

异形装配式RC结构与变截面钢混组合结构施工技术

崔世强 强 军 张 杰 曹云锋 周东博

中国葛洲坝集团第一工程有限公司 湖北 宜昌 443000

摘要：随着装配式建筑的迅猛发展与异形建筑日益增多，如何有效增强节点强度，提升结构整体力学性能，同时实现异形构件标准化量产，并进一步提高施工效率，已成为当前建设中的核心挑战。依托海南文昌航天科创基地项目，对异形装配式RC结构与变截面钢混组合结构施工技术研究与应用，通过优化连接构造，并解决建造过程中出现的难题，成功打造了装配式构件在异形超限高层建筑中的应用样板，对类似工程提供了借鉴和参考价值。

关键词：异形装配式建筑；变截面钢混组合结构；超限建筑

引言

近年来，国内装配式建筑市场规模呈现快速增长态势，伴随着建筑设计理念的革新和对环境个性化需求的增长，异形建筑的数量亦显著增加。然而，异形装配式建筑整体施工技术仍面临诸多挑战，尤其是异形构件的生产成本较高、周期长、安装效率低。未来装配式的研究方向将更加聚焦于探索异形构件的灵活设计、优化工业化生产方式以及高效的施工安装技术，以全面提高建造效率并有效降低成本。

变截面型钢柱基于结构力学原理设计，通过调整截面尺寸以适应弯矩变化，既提高了承载能力，增强了抗震性能，还能有效节约材料，是一种经济高效的型钢柱形式。变截面型钢柱与钢板墙组合钢骨混凝土结构是一种创新的建筑技术。该技术将变截面型钢柱和钢板墙融合，型钢柱通过变化的截面形式，能有效适应不同部位的受力需求，钢板墙则作为主要的抗侧力构件，与型钢柱共同工作。不仅提升了结构的稳定性和承载能力，还实现了异形超限建筑布局的灵活性和美观性。

1 工程概况

海南文昌国际航天城，位于海南文昌市，是海南自由贸易港13个重点园区之一，也是海南三大科技城之一，中国首个具备商业性质的滨海航天城，致力打造为开放型、国际化、创新融合的世界级航天城。航天科创基地项目作为文昌国际航天城核心地标，其承担着航天科技研发、太空装备实验等关键功能，对促进军民融合航天事业具有重要作用。

项目采用EPC模式，总工期912天，主要由科研楼、办公楼及地下建筑组成，整体呈圆弧形。总建筑面积9.42万 m^2 ，地下2层、地上8层，建筑高度36m。整体装配率50%，装配整体式框架-现浇剪力墙结构，部分竖向构件为型钢组合结构。



图1 航天科创基地项目鸟瞰图

2 研究与应用内容

2.1 异形装配式RC结构整体快速施工技术

2.1.1 结构体系介绍

(1) “多圆心圆弧+椭圆”组合异形建筑

项目采用流线型设计，整体呈圆弧形，其中办公楼中心展厅为椭圆形，其余均为不等半径多圆心圆弧形，控制圆心多，最大圆弧半径约208m，最小约24m，每层建筑造型各不相同。

(2) 异形装配式RC结构应用方案

本项目预制竖向构件采用装配复合模壳体系混凝土柱（简称模壳柱）+装配复合模壳体系混凝土剪力墙（简称模壳剪力墙），水平楼板采用纤维水泥平板免拆式桁架楼承板+钢筋桁架楼承板，预制内隔墙采用蒸压轻质加气混凝土隔墙板（ALC隔墙板）。

1) 装配式复合模壳墙柱体系

模壳构件由模板+成型钢筋+集成机电管线组成，采用工厂化预制生产，运输至施工现场后项空腔内部现浇混凝土形成的墙体。模壳材料采用UHPC，强度 $\geq 60\text{Mpa}$ ，具备高性能高耐候性高耐久性的特点，适应海南当地盐雾环境。

抗震性能优越。墙体构件做法及连接方式等同现

浇，抗震性能、结构安全性能高。可适用于海南等抗震设防烈度8度区域。

构件自重轻。模壳制备厚度仅2.5cm，重量约是预制灌浆套筒墙体的20%、是空腔墙墙体的40%，在运输、吊装、周转时优势明显，对施工现场吊装能力要求低。

施工速度快。墙体钢筋采用直螺纹套筒连接，施工现场操作简单，现场安装仅需布置临时斜向支撑，并实现构件表面免抹灰，工序少，施工效率高。

2) 纤维水泥平板免拆式桁架楼承板

纤维水泥平板免拆式桁架楼承板是钢筋桁架与免拆底模通过埋置连接形成整体的组合承重板，且在施工阶段承受全部施工荷载。较现浇楼板具有施工速度快、整体刚度强、抗震性能优、施工质量保证、装配率高、经济、绿色环保等特点。

