

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.01.004

中等直径钢筋焊搭混合连接的受拉性能

冯 鹏¹, 周正海², 田 野¹, 叶列平¹

(1. 清华大学 土木工程系, 北京 100084; 2. 中国建筑技术集团有限公司, 北京 100013)

摘 要:提出一种中等直径(10~16 mm)钢筋在钢筋混凝土结构中的新型连接方式,通过焊搭混合连接降低施工难度、节约钢筋用量。对比现行规范规定的钢筋连接方法,研究其受拉性能,制作了非埋入式和埋入式钢筋连接 2 组试件,共完成了 138 个钢筋连接的拉伸试验,得到无横向配筋约束的改良焊搭混合连接钢筋的破坏模式和承载力,并用有限元软件进行了模拟和验证,对破坏机理进行分析。试验结果表明:该方法简单易行,能够实现在钢筋混凝土结构中的可靠连接,承载力满足要求,破坏模式合理。基于试验结果,对焊搭混合连接的工程应用提出了建议。进行了工程实例的经济性分析,证明了该连接具有很好的经济前景。

关键词:钢筋连接;焊搭混连;绑扎搭接;焊接

中图分类号:TU392.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2014)01-0025-08

Analysis on Mechanical Behavior of Welding-Overlap Splices for Mid-Diameter Steel Bars

Feng Peng¹, Zhou Zhenghai², Tian Ye¹, Ye Lieping¹

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P. R. China;

2. China Building Technique Group Co., Ltd, Beijing 100013, P. R. China)

Abstract: An improved splice method for mid-diameter steel bars (10-16mm) used in RC structures was developed, which can make the installation more easily and economic through the hybrid connection of welding and overlapping. In order to study the mechanical behavior of welding-overlap splices, a total of 138 steel bar splice tests were conducted, including both the steel-concrete interaction group and the lonely-steel group. Through the splice tensile experiment, the failure model and ultimate strength of the improved splice was summarized. Meanwhile, the failure mechanism was analyzed by the FEM analysis. The test results show that: hybrid connection of welding and overlapping is a simpler splice method which can realized the reliable splice in the RC structures, the ultimate load of the improved splice is sufficient for the application and the failure model is reasonable. Base on the test results, some suggestions for application were given. The economic analysis of a real application case is conducted, which shows a good prospect of proposed connection.

Key words: splice of steel rebar; welding-overlap splice; binding splice; welding

钢筋连接是混凝土结构施工中量大面广、不可避免的工作,如何有效、简便、经济地实现钢筋连接是一项意义重大、影响面广的研究。

目前,中国规范规定,受力钢筋连接包括机械连接、绑扎搭接或焊接连接 3 种方式。绑扎搭接施工方便,操作难度低,但需要设置较长的锚固长度,搭

收稿日期:2012-11-06

基金项目:教育部长江学者与创新团队发展计划(IRT0736);国家 863 计划(2012AA03A204)

作者简介:冯鹏(1977-),男,博士,教授,主要从事新型结构与新材料研究,(E-mail)fengpeng@tsinghua.edu.cn。

接头连接区段内必须按要求布置箍筋^[1-3],箍筋用量较大。另外,当钢筋较粗时,绑扎搭接施工困难且容易产生裂缝,因此规范对其直径的适用范围进行了限制^[4]。机械连接需要对钢筋接头进行机械处理,操作工艺复杂,直径较小的钢筋不适用机械连接,且费用昂贵。焊接连接效果最好,连接强度可以达到甚至超过钢筋自身强度,但是施工要求高,受施工现场天气条件等影响较大,而且焊接位置处形成的热影响区和残余应力等对连接的性能影响较大;《钢筋焊接及验收规程》(JGJ 18—2003)规定,搭接焊时,焊接端钢筋应预弯,并使两钢筋的轴线在同一直线上,消除偏心作用的影响^[5]。

