

混凝土徐变对坝体温度应力场的影响

李钦智

(新疆石河子市新疆玛纳斯河流域管理局, 新疆 石河子 832000)

【摘要】 徐变对温度应力影响很大,可使其减小一半左右。本文用有限单元法研究徐变对大体积混凝土结构温度应力的影响,对混凝土结构温度应力进行仿真计算。结果表明,徐变度越大,温度应力越小,二者近似服从二次函数关系。徐变对温度应力场的影响受水管冷却措施的影响较大,当水管冷却时间较长或水化热发热速率较快时,徐变对温度应力的影响作用明显减小。

【关键词】 混凝土; 坝体; 徐变度; 温度应力; 水管冷却

中图分类号: TV331

文献标识码: A

文章编号: 1005-4774(2017)02-0029-06

Influence of concrete creep on the stress field of dam temperature

LI Qinzhi

(Xinjiang Shihezi Xinjiang Manas River Basin Administration, Shihezi 832000, China)

Abstract: Creep has high influence on temperature stress. It can be decreased by about 50%. In the paper, Finite element method is applied for studying the influence of creep on the temperature stress of mass concrete structure. The temperature stress of concrete structure is simulated and calculated. The results show that creep degree is larger, temperature stress is smaller, and they obey the quadratic function relation approximately. Creep influence on temperature stress field is influenced by water pipe cooling measures strongly. The influence and function of creep on temperature stress are reduced prominently when water pipe cooling time is longer or the heating rate of hydration heat is faster.

Key words: concrete; dam body; creep degree; temperature stress; water pipe cooling

1 引言

由于施工时温度变化多样,大体积混凝土产生很大的拉应力,导致混凝土坝出现裂缝,直接影响工程施工安全。因此,对温度应力进行研究分析在混凝土结构设计中十分重要。在浇筑过程中,徐变对温度应力有很大影响。对大体积混凝土工程,徐变可降低或消除一部分由于温度变形所产生的破坏应力。徐变的计算模型有很多种,如:有效模量法模型及其改进模型^[2],徐变固化理论模型及其改进模型^[3-6],时间微分形式下的 Maxwell 模型、Kelvin 模型和 Burgers 模

型^[7-9],老化理论模型,弹性徐变理论模型及弹性徐变老化理论模型等^[1]。工程上一般建议采用朱伯芳提出的弹性徐变老化理论模型,它可以较好地反映早期混凝土在卸载作用下徐变的部分可恢复性质。此外,朱伯芳提出徐变对温度应力影响很大,可使温度应力减小一半左右^[1]。在徐变对混凝土结构温度应力的影响方面,虽然分析研究不少,但考虑的因素不够全面,一些重要的因素没有考虑,如:水管冷却和水化热发热速率等,因此,有必要深入研究这些因素的影响。

本文根据弹性老化徐变理论式建立模型,对大体积混凝土进行描述;采用有限元法基本原理,编写 C++

程序 TSC,对温度应力场进行仿真计算,从水管冷却、徐变和绝热温升 3 个条件入手,通过对混凝土浇筑块在有水管冷却、有无徐变、不同绝热温升和不同冷却时长下进行温度应力计算分析,并对计算结果进行拟合。

2 基本理论

2.1 单元应力计算

在复杂应力状态下时,应力增量与应变增量的关系:

$$\{\Delta\sigma_n\} = [\overline{D}_n]([\overline{B}]\{\Delta\delta_n\} - \{\Delta\varepsilon_n^T\} - \{\eta_n\}) \quad (1)$$

式中 $[\overline{D}_n]$ ——弹性矩阵;

$[\overline{B}]$ ——几何矩阵;

$\{\Delta\delta_n\}$ ——位移增量矩阵;

$\{\Delta\varepsilon_n^T\}$ ——温度应变;

