

基于等效龄期的钢管拱内混凝土硬化过程热应力

孙建渊, 谢津宝

(同济大学 土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 为揭示大直径钢管拱内混凝土硬化过程中力学性能增长的温度依赖性因素对组合结构热力作用效应的影响机理, 采用有限元程序模拟钢管拱内混凝土的水化热传导过程, 并与实测温度场数据进行对比, 随后基于等效龄期法考虑其对管内混凝土弹性模量增长的影响, 在此基础上结合热弹性力学理论得到了硬化过程中组合结构热应力的变化规律, 并与未考虑温度依赖性影响的计算结果进行比较分析。结果表明, 水化热温度场加快了管内混凝土硬化过程中弹性模量的增长速度, 进而导致混凝土温度应力明显增大, 截面径向、环向以及纵向温度应力增幅分别可达 1.3 倍、1.3 倍和 1.4 倍, 但对钢管应力的影响可忽略不计。因此, 在分析大直径钢管拱内混凝土硬化过程中的热力作用效应时, 必须考虑水化热温度场对管内混凝土弹性模量增长的影响。

关键词: 钢管混凝土拱桥; 硬化过程; 水化热; 温度依赖性; 等效龄期法; 热力作用

中图分类号: U448.22, TU392.3

文献标志码: A

Thermal Stress of Concrete-filled Steel Tube Arch During Hardening Process Based on Equivalent Age Method

SUN Jianyuan, XIE Jinbao

(College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to reveal the influence mechanism of temperature dependence of development of mechanical properties of concrete in large-diameter steel tube arches on the thermodynamic effect of composite structures during hardening process, a finite element model was established to simulate the hydration heat transfer process of the concrete in the steel tube arch, which was compared with the measured temperature field data. Subsequently, the effect of hydration heat on the development of the modulus of elasticity of the concrete was further considered based on the equivalent age

method, by which the variation of thermal stress of composite structure during hardening process were revealed combining with thermal elasticity mechanics theory, and compared with the calculation results without considering the influence of the temperature dependence. The results show that the hydration heat temperature field accelerates the growth rate of the modulus of elasticity of the concrete in the tube during hardening, which leads to a significant increase in the thermal stress of the concrete during hardening process, and the increases in the radial, circumferential and longitudinal directions can reach 1.3 times, 1.4 times and 1.3 times, respectively, but the effect on the stress of the steel tube is negligible. Hence, in the analysis of the thermodynamic effect during the hardening of concrete in large-diameter steel tube arches, the effect of hydration heat temperature field on the development of the modulus of elasticity of the concrete in the steel tube must be considered.

Key words: concrete-filled steel tube arch bridge; hardening process; hydration heat; temperature dependence; equivalent age method; thermodynamic effect

我国的钢管混凝土(concrete-filled steel tube, CFST)拱桥在近二十多年中得到了大量的应用, 截止 2015 年 1 月, 已建和在建的钢管混凝土拱桥(跨径在 50 m 及以上)已达 413 座^[1-2]。我国仍处于大规模修建钢管混凝土拱桥的时期, 对其需求量还很大, 跨径不断增加, 采用的钢管管径随跨径而增大, 目前钢管混凝土拱桥跨径已经超过 500 m, 可望在不久的将来达到 700 m。

随着钢管混凝土拱跨径不断增加, 同时钢管拱肋的直径不断加大, 最大钢管拱肋管径已达 1.5 m^[3], 大直径钢管灌注的混凝土具有大体积混凝土水化反应特性^[4]。处于密封条件下的钢管混凝土水

收稿日期: 2018-09-17

基金项目: 国家自然科学基金(51778468)

第一作者: 孙建渊(1966—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为混凝土桥梁、钢-混凝土组合结构、桥梁计算机辅助设计。E-mail: sunjy@tongji.edu.cn

通信作者: 谢津宝(1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为混凝土桥梁、桥梁计算机辅助设计。E-mail: xiejnbao@tongji.edu.cn



扫码
查看
作者
扩展
介绍

化热引起较大的温度变化,不仅严重影响管内混凝土力学性能的增长规律,而且使得钢管与混凝土硬化过程产生复杂相互作用,导致与其相对应的截面应力以及成桥后的受力状态也受到影响^[5].并且由于管内大体积砼水化热造成的混凝土温度裂缝内包在钢管内,人们难以发现或检测钢管混凝土的开裂情况,而这些温度裂缝将对大量钢管混凝土拱的承载力、耐久性等都会留下永久的严重质量隐患.

关于钢管混凝土拱桥水化热问题虽然展开了一定的研究,但研究数量整体偏少,并且现行研究主要偏向于水化热温度场研究^[3,6-8],鲜有对水化热作用下的结构温度应力进行研究,研究尚不深入.而且,由于大直径钢管混凝土管内泵送的混凝土是高强度微膨胀混凝土,掺加了微膨胀剂、粉煤灰等,材料组成较为复杂,其水化放热及其力学性能增长规律异于普通混凝土,而已有研究多集中在小直径钢管混凝土拱桥上^[8-10],不能真实地反映大直径钢管混凝土拱桥硬化过程中的热力作用效应.特别是研究硬化过程温度应力时,受水化热温度场不均匀分布的影响,管内混凝土各部位的水化反应速率以及水化反应程度不同,进而导致同一龄期不同位置处混凝土力学性能(比如弹性模量)的发展存在显著差异,但已有研究未能综合考虑水化热温度场分布对管内混凝土力学性能增长的影响^[10-17].

以某铁路上承式大直径钢管混凝土拱桥为工程背景,以热传导理论结合有限元法建立了大直径钢管拱内微膨胀高强度混凝土水化过程中的热传导分析模型,并通过引入等效龄期法进一步考虑水化热温度场对管内混凝土弹性模量增长的影响,在此基础上结合热弹性力学理论对钢管拱内混凝土硬化过程中的结构温度应力进行了热力作用数值模拟与比较分析.

