

Solving the "Double Problem" of Linear Accelerator Room Construction

Cao Qi, Fan Weiwu, Liang Wanli, Wang Canwei, Li Zhi

(The fourth branch of the general contracting company of China Construction Eighth Engineering Bureau Co., Ltd Wuhan 430000, China)

Abstract: This paper deeply discusses the "double problems" of safety and quality faced in the construction of linear accelerator computer room, and puts forward practical solutions to solve them. In terms of safety, in view of the large thickness of the roof of the computer room and the characteristics of the total construction load far exceeding 15kN/m^2 , the research team optimized the design of the formwork support system, used structural analysis software for accurate modeling and calculation, reasonably determined the parameters such as pole spacing and step distance, and adjusted them according to the actual situation on site. At the same time, the inspection of formwork support materials is strictly controlled, the technical training of construction personnel is strengthened, and a sound monitoring system is established to ensure the safety and controllability of the construction process. In terms of quality, in view of the characteristics of the large-volume concrete structure with a thickness of more than 1 meter of wallboard in the computer room, the research analyzed the causes of cracks in detail, including the heat of hydration, temperature change and other factors, and proposed corresponding quality control measures. By strengthening the quality control of raw materials, optimizing the design of the mix ratio, standardizing the concrete pouring process, and improving the thermal insulation and maintenance measures, the construction quality of large-volume concrete was effectively improved, and the strength, stability and radiation protection performance of the wall structure of the computer room were ensured. The study also verified the effectiveness and feasibility of the proposed strategy through the actual case of the linear accelerator computer room project of Hubei Provincial Cancer Hospital. The comparison of the effect after construction shows that the optimized formwork support system is stable and reliable, the concrete strength pass rate is more than 98%, the wall has no cracks, the appearance quality is good, and the radiation protection performance of the computer room meets the requirements. The research results of this paper not only provide valuable reference experience for the construction of similar linear accelerator computer room projects, but also lay a solid foundation for promoting the technological progress of the medical facility construction industry. In the future, with the continuous integration of advanced technologies such as intelligence and greening and the continuous improvement of relevant norms and standards, the construction technology level of linear accelerator computer room is expected to be further improved, providing a stronger guarantee for the high-quality development of the medical industry.

Key words: Linear acceleration machine room, pole spacing, step distance, quality control, ultra-dangerous projects

Date of Submission: 27-07-2025

Date of acceptance: 05-08-2025

1 引言

直线加速器机房在肿瘤治疗中具有关键作用，其建设和完善对提升肿瘤治疗服务的供给能力和效果意义重大。然而，施工过程中的安全与质量“双重难题”给医疗设施建设带来了巨大挑战。

在安全方面，机房顶板厚度达 1.4-3 米，施工总荷载远超 15kN/m^2 ，模板支撑系统属超危大工程。

根据住房和城乡建设部令第 37 号《危险性较大的分部分项工程安全监督管理规定》，此类工程需严格管理。模板支撑系统设计和施工不当可能引发坍塌等安全事故，威胁施工人员生命安全，造成工程延误和资源浪费，影响医疗设施建设进度，进而阻碍肿瘤治疗服务及时开展。

在质量方面，机房部分墙板厚度超过 1 米，属大体积混凝土结构。大体积混凝土施工易因水化热产生、温度变化等因素出现裂缝^{[1][2]}，降低墙体结构强度和稳定性，导致辐射防护性能下降，无法有效阻挡高放射性射线，对医护人员和患者安全造成潜在危害。此外，大体积混凝土施工质量不佳可能使机房使用过程中出现耐久性问题，增加后期维护成本和维修难度，甚至影响直线加速器正常运行，降低肿瘤治疗效率和质量。

深入研究直线加速器机房施工中的安全与质量“双重难题”，具有极为重要的现实意义。通过优化模板支撑系统设计、规范施工流程、加强安全监测等措施，能够有效提高施工安全性，保障施工人员生命安全，确保机房建设顺利进行，按时交付投入使用，为肿瘤患者提供及时的治疗服务。同时，针对大体积混凝土施工质量难题，探索科学合理的混凝土配制方案、改进浇筑工艺、完善保温养护措施，可以提升机房墙体结构的强度、稳定性和辐射防护性能，延长机房使用寿命，降低维护成本，为直线加速器的稳定运行和肿瘤治疗的高质量开展提供坚实基础。这一研究还有助于推动医疗设施建设行业的技术进步，提高整个行业在特殊医疗设施施工领域的技术水平和质量意识，为医疗事业的发展提供有力支持，最终造福广大肿瘤患者，提升全社会的医疗健康水平。

