

文章编号:1673-2049(2019)06-0064-08

# 梯度温差对防水板混凝土开裂机理的影响

李潘武<sup>1</sup>, 胡明峰<sup>1</sup>, 李伟<sup>1</sup>, 赵鹏<sup>2</sup>

(1. 长安大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710061; 2. 陕西省建筑科学研究院有限公司, 陕西 西安 710082)

**摘要:**基于混凝土浇筑时防水板内外温度差异导致的温度应力对早期裂缝开展的影响,研究了防水板混凝土在施工期的温度应力性能,结合实际工程,总结了当防水板内外温度差异变化时混凝土裂缝损伤的情况。为了深入研究防水板混凝土开裂机理,用ANSYS进行数值模拟,根据防水板主拉应力计算分析公式得到梯度温差下的应力和变形云图。基于ANSYS云图分析结果,研究了混凝土结构的变形趋势、温度应力演变及裂缝分布情况。结果表明:在该联合基础过渡区域混凝土抵抗应力能力较弱,在云图中该处裂缝最早产生,裂缝蔓延速度更快;防水板的第一应力值随着温差增大而增大,当浇筑温度越高时,混凝土结构所产生的温度应力越大;在进行防水板施工阶段混凝土浇筑时,大温差导致防水板的大变形,25℃左右为混凝土防水板结构开裂的临界温差。

**关键词:**防水板混凝土;梯度温差;温度应力;抗拉强度;裂缝

**中图分类号:**TU48 **文献标志码:**A

## Effect of Gradient Temperature Difference on Crack Mechanism of Waterproof Slab Concrete

LI Pan-wu<sup>1</sup>, HU Ming-feng<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1</sup>, ZHAO Peng<sup>2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, Shaanxi, China;

2. Shaanxi Architecture Science Research Institute Co., Ltd, Xi'an 710082, Shaanxi, China)

**Abstract:** Based on the influence of the temperature stress caused by the temperature difference between the inside and outside of the waterproof slab on the early crack development during the concrete pouring, the temperature stress performance of waterproof slab during construction period was studied. Combined with the actual project, when the temperature difference between the inside and outside of waterproof slab changed, the situation of concrete damage caused by cracks was summarized. In order to further study the crack mechanism of waterproof slab concrete, ANSYS numerical simulation was used to obtain the stress and deformation nephogram under the gradient temperature difference based on the calculation and analysis formula of the main tensile stress of waterproof slab. The ANSYS nephogram analysis results were adopted to study the deformation trend, temperature stress evolution and crack distribution of concrete structures. The results show that the resistance stress of concrete at the transition junction of the combined foundation is weak. In the nephogram, the first crack appears in this area and it spreads faster. The first stress value of waterproof slab increases with the increase of temperature difference. When the pouring temperature is higher, the temperature stress produced by concrete structure is higher. When concrete is poured in the construction stage of waterproof slab, the

收稿日期:2019-01-07

基金项目:国家自然科学基金项目(51579013)

作者简介:李潘武(1963-),男,陕西西安人,副教授,工学博士,E-mail:panwuli@chd.edu.cn。

large temperature difference will lead to large deformation of waterproof slab. The critical temperature difference of cracking in concrete waterproof slab structure is about 25 °C.

**Key words:** waterproof slab concrete; gradient temperature difference; temperature stress; tensile strength; crack

## 0 引言

城市化进程的加快使中国城市向多层、小高层、高层和地下建筑发展的趋势渐趋明显,伴随基础设施建设的迅速发展,出现了很多新型基础形式,其中就包括柱下独立基础联合防水板<sup>[1]</sup>。朱炳寅<sup>[2-4]</sup>结合工程实践,最先研究了这一新型基础形式的受力特征与设计重点,张洁<sup>[5]</sup>结合实际工程,提出了此新型基础形式设计时的常见问题并给出了建议,王军华<sup>[6]</sup>分析了独立基础加防水板的设计关键和受力特征,在计算独立基础加防水板的地基承载力时,郭劲<sup>[7]</sup>对于深度修正的取值问题进行了具体研究。苏柳明<sup>[8]</sup>介绍了几种常用类型及计算方法,同时对这些基础形式进行了对比分析。Mcnerney 等<sup>[9]</sup>介绍了防水板按构造要求设置软垫层的2种常用做法,并对其性能要求进行了分析,吴振河<sup>[10]</sup>具体梳理总结了在防水板下设聚苯板软垫层的施工方法。天津大学王大智<sup>[11]</sup>研究了防水板在设计时如何确定防水板的固端弯矩,以及弯矩对于防水板裂缝的影响情况,但在防水板混凝土浇筑时,对板内外温差影响裂缝的相关研究尚少。

本文针对防水板混凝土,从温控的角度出发,对实际工程进行模拟,研究浇筑时期温度和板内外梯度温差对防水板混凝土的影响,得到温差作用下的变形云图和裂缝分布图。从而模拟分析防水板结构内部温度应力和应力变化对于裂缝开展的作用效应,根据分析结果,找到混凝土防水板裂缝发展时的临界温差,进一步探讨削弱甚至避免防水板混凝土在浇筑早期开裂的推荐方案<sup>[12-13]</sup>。