1 钢管砼拱水化热温度场计算原理

1.1 水化热计算模型

大直径钢管混凝土硬化的过程是一个复杂的放热过程.假定浇筑后混凝土为均质、各向同性,即水泥砂浆、骨料等呈现均匀分布状态,其水化热的释放与空间位置无关,只是时间的函数,因此,应该计算出各龄期的累积水化热量,以便求得水化放热速率,并将其作为内热源代入后续瞬态温度场的计算中.而水泥累积水化热依赖于龄期,常见的计算模型有指数式(式(1))、双曲线式(式(2))和复合指数

式(式(3))水化热表达式三种^[18].

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-mt}) \quad (1)$$

$$Q(t) = \frac{Q_0 t}{n + t} \quad (2)$$

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-t^p}) \quad (3)$$

式(1)~(3)中: $Q(t)$ 为在龄期 t 时的累计水泥水化热; Q_0 为 $t \rightarrow \infty$ 时的最终水泥水化热; t 为龄期; m 为常数; n 为常数,它是水化热达到一半时的龄期, d ; p 、 q 为常数.

钢管内灌注的复合胶凝材料混凝土水化热最好由实验测定,在缺乏直接测定的资料时,建议按照式(4)进行估算^[18-19].

$$Q(\tau) = Q(t)(W + kF) \quad (4)$$

式中: $Q(\tau)$ 为混凝土水化热; W 为按配合比计算的水泥用量; F 为按配合比计算的矿物掺合料用量; k 为折减系数,对粉煤灰可取0.25^[18].

1.2 水化热温度场模拟

假定没有日照作用、环境温度均匀分布,同时材料热工性能参数是各向同性的,由于有内热源的圆钢管混凝土的几何形状、热力学边界条件都对称于中心轴,因此,圆钢管混凝土水化热瞬态温度场问题可简化为轴对称热传导问题,采用柱坐标系来描述,以 Oz 轴为轴向对称轴.由于钢管混凝土温度沿环向 θ 分布不变,即 $\partial T / \partial \theta = 0$,则得到管内混凝土的轴对称热传导方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_c \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} \quad (5)$$

式中: r 为半径; τ 为时间; T 为温度; θ_c 是混凝土绝热温升, $^{\circ}\text{C}$; $a_c = k_c / c_c \rho_c$,为混凝土的导温系数;其中, k_c 为混凝土的热传导系数; c_c 为混凝土的比热容; ρ_c 为密度.

$$\frac{\partial \theta_c}{\partial \tau} = \frac{W q_v}{c_c \rho_c} \quad (6)$$

式中: W 为单位体积混凝土的水泥用量; q_v 为单位时间单位质量水泥释放的水化热.

钢管壁外表面与内表面之间存在热传导,则钢管内热流密度 q_s 表达式为

$$q_s = \frac{k_s}{t_s} (T_{so} - T_{si}) \quad (7)$$

式中: k_s 为钢材导热系数; t_s 为钢管壁厚; T_{so} 为钢管壁外表面温度; T_{si} 为钢管壁内表面温度.

为了确定所求温度场的唯一解,热方程还需要满足下列初始条件和边界条件.前者为

$$T|_{t=0} = T_0(r, \theta, z) \quad (8)$$

边界条件给出导热物体在边界上的温度或换热

情况,反映影响物体热传导和温度状态的外部因素。钢管混凝土水化热温度场分析主要存在下列三种边界条件(图1)。图中, q_{ce} 为管内边缘混凝土热流密度; q_{si} 为钢管壁内表面热流密度; T_{ce} 为管内边缘混凝土温度; T_f 为大气环境温度; β 为钢管壁外表面在大气环境中的放热系数; q_{so} 为钢管壁外表面热流密度。

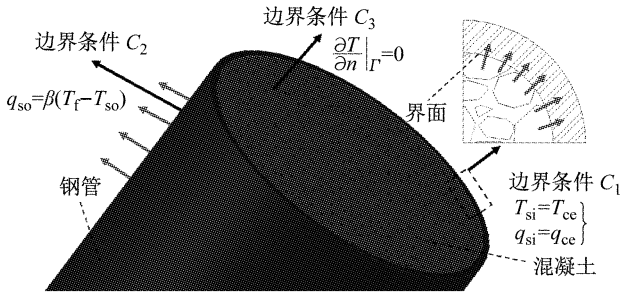


图1 钢管混凝土水化热温度场边界条件

Fig.1 Boundary conditions of hydration heat temperature field of CFST

边界条件 C_1 , 钢管壁内表面与管内边缘混凝土之间假设接触良好, 在接触面上温度和热流密度都是连续的, 用公式表示为

$$\left. \begin{aligned} T_{si} &= T_{ce} \\ q_{si} &= q_{ce} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

边界条件 C_2 , 钢管壁外表面与大气环境进行热对流, 则钢管壁外表面热流密度 q_{so} 表达式为

$$q_{so} = \beta(T_f - T_{so}) \quad (10)$$

式中: T_{so} 为钢管壁外表面温度; β 与风速 v 有关, 可用式(11)计算^[7]:

$$\left\{ \begin{aligned} \text{粗糙表面: } \beta &= 23.9 + 14.50v \\ \text{光滑表面: } \beta &= 21.8 + 13.53v \end{aligned} \right. \quad (11)$$

边界条件 C_3 , 钢管混凝土拱肋的拱脚与拱座之间传热较少, 即:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{\Gamma} = 0 \quad (12)$$

式中: n 为表面外法线方向。

热传导某一瞬间的钢管壁内热流量为稳定状态, 则钢管内热流密度 q_s 与钢管壁内、外表面热流密度 q_{si} 、 q_{so} 相等, 联立式(7)、(9)、(10)可得式(13):

$$q_{so} = q_s = q_{si} = q_{ce} = \frac{1}{\frac{1}{\beta} + \frac{t_s}{k_s}} (T_f - T_{ce}) \quad (13)$$

