

引文格式:张敏,李昆松,卢旦,等.纵向钢筋C型卡槽连接单向拉伸力学性能[J].建筑科学与工程学报,2024,41(2):58-65.

ZHANG Min, LI Kunsong, LU Dan, et al. Mechanical properties of longitudinal steel bar C-shaped groove connection under uniaxial tension [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2024, 41(2): 58-65.

DOI:10.19815/j.jace.2022.05002

纵向钢筋C型卡槽连接单向拉伸力学性能

张敏^{1,2}, 李昆松^{1,2}, 卢旦³, 陈宜虎^{1,2,4}, 于伟^{1,2}, 刘艳萍^{1,2}

(1. 桂林理工大学 广西建筑新能源与节能重点实验室, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004; 3. 华东建筑设计研究院有限公司, 上海 200002; 4. 贺州学院 建筑与电气工程学院, 广西 贺州 542899)

摘要:为提高装配式纵向钢筋连接的施工效率,提出了C型卡槽连接方式,制作9个连接件并进行单向拉伸试验,观察其破坏形态,研究试件荷载-位移曲线、应变发展过程,分析不同锚固板直径对连接件连接性能的影响;基于混凝土局部受压计算公式,推导出C型卡槽连接钢筋的承载力计算公式,并给出不同锚固板直径与带锚固板钢筋直径的适配表。结果表明:锚固板直径为43 mm和48 mm的连接件发生带锚固板钢筋拉断破坏,荷载-位移曲线与单根钢筋拉伸的荷载-位移曲线相似,均能满足JGJ 107—2016和ACI 318对接头的强度要求;锚固板直径为38 mm的连接件是依据JGJ 256—2011选取锚固板直径,试验过程中发生带锚固板钢筋拔出破坏,证明按照规程取值,锚固板直径偏小,无法满足连接要求;锚固板直径为38 mm的连接件其荷载-位移曲线呈现波浪形,承载力虽小于前两者,但仍具有较好的延性和较高的残余承载力;所有连接件的C型卡槽在整个受力过程中应变值较小,始终处于弹性阶段,C型卡槽环向应变表现为压应变,C型卡槽连接钢筋承载力的理论计算结果与试验结果相符。

关键词:钢筋连接;C型卡槽连接;单向拉伸;锚固板直径

中图分类号:TU375

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2024)02-0058-08

Mechanical properties of longitudinal steel bar C-shaped groove connection under uniaxial tension

ZHANG Min^{1,2}, LI Kunsong^{1,2}, LU Dan³, CHEN Yihu^{1,2,4}, YU Wei^{1,2}, LIU Yanping^{1,2}

(1. Guangxi Key Laboratory of New Energy and Building Energy Saving, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 2. College of Civil Engineering and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China; 3. East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200002, China; 4. College of Architecture and Electrical Engineering, Hezhou University, Hezhou 542899, Guangxi, China)

Abstract: In order to improve the construction efficiency of prefabricated longitudinal reinforcement connection, the C-shaped groove connection method was proposed. Nine connectors were made and uniaxial tensile tests were carried out to observe their failure modes.

收稿日期:2023-05-07

投稿网址: <http://jace.chd.edu.cn>

基金项目:广西自然科学基金项目(2018GXNSFAA050145);广西重点研发计划项目(2021AB31014);

国家自然科学基金项目(51868013)

作者简介:张敏(1980-),男,工学博士,教授,E-mail:emailzm@126.com。

通信作者:卢旦(1978-),男,工学博士,教授级高级工程师,E-mail:474558052@qq.com。

The load-displacement curve and strain development process of specimens were studied, and the influence of different anchor plate diameters on the connection performance of connectors was analyzed. Based on the calculation formula of local compression of concrete, the calculation formula of bearing capacity of C-shaped groove connection steel bar was derived. The fitting table of different anchorage plate diameters and the diameter of steel bar with anchorage plate was given. The results show that the connector with anchor plate diameter of 43 mm and 48 mm has tensile failure of steel bars with anchor plate, and the load-displacement curve is similar to the load-displacement curve of single steel bar, which can meet the strength requirements of JGJ 107—2016 and ACI 318. Anchor plate diameter of 38 mm connector is based on JGJ 256—2011 specification to select the diameter of the anchor plate, and the pull-out failure of the steel bar with anchor plate occurs during the test. It is proved that according to the specification, the diameter of the anchor plate is too small to meet the connection requirements. The load-displacement curve of the connector with the diameter of 38 mm is wavy. Although the bearing capacity is less than the former two, it still has good ductility and high residual bearing capacity. The C-shaped grooves of all connectors have small strain values throughout the loading process and are always in the elastic stage. The circumferential strain of C-shaped grooves is compressive strain. The theoretical calculation results of bearing capacity of C-shaped groove connection steel bar are consistent with the experimental results.

