

DOI: 10.7672/sgjs2022110049

装配式混凝土结构连接技术研究综述*

毛诗洋^{1,2}, 孙 彬^{1,2}, 齐 健^{1,2}, 王紫潇^{1,2}, 刘桂欣^{1,2}

(1. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100013; 2. 国家建筑工程技术研究中心, 北京 100013)

[摘要] 通过归纳总结国内外的研究成果,将装配式混凝土结构中的新型连接形式按照施工方式,划分为钢筋套筒灌浆连接、浆锚连接、混凝土结合面连接技术的湿式连接和干式连接类型,分别从连接原理、应用特点和质量影响因素等方面对不同连接形式的抗震性能进行分析,对比国内外装配式混凝土结构连接技术在施工工艺和性能要求等方面的差异,并对装配式混凝土结构连接技术的发展进行展望。

[关键词] 装配式混凝土结构;绿色建筑;连接;湿式连接;干式连接

[中图分类号] TU375 [文献标识码] A [文章编号] 2097-0897(2022)11-0049-05

Review of Research on Connection Technology of Precast Concrete Structure

MAO Shiyang^{1,2}, SUN Bin^{1,2}, QI Jian^{1,2}, WANG Zixiao^{1,2}, LIU Guixin^{1,2}

(1. China Academy of Building Research, Beijing 100013, China;
2. National Engineering Research Center of Building Technology, Beijing 100013, China)

Abstract:Through summarizing the research results at home and abroad, according to the construction method, the new connection methods appearing in prefabricated concrete structures is divided into wet connection and dry connection, respectively in terms of connection principle, application characteristics and quality influencing factors. It analyzes and compares the differences in the application of prefabricated concrete structure connection technology at home and abroad, and prospects the development of prefabricated concrete structure connection technology.

Keywords:precast concrete structure;green building; connection; wet connection;dry connection

0 引言

为适应新形势下发展绿色建筑的要求,预制装配式混凝土结构设计、生产和施工等关键技术越来越受到人们的关注。20 世纪中期,西方国家为尽快恢复生产和安置生活,预制装配式结构以生产周期短、安装施工较便捷等特点快速兴起。随着技术和理念发展,目前在发达国家已拥有成熟可靠的住宅产业化生产方式^[1]。我国预制装配式建筑应用始于 20 世纪 50 年代,主要用于工业厂房建设。20 世纪 70—80 年代,各种预制屋面梁、吊车梁、预制屋面板、预制空心楼板、装配式框架及大板建筑等得到应用,但建筑工业化的生产效率及安全性能仍有待提升。20 世纪 90 年代后,装配式结构暴露出部分问题,且当时现浇混凝土技术发展迅速、人力物力成本低廉,装配式建筑的应用处于停滞状态。近十年来,随着我国经济快速发展,劳动力成本上升,预制构件制造精度与质量、设计理念与施工技术及管理水平提高,预制装配式建筑应用重新升温,并呈快速发展态势^[2]。

1 装配式混凝土结构连接分类

美国建筑统一标准 UBC97 中规定可通过灌浆连接、设置剪切键、机械连接、锚固板等方式有效传递预制构件间的作用效应。NEHRP 推荐条款中,将预制装配结构节点分为等效现浇节点(monolithic emulation)和装配式节点(jointed precast)。其中,装配式节点的设计理念是节点具有较好的延性,允许发生较大变形。日本公布的 PRESSS (precast seismic structural systems)研究报告中,利用性能设计方法提出预制装配式结构连接性能要求,适用范围较广,没有局限连接的构造措施,只是对最终连

* 国家重点研发计划(2016YFC0701800);中国建筑科学研究院有限公司青年基金(20190112331030019)

[作者简介] 毛诗洋,工程师,E-mail:maoshiyang89@126.com

[收稿日期] 2022-03-05

性能进行要求^[3]。新西兰预制结构节点连接分为湿式连接和干式连接。湿式连接适用于现浇构件与预制构件连接处或重要的连接节点处;干式连接适用于钢结构连接或钢混结构连接。GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》和 JGJ 1—2014《装配式混凝土结构技术规程》强调连接节点安全可靠的重要性,并采用与现浇混凝土结构基本相同的设计方法和设计要求。