上述问题可以采用热传导有限元法来求解, 并在时间离散上采用向后差分法, 可以得到^[20-21]:

$$\left[\mathbf{H} + \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \right] \mathbf{T}_{n+1} - \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \mathbf{T}_n + \mathbf{F}_{n+1} = 0 \quad (14)$$

$$\mathbf{H}_{ij} = \sum_e (\mathbf{h}_{ij}^e + \mathbf{g}_{ij}^e) \quad (15)$$

$$\mathbf{R}_{ij} = \sum_e \mathbf{r}_{ij}^e \quad (16)$$

$$\mathbf{F}_i = \sum_e \left(-f_i^e \frac{\partial \theta}{\partial t} - p_i^e T_f \right) \quad (17)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{h}_{ij}^e &= \iint_{\Delta R} \left(\frac{\partial N_i}{\partial r} \frac{\partial N_j}{\partial r} + \frac{\partial N_i}{\partial z} \frac{\partial N_j}{\partial z} \right) r dr dz \\ \mathbf{r}_{ij}^e &= \frac{1}{a} \iint_{\Delta R} N_i N_j r dr dz \\ \mathbf{f}_i^e &= \frac{1}{a} \iint_{\Delta R} N_i r dr dz \\ \mathbf{p}_i^e &= \int_{\Gamma} \frac{\beta}{k_s} N_i r ds \\ \mathbf{g}_{ij}^e &= \int_{\Gamma} \frac{\beta}{k_s} N_i N_j r ds \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

式(14)~(18)中: \mathbf{H} 、 \mathbf{R} 、 \mathbf{F} 分别为整体热传导矩阵、整体热容矩阵和整体温度荷载向量; \mathbf{T} 为待求解的节点温度向量; Δt_n 为 t_n 时刻的时间步长; \mathbf{h}_{ij}^e 为单元热传导矩阵; \mathbf{g}_{ij}^e 为热交换边界条件对单元热传导矩阵的修正; \mathbf{r}_{ij}^e 为单元热容矩阵; $f_i^e \frac{\partial \theta}{\partial t}$ 为水化热源引起的单元温度荷载; $p_i^e T_a$ 为热交换引起的单元温度荷载; a 为单元导温系数, 并区分混凝土单元和钢管单元; \mathbf{N} 为形函数矩阵; ΔR 为单元求解域; Γ 为钢管外表面所在单元的边界。当 \mathbf{T}_n 为已知、 \mathbf{T}_{n+1} 为未知时, 式(14)是关于 \mathbf{T}_n 的线性方程组。由于初始温度是已知的, 基于方程式(14)求解即可得到各节点在 t_{n+1} 时刻的温度 \mathbf{T}_{n+1} 。

2 钢管砼拱温度应力场计算原理

2.1 基于等效龄期的混凝土弹性模量增长模型

研究管内混凝土硬化过程温度应力时, 受水化热温度场不均匀分布的影响, 管内混凝土各部位的水化反应速率以及水化反应程度不同, 进而导致同一龄期不同位置处混凝土弹性模量的发展存在显著差异, 因此, 需要采用等效龄期计算方法进一步综合考虑水化热温度分布对管内混凝土弹性模量整体增长的影响。通过等效龄期法换算, 可以用参考温度下混凝土弹性模量的发展历程表征任意温度历程下混凝土弹性模量发展历程^[22]。

等效龄期的概念建立在混凝土成熟度理论上, Nurse^[23] 和 Saul^[24] 认为在其他养护条件相同的情况下(比如湿度等), 不同的温度历程达到相同的

成熟度时,同一混凝土的力学性能相近. 用 Nurse—Saul 方程表征的成熟度理论的积分形式为

$$M = \int_0^t (T(\tau) - T_{\text{ref}}) d\tau \quad (19)$$

式中: M 为成熟度; τ 为养护龄期; T_{ref} 为参考温度; $T(\tau)$ 为龄期 τ 时的温度.

与成熟度的概念一致,等效龄期是指在不同温度历程时混凝土达到相同成熟度而需要在参考温度下养护的时间^[25],即:

$$t_e = \int_0^t \frac{K(T(\tau))}{K(T_{\text{ref}})} d\tau \quad (20)$$

式中: $K(T_{\text{ref}})$ 为参考温度下的反应速率系数; $K(T(\tau))$ 为龄期为 τ 、温度为 T 时的反应速率系数.

而混凝土的水化是一个放热反应过程,可以用化学反应中的 Arrhenius 方程来表征温度对水泥化学反应速率的影响,即:

$$K(T) = A e^{\frac{-E_a}{R(T+273)}} \quad (21)$$

式中: R 为理想气体常数 $8.314, \text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$; A 为前因子; E_a 为水泥的化学活化能, $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$.

根据 Arrhenius 方程, Hansen 和 Pedersen 等^[26]提出了新的成熟度理论的表征方法,以标准养护温度 20°C (293 K) 为参考温度,即等效龄期 t_{eq} :

$$t_{\text{eq}} = \int_0^t \exp \left[\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}} + 273} - \frac{1}{T(\tau) + 273} \right) \right] d\tau \quad (22)$$

在有限元计算的过程中,采用时间步累计叠加的形式计算相应的等效龄期,即把龄期等分为 n 段,并假设每段时间间隔内的温度为常数,则等效龄期的计算简化为

$$t_{\text{eq}} = \sum_{i=1}^n \exp \left(\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T(\tau) + 273} \right) \right) (t_i - t_{i-1}) \quad (23)$$

水化热温度场各节点每时刻的温度均不相同,因此各节点均要建立这样的等效龄期公式. 根据离散化的等效龄期定义式(23),在每个时间段内分别累积计算各节点的等效龄期 t_e ,并代入式(24)^[27]中求出该节点此计算步内的弹性模量值.

$$E_c(t_e) = (1 - \exp(-at_e^b)) \cdot (E_c)_{\text{max}} \quad (24)$$

式中: a, b 为常数; $(E_c)_{\text{max}}$ 表示混凝土最终能达到的极限弹性模量值; $E_c(t_e)$ 表示等效龄期 t_e 时的混凝土弹性模量.

因此,对于配合比一定的同类型混凝土,在其他养护条件相同的情况下,不管温度与时间如何组合,只要在参考温度下的等效龄期相等,其对应的弹性模量也是相等的^[25].

2.2 水化热温度应力场有限元分析

混凝土终凝之后完全丧失可塑性,强度和弹性模量开始增长,符合弹性变形规律,并假定混凝土是均质、各向同性的. 因此,钢管混凝土水化热引起的结构温度应力可作为拟静态热应力问题求解,时间只是作为确定温度场的参数,任意时刻的温度应力都可看成是一个纯空间域问题^[21].