Key words: steel bar connection; C-shaped groove connection; uniaxial tension; diameter of anchor plate

Author resumes: ZHANG Min(1980-), male, PhD, professor, E-mail: emailzm@126. com;

LU Dan(1978-), male, PhD, senior engineer, E-mail: 474558052@qq. com.

0 引 言

近些年来,随着中国劳动力成本和工业化水平的进一步提高,以及社会可持续发展的需求,具有环境污染小和施工效率高等优点的装配式建筑得到了国家的大力推广^[1-2]。目前装配式建造技术广泛应用在建筑行业当中,在施工过程中,如何确保钢筋连接的可靠性和安全性是预制构件安装的关键环节,因此,寻找有效的钢筋连接方式是十分有必要的。

预制构件的纵向钢筋连接方式主要为灌浆套筒连接。灌浆套筒连接技术具有连接可靠、适用性广等优点,因此在装配式建筑中得到广泛推广使用。近年来,国内外学者对灌浆套筒连接的研究主要集中在研制新型套筒并进行力学性能研究。余琼等^[3-4]设计了一种新型套筒约束浆锚连接接头,研究钢筋直径和搭接长度对该接头的影响,并提出搭接长度的计算公式。郑永峰等^[5-7]提出一种冷滚压制作而成的变形灌浆套筒,研究套筒内腔构造对连接件性能的影响,分析其约束机理及约束应力分布。Sayadi 等^[8]采用玻璃纤维增强聚合物(GFRP)制作套筒,通过试验发现,增加套筒弹性区内的约束压力

会导致黏结强度降低。Henin 等^[9]依据剪切摩擦理论知识,设计了一种内壁带螺纹的套筒,进行了单向拉伸试验和数值模拟分析,结果表明,套筒长度达到 16 倍钢筋直径时,连接件才能达到锚固钢筋极限强度的 100%。除了对新型套筒研发之外,学者们还研究分析了不同因素对灌浆套筒连接的影响。张望喜等^[10]研究半灌浆套筒在考虑钢筋轴线偏心以及高温的双重作用下的力学性能,试验发现,提高温度以及增大钢筋轴线偏心率,连接件的破坏模式有从钢筋拉断转变为钢筋拔出破坏的趋势。陈建伟等^[11-12]研究了泥涂浆层、不同加载方式以及锚固长度对套筒灌浆连接的影响,试验结果表明:水泥涂浆层比率对试件的破坏形式影响较小;在不同加载形式作用下,锚固钢筋直径相同的试件极限荷载相等;钢筋锚固长度应大于 6.5 倍的钢筋直径,才能保证接头满足强度要求。Xu 等^[13]为了研究灌浆不足对连接件黏结能力的影响,制作 126 个试件进行拉伸试验,提出相应的黏结应力-滑移本构模型和经验表达式。为了研究钢筋直径、套筒尺寸以及钢筋偏移量对套筒连接的影响,Huang 等^[14]设计了拉伸试验,根据试验结果建立了试件承载力模型,给出防止

试件过早钢筋拔出的设计方法。

虽然灌浆套筒连接具有显著的优点,但也存在一定的不足,灌浆套筒连接对构件生产和施工的精度要求高,容易漏浆,质量检查困难。针对上述灌浆套筒连接方式存在的不足,本文提出了一种新型纵向钢筋连接方式——C 型卡槽连接,如图 1 所示,这种连接方式由带锚固板钢筋、C 型卡槽、连接钢筋以及灌浆料四部分组成。C 型卡槽指的是形状如同字母“C”的槽钢,并在两端分别焊接一块端板的连接件。C 型卡槽接头首先在 C 型卡槽的一端焊接连接钢筋,其次在另一端穿插带锚固板钢筋,最后在 C 型卡槽内腔浇筑灌浆料。该连接方式与灌浆套筒连接相比,孔腔大,对施工精度要求较低,容易灌浆,施工效率高。

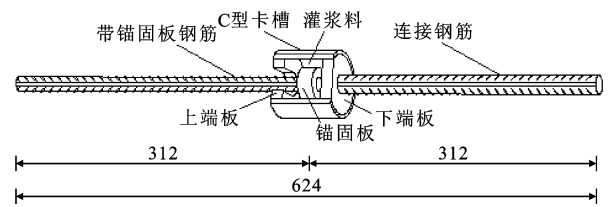


图 1 C 型卡槽连接方式(单位:mm)

Fig. 1 C-shaped groove connection method (unit:mm)

