

DOI: 10.7672/sjgs2025070106

CAP1000 超长筏基“三合一”技术研究及应用*

董卫红,徐 威,刘优生,薛 仟,张 涛
(中国核工业第二建设有限公司,湖北 武汉 430050)

[摘要] 基于三门二期核电项目,结合 CAP 堆型特点首次提出超长筏基“三合一”技术,设计 CR10 下部临时支撑系统,实现以支撑系统为受力主体进行 CR10 整体浇筑前提前就位,筏基与外基础 A 层一体浇筑,取消中心十六边形凹槽,减小应力集中。实践表明,采用该技术可显著提高工程质量、改善项目施工环境、减少人力投入、加快施工进度,同时采用无线测量装置能保证测量精度。对温度和应变监测数据分析发现,“三合一”技术可以有效减少甚至消除混凝土的有害裂缝,进一步证明了该技术可大大提高大体积混凝土基础筏板无缝整体浇筑施工质量。

[关键词] 核电站;筏基;混凝土;应变;监测

[中图分类号] TU753

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)07-0106-06

Research and Application of “Three-in-one” Technology of Ultra-long Raft Base in CAP1000

DONG Weihong, XU Wei, LIU Yousheng, XUE Qian, ZHANG Tao

(China Nuclear Industry 22nd Construction Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430050, China)

Abstract: Based on the Sanmen Nuclear Power Plant Project (Phase II) in Zhejiang Province and combined with the characteristics of CAP reactor type, the “three-in-one” technology of super-long raft foundation is proposed for the first time. And the temporary support system under CR10 was designed to realize the pre-positioning of CR10 integral pouring with the support system as the main body of force. The raft foundation and the outer foundation A-layer were poured together, and the central hexagon groove was cancelled to reduce the stress concentration. The practice shows that this technology can significantly improve the project quality, improve the project construction environment, reduce the manpower input, and speed up the construction progress. Meanwhile, the use of wireless measurement devices can ensure the measurement accuracy. Through the analysis of temperature and strain monitoring data, it is found that the “three-in-one” technology can effectively reduce or even eliminate the harmful cracks in concrete, which further proves that this technology can greatly improve the construction quality of seamless pouring of mass concrete foundation raft.

Keywords: nuclear power plant; raft base; concrete; strain; monitoring

0 引言

核电作为一种高效稳定的新型清洁能源^[1-3],已成为新型能源开发的重点,其中 AP 堆型因安全性能高、设计简化、结构模块化等优点被我国引进,然而其结构复杂、施工工艺及逻辑关系交叉性大,

如果按照传统方法施工将给组织部署、技术方案、进度控制、施工工艺流程、施工方法带来巨大的未知风险^[4],为此学者们提出在施工过程中可通过优化施工逻辑进行控制。陈晶晶等^[5]以海阳核电一号核岛安全壳厂房为研究对象,从纵、横两个方向阐明了安全壳厂房内部构造及施工逻辑关系;何锦等^[6]分析了 AP1000 核岛屏蔽厂房与人员闸门的关系、现场施工中存在的主要问题及施工需求现状,通过设置预留段及技术优化方法来解决屏蔽厂房与人员闸门之间交叉施工的影响问题;兰学文等^[7]通过对 AP1000 钢制安全壳施工实施过程中存在的

* 中国核工业第二建设有限公司科研课题;CAP1000 堆型混凝土质量提升

[作者简介] 董卫红,副总工程师,高级工程师, E-mail: dongwh@cni22.com.cn

[通信作者] 刘优生,总工程师,高级工程师, E-mail: lysheng321@163.com

[收稿日期] 2024-09-20

问题和经验进行分析总结,从安装优化和吊装安全角度明确指出钢制安全壳筒体应采用“4-2-2-3”的分段形式;李子朋^[8]研究了 AP1000 核岛项目中贯穿件安装对内部关键路径上土建施工的影响,结果表明施工前应在拼装区完成部分贯穿件开孔、安装加强板和套筒可有效缩短关键路径工期;刘国星等^[9]采用有限元模拟研究了早强混凝土和普通混凝土的水化热温度场差异性以及普通混凝土相比于早强混凝土到达温度峰值时间滞后性的一般规律;胡立飞等^[10]分析了配合比、入模温度、环境温度等参数对拱座大体积混凝土温度场及应力的影响;何骏炜等^[11]以宁波曼哈顿大厦塔楼项目为例,采用有限元模拟软件研究了不同厚度对大体积混凝土的温度变化规律,阐述了应根据结构厚度、环境温度、中心温度等多因素施加不同的保温措施。