2 湿式连接方式

2.1 钢筋套筒灌浆连接技术

钢筋套筒灌浆连接是通过特殊设计的柱状套筒和作为黏结剂的无收缩灌浆料组合成的钢筋连接装置,该技术是 20 世纪 60 年代,由 Alfred A.Yee 博士发明,优化了装配式结构构件竖向连接问题,可实现等同现浇的设计原则。

目前对套筒灌浆连接技术的研究主要集中在连接机理、接头力学性能和构件抗震性能等方面。当钢筋承受轴向荷载时,钢筋与灌浆料间发生相对位移,钢筋横肋对灌浆料产生径向挤压力,使灌浆料环向受拉,由于金属套筒的约束作用,限制灌浆料环向变形和裂缝开展,使钢筋在较短的锚固长度下充分发挥力学性能^[4],如图 1 所示。

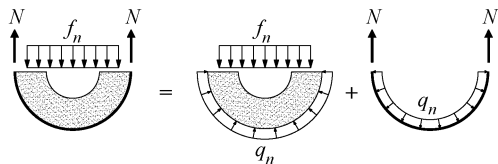


图 1 套筒灌浆连接受力状态

基于连接机理,影响灌浆套筒连接接头性能的因素主要为灌浆料强度、灌浆饱满度和钢筋插入长度。当其他条件相同时,随着灌浆料强度提高,套筒灌浆连接接头的轴向抗拉强度逐渐增大,最终达到钢筋极限抗拉强度^[5]。灌浆饱满度是硬化后灌浆料高度与设计要求的比值,与套筒内钢筋插入长度可一同作为有效锚固长度指标,共同影响套筒灌浆连接接头力学性能。由于现场灌浆质量等因素,使钢筋有效锚固长度小于设计值,通过分析研究成果,连接钢筋直径 25mm (HRB400E) 以下的套筒灌浆接头中,当钢筋端部灌浆缺陷达 30% 时,钢筋对中的灌浆接头破坏形式由钢筋拉断向钢筋拔出转变^[6]。不同缺陷布置和钢筋对中的接头试件对缺陷敏感程度不同,中部缺陷较端部缺陷对接头力学性能影响更大,偏置试件对灌浆缺陷更敏感,缺陷更小时会出现钢筋拔出破坏^[7]。灌浆缺陷对接头的变形性能影响更大,连接钢筋直径 20mm

(HRB400E) 的套筒灌浆接头在端部缺陷达 25% 时,接头变形性能显著下降^[8]。

为验证套筒灌浆连接技术是否达到等同现浇的设计原则,许多学者对由灌浆套筒为主要连接方式的结构构件抗震性能进行试验研究^[9-14]。采用套筒灌浆连接预制混凝土柱和剪力墙,其承载力、延性和耗能能力等指标能达到或接近现浇混凝土构件,但预制混凝土构件的破坏模式与现浇混凝土构件有明显区别,当轴压比较小时,竖向构件和基础界面的套筒区域形成刚域,较易开裂并发生直剪破坏。由于灌浆套筒直径一般均大于钢筋直径,以减小核心区受压混凝土面积,当外层混凝土脱落后,轴压比突然增大而发生受压破坏。

目前工程中大量采用灌浆套筒连接技术,灌浆施工时易发生漏浆、灌浆孔和出浆孔堵塞现象,灌浆量较大时易出现灌浆时间过长、节点钢筋碰撞、钢筋偏位和低温施工等问题,施工缺陷会降低钢筋套筒灌浆连接性能^[15]。为确保灌浆套筒质量可靠,需检测灌浆施工质量。已有学者结合套筒灌浆连接特点,提出小直径芯样法、预成孔法、压电阻抗法等现场灌浆施工质量检测技术^[16-18]。

