. Finite element analysis of precast hybrid-steel concrete connections under cyclic loading[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2008, 64(2):190—201.
- [4] 宋国华,霍达,王东炜,等. 装配式大板结构竖向齿槽接缝受剪承载力设计[J]. 土木工程学报,2003,36(11):61—64 (SONG Guohua, HUO Da, WANG Dongwei, et al. Shear capacity of vertical-grooved connection in PBP structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(11):61—64 (in Chinese))
- [5] 靳利娜,王山山,任青文,等. 新老混凝土结合面抗剪性能试验研究[J]. 实验力学,2014,29(5):611—619 (JIN Lina, WANG Shanshan, REN Qingwen, et al. Experimental study of shear performance of new-to-old concrete interface[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2014, 29(5):611—619 (in Chinese))
- [6] 张申,车铁,谢庆红,等. 钢筋混凝土开裂面剪力传递性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2011,32(2):48—53 (ZHANG Shen, CHE Yi, XIE Qinghong, et al. Experimental research on shear transfer behavior in cracked reinforced concrete[J]. Journal of Building Structures, 2011, 32(2):48—53 (in Chinese))
- [7] Dulacska H. Dowel action of reinforcement crossing cracks in concrete[J]. ACI Journal, 1972, 69(12):754—757.
- [8] Taylor H P J. The fundamental behavior of reinforced concrete beams in bending and shear[J]. Shear in Reinforced Concrete, 1974, 42:43—78.
- [9] Mattock A H. Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear plane[J]. Special Publication, 1974, 42:17—42.
- [10] Maekawa K, Qureshi J. Embedded bar behavior in concrete under combined axial pullout and transverse displacement[C]. Proceedings—Japan Society of Civil Engineers, 1996:183—196.
- [11] Dei Poli S, Di Prisco M, Gambarova P G. Cover and stirrup effects on the shear response of dowel bar embedded in concrete[J]. Structural Journal, 1993, 90(4):441—450.
- [12] Utescher G, Herrmann H. Experimental evaluation of the ultimate capacity of smooth round dowels embedded in concrete and made of austenitic stainless steel[J]. Report, 1983, 346:49—104.
- [13] Dei Poli S, Di Prisco M, Gambarova P G. Shear response, deformations, and subgrade stiffness of a dowel bar embedded in concrete[J]. Structural Journal, 1992, 89(6):665—675.

The influence of multi-hinge linkage loading device on the bearing performance of dowel action of reinforcing bar

LI Peng-fei¹, CHEN Chen², HE Shi-qin²

(1. Waterway and Coastal Engineering, Department of Harbor, Chongqing 400074, China;

2. College of Civil Engineering, North China University of Technology, Beijing 100144, China)

Abstract: Scholars at home and abroad have carried out a series of study about dowel action of reinforcing bar. But the direct shear experimental method of steel bar is less adopted. It is mainly due to the complexity of loading device that it is difficult to simulate the load boundary conditions. In this paper, aiming at the problems in experimental method of shear bearing performance of reinforcing bar dowel action, a direct shear experimental method for both vertical and horizontal loading at the same time is designed, the influence of actuator, vertical connector and reinforcing bar clamp on the experimental results is studied, and the causes of experimental errors are analyzed. Experimental results show that the multi-hinge linkage loading device proposed in this paper can apply axial restraint to reinforcing bar along horizontal direction, and along vertical direction can keep vertical reinforcement load. So it can effectively eliminate experimental errors due to actuator's rigid body displacement and reflect the real bearing capacity of reinforcing bar dowel action. It provides the reference for the design of experimental device in experimental study of reinforcing bar dowel action.

Keywords: multi-hinge linkage loading device; dowel action of reinforcing bar; shear performance