

DOI: 10.7672/sgjs2026040041

国家医学中心直线加速器用房施工控制关键技术*

陈相坤¹, 陈健², 李永轩², 吕岳祥¹, 吕昉淼¹, 金磊¹, 王灏¹

(1. 复旦大学附属中山医院, 上海 200032;

2. 中国建筑第二工程局有限公司华东公司, 上海 200135)

[摘要] 针对国家医学中心直线加速器用房超厚混凝土墙体与顶板施工中存在的温度裂缝控制难、高荷载架体设计复杂、斜向防辐射管线精确定位与综合安装要求高等难题,从施工材料、施工方法和综合管理开展研究,主要得出以下结论:提出了适用于超厚大体积混凝土的温控技术,通过配合比试验优选低水化热水泥、聚丙烯抗裂纤维含量,确定了最优混凝土配合比;采用一维差分法进行浇筑温度预测,并结合塑料薄膜与矿棉被复合养护措施,实现了温度场的有效控制。研发了可靠的超厚混凝土板下支撑架体施工技术,3m厚混凝土板设计了间距600mm×300mm的重型盘扣架,立杆最大轴力约47.9kN,安全系数3.0;施工过程中通过轴力与位移监测,验证了架体在强度和稳定性方面均满足要求。建立了直线加速器房综合机电管线精益施工技术体系,通过土建与机电全专业BIM建模,完成了碰撞检查和净高分析。基于模型构建了“定位-复核-安装”管控体系,依托BIM进行精细化交底和施工复核,保障超厚墙体斜向管线的精准预埋。

[关键词] 直线加速器;大体积混凝土;温度场;管线;建筑信息模型

[中图分类号] TU17

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0041-08

Key Technologies for Comprehensive Construction of Linear Accelerator Building at National Medical Center

CHEN Xiangkun¹, CHEN Jian², LI Yongxuan², LÜ Yuexiang¹, LÜ Fangmiao¹,
JIN Lei¹, WANG Hao¹

(1. Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China;

2. China Construction Second Engineering Bureau Ltd. East China Co., Shanghai 200135, China)

Abstract: Addressing the challenges in the construction of ultra-thick concrete walls and roofs for the linear accelerator room at the National Medical Center, such as the difficulty in controlling temperature cracks, the complexity of high-load scaffolding design, and the high requirements for precise positioning and comprehensive installation of oblique radiation-proof pipelines, research was conducted on construction materials, methods, and comprehensive management. The main conclusions are as follows. Firstly, a temperature control technology suitable for ultra-thick mass concrete was proposed. Through mix proportion tests, low hydration heat cement and polypropylene anti-crack fiber content were optimized to determine the optimal concrete mix proportion. The one-dimensional difference method was used for pouring temperature prediction, and combined with plastic film and mineral wool blanket composite curing measures, effective control of the temperature field was achieved. A reliable construction technology for supporting scaffolding under ultra-thick concrete slabs was developed. For a 3m-thick concrete slab, a heavy-duty scaffolding with a spacing of 600mm×300mm was designed, with a maximum axial force of about 47.9kN and a safety factor of 3.0. During the construction process, axial force and displacement monitoring verified that the scaffolding met the requirements in terms of strength and

*上海市医院协会医院建筑后勤管理专委会课题;结合AI的新一代信息技术在国家医学中心建设项目中的探索应用(2025JZHQ005);复旦大学附属中山医院管理科学基金;基于关键链的国家医学中心建设项目进度管理研究(2024ZSGL08)

[作者简介] 陈相坤,总务处副处长,重大办副主任,助理研究员,E-mail: chen_xiangkun@zs-hospital.sh.cn

[通信作者] 王灏,总务处处长,助理研究员,E-mail: wang_hao1@zs-hospital.sh.cn

[收稿日期] 2025-10-20

stability. A lean construction technology system for comprehensive electromechanical pipelines in the linear accelerator room was established. Through BIM modeling across civil engineering and electromechanical disciplines, collision inspection and clear height analysis were completed. Based on the model, a "positioning-review-installation" control system was constructed, relying on BIM for detailed disclosure and construction review to ensure precise embedding of oblique pipelines in ultra-thick walls.

Keywords: linear accelerator; large mass concrete; temperature field; pipelines; building information modeling(BIM)

0 引言

直线加速器可进行全身各类深部肿瘤和浅表肿瘤的放射治疗,是近年来最普遍使用的放射治疗装置。直线加速器在工作状态下最大可输出 X 射线 10MV、最大电子束 22MeV,引起的 X 射线辐射、中子和感生放射性的辐射危害较为突出,若没有采取必要的防护措施或防护不当的话,将对机房周围的环境造成电离辐射污染,并对周围的放射工作人员及公众等造成健康危害。混凝土材料具有良好的辐射屏蔽性能,兼具性能可靠、价格低廉、施工方便的特点,采用超厚大体积混凝土成为直线加速器用房常用的防护措施^[1-2]。

多位学者针对大体积混凝土浇筑进行了深入研究^[3-14]。黄俊^[3]对直线加速器用房的设计施工进行探讨比选,认为相比重晶石材料,超厚积混凝土经济效果最佳。李潘武等^[4]对超厚防辐射混凝土墙体的温度应力影响进行了建模分析,并与实测数据进行对比,探索相关规律。冯锦华等^[5]细致描述了直线加速器房间的施工过程,采取梯子筋定位、配筋优化、墙体阳角模板加固、混凝土加冰预冷降温等措施,增强钢筋支架与模板支撑体系整体稳定性。丁华营等^[6]对深圳市某医院直加机房防辐射大体积混凝土施工技术进行研究,关注洞口支架的加强措施、钢筋支架整体稳定措施。刘文昆等^[7]对大体积混凝土采用高支模安全监测技术,实时监控,降低了现场安全风险。何帅全等^[9]给出模板支撑体系分析与选型、梁、板支撑体系构造措施、墙模加固构造,形成直线加速器机房超厚钢筋混凝土墙顶板施工。上述论文分别从不同侧面给出了现有施工工艺,但没有明确原材料配合比、架体布置原则,没有深入分析架体变形规律,缺少对于直线加速器房间医疗专项管道的有效组织管理。