物体热膨胀只产生线应变,剪切应变为零. 这种由于热应变 ϵ_T 可以看做是物体的初应变,对于钢管混凝土的轴对称热应力问题, ϵ_T 的表达式是:

$$\epsilon_T = [\epsilon_r \epsilon_z \epsilon_\theta \gamma_{rz}]^T = \alpha(\phi - \phi_0) [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0]^T \quad (25)$$

式中: α 为单元材料的线膨胀系数; ϕ_0 为结构的初始温度场; ϕ 为结构的瞬态温度场,可由温度场分析得到的单元结点温度 ϕ_i 通过插值求得,即:

$$\phi = \sum_{i=1}^{n_e} N_i \phi_i = N \phi^e \quad (26)$$

在物体中存在初应变的情况下,应力应变关系可表示为^[21]

$$\sigma = D_{\text{eq}}(\epsilon - \epsilon_T) \quad (27)$$

其中:

$$D_{\text{eq}} = \lambda_{\text{eq}} \begin{bmatrix} \frac{1-\mu}{\mu} & 1 & 1 & 0 \\ 1 & \frac{1-\mu}{\mu} & 1 & 0 \\ 1 & 1 & \frac{1-\mu}{\mu} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\mu}{2\mu} \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$\lambda_{\text{eq}} = \frac{E_{\text{eq}} \mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \quad (29)$$

式(28)~(29)中: μ 为单元材料的泊松比; E_{eq} 为引入等效龄期方法计算后的弹性模量,其中,对于混凝土单元弹性模量采用 $E_c(t_e)$,而钢管单元的弹性模量 E_s 为常数; λ_{eq} 为引入等效龄期方法计算后的 Lamé 系数; D_{eq} 为同时考虑龄期和温度的单元弹性矩阵.

根据最小位能原理,只考虑温度应力问题,即假设结构不受外力和体力作用,并对泛函求驻值得^[21]:

$$\delta \Pi(u) = \int_{\Omega} \delta \epsilon^T \sigma d\Omega = \delta a^T \int_{\Omega} B^T D_{\text{eq}} (Ba - \epsilon_T) d\Omega \quad (30)$$

式中: B 为单元应变—位移关系矩阵; a 为整体节点位移列向量.

再考虑到虚位移 δa^T 是任意的,所以:

$$\int_{\Omega} B^T D_{\text{eq}} (Ba - \epsilon_T) d\Omega = 0 \quad (31)$$

将式(31)按单元逐一积分再叠加,即得到温度应力问题的有限元基本方程如下:

$$\mathbf{K}\mathbf{a} = \mathbf{P}_T \quad (32)$$

式中: \mathbf{K} 为整体刚度矩阵; \mathbf{P}_T 为温度变化引起的荷载列向量,且有:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{K}_T &= \sum_e \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} d\Omega \\ \mathbf{P}_T &= \sum_e \int_{\Omega_e} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{e}_T d\Omega \end{aligned} \right\} \quad (33)$$

3 工程案例

3.1 工程背景

以某铁路上承式钢管混凝土拱桥为工程背景^[3],桥梁主跨 360 m,矢跨比 1/6,拱轴线为悬链线,拱轴系数为 2.5. 主拱肋采用钢管混凝土结构,截面形式为四肢桁式(图 2),2 片桁架拱肋向中间倾斜 8°,通过相贯线焊接形式的 K 形钢管连接. 桁架拱肋由上下两个横置哑铃通过 H 型弦杆连接而成,哑铃截面单根钢管外径为 1.5 m,钢管壁厚 30~35 mm. 拱肋钢结构采用 Q370qD,拱肋内部填充 C50 微膨胀混凝土. 首先进行 1 号管的浇注,管内混凝土达到 90%设计强度后浇注另一根钢管混凝土.

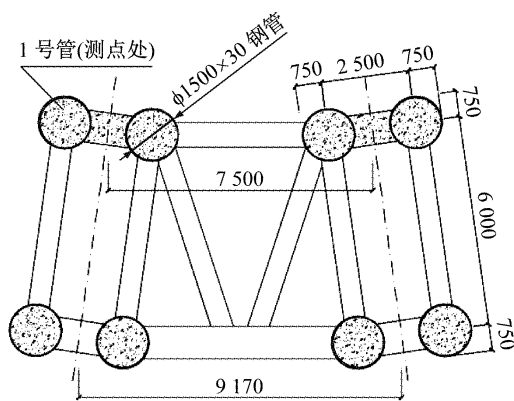


图2 钢管混凝土拱肋截面(单位:mm)

Fig.2 Cross section of concrete-filled steel tube arch (unit: mm)

3.2 有限元模型

钢管混凝土拱肋水化热热力耦合分析采用有限元计算程序进行. 由于物体的几何形状、热力学参数和边界条件等与 θ 角无关(即对称于轴线),并假定没有日照作用、环境温度均匀分布,同时材料热工性能参数是各向同性的,则可以推论温度分布与 θ 角亦无关. 这就只需要取出物体的子午面进行轴对称单元建模,其有限元轴对称和三维扩展模型如图3

所示. 图中, a 、 b 、 c 为测点. 热力耦合单元采用具有温度自由度和结构位移自由度的轴对称单元. 混凝土单元与钢管单元共用节点、完全连接以满足界面热传导连续的要求,温度场分析时沿两端截面取为绝热边界,应力场分析时钢管混凝土两端截面固结.

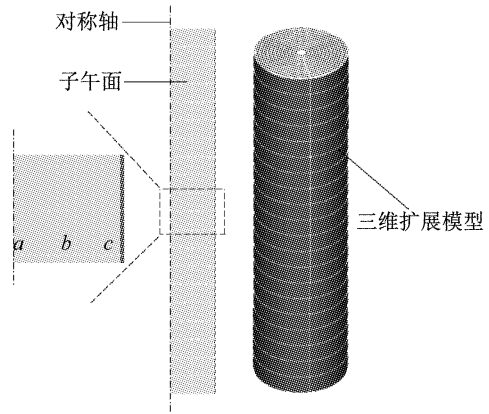


图3 水化热分析有限元模型

Fig.3 Finite element model of hydration thermal analysis

针对拱肋水化热分析,主要有以下假设:管内混凝土与钢管壁接触良好,不存在脱空;大气温度均匀分布,不考虑日照等因素引起的非均匀温度场^[3];钢管混凝土拱桥选用的混凝土一般添加缓凝剂,且以泵送的方式浇注,浇注完成时间很短,可以忽略不计,因此假设在一根拱肋全部灌注完成后,混凝土才开始水化放热.