## 1 防水板联合基础设计

### 1.1 独立基础连同防水板构造

在设有防水板的基础中,当荷载自上而下传递时,荷载的承担不会经由防水板。对于该结构的设计,重点是使地基反力仅仅存在于独立基础之下。通过收集实际工程案例,在多方论证研讨后,为使独立基础与防水板以结合体形式呈现,在防水板下设置具备高压缩性能的材料<sup>[14]</sup>,即可从性质上使独立基础与防水板下地基差异明显,如图1所示。

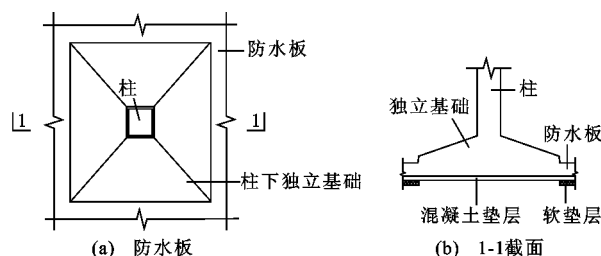


图1 换填材料后的防水板

Fig. 1 Waterproof Slab After Material Replacement

### 1.2 防水板内部结构理论计算及应力求取

防水板结构的几何模型可以参照防水板的中间平面形状,因为板在发生弯曲变形之前同中间平面法线是互相垂直的。在计算防水板变形时,对于横向剪力导致的位移变形可不予考虑<sup>[15]</sup>。在防水板结构计算时,采用的应力与挠度关系式如下

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right) \\ \sigma_y &= -\frac{Ez}{1-\mu^2} \left( \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \right) \\ \tau_{xy} &= \tau_{yx} = -\frac{Ez}{1+\mu} \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: $\omega$ 为挠度; $x, y$ 为水平向坐标, $z$ 为竖向坐标; $E$ 为弹性模量; $\mu$ 为泊松比; $\sigma_x$ 为 $x$ 向正应力; $\sigma_y$ 为 $y$ 向正应力; $\tau_{xy}, \tau_{yx}$ 均为剪应力。

同时,在对防水板面的挠度求解时,经过静力平衡后,挠度的微分方程为

$$D \left( \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \omega}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \omega}{\partial y^4} \right) = q(x, y) - p(x, y) \quad (2)$$

$$D = \frac{Et_e^3}{12(1-\mu^2)} \quad (3)$$

式中: $q(x, y), p(x, y)$ 分别为防水板面荷载、防水板板底反力集度; $D$ 为防水板截面的弯曲刚度; $t_e$ 为防水板弯曲刚度计算时截取的微元体除 $x, y$ 外的纵向边长。

## 2 防水板混凝土内部温度应力

浇筑完成防水板混凝土结构后,防水板内部水泥水化过程仍在不断进行,这一过程会有较多的水化热释放<sup>[16]</sup>。水泥水化出来的热量将会使防水板温度不断上升,升温后防水板将与外界进行热交换,防水板同周围环境温差开始减小,内外温差得到较

好的均衡<sup>[17-18]</sup>。热交换的主要途径有:热量通过防水板边界处持续地向外界耗散;防水板混凝土结构持续得到来自于太阳能或者别的外界热源能量补给。

由于热量交换对混凝土的水泥水化过程影响显著,会产生由于温度所导致的膨胀(收缩)变形。在防水板基础当中,因为四周及底部约束的存在,温度造成的变形将会被抑制。混凝土开裂变形则是由于内部出现拉应力,此时混凝土龄期的抗拉强度若不能抵抗该拉应力,由于温差而导致的混凝土损伤发生;若温差加剧,将导致混凝土损伤继续演化,出现开裂,损坏防水板混凝土<sup>[19-21]</sup>。探讨防水板混凝土结构由于板内外温差而导致裂缝出现的首要任务,是搞清楚防水板结构内分布的瞬间状态的温度场、板边界四周所受到的约束以及当温差有一定量值变化时出现的变形情形<sup>[22]</sup>。

采用主拉应力分析法对防水板温度应力进行计算。当有混凝土徐变存在时,将板所受到的温差分解成为连续的  $\Delta T_i$  区域,可设该区域包含  $n$  段,连续求解叠加  $n$  个  $\Delta T_i$  得出整个防水板的应力  $\sigma_{xman}^*$  为

$$\sigma_{xman}^* \sum_{i=1}^n \Delta \delta_i = -\frac{a}{1-\mu} \sum_{i=1}^n \left[ 1 - 1/\operatorname{ch}(\beta \frac{L}{2}) \right] \cdot \Delta T_i E_i(t) H_i(t, \tau_i) \quad (4)$$

式中: $\Delta \delta_i$  为水平应力变化值; $a$  为防水板混凝土导热系数; $\beta$  为混凝土材料表面放热系数; $L$  为防水板全长; $E_i(t)$  为第  $i$  段温差区域的弹性模量; $H_i(t, \tau_i)$  为应力松弛系数,由时间  $t$  和龄期  $\tau_i$  所确定。