综上所述,虽然学者们对大体积混凝土水化热及在 AP1000 堆型施工逻辑中关于钢制安全壳内部施工方面取得了丰硕成果,但关于筏基底板土建与钢结构施工逻辑关系以及具有不规则、多截面的大体积混凝土温度场、应力场尚未涉及。因此,在原有研究的基础上,以三门核电二期 4 号机组核岛底板为研究背景,详细叙述 CAP1000 超长筏基“三合一”技术原理,并对采用此技术后一次成型大体积混凝土的温度与应变变化规律进行研究分析,以期为类似工程建设提供借鉴。

1 工程概况

浙江三门二期 4 号核岛筏基为反应堆厂房和辅助厂房的底板连成一体钢筋混凝土筏基,反应堆厂房基础三面嵌入辅助厂房中,其平面形状为多边形与半圆形的组合,基础最长为 78.031m,最宽处为 49.073m,最窄处为 27.737m。本工程采用“三合一”技术,即设置临时支撑系统,CR10 模块提前吊装,将底板与外基础 A 层合并浇筑,取消以反应堆圆心为中心的正十六边形区域,将竖向施工缝设置在以反应堆为圆心、半径为 9.4m 处,混凝土浇筑厚度为 1.688~3.049m(见图 1)。混凝土采用 C35P8,配合比编号为 NI-001D,骨料最大粒径 37.5mm,坍落度为 150±40mm(现场使用坍落度≤180mm),浇筑总量为 5 824.5m³。

2 核岛底板方案比选及施工重难点

2.1 核岛底板方案比选(见表 1)

2.2 “三合一”技术施工难点

- 1)筏基与外基础 A 层的钢筋施工逻辑复杂。
- 2)CR10 模块提前就位需设计临时支撑系统以及吊装,对现场施工组织要求高。

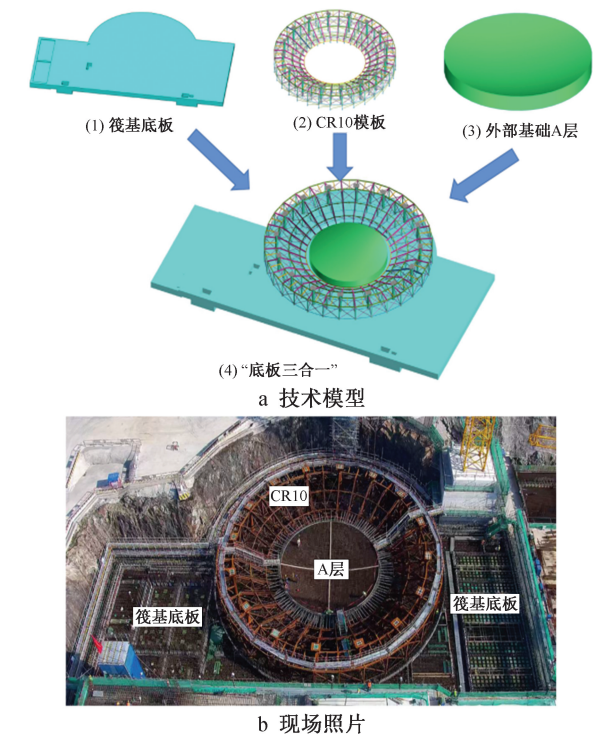


图 1 筏基“三合一”技术模型及现场照片
Fig. 1 Model and site plan of the “three-in-one” raft foundation technology

表 1 传统技术与“三合一”技术对比
Table 1 Comparison of traditional technology and “three in one” technology

传统技术	“三合一”技术	“三合一”技术 优点分析
正十六边形区域以反应堆圆心为中心	取消了反应堆圆心为中心的凹陷正十六边形区域	减少了应力集中区域,降低裂缝产生可能性
CR10 模块待筏基浇筑并养护后再吊装	通过在垫层上设置临时支撑系统,筏基浇筑前 CR10 安装到位,同时部分管道提前引入	CR10 模块及部分管道可提前引入,缩短工期
A 层主筋未设置套筒	伸出 A 层主筋套筒设置在混凝土外侧 300mm 处	减少钢筋绑扎量,便于混凝土下料
外基础 A 层与筏基分两次浇筑,中间存在施工缝	外基础 A 层与筏基一体化浇筑	减少 A 层凿毛量,节约成本