基于复旦大学附属中山医院国家医学中心青浦新城院区一期项目,研究直线加速器用房混凝土浇筑合理分布。从浇筑材料、施工方法和和管理措施方面,总结形成国家医学中心直线加速器用房施工

关键技术。

1 工程概况

1.1 项目总体概况

复旦大学附属中山医院国家医学中心建设项目总用地面积为 12.4 万 m²,规划总建筑面积为 17.2 万 m²,其中地上建筑面积 11.4 万 m²,地下建筑面积为 5.8 万 m²,共包含国际学术交流中心 A,门急诊综合楼、病房综合楼、后勤保障楼 B 和 C 发热门诊楼地块(见图 1),3 个地块由跨越市政道路的地下连通道和地上连廊连为一体。

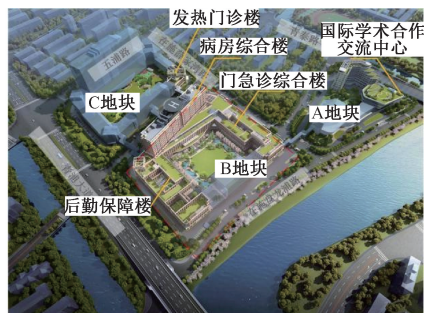


图 1 总体设计概况

Fig. 1 Overall design overview

1.2 直线加速器用房概况

直线加速器机房位于 B 地块病房综合楼地下 2 层地下室西北角放疗中心,设有直线加速器机房 3 间、磁共振直线加速器 1 间,共设置 4 台最大能量为 22MeV、最大 X 射线 10MV 的医用电子直线加速器,属于 II 类射线装置,如图 2 所示。设计直线加速器用房结构尺寸如图 3 所示。顶板最厚处位于房间中部。因此,浇筑顶板超厚混凝土时,下部架体的稳定性至关重要。

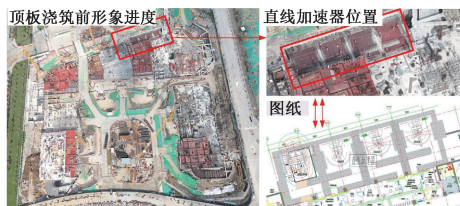


图 2 直线加速器位置

Fig. 2 Linear accelerator position

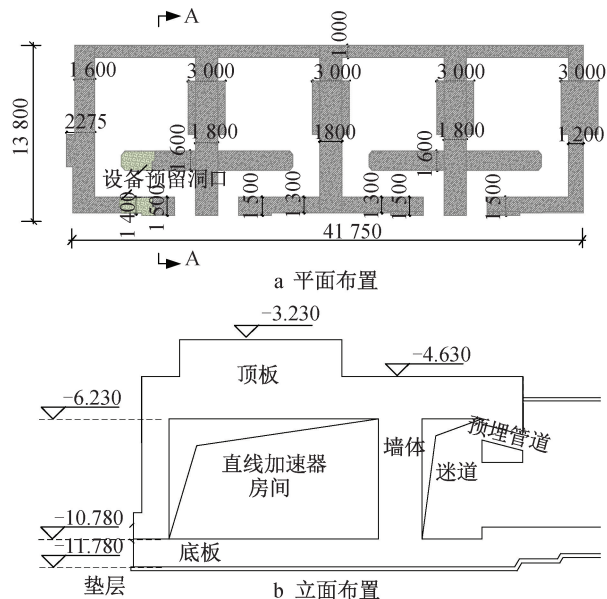


图3 直线加速器结构尺寸

Fig. 3 Structural dimensions of linear accelerator

2 大体积混凝土施工温度控制技术

2.1 混凝土配合比

直线加速器用房墙体、顶板混凝土强度等级为C35、抗渗等级P10,混凝土配合比掺量分别为水泥、矿粉、粉煤灰、水、砂、石子、泵送剂和抗裂纤维233,81,90,166,738,1027,4.04,1.2kg/m³。应确保使用低水化热水泥3,7d水化热≤250,280kJ/kg,粗骨料为5~25mm连续级配,细骨料采用天然中砂,各项添加剂符合国家规范要求,并通过试验确定了抗裂纤维的掺加量。

为明确抗裂纤维用量对混凝土性能的影响,对纤维掺量进行了不同配合比测试。设计4组12个试块进行强度和抗裂性能试验。主要采用的抗裂纤维为聚丙烯纤维^[10-11]。抗裂纤维对早期抗压强度和抗裂性能的影响如表1所示。随着抗裂纤维掺量的增加,结构坍落度的影响较小,3,7d抗压强度略有增长。当抗裂纤维含量从0.5kg增加到1.2kg,单位面积上总开裂面积降低10.2%,单位面积上的总开裂面积显著减小;纤维掺量从1.2kg继续增加至1.5kg时,总开裂面积变化不大,对结构性能影响小,为此配合比采用1.2kg抗裂纤维。

2.2 温度计算

本项目浇筑时为上海高温季节,进一步实测浇筑前7天的数据,得到入模温度、房间内部温度、浇筑时环境温度(即房间外部温度)分别为25.7,25.0,33.0℃。

基于上述初始条件,采用一维差分法,根据GB 50496—2018《大体积混凝土施工标准》要求计算温

表1 抗裂纤维对混凝土结构性能的影响

Table 1 The influence of crack resistant fibers on the performance of concrete structures

抗裂纤维 YL-A 含量/ kg	坍落度/ mm	3d 混凝土 抗压强度/ MPa	7d 混凝土 抗压强度/ MPa	单位面积 上的总开 裂面积/ (mm ² ·m ⁻²)
0.5	180	15.3	24.7	98
0.8	182	15.0	24.4	94
1.2	175	16.0	25.1	88
1.5	185	15.9	25.4	86