3 ANSYS 有限元模拟

3.1 防水板数值模拟

防水板在进行数值模拟时,考虑到防水板的结构构造类似于双向板,四边角则支撑在独立基础上,支承方式如图 2 所示,其中  $l_x, l_y$  分别为防水板计算单元  $x$  向、 $y$  向长度,  $a_1, a_2$  分别为独立基础的长度和宽度。对防水板进行计算时采用不设置梁板的楼盖,楼盖双向板板带划分如图 3 所示。

3.2 计算模型

华北地区某在建工程建设场地位于中硬土地基上,设置有地下室车库的某一多层建筑裙房的设计构造为独立基础连同防水板,通过数值模拟研究防水板开裂机理,模型的相关设计参数为:弹性模量  $E$  取值为  $3 \times 10^{10}$  Pa,密度  $\rho$  取值为  $2\,400\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,泊松比  $\mu$  取值为  $0.2$ ,线膨胀系数  $\alpha = 1 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ,模型中的平均重度  $\gamma = 20\text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$ 。防水板的设

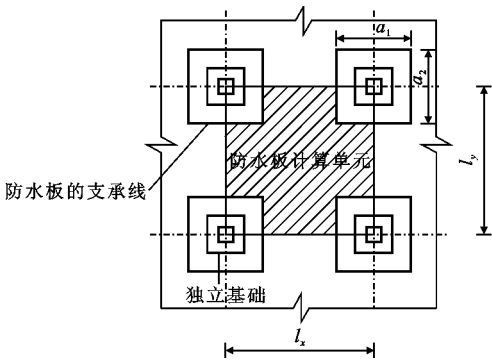


图 2 支承方式  
Fig. 2 Supporting Mode

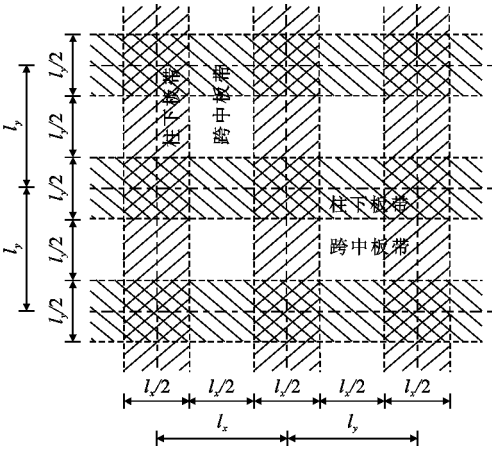


图 3 不设梁楼盖双向板板带划分  
Fig. 3 Division of Two-way Slab with No Girder

计尺寸为:上部柱截面尺寸为  $600\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ ,采用柱网尺寸  $6\text{ mm} \times 6\text{ mm}$ ,基础底面尺寸为  $3.6\text{ m} \times 3.6\text{ m}$ ;防水板厚度为  $300\text{ mm}$ ,所配钢筋为 HRB335 级,使用双层双向 B12@150 的钢筋配备方式;防水板下部设置软垫层,垫层采用材料为  $80\text{ mm}$  厚的聚苯板;模型中均使用 C30 强度等级的混凝土,防水板板底距离地下室地面高差为  $1.2\text{ m}$ ,数值计算模型如图 4 所示。在 ANSYS 有限元模型中对防水板的施加载荷面和约束方式如图 5 所示。

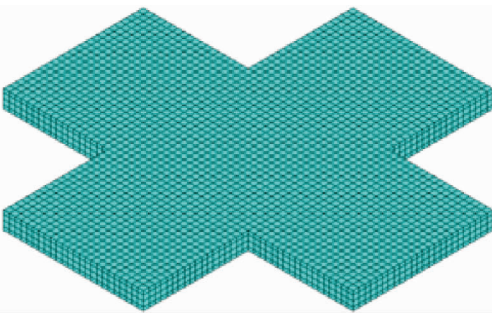


图 4 防水板数值模型  
Fig. 4 Numerical Model of Waterproof Slab

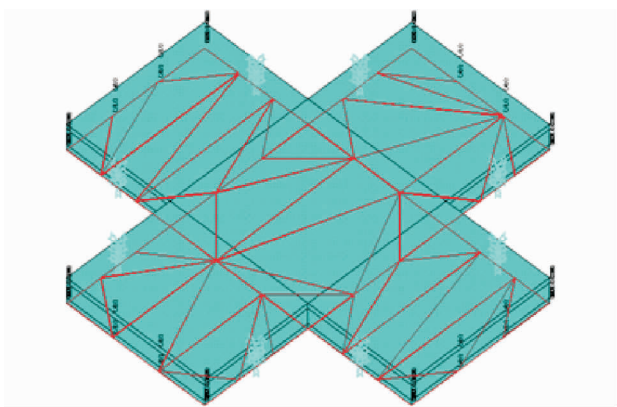


图 5 防水板施加荷载面和约束方式

Fig. 5 Loading Surface and Restraint Mode of Waterproof Slab

## 4 梯度温差对混凝土开裂机理的影响

### 4.1 混凝土浇筑时期温度应力分析

首先,明确防水板混凝土起始温度,指的是混凝土拌合原料在经过现场拌合、拌合料运输、振捣与平仓、浇筑铺筑层等工序后<sup>[23]</sup>,将新拌合的混凝土浇筑于旧混凝土上时,实测旧混凝土所具有的温度。为避免防水板混凝土的开裂,需要控制混凝土在浇筑时期具有合理温度,因为在防水板混凝土温度应力影响因素中较为突出的是浇筑温度,采用 ANSYS 软件模拟板两侧具备梯度温差条件时防水板混凝土温度应力变化,以期通过对温度应力的控制来研究防水板混凝土开裂机理。