$\{\eta_n\}$ ——徐变应变。

求出 $[\overline{D}_n]$ 、 $[\overline{B}]$ 、 $\{\Delta\delta_n\}$ 、 $\{\Delta\varepsilon_n^T\}$ 、 $\{\eta_n\}$ 代入式(1),可求解得到 $\{\Delta\sigma_m\}$ 。

由温度场的有限元方程:

$$\left(H + \frac{1}{\Delta t_n}R\right)T_{n+1} - \frac{1}{\Delta t_n}RT_n + F_{n+1} = 0 \quad (2)$$

式中 H ——热传导矩阵;

R ——热容矩阵;

T_n 及 T_{n+1} —— n 时刻和 $n+1$ 时刻节点温度向量;

F_{n+1} ——温度荷载向量。

求式(2),可得各节点在 $n+1$ 时刻的 $\{T_{n+1}\}$,由 $\{\Delta\varepsilon_n^T\} = \alpha\{\Delta T_n\}$ 可以算出 $\{\Delta\varepsilon_n^T\}$ 。

由徐变公式:

$$c(t, \tau) = c_1(1 + 9.2\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.3(t-\tau)}] + c_2(1 + 1.7\tau^{-0.45})[1 - e^{-0.005(t-\tau)}] \quad (3)$$

其中 $c_1 = 0.23/E_0$; $c_2 = 0.52/E_0$

式中 t ——时间;

τ ——加载龄期;

E_0 ——混凝土弹性模量。

代入式(4)中:

$$[\overline{D}_n] = \overline{E}_n [Q]^{-1} = \frac{E(\overline{\tau}_n)}{1 + E(\overline{\tau}_n)c(t_n, \overline{\tau}_n)}$$

$$\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)} \begin{bmatrix} 1 & \frac{\mu}{1-\mu} & 0 \\ \frac{\mu}{1-\mu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2\mu}{2-2\mu} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $[\overline{D}_n]$ 、 $[\overline{D}_n]$ ——弹性矩阵;

μ ——泊松比;

$\overline{\tau}_n$ ——中点龄期。

$$\begin{cases} c(t, \tau) = \sum_{s=1}^2 \psi_s(\tau) [1 - e^{-r_s(t-\tau)}] \\ r_s(\tau) = r_0 + r_1 \tau^{-s} \\ \Delta \varepsilon_n^c = \varepsilon^c(t_n) - \varepsilon^c(t_{n-1}) = \eta_n + \Delta \sigma_n C(t_n, \overline{\tau}_n) \\ \eta_n = \sum_{s=1}^2 (1 - e^{-r_s \Delta T_n}) W_{sn} \\ \Delta \tau_n = \tau_n - \tau_{n-1} \\ W_{sn} = W_{s,n-1} e^{-r_s \Delta \tau_{n-1}} + \Delta \sigma_{n-1} \psi_s \overline{\tau}_{n-1} e^{-0.5 r_s \Delta \tau_{n-1}} \\ W_{s1} = \Delta \sigma_0 \psi_s(\overline{\tau}_0) \end{cases} \quad (5)$$

式中 ψ_s 、 r_0 、 r_1 ——材料常数。

η_n 可由递推公式算出,其中大部分变量为计算过程中的中间量,该递推式在运算中可将其抵消。

有限元的平衡方程为:

$$[K]\{\Delta\delta_n\} = \{\Delta P_n\} + \{\Delta P_n^c\} + \{\Delta P_n^T\} \quad (6)$$

式中 $[K]$ ——结构刚度矩阵;

$\{\Delta\delta_n\}$ ——位移增量矩阵;

$\{\Delta P_n\}$ ——外荷载增量;

$\{\Delta P_n^c\}$ ——徐变引起的结点荷载增量;

$\{\Delta P_n^T\}$ ——温度引起的结点荷载增量。

结构刚度矩阵 $[K] = \int [B]^T [\overline{D}_n] [B] dv$ 。

外荷载增量 $\{\Delta P_n\} = \int [B]^T \{\Delta\sigma_n\} dv$,其中 $\{\Delta\sigma_n\}$ 为应力增量。

