

装配式混凝土结构湿连接发展现状

史继创^{1,2}, 田鹏刚^{1,2}, 张凤亮^{1,2}, 边兆伟^{1,2}, 成浩^{1,2}

(1. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082; 2. 陕西建科建设特种工程有限公司, 陕西 西安 710082)

摘要: 围绕国内外已开展的研究工作, 介绍了我国最常用的两种预制装配式混凝土结构湿连接形式——套筒灌浆连接和浆锚搭接连接, 分析了影响湿连接节点质量的各种因素, 并评价了不同影响因素下湿连接节点质量缺陷的检测方法, 以便实际工程中进行选用; 最后, 总结与讨论了各国规范中装配式混凝土结构水平缝承载力的计算公式, 为今后装配式混凝土结构湿连接的发展提供基础理论支持。

关键词: 湿连接; 节点质量; 缺陷检测; 承载力计算

中图分类号: TU756

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2022)06-0914-09

Development status of wet connection of precast concrete structure

SHI Jichuang^{1,2}, TIAN Penggang^{1,2}, ZHANG Fengliang^{1,2}, BIAN Zhaowei^{1,2}, CHENG Hao^{1,2}

(1. Shaanxi Institute of Architecture Science, Xi'an 710082, China;

2. Shaanxi Jianke Construction Special Engineering Co. Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: The most commonly used wet connection technology of precast concrete structure in China was introduced in this paper, included the sleeve grouting connection technology and the grout anchor lap connection technology. Various factors affecting the quality of wet connection were analyzed. The detection methods for the quality defects of wet-connected joints under different influence factors are evaluated for selection in practical engineering. Finally, the prediction formulas of horizontal joints bearing capacity of prefabricated concrete structures in various national codes were summarized and discussed. It provides basic theoretical support for the development of wet connection of prefabricated concrete structures in the future.

Key words: wet connection; connection quality; defect detection; bearing capacity prediction

自 1824 年混凝土诞生以来, 混凝土结构建造技术日益发展, 尤其是近年来, 装配式建筑的大量应用。装配式混凝土结构是在工厂预先制作混凝土构件, 并在施工现场通过可靠的节点连接形成整体结构。装配式混凝土结构具有环境污染少、质量把控严格、施工速度快及生产效率高等优点, 符合我国建筑工业化的发展趋势。2014 年, 我国正式颁布并实施了《装配式混凝土结构技术规程》(JGJ1—2014), 为装配式混凝土结构在实际工程中的应用提供了详实的技术支持和指导^[1]。

节点的可靠连接是保证装配式混凝土结构整体性的关键, 目前主要有干连接与湿连接两种。干连接是在预制构件内设置埋件, 施工现场通过螺栓或焊接等方式进行构件连接; 与之相比, 湿

连接是通过在预制构件节点处浇筑混凝土进行构件连接, 其连接强度比干连接更高、且耐久性更好^[2], 同时也更符合我国“等同现浇”的装配式结构设计理念, 因此, 湿连接在我国具有广泛的应用前景。

然而, 在工程应用中装配式混凝土结构湿连接易出现节点灌浆不饱满、灌浆料强度低、埋置钢筋截断等问题, 直接影响构件节点的连接强度, 导致结构安全性降低^[3]。为此, 本文总结了现常用的装配式混凝土结构湿连接技术, 分析了影响节点质量的各种因素, 依据不同影响因素评价了现有湿连接节点质量缺陷的检测方法, 并对多个国家规范中关于装配式混凝土结构水平缝承载力的计算方法进行讨论分析。

收稿日期: 2021-02-08

修改稿日期: 2022-07-04

基金项目: 陕西省“两链”融合重点研究计划项目(2022LL-JB-12); 陕西省住房城乡建设科技研发计划项目(2019-K24, 2019-K25); 陕西省建筑科学研究院科研项目(2019-1-309, 2019-1-314, 2021-1-370)

第一作者: 史继创(1988—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 结构抗震, 结构检测鉴定与加固, E-mail: sjchuang@qq.com

1 装配式混凝土结构湿连接技术

1.1 典型的结构湿连接技术

(1) 套筒灌浆连接技术

当前, 套筒灌浆连接技术是我国预制装配式混凝土结构中较为常用的一种连接方式. 20 世纪 60 年代, 余占疏在美国发明了钢筋套筒灌浆连接接头解决了装配式结构中纵向钢筋的连接问题, 用以承受构件的压力以及连接节点处弯矩^[4]; 之后, Yee^[5]首先提出钢筋套筒连接概念, 该方式一经提出, 陆续在世界各地的工程中得到成功使用; Eniea 等^[6]研究建造了四种不同结构形式的全灌浆套筒, 并通过试验表明其良好的力学性能; 在此基础上, Kim^[7]通过在灌浆套筒结构中增设出气孔对其进行了改进, 该技术现已在预制梁柱节点中得到成功应用; 我国学者郭正兴等^[8]提出了一种低合金高强无缝钢管灌浆套筒, 并通过试验研究了其力学性能, 结果表明, 新型钢管灌浆套筒力学性能良好, 满足相关规范要求. 此外, 我国学者王爱军^[9]还基于工程实际应用, 对灌浆套筒的工艺特点和连接技术进行了详细的描述.