综上所述,灌浆套筒连接方式具有技术成熟、可靠、适用范围广、可采用群灌技术注浆、施工效率较高的优点,在构件整体性能试验中,节点承载力、刚度和耗能能力与现浇试件基本相同,满足规范对装配整体式结构节点设计的要求,但存在灌浆料受施工阶段环境温度影响大,套筒及灌浆料成本较高,预制构件生产精度、安装施工组织和管理要求较高,灌注质量较难核查等问题。当采用灌浆套筒连接时,连接区段内受力钢筋搭接接头率为 100%,且钢制套筒横向刚度较大,会在界面处发生刚度突变,影响连接区域受力性能。为减少因布置在楼层底部,导致连接部位成为薄弱环节的问题,可将构件划分为不同类型的预制单元,将连接节点设置在受力较小区域^[19],如图 2 所示。

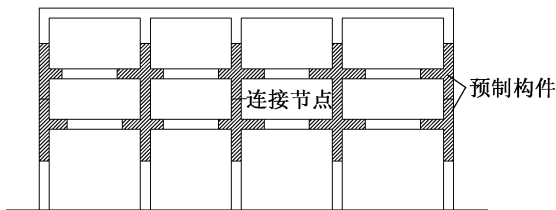


图 2 新型预制构件布置

2.2 浆锚连接技术

在装配式混凝土结构中,另一种较常用的构件连接方式是浆锚连接,工作原理是通过灌浆料使不

同预制构件中的钢筋搭接^[20]。此连接方式关键在于确定合理的钢筋搭接长度,以保证连接节点整体性能可靠^[21]。当浆锚连接承受纵向拉伸荷载时,随着外荷载增大,钢筋周围出现径向裂缝,由于螺旋箍筋的约束作用,延缓混凝土裂缝发展,可有效避免因混凝土劈裂导致的连接失效,确保充分利用钢筋力学性能,如图3所示。

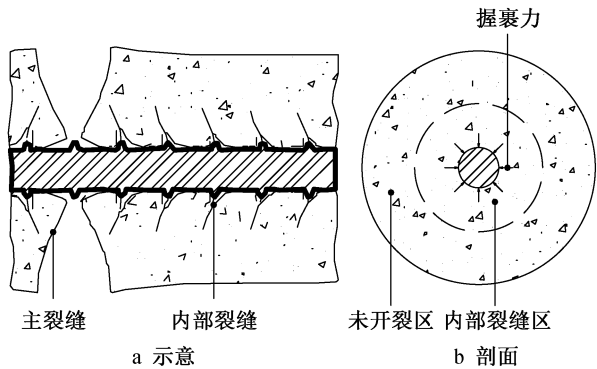


图3 浆锚搭接受力状态

热轧带肋钢筋采用浆锚连接时的搭接长度按基本锚固长度取值。实际工程中,混凝土强度等级和钢筋直径及规格是已知的,为使浆锚连接正常工作,需要确定合适的锚固长度。根据 GB 50010—2010《混凝土结构设计规范》,钢筋基本锚固长度计算如下:

$$l_{ab} = \alpha \frac{f_y}{f_t} d \tag{1}$$

式中: α 为锚固钢筋外形系数; d 为锚固钢筋直径; f_t 为混凝土轴心抗拉强度设计值; f_y 为普通钢筋抗拉强度设计值。该计算公式将钢筋类别、施工条件、保护层厚度等因素以经验系数的方式给出。

ACI 318—14《Building Code Requirements for Structural Concrete》中,钢筋锚固长度计算如下:

$$l_d = k \frac{f_y \Psi_t \Psi_e}{\lambda \sqrt{f'_c}} d_b \tag{2}$$

$$l_d = \left(\frac{3}{40} \frac{f_y}{\lambda \sqrt{f'_c}} \frac{\Psi_t \Psi_e \Psi_s}{c_b + K_{tr}} \right) d_b, K_{tr} = \frac{40 A_{tr}}{sn} \tag{3}$$