温度荷载增量 $\{\Delta P_n^T\} = \int [B]^T [\overline{D}_n] \{\Delta\varepsilon_n^T\} dv$

徐变荷载增量 $\{\Delta P_n^c\} = \int [B]^T [\overline{D}_n] \{\eta_n\} dv$

其中,上式求得的 $\{\Delta P_n^T\}$ 和 $\{\Delta P_n^c\}$ 代表非应力变形所引起的结点力,将 $[K]$ 、 $\{\Delta P_n\}$ 、 $\{\Delta P_n^T\}$ 和 $\{\Delta P_n^c\}$ 代入式(6),可以解出位移增量矩阵 $\{\Delta\delta_n\}$ 。

将求解出的 $[\overline{D}_n]$ 、 $[B]$ 、 $\{\Delta\delta_n\}$ 、 $\{\Delta\varepsilon_n^T\}$ 、 $\{\eta_n\}$ 代入到式(1),得到 $\{\sigma\}$ 。

2.2 混凝土表面散热对水管冷却效果的影响

除了开始冷却时的混凝土温度 T_o 与水管水温 T_w 的差值($T_o - T_w$)以及水泥水化热外,混凝土表面散热也会影响到水管冷却的效果。董福品提出了考虑混凝土表面散热对水管冷却效果影响的计算方法^[10]。

把时间分为时段 $\Delta\tau_i$, $\Delta\tau_i = \tau_i - \tau_{i-1}$, T_{mi} 为第 i 时段末 τ_i 时刻混凝土的平均温度。假设 $\Delta\tau$ 由于混凝土表面散热引起的混凝土平均温度降低为 ΔT_u ,且 ΔT_u 只发生在时段末。

第 n 时段的 ΔT_{un} 为:

$$\Delta T_{un} = T_{on} + \sum_{i=1}^n \Delta\theta_{i,n} - \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_{u,i} \phi(\tau_n - \tau_i) - T_{mn} \quad (7)$$

混凝土外表面散热对水管冷却效果的影响计算

如下:

$$\begin{cases} T_{j1} = 0 \\ T_{j2} = \Delta T_{u1} - \Delta T_{u1} \phi(\Delta\tau_2) = \Delta T_{u1} [1 - \phi(\Delta\tau_2)] \\ T_{j3} = \Delta T_{u1} - [1 - \phi(\Delta\tau_2 + \Delta\tau_3)] + \Delta T_{u2} [1 - \phi(\Delta\tau_2)] \\ T_{jn} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_{u,i} [1 - \phi(\tau_n - \tau_i)] \end{cases} \quad (8)$$

式中 T_{jn} ——从 τ_o 到 τ_n 时间混凝土表面散热对水管冷却效果的影响。

3 计算模型及参数的选取

计算模型由混凝土浇筑块和基岩组成,浇筑块高13.5m,分9层浇筑,每层1.5m厚,假定每层瞬时浇筑完成,每个浇筑层划分为3层网格(见图1),混凝土浇筑层与层之间的浇筑间歇为10d。