套筒灌浆连接技术是在金属套筒内插入带肋钢筋, 并通过套筒注浆孔向套筒内腔注入高强、早强、微膨胀的水泥基灌浆料, 灌浆料硬化后将连接钢筋与套筒形成整体进行力的传递, 如图 1 所示. 由于套筒对微膨胀的灌浆料产生侧向约束力, 灌浆料与钢筋之间的粘结性能得到增强; 同时带肋钢筋与硬化后的灌浆料进行摩擦、咬合也能增强受力钢筋间传力效果; 由于套筒内径与钢筋外径相差较小, 则沿轴向钢筋位置偏差较小, 因此, 可将该接头视为钢筋轴向直接传力, 传力更加直接、更加明确, 这是套筒灌浆连接技术明显优于浆锚搭接连接技术的重要原因.

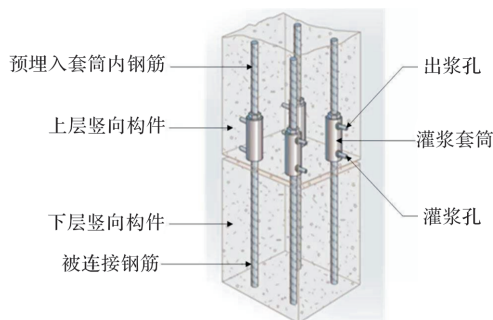


图 1 套筒灌浆连接技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of splicing by grout-filled coupling sleeve technology

鉴于套筒灌浆连接技术的优越性, 在世界范

围内有广泛应用与研究热潮. 套筒外钢筋被拉断是达到连接合格的基本要求, 但工程中仍存在材料质量或者施工质量不合格等因素, 特别是套筒水平连接缺乏重力作用, 致使套筒内灌浆密度较低, 最终导致钢筋被拔出、灌浆料劈裂、灌浆料被拔出及套筒被拉断等破坏情况, 使套筒灌浆连接接头提前破坏, 连接性能下降, 影响结构安全. 因此, 有必要对其破坏成因进行进一步研究.

(2) 浆锚搭接连接技术

浆锚搭接连接技术同样是在我国应用较多的连接技术, 并且是我国特有的一种纵向钢筋连接方式^[10], 中南建设科研人员随后对该体系进行升级开发, 研发了具有中国特色的 NPC 浆锚体系^[11]. 随后国内学者对浆锚搭接连接技术进行了大量的应用研究, 钱稼茹等^[12]完成了浆锚搭接连接的剪力墙的抗震性能试验研究, 结果表明浆锚搭接技术能保证钢筋应力间的有效传递, 且预制墙采用粗糙面设计效果更好; 刘家彬等^[13]采用矩形螺旋箍筋约束波纹管浆锚搭接连接并完成了采用该连接技术的剪力墙抗震性能试验, 研究表明, 若构造合理, 浆锚搭接连接结构可以达到同现浇结构相当的抗震性能; 马军卫等^[14]设计完成了不同类型浆锚搭接试件的轴向拉伸试验, 研究结果表明: 采用浆锚搭接连接技术可保证装配式结构纵向钢筋连接的可靠性; 吴东岳等^[15-16]采用试验和数值模拟的方法研究分析了波纹管浆锚搭接连接的受力机理, 表明了该连接的可靠性, 可用于工程实践.

浆锚搭接连接技术即首先在预制混凝土构件中预留孔道, 然后在孔道中插入需要搭接的钢筋, 并采用无收缩、高强水泥基灌浆料进行灌注以实现钢筋间搭接连接的方式, 如图 2 所示. 传力过程是通过钢筋与混凝土之间的粘结锚固作用, 两根相向受力的钢筋分别锚固在搭接区段的混凝土中从而将力传递给混凝土. 此外, 可以通过在浆锚搭接高度范围内设置螺旋箍筋, 提高节点核心混凝土的横向约束力从而改善节点的受力性能.

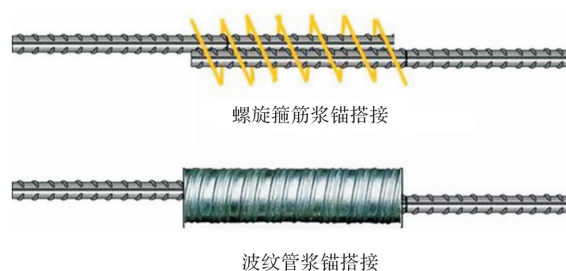


图 2 浆锚搭接连接技术

Fig. 2 Lapping in grout-filled hole technology

然而,浆锚搭接连接技术也存在施工质量问题:坐浆层及灌浆孔处的漏浆造成的浆锚搭接连接的端部缺陷;钢筋偏移倾斜或孔洞错位造成的偏心缺陷;坐浆料不合格造成的质量缺陷;钢筋搭接长度不足等情况都将直接影响到结构的连接性能,进而影响结构的安全性。因此,有必要对其破坏成因进行研究分析。

(3)其他连接技术

除上述两种主要的连接方式外,预制装配式混凝土结构连接技术还包括:结合面连接技术,带键槽的世构连接技术,特殊混凝土节点等^[17]。结合面连接技术应用于有较多结合面,包括叠合构件等,但因其振捣空间有限,容易形成内部缺陷;带键槽的世构连接技术应用于预制预应力混凝土装配整体式框架结构(世构体系),该技术是在预制预应力梁连接部位设置键槽区,通过附加U形钢筋与预制梁内钢筋实现搭接,再通过浇筑

混凝土连成整体与其他连接技术相比,施工方便,但键槽中U形钢筋定位及质量要求较高,施工质量不好控制;还有部分学者采用在混凝土中加入钢纤维或FRP筋等方式提高混凝土节点的强度,以减小钢筋连接长度。

