Architectural Engineering
May 2015, Volume 3, Issue 2, PP.30-35

Study on the Crack Control of Large Volume Concrete for a Radiation Protection Structure

Fei Wang

Infrastructure Division of the First Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215006, China

Email: wangfei197908@126.com

Abstract

For the structure of radiation protection, the crack control of large volume concrete structure is very important. The concrete crack control level is strict because of two factors: the large-volume concrete and radiation protection concrete elements. Based on a specific projects study, this paper took an underground engineering structure as a major radiation source structure to study on the crack control of large volume concrete through construction cracks control calculation and self-constraint crack control, and maintenance during construction and temperature control, all the conclusion can be reference for the similar projects.

Keywords: Large Volume Concrete; Radiation; Radiation Protection; Concrete Mix Proportion

大体积防辐射混凝土结构的裂缝控制研究

王斐

苏州大学附属第一医院基建办，江苏 苏州 215006

摘　要：为了确保结构的防辐射，确保大体积混凝土结构的抗裂性十分重要。受大体积混凝土与防辐射混凝土两大因素的控制，其混凝土裂缝控制要求等级要求严格。本文结合具体工程，开展了一个直线加速器室的重大辐射源所在地下结构的大体积防辐射混凝土的裂缝控制研究，通过施工前的裂缝控制计算、自约束裂缝控制验算，以及施工过程中的养护和温度监控，实现裂缝最佳控制，相关结论对于类似工程提供了完整的参照。

关键词：大体积混凝土；放射；防辐射；混凝土配合比

引言

本工程为苏州大学附属第一医院平江分院一期二标段土建工程，地下 2 层，地下部分建筑面积约为 52000 平方米，地下室楼板、顶板采用的是梁板结构，地下室层高：地下二层：5.05m、5.15m、7.05m（空心板）；地下一层：4.55m、5.0m。本工程中地下二层直线加速器室顶板厚度为 3.2m、2.9m、1.3m，属于重大危险源。此区域为 19-21 轴 L-R 轴之间，约 13.4×45.85m^2 左右面积，2.9m 厚板分为 2 块，3.2m 厚板分为 1 块，其余为 1.3M 厚板，加速区的净高为 3.9M。

医用直线加速器对肿瘤疾病有良好的治疗效果，但如果防护不当，其高能电磁辐射也会给周边人员造成伤害。为了防止射线的泄漏，除进出治疗室的各种管道和线路均应预留、预埋外，不允许成型后钻孔，更不能有穿透的施工缝，并要严防大体积混凝土的水化热反应引起的裂缝[1]。因此，除了应做好原材料的选择和优化配合比以及各种管道和线路的预留、预埋外，还必须做好对钢筋的绑扎、模板的安装、混凝土施工缝的位置的留置、混凝土浇筑（原材料的选用、浇筑顺序、浇筑速度、温度控制、保养）都提出了很高的要求[2]。

该直线加速区混凝土设计强度等级为 C35，C45、C60 三个等级，采用中砂、5～25mm 石料、C35，C45 混凝土采用金峰牌 P.O42.5 级或南方 P.O42.5 普通硅酸盐水泥，C60 采用金峰牌 P.O52.5 普通硅酸盐水泥，经过原材料优选，主要参照 GB50119－2011《混凝土外加剂应用技术规程》和 JBJ/T55－2011《普通混凝土配

合比设计规程》的相关规定进行配合比设计。塌落度控制在 100-150mm 之间。每立方米胶凝材料总用量控制在最大水泥用量以内；考虑地下结构有利于大体积混凝土抗裂，采用 JM-III 型膨胀剂（内掺 10%）和 1kg/m^3 抗裂纤维以及高效混凝土掺合料粉煤灰（内掺 12-15%）等量取代水泥[3][4]。砂率按 41%、掺泵送剂、经试配试验后确定最优配合比见表 1。

表 1 设计用配合比

	水泥	煤灰	矿粉	砂	石子	水	泵送剂	膨胀剂	纤维
C35	280	50	70	720	1110	175	4.84	40	1.0
C45	340	50	85	670	1090	160	6.28	48	1.0
C60	400	70	70	627	1060	160	7.72	54	1.0