2 直线加速器机房施工安全问题剖析

2.1 模板支撑系统超规模危险性阐述

根据住房和城乡建设部令第 37 号《危险性较大的分部分项工程安全监督管理规定》和《住房和城乡建设部办公厅关于实施〈危险性较大的分部分项工程安全监督管理规定〉有关问题的通知》（建办质〔2018〕31 号），混凝土模板支撑工程中施工总荷载（设计值） 15kN/m^2 及以上属于超过一定规模的危险性较大的分部分项工程。

直线加速器机房顶板施工总荷载计算及分析如下：混凝土自重为 72kN/m^2 （顶板厚度 3 米，容重 24kN/m^3 ），模板及支撑系统自重 1.5kN/m^2 ，施工活荷载 4.5kN/m^2 ，总荷载达 78kN/m^2 ，远超 15kN/m^2 标准，故其模板支撑系统属超危大工程，需严格管理。

2.2 安全控制要点与难点

2.2.1 模板支撑系统设计难点分析

直线加速器机房顶板厚度大、形状不规则且空间有限，与周边建筑连通时需考虑协同性，使得支撑体系布置形式复杂。立杆间距与步距需依据荷载计算确定，但受多种变量影响，如局部荷载集中区域需减小立杆间距，施工振动荷载影响下需平衡立杆间距与稳定性。同时，需协调承载能力与稳定性，通过合理参数设计与构造措施确保支撑系统可靠。

2.2.2 模板支撑施工过程中的挑战

模板支撑系统材料质量是安全施工的基础，但采购渠道复杂，材料规格型号不符、材质不达标等问题时有发生，且保管堆放不当会降低材料强度与使用寿命。搭设工艺不规范，如立杆垂直度偏差、水平杆间距不均、剪刀撑搭设不当等，会影响支撑系统稳定性。施工人员操作熟练程度直接影响施工质量，新入场或经验不足人员易违规操作。施工过程中安全监测工作存在漏洞，部分企业未配备专业监测设备或人员，即使有也存在监测点布置不合理、监测频率不足等问题。

3 直线加速器机房施工质量难题分析

3.1 大体积混凝土墙板特性及施工难点

3.1.1 直线加速器机房部分墙板厚度特点

直线加速器机房部分墙板厚度超过 1 米，设计主要用于满足辐射防护和结构强度要求，以保障人员和环境安全。

3.1.2 大体积混凝土的定义和特性

大体积混凝土指结构物实体最小尺寸不小于 1 米或预计会因水泥水化热作用导致内外温差过大而

产生裂缝的混凝土。其特性包括水化热产生，水泥水化过程中释放大热量，内部温度升高，普通硅酸盐水泥水化初期可使内部温度升高 30 - 50°C。

3.1.3 大体积混凝土产生裂缝的原因

水化热产生的高温和后续温度变化使大体积混凝土内部与表面形成较大温度梯度，导致内部产生压应力，表面产生拉应力，当拉应力超过混凝土抗拉强度时，就会产生裂缝，危及机房结构安全和辐射防护性能。

3.1.4 大体积混凝土施工中的其他质量难题

混凝土强度均匀性难以保证，运输、浇筑和振捣过程中的不均匀性会导致局部混凝土强度不均匀，影响机房结构稳定性和辐射防护能力。施工缝处理复杂，分层浇筑时施工缝处理不当会导致新旧混凝土粘结不牢，影响混凝土整体性和抗渗性能，进而影响机房防护效果和使用寿命。

3.2 质量控制关键环节缺失分析

3.2.1 混凝土配制环节易被忽视的问题

砂石骨料质量波动受开采环境、运输和储存条件等因素影响，存在波动风险，可能导致混凝土强度、耐久性和工作性不满足设计要求。

外加剂不合理使用，如品种选择不当、掺量不准确等，会影响混凝土凝结时间、强度发展和耐久性。

3.2.2 混凝土浇筑环节问题分析

浇筑顺序不规范会导致混凝土内部出现孔洞、蜂窝麻面等问题，降低结构承载能力和防水性能。

振捣工艺不规范，如振捣时间不足或过长、振捣棒插入深度和间距不当等，会影响混凝土密实度和强度，导致结构质量问题。

3.2.3 保温养护措施问题及影响

养护时间不足会导致混凝土内部水分过早蒸发，水泥水化反应不充分，强度发展受限，体积收缩产生拉应力，易产生裂缝。养护温度和湿度控制不当，如冬季未保温、夏季未降温、初期湿度不足等，会导致温度应力和干缩应力叠加，使混凝土产生裂缝，影响结构质量。