1 试验概况

1.1 试件设计

C 型卡槽和锚固板分别采用 Q235 无缝钢管和 45 号钢板,带锚固板钢筋与锚固板通过螺纹连接,锚固板安装应满足 JGJ 256—2011 最小拧紧扭矩值要求,而灌浆料中水泥、砂、华千素添加剂、水的质量配合比为 400 : 600 : 15 : 122。为了研究带锚固板钢筋的锚固板直径对 C 型卡槽连接件力学性能的影响,试验设计了 3 种锚固板直径 D ,分别为 38、43、48 mm,每一种锚固板直径制作 3 个相同的试件,共 9 个连接件。带锚固板钢筋和连接钢筋均为 HRB400 级钢筋,直径分别为 16 mm 和 22 mm。C 型卡槽的外径为 76 mm,壁厚为 4 mm,长度为 64 mm,连接件的总长为 624 mm,图 2 为试件具体的构造尺寸,试件主要参数见表 1。

1.2 材料性能

浇筑连接件时,同批次浇筑了尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm 的试块,在与连接件相同的养护条件下养护,测得的试块 28 d 抗压强度平均值见表 2。由公式(1)可以计算出 $f_{cu,k}$ 的计算值为 74.48 MPa,参照混凝土强度等级,灌浆料强度等级为 C75(凝

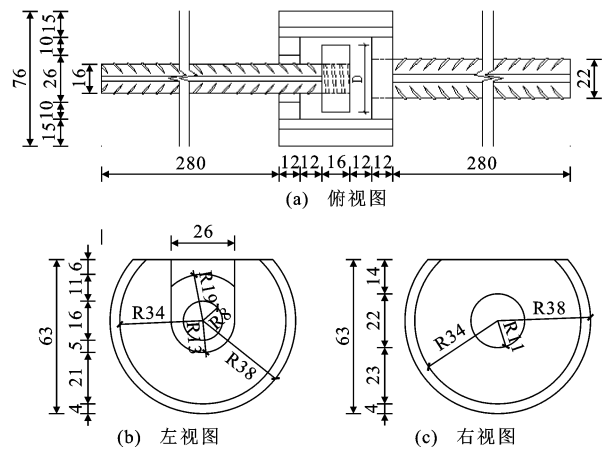


图 2 试件构造尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Dimensions and configuration of specimen (unit:mm)

表 1 试件主要参数

Table 1 Main parameters of specimens

试件编号	锚固板钢筋 直径/mm	锚固板直径 D /mm	连接钢筋直径 d /mm
D38-1/2/3	16	38	22
D43-1/2/3		43	
D48-1/2/3		48	

表 2 灌浆料材料性能

Table 2 Properties of grouting material

试块编号	抗压强度/MPa		
	实测值	平均值	标准差
1	75.6	77.1	1.59
2	79.3		
3	76.4		

土轴心抗压强度 $f_c=33.8$ MPa)。钢筋的力学性能参数如表 3 所示。

$$f_{cu,k}=\mu_f-1.645\sigma_f \tag{1}$$

式中: $f_{cu,k}$ 为灌浆料立方体抗压强度标准值; μ_f 为灌浆料立方体抗压强度实测值的平均值; σ_f 为灌浆料立方体抗压强度实测值的标准差。

表 3 钢筋材料性能

Table 3 Mechanical properties of reinforcement

钢筋直径/ mm	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	断后伸长 率/%	弹性模量/ (10^5 MPa)
16	483	661	11.8	2.06
22	496	683	12.8	2.02

1.3 加载装置及量测内容

试件在电液式高速冲击试验机(图 3)上进行加载,采用单向拉伸加载制度,加载速度为 1 kN·s⁻¹,以钢筋拉断或者钢筋被拔出破坏作为试件加载终止标志。加载过程由试验机自带的数

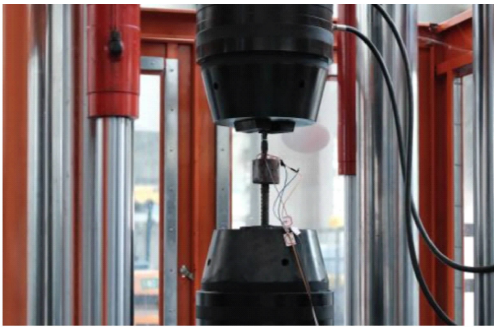


图 3 加载装置

Fig. 3 Loading setup

集系统自动采集荷载以及夹具之间的位移,并且通过应变采集仪采集监测加载过程中试件的应变变化情况。加载前,在带锚固板钢筋以及 C 型卡槽上粘贴应变片。带锚固板钢筋应变片粘贴在距离 C 型卡槽中部 108 mm 的位置上,测量钢筋的纵向应变; C 型卡槽外表面中间位置沿轴向方向对称布置 2 个应变片,环向布置 1 个应变片,分别测量 C 型卡槽的轴向应变以及环向应变,应变片具体布置情况如图 4 所示。