1 混凝土浇注前裂缝控制计算

根根据盖奇商品混凝土有限公司试验室提供的配合比及相关的强度试验报告，试配而成的配合比以及现场情况，计算混凝土浇注后可能产生的最大温度收缩应力，如小于混凝土抗拉强度，表示可以控制裂缝出现；如超过混凝土的抗拉强度，应该采取有效措施（调整混凝土浇注温度以减低水化热温升值、降低混凝土内外温差、提高混凝土抗拉强度、改善混凝土外约束），达到控制混凝土温度收缩裂缝的目的[5]-[7]。

相关基础资料包括：混凝土强度等级 C35；水泥品种 425 号普通硅酸盐水泥；入模温度 T=40℃；混凝土龄期 t=3 d；计算期平均气温 d=35 ℃；年平均气温 T_h=20 ℃。

2.1 混凝土温度收缩应力计算

（1）龄期水化热温差

$$T_1 = M_c \cdot Q(1-E^{-mt}) / C \cdot P$$

其中：M_c 每立方米混凝土水泥含量 M_c=340kg/m^3；Q 每千克水泥水化热 Q=377 J/kg；m 经验系数 m=0；t 混凝土龄期 t=3 d；C 混凝土的比热 C=0.96 kJ/kg.K；P 混凝土质量密度 P=2400 kg/m^3。

经计算得到：T_1=352×377×(1-2.718$^{(-0.0\times3)}$)÷(0.96×2400)=0 ℃。

（2）收缩当量温差计算

$$\varepsilon_{y(t)} = \varepsilon_y(1-e^{-bt})M$$

其中：ε_y 标准状态下的最终收缩值 0.000324；b 经验系数 b=0.01；t 混凝土龄期 t=3 d；M 修正系数 M=0.517。

经计算得到：$\varepsilon_{y(t)}$ =0.000324×(1-2.718$^{(-0.01\times3)}$)×0.517=5×10^{-6}。

（3）收缩当量温差

$$T_{y(t)} = \varepsilon_{y(t)} / \alpha$$

其中：α 混凝土的线膨胀系数 α=0.00001；$\varepsilon_{y(t)}$ 任意龄期混凝土的收缩变形值 $\varepsilon_{y(t)}$ =5×10^{-6}。

经计算得到：$T_{y(t)}$ =5×10^{-6}/0.00001=0.5 ℃。

（4）混凝土最大综合温差

$$\Delta T = T_0 + 2T(t)/3 + T_{y(t)}.T_h$$

其中：T_0 混凝土入模温度 T_0 =40℃；T_h 年平均气温 T_h=20℃；$T(t)$ 龄期水化热温差$T(t)$=0 ℃

经计算得到：ΔT =40+2×0/3+0.5-20=20.5(℃)。

（5）混凝土温度收缩应力

$$\sigma = -\frac{E(t)\alpha\Delta T}{1-\nu_c} S(t) \cdot R$$

其中：α 混凝土的线膨胀系数 α=0.00001；V_c 混凝土的泊松比 V_c=0.15；S(t) 考虑徐变影响的松弛系数

S(t)=0.233；R 混凝土的外约束系数 R=0.3；E(t) 混凝土最终弹性模量 E(t)=31500 N/mm^2。

经计算得到：σ=-(31500×0.00001×20.5)/(1-0.15)×0.233×0.3=-0.53 N/mm^2。

2.2 抗裂安全度计算

（1）混凝土抗拉强度设计值

$$f(t)=0.8f_t(\lg t)^{2/3}$$

其中：f_t 混凝土抗拉强度标准值 f_t=1.65 N/mm^2；t 混凝土龄期 t=3 d。

经计算得到：$f(t)$=0.8×1.65×(lg3)$^{2/3}$=0.81 N/mm^2。

（2）抗裂缝安全度

$$K=\frac{f_t(t)}{\sigma}$$

经计算得到：K=0.81/0.53=1.53 N/mm^2。

混凝土抗裂安全度大于等于 1.15，故满足要求。

2.3 计算期内裂缝控制

（1）混凝土龄期温差

$$\Delta T=\frac{T_0+2T(t)}{3}+T_{y(t)}-T_h$$

其中：T_0 混凝土入模温度 T_0=40 ℃；T_h 年平均气温 T_h=10 ℃。

经计算得到：ΔT=(40+2×0)/3+0.5-10=30.5 ℃。

（2）混凝土龄期降温收缩应力

$$\sigma=-\frac{E(t)\alpha\Delta T}{1-\nu_c}S(t)\cdot R$$

其中：α 混凝土的线膨胀系数 α=0.00001；V_c 混凝土的泊松比 V_c =0.15；S(t) 考虑徐变影响的松弛系数 S(t)=0.233；R 混凝土的外约束系数 R=0.3；E(t) 龄期内弹性模量 E(t)=7452.87 N/mm^2。

