

引用格式 侯佑胜,张兴斌,张家臻,等. 核电站大体积混凝土基础裂缝控制理论与方法[J]. 工业建筑,2025,55(1):182-187. HOU Y S, ZHANG X B, ZHANG J Z, et al. Crack Control Theory and Methods of the Mass Concrete Foundation in Nuclear Power Plants [J]. Industrial Construction, 2025, 55(1): 182-187 (in Chinese). DOI:10.3724/j.gjzG24041001

核电站大体积混凝土基础裂缝控制理论与方法

侯佑胜¹ 张兴斌² 张家臻³ 冯长中² 庄艺斌²

(1. 广西防城港核电有限公司, 广西防城港 538000; 2. 中国建筑科学研究院有限公司, 北京 100011;
3. 纽约市哥伦比亚大学, 纽约 10027)

摘 要 核电站反应堆筏板基础为大体积钢筋混凝土, 面积大、厚度高、混凝土强度等级高、水泥用量大、施工期间绝热温升高, 如何在施工期间采取措施避免裂缝出现、有效进行裂缝控制是反应堆筏板基础施工的重中之重。施工期间混凝土内部应力主要为温度、水化收缩及约束产生的综合应力。温度应力公式显示温度场主要沿着半径方向变化, 最大温度应力处总是位于筏板边缘环向, 与温度值、半径无关, 而试验数据显示收缩应力为中心位置受拉、边缘位置受压, 与温度应力相反。在此基础上, 提出了“动态养护法”裂缝控制技术, 通过不断改变表面覆盖层的保温措施来改变温度分布, 进而用温度变形中和抵消收缩变形, 再以弹性变形装置监测总变形, 依据第三破坏准则来控制裂缝, 控制内部总应力在一定范围内。动态养护的裂缝控制方法安全、有效、经济、便捷, 目前已在数十个核电基础施工中得到成功应用, 大大缩短了基础施工时间。

关键词 安全壳; 大体积混凝土; 动态养护; 温度应力; 收缩应力; 水化收缩

Crack Control Theory and Methods of the Mass Concrete Foundation in Nuclear Power Plants

HOU Yousheng¹ ZHANG Xingbin² ZHANG Jiazhen³ FENG Changzhong² ZHUANG Yibin²

(1. Guangxi Fangchenggang Nuclear Power Co., Ltd., Fangchenggang 538000, China; 2. China Academy of Building Research, Beijing 100011, China; 3. Columbia University in the City of New York, New York 10027, America)

Abstract: The mass reinforced concrete in the raft foundation of nuclear power plant reactors has the characteristics of large area, large thickness, high strength, large cement dosage, and increased adiabatic temperature during construction, so the measures to prevent and control cracks are the top priorities. The internal stress is mainly the comprehensive stress caused by temperatures, hydration shrinkage and its constraints during construction. The temperature stress formula shows that the temperature field mainly varies along the radial direction, maximum temperature stress is horizontally hooped at the raft edge, independent of the temperature values and radius. Experimental data showed that the shrinkage stress was tensioned at the center and compressed at the edges, as opposed to the temperature stress. Based on this, the dynamic curing method was proposed, the temperature distribution was changed by continuously changing the insulation measures of the surface covering, and then the temperature deformation was used to neutralize the shrinkage deformation, the total deformation was tested by the elastic deformation device, and the cracks were controlled according to the third failure criterion, thus, and the total internal stress was controlled within a certain range. The crack control method is safe, economical, effective and low investment, and has been successfully applied in dozens of nuclear power foundation construction, which greatly shortens the foundation construction time.