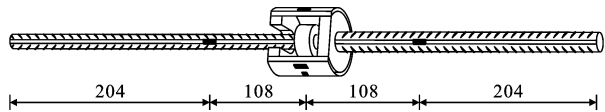


图 4 应变测点布置(单位:mm)

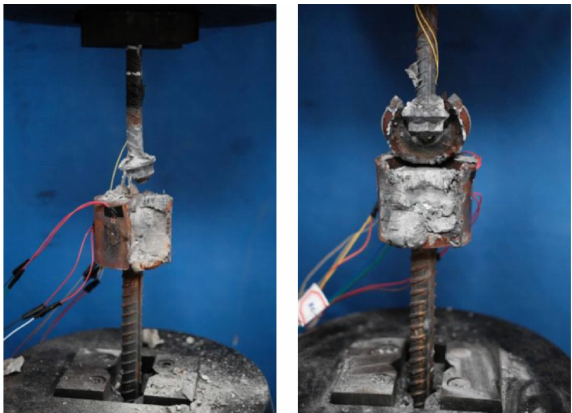
Fig. 4 Layout of strain measuring points (unit:mm)

2 试验结果与分析

2.1 破坏形态

试验加载前期,连接件处于弹性阶段,没有明显的试验现象,随着荷载的不断增加,最终试件发出巨大的响声,连接件破坏并退出工作。试件的破坏模式主要有 3 种:带锚固板钢筋拔出破坏或拉断破坏,以及 C 型卡槽翘曲破坏。

D38 组 3 个相同试件中有 2 个连接件发生带锚固板钢筋拔出破坏[图 5(a)],另一个连接件则是锚固钢筋拔出过程中,由于 C 型卡槽焊接不牢靠,导致 C 型卡槽上端板翘曲破坏[图 5(b)]。在上述 2 种破坏形式当中,灌浆料都被压碎并脱落, C 型卡槽发生一定程度的变形,而锚固钢筋没有明显的颈缩或断裂现象。D43 组 3 个连接件均为带锚固板钢筋拉断破坏(图 6),灌浆料表面出现锥形劈裂裂缝,这与文献[15]中带锚固板钢筋浅埋拔出试验锥形破坏现象一致;D48 试件破坏现象与 D43 试件不同在于, D48 试件灌浆料没有出现明显的劈裂裂缝(图 7)。



(a) 带锚固板钢筋拔出破坏 (b) C型卡槽破坏

图 5 D38 试件破坏形态

Fig. 5 Failure modes of D38 specimens

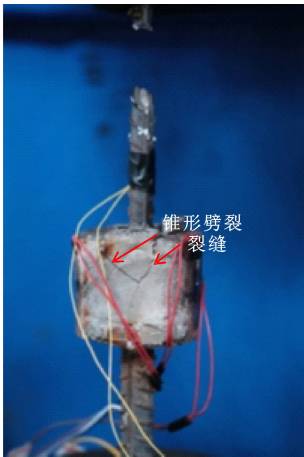


图 6 D43 试件破坏形态图

Fig. 6 Failure mode of D43 specimens

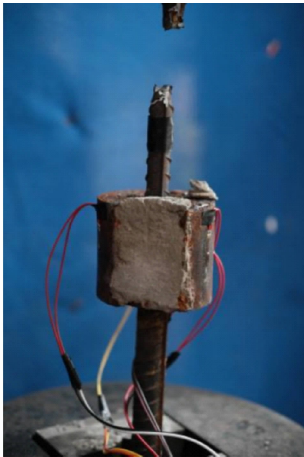


图 7 D48 试件破坏形态

Fig. 7 Failure mode of D48 specimens

2.2 荷载-位移曲线

同组的 3 个连接件荷载-位移曲线基本上相同,取 3 个试件的平均值,得到 D38、D43、D48 试件的荷

载-位移曲线如图 8 所示,其中位移指的是试验机夹具间的相对位移。

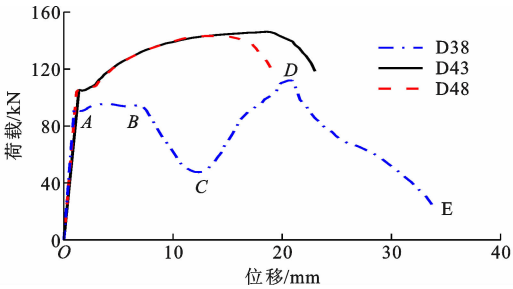


图 8 不同锚固板直径试件的荷载-位移曲线
Fig. 8 Load-displacement curves of specimens with different anchor plate diameters