式中: A_{tr} 为横向钢筋总配筋率; d_b 为钢筋直径; c_b 为最小保护层厚度; f_y 为钢筋屈服强度; f'_c 为混凝土抗压强度; k 为调整系数; n 为箍筋肢数; s 为箍筋间距; Ψ_e 为环氧涂层调整系数; Ψ_s 为钢筋尺寸调整系数; Ψ_t 为浇筑位置调整系数; λ 为混凝土重度修正系数。

式(2),(3)的区别在于涉及的影响因素略有不同,式(2)根据不同类型的钢筋确定系数 k ,式(3)

则考虑螺旋箍筋对黏结性能的影响。

为验证采用浆锚连接预制混凝土构件的抗震性能,学者们开展大量低周反复荷载试验^[22-26],结果表明采用浆锚连接的预制混凝土竖向构件在水平力作用下,极限承载力、破坏形态和现浇构件相差不大,浆锚连接预制构件的初始刚度略低于现浇构件,但延性较好,总体来看浆锚连接构件可达到现浇整体效果。吴东岳^[27]通过增加闭合扣接约束箍筋的方式改进传统钢筋浆锚连接,并对改进后的剪力墙进行低周反复加载试验,证明闭合扣接约束箍筋能有效提高钢筋浆锚连接装配式剪力墙的力学性能,进而采用规范公式计算和截面应力积分计算,得到改进型钢筋浆锚连接装配式剪力墙接缝的承载力。通过对比计算承载力与试验实测承载力,证明简化计算模型和计算方法的合理性。

综上所述,浆锚连接因为不需要预埋钢制套筒,造价成本较低,适用于直径较小的剪力墙钢筋连接,可采用群灌技术提高施工效率,但存在后注浆体易受环境温度影响、钢筋搭接长度较长、现场湿作业量较大等问题。

2.3 混凝土结合面连接技术

目前,PC构件中装配式混凝土楼板水平连接和预制结构梁柱节点连接通常采用后浇混凝土的方法。因此,预制构件与现浇混凝土叠合面的性能成为装配式结构实现现浇结构整体性的关键。根据受力状态可将叠合构件分为一次受力叠合构件和二次受力叠合构件。一次受力叠合构件指在施工阶段,竖向荷载全部由支撑承担,待后浇混凝土达到规定强度后再共同受力。二次受力叠合构件指施工阶段后浇混凝土自重及其他竖向荷载由预制结构承担,待后浇混凝土达到规定强度后再协同工作。为加快施工进度、节约成本,目前都采用二次受力叠合构件。

预制构件一般在工厂中经过标准条件的养护,强度达到设计要求时,才进行现场吊装施工。由于工厂混凝土的原材料、拌合条件、龄期和养护条件与现场后浇混凝土存在差异,导致在新旧混凝土间形成界面。经过长期实践发现,叠合构件的新旧混凝土结合界面是薄弱环节,降低混凝土整体抗拉强度、抗剪强度及耐久性能^[28-30]。

叠合连接是装配式混凝土结构使用时间最早、应用范围最广的构件连接方式。影响叠合面性能的主要因素有粗糙面凹凸深度、界面剂种类和粗糙面处理方式等。粗糙面凹凸深度是定量描述粗糙面成型质量的指标,但目前尚未有统一评价标准。

袁群等^[31]对结合面采用灌砂法和功率谱法进行分维对比后认为,功率谱法的分维值及相应截距可对结合面大的波形起伏与粗糙点进行描述。

混凝土结合面界面剂主要有缓凝剂、抗裂防水剂和掺加纤维材料的修补材料等。在结合面处添加缓凝剂的预制叠合墙体,其极限承载力和破坏形态与现浇混凝土剪力墙相似,且试验现象表明预制部分与现浇部分墙体的受力变形基本同步,说明试验中采取的构造措施能保证预制叠合剪力墙充分发挥性能^[32]。抗裂防水剂具有减水功能,可提高流动性、和易性,避免粗骨料与旧混凝土表面的点接触,并且使混凝土界面密实,增加新旧混凝土的机械咬合力,提高界面结合强度^[33]。在修补材料中掺入纤维并涂抹在结合面处,可明显提高界面结合强度,聚丙烯纤维优于碳纤维,使用界面剂后,可减小干湿程度对结合强度的影响^[34]。