实际工程中,直径 10~16 mm 的钢筋应用量很大,其连接方式主要以绑扎搭接为主,尤其是 12 和 14 mm 的钢筋几乎全部采用绑扎搭接。受力纵筋的绑扎搭接对搭接区横向配筋有较高的要求^[2],且钢筋直径越小,横向配筋越多,这就使得在实际工程中,由于钢筋绑扎搭接产生了一部分额外的用钢量。随着 HRB500 钢筋等高强钢筋的应用,钢筋抗拉强度增大,钢筋搭接长度也相应增大,这部分额外增加的用钢量将相应增加。例如在 C40 混凝土柱中,直径 14 mm 的 HRB335 钢筋基本搭接长度为 413 mm,而 HRB500 钢筋则需要 598 mm。针对这种情况,笔者提出了 2 种钢筋混凝土竖向结构构件中的钢筋连接结构(专利号分别为:200920163870.5 和 201020166469. x)^[6-7]。这是一种钢筋焊搭混合连接,希望实现有效、简便、经济的钢筋连接方式。这种连接与传统的钢筋绑扎搭接、机械连接和焊接连接相比,可节省材料,且施工方便、造价低,如果在钢筋混凝土结构尤其是剪力墙等钢筋用量较大的结构中推广使用,可以取得很好的经济效益和社会效益。

关于钢筋混合连接的相关试验研究较少,Chun 等^[8]通过 48 根轴压柱试验研究横截面箍筋对于受压钢筋连接强度的影响;Bashandy^[9]通过 16 个在弯曲梁跨中受拉区布置钢筋连接的弯曲试验,研究在总截面面积不变的情况下并筋对于钢筋连接强度的影响;Hassan 等^[10]进行了 20 个足尺梁模型弯曲试验,研究了受拉区纵向主筋搭接连接强度的影响因素及大小。Issa 等^[11]通过试验研究,认为钢筋焊接连接的焊脚尺寸应取为钢筋直径的 0.3 倍,焊缝最小长度应为 15 倍钢筋直径,并且认为焊接连接在高强度钢筋、低强度混凝土或者大直径钢筋等特殊情况下具有较好的经济性。Hosny 等^[12]进行了 66 个大尺寸钢筋连接试验,探讨了常规的计算公式对于

无约束高强钢筋的适用情况,认为在某些情况下可能会过高的估计钢筋与混凝土之间的粘结强度,并提出一种适用于无约束高强钢的延伸长度计算公式。Xiao 等^[13]对高强钢筋(HPB500)在高性能混凝土(C60)中的锚固性能进行了静力和疲劳试验研究,并结合有限元对试验结果进行了分析。Simons 等^[14]对比现浇混凝土中钢筋连接,研究了后植筋在地震激励下的粘结性能,并根据试验结果提出了地震荷载作用下后植筋的设计模型。对于搭接混合连接的受力性能的研究未见有文献涉及。

笔者通过 138 个连接试件拉伸试验,针对 12 和 14 mm 两种直径的钢筋,从非埋入混凝土和埋入混凝土两个方面进行试验,分别研究钢筋单独作用的钢筋连接性能和钢筋与混凝土共同作用下的钢筋连接性能,对其破坏模式和受力性能进行分析,对钢筋焊搭混合连接的性能进行研究。

1 非埋入混凝土钢筋连接性能试验

1.1 试验设计

非埋入混凝土钢筋连接性能试验试件共计 36 个,按焊接方式分为 3 组:单点焊接、两点焊接和三点焊接。每组又根据钢筋等级和直径不同制作 4 种试件,每种试件按相同要求制做 3 个。对所有试件进行拉伸试验(见表 1),并对每种母材进行材性试验,共计 16 种试件。在试验过程中记录屈服承载力、极限承载力,并计算钢筋伸长率^[15]。

表 1 钢筋焊接连接性能试验试验结果 MPa

连接方式	焊缝长度	HRB335		HRB400	
		12 mm	14 mm	12 mm	14 mm
单点焊接	10 d×1	380/578	292/447	424/634	395/605
两点焊接	5 d×2	377/570	292/509	410/625	405/620
三点焊接	5 d×3	380/579	286/510	376/585	391/608

注:表中试验结果为试件屈服荷载平均值/试件极限荷载平均值。

单点焊试件的搭接长度和施焊长度均为 10 倍钢筋直径(文中用 d 表示),搭接区域全部满焊;两点焊组试件的搭接长度为 30 d ,在搭接区域两端各 5 d 长度区域内施焊,焊缝总长度为 10 d ;三点焊组试件的搭接长度同样为 30 d ,在搭接区域两端和中点处分别施焊三条长度为 5 d 的焊缝,焊缝总长度为 15 d 。为了与工程实际相符合,焊接方法单面手工电弧焊,焊缝布满并排放置的钢筋之间的凹槽,根据文献^[10]认为焊脚尺寸为 0.3 倍直径。材料性能见表 2。