4 破解安全与质量“双重难题”的策略

4.1 模板支撑系统安全保障措施

4.1.1 优化模板支撑系统设计的方法

运用先进的结构分析软件进行精准建模和计算，选择如 MIDAS、PKPM、SAP2000 等软件，根据建筑设计图纸详细输入参数，准确模拟支撑体系布置形式，按照规范要求计算各项荷载，分析模板支撑体系受力情况。合理确定支撑体系的各项参数，根据计算结果优化立杆间距和步距，确定水平杆与剪刀撑设置参数，并结合现场实际情况进行适当调整，考虑现场地形与周边环境以及施工设备与工艺的影响。

4.1.2 施工过程中的安全保障措施

严格把控模板支撑材料的进场检验，制定检验制度，按照国家标准对每一批材料进行质量检测，建立不合格材料台账。加强施工人员的技术培训，组织培训并进行考核，确保施工人员熟练掌握搭设工艺和规范要求。建立完善的监测体系，合理布置监测点，设定位移和应力的预警值和报警值，确保施工安全。

4.2 大体积混凝土施工质量提升举措

4.2.1 加强原材料质量控制

建立原材料供应商评估制度，制定评估标准，定期审核供应商，确保原材料质量稳定。优化配合比设计，通过试验研究确定最佳的水泥用量、砂率、水胶比等参数，提高混凝土的抗裂性能。

4.2.2 针对混凝土浇筑环节

制定详细的施工方案，明确合理的浇筑顺序和分层厚度，采用先进的振捣设备和工艺。加强施工人员操作监督，确保施工人员严格按照规范要求进行施工。

4.2.3 保温养护方面

采用新型的保温材料进行覆盖养护，根据不同季节和环境温度条件调整养护时间和措施，加强对养

护过程中的温度和湿度监测，确保混凝土始终处于良好的养护环境中。

5 工程案例分析

5.1 项目概述

湖北省肿瘤医院为提升肿瘤治疗水平，新建直线加速器机房。该机房建筑面积 320 m²，长 24m、宽 18m、高 7.2m，包含两个直线加速器室、模拟定位 CT 室等。机房顶板厚度 2.4-3.0m，墙板厚度 1.2-1.5m，设计使用年限 50 年，抗震设防烈度 7 度。