- 3)由于外基础 A 层存在吊模,支模难度大。
- 4)筏基平面尺寸大、形状不规则,底板厚 1.83m,最厚处可达 3.049m,由于混凝土较高的流动性,坡度可达 1 : 8,物项密集,振捣难度大,并且外基础 A 层表面存在不规则坡度,浇筑难度大。
- 5)筏基平面尺寸大、厚度较小、形状复杂,变截面处容易引起应力集中,CR10 提前吊装形成热传导通路,增加了大体积混凝土温度控制的难度。

3 筏基底板施工技术

3.1 钢筋施工

筏基与外基础 A 层钢筋一并绑扎,取消核岛底板与外部基础 A 层之间纵横向布置的施工缝钢筋,除外部基础 A 层以外底板施工缝径向钢筋保护层厚度均为 75mm,径向钢筋采用 $\phi 25@1.5^\circ$ 布置,环向钢筋采用 $\phi 25@305$ 布置,施工缝钢筋布置范围延伸至 A 层内部距底板底面 2m 处。外部施工缝侧边、A 层与底板反应堆范围内表面设置 $\phi 14@150\times 150$ 的抗裂钢筋。

3.2 CR10 模块临时支撑系统支设及吊装

临时支撑系统的柱支撑采用 Q355B 的 H 型钢柱、槽钢拼装组合钢柱两种类型,钢柱沿轴线居中布置,柱间支撑采用断续焊接的双肢槽钢。临时支撑上部通过垫板与 CR10 模块的钢柱底板焊接,临时支撑下部与下底板混凝土连接,每个钢柱下都对应 1 个临时支撑钢柱。

临时支撑柱依次按照图纸位置进行吊装,就位后钢柱上部垫板依图纸标高测量调节,标高允许偏差按负公差控制,调节完成后在钢柱底部打入膨胀螺栓。

现场在临时支撑上部垫板位置弹出中心线后进行 CR10 模块安装。依次完成 CR10 单元件吊装就位,单元件初步就位后在圆管柱顶部放出螺栓孔定位十字线对单元件进行精调,精调完成将单元件固定,相邻单元件完成安装后进行补档构件安装(钢梁、柱间支撑、拉杆),至所有补档构件安装完成连接成整体。CR10 模块安装流程如图 2 所示。

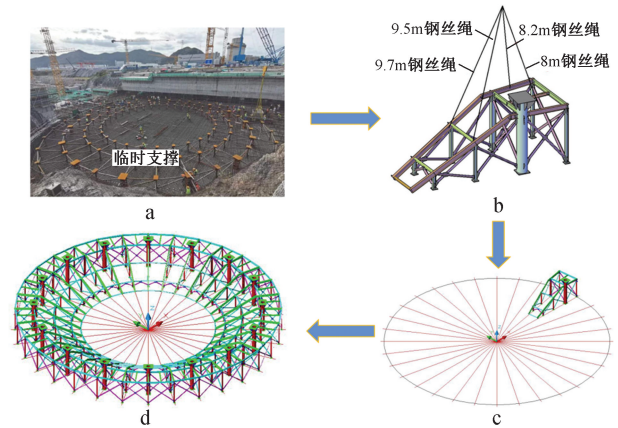


图 2 CR10 模块安装流程

Fig. 2 Installation process of CR10 module

3.3 模板施工

“三合一”技术与传统技术主要区别是底板与外基础 A 层合并浇筑。外基础 A 层支模如图 3 所示,采用吊模支设方式,即采用免拆模板,最大优势

在于施工方便、免凿毛,为上层施工创造有利条件。外基础 A 层模板高为 1 220mm,外侧采用金属模板+环向钢筋支设,金属模板整体性较强,环向钢筋仅为了限制金属模板的位移,横楞采用单根环向 $\phi 16$ 钢筋共 5 道,中间焊接长度不小于 $10d$ (单面焊接)或 $5d$ (双面焊接),环向钢筋外侧为竖向 $50\text{mm}\times 100\text{mm}$ 木枋,木枋外侧用钢管顶住,木枋及钢管水平间距 0.4m ,钢管一端与环向钢筋顶紧,一端与 CR10 模块支架顶紧,水平夹角 $\leq 45^\circ$ 。

