文章编号:1674-2974(2016)05-0030-09

多场耦合下大体积混凝土初次蓄水的温度应力问题研究*

严 俊[1],魏迎奇[1],蔡 红[1],璩爱玉[2]
(1.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100048;
2.环境保护部环境规划院,北京 100012)

摘 要:在大体积混凝土坝初次蓄水时,温度较低的库水必然会对坝体温度场产生较明显的影响,从而影响坝体的变形,甚至产生温度裂缝.为分析大体积混凝土初次蓄水的温度应力,本文将混凝土类多孔介质视为连续介质,综合运用水力学、热学和固体力学等基本理论,根据动量守恒、质量守恒和能量守恒方程建立了以位移、孔隙水压力、孔隙气压力、温度和孔隙率为未知量的多场耦合数学模型,在此基础上编制了有限元计算程序,并对大体积碾压混凝土块的渗流场、温度场和应力场进行了耦合分析,结果表明,考虑耦合后块体温降幅度及温度大主应力均较不考虑耦合条件下大.

关键词:多场耦合;数学模型;大体积混凝土;温度应力
中图分类号:TU43 **文献标识码**:A

Research on Thermal Stress of Mass Concrete under Hydro-thermo-mechanical Coupling During Initial Impoundment

YAN Jun[1], WEI Ying-qi[1], CAI Hong[1], QU Ai-yu[2]
(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China; 2. Chinese Academy for Environmental Planning, Beijing 100012, China)

Abstract: During the initial impoundment of mass concrete dam, the reservoir water with low temperature would be critical to the temperature field of dam body, which affects the deformation of dam body and even results in temperature cracks. Therefore, in order to investigate the thermal stress distribution of mass concrete during the initial impoundment, the concrete was assumed as a continuous porous media in this paper. In consideration of the basic theories of solid mechanics, hydraulics, and thermodynamics, the multi-field coupling equations of unsaturated porous media that include momentum conservation, mass conservation, and energy conservation were provided as the function of displacements, pore liquid pressure, pore gas pressure, temperature, and porosity. The finite element analysis program was then developed. A mass roller-compacted concrete block was considered for coupling analyses on the seepage field, temperature field, and stress field. The analysis results show that the temperature reduction and principle thermal stress of the concrete block considering the multi-field coupling process are greater than those without the coupling effect.

* **收稿日期**:2015-04-14
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51409278),National Natural Science Foundation of China(51409278);国家重点基础研究发展计划(973计划)资助项目(2014CB047004)
作者简介:严 俊(1984—),男,湖北襄阳人,中国水利水电科学研究院博士
† 通讯联系人,E-mail:yanjun@iwhr.com

Key words: multi-field coupling; mathematical model; mass concrete; thermal stress

在水利工程中,尤其是对大体积混凝土而言,较大的温度拉应力会引起混凝土的温度裂缝,因此温度应力是大体积混凝土需要额外关注的.在水库初次蓄水时,温度较低的库水必然会对坝体温度场产生较明显的影响,从而影响混凝土坝的变形,甚至产生温度裂缝.如国际上,在 Revslstoke[1],Dworshak[2]和 Russel[3]等重力坝的上游表面曾经产生过严重的劈头裂缝,深入坝内几十米,有的甚至将整个坝段一分为二,产生严重漏水.目前一般都认为是在施工过程中坝体的上游侧如果出现了表面裂缝,水库蓄水之后,经过一段时间,表面裂缝突然大范围地扩展,成为劈头裂缝,尤其是通仓浇筑的混凝土重力坝更容易出现这种劈头缝,分析其原因主要是由于这类坝没有布置纵缝,不进行二期冷却,在水库初次蓄水时,坝体温度还很高,与外界低温的库水之间形成较大的内外温差,容易使表面扩展成为劈头缝[4].由此可见,初次蓄水对混凝土重力坝的温度场和应力场的影响是需要加以研究的,并为采取有效、合理地渗控措施提供科学依据.

事实上,如果将混凝土坝体也视为多孔介质,则蓄水时渗流的产生也是必然的,若考虑库水入渗,坝体非稳定温度场的变化将更加复杂.考虑渗流因素的存在,对大体积混凝土坝体温控防裂及应力状态研究都有直接意义.国内已经有学者用多场耦合的方法来求解大体积混凝土的渗流场-温度场耦合作用[5-7]、渗流场-温度应力耦合作用[8]等.

本文在总结国内外学者对多孔介质多场耦合的机理、数学模型建立及求解方法的研究成果基础上,将混凝土视为多孔介质,综合运用固体力学、水力学、热学等基本理论,结合多孔介质的热本构关系以及孔隙流体的热运动规律,建立了混凝土多相、多场全耦合数学模型方程组,并编制了有限元求解程序,对某一大体积混凝土模型初次蓄水后一段时间内的渗流场、温度场、应力场进行耦合分析,以初步阐释大体积混凝土初次蓄水时渗流场对坝体温度场、应力场的影响过程.