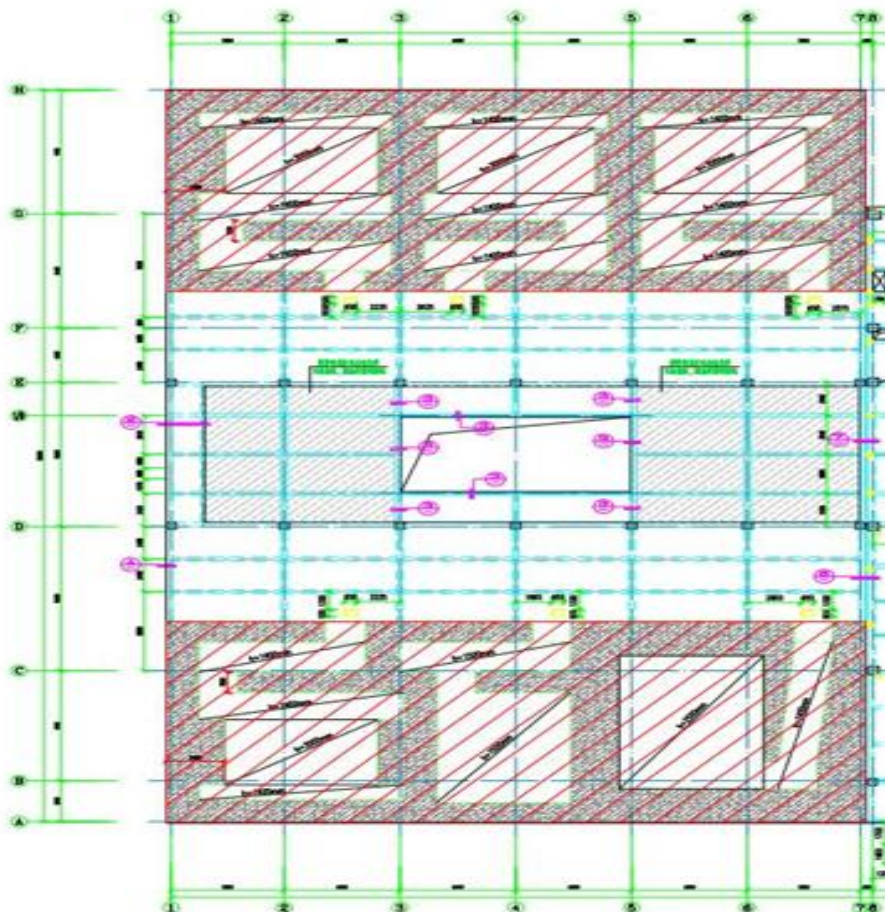


图 1 直线加速器机房平面图

5.2 模板支撑系统设计与安全措施

5.2.1 模板支撑系统设计参数

模板采用 15mm 厚覆面木胶合板。采用 50*50*2.5mm 的方钢管作为次龙骨，间距 150mm；主龙骨采用 10 号工字钢，平行立杆纵向方向布置，间距 600mm；支撑架采用盘扣式脚手架，纵横向间距 600mm×600mm 布置，步距 1500mm，顶层步距 1000mm。详图见下（1400、1500、2500mm 的板厚支撑均同 3000mm 厚的板支撑）。

板凸出部位侧模采用 15mm 厚覆面木胶合板。小梁采用 40mm 宽，80mm 高方木水平向布置，间距 100mm，小梁最大悬挑长度 100mm。主楞采用 $\Phi 48.3 \times 3.2$ 双拼钢管，间距 350mm，两侧通过 M16 对拉螺栓进行固定，竖向方向间距 350mm，水平向间距 350mm。

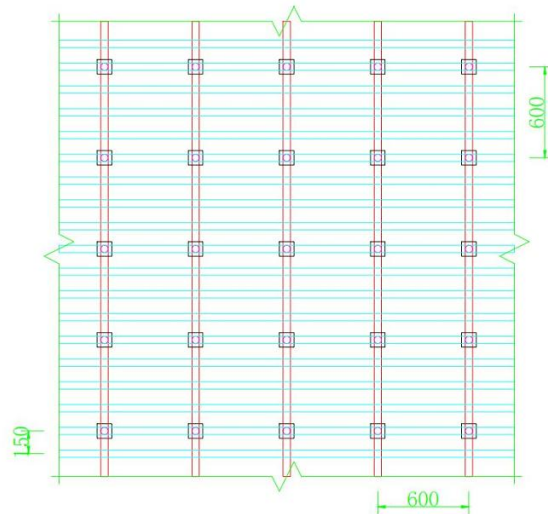


图 2 模板设计平面图

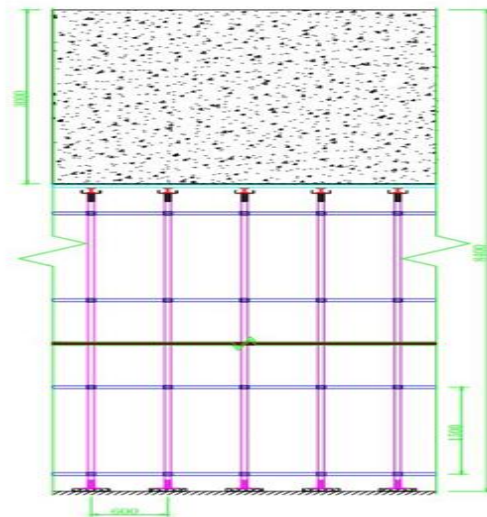


图 3 模板设计纵向剖面图

侧墙模板采用 15mm 厚覆面木胶合板，次楞采用 40mm×80mm 方木竖向布置，间距 100mm，最大悬挑长度不大于 100mm；主楞采用 $\Phi 48.3 \times 3.2$ 双拼钢管，间距 350mm，最大悬挑长度不大于 100mm，两侧通过 M16 对拉螺栓进行固定，横向间距 350mm，纵向间距 350mm。详图见下（超限区域其他厚度剪力墙模板支撑均同 3000mm 厚的剪力墙支撑）

侧墙两侧应设置抛撑或对撑，撑杆采用 $\Phi 48.3 \times 3.2$ 钢管，结合项目实际情况及施工时的工况，对不同部位采用不同的支撑方法，剪力墙外部区域①采用斜撑，斜撑底部撑于临时道路侧面；剪力墙外部区域②采用斜撑，斜撑底部撑于承台侧面；剪力墙外部区域④采用水平撑，撑于东侧机房外墙上；剪力墙内部区域③两堵剪力墙采用水平对撑；剪力墙其他内部区域，采用斜撑，通过筏板浇筑时预埋钢管或浇筑宽 200mm 高 100mm 的混凝土导墙，进行斜撑底部固定。