3) 蒸压轻质加气混凝土隔墙板

ALC预制隔墙板是以硅砂、水泥、石灰为主要原料，由经过防锈处理的钢筋增强，经过高温、高压、蒸汽养护而成的多气孔混凝土制品^[1]。其隔音与吸音性能俱佳，具有很好的保温隔热性能；轻质比重为0.5，是普通混凝土的1/4，大大降低了墙体的自重，减低建筑物基础造价。完工后的内墙墙面可以免抹灰直接进行装修施工，减少现场湿作业。

2.1.2 主要研究内容

(1) 异形装配式RC结构整体快速施工技术

1) “多圆心圆弧+椭圆”异形组合建筑测量定位

异形建筑施工难度大，施工精确度是保证整体质量效果及线条流畅的关键。针对建筑平面复杂、相交（切）点多、多方向轴线关系、细部尺寸多等特点，充分利用AutoCAD的矢量计算与虚拟空间功能，结合设计图纸，实现精准测量计算，配合高精全站仪进行测量放样，以提高效率和精度。

2) 装配式复合模壳墙柱快速施工技术

项目最大层高为5.1m，标准层高为4.2m，模壳墙尺寸面积大，吊装迎风面大，转向变位效率低，运输或吊装过程中操作不当，易导致角部边缘破碎或开裂。下层预留钢筋必须保证垂直和不碰撞模壳墙体内侧墙面，钢筋连接须确保质量稳定可靠。

构件起重吊装。为确保吊装安全和效率，同时为避免起吊过程中压弯模壳柱主筋，模壳墙柱吊装采用专用工装。各方配合默契尤为重要，注意吊运过程慢起、缓升、稳放，避免破损、断裂。

上下钢筋连接。模壳墙柱钢筋搭接形式分为延伸搭接和机械接头连接，综合现场质量控制和施工便利性考

虑，墙体采用延伸搭接，柱子采用直螺纹套筒连接，接头质量为一级。

临时固定支撑。柱体达到安装高度时，采用斜支撑进行临时固定，固定时，支撑不应少于2道，并同时柱体两个垂直方向进行支撑。通过模壳柱专用定位工装或短斜撑调节柱体水平位置，通过长斜撑调整柱体垂直度。

3) 异形装配式楼板一次整体浇筑成型施工技术

由于加工规格及模数等因素限制，常规装配式楼承板均为直边矩形形状，但项目水平楼板均为弧边设计，市面现有楼承板无法满足异形装配式楼板的特定需求。且本项目装配式楼板应用比例高达90%，数量众多。若选择定制弧边模具进行生产，生产周期长，费用高；而若采用现场切割方案，因UHPC（超高性能混凝土）强度高，切割难度大，耗时耗力，在部分边缘位置需要切割出倒边结构，才会拼接整齐，不易漏浆。总体来说，实现装配式板材的异形加工或切割拼装，实际操作难度大。

经多方研讨，反复酝酿，项目采用预制梯形直边楼承板+梁柱边交接处弧边现浇处理，通过桁架楼承板与木模板结合进行一次性整体浇筑形成异形框架RC结构。另外两块楼板密拼接缝处，优化生产工艺，预留“V字型”上导角，拼缝处V字形槽内采用1:1水泥砂浆嵌缝，防止漏浆，确保拼缝整齐美观。