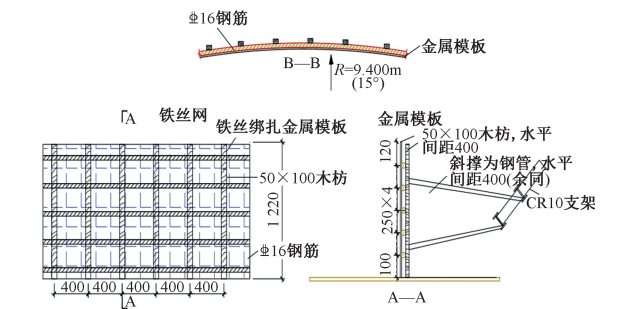


图 3 模板支设方式

Fig. 3 Formwork support method

3.4 混凝土施工

为保证筏基底板混凝土刚度大、无接缝、防渗好,本工程采取斜面分层、一个坡度、循序推进、一次成型的连续浇筑方式,混凝土分层厚度约 300mm,流淌坡度按 1 : 8 左右控制,并且保证前后层混凝土浇筑时间间隔不超过混凝土初凝时间。布料点纵横方向间距控制在 2~2.5m,混凝土自由倾落高度不得超过 3m。整体分为 3 个阶段(见图 4),各阶段均采用 4 台泵车(3 台 63m,1 台 73m)同时依次由①轴向⑪轴浇筑以保障浇筑连续性。

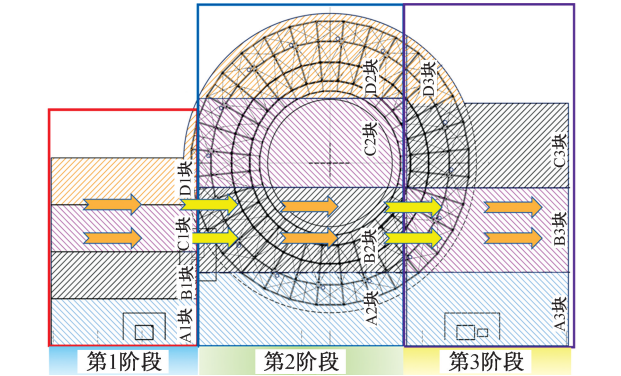


图 4 浇筑顺序

Fig. 4 Pouring sequence

为有效防止突变天气和外部恶劣环境温度对底板的影响,混凝土浇筑完成后搭设保温防雨棚。支撑材料为脚手架钢管,所有立杆在底部、中部和顶部用纵横水平钢管连接形成整体,以增强结构的

整体抗风能力,保温棚上部主龙骨上环向布置木枋作为次龙骨,便于固定防雨油布布设。

混凝土上表面采取覆盖养护法,垂直表面采取带模养护法。混凝土表面保持湿润→1 层地薄膜→1 层湿润土工布(浇水润湿)→1 层塑料薄膜→5 层土工布,并在外侧墙体插筋上缠绕 1 圈塑料薄膜,CR10 斜撑及 CR10 柱脚处用土工布缠绕密实,初始高度为柱上 2m 位置,A 层侧面、转角区域应尽早覆盖保温层并保证覆盖严实,导墙插筋用塑料薄膜包裹,防止温度通过热传导散失,同时为保证养护水的温度不低于混凝土表面温度,设置 2 个热水器用于养护用水加热。

3.5 温度与应变监测

为掌握底板混凝土温度场和应力场分布规律,从而及时指导现场养护工作,本工程基于精确理论仿真计算^[12],结合传统技术施工的筏基大体积混凝土浇筑监测经验,各部位测点沿厚度区域分 3 层布置,外基础 A 层高于 2.5m 的区域测点沿厚度方向分 5 层布置。上下测点均位于距混凝土表面 5cm 处,中间测温点位于混凝土底板厚度的中心处,保温层中温度测点位于混凝土表面和土工布之间,空气中温度测点位于混凝土表面以上 1.5m 左右,共计 91 个,应变传感器沿距混凝土上表面 4cm 处进行布置,共布置 11 个应变变点,具体布置如图 5 所示。