1.2 结构湿连接影响因素

装配式混凝土结构连接节点是结构最重要亦最容易破坏的地方,实际工程中连接节点存在各种缺陷导致结构安全性降低,因此,对影响装配式混凝土结构连接节点力学性能的因素以及形成的缺陷进行研究分析很有必要。由于套筒灌浆连接技术与浆锚搭接连接技术方式均为装配式混凝土湿连接技术,且灌浆料质量与灌浆质量均为重要影响因素,故将两种技术的影响因素共同分析。为更直观的描述,将装配式混凝土结构湿连接的影响因素整理见表1。

表1 装配式混凝土结构湿连接影响因素

Tab. 1 Influence factors of wet connection of precast concrete structure

影响因素	合格要求	作用	不当操作	造成后果
材料质量	符合《钢筋连接用灌浆套筒》标准;具有较大的刚度和较小的变形能力。	承受着轴向力,对灌浆材料提供侧向约束力,增强灌浆料与钢筋间的粘结。	套筒质量不合格。	套筒破坏,连接节点丧失承载力。
	符合《钢筋连接用套筒灌浆料》、《装配式混凝土结构技术规程》标准;具有高强、早强、无收缩和微膨胀等基本特性。	硬化后微膨胀与钢筋进行粘结、咬合来传力。	灌浆料质量不合格、流动性低。 强度不足。	灌浆料锚固钢筋性能下降,降低连接性能 产生劈裂,连接节点丧失承载力。
施工质量	钢筋埋置深度不小于8倍钢筋直径;确保钢筋的中心位置、垂直度。	连接两个预制构件进行力的传递。	埋置深度不足。 未处于中心位置,偏心 倾斜、弯折及偏位,未保持垂直。	节点提前破坏,丧失承载力。 影响预制构件间的对位、连接的受力性能,钢筋产生额外的弯矩和剪力。
	饱满性、密实性;灌浆结束后,套筒或孔道内灌浆料液面到达出浆口的程度。	预制构件间力的传递。	坐浆料不密实;灌浆口封堵不及时。 灌浆通道杂物堵塞,腔体内有空腔或气泡未排;气泡排出时产生浆料回落。	产生爆浆、漏浆形成端部缺陷,降低连接性能。 导致灌浆不密实、不饱满形成中部缺陷。

(1)材料质量因素

①套筒

套筒在整个套筒灌浆连接技术中起着重要的作用,它承受着钢筋通过灌浆料传来的轴向力,同时对灌浆料提供侧向约束力,增强灌浆料与钢筋间的粘结性能。灌浆连接技术中的套筒最初使用时形式简单,内外都是光滑筒体。之后,Ling

等^[18]、Hosseini等^[19]、Henin等^[20]设计研究了不同类型了套筒形式,并验证了其良好的力学性能。但不同形状和内腔结构的套筒对混凝土内部约束效应不同,对节点的粘结性能有影响。我国为提高灌浆套筒的力学性能,制造采用的套筒内侧筒壁的凹凸构造较复杂。套筒的材料宜采用碳素结构钢、合金结构钢或球墨铸铁等钢材以便加工制

作;并规定灌浆套筒应符合《钢筋连接用灌浆套筒》^[21]标准,具有较大的刚度和较小的变形能力。若套筒质量不合格,会导致接头钢筋拉断前发生套筒破坏,构件连接节点丧失承载力。

②灌浆料

灌浆料的质量是影响预制装配式混凝土结构湿连接节点质量的另一个关键因素。通常灌浆料是以水泥为基料,配以细骨料、外加剂等材料混合配制而成,灌浆料在硬化后微膨胀与钢筋进行粘结、咬合来传力。王凤等^[22]在研究中表明,为防止发生劈裂破坏,灌浆料应具有足够强度,此外,其膨胀性需能弥补浆体硬化过程中的体积收缩,增强粘结性能;詹婧洁^[23]表明灌浆料流动性不足会导致对钢筋的锚固性能下降;吴玉龙等^[24]、何思聪等^[25]也表明了灌浆料强度的重要性。我国规范《装配式混凝土结构技术规程》^[1]、《钢筋连接用套筒灌浆料》^[26]对灌浆材料进行了明确规定,为保证灌浆料与连接钢筋之间拥有足够的连接性能,灌浆料应具有高强、早强、无收缩和微膨胀等基本特性,同时应满足装配式结构快速施工的要求。若灌浆料的强度不够,会导致灌浆料受力时产生劈裂,在钢筋拉断前发生构件破坏,使结构处于危险之中。

(2)施工质量因素

①连接钢筋

连接钢筋是两个预制构件之间进行传力的重要构件,钢筋的埋置深度、中心位置、垂直度都影响着构件的连接性能,是实际施工中较难把握的一环。预制构件厂须确保埋置钢筋插入深度,钢筋套筒灌浆连接中,要求灌浆连接端钢筋埋置深度不应小于8倍钢筋直径;同时,须严格把控预埋钢筋及外露钢筋的位置,在施工时应设置定位架等措施保障外露钢筋的位置、长度和垂直度,以避免连接钢筋产生偏心,顾盛^[27]、颜文^[28]在研究中均表明连接钢筋合格施工的重要性。然而,实际中,构件因浇筑、拆模、运输及安装等原因不可避免的会产生一些问题,如碰撞等。若碰撞较严重,会出现钢筋倾斜、弯折及偏位等现象,轻则影响预制构件间的对位、连接的受力性能,钢筋非垂直受力将产生额外的弯矩和剪力;重则下段钢筋无法就位,部分不规范工地为了强行就位甚至将下段钢筋割短或截断,导致连接钢筋的锚固长度减少,极大增加连接节点提前破坏的风险。