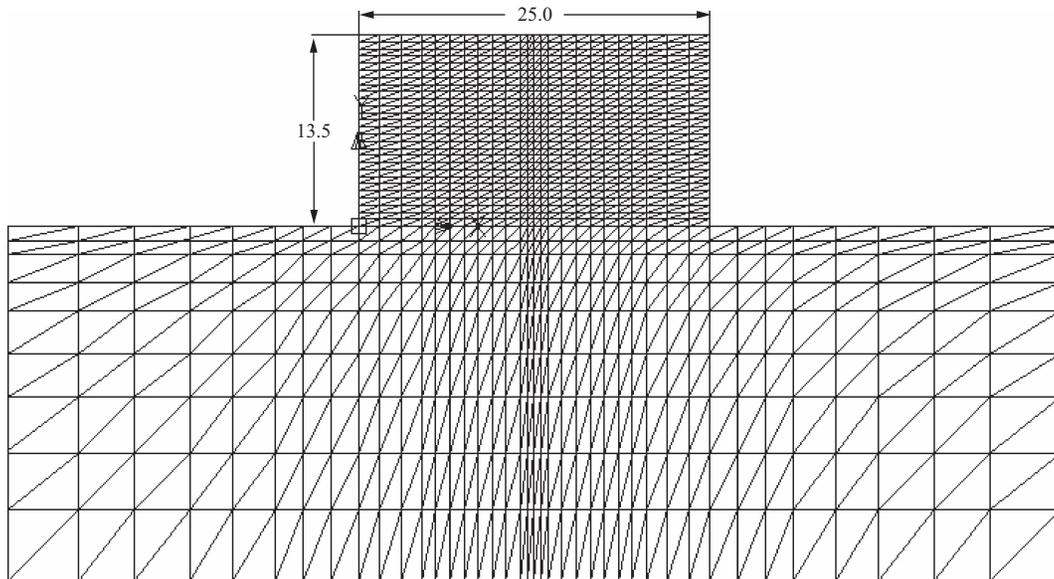


图1 计算模型

计算参数见表1。

表1 模拟参数

材料名称	导温系数/ (m^2/h)	导热系数/ [$kJ/(m \cdot ^\circ C)$]	放热系数/ [$kJ/(m \cdot ^\circ C)$]	线胀系数/ ($1/^\circ C$)	泊松比 μ	绝热温升/ [$\theta(\tau)/^\circ C$]	弹性模量 $E(\tau)$ / MPa
混凝土	0.004	10	60	1×10^{-2}	0.167	$\frac{25\tau}{1+\tau}$	$30000[(1 - e^{-0.40+0.34})]$
岩基	0.004	10	60	1×10^{-2}	0.200	0	30000

无水管冷却工况下,混凝土浇筑温度和气温均设为0℃。

有水管冷却工况下,设混凝土3月浇筑,浇筑温度取为17.1℃。表2为12个月的气温。

表2 气温

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
气温/℃	12.4	13.4	17.1	21.4	25.5	27.4	28.7	28.3	27	23.6	18.7	14.4

4 计算结果及分析

4.1 无水管冷却工况

由二结点法算出混凝土浇筑模型中间截面的最大主应力,对浇筑层的接触面运用线性插值法得出接触面上最大主应力,画出模型温度应力图。所得应力图见图2。(由于篇幅原因,且应力图走势相似,本文只以1倍徐变的应力图对其进行分析。)