由于温度测点较多,限于篇幅,选取 W3, W4, W8, W10, W11 和 W23 不同厚度典型测点进行分析,温度曲线如图 6 所示。

由图 6 温度曲线可知,养护期间筏基混凝土经历上升-下降两个阶段,在升温阶段表现为同养护龄期下混凝土中心区域温度峰值比上、下部区域温度

峰值高,且峰值随筏基混凝土厚度增大而增大,其中厚度为 3.094m 的 W23 测点为温升最大点,从上到下 5 层混凝土温度峰值分别达到 50.5, 63.6, 68.1, 62.2, 48.0℃,入模温度为 18.7℃,最大温升值分别为 31.8, 44.9, 49.4, 43.5, 29.3℃;当养护龄期到达第 3~4 天后,筏基混凝土进入降温阶段,温度曲线基本呈现出下部温度曲线最先与上部温度曲线相交,其次是中心温度曲线,分析认为中层、上层平均降温速率基本一致,下层降温速率较小,相比其他测点, W3 测点上、中、下部位的降温速率最大,这是由于 W3 测点位于筏基边缘位置,最容易受到外界环境的影响加速热量散失,但在及时采取合理措施后,综合降温速率减小,在混凝土硬化阶段综合降温速率基本维持在 2℃/d 的范围内,满足规范要求^[13]。

应变随着养护龄期的增长变化曲线如图 7 所示。图 7a 为混凝土在不受结构约束下的自身应变,由图 7a 可以看出,在升温阶段零应力装置内混凝土自由膨胀高于自身收缩而表现出明显的拉应变,当经过升温峰值进入降温阶段后,在温降和收缩的共同作用下,应变曲线逐渐下降至平缓^[14];图 7b 为混凝土在受结构约束和自身应变组合值,由图 7b 应变曲线分析可知,混凝土表面应变受大气环境的影响较大,尤其后期降温阶段应变曲线表现出随气温波动显著。除 M6 应变测点,底板混凝土各测点均存在拉应变和压应变,混凝土在升温过程中呈现受压趋势,最大压应变为 158μ ϵ ;除 M3 应变测点,受拉区域应变基本都在 160μ ϵ 之内,在降温过程中,压应变减小,逐渐向受拉方向发展,前期发展较快,后期呈现出平缓趋势。由于 M3 应变测点靠近养护棚进出口并且位于边缘区域,后期降温阶段里表温差