粗糙面的处理方式主要为高压水射法、人工拉毛法和压痕法等。以黏结劈拉强度为评价指标,高压水射法在粗糙度较小的情况下,能获得较大的黏结强度,优于人工拉毛法^[35]。施工前粗糙面的清理和洒水湿润也影响结合面黏结的长期性能。混凝土结合面是装配式结构抗渗透的薄弱部位,若在后浇混凝土前不清理结合面会显著降低混凝土抗渗性能。

在目前的设计方法和抗震要求下,现浇叠合连接仍然是较常用和可靠的装配式混凝土结构构件连接方式。从力学性能上看,相比全预制装配式结构,可提高结构整体刚度和抗震性能。从经济效益看,叠合构件主要受力主体在工厂制造,易保证质量,也容易制作较复杂截面形式的构件,同时减少模板使用,降低施工成本。但现浇叠合连接的湿作业量较大,人工成本较高,仍需完善叠合面黏结性能。

3 干式连接

由于湿式连接需要进行现浇混凝土等施工方式,影响装配式混凝土结构安装,为充分利用装配结构的优点,许多学者对干式连接方式进行研究。

焊接是装配式混凝土结构常用的干式连接方式。Naito 等^[36]研究和总结不同 DT 型预制楼板连接器的性能,主要原理是通过焊接预埋钢板传递荷载。研究认为,此连接方式可使预制楼板达到现浇整体效果,且减少湿作业、降低施工成本,具有较好的经济性和可靠性。Araujo 等^[37]提出采用焊接工艺,且可作为临时性装配式混凝土结构梁柱节点的连接方式,在试验环境下能达到设计性能要求,但

施工现场的试验性能有所降低。如果预制结构采用大量焊接连接方式,则经济成本和质量控制的投入将抵消本身的优势。而且,焊接过程中的高温会损害钢筋黏结性能,导致连接区域更易产生裂缝,影响节点耐久性、安全性。

螺栓连接通过梁端和柱端弯矩作用产生的摩擦力抵抗剪力作用。薛伟辰等^[38]对螺栓连接装配整体式混凝土剪力墙进行低周反复试验,结果表明剪力墙均发生受弯破坏,且装配整体式混凝土剪力墙的抗弯承载力与现浇混凝土剪力墙接近,总体延性良好。李进等^[39]研发外包钢板箍和横穿螺栓连接形式,通过对新型连接装配柱和现浇柱进行拟静力试验,验证此连接的装配柱和现浇柱具有同样的抗震性能。孙建等^[40]提出采用内嵌边框、高强螺栓连接相邻层预制墙板的新型干式连接方式,并进行试验研究。结果表明该新型连接方案可行,传力路径明确,连接钢框受压区应力大于受拉区应力,受压区高强螺栓传递剪力大于受拉区高强螺栓传递剪力,受压区高强螺栓率先发生滑移,具有较高的承载力和较好的延性。

20 世纪 90 年代,为研究地震区域是否适合应用装配式混凝土结构,美国和日本合作开展 PRESSS 项目,将装配式混凝土结构连接节点分为刚性连接 (rigid connections) 和延性连接 (ductile connections)。其中,延性连接分为消能连接 (energy-dissipating connections) 和可延伸连接 (extensible connections)。刚性连接指在地震作用下连接节点始终处于弹性范围,通常用于竖向构件间的连接。消能连接必须有足够的塑性变形能力,并能消散地震输入的能量;可延伸连接指在地震作用下节点可发生有限的水平位移和扭转,但竖向有充足的承载力。