②灌浆操作

灌浆质量对构件连接质量和结构整体性能影

响显著,灌浆操作要求:饱满性、密实性,即灌浆结束后,套筒或孔道内灌浆料液面到达出浆口的程度,灌浆料需在拌合完成后30 min内用完,切忌二次加水搅拌。灌浆常见质量问题包括:灌浆料强度达不到或不密实产生爆浆、漏浆形成的端部缺陷;灌浆口封堵不及时或者连通腔漏浆形成的端部缺陷;灌浆通道因杂物堵塞,灌浆不畅,灌浆腔体内出现空腔或存在气泡未排出,导致灌浆不密实形成连接部位的中部缺陷;腔体及浆料气泡排出等原因产生浆料回落,导致灌浆出现不饱满形成的中部缺陷。此外,郑清林等^[29]通过对70个灌浆钢筋套筒连接试件进行单向拉伸试验发现:中部缺陷比端部缺陷对性能的影响更大;吴小宝^[30]通过试验研究表明龄期也是影响灌浆连接受力性能的因素;薛春领^[31]指出现漏浆情况后,若采用不合理的补浆方式,仍会产生较严重的中部缺陷,影响连接性能。因此,须特别关注灌浆操作避免出现灌浆质量问题。

2 装配式混凝土结构湿连接缺陷检测

缺陷检测是控制施工质量的重要手段。连接节点是影响装配式混凝土结构安全性能的重要因素,实际工程中,由于材料生产质量不合格和施工操作不规范导致装配式混凝土结构湿连接存在各种缺陷,因此需对其进行实体检测。依据装配式混凝土结构湿连接的影响因素对已有的检测方法进行分类介绍和评价,同时为更直观的对比,整理装配式混凝土结构湿连接缺陷检测方法的优缺点如表2所示。

2.1 套筒质量

对于套筒质量检测,一般采用直接测量法,即对预制构件厂构件脱模后灌浆套筒的外径、壁厚、中心位置等直接测量,以确保未出现尺寸偏差的现象;并对同一批套筒试件进行拉伸试验测得其强度。该方法简单易操作,但对埋入后的套筒无法真实测量。

2.2 灌浆料强度

(1)小直径芯样法

在原位局部取样,加工成高径比1:1圆柱体试件并进行抗压强度试验,得到灌浆料实体强度,取样及加载操作应符合《钻芯法检测混凝土强度技术规程》^[32]。该方法简单易操作,但会对构件造成微损伤。

(2)表面回弹法

采用回弹仪在出浆口和注浆口部位对表面硬度

回弹,建立其回弹测强曲线,得到灌浆料实体强度.该方法简单易操作,且不会对构件造成损伤;但测试环境温度、混凝土表面的干燥程度均会对测量数据产生影响,需在干燥环境下进行测量.

(3)超声波法

基于超声波在不同介质中的传播速度有明显差异,以超声波声速作为检测指标,通过测到的波形信息分析声波参数的变化来判定灌浆料强度.该方法简单易操作,且不会对构件造成损伤;但检测精度较低,只能定性检测.

2.3 连接钢筋

(1)X射线检测法

采用工业CT等检测器发射X射线,记录下透射射线的强度,可以得到连接节点内部的投影图像,根据图像可以直观的分辨出钢筋位置及锚固长度.该方法检测精度较高,不会对构件造成损

伤;但设备复杂不便运输与使用,且检测速度较慢,检测成本较高.

(2)地质雷达法

采用地质雷达向结构发射雷达波,由于钢筋的介电常数和电导率非常大,电磁波对钢筋的穿透小、反射信号强,依据反射回来雷达波的差异分析处理出钢筋与混凝土信息.该方法检测速度快、检测面广,且不会对构件造成损伤;但设备操作较复杂,精度适中,不适宜高精度测量.

(3)内窥镜法

在预制构件完成后套筒灌浆前,首先将测量连接钢筋的插入深度转化为测量钢筋的插入段末端与套筒内上一已知参照点的相对距离,然后通过三维立体测量内窥镜准确测量出相对距离,最后计算出连接钢筋的插入深度.该方法操作简单易操作,但对灌浆后的钢筋无法实际检测.

表2 装配式混凝土结构湿连接缺陷检测方法的优缺点

Tab. 2 Advantages and disadvantages of the wet connection defect detection methods for precast concrete structure

影响因素	检测方法	优点	缺点
套筒质量	直接测量法	操作简单	埋入后的套筒无法真实测量
	小直径芯样法	操作简单	对构件造成损伤
灌浆料强度	表面回弹法	操作简单,不会对构件造成损伤	需在干燥环境下测量
	超声波法		检测精度较低,只能定性检测
连接钢筋	X射线检测法	检测精度较高,不会对构件造成损伤	设备复杂,检测速度慢,检测成本较高
	地质雷达法	检测速度快,不会对构件造成损伤	设备复杂
	内窥镜法	操作简单	灌浆后的钢筋无法实际检测
	预埋传感器法		
灌浆质量	电阻法	操作简单	对构件造成损伤
	内窥镜法		
	红外成像法	检测精度较高,不会对构件造成损伤	图像判断及数据处理复杂,检测效率低
	X射线检测法		设备复杂,检测效率低,检测成本较高
	预埋钢丝拉拔法	操作简单	检测精度较低,对构件产生损伤
	冲击回波法	对构件不会造成损伤	检测精度较低
	超声波法	操作简单,不会对构件造成损伤	检测精度较低,只能定性检测
	地质雷达法	检测速度快,不会对构件造成损伤	设备复杂

2.4 灌浆质量

(1)预埋传感器法

基于阻尼振动幅值衰减原理,通过记录并计算灌浆前、后出浆口处传感器在初始激励作用下振动幅值,根据其衰减变化情况,即可检测内部灌浆的饱满度.该方法精度较高;但需预埋传感器,对构件造成损伤.