度场、自约束力、外约束力,沿厚度方向分层计算混凝土水化热温度场如图4所示。大体积混凝土表现出明显的规律性,温度最高的区域为厚度中心点处,向两侧逐渐降温。温度最高为浇筑后的第4天,温度达到66.4℃,入模升温值≤42℃,满足规范要求。

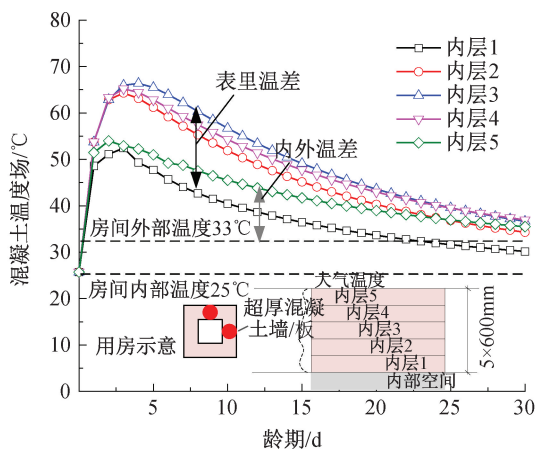


图4 基于一维差分法得到的理论温度场

Fig. 4 Theoretical temperature field obtained based on one-dimensional difference method

直线加速器房间大体积混凝土温度设置洒水养护,其中墙体采用不脱模并增设5cm矿棉被养护,顶板采用1mm塑料薄膜和5cm厚矿棉被组合养护,从而确保内外温差最高≤20℃。此时理论内外温差最大为19.3℃,表里温差最大为17.8℃,均满足规范要求。

最大自约束拉应力出现在第4天,为0.226MPa,累计最大外约束拉应力出现在第24天,为0.778MPa,均低于当期混凝土抗拉强度。

2.3 温度测点布置

混凝土墙体、顶板温度测点布置如图5所示。特征测温结果如图6所示。相比1.6m厚混凝土,3m厚的核心温度升温更高。结合气温波动,混凝土表层、核心处升温趋势与理论预测相同,实测显示,核心处温度于90h左右达到峰值69.4℃,表层温度于52h左右达到峰值55.6℃,理论值与实测误差分

别为4.8%,5.8%,误差很小,采用一维差分法可有效预测混凝土的温度极限。

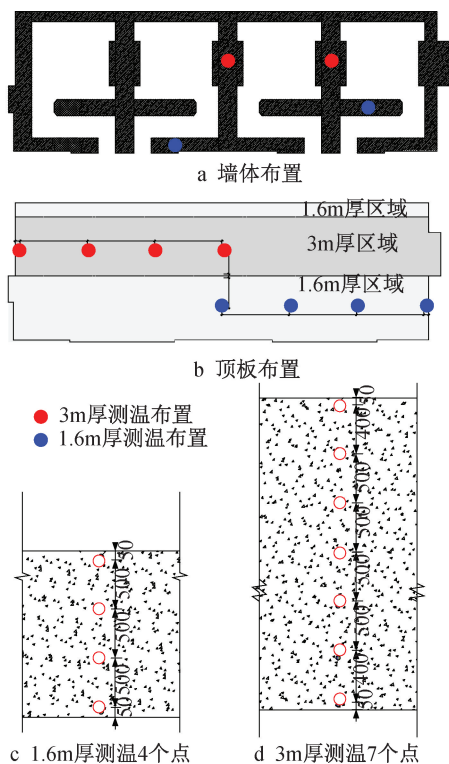


图5 大体积混凝土测温布置

Fig. 5 Temperature measurement arrangement for mass volume concrete

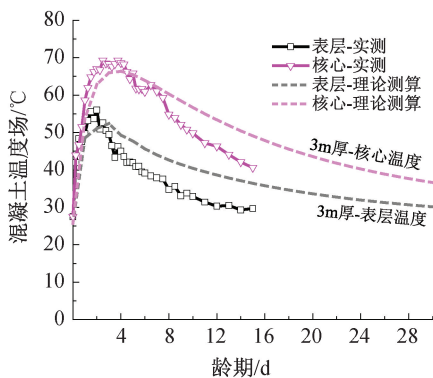


图6 3m厚混凝土测温结果

Fig. 6 Test results of 3m concrete

3 浇筑布置及架体设计

3.1 浇筑布置

结构分为3次浇筑。第1次浇筑1m底板,第2次浇筑5.7m高墙体,第3次浇筑1.6,3.0m顶板。顶板和墙体分开浇筑的原因在于地下混凝土支撑与顶板超厚混凝土位置存在交叉。为此,在浇筑混凝土顶板前,应先进行肥槽回填,进而拆除与顶板存在碰撞的混凝土支撑梁,保障顶板连续浇筑。

直线加速器房间浇筑时采用汽车泵送工艺,底

板、墙体、顶板混凝土总量分别为641,1462,864m³,混凝土浇筑层厚度每层500mm,振捣时应避免过振和漏振,整体分层连续浇筑或推移式连续浇筑,应缩短间歇时间并应在前层混凝土初凝之前将次层混凝土浇筑完毕。层间间歇时间 ≤ 40 min。直线加速器范围内底板、顶板不设置水平施工缝。

3.2 侧墙支撑布置

混凝土墙体浇筑加固措施如图7所示,为防止大体积混凝土墙体浇筑过程中出现涨模现象,墙体外侧肥槽区域设置间距2m的横杆与基坑支护对撑加固,内侧设置间距2m的斜抛撑。在此基础上,墙体1.6m厚变3m厚,阴阳角处设置1道斜向止水螺栓,并增设斜抛撑;在墙体转角处设置多道间距400mm的斜向止水螺栓,同时加密设置间距1m的斜抛撑。墙体主要采用主次梁作为龙骨、密布止水螺栓加固墙面模板的方案,主梁为 $\phi 48$ 壁厚3.2mm钢管,间距400mm布置;次梁为40mm \times 40mm \times 2.5mm方钢管,间距200mm布置;止水螺栓间距400mm密布。外墙立面布置应搭设双边操作架,内侧设地锚钢筋增设斜抛撑。其中,斜向止水螺栓通过在端头增设L10并焊接三角形铁片与模板体系双钢管主梁焊接。