Keywords: containment; mass concrete; dynamic curing; temperature stress; shrinkage stress; hydration shrinkage

第一作者: 侯佑胜, 高级工程师, 主要从事核电厂施工及建造领域研究, Re-zhang@126.com。

通信作者: 张兴斌, 教授级高级工程师, 主要从事工程结构检测及施工领域研究, zhang13801065055@126.com。

收稿日期: 2024-04-10

在设计上,核电站反应堆舱室的基础往往是一块比较大的钢筋混凝土筏板基础,厚度 4 m 左右,平面为圆形,半径在 20~28 m 之间。作为核电站反应堆设备的基础,其混凝土强度等级一般为 55 MPa 以上,采用的胶粘材料总量在 400 kg 以上,要求浇筑后的混凝土具有较高的质量和强度,并需严格控制裂缝。因此核电站基础具有面积大、厚度高、混凝土强度等级高、水泥用量大、施工期间温升高等特点^[1]。我国核电选址从南到北,地理跨度大,环境复杂。为了避免裂缝的产生,早期施工时都是对基础进行分层分块浇筑,降低混凝土的绝热温升,控制温度应力,进而控制裂缝。典型的施工方法有“跳仓法”等。4 m 厚的基础往往分成 4 层,每层再分成 5 块。同时采取了多种养护办法,如在混凝土上表面温水养护,搭设大棚等。即便如此,还是会不可避免地出现一些超出允许范围的裂缝。产生裂缝后,需对裂缝进行修补,也面临修补方法科学性的问题。分层分段浇筑、裂缝修复,占用了核电建造关键路径上大量的时间,延时长度最长达 8 个月,极大地制约了核电工程的施工建设周期。核电站基础裂缝控制在国际核电界也是一大技术难题,由于基础施工问题,延长了建造进度,对业主和行业造成了很大的困扰。因此研究核电站大体积混凝土基础裂缝控制技术是核电行业的迫切需求。

课题组从 2007 年开始研究核电站大体积混凝土裂缝控制^[2-4],提出了温度作为活荷载从而中和收缩的裂缝控制理论方法,并研究了裂缝控制的专项技术^[5-6],发明了“动态养护法”的混凝土施工方法^[7]。该方法目前已在我国数十座核电站基础施工中得到广泛应用,基本上杜绝了出现裂缝的现象。

1 大体积混凝土温度应力理论分析

我国早期核电站基础混凝土以及现在主流的机型华龙一号都是采用平面为圆形的大体积混凝土筏板基础,厚度约 4 m,因此筏板基础呈圆柱状。浇筑完成后混凝土产生裂缝的原因,一般认为是混凝土在浇筑过程中产生温度应力、化学反应产生的收缩应力,以及约束应力^[8-9]。混凝土在浇筑过程中产生的主要应力如图 1 所示。

混凝土在养护过程中,温度应力和收缩应力是各自独立发展的,但其作用效果却是一起显现的。为了研究温度应力和收缩应力,设计图 2 所示的装置:一个圆柱形钢管,一端封闭,内壁周围是 3 mm

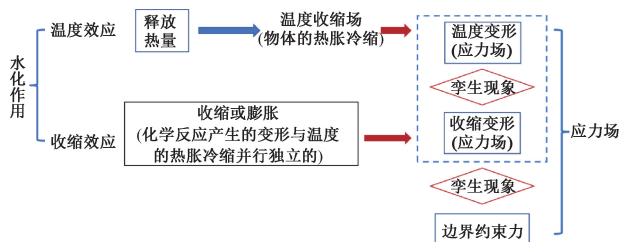


图 1 混凝土浇筑后形成的作用

Fig. 1 The effects of concrete after pouring

厚的软泡沫,一端开口,圆筒中间纵向安置一个应变传感器,用来测试混凝土的自由变形。

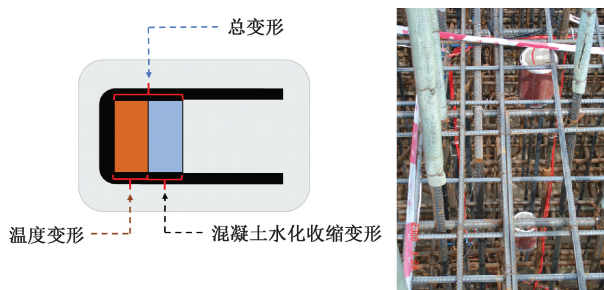


图 2 混凝土固化过程中温度变形、水化收缩变形测试装置

Fig. 2 Temperature deformation and the test device for hydration shrinkage deformation of concrete during solidification