表 2 试验材料性能

材性	HRB335		HRB400	
	12 mm	14 mm	12 mm	14 mm
母材	333/520	227/376	365/551	322/533
伸长率/%	30.55	32.77	33.33	30.55

注:表中试验结果为试件屈服荷载平均值/试件极限荷载平均值。

试验使用 1 000 kN 拉力试验机进行。试验装置见图 1。将试件两端分别夹持在试验机的上下夹具内,施加单调拉伸荷载至试件破坏,观察其破坏模式,记录屈服及极限承载力大小。试件破坏后测量其伸长率。



图 1 试验装置

1.2 破坏过程与破坏形态

从试验过程中来看,3 种钢筋连接的破坏形态与过程基本相同,都是经历屈服、强化、颈缩的阶段后被拉断而破坏。受到焊接热影响作用导致钢材性能下降,每种连接方式都有断点位于焊缝外侧端部的情况出现,但多数构件破坏模式主要以钢筋拉断为主,试件的破坏都发生在搭接区域以外。构件破坏形态如图 2 所示。

1.3 试验结果分析

试验结果如表 1、表 2 所示。将试验结果数据整理分析,如图 3 所示。

图 3 中的数据选取试验结果的平均值。从图中可以看出,对于相同母材的焊接连接,不同连接方式的极限承载力区别不大。其中 HRB335- Φ 14-三点焊连接的极限荷载较低,属于焊接质量问题,3 根构件的极限荷载离散较大,不予考虑。从结果中可以看到,3 种连接方式均满足要求。三点焊组相比于两点焊组,在承载力的表现上没有明显提高,两点焊的连接强度甚至超过三点焊,说明焊缝长度不是决定承载力的主要因素。而在工程实践中,三点焊的连接方法在没有明显提高连接效果的情况下,增加了施工的成本和复杂程度,因此在下一步实验中,选

用两点焊与绑扎进行对比,不再设置三点焊连接对比组。



(a)单点焊连接

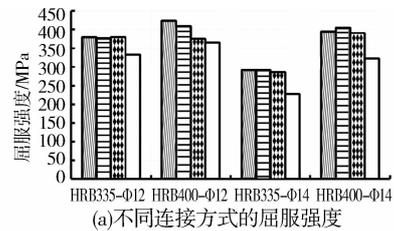


(b)两点焊连接

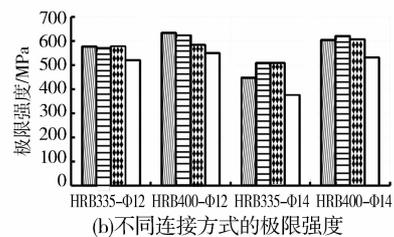


(c)三点焊连接

图 2 非埋入混凝土钢筋连接构件破坏形态



(a)不同连接方式的屈服强度



(b)不同连接方式的极限强度

注:■单点焊 □两点焊 ▨三点焊 □材性试验

图 3 不同连接方式的屈服和极限强度对比

2 埋入混凝土钢筋连接性能试验

2.1 试验设计

埋入混凝土钢筋连接性能试验试件共计 102 个,设计时考虑钢筋混凝土共同作用。按连接方式分为 3 组:绑扎搭接、单点焊连接和两点焊连接,分别用 L、M1 和 M2 表示,其中 M2 组即为所提出的焊搭混合连接方式。每组有根据钢筋直径和搭接长度不同进行试件设计:选择 12 和 14 mm 2 种钢筋直径,每组设置 6 种搭接长度,M2 组最短时与 M1 相同,因此实际包含 5 种搭接长度,共 34 种试件,每种

试件按照相同要求制作 3 个(试件具体情况如表 3 所列)。

表 3 埋入混凝土钢筋连接性能试验试件

连接方式	直径 d/mm		搭接长度 L/mm				
绑扎(L)	12	120	197	274	350	427	504
	14	140	230	319	409	498	588
单点焊接(M1)	12	120	197	274	350	427	504
	14	140	230	319	409	498	588
两点焊接(M2)	12	—	197	274	350	427	504
	14	—	230	319	409	498	588