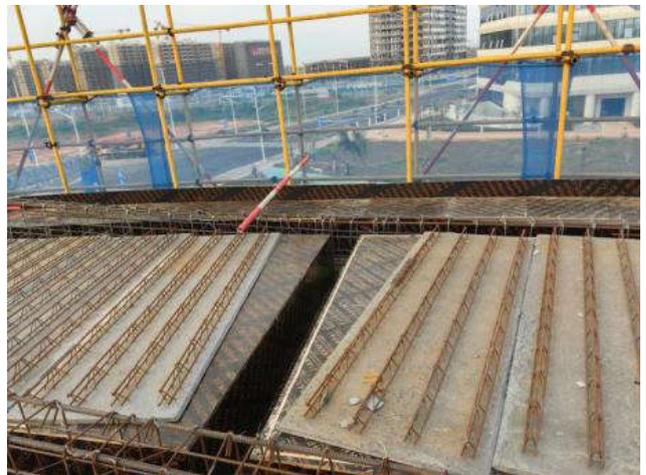


图2 预制梯形直边+交接处弧边一次整体浇筑

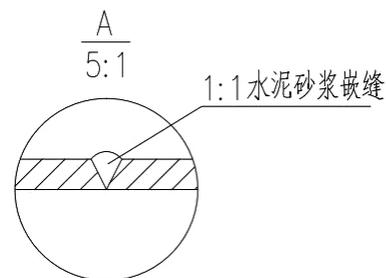


图3 密拼拼接做法

4) 弧形装配式墙板拼装施工技术

内隔墙设计弧度为 55° ，常规ALC板均为矩形直段墙板，初期考虑过弧形墙板和直段拼弧两种方案，经讨论评选，弧形墙体精度控制难度大，定制模具生产周期长，费用高，在满足外观交付标准的前提下，采用施工难度更小，工期更短直段墙板折线拼弧方案。

2.1.3 主要技术创新点

(1) “多圆心圆弧+椭圆”异形组合建筑测量定位

异形建筑采用CAD技术可提高测量放样效率和精度，施工简易、方便快捷，计算更精确简易，满足结构施工需求，适应现代化施工要求^[2]。

(2) 装配式复合模壳墙柱快速施工技术

通过专业工装，有效化解了模壳墙柱吊装过程中的安全风险和质量隐患，提升了施工效率。根据现场工况，合理选用钢筋连接方式，既有利于现场质量控制，又能兼顾施工便利性。并用短斜撑调节柱体水平位置，通过长斜撑调整柱体垂直度，有效解决了临时加固、位置校正的问题，技术先行合理。

(3) 异形装配式楼板一次整体浇筑成型施工技术

采用梯形直边预制与弧边现浇相结合的创新工艺来处理装配式水平楼板，通过一次性整体浇筑形成了异形框架钢筋混凝土(RC)结构。这种方法将预制构件的便捷性和现浇结构的灵活性完美融合，不仅实现了异形构件的标准化、工业化生产，还显著提高了异形装配式建筑的施工效率，并有效控制了成本。

(4) 弧形装配式墙板拼装施工技术

在满足外观交付标准的前提下，采用施工难度更小，工期更短直段墙板折线拼弧方案，有效解决了现场弧形墙体的施工问题，经济合理，成效显著。

2.2 变截面型钢柱与钢板墙组合钢骨混凝土结构

2.2.1 结构体系介绍

科研楼主体钢结构为隐式框架剪力墙结构体系，主要由十字钢柱、H型钢柱、H型钢梁、钢板墙组成。变截面型钢柱分为3层，下层为大截面，中层为梯形，上层为小截面。钢板墙厚度为10mm，中间横向肋为PL10×110mm钢板；纵向肋为PL10×75钢板，两侧对称设置，钢板墙两端采用M16螺栓与钢柱栓焊连接。

2.2.2 主要研究内容

(1) 变截面型钢柱与钢板墙连接关键技术

传统的十字型钢柱在与钢板墙连接时，钢板墙的端头伸入十字形钢柱的混凝土内，与十字形钢柱有一定的间距，在十字型钢柱与钢板墙连接的位置存在局部应力集中、连接不牢固等问题，影响整体结构的稳定性和抗

震性能。因此，迫切需要一种改进的设计，来优化钢柱与钢板墙的连接方式，以提升其整体性能。

另外，十字型钢柱通常在周圈布设有水平加劲板，当十字型钢柱外围钢筋直径大且密集时，寻常的加劲板会使浇筑放料困难，加劲板底部混凝土无法填充密实，以致型钢混凝土结构内形成空腔，振捣棒难以伸入，混凝土难以振捣密实。

为此，为解决上述问题，结合现场实际各方讨论结果，解决方案如下：

首先，在十字形腹板的横截面端头设有与端头垂直的翼缘板，并在翼缘板边缘布置T形钢板，这样可增强构件的强度。其次，在T形钢板上固设有钢板墙连接板，钢板墙连接板上设有高强螺栓孔钢板墙连接板，用于与钢板墙固定连接，这样钢板墙可通过T形钢板与十字形腹板焊接连成整体，提高了整体受力性能。然后，T形钢板朝向外缘的面上与钢板墙的钢暗梁相对应的位置还设有钢暗梁连接板，钢暗梁连接板可用于与钢板墙的钢暗梁固定连接。如不连接钢板墙的两侧固设有多个加劲板，加劲板的两端与十字形腹板和翼缘板固定连接，同样提高了整体受力性能。再次，在十字形腹板和翼缘板的底部设有焊接坡口，焊接坡口朝向外缘；焊接坡口端头的内侧设有挡边，挡边可用于挡住焊池。最后，改进了加劲板的形状，使加劲板的内空为弧形，内空通流截面增大，便于混凝土和振捣棒通过，确保了浇筑质量。