3.3 初始条件和材料参数

初始条件为浇注时刻混凝土和钢管的内部温度分布,考虑钢管相对混凝土不仅传热较快而且体积小很多,因此钢管温度会较快与管内混凝土一致,可以认为混凝土和钢管的初始温度都为定值,即 $t=0$, $T=T_0$ (起始时刻为浇注完管内混凝土开始放热的时刻, T_0 取为混凝土浇注温度 20 °C).

实际工程中钢管混凝土拱肋水化热温度变化在 20 °C~80 °C 范围,温度对钢管混凝土两种材料热工性能影响可忽略不计^[28]. 考虑到材料是各向同性的,有限元模拟分析时钢管混凝土材料热工性能参数取值见表 1^[3,29].

采用双曲线式水化放热模型. 根据实验室测定,水泥 3 d 水化热为 364.7 kJ·kg⁻¹,通过 C50 微膨胀混凝土配合比(表 2)拟合计算^[3],即可得到管内混凝土水化放热曲线. 钢管外表面与大气之间的换热系数按风速 1.0 m·s⁻¹ 选取 9.814 W·m⁻²·°C⁻¹^[18].

水化反应的活化能 E_a 在 0 °C~100 °C 之间大致

表 1 钢管混凝土材料热工性能参数

Tab.1 Thermal performance parameters of concrete-filled steel tube materials

材料	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	热传导系数/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热/ ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	热膨胀系数/ ($10^{-5} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	弹性模量/GPa	泊松比
混凝土	2 408	2.46	902	1.0	43.2(28 d)	0.2
钢材	7 850	49.8	465	1.2	206	0.3

表 2 C50 微膨胀混凝土配合比

Tab.2 Mix proportion of C50 micro-expansion concrete

水泥	粉煤灰	膨胀剂	外加剂	水	骨料
400	50	50	8	162	1738

为常数,计算中 E_a/R 取为恒定值 $2\,700\text{ K}^{[28,30]}$. 对于管内灌注的 C50 微膨胀高强度混凝土而言,其弹性模量成长历程不同于普通的硅酸盐混凝土,参考温度 20°C 下弹性模量增长拟合公式^[11-12,14]为

$$E_c(t_e) = 43.2(1 - \exp(-0.806\,5t_e^{0.609\,2})) \quad (34)$$

3.4 结果分析

为考察有限元结果计算的正确性,选取测点 a , b, c 的温度计算值与文献中实测值进行对比,如图 4 所示. 1.2 节有限元模型计算的钢管混凝土拱肋截面温度场,与文献[3]中的实测温度场基本相符,最大误差不超过 $5\text{ }^\circ\text{C}$,说明本计算模型可正确模拟钢管混凝土水化热温度场.

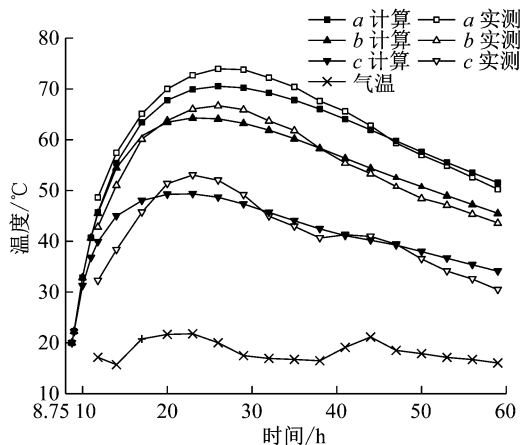


图 4 温度场数值计算结果与实测结果的对比

Fig.4 Comparison of the calculated and measured temperatures of typical points

钢管混凝土拱截面各点温度在浇筑完成后 10 d 内的变化曲线,如图 5 所示. 在水化热影响下,前期混凝土水化短时间内急剧放热,拱肋截面温度迅速升高,管内混凝土中心温度在混凝土灌注后 26 h 左右达到峰值 $70.5\text{ }^\circ\text{C}$,且在截面上存在内高外低的温度差:越靠近截面边缘,节点温度峰值越低,最外侧节点(即钢管外表面)温度峰值为 $41.7\text{ }^\circ\text{C}$,截面最大温差接近 $30\text{ }^\circ\text{C}$. 后期混凝土水化放热减少,拱肋截面温度相对缓慢下降,最终趋于环境温度 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 左

右,内侧节点受环境温度影响小,外侧节点随环境温度变化最为明显.

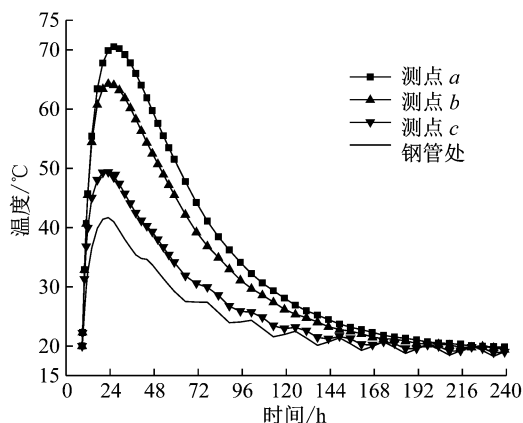


图 5 水化热截面温度场分布

Fig.5 Cross section temperature field distribution caused by hydration heat

图 6 是根据水化热温度场计算得到的混凝土截面上各点等效龄期随浇筑后实际龄期的变化规律. 计算等效龄期选取的参考温度与标准养护温度一致,均为 $20\text{ }^\circ\text{C}$,从图 6 曲线上得出的混凝土截面各点等效龄期的成熟度可以认为与标准养护下该点达到该龄期时的成熟度一致. 图 6 表明,受水化热温度场影响,早龄期管内混凝土成熟度呈现不均匀增长的趋势,当实际龄期相同时,管内混凝土 b, c 点的成熟度均滞后于 a 点,且这一现象随龄期增长更显著,管内混凝土内外侧的等效龄期最大可相差 4 d.