试件制作使用 HRB335 钢筋,钢筋实测抗拉屈服强度为 364 MPa,极限强度为 604 MPa。各试件的钢筋搭接长度如表 3 所示,L 组不进行焊接,使用火烧丝进行三点绑扎,绑扎位置如图 4(a)所示;M1 组在钢筋搭接区域中点处施加 $10d$ 长的焊缝;M2 组在钢筋搭接区域两端设置 2 条长为 $5d$ 的焊缝,焊缝总长为 $10d$,施焊位置如图 4 所示。与非埋入混凝土钢筋连接性能试验相同,所有焊缝均使用单面手工电弧焊。

试件制作使用的混凝土 150 mm 立方体抗压强度平均值为 54.2 MPa。试件混凝土部分为截面 $100\text{ mm}\times 100\text{ mm}$,长度为钢筋搭接长度加 100 mm 的棱柱体,搭接钢筋端部距离混凝土表面 50 mm,钢筋夹持端的端部距离混凝土表面 150 mm。钢筋穿过棱柱体上下表面的中心,无横向配筋约束。试件构造图见图 4。

使用 1 000 kN 拉力试验机对试件进行加载。将试件的夹持端分别夹持在试验机的上下夹具,施加单调拉伸荷载,加载至试件彻底丧失承载力。观察试件在破坏过程中混凝土的裂缝发展情况和破坏模式,记录其屈服及极限承载力大小,试验结果取平均值。

2.2 破坏过程与破坏形态

2.2.1 绑扎搭接

绑扎搭接的构件在拉伸过程中,首先出现微小的横向裂缝,大多分布在钢筋搭接区域内的两侧。当横向裂缝发展到一定程度后,裂缝开始向斜向发展,形成斜向裂缝,然后钢筋一般会进入屈服阶段,与此同时,多条斜向裂缝共同发展,连成一条主劈裂裂缝,最终由于主裂缝发展过宽导致混凝土发生破坏。绑扎搭接的传力主要依靠钢筋与混凝土之间的粘结锚固。当混凝土破坏后,粘结锚固失效,钢筋绑扎搭接丧失承载力。另外,对于长度较小的构件,由于锚固长度不足,会出现混凝土

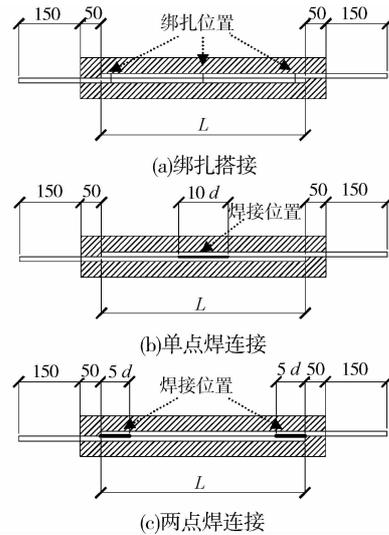
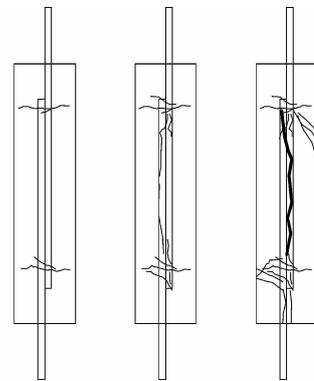
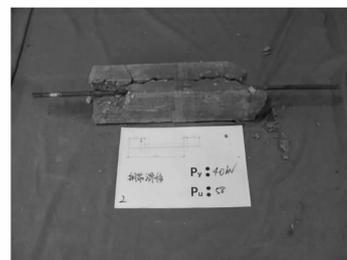


图 4 埋入混凝土钢筋连接性能试验试件构造图(单位:mm)

没有横向裂缝,而钢筋直接被拔出的情况;在搭接长度较小的情况下,试件会出现钢筋未进入屈服阶段,连接就直接发生破坏的现象,而且搭接长度越小,钢筋连接跳过屈服阶段直接破坏的现象越明显。裂缝发展过程及破坏的典型形式如图 5 所示。