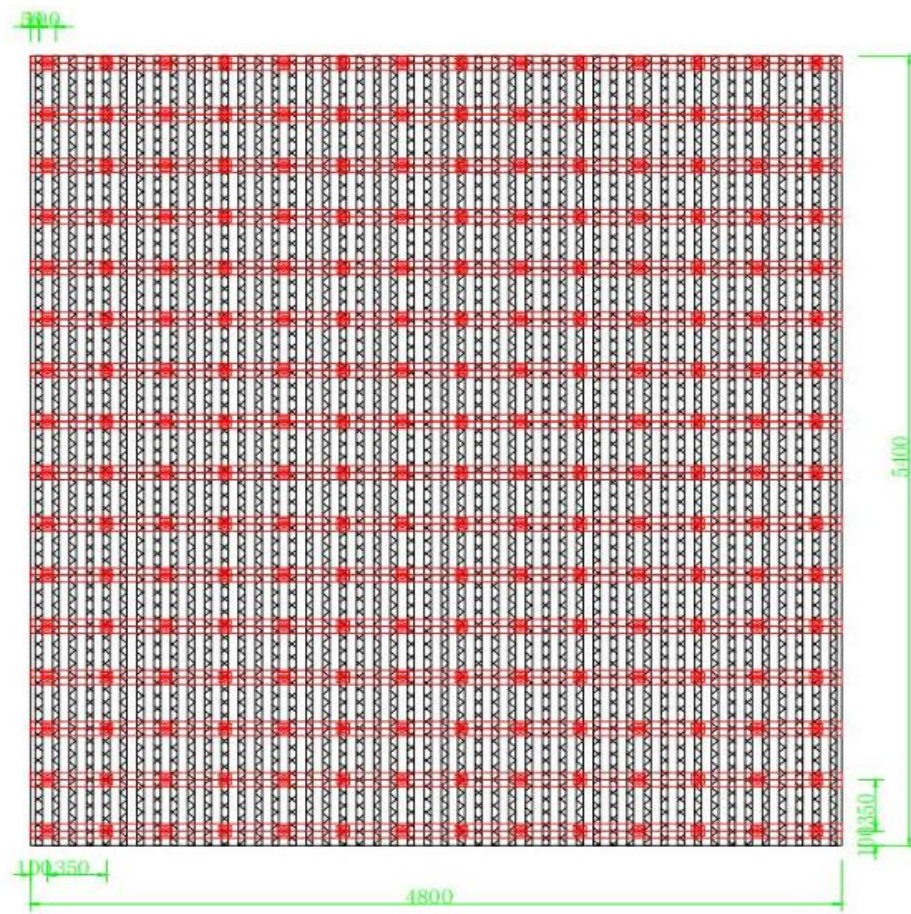


图 4 墙模板立面布置图

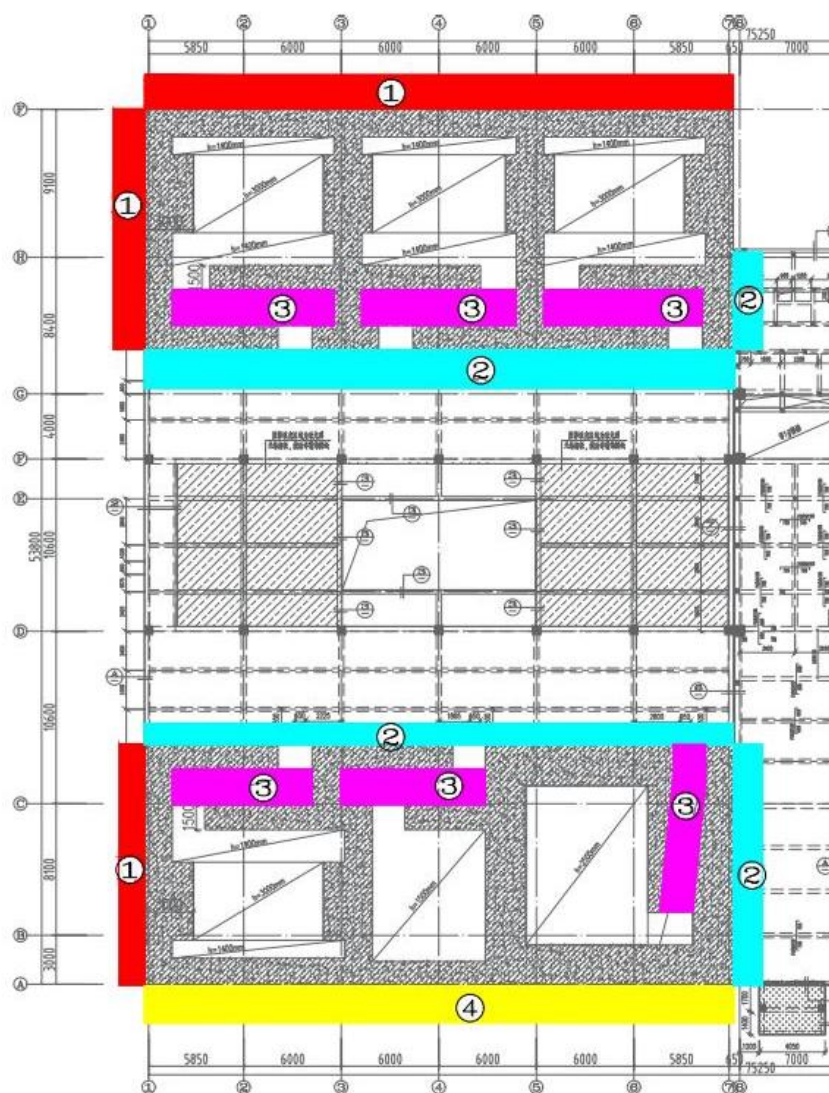


图 5 墙模板斜撑或对撑分区图

5.2.2 施工安全保障措施

材料检验与管理：模板支撑材料进场时，严格检查钢管壁厚、材质证明等，确保符合设计要求。建立材料管理台账，记录材料进场时间、数量、检验结果等信息。对扣件进行抽样检测，确保其抗滑移性能满足施工需求。

施工人员培训与交底：组织施工人员参加模板支撑施工技术与安全培训，邀请专家讲解模板支撑体系的受力特点、搭设工艺和安全注意事项等内容。培训结束后进行考核，合格人员颁发上岗证。在施工前，项目技术负责人向施工班组进行详细的安全技术交底，明确施工流程、质量标准和安全要点。

施工过程监测：在模板支撑体系搭设过程中，设置位移监测点和应力监测点。位移监测点布置在立杆的顶部和中部，应力监测点则布置在立杆的中部和底部。实时监测数据，当位移或应力接近预警值时，立即采取措施进行调整，如增加临时支撑、调整荷载分布等，确保施工安全。

5.3 大体积混凝土施工

5.3.1 混凝土配制