当浇筑期温度改变时,对混凝土温度应力场进行探究。具体操作是:在控制其他因素不变的情况下,浇筑前采用一定的降温方案;接着进行 ANSYS 模拟,对于模拟结果云图进行整理分析,通过 ORIGIN 绘图软件得到在不同浇筑温度下混凝土温度随浇筑天数的变化。

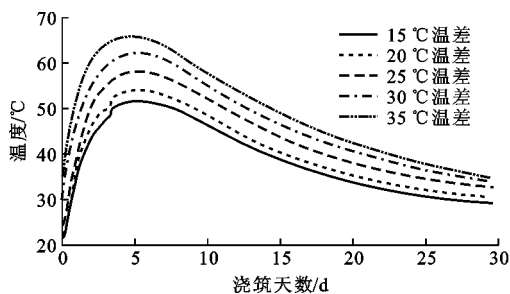


图 6 不同浇筑温度下混凝土温度随浇筑天数的变化

Fig. 6 Concrete Temperature Changing with Pouring Days Under Different Pouring Temperatures

从图 6 可知:对于 5 种浇筑温度,混凝土表面相

对应地具有了一定的温度;随着浇筑温度逐步升高,对应的混凝土表面温度也会有相应的升高<sup>[24]</sup>。在采用 15 °C 浇筑时,对应的混凝土峰值温度为 50.53 °C;在采用 35 °C 浇筑时,混凝土峰值温度为更高的 66.81 °C。浇筑结束后即进行混凝土的养护,此时混凝土水泥水化速度的合理控制对裂缝的开展情况至关重要。相对较高的温度会加速水化过程,当温度越高时混凝土温度到达峰值的时间也会相应提前,所以控制浇筑温度是对混凝土内部温度应力控制的有效途径。通过下面浇筑温度计算式来控制浇筑温度:

(1)混凝土在特定配合比下经搅拌机充分搅拌,从搅拌机中取出时的温度  $T_0$  的表达式为

$$T_0 = [(c_s + c_w q_s) W_s T_s + (c_g + c_w q_g) W_g T_g + c_c W_c T_c + c_w (W_w - q_s W_s - q_g W_g) T_w] / (c_s W_s + c_g W_g + c_c W_c + c_w W_w) \quad (5)$$

式中:  $c_w, c_g, c_s, c_c$  分别为水、石、砂、水泥的比热容;  $W_g, W_w, W_c, W_s$  分别为在每立方米混凝土中石、水、水泥、砂的质量;  $T_g, T_w, T_c, T_s$  分别为石、水、水泥、砂的温度;  $q_s, q_g$  分别为砂、石含水量。

基于混凝土所采用的配合比,砂、石的质量分别约为水泥质量的 3.5 倍与 4.5 倍,对于如何降低混凝土经拌合倾倒入模板时的温度,最有效的措施是使砂子和石子的温度减小,可采取隔绝与外部空间的热交换、覆盖或淋湿等措施。

(2)浇筑温度  $T_p$  的表达式为

$$T_p = T_1 + (T_a + R/\beta - T_1)(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (6)$$

$$\varphi_1 = k\tau$$

式中:  $T_1$  为进仓时温度;  $T_a$  为大气温度;  $R$  为辐射的太阳热;  $\varphi_1, \varphi_2$  分别为平仓前、后的温度系数;  $\tau$  为混凝土入仓至混凝土平仓中间阶段用时;  $k$  为经验系数。

由于混凝土在没有平仓时的情况较为特殊,所以混凝土拌合物温度量测应最好在施工过程中进行。系数的确定通常由现场测量得到,然而在现场实地量测材料不足的情况下,通常设  $k = 0.003 \text{ min}^{-1}$ 。通过  $T_p$  的计算公式可知,有效降低混凝土浇筑温度的办法是使出机口温度、入仓温度等值均不高。

### 4.2 梯度温差影响下防水板温度应力分析

使用数值模拟软件对施工阶段独立基础连同防水板基础整体浇注模拟,当防水板内外温差发生改变时,得到应力有限元模拟云图。在 ANSYS 模型中设置的梯度温差是从 15 °C 开始,每个梯度为 5



℃,包含 5 个温差梯度,最大温差为 35 ℃。在有限元模型中施加温度荷载,模拟防水板混凝土结构在整体浇筑时板内部的温度应力值、板变形的幅度及裂缝的发展趋势。在处理有限元模型时考虑防水板的边界条件,本模型中使防水板底面边界隔绝热源,

别的部位通过与空气对流而形成热对流边界。在设定边界条件下,混凝土结构受到梯度温差作用,可得到防水板板顶的第一主应力云图(图 7);通过第一主应力云图,绘制出第一主应力值随防水板温差变化的曲线(图 8)。