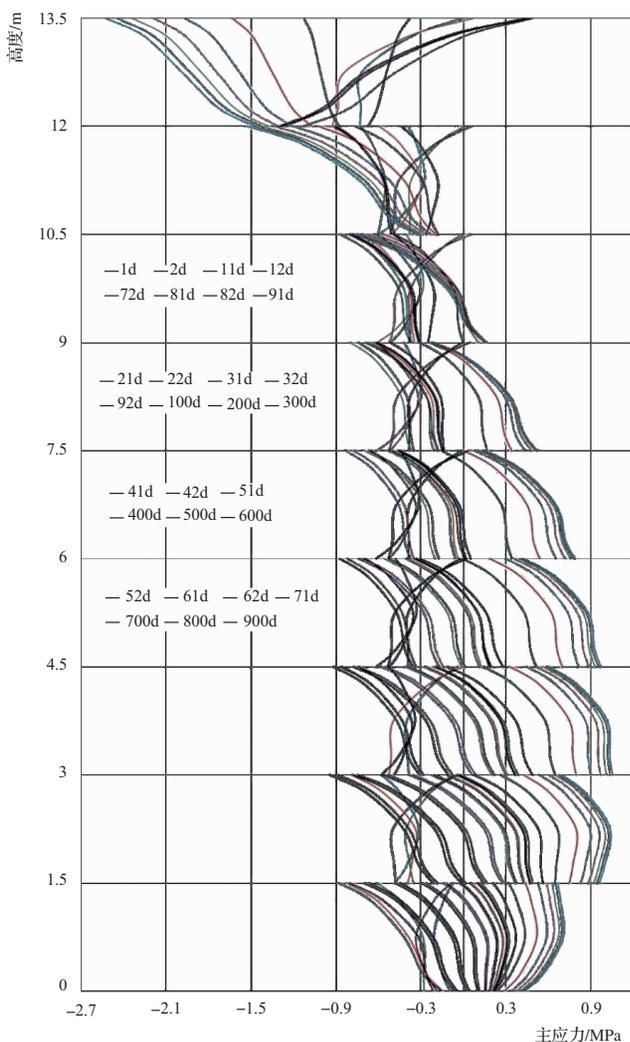


图2 模型中间截面应力图

由图2可知,浇筑初期,层面中间截面受到了压应力。因为暴露早期的混凝土表面温度升高,应力转为压应力。到后期混凝土表面完全冷却后,由于受到基础约束作用,压应力再转变为拉应力。由于前七层应力走势相似,现单独拿出最后两层详细说明。第九层浇筑于81d后,浇筑后表面长期暴露。早期部分受压,后期全面受压。由于长期暴露,表面温度降低,内部完全冷却后,表面产生了压应力。对于整体模型而言,上面两层可以近似看作模型的表面。所以第八层应力走势与第九层相似。而第八层较第九层更靠近内部,温度变化幅度不如第九层大,所以应力变化幅度不及第九层。

定义温度应力减小百分比为:

$$\lambda = \frac{\sigma'_1 - \sigma_1}{\sigma'_1} \quad (9)$$

式中 λ ——温度应力减小百分比;

σ_1 ——有徐变度时的最大主应力;

σ'_1 ——无徐变度时的最大主应力。

由模型计算结果可知:

$$\sigma'_1 = 1.052\text{MPa}, \sigma_1 = 0.692\text{MPa}。$$

带入上式可得:

$$\lambda = \frac{\sigma'_1 - \sigma_1}{\sigma'_1} = 34.22\%$$

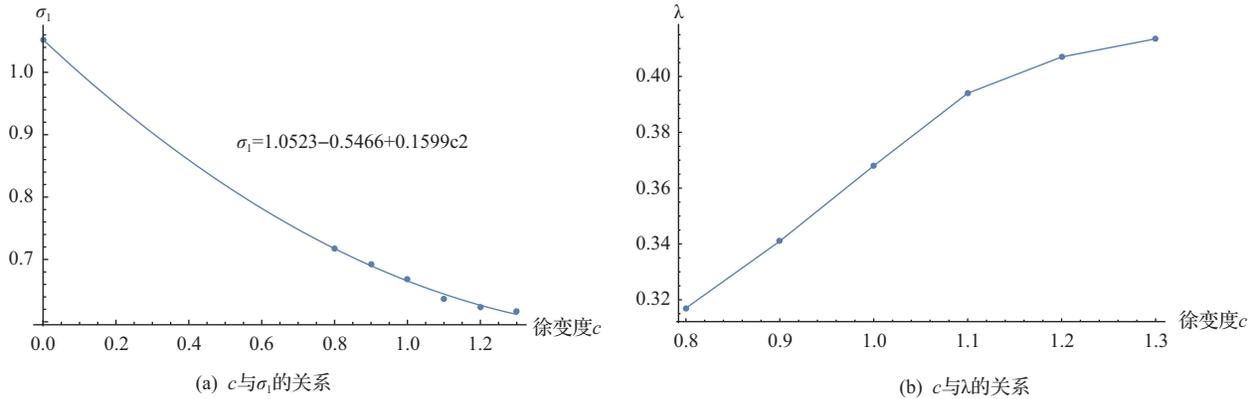
可以得出结论:混凝土的徐变对于温度应力具有很大影响。

考虑到不同徐变对温度应力会产生趋势效果,在计算中徐变度分别取为无徐变、0.8倍徐变、0.9倍徐变、1倍徐变、1.1倍徐变、1.2倍、1.3倍徐变,建立不同徐变度对温度应力的影响变化。计算结果见表3。