对于 D38 试件,在加载初期,连接件处于弹性阶段(OA 段),荷载和位移呈现出线性增长趋势;随后进入第二阶段(AB 段),此阶段荷载波动不大,基本上维持在 89 kN,但位移一直在增长,灌浆料裂缝逐渐开展,带锚固板钢筋未受拉屈服,灌浆料达到了抗压强度;紧接着灌浆料破碎脱落,连接件承载力下降(BC 段);当带锚固板钢筋滑移到与 C 型卡槽上端板接触时(C 点),带锚固板钢筋所受的外力通过接触挤压的形式传递给 C 型卡槽,荷载从而持续增长(CD 段);最终带锚固板钢筋的锚固板因变形严重而从 C 型卡槽内部拔出(DE 段)。这种破坏形态的荷载-位移曲线呈波浪形,由于卡槽的约束作用,使得试件表现出良好的延性。

对于 D43 试件和 D48 试件,两者均为带锚固板钢筋拉断破坏,其荷载-位移曲线与单根钢筋拉伸试验的荷载-位移曲线基本相同,大致可以分为 4 个阶段:弹性阶段、屈服阶段、强化阶段以及颈缩阶段。这说明 C 型卡槽和华千素灌浆料可以给钢筋提供有效的约束,从而实现两根独立不相连的钢筋之间力的传递。

由图 8 可知,D43 和 D48 试件极限承载力相近,D38 试件极限承载力最小。荷载-位移曲线的斜率表示连接件的刚度,在弹性阶段,3 种不同锚固板直径的连接件荷载-位移曲线几乎重合,表明三者具有相同的初始刚度。

2.3 荷载-应变曲线

图 9 为每组连接件的荷载-应变曲线。在带锚固板钢筋屈服之前,不同锚固板直径的连接件呈现出相同的变化规律,即随着荷载的增加,钢筋应变、卡槽的轴向应变和环向应变都呈现线性增大。在相同的荷载作用下,钢筋的应变最大,其次是卡槽轴向

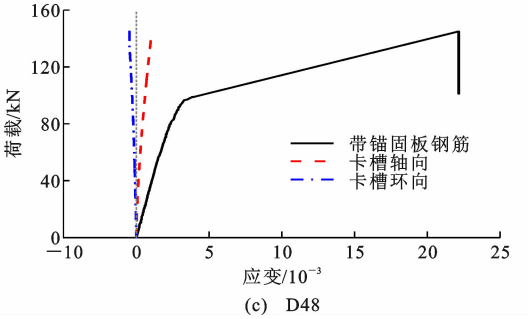
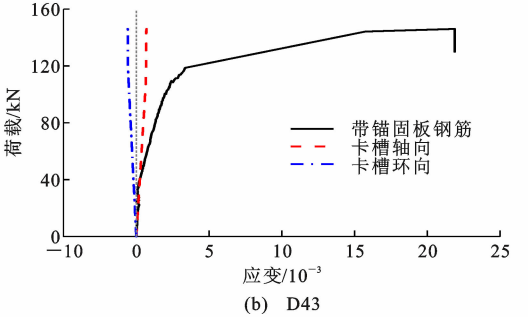
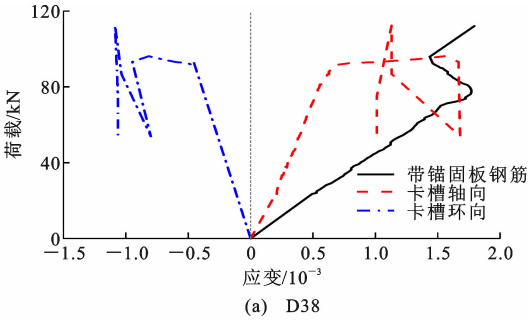


图 9 不同锚固板直径试件的荷载-应变曲线
Fig. 9 Load-strain curves of specimens with different anchor plate diameters

应变,应变最小的是卡槽环向应变。在整个试验过程中,卡槽的应变始终都较小,处于弹性阶段,说明 C 型卡槽连接方式具有一定的安全储备,满足强度要求。这种圆筒形连接器的环向变形主要由以下两个因素共同作用:一是拉伸状态下由泊松效应引起的环向收缩,此时套筒环向应变表现为压应变;其次是灌浆料的劈裂膨胀变形,导致套筒周向膨胀,此时套筒环向应变表现为拉应变^[14,16-17]。C 型卡槽环向应变在整个加载过程中始终为压应变,表明泊松效应引起的卡槽环向收缩是卡槽环向变形的主导因素。

3 种不同锚固板直径试件区别在于,D38 连接件破坏时,钢筋锚固板处的灌浆料被压碎,钢筋产生较大的滑移,使得锚固板直接与卡槽接触受力,最终卡槽端部因弯剪变形产生翘曲破坏,因此,荷载-应变曲线呈现出波浪状;另外两种不同锚固板直径的连接件则是钢筋被拉断破坏,带锚固板钢筋应变显著大于 D38 试件钢筋应变。