3.3 顶板下支撑布置

混凝土顶板板下支撑架体布置如图8所示。顶板存在1.6和3m厚区域,其中3m厚区域位于房间中部。为便于现场施工,对立杆进行精确布置。顶板下支撑架体主要采用重型盘扣,立杆直径60mm,间距布置为600mm \times 300mm;横杆密布连接各立杆。

搭设顶板下架体前,已完成墙体混凝土浇筑、拆除混凝土支撑。搭设时,采用架体自最远处向出口退搭的方案。为增强3m厚顶板板下立杆支撑体系稳定,盘扣架竖向斜拉杆设置为隔一拉一,架体顶部和底部均设置水平剪刀撑;顶板支撑体系与已浇筑墙体钢管扣件顶紧。

顶板3m厚区域采用吊模,顶板侧模体系通过设置沿板内贯通的 $\phi 12@200 \times 900$ 对拉螺栓加固,且对拉螺栓与钢筋焊接连接。为防止顶板浇筑过程中出现涨模现象,顶板变厚度区域侧模增设间距2m的斜抛撑,斜抛撑下部与钢筋焊接,浇筑完成后割除。墙体顶部设置凹凸企口缝和止水钢板,确保防辐射性能和防水性能。

4 超厚混凝土板下架体施工关键技术

4.1 模板支撑体系计算要点

对于侧墙架体计算,根据JGJ 162—2008《建筑

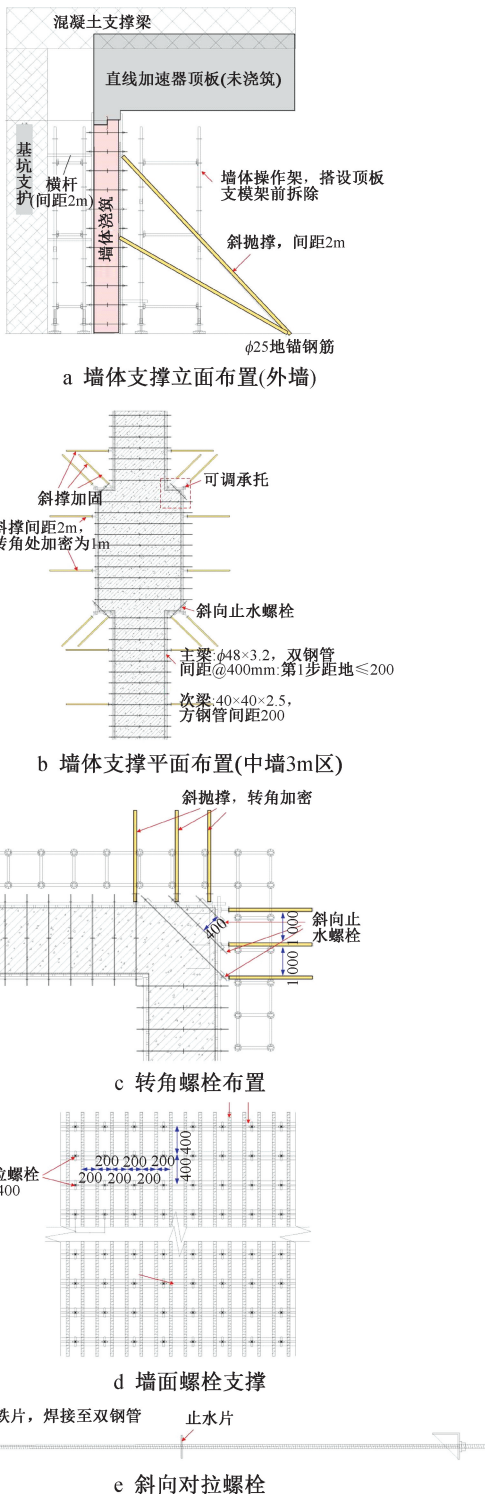


图 7 混凝土墙体浇筑加固措施

Fig. 7 Concrete wall pouring reinforcement measures

施工模板安全技术规范》，得到新浇混凝土对模板的侧压力标准值，分别验算 φ48 双钢管的主梁、40×40 方钢管的次梁、面板和对拉螺栓受力，结构受力稳定。

对于板下模板体系计算，荷载考虑 3m 厚混凝土自重、施工泵送及倾倒混凝土等因素产生的水平

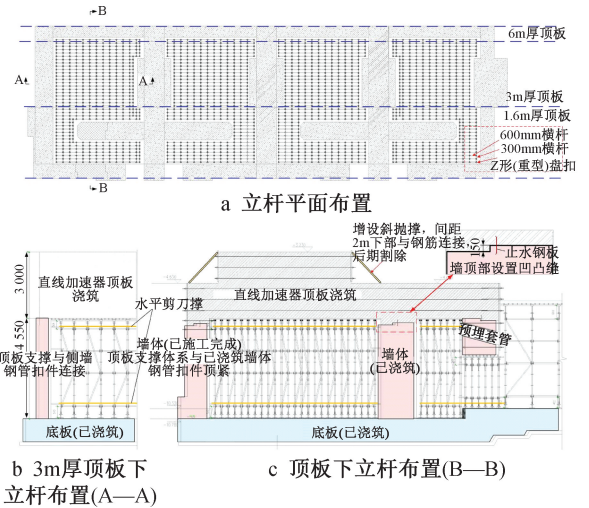


图 8 混凝土顶板浇筑板下架体布置

Fig. 8 Arrangement of the scaffold beneath the ceiling during the concrete pouring

荷载、风荷载等，对双向 60×40 方钢管的主梁、次梁及面板受力进行检验。

部分医院项目施工往往采用密布 300mm×300mm 的盘扣架体系，该方式只能退搭、工效低、施工及后期拆除极为困难，且常因间距过窄易造成人员受伤等问题。为此，将本项目的板下架体间距布置为 600mm×300mm。