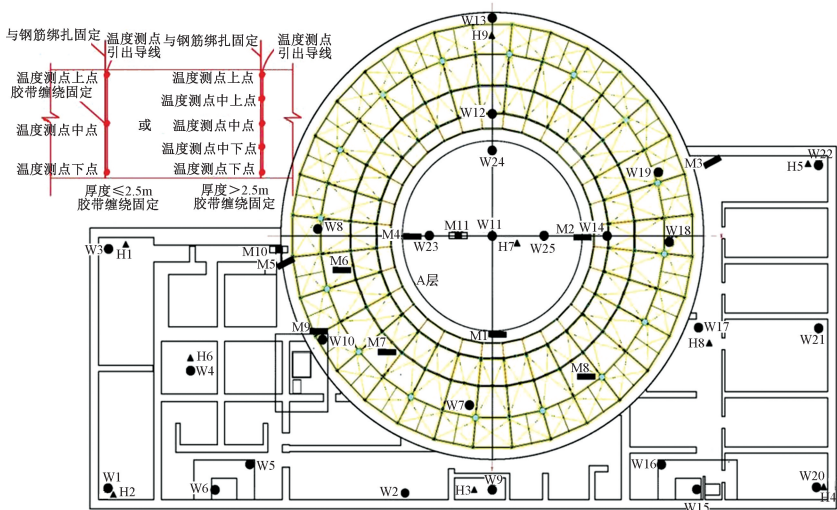


图 5 温度与应变测点布置

Fig. 5 Temperature and strain point arrangement

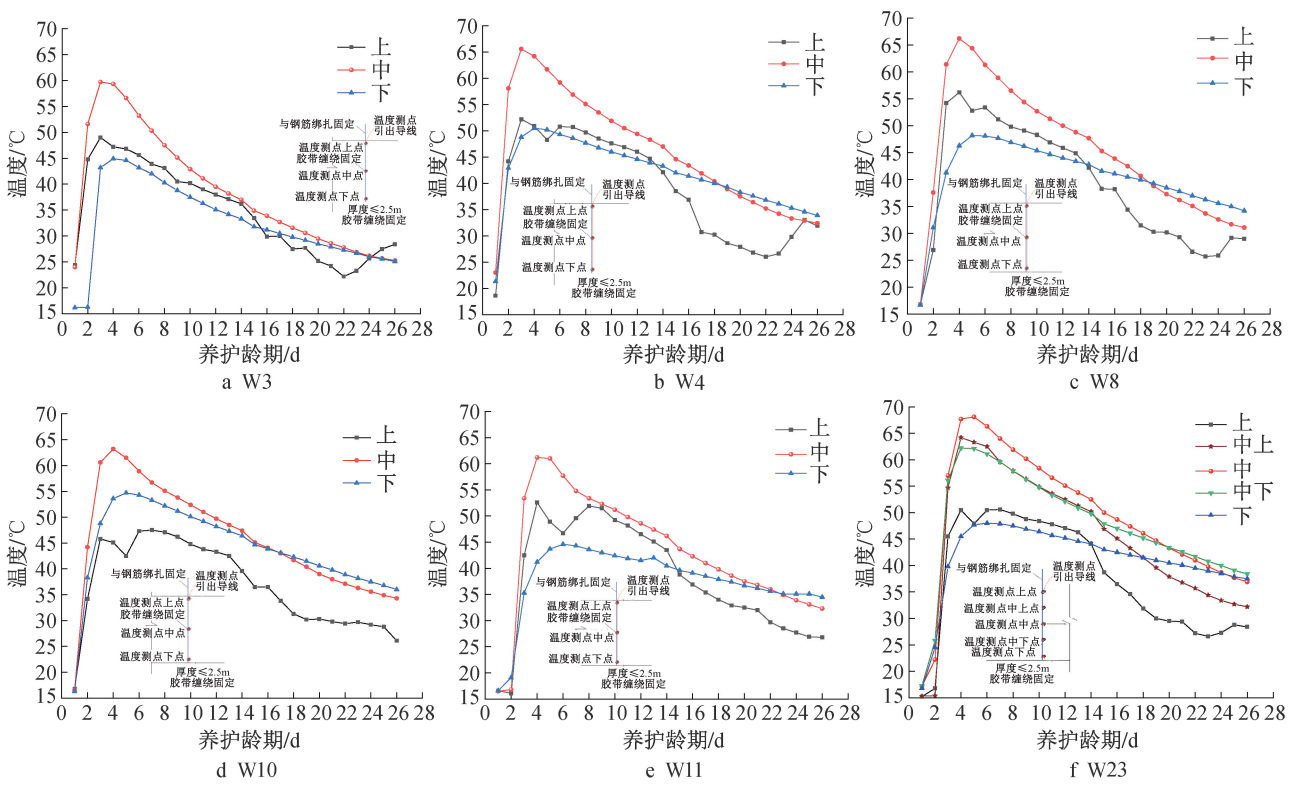


图 6 温度演化曲线

Fig. 6 Temperature evolution curve

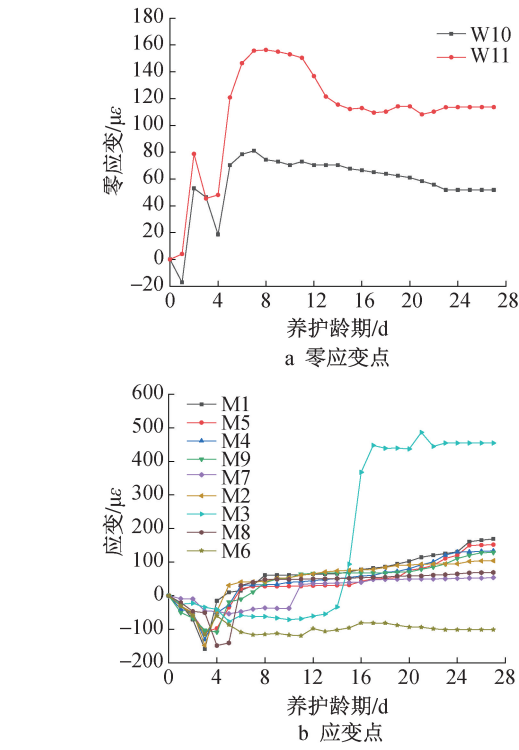


图 7 应变-养护龄期曲线

Fig. 7 Strain-conservation age curve

难以控制,导致拉应力较大,养护龄期 27d 拉应变最大为 454.7 $\mu\epsilon$ 。一般研究成果认为混凝土的收缩主要集中在混凝土终凝后的最初数日,因此前期保温