预应力装配式混凝土结构连接方式中,PRESSS 项目重点研究和推荐延性连接方式。根据耗能能力不同,预应力连接分类如下(见图 4):①非线性弹性连接体系(NLE) 指通过无粘结后张预应力体系连接装配式混凝土的不同构件,当连接区域裂缝发展变化时,预应力筋的应力也逐渐变化,但仍处于弹性范围。地震作用下,由于预应力连接的非线性耗散地震作用,减小对节点区域的损害。此预应力连接方式可减小残余变形和刚度退化效应,构造措施较简单,但耗能效率较低。②拉压屈服连接体系(TCY) 是将预应力筋设置在截面中部,在两端设置低碳钢筋。此连接方式的节点性能接近整体现浇节点,地震作用下,预应力筋仍保持在弹性

范围内,依靠截面两端的低碳钢钢筋在拉压作用下耗散能量。但此连接方式的参与变形较大,发生塑性变形后刚度退化较快,容易在极限状态下发生剪切破坏。③剪切屈服连接体系(SY) 主要利用剪切塑性变形耗散地震作用。通常用于连接跨中两边的预制 T 型梁或预制板的水平缝,滞回性能与 TCY 型体系接近。④库仑摩擦连接体系(CF) 指在装配式混凝土框架或预制楼板上设置摩擦型阻尼装置的连接方式,当与预应力连接方式组合使用时,具有较高的初始刚度和耗能能力。

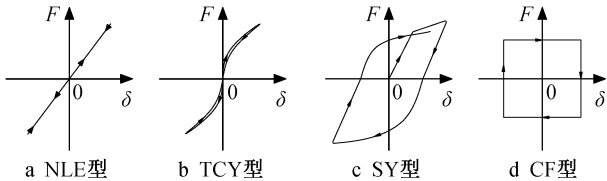


图4 PRESSS 连接典型滞回曲线

4 结语

依照我国目前的设计规范,装配式混凝土结构应达到等同现浇性能,预制构件连接应与主体结构连续,满足结构整体性能和抗震可靠性要求,与结构设计模型一致,满足建筑正常使用要求,保证建筑气密性、水密性和抗裂性,满足生产工艺要求,保证安装方便和施工质量。本文对现阶段国内外装配式混凝土结构连接技术进行总结,得到以下结论。

1)目前国内较常用的预制构件连接方式是湿式连接,国外则根据地震设防烈度不同采取不同连接方式。预制装配式结构的连接区域性能对整个结构的安全性至关重要,因此国内外在大力发展装配式混凝土结构前,需对各种连接方式的受力性能、破坏形态和构造措施等进行试验研究。

2)经过地震灾害考验,装配式混凝土结构通过合理的设计和正确的安装可达到现浇混凝土结构性能,且具有较好的可修复性。结合耗能装置,可大幅提升预制结构抗震性能。

3)需要进一步改进现有连接方式,使其更符合预制结构特点,尽量减少现场湿作业量,提高施工效率,更多地采用可再生资源,真正实现绿色节能建筑要求。

4)保证装配式结构连接节点质量对结构安全性和整体性至关重要,选择连接节点形式时除考虑抗震性能外,尚应考虑施工便利性。

5)装配式混凝土结构的进一步发展,需要有效协调设计、生产和施工各方关系,保证设计图纸满足生产要求,施工质量满足设计要求,生产质量满足施工和设计要求。通过 BIM 等技术,完成设计生

产一体化,真正实现建筑行业工业化。

参考文献:

[1] 张希黔,康明,黄乐鹏.对我国建筑工业化现状的了解和建议[J].施工技术,2015,44(4):5-13.

[2] 王俊,赵基达,胡宗羽.我国建筑工业化发展现状与思考[J].土木工程学报,2016,49(5):1-8.

[3] KURAMA Y C, SRITHARAN S, FLEISCHMAN R B, et al. Seismic-resistant precast concrete structures: state of the art[J]. Journal of structural engineering, 2018, 144(4):1-18.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 李向民,高润东,许清风,等.灌浆缺陷对钢筋套筒灌浆连接接头强度影响的试验研究[J].建筑结构,2018,48(7):52-56.