(2)电阻法

在套筒顶部提前放置探测装置,并设置引出导线,测定不同状态下介质的灌浆套筒顶部电阻值,可以判定灌浆饱满度.该方法精度较高,可

以实时监测混凝土;但需预埋探测装置,对结构造成损伤.

(3)内窥镜法

利用钻孔法或预成孔法,在连接节点位置钻孔或通过预留的检测孔道将三维立体测量镜头送至连接点内腔,可以直观、清晰地观察到节点内腔并精准地测量灌浆缺陷长度.该方法检测精度很高,但需钻孔或预留孔道,对构件造成损伤.

(4)红外成像法

运用红外热辐射的测量分析技术对结构进行检测,在热量的扩散和传递过程中缺陷对热传导

产生影响, 表现为构件的表面温度分布不同. 该方法精度较高, 且不会对构件造成损伤; 但图像判断及数据处理复杂, 检测效率较低.

(5) 预埋钢丝拉拔法

在套筒出浆口预埋钢丝, 待灌浆料凝固一定时间后, 对预埋钢丝进行拉拔, 通过拉拔荷载值判断灌浆饱满度. 该方法简单易操作, 但需埋设钢丝, 对结构产生损伤.

(6) 冲击回波法

该技术首先是接收冲击回波, 然后将时域数据转化成频域数据, 计算确定回波的频率峰值, 最后通过对比阻抗、振幅及相位, 即可检测灌浆饱满度. 该方法的优点是对构件不会造成损伤, 但缺点是操作复杂, 且精度较低.

此外, 还有超声波法、X 射线检测法和地质雷达法可以对灌浆质量进行检测, 检测方法同前.

3 装配式混凝土结构湿连接水平缝承载力计算

在预制装配式混凝土结构中, 构件之间接缝的可靠性是影响结构承载力的一个重要因素, 通常情况下, 水平接缝开裂或墙体摇摆等原因都会导致整体结构的刚度出现显著退化, 从而延长结构的自振周期, 影响结构的抗震性能^[33]. 因此, 有必要对装配式混凝土结构湿连接水平缝的承载力进行深入研究.

混凝土界面剪力传递问题指因混凝土浇筑的先后时间不同而形成的连接界面(如湿连接后浇混凝土与预制构件间连接界面)的剪力传递及抗剪问

题^[34]. 当前, 剪切摩擦理论是最为常用的计算预制混凝土构件连接界面受剪承载力的方法, 该理论指出, 作用于混凝土裂缝界面的剪力会导致界面发生相对滑移, 而若界面是粗糙且不规则的, 那么界面在发生相对滑移的同时还会出现部分分离, 穿过此裂缝界面的钢筋会因此产生拉力, 并给混凝土界面施加压力, 此时, 作用于混凝土裂缝界面之上的剪力主要由压力所产生的界面摩擦力抵抗^[35].

与剪切摩擦理论不同, Mattock^[36]认为界面的抗剪作用由钢筋的剪切摩擦力、界面粗糙物的机械咬合力与钢筋的销栓力组成; Laible 等^[37]根据界面的粗糙度不同将界面分为了整体粗糙和局部粗糙两类, 整体粗糙会引起钢筋的剪切摩擦力, 而当界面的分离程度较小时, 主要依靠局部粗糙产生的骨料和砂浆的挤压作用的咬合力进行抗剪; Walraven^[38]认为界面存在于骨料和水泥浆间, 在剪应力和正应力的共同作用下, 界面上部分水泥浆体开始变形, 连接面上同时传递剪应力和正应力; 秦文钺等^[39]基于试验研究结果, 认为预裂剪切面是由凹凸物咬合力、钢筋拉力在剪切面方向的分力及其销栓作用共同抵抗剪力.

对于齿槽界面, 学者们基于剪切摩擦理论, 认为抗剪键的抗剪作用和钢筋的剪切摩擦作用共同组成界面抗剪承载力, 且抗剪键对抗剪承载力的贡献可采用抗剪强度^[40]和斜压杆理论^[41]的方法进行计算; 目前也有基于摩尔库伦破坏准则^[42]推导而建立的齿槽界面抗剪承载力计算公式. 各国规范的水平缝承载力计算公式整理如表 3 所示.