保湿养护尤为重要。但从本工程实测的表面收缩应变曲线可以看出,降温阶段混凝土的表面收缩明显增加,可见散热最快的区域产生不利应力越大,混凝土出现表面裂缝的机会将大大增加^[15]。

3.6 技术经济效益分析

本技术实现 CR10 模块安装、底板与外部基础 A 层同时施工,合理利用操作面,取消中心区域十六边形凹槽,减小应力集中,并减少了 CR10 模块底部一次灌浆跟外基础 A 层凿毛的施工成本工期,已成功应用于三门核电二期工程。同传统技术相比,可节约施工关键路径工期约 39d,节约直接工程成本 35 万元左右,产生了良好的社会效益和经济效益。

4 结语

CAP1000 超长筏基“三合一”技术创新提出将 CR10 拼装完提前就位,与底板、外基础 A 层一体化浇筑,解决了传统技术工期长、工程质量难保证等难题。本文通过结合三门核电二期 4 号机组核岛底板工程实际,从钢筋工程、CR10 模块临时支撑系统支设及吊装、模板工程、混凝土工程、温度与应变监测等施工具体做法进行详细叙述,可为类似工程提供参考。

参考文献:

[1] 李伟强. 清洁高效核电保障我国能源安全和“双碳”目标的实现[J]. 中国能源, 2022, 44(11): 42-48.

LI W Q. Clean and efficient nuclear power ensures the realization of China's energy security and carbon peaking and carbon neutrality targets[J]. Energy of China,2022,44(11) :42-48.

[2] 荆春宁,高力,马佳鹏,等. “碳达峰、碳中和” 背景下能源发展趋势与核能定位研判[J]. 核科学与工程, 2022, 42(1) : 1-9.

JING C N, GAO L, MA J P, et al. Study and judgment on energy developing trend and nuclear energy positioning under the background of “carbon peaking and carbon neutrality” [J]. Nuclear science and engineering, 2022, 42(1) : 1-9.

[3] ORHAN M F, DINCER I, ROSEN M A, et al. Integrated hydrogen production options based on renewable and nuclear energy sources [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2012, 16(8) : 6059-6082.

[4] 王飞. CAP1400 核电站示范工程常规岛大体积混凝土施工技术[J]. 施工技术, 2016, 45(S1) : 561-564.

WANG F. CAP1400 Nuclear Power Plant Demonstration Project CI mass concrete construction technology [J]. Construction technology, 2016, 45(S1) : 561-564.

[5] 陈晶晶,张加军,孙克彬,等. AP1000 核电站安全壳厂房建造施工逻辑分析[J]. 施工技术, 2014, 43(21) : 36-39.

CHEN J J, ZHANG J J, SUN K B, et al. Construction logic analysis to construction of containment building in AP1000 nuclear power station [J]. Construction technology, 2014, 43(21) : 36-39.

[6] 何锦,蔡松,刘向荣. AP1000 核岛屏蔽厂房与人员闸门施工逻辑研究[J]. 施工技术, 2013, 42(S2) : 393-395.

HE J, CAI S, LIU X R. Research on construction logic of shield plant and personnel gate in AP1000 nuclear island [J]. Construction technology, 2013, 42(S2) : 393-395.

[7] 兰学文,周少丽. AP1000 钢制安全壳施工技术优化分析[J]. 中国核电, 2016, 9(2) : 151-155.

LAN X W, ZHOU S L. Study on the optimization of the AP1000 containment vessel construction technology [J]. China nuclear power, 2016, 9(2) : 151-155.

[8] 李子朋. AP1000 安全壳贯穿件安装逻辑和进度优化研究 [J]. 项目管理技术, 2014, 12(6) : 93-95.

LI Z P. Research on the installation logic and schedule optimisation of AP1000 containment penetration [J]. Project management technology, 2014, 12(6) : 93-95.

[9] 刘国星,黄永辉,汪洋. 桥墩大体积混凝土水化热试验研究及数值模拟[J]. 混凝土与水泥制品, 2018(9) : 94-97.