2.4 连接件强度分析

根据《钢筋机械连接技术规程》^[18] 相关规定,当接头的钢筋从套筒里拔出时,一级接头应满足接头的极限抗拉强度 f_u 与连接钢筋抗拉强度标准值 f_{stk} (本试验的带锚固板钢筋为 HRB400 钢筋,取 540 MPa) 比值大于等于 1.1;当接头的钢筋拉断时,则一级接头极限抗拉强度 f_u 与连接钢筋抗拉强度标准值 f_{stk} 的比值不应小于 1。对于接头连接强度,ACI 318^[19] 要求接头的极限抗拉强度 f_u 不能小于连接钢筋屈服强度标准值 f_{syk} (400 MPa) 的 1.25

表 4 主要试验结果
Table 4 Main test results

试件编号	P_u/kN	\bar{P}_u/kN	$\frac{f_u}{f_{stk}}$	$\frac{f_u}{f_{syk}}$	破坏模式
D38-1	104.52	116.65	0.96	1.30	灌浆料压碎后,带锚固板钢筋拔出
D38-2	132.99		1.23	1.65	灌浆料压碎后,带锚固板钢筋拔出
D38-3	112.45		1.04	1.40	灌浆料压碎后,卡槽翘曲破坏
D43-1	146.11	146.02	1.35	1.82	带锚固板钢筋拉断
D43-2	145.04		1.34	1.80	带锚固板钢筋拉断
D43-3	146.91		1.35	1.83	带锚固板钢筋拉断
D48-1	144.25	144.92	1.33	1.79	带锚固板钢筋拉断
D48-2	145.20		1.34	1.81	带锚固板钢筋拉断
D48-3	145.32		1.34	1.81	带锚固板钢筋拉断

对于锚固板直径为 38 mm 的 3 个相同连接件极限承载力相差较大,而另两种锚固板直径的连接件 3 个相同试件的极限承载力基本相同。当锚固板直径从 38 mm 增加到 43 mm 时,连接件的平均极限承载力增幅为 25%,增大锚固板直径可以显著提高连接件的承载力;当锚固板直径从 43 mm 增至 48 mm 时,连接件的平均极限承载力略有下降,但总体上相等,锚固板直径在 43~48 mm 范围内,增减锚固板直径对极限承载力影响不大。

3 连接件承载力计算

在 C 型卡槽本身具有足够的强度和刚度的前提下,由前面的试验可知,灌浆料被压碎后,钢筋容易拔出,因此灌浆料是否破坏将决定连接件的承载力。在钢筋受拉过程中(图 10),受锚固板挤压的灌浆料还受到了卡槽壁的约束,这与混凝土的局部受压机理类似,因此可借用《混凝土结构设计规范》(以下简称《规范》)6.6.1 条规定^[21] 的混凝土局部受压承载力计算。本试验灌浆料的性能与普通混凝土有较大区别,且卡槽对灌浆料的约束程度也与《规范》^[21] 的不一致,因此对规范公式进行修正,用 γ 来替换原公式的 1.35,修订后的公式为

倍。根据上述两个规范得到连接件的强度性能计算结果如表 4 所示。可以看出,所有连接件均能满足 ACI 318 规范强度要求,但其中 D38-1 和 D38-3 连接件不满足《钢筋机械连接技术规程》的规定,而 D38 试件锚固板直径以及带锚固板钢筋直径是按照《钢筋锚固板应用技术规程》第 3.1.2 条^[20] 选取,说明依据《钢筋锚固板应用技术规程》选取锚固板直径不能满足 C 型卡槽连接要求,应适当增大锚固板直径。其他连接件均能同时满足两个规范的要求,表明这种钢筋连接方式在强度方面是可靠的。

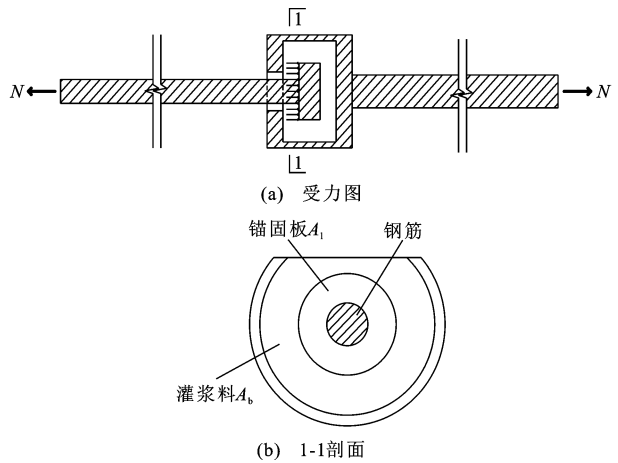


图 10 计算简图
Fig. 10 Computing diagram

$$F_1 \leq \gamma \beta_c \beta_l f_c A_{ln} \tag{2}$$

$$\beta_l = \sqrt{\frac{A_b}{A_l}} \tag{3}$$

式中: F_1 为局部受压面上作用的局部荷载或局部压力设计值; β_c 为混凝土强度影响系数; β_l 为混凝土局部受压时的强度提高系数; A_l 为混凝土局部受压面积; A_{ln} 为混凝土局部受压净面积; A_b 为局部受压的计算底面积。

