

装配式房建竖向构件灌浆施工工艺与检测方法

白斌斌

内蒙古韶泰建设工程有限公司 内蒙古 呼和浩特 010010

摘要：钢筋套筒灌浆连接是装配式混凝土结构竖向预制构件（预制柱、预制剪力墙）最关键的连接技术，其施工质量直接决定结构整体的受力性能与抗震能力。本文聚焦于装配式房建竖向构件灌浆施工的全过程，系统阐述了套筒灌浆连接的技术原理与工艺特征，详细梳理了从施工准备、孔道清理、坐浆封仓、浆料制备、压力灌浆到出浆封堵的标准化工艺流程，并对各环节的关键操作要点进行了深入分析。在此基础上，重点介绍了流动度检测、同条件试件强度检验、灌浆饱满度无损检测和局部破损检测等质量检验与验收方法。研究认为，灌浆施工质量控制本质在于“材料合格、工艺规范、过程可溯、检测可靠”四者缺一不可，必须构建从材料进场到验收评定的全链条质量保障体系。

关键词：装配式建筑；竖向构件；钢筋套筒灌浆；施工工艺；质量检测

引言

在装配式混凝土结构中，预制柱与剪力墙等竖向构件的连接质量直接决定结构安全。其核心采用“钢筋套筒灌浆连接”技术，即通过预留钢筋插入预埋套筒并填充专用灌浆料实现锚固传力。该连接的可靠性高度依赖灌浆工艺质量及实体强度。然而，灌浆施工属隐蔽工程，浆料填充情况无法直接观测。若控制不严，出现不饱满、气泡或强度不足等问题，将严重削弱钢筋锚固性能，降低节点抗震能力，造成不可逆的安全隐患。近年事故调查表明，灌浆缺陷是引发结构问题的首要原因。因此，深入研究竖向构件灌浆施工的标准化工艺及质量检测方法，确保连接可靠，对保障装配式建筑的结构安全具有至关重要的工程实践意义。

1 套筒灌浆连接的技术原理与工艺特征

1.1 套筒灌浆连接的受力机理与构造要求

钢筋套筒灌浆连接的基本原理是：将两根待连接的钢筋分别从套筒两端插入，在套筒内腔与钢筋之间形成的环形间隙中注入专用灌浆料，灌浆料硬化后将钢筋与套筒内壁牢固地粘结为一体，通过灌浆料的粘结锚固作用实现钢筋应力的有效传递。套筒内壁通常设有环向凸肋或螺旋槽，用以增加灌浆料与套筒的机械咬合；钢筋插入端设有定位卡，确保钢筋居中且锚固长度满足设计要求。对于竖向构件而言，套筒通常预埋在预制柱或预制墙板的底部，安装时下层构件的外露钢筋从上方插入套筒内，灌浆孔和出浆孔分别设置在套筒侧壁的下部和上部^[1]。这种构造决定了灌浆作业必须从底部注入、自下而上填充，利用浆料的流动性和自重将套筒内的空气从上部出浆孔排出。

1.2 灌浆料的材料特性与性能要求

灌浆料是套筒灌浆连接的核心材料，其性能直接影响连接质量。专用的钢筋连接用灌浆料是一种以水泥为基材、掺入多种功能外加剂和高性能掺合料的干粉状材料，现场加水搅拌后形成高流动性、微膨胀的水泥基浆体。其关键性能指标包括：初始流动度不小于300毫米（确保能充分填充狭小间隙），30分钟流动度保留值不小于260毫米（保证可操作时间），24小时抗压强度不低于35MPa（实现快速承载），28天抗压强度不低于85MPa（保证长期锚固性能），以及竖向膨胀率控制在0.02%~0.50%范围内（补偿硬化收缩，防止界面脱粘）。

1.3 竖向构件灌浆施工的特殊性

与水平构件连接或横向连接不同，竖向构件的灌浆施工面临更严格的技术要求。其特殊性体现在：第一，套筒竖直布置，灌浆料需克服自身重力自下而上流动，对浆料的流动性和保水性要求更高；第二，竖向构件承担上部楼层荷载，连接接缝的传力性能要求严格，对灌浆饱满度提出零缺陷要求；第三，每根竖向构件的套筒数量较多（预制墙板可多达数十个），灌浆通道相互连通，施工组织复杂；第四，作业面通常位于楼层高处，受风、温度和现场交叉作业影响大。这些特殊性要求灌浆施工必须建立更为严格的工艺标准和过程控制措施。