原材料质量把控：成立原材料评估小组，对砂石骨料、水泥、外加剂等供应商进行严格筛选。每月对供应商生产过程进行现场审核，确保原材料质量稳定。进场原材料批批检测，如砂石骨料的级配、含泥量，水泥的强度等级、安定性等指标。

配合比设计优化：通过大量试验确定最佳配合比。C35P6 抗渗混凝土水泥用量 360kg/m^3 ，砂率 42%

-45%，水胶比 0.48，减水剂掺量 1.0%。此配合比满足机房墙板强度和抗渗要求^[3]。

表 1 混凝土配合比

材料名称	水泥	粉煤灰	矿渣粉	砂	石子	水	减水剂	膨胀剂
品种	P.042.5	II级	S95 级	中砂	碎石	地表水	QY-802	ZM-W 聚合物纤维
kg/m ³	290	40	70	730	967	173	9.68	40

5.3.2 混凝土浇筑

浇筑方案制定：根据机房结构特点，制定详细浇筑方案。墙板采用分层浇筑，每层厚度 30cm；顶板采用由中间向四周的对称浇筑方式，确保混凝土均匀分布，减少结构内部应力。

浇筑过程控制：在浇筑过程中，严格控制混凝土坍落度，确保混凝土和易性良好。使用插入式振捣器进行振捣，插入深度控制在下层混凝土 5cm 处，振捣时间 25 - 30s，确保混凝土振捣密实^[1]。安排专人负责监督浇筑过程，及时解决施工中出现的問題。