从测量结果看,混凝土在固化过程中温度变形、化学收缩效果明显。由于相对初始温度高,温度变形为正,混凝土的水化变形表现为收缩,收缩变形为负。混凝土的收缩并不是自由的,会受到相邻混凝土的约束,并产生约束力。故混凝土内部的应力主要就是温度、水化收缩及其约束产生的综合应力^[10-11]。

1.1 温度应力

混凝土在水化过程中释放的热量,形成了混凝土内部的温度场,由于外表面的散热,一般造成混凝土内部温度高,表面温度低,因此会产生温度应力,表现为混凝土内部受压,表面受拉。混凝土固化过程中,其力学性能也在发生复杂的变化,表现为强度不断升高,弹性模量不断变大,且混凝土内部不同区域这些参数也不相同,精确描述其温度应力极其复杂。但由于温度与弹性模量和热膨胀系数的线性关系,可以采用简化计算的方式分析温度场与温度应力的规律。图 3 是核电站圆柱状大体积混凝土基础示意,由于混凝土下表面位于天然基岩上,上表面各处一般采取相同的养护措施,如用绝热效果好的材料保护,此时温度在厚度方向上基本一致,温度场主要沿着半径方向变化,可采用柱坐标来描述温度场。

此时与混凝土距离中心位置为 r 的单元,其环向应力 σ_r 、径向应力 σ_t ,如式(1)所示。

$$\sigma_r = \gamma E \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right) \quad (1a)$$

$$\sigma_t = \gamma E \left(-T + \frac{1}{R^2} \int_0^R T r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right) \quad (1b)$$

式中: T 为基础筏板温度场; R 为基础筏板半径; r 为体积单元与中心位置的距离; σ_r 为 r 处的环向应力; σ_t 为 r 处的径向应力; E 为弹性模量; γ 为混凝土热膨胀系数。

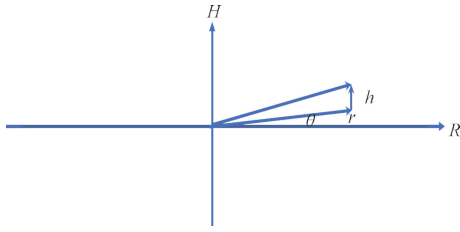


图3 核电站大体积混凝土基础温度分布

Fig. 3 Temperature distribution of the mass concrete foundation in nuclear power plants

温度应力用式(1)表达后,需进一步求解温度函数。温度函数与浇筑时间、顺序、养护环境、表面环境等因素密切相关,虽然这些因素较难量化,无法得到精确的温度函数 T ,但可以判断出温度在厚度方向上基本一致,温度场主要沿着半径方向变化。假定温度沿半径方向线性分布,可以根据式(1)得到环向应力、径向应力式如(2)所示。

$$\sigma_r = -\gamma E (T_0 - T_R) \frac{(R^2 - r^2)}{4R^2} \quad (2a)$$

$$\sigma_t = -\gamma E (T_0 - T_R) \frac{(R^2 - 3r^2)}{4R^2} \quad (2b)$$

式中: T_R 为边缘温度; T_0 为中心温度。

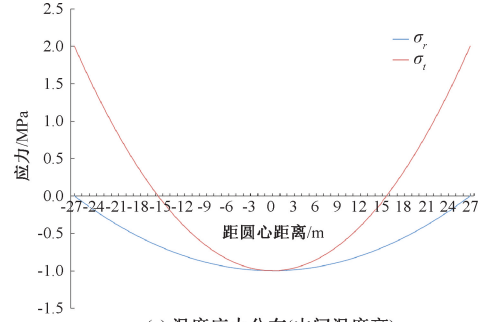
根据式(2),可以得到核电站基础大体积混凝土温度应力的以下特点:

1) 径向应力 σ_r 始终是负的,表示混凝土直径方向始终受压,也表示混凝土不会出现环向裂缝。

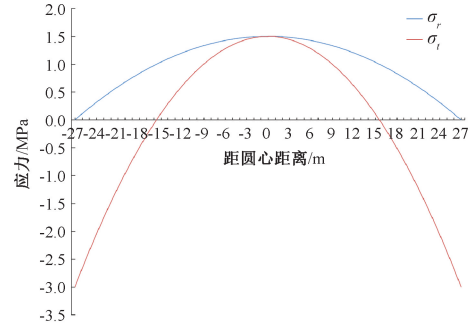
2) 环向应力 σ_t 有正有负,内部环向受压,外部环向受拉,正负应力分界点 r 如式(3)所示。表明裂缝一般只会出现在边缘径向和侧面竖向。应力分布如图4所示。

$$r = \sqrt{3}/3R = 0.577R \quad (3)$$

最大温度应力在边缘水平环向,其应力大小只与温度差有关,既与温度值大小无关,也与半径无关,这一点为混凝土的养护提供了基本的理论支撑。



(a) 温度应力分布(中间温度高)



(b) 温度应力分布(中间温度低)

图4 温度应力分布

Fig. 4 Temperature stress distribution

温度应力与温度差有关,同时与弹性模量、热膨胀系数有关,但混凝土凝固期间的弹性模量、热膨胀系数较难定量,因此也很难得到确切的温度应力。但式(2)显示了核电站基础固化过程中温度应力的基本规律,可以为养护措施提供理论支撑。

1.2 收缩应力

混凝土的收缩比温度更难掌握,不同的配合比、材料选择、不同的温度都可能造成收缩的不一样。到目前为止还无法定量地描述大体积混凝土收缩,但可以用当量温差的概念来描述收缩效应。如果内部收缩大,边缘收缩小,则收缩应力如图5(a)所示;如果内部收缩小,边缘收缩大,则收缩应力如图5(b)所示。

收缩效应无法定量计算,但可以使用图2的装置对实际工程进行定量测量。图6是多座核电站大体积基础收缩的实测数据,基本规律是前7天收缩较大,7天后收缩明显放缓。

测到准确的混凝土收缩变形量,就可为后期混凝土动态养护提供关键指导。从图6可以看出,混凝土总体是收缩的,但不同部位的收缩是不同的,基本规律是混凝土中间部位收缩量大,边缘、表面位置收缩小。因此收缩应力的特点是:混凝土中心位置受拉、边缘位置受压,这与温度应力刚好相反。混凝土