经计算得到：σ=7452.87×0.00001×30.5÷(1-0.15)×0.233×0.3=-0.19 (N/mm^2)。

混凝土计算龄期降温收缩应力小于等于龄期的抗拉强度的 75%，即 0.75×0.81 = 0.61 N/mm^2，故可控制裂缝出现。

2 自约束裂缝控制计算

由于水化热的作用，中心温度高，与外界接触的表面温度低，当混凝土表面受外界气温影响急剧冷却收缩时，外部混凝土质点与混凝土内部各质点之间相互约束，使表面产生拉应力，内部降温慢受到自约束产生压应力。如果该表面拉应力小于该龄期内混凝土的抗拉强度值，则不会出现表面裂缝，否则有可能出现裂缝[7]-[10]。计算基本参数包括：混凝土强度等级 C35；混凝土截面表面温度 T_1=35 ℃；混凝土截面中心温度 T_2=50 ℃；混凝土龄期 t=3 d。

（1）混凝土在任意龄期的弹性模量

$$E(t)=E_c(1-e^{-0.09t})$$

其中：E_c 混凝土最终弹性模量 E_c =31500 N/mm^2；t 混凝土龄期 t=3 d。

经计算得到：E(t)=31500×(1-2.718$^{(-0.09\times3)}$)=7452.87 N/mm^2。

（2）不考虑徐变影响的混凝土的最大拉应力

$$\sigma_t=\frac{2}{3}\frac{E(t)\alpha T_1}{1-\nu}$$

其中：E(t) 混凝土一定龄期的弹性模量 E(t)=7452.87 N/mm^2；α 混凝土的热膨胀系数 α=0.00001 1/℃；ΔT_1 混

凝土截面中心与表面之间的温差 ΔT_1 =15 ℃；υ 混凝土的泊松比 υ=0.15。

经计算得到：σ_c =2/3×(7452.87×0.00001×15/(1-0.15))=0.88 N/mm^2。

（3）不考虑徐变影响的混凝土的最大压应力

$$\sigma_t = \frac{1}{3}\frac{E(t)\alpha T_1}{1-\nu}$$

其中各参数同上。经计算得到：

σ_c =(7452.87×0.00001×15/(1-0.15))/3=0.44 N/mm^2。

（4）混凝土的龄期抗拉强度

$$f(t) = 0.8 f_t (\lg t)^{2/3}$$

其中：f_t 混凝土抗拉强度标准值 f_t =1.65 N/mm^2；t 混凝土龄期 t=3 d。

经计算得到：$f(t)$=0.8×1.65×(lg3)$^{2/3}$)=0.81 N/mm^2。

混凝土内部引起的最大拉应力大于等于龄期内混凝土的抗拉强度值，所以表面可能会出现裂缝，加以覆盖，缩小内外温度之差。

3 大体积混凝土施工裂缝控制

地下二层直线加速区位于负二层 P-Q 和 L-M 轴之间、分别设置两条后浇带，一条是人防工程的一般施工后浇带、一条是主楼的沉降后浇带、根据直线加速区后浇带位置设置特点、项目部对直线加速区分别进行三次浇筑。

第一次浇筑 6 月 10 日开始同主楼区域一起开始浇筑，因当天的最高气温 34.0℃、最底温度 25.0℃、考虑到混凝土的入模温度，直线加速区的浇筑时间控制在旁晚 17:00 浇筑，混凝土到达时间 17:40，运输时间 40min，混凝土入模温度 40.0℃、混凝土塌落度 120mm（混凝土出厂塌落度 150mm）、在浇筑过程中发现混凝土没有流动性，给混凝土震捣和泵送带来了很大困难，项目部召集了监理、混凝土公司技术人员以及添加剂生产厂家技术人员进行现场分析，可能产生的原因是因运输线路长，塌落度在运输工程中流失比较大，决定加大混凝土出厂塌落度，现场再次检测混凝土塌落度为 150mm，混凝土流动性及泵送正常，避免混凝土堆积过大、振捣不密实现象。墙板的混凝土浇筑厚度按 50mm 循环浇筑，均匀上升，混凝土浇筑层之间浇筑时间控制在 1 小时内，130cm 厚顶板的浇筑分三层浇筑厚度为 40cm-45cm 之间。于第二日零晨 4 点浇筑结束。即保证了混凝土浇筑的连续性，也解决了混凝土浇筑过程中产生的水化热散发。