[7] 郑清林,王宽,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.

[8] 孙彬,毛诗洋,欧阳志鹏,等.灌浆饱满度对半灌浆套筒钢筋连接性能影响的试验研究[J].建筑结构,2020,50(9):1-6.

[9] 郑清林,王宽,陶里,等.套筒灌浆缺陷对装配式混凝土柱抗震性能影响的试验研究[J].土木工程学报,2018,51(5):75-83.

[10] 刘洪涛,闫秋实,杜修力.钢筋混凝土框架梁柱节点灌浆套筒连接抗震性能研究[J].建筑结构学报,2017,38(9):54-61.

[11] 钱稼茹,韩文龙,赵作周,等.钢筋套筒灌浆连接装配式剪力墙结构三层足尺模型子结构拟动力试验[J].建筑结构学报,2017,38(3):26-38.

[12] 魏红一,肖纬,王志强,等.采用套筒连接的预制桥墩抗震性能试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(7):1010-1016.

[13] 李锐,郑毅敏,赵勇.配置 500MPa 钢筋套筒灌浆连接预制混凝土柱抗震性能试验研究[J].建筑结构学报,2016,37(5):255-263.

[14] 钱稼茹,彭媛媛,张景明,等.竖向钢筋套筒灌浆锚固连接的预制剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构,2011,41(2):1-6.

[15] 郑清林,王宽,陶里,等.灌浆套筒力学性能影响因素分类及其机理分析[J].四川建筑科学研究,2017,43(3):5-9.

[16] 李俊华,何思聪,陈文龙,等.基于压电阻抗效应的套筒灌浆饱满度识别与应用[J].土木工程学报,2020,53(5):65-77,117.

[17] 毛诗洋,孙彬,张仁瑜,等.小直径芯样法检验套筒灌浆料实体强度的试验研究[J].建筑结构,2018,48(23):1-6.

[18] 孙彬,毛诗洋,王宽,等.预成孔法检测装配式结构套筒灌浆饱满度的试验研究[J].建筑结构,2018,48(23):7-10.

[19] 范力. 装配式预制混凝土框架结构抗震性能研究[D].上海:同济大学,2007.

[20] 赵培. 约束浆锚钢筋搭接连接试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.

[21] 倪英华. 约束浆锚连接极限搭接长度试验研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014.

[22] 管乃彦,陈昕,吕亚军.两种成孔方式下约束浆锚搭接的预制剪力墙抗震性能研究[J].混凝土,2015(6):1-4.

工运至指定拼装地点进行拼装。

2.5.5 装配式免拆模楼板安装

装配式免拆模楼板拼装前应对施工安装人员进行技术交底及安全技术培训,明确装配式免拆模板部件拼装作业要点。模板进场前,按照使用部位分区进行打包,并按排版图进行编号。吊至作业面后进行人工拼装,首先根据图纸核对部件尺寸、编号及位置,准确无误后按编号顺序进行拼装,拼装完成后应校核板面平整度及标高。

对结构跨度 $\geq 4\text{m}$ 的板,装配式免拆模楼板安装时按板跨度的 $1/1\,000\sim 3/1\,000$ 进行起拱。起拱时不得减少构件的设计截面高度。装配式免拆模楼板安装完毕后,全面检查扣件螺栓斜撑是否稳固稳定,模板拼缝是否严密,防止浇筑时模板拼缝处产生漏浆^[4-6]。

机电管线预埋需在装配式免拆模楼板上现场开孔,根据孔径,采用云石机或水钻进行开孔,保证开孔位置的准确性,同时不得因为水电开孔损坏免拆模板。

装配式免拆模楼板便于运输、吊装和安装,省去楼面模板的拆、装、倒及抹灰找平等工序。据测算,相比装配式叠合板,本工程通过应用装配式免拆模一体化技术,综合效率提升约 10%。