根据图 10,连接件的承载力 N 等于灌浆料提供

的结构抗力,可列出平衡方程,即

$$N=\gamma\beta_c\beta_f f_c \frac{\pi}{4}(D^2-d^2)$$

(4)

由试验可知,D38 试件在 89 kN 的拉力状态下,灌浆料被压碎,灌浆料达到了抗压强度($f_c=33.8$ MPa),对应的 β_c 值为 0.833。灌浆料局部受压面积为锚固板的面积 $A_1=1\,134.11\text{ mm}^2$,局部受压的计算底面积为 C 型卡槽连接件内灌浆料的横截面面积 $A_b=3\,339.11\text{ mm}^2$,通过公式(3)、(4)可得局部受压提高系数和修正系数分别为 $\beta_1=1.72$ 和 $\gamma=1.97$ 。

将 D43 和 D48 试件参数代入式(4),计算得到相应承载力分别为 119.42 kN 和 153.53 kN,而带锚固板钢筋抗拉承载力为 $N=\frac{f_y\pi d^2}{4}=97.06\text{ kN}$

(其中 f_y 为直径 16 mm 钢筋的实测计算屈服强度),因此钢筋抗拉强度小于灌浆料所提供的承载力,即灌浆料拥有足够的承载力,使得带锚固板钢筋在灌浆料破坏之前先受拉屈服破坏,这跟单向拉伸试验中 D43 和 D48 试件的带锚固板钢筋受拉屈服断裂的试验现象相符合。因此,提出的公式计算结果推断出试件的破坏形式和试验结果吻合较好,说明本文提出的理论计算公式对预测 C 型卡槽连接件的抗剪承载力有一定的参考价值。

在承载力极限状态下,为了充分利用材料的性能,令带锚固板钢筋抗拉承载力与灌浆料抗压承载力相平衡,列出公式(5),可以推导出满足钢筋屈服时锚固板最小直径的计算公式,即

$$\frac{f_y\pi d^2}{4}=1.97\beta_c\beta_f f_c \frac{\pi}{4}(D^2-d^2)$$

(5)

$$D=\sqrt{\frac{f_y d^2}{1.97\beta_c\beta_f f_c}+d^2}$$

(6)

同时根据公式(6),可得出本文的 C 型卡槽在使用华千素灌浆料作为灌浆料时,不同锚固板直径 D 与带锚固板钢筋直径之间的适配关系,如表 5 所示。

表 5 锚固板直径与带锚固板钢筋直径之间的适配关系

Table 5 Fitting relationship between anchorage plate diameter and rebar diameter with anchorage plate

钢筋直径 d/mm	12	14	16	18	20
锚固板直径 D/mm	30	35	40	45	50

4 结 语

(1)C 型卡槽主要有两种破坏模式(卡槽翘曲破坏除外):带锚固板钢筋拔出破坏和拉断破坏。钢筋

拔出破坏形式的连接件荷载-位移曲线呈现波浪形,而钢筋拉断破坏的试件荷载-位移曲线与单根钢筋拉伸试验的荷载-位移曲线基本相同。

(2)所有连接件的卡槽应变都小于相应的钢筋应变,C 型卡槽处于弹性阶段,C 型卡槽环向应变在泊松效应和灌浆料膨胀变形共同影响下,表现为压应变。

(3)3 种不同锚固板直径的连接件除了 D38 试件外,均能同时满足《钢筋机械连接技术规程》和 ACI 318 对连接接头在单向拉伸下的强度要求。对于 C 型卡槽连接件,《钢筋锚固板应用技术规程》给的锚固板直径建议值偏小,当带锚固板钢筋直径为 16 mm 时,锚固板直径建议取大于 38 mm,经后续理论计算,约为 40 mm。

(4)在混凝土局部受压公式的基础上,推导 C 型卡槽承载力计算公式,计算并列出了不同锚固钢筋直径的锚固板直径的适配表,可以指导工程应用。

参考文献:

References:

[1] 朱俊成,余欢,石思源. 装配整体式混凝土结构钢筋连接技术及应用[J]. 建筑技术开发,2021,48(17): 13-14.

ZHU Juncheng, YU Huan, SHI Siyuan. Connection technology and application of steel bar of prefabricated integral concrete structure[J]. Building Technology Development,2021,48(17):13-14.

[2] 詹霖伟. 装配整体式混凝土结构钢筋连接技术研究进展探析[J]. 福建建筑,2021(7):76-81.