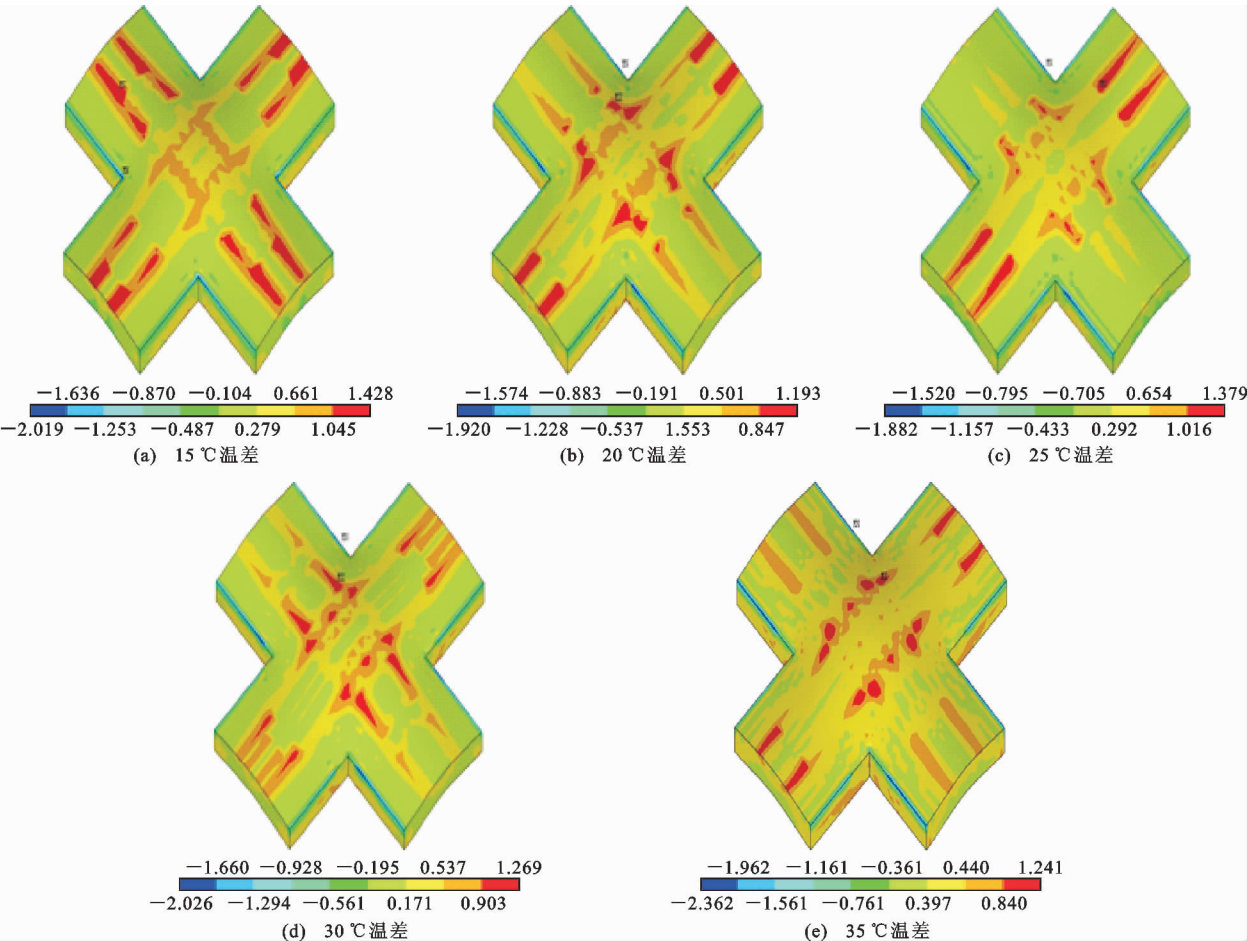


图 7 梯度温差下的第一主应力 ANSYS 云图(单位:MPa)

Fig. 7 ANSYS Nephogram of the First Main Stress Under Gradient Temperature Difference (Unit:MPa)

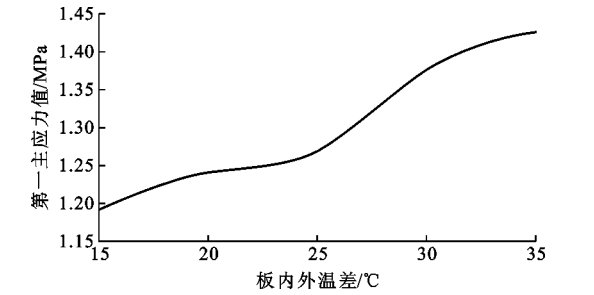


图 8 第一主应力值随防水板内外温差变化

Fig. 8 Changes of the First Main Stress Value with Temperature Differences Between Inside and Outside of Waterproof Slab