LIU G X, HUANG Y H, WAN Y. Experimental study and numerical simulation of heat of hydration of bridge pier mass concrete[J]. Concrete and cement products, 2018(9) : 94-97.

[10] 胡立飞,辛景舟,张兰,等. 拱座大体积混凝土水化热及温控措施[J]. 中国科技论文, 2023, 18(2) : 152-157.

HU L F, XIN J Z, ZHANG L, et al. Heat of hydration and temperature control measures of mass concrete for arch base[J]. China science paper, 2023, 18(2) : 152-157.

[11] 何骏炜,黄政哲,谢旻杲,等. 不同厚度大体积混凝土底板温度控制分析及施工[J]. 建筑施工, 2023, 45(11) : 2355-2358.

HE J W, HUANG Z Z, XIE M G, et al. Temperature control analysis and construction of mass concrete floor with different thickness[J]. Building construction, 2023, 45(11) : 2355-2358.

[12] 董事尔,刘杨,侯立群,等. 某核电站 1 号核岛底板大体积混凝土养护与测温技术[J]. 施工技术, 2011, 40(14) : 98-101.

DONG S E, LIU Y, HOU L Q, et al. Mass concrete curing and temperature measurement technology of No. 1 nuclear island floor slab of a nuclear power plant[J]. Construction technology, 2011, 40(14) : 98-101.

[13] 邓晓阳,赵平,张冰冰. 基于动态设计养护法的核电站大体积混凝土裂缝控制研究[J]. 施工技术, 2013, 42(18) : 54-57.

DENG X Y, ZHAO P, ZHANG B B. Research on crack control of mass concrete in nuclear power plants based on dynamic design curing method [J]. Construction technology, 2013, 42(18) : 54-57.

[14] LI L, DABARERA A, DAO V. Evaluation of zero-stress temperature and cracking temperature of high performance concrete at early ages[J]. Materials and structures, 2022, 55(7) : 181.

[15] ZHONG A C, SOFI M, LUMANTARNA E, et al. Effects a simplified numerical model for temperature profiles of early age concrete[J]. Magazine of concrete research, 2023.

(上接第 87 页)

[5] 龚靖渝,楼雨京,柳奉奇,等. 三维场景点云理解与重建技术[J]. 中国图象图形学报, 2023, 28(6) : 1741-1766.

GONG J Y, LOU Y J, LIU F Q, et al. 3D scene point cloud understanding and reconstruction technology [J]. Chinese journal of image and graphics, 2023, 28(6) : 1741-1766.

[6] ZHANG J, SINGH S. LOAM: lidar odometry and mapping in real-time[C]. Robotics: Science and Systems Conference, 2014.

[7] 李晓亮,李海鹏,张筠卓. 地面三维激光扫描数据多站配准方法[J]. 北京测绘, 2023, 37(5) : 676-682.

LI X L, LI H P, ZHANG Y Z. Multi-station registration method for ground 3D laser scanning data[J]. Beijing surveying and mapping, 2023, 37(5) : 676-682.

[8] 王少钦,姜耀,鲁宇明. 基于 Inventor 的零件三维建模研究 [J]. 技术与市场, 2020, 27(9) : 51-52.

WANG S Q, JIANG Y, LU Y M. Research on 3D modeling of parts based on inventor[J]. Technology and market, 2020, 27(9) : 51-52.

[9] 张伟,汤发树. 三维激光扫描技术在盾构隧道钢结构安装测量中的应用[J]. 测绘通报, 2018(S1) : 75-78.

ZHANG W, TANG F S. Application of 3D laser scanning technology in steel structure installation of shield tunnel [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2018(S1) : 75-78.

[10] 王珊,王春阳. 基于特征点匹配的三维点云配准算法[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(12) : 23-28.

WANG S, WANG C Y. 3D point cloud registration algorithm based on feature point matching [J]. Foreign electronic measurement technology, 2020, 39(12) : 23-28.

[11] 贺磊,蔡乾广,许诚权,等. 地铁盾构断面椭圆度检测及数据分析研究[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(3) : 104-107, 118.

HE L, CAI Q G, XU C Q, et al. Research on ovality detection and data analysis of metro shield section [J]. Urban rapid transit, 2021, 34(3) : 104-107, 118.