对于板下架体计算，采用 JGJ/T 231—2021《建筑施工承插型盘扣式钢管脚手架安全技术标准》，重点计算立杆受力稳定性、强度、整体架体稳定性，确保结构受力稳定。计算得板下架体长细比为 85.82 (<长细比限值 150)。分别考虑有无风荷载的影响，计算得板下立杆轴力最大值为 37.3kN，最大应力为 115.5MPa，小于应力限值 300MPa。计算整体高宽比 <3.0，可不设刚性支撑，满足材料强度、刚度和稳定性的要求。

4.2 板下立杆监控

直线加速器用房 3m 厚大体积混凝土板下架体布置 3 个监测点，可用于监测板下立杆轴力、顶部竖向沉降、立杆顶部水平侧移，如图 9 所示。

立杆监测轴力随时间变化曲线如图 10 所示。随混凝土分层浇筑，立杆轴力逐渐增加，最大可达 47.9kN，此时立杆应力约 77MPa，约为立杆屈服承载力的 32.8%，此时可认为安全系数为 3.0。

立杆竖向位移随时间的变化如图 11 所示。测点 1~3 的前期竖向沉降量（约浇筑 1m 厚度）分别约为 63.5, 59.5, 31.2mm；而当浇筑厚 1~3m 混凝土时，测点 1~3 的竖向位移分别增长为 18.0, 12.4, 14.5mm。立杆竖向位移与混凝土的浇筑并未表现出较强的相关性，而是在浇筑前期产生了较大位

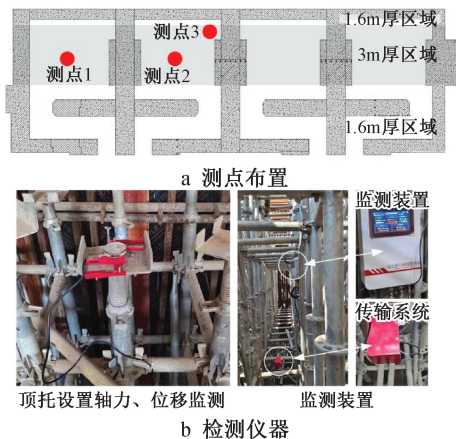


图9 板下轴力位移监测系统

Fig. 9 Axial force displacement monitoring system under the ceiling

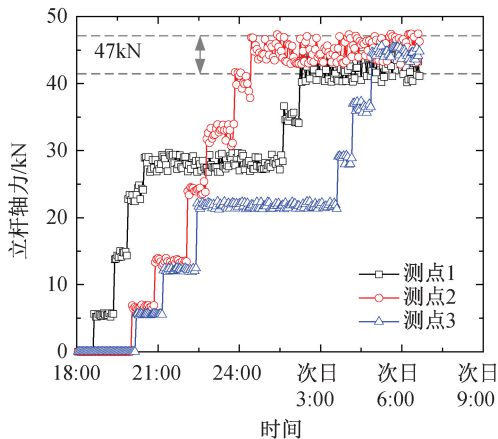


图10 实测轴力随时间变化

Fig. 10 Measured axial force of the pole varies with time

移。当施工机具布置在相关区域后,立杆顶托、方钢、木模板、顶托底部不均匀间隙等被压缩,虽然立杆轴力较小,但竖向变形较大。而当间隙压缩完毕后,进入弹性受力阶段,各立杆竖向变形较小,约在2cm 范围内。

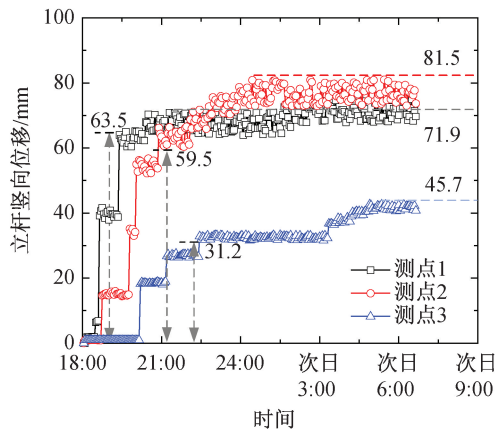


图11 立杆竖向位移随时间变化

Fig. 11 Vertical displacement of the pole varies with time

立杆顶部水平位移随时间的变化如图12所示。测点1~3的水平位移全过程最大值分别为39.5, 37.8, 30.2mm, 均 ≤ 50 mm。变形主要集中在前期,因混凝土首层浇筑时,施工机具和人员对相应位置处立杆横向变形影响较大,后期仅有局部扰动。架体变形与理论计算结果基本吻合,施工过程安全可控。

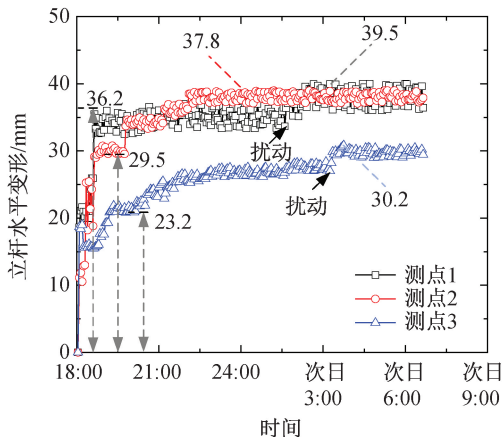


图12 水平位移随时间变化

Fig. 12 Displacement of the top of the pole varies with time

5 直线加速器用房机电管线施工关键技术

5.1 总体要求

直线加速器用房机电管线布置如图13所示。其中与内部房间相连布置了多个管道。磁共振直线加速器用房内侧设置2排6根 $\phi 200$ 预留洞口用于给排水套管、600mm \times 600mm泄压口、900mm \times 600mm风道、 $\phi 80$ 测试管等。