通过对比第一主应力云图,并结合图 8 可知,总体上防水板的第一主应力值随着温差增大而增大,当浇筑温度越高时,温度应力越大。防水板内外温

差在 15~25 ℃时,防水板内温度应力增长更趋于缓和。

4.3 温度梯度下防水板裂缝及总变形趋势分析

同样,利用 ANSYS 软件中的热结构耦合功能,将温度作为荷载施加到防水板混凝土结构上。选取温差变化时防水板混凝土结构的 X 向位移及总位移云图(图 9),分析作出在温差变化下的最大变形曲线(图 10)。由图 10 可知:当温度处于 15~25 ℃区间时最大变形值(DMX 值)受板内外温差影响的变化幅度并不大,板上温度应力的分布也较为均衡;在温差达到 25 ℃之后曲线的斜率递增,即此刻温差对 DMX 值影响加剧;在温差超过 30 ℃后,曲线斜率迅速增大,意味着此时温差影响尤为突出。进一步分析可知,防水板混凝土结构在整体浇筑时,温差

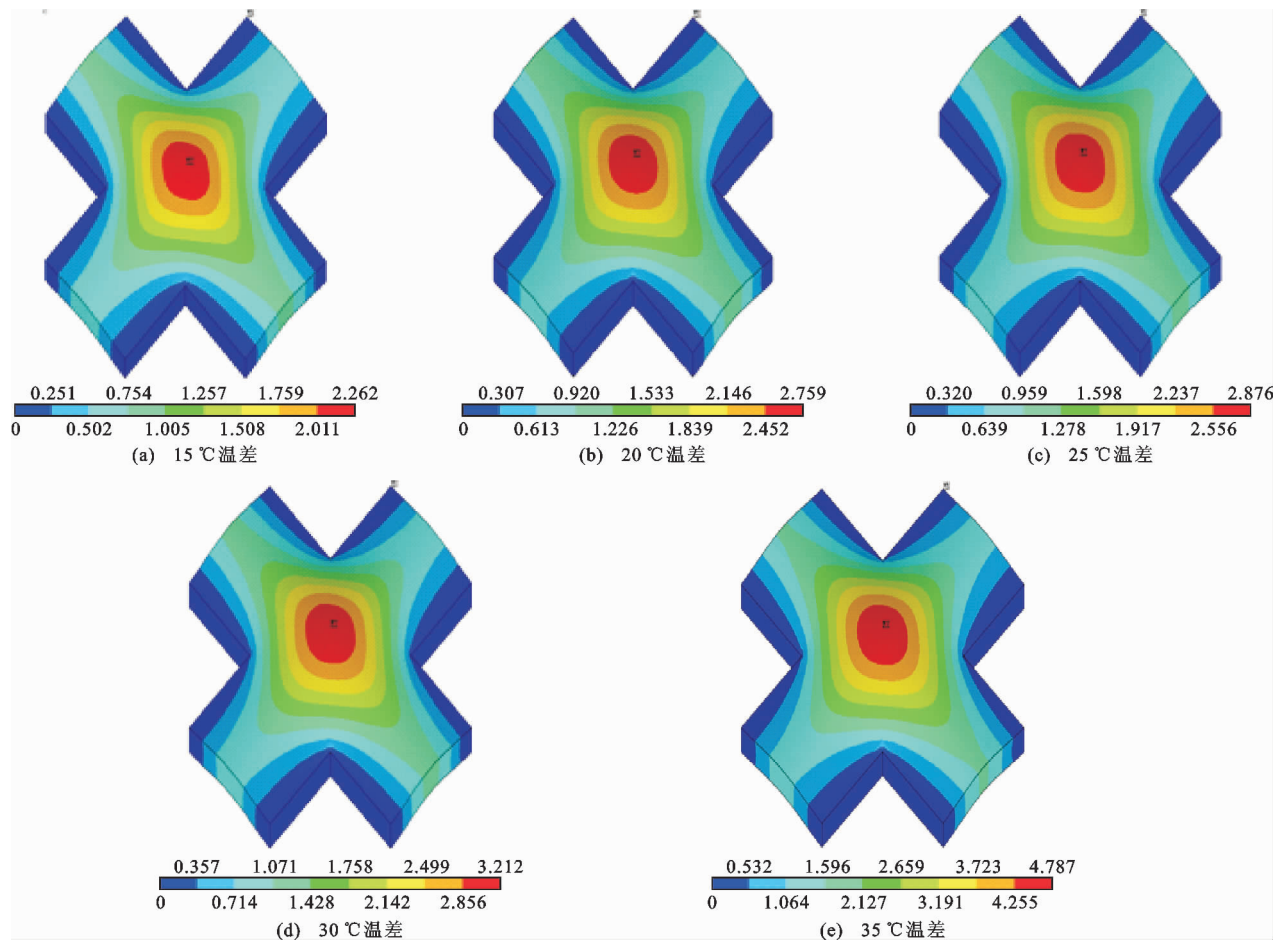


图 9 梯度温差下的位移变形云图(单位:mm)

Fig. 9 Nephogram of Displacement Deformation Under Gradient Temperature Difference (Unit:mm)

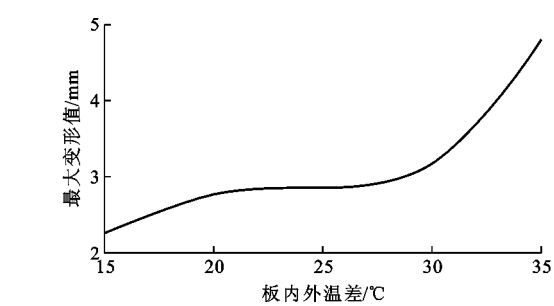


图 10 板内外温差变化下的 DMX 拟合曲线  
Fig. 10 DMX Fitting Curve of Temperature Difference  
Between Inside and Outside of Slab