(a)裂缝发展过程



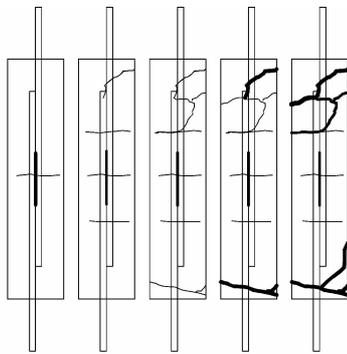
(b)典型破坏形式

图 5 绑扎搭接

2.2.2 单点焊连接

单点焊连接的构件在拉伸过程中,钢筋搭接范围内会出现横向裂缝。随着荷载进一步增加,混凝土的端部出现斜裂缝,并发展成为端部破坏,部分构件端部破坏呈现锥形破坏形态,

甚至发生端部脱落;荷载继续增加,钢筋屈服、颈缩直至被拉断,最终破坏。钢筋的断点多位于混凝土包裹范围外,少数破坏发生在混凝土内部。钢筋搭接区域内混凝土破坏不明显。裂缝发展过程及破坏的典型形式如图 6。



(a)裂缝发展过程



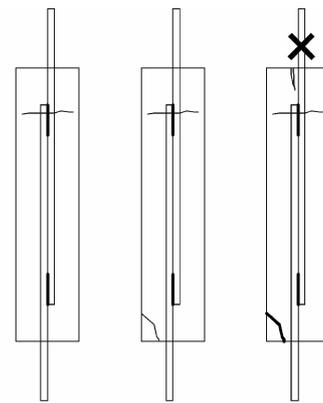
(b)典型破坏形式

图 6 单点焊连接

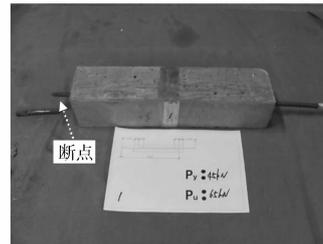
从破坏现象分析,试验开始初期,在受拉荷载作用下,钢筋与混凝土协调变形,导致混凝土出现均匀的横向裂缝,随着荷载继续增加,裂缝持续发展,由于焊接钢筋的偏心受拉作用,导致钢筋搭接区域未焊接部位开始张开,形成对搭接区域边缘混凝土由内向外的张力,混凝土开始出现斜裂缝,并继续发展,端部混凝土劈裂后开始剥落,最终进入钢筋单独工作状态,依次出现屈服,颈缩和破坏,试件最终破坏。

2.2.3 两点焊连接 M2 组试件的焊缝分为两部分,位于搭接区域的两端。试件在加载过程中,混凝土表面几乎没有观察到裂缝出现;钢筋在混凝土未发生明显破坏的情况下直接屈服、颈缩直至被拉断,钢筋的断点均位于混凝土外。在钢筋与混凝土界面交界的地方有少许混凝土松动。裂缝发展过程及破坏的典型形式如图 7。

根据以上现象可以看出,3 种连接方式的破坏模式表现出明显的不同。绑扎搭接连接由于仅靠粘结锚固传力,所以连接发生破坏也就是钢筋与混凝土的界面发生破坏,破坏模式的主要特点为混凝土先后出现横向裂缝和斜裂缝,并发展为劈裂裂缝,直至混凝土完全破坏。而 M1 组试件大部分荷载由焊



(a)裂缝发展过程及钢筋断点位置



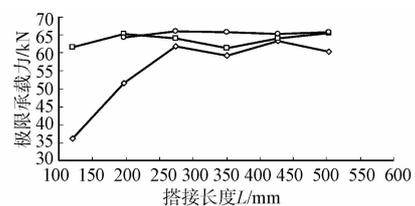
(b)典型破坏形式

图 7 两点焊连接

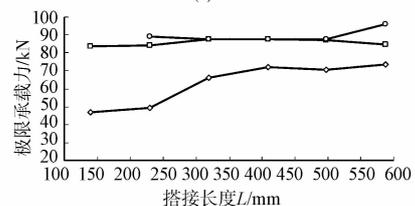
缝传递,且焊缝附近热影响区刚度较大,导致钢筋连接在两端的应变大于中央,钢筋与混凝土的界面破坏主要集中在两端,破坏模式主要为混凝土横向裂缝发展至混凝土被拉坏。两点焊组试件的 2 条焊缝将连接钢筋的搭接区域连结成为一个整体,其纵向刚度为 2 根钢筋相加,大于搭接区域外的单根钢筋,所以在加载过程中,搭接区域纵向应变小于非搭接区域,混凝土破坏主要发生在非搭接区域以外,破坏模式为混凝土出现轻微角部破坏,钢筋在混凝土外部某点被拉断。