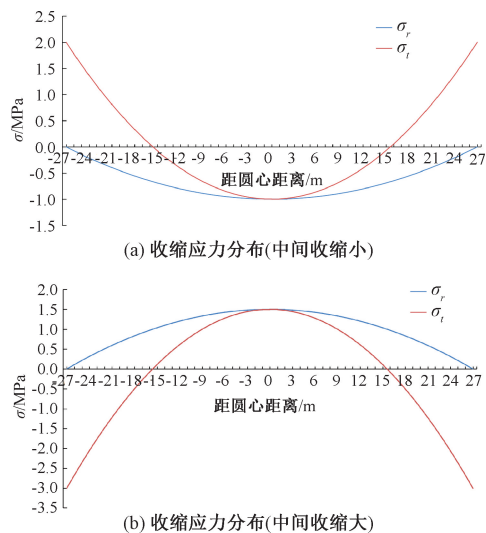


图 5 混凝土收缩应力的特点

Fig. 5 Shrinkage stress characteristics of concrete

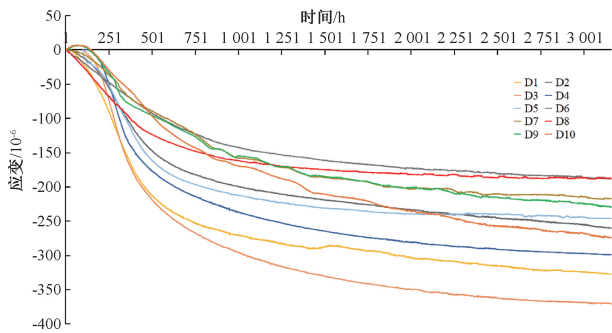


图 6 核电站基础混凝土收缩变形实测数据

Fig. 6 Measured data of the shrinkage deformation of the concrete in nuclear power plant foundations

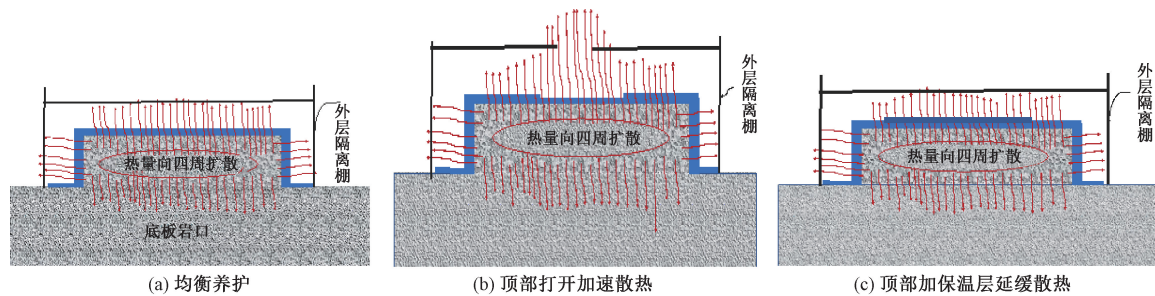


图 7 混凝土的动态养护法原理

Fig. 7 The principle of dynamic curing method for concrete

图 7 (b) 是放热过程,此时上表面中间保温层打开一部分,最外界隔离层也做一个开口,热量可从上面中间快速散发;图 7 (c) 是阻热过程,通过增加上表面保温层,可以阻止热量散发。通过动态养护操作,混凝土内部的温度应变(变形)可以实现从图 8 (a) 向图 8 (b) 的转变。

土这一收缩特征对控制混凝土裂缝有利,即在混凝土固化过程中温度应力和收缩应力如相互抵消,则可以大大减少混凝土产生裂缝的机会。

2 大体积混凝土裂缝控制方法

控制大体积混凝土裂缝的关键在于如何控制混凝土内部的总应力。如前所述,混凝土在固化过程中,分别产生了温度应力和收缩应力,混凝土的内部应力主要是这两种应力的叠加,混凝土裂缝取决于这两种力共同作用的结果。混凝土的温度应力可根据混凝土配合比等边界条件计算,收缩应力则与混凝土配合比、养护条件、外界环境等动态因素相关,因此可以通过调节外部边界条件来改变混凝土的内部应力,从而控制裂缝。

基于以上理论基础,提出大体积混凝土施工的“动态养护法”:通过改变边界条件来改变温度应力,采用动态养护的方法来调节混凝土的温度场,用温度变形来中和抵消收缩变形,从而使得混凝土内部总应力控制在一定范围内,避免裂缝的产生。此方法需要图 2 所示的装置测量混凝土总的变形,以及一套养护装置调节表面覆盖层,通过不断地改变混凝土表面的保温措施来调节温度应力分布。

图 7 显示了动态养护的基本原理。在图 7 (a) 中,混凝土四周被保温层覆盖,外面再搭设一个帆布大棚。这样的养护措施可以方便地动态调节混凝土内部的温度场,从而便捷地调整混凝土内部的总变形。