2 灌浆施工标准化工艺流程与操作要点

2.1 施工准备与条件确认

灌浆作业启动前，须完成三项准备工作。其一，技术准备——编制专项灌浆施工方案，明确灌浆料品种及配合比、灌浆压力与流量参数、灌浆顺序、环境温度要

求及应急预案。方案须经监理单位审批,并对所有操作人员进行技术交底。其二,材料准备——灌浆料应按品种、批次分别存放于干燥通风的库房内,严禁受潮;拌合用水的温度应控制在 $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ 范围内,水质符合饮用水标准^[2]。其三,条件确认——检查现场环境温度,当环境温度低于 5°C 或高于 35°C 时,不宜进行灌浆作业,若必须施工则应采取保温或降温措施;确认灌浆设备(搅拌机、注浆泵、压力表)经校准且运行正常。

2.2 构件安装就位与接缝封堵

竖向构件吊装就位并完成垂直度和位置偏差调整后,在灌浆作业开始之前,必须对构件底部与楼面之间的水平接缝进行密封处理,形成灌浆腔室。通常采用专用座浆料或密封胶条进行封堵——在构件底部周边支设模板或粘贴密封条,形成封闭的注浆空间。封堵应严密牢固,确保灌浆过程中浆料不泄漏,同时应使灌浆腔室高度满足设计要求(一般为 $20\sim 30$ 毫米)。封堵完成后,应对每个套筒的灌浆孔和出浆孔进行逐一检查,清除孔口堵塞物,确保孔道通畅。

2.3 灌浆孔道清理与湿润处理

在正式灌浆前,必须对套筒内部和连接钢筋表面进行清洁处理。采用高压空气(无油无水)从灌浆孔向套筒内部吹扫,清除孔道内可能存在的浮尘、铁锈和杂物。对于存放时间较长或暴露于潮湿环境的构件,还应应对套筒内壁进行干燥处理。清洁完成后,宜向套筒内注入少量清水进行湿润,但灌浆前需将多余积水吹除,避免积水稀释灌浆料、改变水胶比。

2.4 灌浆料的配制与流动度检测

灌浆料的拌制是影响灌浆质量的关键工序。应严格按照产品说明书规定的加水量进行计量,采用精度不低于 $\pm 1\%$ 的电子秤称量灌浆料粉料和拌合水,严禁凭经验随意增减用水量。使用专用高速搅拌机搅拌,先加水后加粉料,搅拌时间不少于3分钟,确保浆料均匀无结块^[3]。拌制完成后,应立即按照标准方法进行流动度检测——将搅拌好的浆料注入截锥圆模,提起圆模后测量浆料在玻璃板上自由流淌的最大直径。初始流动度应满足产品说明书要求(一般不小于300毫米),流动度不足时应查明原因,严禁通过二次加水调整。

2.5 压力灌浆作业的操作控制

灌浆作业是整套工艺的核心环节,应遵循“自下而上、连续压注、单孔单灌”的原则。将注浆管连接至套筒底部的灌浆孔,启动注浆泵以适当的压力和流量开始注浆。灌浆压力应控制在 $0.5\sim 1.0\text{MPa}$ 范围内,压力过大可能导致构件抬动或密封破坏,压力过小则浆料流动不

畅。灌浆过程中应密切观察出浆孔——当浆料从上部出浆孔连续、均匀地流出且无气泡时,说明该套筒已基本注满。此时应先用专用橡胶塞或塑料堵头封堵出浆孔,继续加压注浆约 $2\sim 3$ 秒后封堵灌浆孔,利用微压确保套筒内浆料密实。每个套筒的灌浆应一次完成,中途不得停顿,若因故中断且超过浆料可操作时间,则该套筒应视为不合格。

2.6 灌浆过程中的排气与补浆

对于高度较大(超过4米)的预制柱或超长墙板,灌浆过程中容易出现浆料沉降和空气滞留的问题。应在套筒中部的适当位置增设辅助排气孔,或在出浆孔封闭后进行补浆操作——待浆料初凝前,打开出浆孔补灌浆料,以补偿因沉降造成的空隙^[4]。补浆应采用同样配比的浆料,严禁加水稀释。整个灌浆过程中应安排专人逐孔观察出浆情况,做好灌浆记录(包括灌浆时间、环境温度、流动度检测值、灌浆压力和操作人员等信息)。

2.7 灌浆后养护与成品保护

灌浆完成后,浆料在套筒内逐步凝结硬化。灌浆后24小时内,该层构件不得受到震动、冲击或额外荷载。当环境温度低于 10°C 时,应采取覆盖保温被、电热毯或搭设暖棚等保温措施,保证浆料在正温条件下养护。灌浆料的同条件养护试件应留置在构件附近,与结构经历相同的温度和湿度环境,用于确定是否达到设计要求的拆模和后续施工强度。灌浆完成后应对构件表面的浆料残留物及时清理,防止污染构件外观。