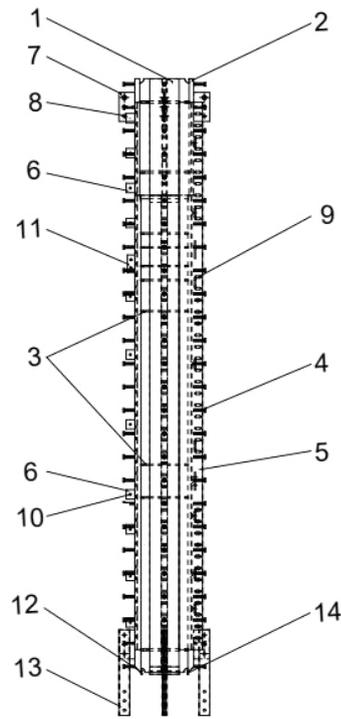


图4 主视图

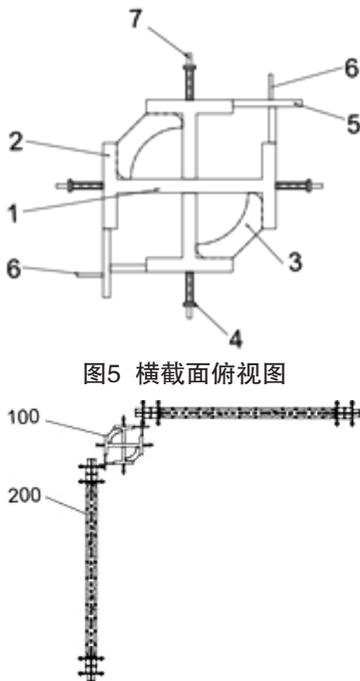


图5 横截面俯视图

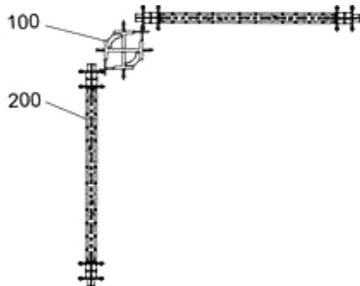


图6 与钢板墙连接时的横截面俯视图

图中：十字形腹板（1），翼缘板（2），加劲肋（3），栓钉（4），T形钢板（5），钢板墙连接板（6），上临时连接耳板（7），安装螺栓孔（8），箍筋孔（9），高强螺栓孔（10），钢暗梁连接板（11），焊接坡口（12），下临时连接耳板（13），挡边（14），十字形钢柱（100），钢板墙（200）

（2）一种钢板混凝土组合剪力墙施工技术

施工过程中，钢筋混凝土墙内增加钢板，会导致钢筋的排列、绑扎作业以及模板的加固施工变得复杂且困难。此外，墙体自重会增加，混凝土在墙体内部难以达到充分振捣密实的要求，不利于工期和质量控制。结合现场实际各方讨论结果，确定了该部位的解决方案如下。首先，通过在钢板墙上设置型钢柱、板面栓钉拉筋孔、箍筋孔和模板加固对拉螺栓孔，这样便于将钢板墙与剪力墙的钢筋结构固定。其次，在钢板墙上固设了竖直布置的竖向加劲肋、水平布置的水平加劲肋、水平布置的水平筋，且便于水平筋与竖向加劲肋固定连接。再次，型钢柱采用的是“H”型钢，且型钢柱的前后端面和远离与钢板墙连接的端面固设有多根板面栓钉，这样便于与相邻的钢板墙总成连接。然后，钢板墙分为下钢板墙和上钢板墙两段，分段吊运安装，可减少吊装和安装的风险，并且上钢板墙的顶部固设有钢暗梁，钢暗梁的顶部固设有水平竖板，水平竖板与上钢板墙固定连接，这样可以提高整体的受力性能。最后，在混凝土内还设有