3 结语

装配式免拆快装系统采用模板与结构一体化及设计、加工、配送、装配一体化的系统化思路,保证装配式施工高质量、高效和灵活,为建筑工业化的发展提供新技术。本文通过对某工程项目装配式免拆快装系统设计、加工、配送及装配关键流程、工序及应用要点进行分析和总结,形成该系统可落地、可推广的一体化快速建造和产业化关键技术,有助于推动装配式建筑高质量、高速度健康发展。

参考文献:

[1] 李东彬,王建军,陈勇,等.混凝土楼盖聚苯免拆模板技术研究[J].施工技术,2015,44(20):110-113.
[2] 张勇,田亮,苏梓儒,等.公建装配式建筑结合铝合金模板施工技术[J].施工技术,2020,49(14):55-59.
[3] 刘永军,丁文艺,刘畅.永久性模板的技术发展[J].水利与建筑工程学报,2010,8(6):30-34.
[4] HAN C, YE H W. A novel IoT-cloud-BIM based intelligent information management system in building industrialization [C]//International Conference on Construction and Real Estate Management,2018.
[5] 胡振凯,王骞. PK 定型免拆模板漏浆问题质量控制要点[J].施工技术,2020,49(8):107-109.
[6] 杨兆源,曹万林,郭利明,等.一种装配式悬挑轻钢模架施工平台受力性能分析[J].施工技术(中英文),2021,50(16):1-5.

(上接第 53 页)

[23] 陈云钢,刘家彬,郭正兴,等.装配式剪力墙水平拼缝钢筋浆锚搭接抗震性能试验[J].哈尔滨工业大学学报,2013,45(6):83-89.
[24] 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.
[25] 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.
[26] 张微敬,钱稼茹,陈康,等.竖向分布钢筋单排连接的预制剪力墙抗震性能试验[J].建筑结构,2011,41(2):12-16.
[27] 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.
[28] 欧阳志鹏,孙彬,王霓,等.装配式结构混凝土结合面抗渗性能试验研究[J].建筑结构,2020,50(9):21-25,31.
[29] 淡浩,吴体,肖承波,等.预制混凝土构件结合面抗剪性能试验及分析[J].建筑科学,2020,36(3):100-104.
[30] 张晋峰,孙彬,毛诗洋,等.装配式结构混凝土结合面粘结强度试验研究[J].建筑结构,2018,48(23):17-21,27.
[31] 袁群,韩菊红,于跃海.混凝土粘结面粗糙度评价的功率谱法分维[J].工业建筑,2001(2):4-5,23.
[32] 潘陵娣,鲁亮,梁琳,等. 预制叠合墙抗剪承载力试验分析研

究[C]//第 18 届全国结构工程学术会议论文集第 II 册,2009.
[33] 水中和,秦明强,刘佳,等.抗裂防水剂对新旧混凝土界面结合的影响研究[J].混凝土,2005(9):55-57,71.
[34] 秦明强,水中和,张建纲.新旧混凝土界面结合状态研究[J].武汉理工大学学报,2006(12):34-37.
[35] 赵志方,赵国藩,刘健,等.新老混凝土粘结抗拉性能的试验研究[J].建筑结构学报,2001(2):51-56.
[36] NAITO C J, MOEHLE J P. Evaluation of bridge beam-column joints under simulated seismic loading [J]. ACI structural journal, 2002, 99(1):62-71.
[37] ARAUJO D D L, PRADO L P, DA SILVA E B, et al. Temporary beam-to-column connection for precast concrete frame assembly[J]. Engineering structures, 2018, 171(15):529-544.
[38] 薛伟辰,古徐莉,胡翔,等.螺栓连接装配整体式混凝土剪力墙低周反复试验研究[J].土木工程学报,2014,47(S2):221-226.
[39] 李进,李小杰,李青宁,等.钢板箍螺栓装配连接混凝土柱抗震性能研究[J].地震工程与工程振动,2013,33(5):197-203.
[40] 孙建,邱洪兴,陆波.新型全装配式混凝土剪力墙(含水平缝节点)的整体性能[J].工程力学,2016,33(1):133-140,170.