利用图 2 的装置监测混凝土的收缩量,同时图 2 中的装置也可以测得混凝土总的弹性变形。此时总的弹性应变是温度与收缩的综合,一旦总的变形大于相关值,就可以通过动态养护法,调节温度应力(图 8),与图 5 中的收缩应力相互抵消,如图 8 (a) 是可以与图 5 (a) 相互抵消的,从而控制住总的弹性

变形,防止裂缝的产生。

采用图2装置测到的应变是总的弹性变形,因此可以依据第三破坏准则来控制裂缝,即依据弹性变形数据来控制裂缝,此弹性变形可以取 120×10^{-6} 左右为限,弹性变形小于此值时,混凝土不会断裂。图8为核电站施工现场实际监测数据,图8(a)是裂缝在传感器附近,此时传感器读数下降,意味着传感器拉应变突然释放;图8(b)是裂缝刚好横穿在传感器上,此时传感器变形突然变大,二者显示裂缝产生时的微应变基本以 120×10^{-6} 左右为限。

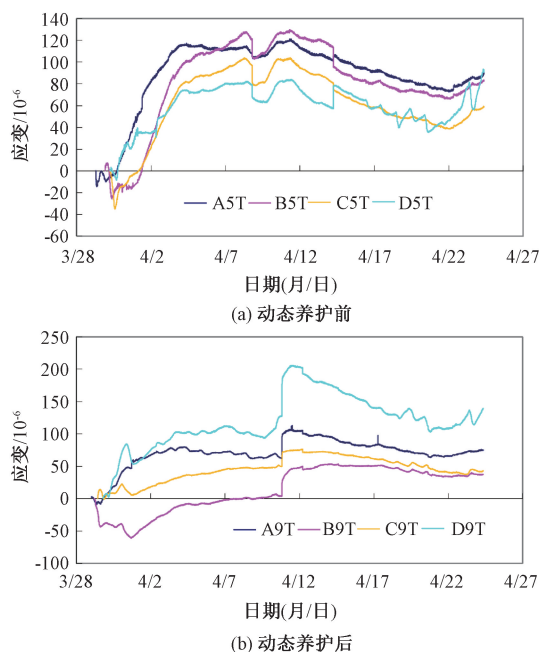


图8 红沿河 $2R \times 3$ m 厚混凝土侧面某点环向应变曲线

Fig.8 The circumferential strain curves of some measuring points on the side of $2R \times 3$ m thick concrete at Hongyanhe

动态养护法可以方便地调节温度应力,进而控制总的应力,防止裂缝产生,是一种非常实用有效且可靠的方法。该方法在国内所有的 M310 改进堆、华龙一号堆、世界最大的核电堆型 EPR 中都已得到了很好的验证。图9是一个核电站施工现场大体积混凝土的养护现场,通过动态养护,有效地调节了混凝土温度应力,进而有效地控制了总应力,避免了裂缝的出现。目前为止,该方法已经在数十个核电站基础施工中得到成功应用,均未出现超限裂缝。

3 结束语

我国地域辽阔,核电站的选址从南到北,地理跨度大,核电站施工所面临的环境条件、材料供货都十



图9 动态养护棚

Fig.9 Dynamic curing shed

分复杂,且核电站的基础又是整个核电土建工程的重点之一,如何保障施工期间的混凝土施工质量,控制住施工期间不出现超限裂缝,探索安全、有效、经济、便捷的裂缝控制技术路线,是迫切的现实需求,也是核电站安全建造和运营的重要保障。本文系统地研究了核电站大体积混凝土在施工过程中的内力体系,分析了裂缝出现的原理,并在此基础上提出了一套完整的核电站大体积混凝土施工裂缝控制的技术路线:1)提出以温度应力中和收缩应力的理论设想。2)大体积混凝土的温度变形和收缩变形的不一致,使得混凝土内部出现约束应力。由于混凝土固化期间,材料特性不断变化,此时变形和应力不是线性关系,针对此问题,研制了测试混凝土固化期间弹性变形的装置。3)发明了动态养护法,可以便捷地调节混凝土内部温度应力,从而降低总的应力。