表 3 各国规范的水平缝承载力计算公式

Tab. 3 The prediction formulas of horizontal joints bearing capacity in various national codes

公式来源	计算公式
日本	$V_u = 0.7(f_y A_s + N)$ 式中: V_u 为水平接缝的极限抗剪强度; f_y 为垂直方向连接钢筋的屈服强度; A_s 为垂直方向连接钢筋的有效面积; N 为构件轴力, 压力时取正, 拉力时取 0.
美国	$V_u = \varphi V_n = \varphi A_{vf} f_y \mu$ 式中: φ 取 0.75; V_n 上限取 $0.2f'_c A_c$ 、 $(3.3 + 0.8f'_c)A_c$ 、 $1.03A_c$ 三者中的较小值; f'_c 为混凝土圆柱体轴心抗压强度; A_c 为混凝土抗剪截面面积; A_{vf} 为抗剪钢筋的截面面积; f_y 为钢筋屈服强度; μ 整浇时取 1.4, 新旧粗糙面取 1.0, 不做粗糙处理取 0.6; 其余参数意义同前.
欧洲	$V_u = c f_{ctd} A_c + \mu N + \mu A_s f_{yd} \leq 0.5 \nu f_{cd} A_c$ 式中: 新旧混凝土表面粗糙化处理时 $c = 0.45$, $\mu = 0.7$, 齿槽界面时 $c = 0.5$, $\mu = 0.9$, 表面未处理时 $c = 0.35$, $\mu = 0.6$, f_{ctd} 为混凝土抗拉强度设计值; f_{yd} 为钢筋抗拉强度设计值; f_{cd} 为混凝土抗压强度设计值; $N \leq 0.6 f_{cd} A_c$; ν 取 $0.6(1 - f_{ck}/250)$; 受拉时无第一项; 其余参数意义同前.
加拿大	$V_u = \lambda \varphi_c (c + \mu \sigma) A_c \leq 0.25 \varphi_c f'_c A_c$ 式中: $\sigma = (f_y A_s + N)/A_c$, 界面为自然状态时 $c = 0.25$, $\mu = 0.6$, 粗糙面时 $c = 0.5$, $\mu = 1$; $\varphi_c = 0.65$; 普通混凝土 $\lambda = 1.0$; 其余参数意义同前.

续表 3

公式来源	计算公式
新西兰	$V_u = \varphi V_n = \varphi (A_{vf} f_y + N) \mu$ <p>式中: $V_n \leq 0.2 f'_c A_c$ 及 $8 A_c$; $f_y \leq 500$ MPa; 其余参数意义及取值同美国规范。</p>
中国	$V_u = 0.6 f_y A_{sd} + 0.8 N$ <p>式中: f_y 为垂直穿过结合面的钢筋抗拉强度设计值; N 为与剪力设计值相应的垂直于结合面的轴向力设计值, 压力时取正, 拉力时取负; A_{sd} 为垂直穿过结合面的抗剪钢筋面积; 其余参数意义同前。</p>

日本规范^[43]的计算公式同时考虑了剪切摩擦和纯摩擦的作用, 式中第一项为连接钢筋因剪切变形而产生的拉应力, 其反力给界面提供了压力从而产生摩擦力, 公式中第二项为单纯的摩擦力, 但缺少对混凝土齿槽抗剪作用的有效考虑。美国规范^[44]的计算公式是基于剪切摩擦理论而建立起来的, 主要适用于存在裂缝和不同材料、不同时间浇筑的混凝土界面的剪力传递情况, 但该公式未考虑轴力的抗剪贡献。欧洲规范^[45]的计算公式则考虑了界面混凝土的抗剪作用, 并规定了轴力和受剪承载力的贡献上限, 适用于不同时间浇筑界面的剪力传递情况。加拿大^[46]规范的计算公式是采用了普遍的裂缝界面剪力传递计算公式, 公式同样考虑了混凝土抗剪贡献并对其上限进行了限值。新西兰^[47]规范的计算公式是在美国规范基础上考虑了轴力贡献而建立起来的。我国规范^[1]则是考虑地震的反复作用, 对承载力进行了调整, 但没有考虑配筋率相同时钢筋的连接方式对其影响, 且忽略了混凝土齿槽对抗剪承载力的贡献。各国规范均以剪切摩擦理论为基础计算湿连接水平缝承载力, 但大多公式较少考虑齿槽界面等复杂情况, 公式适用度较小或精度不足, 需进一步研究。

4 结论

(1) 本文介绍与分析了套筒灌浆连接和浆锚搭接连接技术特点; 节点连接可靠是保持装配式混凝土结构良好抗震性能的关键, 套筒和灌浆料是易出现问题的材料质量因素, 连接钢筋和灌浆操作是易出现的施工质量因素, 工程应用中应多加关注;

(2) 依据装配式混凝土结构湿连接的影响因素对结构湿连接缺陷检测方法其进行分类介绍和评价, 以便工程检测时进行选用;

(3) 针对各国装配式混凝土结构湿连接水平缝承载力计算公式进行总结与讨论; 现有各国规范均以剪切摩擦理论为基础进行研究与发展, 但大多公式较少考虑齿槽界面等复杂情况, 公式适用