房间内不仅管道布置多,还需兼顾防辐射性能需求。根据GBZ 121—2020《放射治疗放射防护要求》,本项目直线加速器房间外各侧墙体表面0.3m处及上下层关注点(门外0.3m处)处剂量率需满足“人员居留因子 $T > 1/2$ 的场所 $H_{c,max} \leq 2.5 \mu\text{Sv/h}$ 、人员居留因子 $T \leq 1/2$ 的场所 $H_{c,max} \leq 10 \mu\text{Sv/h}$ ”的规定。为此,上述管道均为水平、竖直方向两向倾斜,以保证辐射不会外泄。因此,平面上,电气套管、给排水套管水平角度设为 45° ;立面上,直线加速器的风管穿墙角度为 105° ,预留洞口、泄压口为 45° ,电缆沟通过墙底部时也设置为折线穿墙 45° ,测试管斜向穿墙角度为 $30^\circ \sim 45^\circ$ 。此外,为保证磁共振直线加速器用房特殊功能,所有风管均采用不锈钢材质。

5.2 基于BIM模型的管线预埋全过程精益管理

BIM土建、管综模型如图14所示,1台磁共振加速器和3台直线加速器分别布置在其中。通过对直线加速器房间的管线布置建模,模拟穿墙所有管线布置。

1) 建立全管线模型,精准定位预埋管线位置。

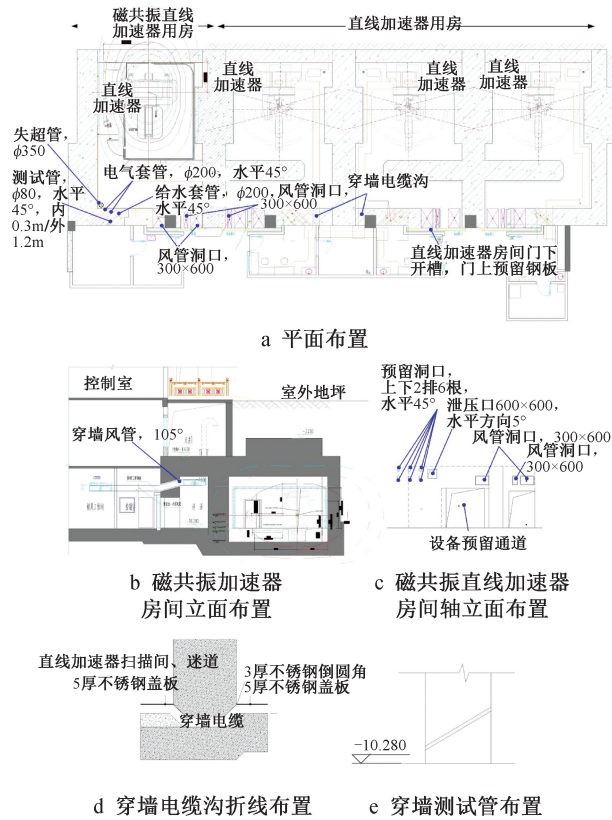


图 13 直线加速器房间机电管线布置

Fig. 13 Mechanical and electrical pipeline arrangement in the linear accelerator room

一方面,基于 BIM 模型出具碰撞报告,可能存在的管道与土建结构碰撞的问题进行提前处理;另一方面,通过优化管道布置,提高与直线加速器用房相连的室内、迷道、外走廊处的净高,为医疗作业开展提供便利条件,实现基于 BIM 模型的管线综合设计优化管理。

2) 建立基于 BIM 的“定位-复核-安装”管控体系。安装前,通过设计深化后的 BIM 管线模型导出几何数据,发给钢筋工程、机电工程作业人员。作业前,管理人员采用移动设备和投影幕布,对作业工人进行交底。针对土建阶段的预制构件,①第 1 步,精准下料:要求机电管线预制段基于 BIM 模型导出的数模加工,下料长度考虑制作误差和焊接变形;②第 2 步,安全运输:对预制风管等截面大、易变形的构件,采用塑料封存、临时固定等多种措施,用紧绳与运输车固定,防止移动和损坏;③第 3 步,现场安装:总包单位做好界面协调工作,以设计单位复核后的 BIM 深化模型数据为基准,向现场劳务分包、专业分包进行交底,现场钢筋工程、混凝土工程精准施工,确保钢筋定位准确;④第 4 步,验收校验:组织总包管理人员、机电工程管理人员复核钢筋工程预埋情况,要求总包人员参与机电预制管道验

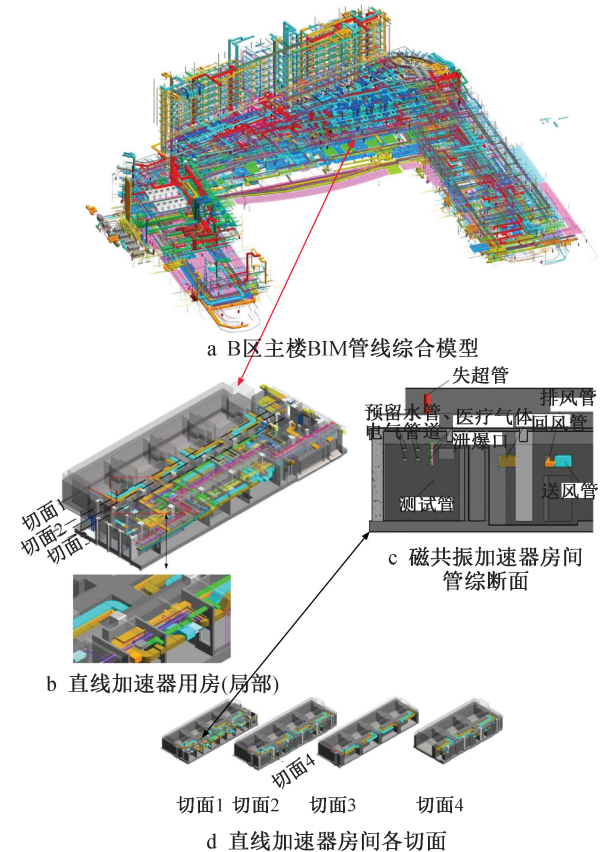


图 14 机电管线 BIM 模型

Fig. 14 BIM model of mechanical and electrical pipelines

收,通过明确责任确保机电管线安装到位;⑤第 5 步,浇筑前加固:针对直线加速器用房顶板墙体厚度大的特点,对 1.6,3m 墙体预埋的管道做好加固工作,确保浇筑时结构不会损坏。同时总包单位验收通过前不得对加固预埋管道,以减少定位错误引起的拆改;⑥第 6 步,浇筑工作交底预埋管道位置:对混凝土浇筑工人交底,明确管道位置,减少振捣棒对预埋管道质量的影响。