表3 无水管冷却的计算结果

徐变度名称	无徐变	0.8 倍徐变度	0.9 倍徐变度	1 倍徐变度	1.1 倍徐变度	1.2 倍徐变度	1.3 倍徐变度
σ_2/MPa	1.052	0.718	0.692	0.669	0.637	0.623	0.617
$\lambda = \frac{\sigma_2' - \sigma_1}{\sigma_1'}$	—	31.70%	34.10%	36.80%	39.40%	40.70%	41.35%

根据表3,绘制徐变度的倍数 c 与 λ 、 σ_2 的关系图, 见图3。

图3 c 与 λ 、 σ_1 的关系

由图3(a)可知,随着徐变增大, σ_1 逐渐减小,但其减小速率亦逐渐放缓,利用 Mathematica 对这组数据寻找最佳拟合函数为:

$$\sigma_1 = 1.0523 - 0.5466c + 0.1599c^2; R^2 = 0.99 \quad (10)$$

由图3(b)可知,当徐变度在 0.8 ~ 1.1 时, λ 随着徐变度的增大而增大,且其斜率固定,约为 0.258;当徐变度在 1.1 ~ 1.2 时,其斜率约为 0.13。说明当徐变度在 1.1 ~ 1.2 时, λ 随着徐变度增大而增大的速率降低,约为前一段的 50%。当徐变度在 1.2 ~ 1.3 时,其斜率约为 0.075。说明当徐变度在 1.2 ~ 1.3 时, λ 随着徐变度增大而增大的速率降低,约为前一段的 50%;总体而言, λ 随着徐变度的增大而增大。当徐变度小于 1.1 时, λ 随着徐变度的增大以固定速率增长;当徐变度大于 1.1 时, λ 的增长速率开始出现衰减,约为原来增长速率的 50%。

4.2 有水管冷却工况

考虑在加入水管冷却条件下,徐变对混凝土温度

应力的影响程度大小。水管采用 HDPE 管,外径 32mm,长 250m,水管水平间距 2.0m,竖直方向间距 1.5m,流量 1.2m³/h,冷却水温为 12℃。

在采用水管冷却措施工况下,分别计算不同水化热发热速率情况下有无徐变时的温度应力。计算中,混凝土的绝热温升 $\theta = 25\tau/(n + \tau)$ 中 n 分别取值为 1、2、4,水管冷却时间分别为 15d 和 25d。计算结果见图 4。

为了直观描述水管冷却和水化热发热速率对 λ 的影响绘制冷却 15d 时,水化热达到一半时龄期 n 与 λ 的关系,见图 4(a); $n = 2$ 时,冷却时间与 λ 的关系,见图 4(b)。

由图 4(a)可知,随着 n 值增大, λ 先增大后减小。当 n 值越小,水化热发展速率越快。 $n < 3$ 时, λ 随着 n 值增大而增大,即水化热发展速率较快时, σ_1' 与 σ_1 的差异较小; $n > 3$ 时, λ 随着 n 值增大而减小,即水化热发展速率较快时, σ_1' 与 σ_1 的差异较大;在有水管冷却的工况下,混凝土徐变对温度应力的影响作用随着水化热发展速率增加先增大后减小。