度较小或精度不足, 需进一步研究。

参考文献 References

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 装配式混凝土结构技术规程: JGJ1—2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for precast concrete structures: JGJ1—2014[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [2] 王伟. 浅谈预制装配式混凝土结构连接节点的研究与应用现状[J]. 科学技术创新, 2019(36): 111-113.
WANG Wei. Discussion on the research and application status of prefabricated concrete structure connection joints[J]. Scientific and Information, Innovation Technological, 111-113.
- [3] 周奎, 陈燕青. 钢筋套筒灌浆连接施工缺陷及检测方法研究进展[J]. 建设科技, 2020(6): 69-72.
ZHOU Kui, CHEN Yanqing. Research on construction defects and detection methods of steel sleeve grouting connection[J]. Construction Science and Technology, 2020(6): 69-72.
- [4] YEE A A. Splice sleeve for reinforcing bars[P]. US Pat. 3540, 763; 1968.
- [5] YEE A A, ENG H D. Structural and economic benefits of precast/prestressed concrete construction[J]. PCI journal, 2001, 46(4): 34-43.
- [6] EINEA A, YAMANE T, TADROS M K. Grout-filled pipe splices for precast concrete construction[J]. PCI journal, 1995, 40(1): 82-93.
- [7] KIM Y. A study of pipe splice sleeves for use in precast beam-column connections[D]. Austin: University of Texas, 2000.
- [8] ZHENG Y, GUO Z, ZHANG X. Effect of grout properties on bond behavior of grouted pipe splice[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2017(1): 1-10.
- [9] 王爱军. 钢筋灌浆直螺纹连接技术及应用[J]. 建筑机械化, 2010, 31(S1): 21-25.
WANG Aijun. Rebars splicing technology and application of grout & parallel thread [J]. Construction Mechanization, 2010, 31(S1): 21-25.
- [10] 刘文清, 姜洪斌, 耿永常, 等. 插入式预留孔灌浆钢筋搭接连接构件. 200820090150. 6[P], 2009-04-08.

- LIU Wenqing, JIANG Hongbin, GENG Yongchang, et al. Members with plug-in reserved hole grouting rebar lap connection. Chinese patent: 200820090150. 6 [P], 2009-04-08.
- [11] 邵晓峰. 预制混凝土剪力墙抗震性能试验及约束浆锚搭接极限研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- TAI Xiaofeng. Research on seismic performance of precast RC shear wall and limited length of overlap-joint restraint grouting-anchoring[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.
- [12] 钱稼茹, 彭媛媛, 秦珩, 等. 竖向钢筋留洞浆锚间接搭接的预制剪力墙抗震性能试验[J]. 建筑结构, 2011, 41(2): 7-11.
- QIAN Jiaru, PENG Yuanyuan, QIN Heng, et al. Tests on seismic behavior of pre-cast shear walls with vertical reinforcements grouted in holes and spliced indirectly[J]. Building Structure, 2011, 41(2): 7-11.
- [13] 刘家彬, 陈云钢, 郭正兴, 等. 螺旋箍筋约束波纹管浆锚装配式剪力墙的抗震性能[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2014, 42(11): 92-98.
- LIU Jiabin, CHEN Yuangang, GUO Zhengxing, et al. Seismic behavior of precast shear wall with rectangular spiral stirrups-constraint grouted corrugated pipe connection[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2014, 42(11): 92-98.
- [14] 马军卫, 尹万云, 刘守城, 等. 钢筋约束浆锚搭接连接的试验研究[J]. 建筑结构, 2015, 45(2): 32-35.
- MA Junwei, YI Wangyun, LIU Shoucheng, et al. Experimental study on constraint grout-filled lap connection of steel bar[J]. Building Structure, 2015, 45(2): 32-35.
- [15] 吴东岳. 浆锚连接装配式剪力墙结构抗震性能评价[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- WU Dongyue. Seismic analysis of steel grouted connecting precast shear wall structure [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.
- [16] 吴东岳, 梁书亭, 郭正兴, 等. 浆锚连接装配式剪力墙空间结构模型试验研究[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(7): 110-116.
- WU Dongyue, LIANG Shuting, GUO Zhengxing, et al. Experimental study on spatial structural model with grouted connected precast shear-wall[J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(7): 110-116.
- [17] 欧卫星, 刘康, 马高. 装配式框架连接节点研究综述[J]. 建筑科技, 2020(ZI): 59-62.
- OU Weixing, LIU Kang, MA Gao. Review on beam-to-column connection of prefabricated frame[J]. Construction Science and Technology, 2020(ZI): 59-62.
- [18] LING J H, RAHMAN A B A, IBRAHIM I S, et al. Behaviour of grouted pipe splice under incremental tensile load [J]. Construction and Building Materials, 2012, 33: 90-98.
- [19] HOSSEINLI S j A, RAHMAN A B A. Analysis of spiral reinforcement in grouted pipe splice connector [J]. Gradevinar, 2013, 65(6): 537-546.
- [20] HENIN E, MORCOUS G. Non-proprietary bar splice sleeve for precast concrete construction[J]. Engineering Structures, 2015, 83: 154-162.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋连接用灌浆套筒: JG/T398—2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. The grouting coupler for rebars splicing: JG/T398—2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2012.
- [22] 王凤, 刘焕玉, 华丽英. 钢筋套筒灌浆连接技术的研究和应用[J]. 福建建筑, 2018, 235(1): 50-53.
- WANG Feng, LIU Huangyu, HUA Liying. Research and application of grout sleeve splicing for reinforcement[J]. Fujian Architecture & Construction, 2018, 235(1): 50-53.
- [23] 詹靖洁. 装配式混凝土结构的关键连接及相关检测技术[J]. 广东土木与建筑, 2019, 26(11): 96-100.
- ZHAN Jingjie. The key connection and the related inspection of prefabricated concrete structure [J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2019, 26(11): 96-100.
- [24] 吴玉龙, 顾盛, 孙彬, 等. 里氏硬度法评估套筒灌浆料抗压强度研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 23(5): 1252-1258.
- WU Yulong, GU Sheng, SUN Bin, et al. Evaluation of compressive strength of sleeve grouting materials by using leeb hardness method [J]. Journal of Building Materials, 2022, 23(5): 1252-1258.
- [25] 何思聪, 李俊华, 熊杨, 等. 装配式建筑套筒灌浆料实体强度检验试验研究[J]. 建筑结构, 2020, 50(9): 7-10, 78.
- HE Sicong, LI Junhua, XIONG Yang, et al. Experimental study on physical strength test of fabricated building sleeve grouting materials[J]. Building Structure, 2020, 50(9): 7-10, 78.
- [26] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢筋连接用套筒灌浆料: JG/T 408—2019 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2019.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Cementitious grout for sleeve of rebar splicing: JG/T 408—2019 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2019.
- [27] 顾盛. 装配式混凝土结构连接节点质量检测的困惑与破解之道[J]. 质量检测, 2018, 36(11): 1-6.
- GU Sheng. Confusion and solution for quality detec-