根据研究成果,也提出了大体积混凝土的养护措施:1)混凝土终凝后,应及时保温养护,以降低温度差,更重要的是快速提高混凝土强度,避免混凝土内外强度不一致。2)控制温度差可以混凝土终凝时间为起点,因为此时从流态向固态混凝土转变,温度差才会产生应力。3)混凝土在固化过程中,强度、弹性变形等基本参数一直在变化,无法得到准确数值,此时测到的数据是总的弹性变形,因此可以依据第三破坏准则来控制裂缝,即依据弹性变形数据来控制裂缝,此弹性变形数可以取 120×10^{-6} 左右为限。4)由于施工期间早期就开始保温,因此面临温度如何下降的问题,为此可在 7 d 左右开始采用动态养护的方式,根据监测数据,不断地打开上表面以及大棚中间开口,将热量通过此处不断地输送出去,因为上表面中间位置热量可以最快速散出,按照式(1),温度差在快速下降,温度应力也会变小,此时应关注收缩变形,要做到温度变形与收缩变形的总和可控。5)计算模拟阶段,根据天气情况设置大棚

外部天气的温度曲线,确定保温层散热的传热系数;工程阶段在大棚内部、大气中、混凝土和保温层之间设置若干温度传感器来实时监控各自的温度变化,并根据温度曲线调节保温措施。6)动态养护方法中监测是关键,在实际工程中会根据具体的工程情况设置温度测点,一般空气中布置 3 个点,大棚中布置 3 个点,保温层和混凝土接触面会布置 5 个点左右。

动态养护法操作简单,成本低廉,可以方便地控制施工期间混凝土的总变形量,进而控制混凝土的裂缝,是一种简单有效的控制大体积混凝土裂缝的技术手段。该方法截止目前已经在全国数十个核电站基础施工中得到成功应用,均未出现超限裂缝。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工标准: GB 50496—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [2] 王德桂, 张忠, 张心斌, 等. 滑动层对上部基础施工温应力的影响有限元分析及应变监测研究[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 8-10, 16.
- [3] 王勇, 张心斌, 程大业, 等. CPR1000 核电站基础大体积混凝土温度应力特性[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 11-13, 63.
- [4] 陈李华, 张心斌, 程大业, 等. 核电站基础大体积混凝土水化特性[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 14-16.
- [5] 陈李华, 张心斌, 陈爱勉, 等. 核电站基础大体积混凝土现场监控技术[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 14-16.
- [6] 顾海明, 程大业, 张心斌, 等. 高温高湿环境核电站核岛筏基整体浇筑温度应变监控[J]. 工业建筑, 2010, 40(1): 17-20.
- [7] ZHANG X B, RONG H, ZHANG Z, et al. Cracking control of mass concrete slab in nuclear power plant with dynamic curing[J]. ACI Materials Journal, 2022, 119(3): 39-52.
- [8] 李东, 刘洋, 李迺, 等. 跳仓法施工的超限筏板基础早期应力状态研究[J]. 建筑结构, 2021, 51(8): 132-138.
- [9] 彭臣. 房建工程大体积混凝土温度裂缝控制研究[J]. 哈尔滨商业大学学报, 2023, 39(1): 72-77.
- [10] 陈传勇, 康飞, 曾勇, 等. 特大桥承台大体积混凝土初期温度场研究[J]. 建筑技术, 2023, 54(3): 263-266.
- [11] 张平, 郑海康, 刘洋, 等. 温度匹配养护对大体积混凝土耐久性能的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023(2): 15-18.