网片或钢筋网片笼与板面栓钉或加劲肋固定连接，进一步增加了结构的强度。

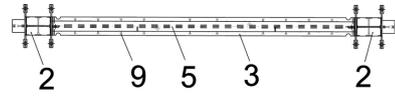


图7 俯视图

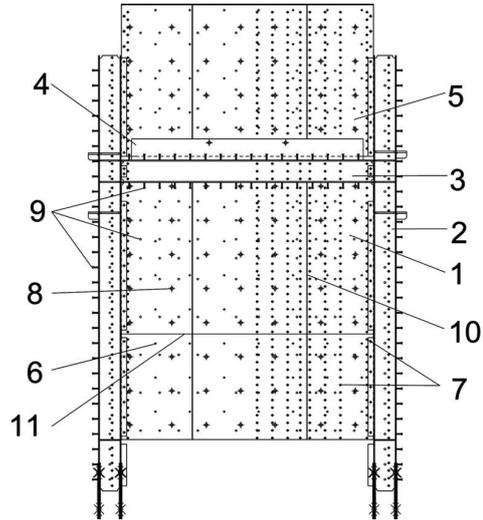


图8 主视图

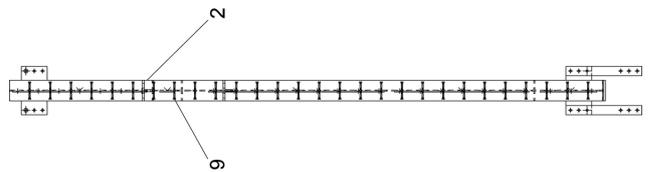


图9 左视图

图中：（下钢板墙1，型钢柱2，钢暗梁3，水平竖板4，上钢板墙5，拉筋孔6，箍筋孔7，模板加固对拉螺栓孔8，板面栓钉9，竖向加劲肋10，水平加劲肋11）

2.2.3 主要技术创新点

（1）变截面型钢柱与钢板墙连接关键技术

变截面型钢柱分为3层，下层为大截面，中层为梯形，上层为小截面，型钢柱翼缘之间连接有T型钢板，T型钢板的长方向外侧连接有钢板墙鱼尾板。通过翼缘布置T型钢板，有效增强了构件强度；同样的钢板墙分为3层与变截面型钢柱的翼缘T型钢板连接成整体，提高了整体受力性能，具体为：1）增强连接结构的强度。通过翼缘布置T型钢板，有效增强了十字钢骨柱构件强度，并且钢板墙可通过T型钢板外侧鱼尾板与十字形腹板焊接连成整体，连接受力可靠，提高了整体受力性能。而且设置的T型钢板与十字形腹板之间具有足够的空间，也便于混凝土振捣施工。2）能够提高抗震性能。增强的结构强度和均匀的受力分布使得构件在地震等横向载荷作用下表现出更好的抗震性能。3）提高混凝土振捣性能。通

过改进加劲板的形状,使加劲板的内空为弧形,内空流通截面增大,便于混凝土和振捣棒顺利通过,确保浇筑质量,使得浇筑施工更加便利,解决了浇筑困难且振捣不密实和空腔的问题,降低了现场施工难度,有利于质量管控,提高了结构本质安全。4)该设计适用于高层建筑、大型钢结构工程等需要高强度、高稳定性及抗震性能要求高的结构领域,具有广泛的应用前景。

(2) 钢板混凝土组合剪力墙施工技术

1)通过在钢板墙上预设拉筋孔、箍筋孔和模板加固对拉螺栓孔,便于将钢板墙与剪力墙的钢筋结构固定,可避免现场开孔,降低了钢筋布置和模板加固的施工难度,减少施工时间,提高施工效率。2)通过将钢板墙分为上下两段,分段吊运安装,减少每次吊运重量,降低安装安全风险,并且通过设置水平竖板,使得上钢板墙能够与下钢板墙、钢暗梁焊接连接成整体,提高了整体受力性能。3)将混凝土内的钢筋网片或多层钢筋网片笼与钢板墙固定连接,进一步增加了钢板混凝土组合剪力墙的结构强度^[3]。4)在实施中,不在钢板墙上设置水平加劲肋,以便于振捣装置能够进入模板内,使混凝土振捣密实。

结语

在异形装配式RC结构整体快速施工技术的实践中,成功打造了装配式构件在异形建筑中的推广应用样板,并系统总结了施工方法,方案切实可行、经济合理,保证施工质量的同时,极大地提升了施工效率。在变截面型钢柱与钢板墙组合钢骨混凝土结构的研究与应用中,创新性地优化了两者间的连接构造,显著增强了节点强度,提升了整体结构的力学性能。在施工策略上,前瞻性地考虑了施工预留问题,有效简化了钢筋的排布与模板的加固流程,极大便利了混凝土的振捣作业,大幅降低了现场施工的复杂度与工期成本。

参考文献

- [1]BIAN li等.“预制装配式变电站建筑外墙板材LCC分析.”中国电机工程学会电力建设专委会2016年年会中国电机工程学会,2016.
- [2]王家法.“CAD技术平台在异形建筑施工测量中的应用.”施工技术:下半月41.9(2012):4.
- [3]汪小林等.“内嵌单层钢板-混凝土组合剪力墙”,CN206599882U.