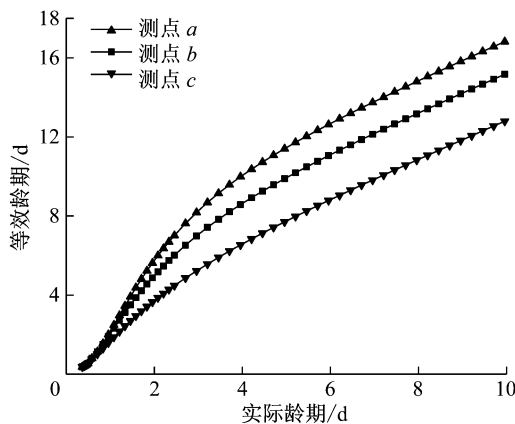


图 6 实际龄期与等效龄期关系

Fig.6 Relationship between actual age and equivalent age

图7对比了采用两种不同计算方式所得管内混凝土弹性模量 E_c 增长的差异,其中曲线 a, b, c 分别代表截面上各点(测点 a, b, c)基于等效龄期法考虑水化热温度场影响的计算结果,曲线 $E_{c, \text{ref}}$ 代表未考虑该因素影响的计算结果. 结果表明,相比参考温度下管内混凝土弹性模量的增长情况,考虑水化热温度场影响的弹性模量增长速度显然更快,水化放热开始后两者弹性模量增长差值迅速增大,在 26 h 时最大达到 11 GPa,之后逐渐减小,在 10 d 左右趋于一致. 并且,由于受到水化热内高外低的温度场分布的影响,混凝土弹性模量沿截面径向增长不同,混凝土中心弹性模量明显增长加快,靠近边侧增长变慢.

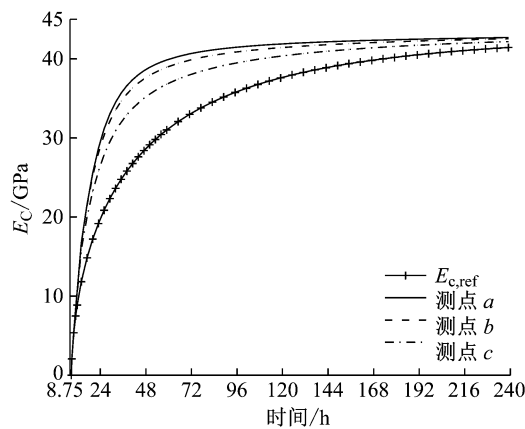


图7 管内混凝土各点弹性模量发展规律

Fig.7 Developments of elastic modulus of the concrete in the steel tube at typical points

图8a、8b、8c分别给出了采用两种不同计算方式所得管内混凝土径向温度应力 σ_r^c 、纵向温度应力 σ_z^c 以及环向温度应力 σ_θ^c 在前10 d内的变化规律,其中曲线 a, b, c 分别代表截面上各点(测点 a, b, c)采用等效龄期法(即考虑了水化热温度场对其弹性模量影响)的计算结果,曲线 $a_{\text{ref}}, b_{\text{ref}}, c_{\text{ref}}$ 分别代表截面上各点未采用该方法的计算结果.

由图8a可知,考虑水化热温度场对弹性模量增长影响的条件下,随着前期水泥水化放热,升温膨胀的混凝土受到钢管的套箍作用产生径向温度压应力,并且快速增大,在38 h左右核心混凝土 a 点应力峰值达到 4.4 MPa,滞后水化热温度峰值 12 h,后期逐渐降低,到 10 d 左右消失. 从整个截面应力场来看,在钢管混凝土水化过程中,由于管内混凝土的温度高于钢管温度,致使整个截面呈现出径向压应力,在钢管和混凝土的界面上不存在拉应力,不会因出现脱粘现象而影响该钢管混凝土后期的正常使用性能. 并且,混凝土径向温度压应力与水化热温度场分布趋势一致,均由核心混凝土中心向外衰减. 从径向温度应力的对比来看,采用等效龄期法的计算结果

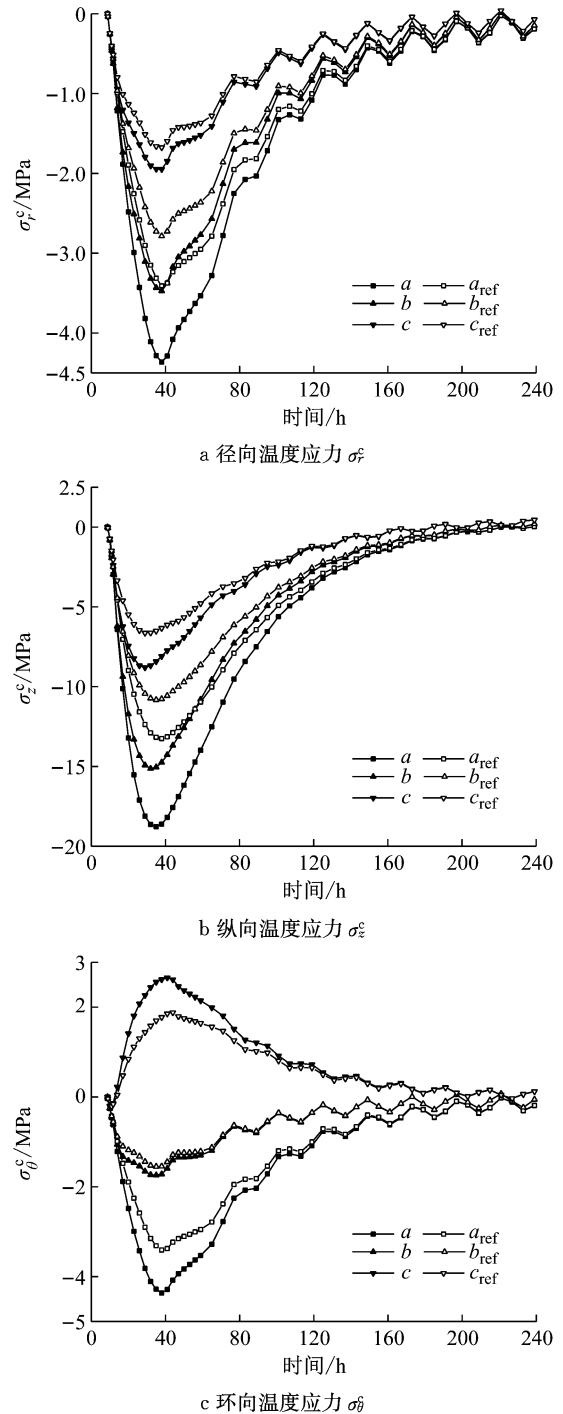


图8 管内混凝土各点弹性模量发展规律

Fig.8 Temperature stress variations of the concrete in the steel tube at typical points

明显更大,且越靠近截面中心差异越大,核心混凝土 a 点的径向温度压应力约为不采用时的 1.3 倍.