浇筑 4 小时后、用一层用塑料薄膜加二层棉毯全面封闭覆盖，然后再用塑料薄膜全面封闭，进行润湿覆盖保养，考虑 3 天为水化热高峰期，第三天加盖两层棉毯进行覆盖。总体测温情况见测温记录。

第二次、第三次混凝土浇筑分别于 6 月 22 日和 6 月 24 日浇筑，这两次浇筑天气情况比第一次有利，当天的最高气温分别 29.0℃、27.0℃最低温度 24.0℃、22.0℃，大大降低入模温度。为根据第一次浇筑的经验总结，避免浇筑过程中不应该发生的问题，圆满完成直线加速区的混凝土浇筑。无发现涨模现象。

控制混凝土在浇筑过程中均匀上升、连续振捣，避免混凝土堆积过大高差。在混凝土浇筑完成后，及时覆盖保湿保温、避免其表面长期暴露，产生裂缝。做好混凝土的保温保湿养护，缓缓降温，充分发挥徐变特性，减低温度应力，是大体积混凝土浇筑和养护的关键。

根据大体种混凝土和防辐射混凝土的要求和特点，结合计算所得结论，相应大体积混凝土裂缝控制措施包括：

（1） 采用低水化热水泥和掺合料。

（2） 优化配合比设计，控制骨料质量和含泥量及水灰比，混凝土表面做好二次抹平压实工序。

（3） 采取对板基层压光或增加滑动层等降低结构边缘约束措施。

（4） 就结构本身而言，针对其相应薄弱部位及应力集中部位要采取有效的加强措施；外露结构表面应

增加细而密的温度筋网片；水平施工缝适当增加插筋。

4 大体积混凝土养护和温度监控

4.1 大体积混凝土温度监控

（1）大体积混凝土温度控制参数：

混凝土内表温度之差不得超过 25℃，混凝土温度骤降不得超过 10℃，内表温差达 23℃时就发警报。

（2）测温点布置：

四面墙板、墙板超厚部分 5 处，在其中部沿高度方向各取 1 处，分别在距混凝土表面 10cm 及结构中间部位布置 2 个测温点，共计 10 个测温点。

顶板：大体积顶板 3 处，在其中部沿高度方向取 2 处，分别在距混凝土表面以下 10cm 及结构中间部位布置 2 个测温点，共计 6 个测温点。

外环境：在墙板与顶板加厚部分中心部位，离混凝土表面以外 10cm 处各布置一处环境温度测点。

（3）测温工具的选用采用表盘式干式温度计与水银温度计。

测温线布置如图 1 所示：

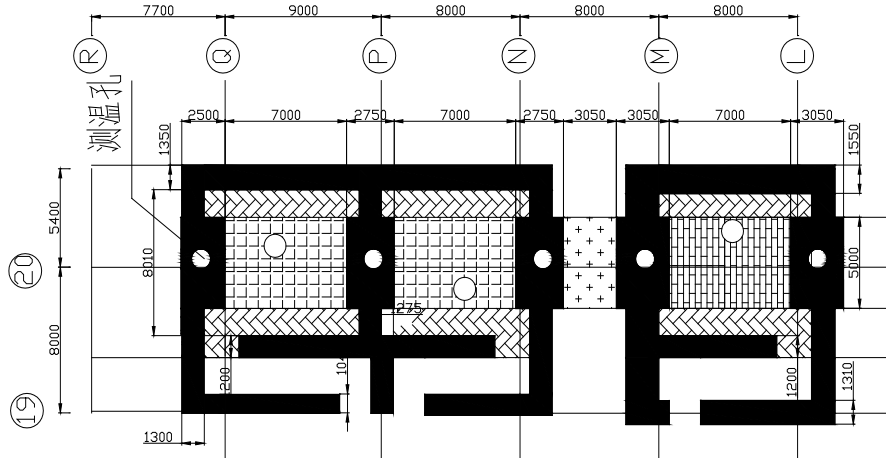


图 1 测温点平面布置图

4.2 大体积混凝土保温与养护

在混凝土浇筑完成 2h 后，拆除障碍的钢管，用塑料薄膜全面封闭，外围用棉毯缠裹，然后再用塑料薄膜全面封闭，并加强测温。如外界和内部的温差大于 25℃时，再用以上方法重复处理。