与变形之间有正相关趋势,在低温差段和高温差段影响变形效应差别显著。由变形导致裂缝的开展趋势与变形同步。35 °C 温差下防水板裂缝的分布云图如图 11 所示。

基于变形图和 DMX 值拟合曲线可知,25 °C 左右是防水板变形增速加快而致使开裂的临界温差。为了避免防水板混凝土因出现大温差而开裂,推荐在进行浇筑时采用有效降低板内外温差的施工方案,避免或削弱防水板混凝土由于浇筑早期开裂而

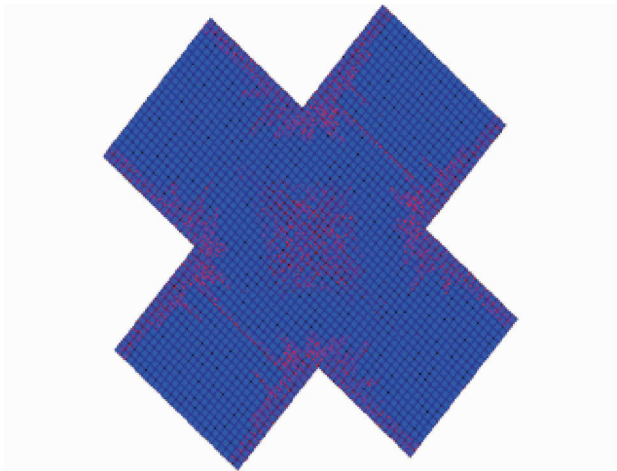


图 11 防水板混凝土裂缝 ANSYS 云图  
Fig. 11 ANSYS Nephogram of Concrete  
Crack of Waterproof Slab

对其正常使用产生影响。

5 结 语

(1)浇筑温度会影响混凝土表面温度,并且呈现出随浇筑温度的升高表面温度也升高的规律。在浇

筑完养护过程中,混凝土水泥水化速度的控制对裂缝的发展影响至关重要,并且相对较高的温度会加速水化过程;当温度越高时混凝土温度达到峰值的时间也会相应提前,此时可通过降低入仓温度或者出机口温度等来降低浇筑温度。

(2)防水板温度应力的的大小受温差大小和约束程度影响很大,裂缝会致使混凝土损伤,温度裂缝的发生是由抗拉强度是否能抵抗温度应力决定。总体上防水板的第一应力值随温差增大而增大,浇筑温度与温度应力值呈现正相关关系。防水板内外温差在 15~25℃时,防水板内温度应力增长更平稳。温差超过 25℃时,温度应力值将迅速上升。

(3)在防水板与独立基础的过渡区域是抵抗应力能力较低区域,混凝土将会在该过渡区域最早开裂,在进行防水板构造设计时要尤其注意此区域的应力是否过于集中,避免由于混凝土裂缝迅速扩展而使防水板质量下降或者破坏,在设计时可以适当加密布置过渡区域钢筋,分散该处所集中的应力。

(4)在施工阶段浇筑防水板混凝土时,大温差必然导致防水板的大变形,通过分析可知 25℃左右的内外温差是防水板混凝土裂缝开展的临界温差。

## 参考文献:

## References:

- [1] 谈雪姣. 独立基础加抗水板基础设计及构造要求[J]. 四川水泥, 2018(2): 107.  
TAN Xue-jiao. Design and Construction Requirements of Independent Foundation with Water-resistant Plate Foundation[J]. Sichuan Cement, 2018(2): 107.
- [2] 朱炳寅. 独立柱基加防水板基础设计方法的分析[J]. 建筑结构, 2001(11): 51-53.  
ZHU Bing-yin. Analysis on the Design Method of Independent Plinth and Waterproof Plate Foundation [J]. Architectural structure, 2001(11): 51-53.
- [3] 朱炳寅. 高层建筑筏基设计方法的分析与探索[J]. 建筑结构, 1999(4): 54-57.  
ZHU Bing-yin. Analysis and Exploration of Raft Design Method for High-rise Building [J]. Building Structure, 1999(4): 54-57.
- [4] 朱炳寅. 对独基加防水板的设计[J]. 建筑结构: 技术通讯, 2007(7): 4-7.  
ZHU Bing-yin. Design of Single Base Plus Waterproofing Board [J]. Building Structure: Technical Communication, 2007(7): 4-7.
- [5] 张洁. 柱下独立基础加防水板设计方法研究[J]. 建筑结构, 2018, 48(增 2): 775-778.