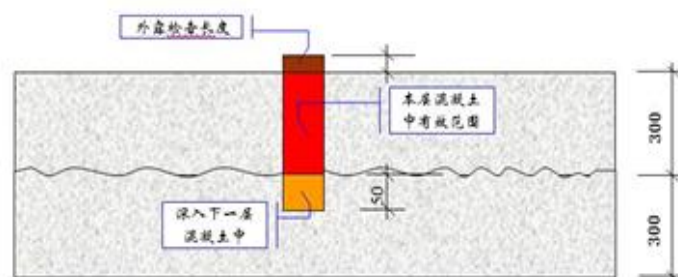


图 6 直线加速器墙体分层浇筑示意图

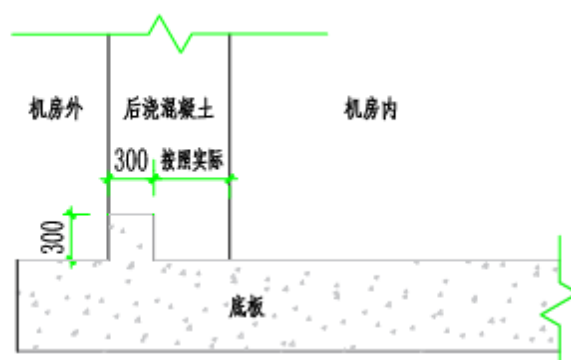


图 7 墙柱施工缝节点详图

5.3.3 混凝土养护

养护方案实施：混凝土浇筑完成后，及时覆盖塑料薄膜和养护毯，初期洒水次数 5-6 次 / 天，3 天后 3-4 次 / 天，7 天后 2-3 次 / 天，养护持续 14 天。冬季施工时，养护毯厚度增加至 6-8cm，内设电加热设备，使混凝土在 5-10℃环境下养护。

温湿度监测与调整：养护期间，测温点主要分布在混凝土表面内 5cm 以及温度最高的中间位置，以确保得到最准确的内部最高温度^[5]，每 2 小时采集一次数据。当混凝土表面温度与环境温差大于 20℃或混凝土内外温差大于 25℃时，增加覆盖材料厚度或调整洒水频率，控制温湿度变化，防止裂缝产生。