当混凝土内部与表面温度之差不超过 25℃，且混凝土表面与环境温度之差也不超过 10℃时，逐层拆除保温层，当混凝土内部与环境温度之差接近内部与表面温差控制值时，则全部撤掉保温层，再进行正常洒水养护至 14d。混凝土在浇筑后 3d 为水化热高峰期，温度在 60℃左右，时下最低气温接近 20℃，需要减少温差 15℃。顶板混凝土，在其上面覆盖一层塑料布和棉毯，必要时保温层进行重复处理，其间应做好测温记录。下道工序开始前由混凝土施工班组组织撤离，集中堆放看管。

为了确定水化热温度应力对防辐射结构的影响程度，验证确定的裂缝控制计算是否正确，尤其是确保结构使用安全性。在混凝土浇捣时，采用在混凝土体内不同部位及深度预埋测温孔的办法，用温度计进行测量。发现偏差立即采取有效处理措施纠偏，直至达到预定控制范围。养护完成后，测温孔采用压密注浆封堵密实。

5 结论和建议

（1）大体积混凝土结构的抗裂性要求除了做好混凝土材料的配合比设计与相关材料的选择外，施工期间的抗裂性验算是保证最终裂缝控制的重要手段。

（2）对于防辐射混凝土结构的抗裂性，在施工过程中有更加严格的施工控制措施和程序，做好施工过程中的养护与温度监测是必需的。除了监测厚度大的部位外，结构转角部位也应引起重视。

（3）在施工过程中，建议混凝土浇捣后，采用在混凝土体内不同部位及深度预埋测温孔的办法，可用温度计直接进行测量。发现偏差立即采取有效处理措施纠偏，直至达到预定控制范围。

REFERENCES

[1] Deng Daping, Lu Feng, Zhu Jianguo, et al. Radiological protection evaluation of occupational hazards of construction project specifications 2nd part: radiation therapy devices (GBZ/T 220.2-2009). People's medical publishing house. 2009, 10: 1-20

[2] Yang Haiyou, Yu Shui. NCRP No.151 reports in evaluating MV medical linear accelerators application of environmental radiation levels around the room. Chinese Journal of Radiological Health. 2011, Vol.20(2): 146-149

[3] Wang Fei. Structural design for the radiation protection of occupational disease hospital. Industrial Construction. 2014, Vol.44(S): 206-210

[4] Fei Wang. Design and Construction of Large Volume Concrete for Radiation Protection Structure. Civil Engineering and Technology. 2014, Vol.3(4): 62-67

[5] People's Republic of China Ministry of construction. GB50496-2009. Construction technology of large volume concrete standard [s]. Beijing: China planning press, 2009

[6] Cai Wei Lingi, Yan Gangwen, Wang Niannian, et al. Harmful cracks control of mass concrete construction technology of complete sets of studies. Construction technology.2014, Vol.43(9): 60-68

[7] Wei Shengxin, Wang Qiang. Study on Super large-volume bearing platform concrete performance and temperature control technology. Concrete. 2014 (1): 127-131

[8] Wang Qiang, Xia Fei, Liu Taiqian, et al. Analysis of temperature field during construction of large-volume high-strength concrete. Journal of Shenyang University of Technology, 2014, Vol.36 (7): 453-458

[9] Xie Jifeng, Jia Fujie, Xu Ning, et al. Crack control of extra long wall temperature of the underground garage. Expansive Agents & Expansive Concrete. 2014(2): 26-29

[10] Gong Jian, Li Hongwe. Crack Control of Mass Concrete Construction. Construction Technology. 2012, Vol.41(361): 28-32

【作者简介】



王斐（1979 -），女，汉族，硕士，工程师，建筑工程项目管理，同济大学建筑工程硕士毕业。

Email: wangfei197908@126.com