- tion of fabricated concrete structure joints[J]. Quality Test, 2018, 36(11): 1-6.
- [28] 颜文. 装配式混凝土结构施工现场连接质量控制技术研究[D]. 南京:东南大学, 2018.
- YAN Wen. Research on connection quality control technology of prefabricated concrete structure in site [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [29] 郑清林, 王霓, 陶里, 等. 灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接试件性能影响的试验研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(5): 61-68.
- ZHENG Qinglin, WANG Ni, TAO Li, et al. Experimental study on effects of grout defects on the connection behaviors of grout sleeve splicing for reinforcing bars[J]. Building Science, 2017, 33(5): 61-68.
- [30] 吴小宝, 林峰, 王涛. 龄期和钢筋种类对钢筋套筒灌浆连接受力性能影响的试验研究[J]. 建筑结构, 2013, 43(14): 77-82.
- WU Xiaobao, LIN Feng, WANG Tao. Experimental research on effects of grout age and types of steel bars on mechanical behavior of grout sleeve splicing for reinforcing bars[J]. Building Structure, 2013, 43(14): 77-82.
- [31] 薛春领. 浅谈装配式混凝土结构中套筒缺陷的形成和质量检测[J]. 江苏建筑, 2019(S2): 16-19.
- XUE Chunling. Brief discussion on formation and quality detection of sleeve connection quality defects in assembled concrete structures[J]. Jiangsu Construction, 2019(S2): 16-19.
- [32] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钻芯法检测混凝土强度技术规程: JGJT384—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technical specification for testing concrete strength with drilled core method: JGJT384—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [33] BECKER J M, LLORENTE C, MUELLER P. Seismic response of precast concrete walls[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2010, 8(6): 545-564.
- [34] HOFBECK J A, IBRAHIM I O, MATTOCK A H. Shear transfer in reinforced concrete[J]. ACI Journal, 1969, 66(2): 119-128.
- [35] 赵作周, 周剑, 侯建群, 等. 装配式混凝土剪力墙结构水平缝抗剪机理及承载力计算方法综述[J]. 建筑结构, 2015, 45(12): 39-47.
- ZHAO Zuozhou, ZHOU Jian, HOU Jianqun, et al. Review of studies on shear resisting mechanisms and calculating formulas of shear resisting capacity of horizontal joints in fabricated reinforced concrete shear wall structures[J]. Building Structure, 2015, 45(12): 39-47.
- [36] MATTOCK A H. Shear transfer in concrete having reinforcement at an angle to the shear plane[G]// ACI SP-42: Shear in Reinforced Concrete. Detroit: American Concrete Institute, 1974: 17-42.
- [37] LAIBLE J P, WHITE R N, GERGLY P. Experimental investigation of seismic shear transfer across cracks in concrete nuclear containment vessels[G]// ACI SP-53: Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones. Detroit: American Concrete Institute, 1977: 203-226.
- [38] WALRAVEN J C. Fundamental analysis of aggregate interlock[J]. Journal of the Structural Division, 1981, 107(11): 2245-2270.
- [39] 秦文钺, 郭平. 弯矩对剪力传递强度的影响[J]. 重庆建筑工程学院学报, 1985, 8(3): 27-37.
- QIN Wenyue, GUO Ping. Effect of moment on shear transfer strength[J]. Journal of Chongqing Architecture University, 1985, 8(3): 27-37.
- [40] 万墨林, 曾兵. 大板结构接缝的强度和刚度[J]. 建筑结构学报, 1986, 7(4): 54-69.
- WAN Molin, ZENG Bing. Strength and rigidity of joints in large panel buildings[J]. Journal of Building Structures, 1986, 7(4): 54-69.
- [41] 柳炳康, 宋国华. 装配式大板结构竖缝抗剪机理研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2002, 23(2): 74-78.
- LIU Bingkang, SONG Guohua. Study on shear resistance mechanisms for vertical connections of precast reinforced concrete structure[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2002, 23(2): 74-78.
- [42] ABDUL-WAHAB H M S, SARSAM S Y H. Prediction of ultimate shear strength of vertical joints in large panel structures[J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(2): 204-213.
- [43] 日本建築学会. 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計基準・同解説[S. n.]. [S. l.], 1982.
- [44] Building code requirements for structural concrete and commentary ACI 318-11[S]. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2011.
- [45] 2004 Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-1; BS EN 1992-1-1[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [46] 3-04 Design of concrete structures; CSA A23[S]. Mississauga: Canadian Standards Association, 2004.
- [47] 2006 Concrete structures standard part1: the design of concrete structures; NZS3101[S]. Wellington: Standards New Zealand, 2006.

(编辑 吴海西 沈波)