2.3 试验结果分析

将试验结果数据整理如图 8 所示。



(a) Φ12



(b) Φ14

注: —○— 绑扎锚固 —□— 单点焊锚固 —◇— 两点焊锚固

图 8 不同钢筋连接方式的极限荷载

对数据进行分析可以得出结论:对于埋入式钢筋连接,也就是在工程中实际应用的钢筋连接来讲,焊接连接的性能远远好于绑扎搭接,尤其是对于搭接长度较小的连接,焊接连接能够保证具有较大的极限荷载,其稳定性优于绑扎搭接。就绑扎搭接的方式而言, $\Phi 14$ 比 $\Phi 12$ 的钢筋连接效果相对较差, $\Phi 12$ 的钢筋连接在保证搭接长度的前提下,基本可以达到焊接连接的极限强度,而 $\Phi 14$ 的钢筋连接则无法达到焊接连接的极限荷载,说明钢筋直径越大,焊搭混合连接的效果更明显。

3 埋入式钢筋连接受力分析

3.1 钢筋连接传力机理分析

钢筋连接是将 2 根独立的钢筋连接在一起,所以无论何种形式的连接,与整体钢筋的直接传力相比,传力机理都发生了改变,都是改变了对整体钢筋传力效果的一种削弱。所以,要改进钢筋的连接方法,必须首先明确钢筋连接的传力机理。

绑扎搭接连接的实质就是搭接的 2 根钢筋分别在混凝土内部的锚固。相向受力的钢筋分别锚固在搭接连接区段的混凝土中而将力传递给混凝土,从而实现钢筋之间应力的传递。但由于 2 根钢筋之间拼缝处混凝土受力不利,握裹力受到削弱,因此搭接传力比锚固受力差,搭接长度应大于锚固长度。此外,搭接钢筋横肋斜向挤压锥楔作用造成的径向推力引起了 2 根钢筋的分离趋势,2 根搭接钢筋之间容易出现纵向劈裂裂缝,甚至因两筋分离而破坏,因此必须保证强有力的配箍约束^[1]。

焊接是受力钢筋之间通过熔融金属直接传力。若焊接质量可靠,则不存在强度、刚度、恢复性能、破坏形态等方面的缺陷。但是如果将未处理的钢筋并排焊在一起,没有对中导致的偏心作用可能会导致混凝土发生劈裂。

将以上 2 种方法结合,将 2 根搭接连接的钢筋通过少量的焊接连接,加强其等效配箍约束。当焊接点在搭接部位中间时,钢筋搭接区域内焊接部位为焊接传力,焊接部位之外为粘结传力,在偏心作用下,非焊接区域会逐渐分开,导致混凝土发生劈裂,端部混凝土脱落,效果较差;而当焊接点位于搭接部位两端时,两端受到焊接点的约束,不利于劈裂裂缝的产生,有利于防止混凝土劈裂裂缝的产生;同时,焊缝也可以进行一部分力的传递。

3.2 钢筋连接偏心影响分析

结合试验,对不同焊搭混合连接方式的偏心影响进行分析。假设焊接区域为刚体,不会发生弯曲

变形,焊接区域以外受到拉力作用,也不会发生弯曲变形,所以在拉力作用下,钢筋连接进行自适应调整时,在焊接区域边缘由于抗弯刚度突变,该位置会发生转角变形,如图 9 所示。

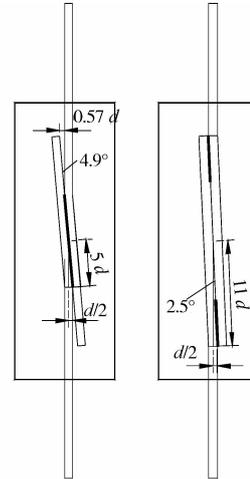


图 9 不同连接方式钢筋连接偏心分析

如图 9 所示,以直径 14 mm,搭接长度 319 mm 的试件为例,计算可得:对于单点焊连接方式,当自适应调节完成以后,焊缝边缘区域发生转角大小为 4.9° ,如果不考虑钢筋受混凝土约束作用,导致搭接边缘区域可能发生宽度为 $0.57d$ 的分离,将对混凝土产生不利影响。这种效应随着钢筋直径的增加而愈加明显。而当使用两点焊连接方式,由于焊缝将整个搭接区域连为一体,刚性区域明显增大,焊缝边缘区域转角减小为 2.5° ,搭接区域边缘由于焊缝作用不会张开,对于防止混凝土开裂有利。