混凝土降温措施：本工程粒子加速器房间各构件均为大体积混凝土构件，需埋设冷却水管^[6]对混凝土进行降温。

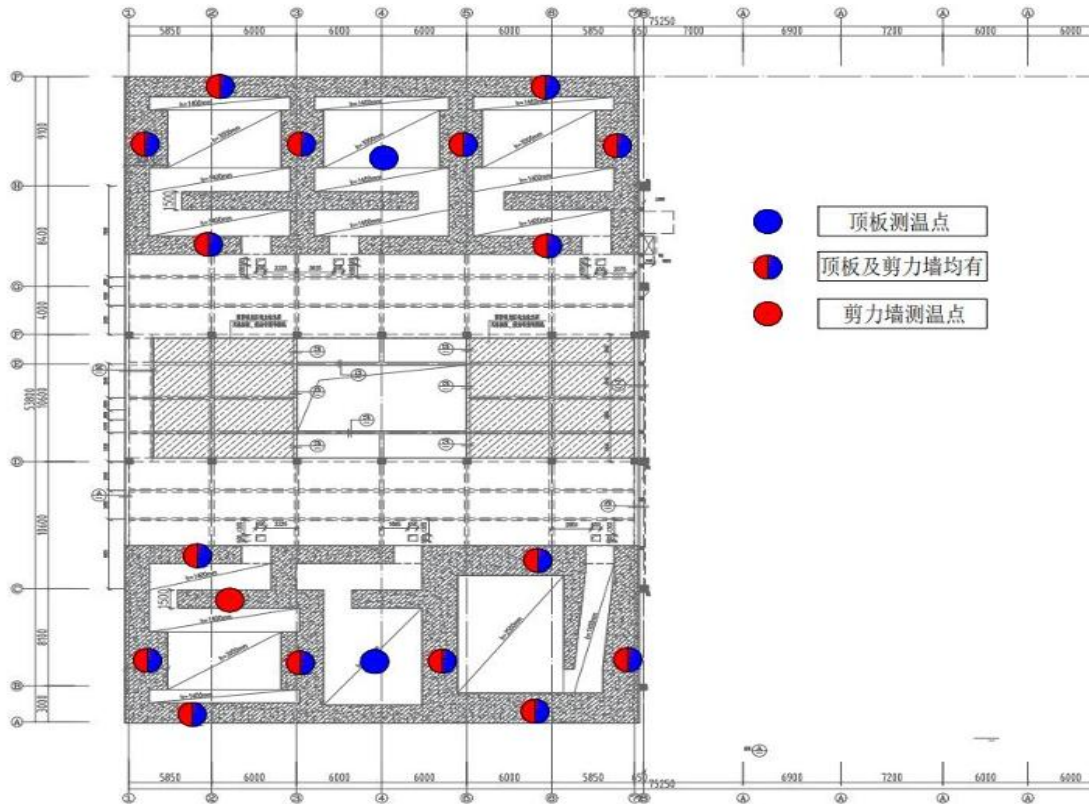


图 8 直线加速器机房测温点布置图

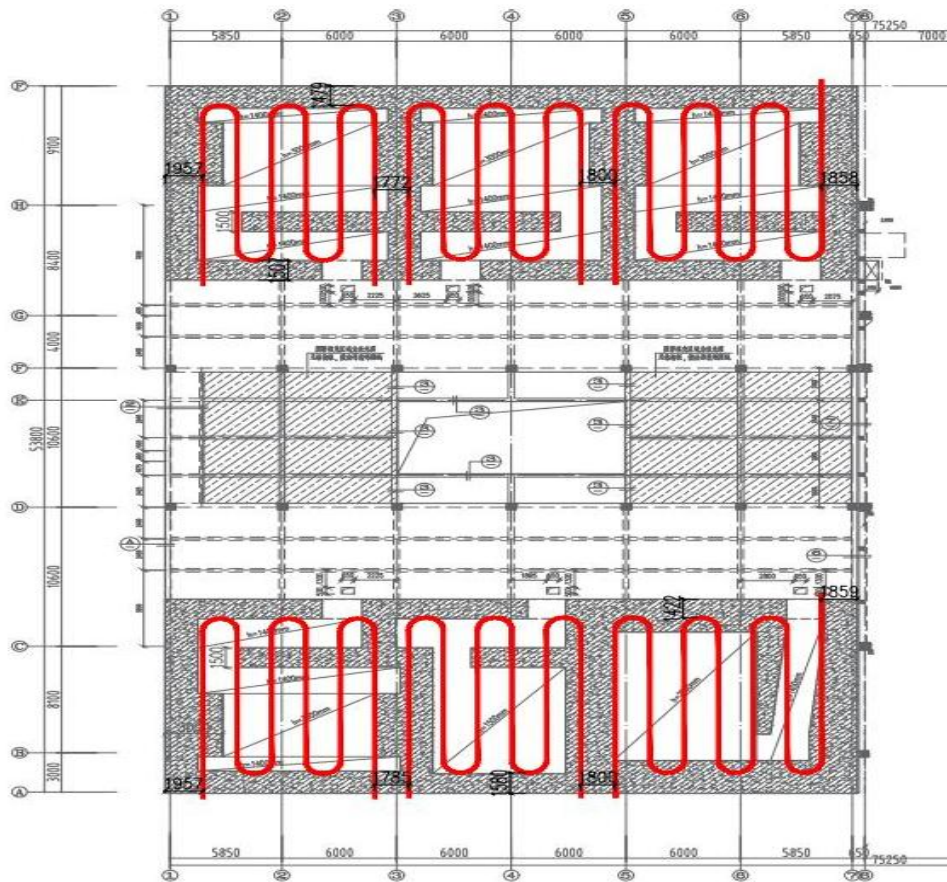


图 9 直线加速器机房顶板混凝土水冷却管平面布置图

5.4 施工效果与验证

5.4.1 安全状况对比

施工前：现场安全风险高，模板支撑材料质量不稳定，部分钢管壁厚不足，扣件松动。施工人员安全意识淡薄，操作不规范，缺乏系统培训。无有效安全监测手段，难以及时发现和处理安全隐患。

施工后：通过优化模板支撑设计、严格材料检验、强化人员培训和建立监测体系，施工过程安全可控，未发生安全事故。模板支撑体系稳定，立杆垂直度偏差控制在 5mm 以内，水平杆间距偏差小于 3mm，剪刀撑角度偏差在 $\pm 5^\circ$ 以内。

5.4.2 质量检测结果对比

施工前：大体积混凝土质量隐患多，混凝土强度离散性大，部分区域强度低于设计要求。墙体裂缝多，混凝土表面蜂窝麻面、孔洞等外观质量问题多。

施工后：混凝土强度合格率达 98% 以上，墙体无裂缝，外观质量良好。混凝土结构密实，抗渗性能满足 P6 设计要求，机房辐射防护性能良好。

6 结论

直线加速器机房施工中的安全与质量控制是医疗设施建设领域的关键任务。通过在湖北省肿瘤医院直线加速器机房项目的实践，证明所采取的策略能有效提升施工的安全性与质量。未来，随着智能化、绿色化等先进技术的不断融入和相关规范标准的持续完善，直线加速器机房施工技术水平必将达到新的高度，为医疗事业的高质量发展提供更加坚实有力的保障。

参考文献

- [1] 刘丹.大体积混凝土温度-应力场理论研究和应用现状综述[J].混凝土与水泥制品,2022(3):17-23.
- [2] 严威,陈楠.直线加速器机房大体积混凝土施工技术[J].安徽建筑,2022,29(3):47-48.
- [3] 陈少军,郑巍,李明月,等.直线加速器机房超厚大体积混凝土温度裂缝控制技术[J].建筑施工,2024,46(02):180-182.
- [4] 《大体积混凝土施工标准》GB 50496-2018.
- [5] 戴国欣.大体积混凝土降温措施[J].工程建设与技术, 2018(12):178-179.
- [6] 《大体积混凝土温度测控技术规范》[附条文说明]GB/T 51028-2015.