图8b表明,与径向温度压应力的变化规律一致,管内混凝土截面纵向温度压应力呈现先增大到应力峰值后逐渐减小,并最终消失的趋势,但混凝土截面纵向温度压应力整体上均高于径向温度压应力,核心混凝土 a 点应力峰值可达 18.8 MPa. 并且,在混凝土截面上存在较大的纵向温度压应力梯度,

其最大差值可达 10.5 MPa。后期混凝土水化放热结束后,混凝土存在约 0.5 MPa 的残余温度拉应力。对比纵向温度应力,考虑温度对弹性模量增长影响的计算结果明显更大,且越靠近截面中心,两者差异越大,核心混凝土 a 点计算结果差异可达 5.8 MPa。

由图 8c 可知,与径向、纵向温度压应力不同,水化热温度作用下混凝土整个截面同时存在环向温度压应力和拉应力,靠近核心处混凝土产生环向温度压应力,压应力峰值约为 4.4 MPa,由于混凝土与钢管壁按共节点考虑,靠近钢管壁处混凝土产生一定的环向温度拉应力。从环向温度应力的对比来看,采用等效龄期法的计算结果明显比不采用时更大,核心混凝土 a 点的环向温度压应力约增大 1.3 倍。

图 9 对比了采用两种不同计算方式所得钢管径向温度应力 σ_r^s 、纵向温度应力 σ_z^s 以及环向温度应力 σ_θ^s 在前 10 d 内的变化规律,其中曲线 $\sigma_r^s, \sigma_z^s, \sigma_\theta^s$ 代表采用等效龄期法的计算结果,曲线 $\sigma_{r,ref}^s, \sigma_{z,ref}^s, \sigma_{\theta,ref}^s$ 代表未采用该方法的计算结果。

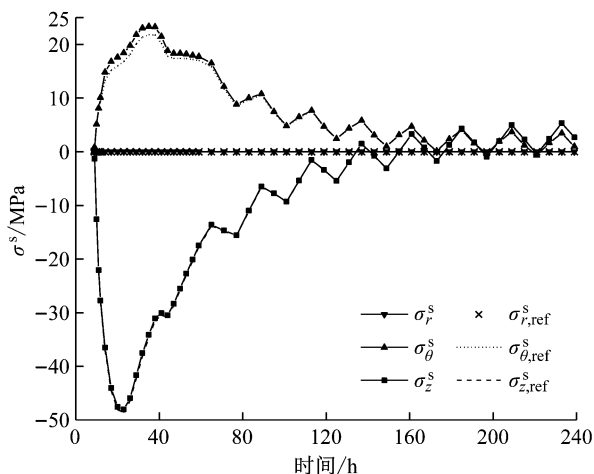


图 9 钢管温度应力时程曲线

Fig. 9 Temperature stress variations of the steel tube

图 9 表明,钢管由于在水化热温度作用下未受到径向约束,因此钢管径向温度应力大小趋近于零,有限元计算结果为 0,与实际情况吻合。水化热释放过程中,钢管环向温度拉应力峰值为 23.4 MPa,纵向温度压应力峰值为 48.1 MPa。后期受变化的环境温度影响,钢管温度拉应力可达 5 MPa。对比钢管三个方向的温度应力,采用等效龄期法的计算结果比不采用时略微偏大,但影响很小,可忽略不计。

4 结语

(1) 大直径钢管拱内混凝土硬化过程中的力学性能增长有较强的温度依赖性,而水化放热过程最

高温可达 70.5 °C,截面最大温差接近 30 °C,严重影响管内混凝土硬化过程中弹性模量的增长规律,导致增长速度加快,并沿截面径向增长不均匀,弹性模量增长差异与标准养护条件下相比可达 11 GPa,但约 10 d 两者逐渐趋于一致。

(2) 钢管混凝土水化热温度场及受其影响的力学性能增长共同决定了硬化过程中组合结构热应力的变化规律。其中,在水化热释放过程中,整个混凝土截面呈现出径向温度压应力,靠近钢管壁处混凝土因受压而不会脱粘;混凝土截面纵向温度压应力最大,在核心混凝土中心处其峰值可达 18.8 MPa;管内混凝土硬化过程中截面各点温度压应力与其至核心混凝土中心的距离成负相关,同等条件下,距离越远则温度压应力越小,其中混凝土截面纵向温度压应力最大梯度可达 10.5 MPa。

(3) 相比未考虑温度依赖性影响的传统方法,采用等效龄期法考虑温度依赖性影响的计算结果发生显著的改变,其对混凝土径向温度应力、环向温度应力以及纵向温度应力的影响一致,发生显著的改变,均使硬化过程中混凝土应力明显增大,峰值应力增幅可达 1.3 倍、1.3 倍和 1.4 倍,但对钢管应力的影响可忽略不计。因此,在分析大直径钢管拱内混凝土硬化过程中的热力作用效应时,有必要综合考虑水化热温度场对管内混凝土弹性模量增长的影响。

参考文献:

- [1] 陈宝春, 韦建刚, 周俊, 等. 我国钢管混凝土拱桥应用现状与展望[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 50.
CHEN Baochun, WEI Jiangang, ZHOU Jun, et al. Application status and prospect of CFST arch bridge in China [J]. Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 50.
- [2] ZHENG J L, WANG J J. Concrete-filled steel tube arch bridges in China[J]. Engineering, 2018, 4(1): 143.
- [3] 高卫卫. 大跨度钢管混凝土拱桥水化热的试验与数值分析[J]. 铁道建筑, 2016(8): 35.
GAO Weiwei. Experimental and numerical analysis on hydration heat of long-span concrete-filled steel tube arch bridge[J]. Railway Construction, 2016(8): 35.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大体积混凝土施工规范: GB 50496—2009 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Mass concrete construction specification: GB 50496—2009[S]. Beijing: China Planning Press, 2009.
- [5] 陈宝春. 钢管混凝土拱桥设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
CHEN Baochun. Design and construction of concrete-filled steel tube arch bridge [M]. Beijing: China Communications Press, 1999.
- [6] 韩林海, 杨有福, 李永进, 等. 钢管高性能混凝土的水化热和