ZHAN Linwei. The analysis on research progress for steel bar connection technology of monolithic precast concrete frame structure[J]. Fujian Architecture & Construction,2021(7):76-81.

[3] 余琼,许雪静,袁炜航,等. 不同搭接长度下套筒约束浆锚搭接接头力学试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2017,44(9):82-91.

YU Qiong, XU Xuejing, YUAN Weihang, et al. Experimental study of mechanical properties of grouted sleeve lapping connector with different lap lengths under tensile load[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences),2017,44(9):82-91.

[4] 余琼,许志远,袁炜航,等. 两种因素影响下套筒约束浆锚搭接接头拉伸试验[J]. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(12):34-42.

YU Qiong, XU Zhiyuan, YUAN Weihang, et al. Experimental study of grouted sleeve lapping connectors varied in two factors under tensile load[J]. Journal of

- Harbin Institute of Technology, 2016, 48(12): 34-42.
- [5] 郑永峰, 郭正兴. 变形灌浆套筒连接性能试验研究及有限元分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(3): 94-102.
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing. Experimental study and finite element analysis on behavior of deformed gout-filled pipe splice[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(3): 94-102.
- [6] 郑永峰, 郭正兴, 张 新. 套筒内腔构造对钢筋套筒灌浆连接黏结性能的影响[J]. 建筑结构学报, 2018, 39(9): 158-166.
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, ZHANG Xin. Effect of sleeve inner cavity structure on bond performance of grouted pipe splice[J]. Journal of Building Structures, 2018, 39(9): 158-166.
- [7] 郑永峰, 郭正兴, 曹 江. 新型灌浆套筒的约束机理及约束应力分布[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2015, 47(12): 106-111.
ZHENG Yongfeng, GUO Zhengxing, CAO Jiang. Confinement mechanism and confining stress distribution of new grouting coupler for rebars splicing[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(12): 106-111.
- [8] SAYADI A A, ABD RAHMAN A B, SAYADI A, et al. Effective of elastic and inelastic zone on behavior of glass fiber reinforced polymer splice sleeve[J]. Construction and Building Materials, 2015, 80: 38-47.
- [9] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction[J]. Engineering Structures, 2015, 83: 154-162.
- [10] 张望喜, 王 嘉, 赵学涛, 等. 钢筋轴线偏心半套筒灌浆连接高温后的单向拉伸试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 49(9): 9-19.
ZHANG Wangxi, WANG Jia, ZHAO Xuetao, et al. Study on uniaxial tensile test of half grouted sleeve connection with axial eccentric rebar after high temperature[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2021, 49(9): 9-19.
- [11] 陈建伟, 王占文, 鞠士龙, 等. 考虑水泥浆涂层影响的钢筋半灌浆钢制套筒连接性能试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(22): 39-44.
CHEN Jianwei, WANG Zhanwen, JU Shilong, et al. Experimental study on connection performance of rebar semi-grouted steel sleeve considering the influence of cement slurry coating[J]. Building Structure, 2020, 50(22): 39-44.
- [12] 王占文, 陈建伟, 鞠士龙, 等. 加载方式和锚固长度对钢筋套筒灌浆连接性能影响试验研究[J]. 工业建筑, 2021, 51(4): 118-125, 171.
WANG Zhanwen, CHEN Jianwei, JU Shilong, et al. Experimental study on effect of loading mode and anchorage length on connection behavior of grouting sleeve for rebars splicing[J]. Industrial Construction, 2021, 51(4): 118-125, 171.
- [13] XU F, WANG K, WANG S G, et al. Experimental bond behavior of deformed rebars in half-grouted sleeve connections with insufficient grouting defect [J]. Construction and Building Materials, 2018, 185: 264-274.
- [14] HUANG Y, ZHU Z G, NAITO C J, et al. Tensile behavior of half grouted sleeve connections: experimental study and analytical modeling[J]. Construction and Building Materials, 2017, 152: 96-104.
- [15] 钢筋锚固板应用技术规程: JGJ 256—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
Technical specification for application of headed bars: JGJ 256—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [16] DEVRIES R A. Anchorage of headed reinforcement in concrete[D]. Austin: The University of Texas, 1996.
- [17] LING J H, ABD RAHMAN A B, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load[J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 90-98.
- [18] LIN F, ZHAO P. Behavior of grouted sleeve splice for steel profile under tensile loadings [J]. Materials, 2020, 13(9): 2037.
- [19] 钢筋机械连接技术规程: JGJ 107—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
Technical specification for mechanical splicing of steel reinforcing bars: JGJ 107—2016 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [20] Building code requirements for structural concrete and commentary: ACI 318-11[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [21] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
Code for design of concrete structures: GB 50010—2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011.