5.3 直线加速器用房管道预埋加固防变形

直线加速器用房迷道处设置了 105°斜向穿墙管道,该风管长度 1.7m,截面最大为 800mm×500mm,两侧加装保温后形成土建预埋 900mm×600mm 管道。但因浇筑时上部有超厚混凝土,且截面尺寸大,风管壁厚仅 3mm,刚度弱,易变形。因此在制作时,风管内部增设 2 道角钢加固措施;同时运输、安装过程中在风管内设置木方提高结构刚度,如图 15 所示。

6 直线加速器用房施工过程

直线加速器混凝土施工过程如图 16 所示。通过精确定位墙体、顶板钢筋,按照方案做好板下架体布置,浇筑完成混凝土后做好养护,完成直线加速器混凝土工程浇筑。

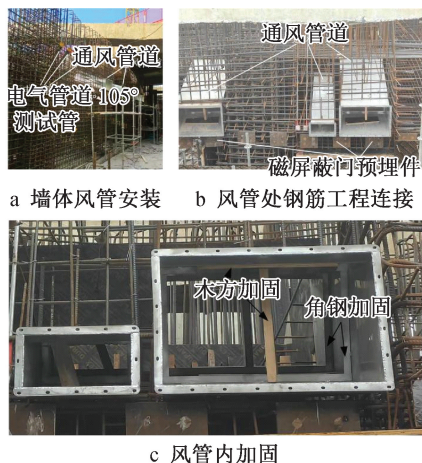


图 15 管线预埋及风管加固

Fig. 15 Pipeline pre-embedding and air duct reinforcement

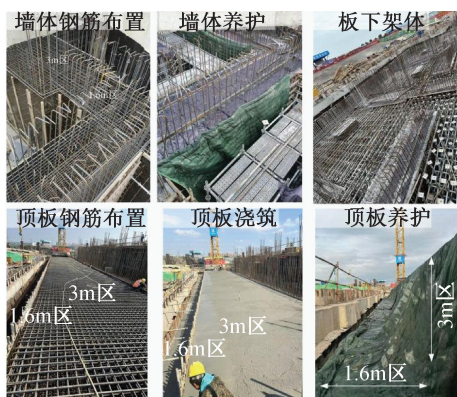


图 16 直线加速器大体积混凝土施工过程

Fig. 16 Construction process of mass concrete casting for linear accelerator room

7 结语

国家医学中心直线加速器用房的墙体、顶板混凝土厚度均超过 3m,为保障加速器用房成品质量,从大体积混凝土温度控制、架体稳定设计、医疗专项管线管道预埋三方面,总结形成如下主要关键技术。

1) 直线加速器用房结构分为 3 次浇筑。第 1 次浇筑底板,第 2 次浇筑墙体,第 3 次浇筑顶板。在浇筑混凝土顶板前,应先进行肥槽回填、进而拆除与顶板存在碰撞的混凝土支撑梁,保障顶板浇筑连续。在变厚度的阴阳角区域设置了斜向对拉螺栓和加密斜抛撑,提高模板体系受力。

2) 大体积混凝土浇筑温度控制技术:对于 3m 厚直线加速器用房,通过采用低水化热水泥、掺入 1.2kg 聚丙烯抗裂纤维,得到大体积混凝土配合比。墙体不脱模并增设 5cm 矿棉被养护,顶板采用 1mm 塑料薄膜和 5cm 厚矿棉被组合养护,保温周期依据

温差确定。基于一维差分法进行理论计算温度场并合理布置测点进行实测,结果显示,核心处温度于 90h 左右达到峰值 69.4℃,表层温度于 52h 左右达到峰值 55.6℃,监测结果与计算结果误差 <6%。混凝土配合比、温差计算能够有效指导直线加速器用房大体积混凝土的浇筑。

3) 直线加速器用房机电管线施工关键技术:为保障辐射屏蔽,穿墙管道均斜向或弯折布置。采用 BIM 数值模型建立了土建+管线综合模型,明确各医疗专项管线位置。基于 BIM 模型,建立“定位-复核-安装”管控体系,确保现场安装定位。

参考文献:

- [1] 陈相坤,蓝新财,林淑敏,等. 医院智能物流平台构建研究[J]. 中国卫生质量管理,2020,27(2):16-18.
CHEN X K, LAN X C, LIN S M, et al. Construction of hospital intelligent logistics platform [J]. Chinese health quality management, 2020, 27(2): 16-18.
- [2] 梁肖倩. 直线加速器医疗室大厚度墙板的温度应力及裂缝控制研究[D]. 西安:长安大学,2022.
LIANG X Q. Study on temperature stress and crack control of large-thickness walls and panels in medical rooms [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022.
- [3] 黄俊. 医疗建筑特殊防护用房—直线加速器设计与施工,广东土木与建筑,2023,30(11):44-48.
HUANG J. Design and construction of linear accelerator-special protective room for medical buildings [J]. Guangdong architecture civil engineering, 2023, 30(11): 44-48.
- [4] 李潘武,梁肖倩,门凡,等. 内外温控条件对超厚辐射混凝土墙体的温度应力影响研究[J]. 混凝土,2021(12):147-152.
LI P W, LIANG X Q, MEN F, et al. Temperature stress of super thick concrete wall with different external temperature control conditions [J]. Concrete, 2021(12): 147-152.
- [5] 冯锦华,梁伟. 医用直线加速器室现浇大体积混凝土施工技术[J]. 施工技术,2009,38(12):40-42.
FENG J H, LIANG W. Construction technology of cast-in-situ mass concrete in medical linear accelerator room [J]. Construction technology, 2009, 38(12): 40-42.
- [6] 丁华营,陈昆鹏,龙洪,等. 医院直加机房防辐射大体积混凝土施工技术[J]. 施工技术,2021(9):32-34.
DING H Y, CHEN K P, LONG H, et al. Construction technology of radiation-proof mass concrete in hospital linear accelerator room [J]. Construction technology, 2021(9): 32-34.
- [7] 刘文昆,金博,李松,等. 基于智能无线监测系统医院狭小密闭空间超厚板高支模安全监测技术[J]. 施工技术,2019,48(18):59-63.
LIU W K, JIN B, LI S, et al. Hospital narrow and confined space super thick plate high-formwork supports safety monitoring technology based on intelligent wireless monitoring system [J]. Construction technology, 2019, 48(18): 59-63.