由图4(b)可知,在相同的水化热发展速率下,水管冷却时间由15d增加到25d时, λ 由47%降低为20%。

可见,水管冷却时间对 λ 的影响很大。

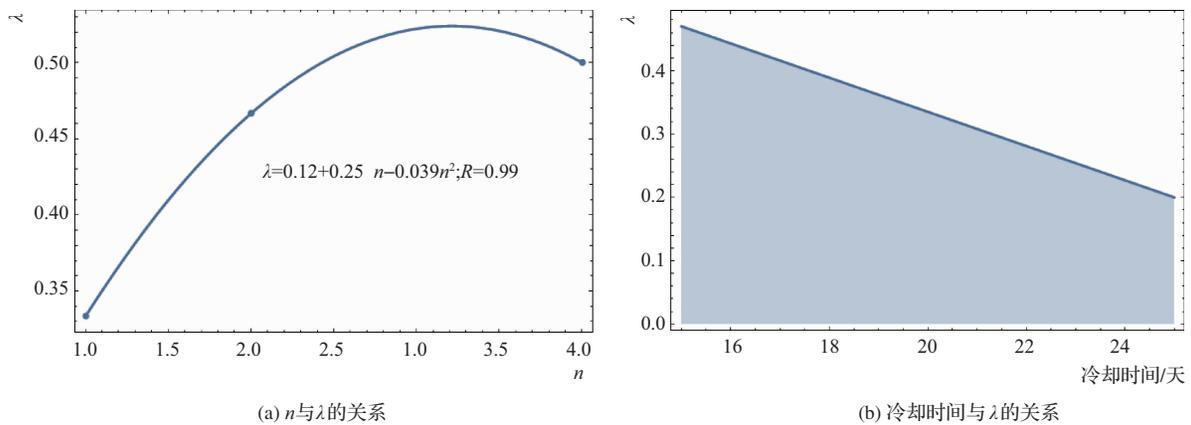


图4 冷却时间、 n 与 λ 的关系

5 结论

a. 随着混凝土徐变度的增大,大体积混凝土结构中的温度应力逐渐减小,但其减小速率亦逐渐放缓,温度应力和徐变度之间的函数关系近似为 $\sigma_1 = 1.0523 - 0.5466c + 0.1599c^2$ 。当徐变度小于1.1时, λ 随着徐变度的增大以固定速率增长;当徐变度大于1.1时, λ 增长速率开始出现衰减,约为原来增长速率的50%。

b. 徐变对混凝土结构温度应力的作用受水管冷却的影响较大。在有水管冷却的工况下,随着水化热发展速率的增加,徐变对温度应力的影响作用先增大后减小。在相同的水化热发展速率下,当水管冷却时间增加时,徐变对温度应力的影响作用减小。◆

参考文献

[1] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
 [2] Bazant Z P, Hon M, Mija H Hubler, et al. Improved estimation of long-term relaxation function from compliance function of aging concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(2): 146-152.

[3] Bazant Z P, Prasanna S. Solidification theory for concrete-creep(I) : formulation [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1989, 115(8) : 1691-1703.
 [4] Havlásek P, Jirásek M. Modeling of concrete creep based on microstress-solidification theory [J]. Acta Polytechnica, 2012, 52(2) : 34-42.
 [5] Wei Y, Hansen W. Tensile creep behavior of concrete subject to constant restraint at very early ages [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25(9) : 1277-1284.
 [6] Wendner R, Hubler M H, Bazant Z P. The B4 model for multi-decade creep and shrinkage prediction [C]. Proceedings of CONCREEP-9. Cambridge: MIT, 2013 : 429-436.
 [7] Anders Boe Hauggaard, Lars Damkilde, Per Freiesleben Hansen. Transitional thermal creep of early age concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1999, 125(4) : 458-465.
 [8] 刘杏红, 周伟, 常晓林. 改进的非线性徐变模型及其在混凝土坝施工期温度应力仿真分析中的应用 [J]. 岩土力学, 2009, 30(2) : 440-446.
 [9] 黄耀英, 郑宏, 周宜红. 考虑混凝土龄期及弹塑性模型徐变的大体积混凝土温度应力研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2011, 43(2) : 22-27.
 [10] 董福品. 考虑表面散热对冷却效果影响的混凝土结构水管冷却等效分析 [J]. 水利水电技术, 2001, 32(6) : 16-19.