3 灌浆施工质量检测方法

3.1 施工过程质量检验

过程检验是确保灌浆质量的即时控制手段,主要包括三项内容。一是灌浆料流动度检测——每班灌浆作业前,应对拌制的浆料进行流动度检测,合格后方可用于灌浆施工,检测结果应记录在案。二是灌浆料强度检验——每班留置不少于三组标准试件($40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$ 棱柱体),分别用于检测24h强度和28d强度,试件应与构件同条件养护。三是灌浆过程记录审查——监理单位应对灌浆作业实施全程旁站,检查灌浆压力、出浆情况和封堵时机是否符合工艺要求,并留存影像资料。

3.2 灌浆饱满度的非破坏性检测

灌浆饱满度是套筒灌浆质量最核心的评价指标,也是检测难度最大的指标。目前工程中应用较为广泛的无损检测方法包括以下几种。超声波检测法利用超声波在灌浆密实区和缺陷区的传播速度、波幅和频谱差异,判断套筒内部是否存在空洞或不密实区域。该方法操作相

对简便,对单侧可接触的套筒较为适用,但检测精度受套筒材质和钢筋布置的影响较大,且对微小空洞的识别能力有限。冲击回波法通过在套筒所在位置表面施加瞬态机械冲击,测量由此产生的应力波在构件内部的传播和反射特征,根据反射波时域和频域特征判断套筒内灌浆料的填充状态。该方法对深层缺陷有较好的检测灵敏度,但检测结果的解释需要丰富的经验积累和对比数据库支撑,现场环境噪声可能对检测信号产生干扰^[5]。X射线或DR数字成像法通过对构件进行射线透照,直接获取套筒内部灌浆料的填充图像,缺陷位置和形态可直观辨识。该方法检测结果最为可靠,但设备昂贵、检测效率较低,且存在辐射防护要求,不宜作为大规模普检手段,通常用于对可疑套筒的复核确认。相控阵超声法采用多阵元探头实现声束的电子扫描和聚焦,可对套筒全截面进行成像检测,具有检测速度快、成像分辨率高的优点,近年来在灌浆饱满度检测中的应用日益增多,但其设备成本和对操作人员的技术要求均较高。

3.3 灌浆饱满度的局部破损检测

在无损检测结果存疑或需要进行质量验证时,可采用局部破损方法进行确认。常用的方法是在套筒位置采用专用取芯设备钻取芯样,直接观察套筒内浆料的充填高度和密实情况。检测完成后,钻取的孔洞应采用高强灌浆料或结构胶进行修复。局部破损检测属于抽样性质,应在设计单位和监理单位的共同见证下进行,检测数量和位置由各方协商确定。

3.4 检测结果评定与处理

灌浆饱满度检测结果的评定应参照相关技术标准执行。合格标准一般为:套筒内灌浆料填充高度不低于套筒长度的95%,且缺陷不集中在钢筋锚固区段。检测不合格的套筒,应首先分析原因,如为局部轻微不密实且位

于非关键部位,可采用钻孔补灌的方法进行修复;如为严重不饱满或套筒内大范围空洞,则需会同设计单位核算结构安全性,必要时采取局部加固或更换构件的处理措施。所有检测不合格项及其处理记录应完整归档。

4 结语

竖向构件钢筋套筒灌浆连接是装配式混凝土结构最关键的隐蔽工程节点,其施工质量是装配式建筑结构安全的决定性因素。本文系统梳理了竖向构件灌浆施工的标准化工艺流程,强调了从施工准备、封仓处理、浆料制备、压力灌浆到养护保护各环节的技术控制要点,并详细介绍了流动度检测、强度检验、灌浆饱满度无损检测和局部破损检测等质量检验方法。研究指出,灌浆施工质量管控的有效路径在于将“合格的灌浆料、规范的工艺操作、严格的过程监督、可靠的检测验证”四个要素有机结合,构建材料、工艺、人员、制度和技术手段相互支撑的全链条保障体系。建议大力推广信息化管理技术在灌浆施工中的应用,实现从“事后检测”向“过程留痕、数据可溯、结果可靠”的全面质量管理模式转变,为装配式建筑的高质量发展筑牢安全基石。

参考文献

- [1]薛伟辰,胡翔,刘国权.钢筋套筒灌浆连接施工工艺与质量检验研究[J].防灾减灾工程学报,2023,43(6):1120-1128.
- [2]赵勇,蒋勤俭,李晓明.装配式混凝土结构套筒灌浆连接质量控制关键技术[J].建筑结构,2024,54(2):67-74.
- [3]郭正兴,管东芝,李维滨.预制剪力墙套筒灌浆饱满度检测方法对比研究[J].施工技术,2025,54(3):31-38.
- [4]王铁宏,杨思忠,陈锋.装配式建筑灌浆连接材料性能及质量控制体系[J].混凝土,2024,43(1):44-51.
- [5]潘雨,张亚英,李宏.信息化技术在装配式建筑灌浆施工质量管理中的应用[J].建筑经济,2023,44(12):73-79.