(下转第 117 页)

- engineering, 2023, 23(10):4185-4193.
- [10] CHEN A J, CHENG F, WU D, et al. Ground vibration propagation and attenuation of vibrating compaction [J]. Journal of vibroengineering, 2019, 21(5):1342-1352.
- [11] GRIZI A, ATHANASOPOULOS-ZEKKOS A, WOODS R D. Pile driving vibration attenuation relationships: overview and calibration using field measurements [C]//Geotechnical earthquake engineering and soil dynamics V. Austin, Texas. American society of civil engineers, 2018.
- [12] 黄菊花, 肖祥芷, 董湘怀, 等. 关于动力机器基础激发的地面振动衰减公式的讨论[J]. 塑性工程学报, 2001, 8(3):85-88.
HUANG J H, XIAO X Z, DONG X H, et al. Discussion on formula calculating the attenuation of the ground vibration by dynamic machine foundation[J]. Journal of plasticity engineering, 2001, 8(3):85-88.
- [13] 杨先健, 徐建, 张翠红. 土-基础的振动与隔振[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
YANG X J, XU J, ZHANG C H. Vibration and vibration isolation of soil-foundation [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.
- [14] 陈福江, 段蓉蓓, 张鑫, 等. 近距离桩基施工对既有盾构隧道的振动影响分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1):140-148.
CHEN F J, DUAN R Q, ZHANG X, et al. Analysis on vibration influence of the construction of short-distance pile foundation on existing shield tunnels[J]. Modern tunnelling technology, 2023, 60(1):140-148.
- [15] 王飞, 宋志强, 刘昱杰, 等. 基于 ABAQUS 无限元的静-动力统一人工边界研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6):170-177.
WANG F, SONG Z Q, LIU Y J, et al. Research on static-dynamic unified artificial boundary based on ABAQUS infinite element [J]. Journal of water resources and water engineering, 2018, 29(6):170-177.
- [16] 聂鹏. 钻孔灌注桩施工对地层及既有管沟振动影响规律研究[J]. 城市轨道交通研究, 2025, 28(1):108-112.
NIE P. Study on the vibration influence law of bored cast-in-place pile construction on existing strata and pipe trenches [J]. Urban mass transit, 2025, 28(1):108-112.
- [17] 徐信芯, 焦生杰, 成建联, 等. 旋挖钻机钻杆轴向与横向耦合振动研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2014, 37(9):1039-1044.
XU X X, JIAO S J, CHENG J L, et al. Study of coupled axial and transverse vibrations on the drill pipe for rotary drilling rig [J]. Journal of Hefei University of Technology (natural science), 2014, 37(9):1039-1044.
- [18] POLETTO F. Energy balance of a drill-bit seismic source, part 1: rotary energy and radiation properties [J]. Geophysics, 2005, 70(2):T13-T28.
- [19] 郝郁清. 爆破地震波对埋地燃气管道的动力响应研究[J]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
HAO Y Q. Study on the dynamic response of blasting seismic waves to buried gas pipelines [J]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019.

(上接第 48 页)

- [8] 陈业林, 梁羽. 直线加速器机房超厚防辐射混凝土施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(9):154-157.
CHEN Y L, LIANG Y. Construction technology of ultra-thick anti-radiation concrete for linear accelerator machine room [J]. Construction technology, 2025, 54(9):154-157.
- [9] 何帅全, 连敏杰, 林航. 直线加速器机房超厚钢筋混凝土墙顶板施工技术[J]. 城市住宅, 2020, 27(10):227-230.
HE S Q, LIAN M J, LIN H. Construction technology of super-thick reinforced concrete wall roof in linear accelerator room [J]. City & house, 2020, 27(10):227-230.
- [10] 康苗, 李守富, 王稼琦, 等. 重晶石重密度抗辐射混凝土制备及其大体积结构施工技术[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(19):137-142.
KANG M, LI S F, WANG J Q, et al. Preparation and construction technology of ultra-high density and large volume barite concrete in proton therapy area [J]. Construction technology, 2024, 53(19):137-142.
- [11] 周拓. 筏板基础大体积混凝土温度发展规律与裂缝防控[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(16):67-72.
ZHOU T. Temperature development law and crack prevention and control of mass concrete of raft foundation [J]. Construction technology, 2024, 53(16):67-72.
- [12] 王龙, 马柏隆, 吴寒, 等. 大体积防辐射混凝土配合比设计与优化[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(4):53-57.
WANG L, MA B L, WU H, et al. Design and optimization of bulk anti-radiation concrete mixing ratio [J]. Construction technology, 2024, 53(4):53-57.
- [13] 贾哲, 姜波, 程光旭, 等. 纤维增强水泥基复合材料研究进展[J]. 混凝土, 2007(8):65-68.
JIA Z, JIANG B, CHENG G X, et al. Research progress of fibers reinforced cement based composites [J]. Concrete, 2007(8):65-68.
- [14] 阎培瑜, 周智凯, 刘卫未, 等. 高层建筑楼板混凝土抗裂性能试验研究[J]. 施工技术, 2015(24):27-29.
YAN P Y, ZHOU Z K, LIU W W, et al. Study on methods of anti-cracking ability of concrete floor of tall buildings [J]. Construction technology, 2015(24):27-29.