- ZHANG Jie. Study on Design Method of Single-footing with Water-proof Slab Under Column[J]. Building Structure, 2018, 48(S2): 775-778.
- [6] 王军华. 独立柱基防水基础施工关键工艺探究[J]. 山西建筑, 2017, 43(5): 101-102.  
WANG Jun-hua. The Key Waterproof Technology of Single Column Foundation [J]. Shanxi Architecture, 2017, 43(5): 101-102.
- [7] 郭劲. 独立柱基加防水板的设计分析[J]. 建材技术与应用, 2009(11): 22-23.  
GUO Jin. Design and Analysis of Independent Column Foundation and Waterproof Slab [J]. Research and Application of Building Materials, 2009(11): 22-23.
- [8] 苏柳明. 浅谈独立基础加防水板设计与结构计算软件结合应用[J]. 武汉勘察设计, 2012(5): 56-57.  
SU Liu-ming. Discussion on the Combined Application of Independent Foundation and Waterproof Plate Design and Structural Calculation Software [J]. Wuhan Investigation & Design, 2012(5): 56-57.
- [9] MCNERNEY M T, KIM J, BESCHER E. Construction, Instrumentation, and Performance of a Double Sized Slab Designed for Airport Runways [C]// ASCE. Proceedings of the International Conference on Highway Pavements and Airfield Technology. Philadelphia: ASCE, 2017: 169-206.
- [10] 吴振河. 独立基础加防水板下设聚苯板软垫层施工方法刍议[J]. 建材与装饰, 2018(48): 4-5.  
WU Zhen-he. Discussion on Construction Method of Soft Cushion of Polystyrene Board Under Independent Foundation and Waterproof Board [J]. Construction Materials and Decoration, 2018(48): 4-5.
- [11] 王大智. 桩基承台加防水板基础设计中防水板固端弯矩的确定[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
WANG Da-zhi. Determination of Fixed-end Moment for Waterproof Slabs in the Foundation Design Consisting of Pile Caps and Waterproof Slabs [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [12] KANDA T, MOMOSE H, ISHIZEKI K, et al. Impacts of Trace Additives and Early-stage Curing Conditions on the Shrinkage Cracking Resistance of Blast-furnace Slag Cement Concrete [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2016, 14(8): 475-488.
- [13] 谭玲. 混凝土坝内外温差控制标准及方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.  
TAN Ling. The Control Standard and Method of Temperature Difference Between Inside and Outside of Concrete Dam [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

- [14] 赵占山,付素娟,崔少华.独立基础加防水板裂缝成因分析[J].华北地震科学,2013,31(增1):1-4.  
ZHAO Zhan-shan,FU Su-juan,CUI Shao-hua. Analysis of the Crack Initiation for the Independent Foundation and Waterproof Board[J]. North China Earthquake Science,2013,31(S1):1-4.
- [15] 赵鹏.独立基础加防水板联合基础的抗裂分析[D].西安:长安大学,2011.  
ZHAO Peng. The Anti-cracking Analysis of the Joint Based Constituted by Independent Foundation Add Waterproof Board[D]. Xi'an:Chang'an University, 2011.
- [16] KURIAKOSE B,RAO B N,DODAGOUDAR G R. Early-age Temperature Distribution in a Massive Concrete Foundation[J]. Procedia Technology,2016, 25:107-114.
- [17] 李永春.钢筋混凝土矩形板薄膜效应的有限元分析[D].武汉:华中科技大学,2006.  
LI Yong-chun. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Rectangular Slab Membrane Effect [D]. Wuhan:Huazhong University of Science & Technology,2006.
- [18] 张自喜,孟宪磊.混凝土浇筑温度的降温有效率分析[J].云南水力发电,2018,34(4):96-98.  
ZHANG Zi-xi,MENG Xian-lei. Analysis of Cooling Efficiency of Concrete Casting Temperature[J]. Yunnan Water Power,2018,34(4):96-98.
- [19] 蹇兆雷.地下室底板混缝控制[J].中华民居,2014 (8):326-327.  
JIAN Zhao-lei. Mixed Seam Control of Basement Floor[J]. China Homes,2014(8):326-327.
- [20] YOUSEFIEH N,JOSHAGHANI A,HAJIBANDEH E,et al. Influence of Fibers on Drying Shrinkage in Restrained Concrete[J]. Construction and Building Materials,2017,148:833-845.
- [21] ELSAFTY A,GRAEFF M K,EL-GHARIB G,et al. Analysis, Prediction, and Case Studies of Early-age Cracking in Bridge Decks[J]. International Journal of Advanced Structural Engineering, 2016, 8 (2): 193-212.
- [22] 卢娟娟.大体积混凝土结构裂缝控制综合措施[J].农业科技与信息,2008(20):44-45.  
LU Juan-juan. Comprehensive Measures for Crack Control of Mass Concrete Structure[J]. Agricultural Science-technology and Information,2008(20):44-45.
- [23] 曾宪哲.大体积混凝土底板温度裂缝的研究[D].西安:长安大学,2009.  
ZENG Xian-zhe. Research of Temperature Crack in Mass Concrete Baseplate[D]. Xi'an:Chang'an University,2009.
- [24] 李潘武,曾宪哲,李博渊,等.浇筑温度对大体积混凝土温度应力的影响[J].长安大学学报:自然科学版,2011,31(5):68-71.  
LI Pan-wu,ZENG Xian-zhe,LI Bo-yuan,et al. Influence of Placement Temperature on Mass Concrete Temperature Stress[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition,2011,31(5):68-71.