- 收缩性能研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 1.
- HAN Linhai, YANG Youfu, LI Yongjin, *et al.* Hydration heat and shrinkage properties of high performance concrete-filled steel tube [J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39 (3): 1.
- [7] 冯斌. 钢管混凝土中核心混凝土的水化热、收缩与徐变计算模型研究[D]. 福州:福州大学, 2004.
- FENG Bin. Research on the calculation models of hydration heat, shrinkage and creep of core concrete in the steel tube[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [8] 刘振宇. 钢管混凝土拱肋截面温度场研究[D]. 福州:福州大学, 2006.
- LIU Zhenyu. Research on the temperature field of CFST arch rib section[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2006.
- [9] 林春姣, 郑皆连, 黄海东. 钢管混凝土拱计算合龙温度试验研究[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2010, 35(4): 601.
- LIN Chunjiao, ZHENG Jieliang, HUANG Haidong. Experimental study on the calculated closure temperature of concrete-filled steel tube arch [J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2010, 35(4): 601.
- [10] 张治成. 钢管混凝土拱桥混凝土灌注阶段的受力仿真分析[J]. 工程力学, 2007, 24(2): 146.
- ZHANG Zhicheng. Force analysis of CFST arch bridge during concrete casting [J]. Engineering Mechanics, 2007, 24 (2): 146.
- [11] 孙国富. 大跨度钢管混凝土拱桥日照温度效应理论及应用研究[D]. 济南:山东大学, 2010.
- SUN Guofu. Theory and application of solar radiation effect of long-span CFST arch bridge [D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [12] 刘恒. 施工阶段钢管拱非线性温度影响研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
- LIU Heng. Research on the effect of nonlinear temperature of steel tube arch during construction period [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.
- [13] 宣纪明, 向华伟, 芦可琪. 钢管混凝土拱桥拱肋水化热温度场和温度应力分析[J]. 桥梁建设, 2010(3): 29.
- XUAN Jiming, XIANG Huawei, LU Keqi. Analysis on hydration heat temperature field and temperature stress of CFST arch bridge[J]. Bridge Construction, 2010(3): 29.
- [14] 王江龙. 哑铃型钢管混凝土拱桥温度场及温度效应研究[D]. 西安:长安大学, 2015.
- WANG Jianglong. Research on the temperature field and thermal effects of dumbbell-shape CFST arch bridge [D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [15] YANG B, HUANG J H, LIN C J, *et al.* Experimental study on temperature fields of dumbbell-shape section of CFST arch rib and its effects[J]. Advanced Materials Research, 2011, 163-167: 2564.
- [16] 王友彪. 大跨度钢管混凝土温度场及温度效应分析[D]. 成都:西南交通大学, 2013.
- WANG Youbiao. Research on the temperature field and thermal effects of long-span CFST arch bridge [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [17] 荆旭. 钢管混凝土拱管内混凝土水化热及灌注方案研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012.
- JING Xu. Research on the hydration heat and casting scheme of CFST arch [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2012.
- [18] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 第2版. 北京:中国水利水电出版社, 2012.
- ZHU Bofang. Thermal stress and temperature control in mass concrete [M]. 2nd ed. Beijing: China Water & Power Press, 2012.
- [19] 张庆欢. 粉煤灰在复合胶凝材料水化过程中的作用机理[D]. 北京:清华大学, 2006.
- ZHANG Qinghuan. Mechanism of action of fly ash in hydration process of composite cementitious materials [D]. Beijing: Tsinghua University, 2006.
- [20] 孔祥谦. 有限单元法在传热学中的应用[M]. 第3版. 北京:科学出版社, 1998.
- KONG Xiangqian. Application of finite element method in heat transfer [M]. 3rd ed. Beijing: Science Press, 1998.
- [21] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.
- WANG Xucheng. Finite element method [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [22] 张增起, 石梦晓, 王强, 等. 等效龄期法在大体积混凝土性能预测中的准确性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2016, 56(8): 806.
- ZHANG Zengqi, SHI Mengxiao, WANG Qiang, *et al.* The accuracy of equivalent age method in predicting the performance of mass concrete [J]. Journal of Tsinghua University (Natural Science Edition), 2016, 56(8): 806.
- [23] NURSE R W. Steam curing of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1949, 1(2): 79.
- [24] SAUL A G A. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure [J]. Magazine of Concrete Research, 1951, 2(6): 127.
- [25] 高原, 张君, 罗孙一鸣. 基于水泥水化度的混凝土早期力学性能发展预测[J]. 工程力学, 2013, 30(10): 133.
- GAO Yuan, ZHANG Jun, LUO Sunyiming. Prediction of development of early mechanical properties of concrete based on cement hydration [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30 (10): 133.
- [26] HANSEN P F, PEDERSEN E J. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete [J]. Nordisk Betong, 1977, 41 (19): 21.
- [27] 马跃峰. 基于水化度的混凝土温度与应力研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- MA Yuefeng. Research on temperature and stress of concrete based on hydration degree [D]. Nanjing: Hohai University, 2006.
- [28] Neville A M. Properties of concrete [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.
- [29] LI Fangyuan, SHEN Yin. Full-scale test of the hydration heat and the curing method of the wet joints of a precast segmental pier of a bridge [J]. Revue Francaise de Génie Civil, 2017, 21 (3): 1.
- [30] 王甲春, 阎培渝. 基于等效龄期的粉煤灰混凝土抗压强度计算模型[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(4): 83.
- WANG Jiachun, YAN Peiyu. Computational model of compressive strength of fly ash concrete based on equivalent age [J]. Journal of Sun Yat-sen University (Natural Science Edition), 2014, 53(4): 83.