使用 ANSYS 中的 solid45 实体单元建模。几何模型为两根截面为正方形的钢筋模型,截面面积按照面积等效原则将边长取为 $a=12.04$ mm(以直径 14 mm,搭接长度 319 mm 的试件为例)。先按照《钢筋焊接及验收规程》(JGJ 18—2003)^[5]的做法建立模型,对预弯后的钢筋建立几何模型,耦合节点模拟焊接。对于试验构件,建立长方体几何模型,每根钢筋在截面上划分为 4×4 的网格,在长度上分为 50 段,单元的长宽高之比约为 $1:1:3.4$ 。划分单元后对钢筋焊接区域进行节点耦合,模拟焊接连接。在钢筋两端分别加位移约束和荷载。计算得到如图 10 所示结果。

有限元分析验证了弯曲变形主要发生在焊接区域以外,尤其是在单点焊连接形式中,在搭接焊区域边缘形成了由弯曲变形引起的楔形开口。通过应力分布图可以看出,两点焊连接区域的焊缝撕裂力应力集中区域小于单点焊连接形式。

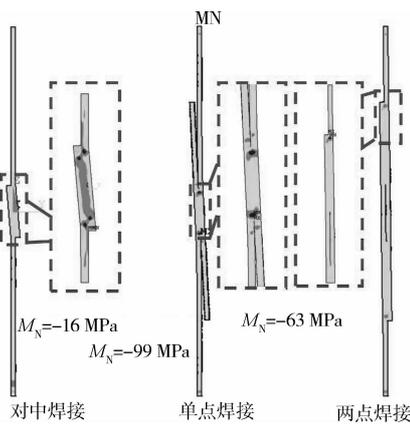


图 10 有限元计算横截面应力分布和变形图
(所标数字为横向截面应力最大值)

经过以上分析可以看出两点焊连接在减小偏心作用方面具有优势,应该尽量采用两点焊钢筋连接方式。

4 经济性分析

以沈阳某商住楼小区项目为例,通过简单计算评价焊搭混合连接方式的经济性。文中提到的焊搭混合连接方式,已在该工程中得到具体应用。该项目包括回迁楼 14 栋(22 层),住宅建筑面积共 108 404.48 m²,商品楼 9 栋(20 层),住宅建筑面积共 78 805.92 m²,两者高度皆小于 80 m,为三级抗震墙。假设层高为 2 800 mm,柱混凝土 C30,柱截面尺寸为 200 mm×400 mm,纵筋 6Φ12,箍筋为 Φ8@200(以图 11 所示暗柱为例),则计算可得每根箍筋的长度为 1.214 m。

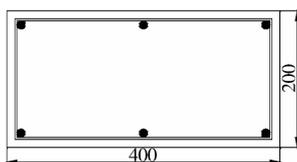


图 11 暗柱截面尺寸示意图

传统绑扎连接方式下箍筋包括加密区箍筋和非加密区箍筋。在加密区箍筋间距按规范规定取为 5 d ,即 60 mm,则加密区箍筋根数为 26 根。非加密区箍筋间距为 200 mm,则非加密区箍筋根数为 7 根,总计 33 根,总重量 15.83 kg。

采用焊搭混合连接方式下,不需要考虑箍筋加密布置,所有区域均按箍筋间距 200 mm 计算,则箍筋总根数为 15 根,重量为 7.2 kg。将计算结果汇总如表 4 所示。

表 4 两种方案经济性分析对比

序号	方案	内容	数量	单位	单价	合价
1	绑扎连接	箍筋	15.83	kg	5	79.15
		合计				79.15
2	焊搭混合连接	箍筋	7.20	kg	5	36.00
		纵筋增加	0.127	kg	5	0.63
		接头	6	个	3	18.00
		合计				54.00
3	节约				25.15	
4	节约比例				31.76%	

结合工程实际,可以计算得出面均节省费用指标,如表 5 所示。

表 5 面均节省费用指标计算

项目	数量	单位	单价	合价(元/m ²)
节约钢筋平米指标	2.5~3.5	kg/m ²	6	15~21
增加接头指标	1.5~2.5	个/m ²	3	4.5~7.5
节约平米指标合计				11.5~13.5

从表中可以看出使用焊搭混合连接进行钢筋连接可以节省大量的柱箍筋用量,节约比例可以达到 31.76%。与现行规范相比,虽然双点焊搭接区多出了 12 d 的纵筋长度(重量约为 0.127 kg),但与加密区箍筋的数量相比,这些增加是微不足道的,综合来看焊搭混合连接有非常好的经济性。将此数据参考以往工程经验进行分析,每平米可以节约 11.5~13.5 元。

对于该工程而言,仅钢筋材料费用的节省,就可以节约工程造价 250 余万元,经济效益显著。此外,焊搭混合连接方式还降低了钢筋连接的操作难度,加快了施工速度,保证了施工质量。在实际应用中,焊搭混合连接方式具有明显优势。

5 结论

通过上述对钢筋连接性能两部分试验进行分析总结,得到以下结论:

1)中等直径钢筋焊搭混合连接能实现有效的钢筋受拉连接;承载力满足要求,破坏模式合理。两点焊与单点焊相比,破坏模式更为合理,建议优先采用两点焊。

2)在混凝土中,单点焊与两点焊在极限强度上高于绑扎搭接的性能,在搭接长度很短(15 d)时就能满足强度要求。

3)焊搭混合连接的传力机制与搭接连接不同,焊缝在连接中除了发挥传力作用外,还起到横向约

束作用,有效地减少了钢筋偏心对于连接的不利影响,破坏模式中没有劈裂破坏出现也证明了这一点。

4) 焊搭混合连接方式作为一种简单经济的钢筋连接方式,可以应用于大量使用钢筋的钢混结构(如剪力墙结构等)中,具有很好的经济效益与社会效益。

参考文献:

- [1] 徐有邻,程志军. 混凝土结构中钢筋的连接[J]. 建筑结构, 2003, 33(4):67-72.
Xu Y L, Cheng Z J. Reinforcements connection in code for design of concrete structures [J]. Building Structure, 2003, 33(4):67-72.
- [2] GB 50010—2010 混凝土结构设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [3] 张园园,贡金鑫. 混凝土结构钢筋构造对比分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2012, 29(1): 70-86.
Zhang Y Y, Gong J X. Comparative analysis of rebar detailing for structures [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2012, 29(1):70-86.
- [4] 李宝红,孟丽军,李锁全. 钢筋连接方式的比较分析[J]. 山西建筑, 2005, 31(10): 77-78.
Li B H, Meng L J, Li S Q. Comparison & analysis of steel bar connection ways [J]. Shanxi Architecture, 2005, 31(10):77-78.
- [5] JGJ 18—2003 钢筋焊接及验收规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [6] 周正海. 钢筋混凝土竖向结构构件中的钢筋连接结构: 中国, 200920163870. 5[P]. 2010-05-19.
- [7] 周正海. 钢筋混凝土竖向结构构件中的钢筋连接结构: 中国, 201020166469. X [P]. 2010-11-24.
- [8] Chun S C, Lee S H, Oh B. Compression splices in confined concrete of 40 and 60 MPa (5800 and 8700 psi) compressive strengths [J]. ACI Structural Journal, 2010, 107(4): 476-485
- [9] Bashandy T R. Evaluation of bundled bar lap splices [J]. ACI Structural Journal, 2009, 106(2): 215-221.
- [10] Hassan T K, Lucier G W, Rizkalla S H. Splice strength of large diameter, high strength steel reinforcing bars [J]. Construction and Building Materials, 2012, 26(1): 216-225.
- [11] Issa C A, Nasr A. An experimental study of welded splices of reinforcing bars [J]. Building and Environment, 2006, 41: 1394-1405.
- [12] Hosny A, Seliem H M, Rizkalla S H, et al. Development length of unconfined conventional and high-strength steel reinforcing bars [J]. ACI Structural Journal, 2012, 109(5): 655-633.
- [13] Xiao J Z, Zhang C Z, Falkner H. Bond strength and damage of long rebar anchored in HPC under static and fatigue loading [J]. Key Engineering Materials, 2006, 324-325II: 867-870.
- [14] Simons I, Eligehausen R. Bond behaviour and design of post-installed rebar connections [C]//Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting - Proceedings of the International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2005, Cape Town, South Africa, 2005 : 433-434.
- [15] GB/T 228.1—2010 金属材料拉伸试验第1部分: 室温试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

(编辑 胡英奎)