1　混凝土类多孔介质概念模型及热本构关系模型

1.1　混凝土概念模型

国内外有些学者提出了关于多孔介质的多场耦合模型[9-13].事实上,非饱和状态下的混凝土材料也可视为连续性多孔介质,其特征单元体主要由固相、液相和气相三相构成,其中固相介质主要为经硬化后形成具有堆聚结构的复合物.特征单元体的体积 V 可以用式(1)表示:

$$V = V_s + V_l + V_g. \tag{1}$$

其中:V_s,V_l 和 V_g 分别为固体介质、液体介质和气体介质的体积.

假设 ρ_s,ρ_l 和 ρ_g 分别为固体介质、液体介质和气体介质的密度,m_s,m_l 和 m_g 分别为固体介质、液体介质和气体介质的质量,且满足 $m = \rho V$,$m_s = \rho_s V_s$,$m_l = \rho_l V_l$,$m_g = \rho_g V_g$.

定义 $n^s = V_s/V$,$n^l = V_l/V$,$n^g = V_g/V$ 分别为固相、液相、气相的体积分数;定义表征单元体的孔隙体积为 V_v,则有 $V_v = V_l + V_g$,相应地,定义 n 为孔隙率,有:

$$n = V_v/V = n^l + n_g. \tag{2}$$

1.2　混凝土类多孔介质热本构关系模型

1.2.1　固相介质的热本构关系

当温度发生变化时,混凝土类多孔介质将由于受热发生膨胀、受冷而发生收缩,从而产生应变.如果多孔介质热变形受到边界的约束,就会产生应力.

混凝土的热本构关系表达方式比较多[14-18],为了利用这些成熟的本构关系,同时考虑温度变化对多孔介质的影响,可以给出以增量形式表述的热本构关系如式(3)所示:

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{D} : [\mathrm{d}\varepsilon - \mathrm{d}\,\boldsymbol{\varepsilon}_T]. \tag{3}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}'$ 为有效应力张量;$\boldsymbol{D}$ 为刚度张量,可以为弹性张量,可以为弹塑性张量;ε 为总应变张量;$\boldsymbol{\varepsilon}_T = \beta_T(T - T_0)\boldsymbol{\delta}$ 可以为受温度影响而产生的应变张量;β_T 为固体骨架的热膨胀系数.

1.2.2　液相介质热运动的广义 Darcy 定律

在考虑温度变化的条件下,温度梯度同样是引起渗流运动的因素[19],为此,可以将 Darcy 定律拓展为变温条件下的广义 Darcy 定律,如式(4)所示:

$$\boldsymbol{v}^{lr} = -k_{rl}\boldsymbol{k}(\nabla p_l - \rho_l \boldsymbol{g})/\mu_l - \boldsymbol{k}_{lT}\nabla T. \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{k}$ 为介质的本征饱和渗透张量;k_{rl} 为液体的相对渗透性系数,非饱和区域,$k_{rl} \in (0,1)$;饱和区域,$k_{rl} = 1.0$;$\boldsymbol{k}_{lT}$ 为液相的热耦合张量.

1.2.3　气相介质热运动的广义 Darcy 定律

在变温条件下,对于多孔介质中气相的流动,同

样会受到温度梯度的影响. 为此也将气相介质运动的 Darcy 定律拓展为变温条件下的广义 Darcy 定律[20],如式(5)所示:

$$\boldsymbol{v}^{\mathrm{gr}} = n(1-S)\,\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{r}} = -k_{\mathrm{rg}}\boldsymbol{k}\,\nabla p_{\mathrm{g}}/\mu_{\mathrm{g}} - \boldsymbol{k}_{\mathrm{gT}}\,\nabla T. \tag{5}$$

式中:k_{rg} 为气体的相对渗透性系数;$\boldsymbol{k}_{\mathrm{gT}}$ 为气相的热耦合张量;μ_{g} 为气相的动力粘滞系数;$\boldsymbol{v}_{\mathrm{g}}^{\mathrm{r}}$ 为气体相对于固体骨架的速度向量.

1.2.4 温度场的热传导定律

在研究温度场的问题时,广义的 Fourier 定律[21]作为基本定律,它是指在导热过程中,单位时间内通过给定截面所传递的热量,正比例垂直于该截面方向上的温度变化率,而热量传导的方向与温度升高的方向相反,用数学表达式表示为:

$$\boldsymbol{q} = -\lambda\,\nabla T. \tag{6}$$

式中:$\boldsymbol{q}$ 为热流密度矢量即单位时间内通过单位面积的热通量矢量;T 为温度分布矢量;λ 为导热系数,其影响因素包括介质的种类、材料组分、湿度和压力等.

2 混凝土类多孔介质多场耦合的控制方程

混凝土类多孔介质非饱和状态下多场耦合的控制方程将主要基于上述非饱和多孔介质的概念模型及其相应的热本构关系[22]:

2.1 变形场控制方程

对于一个非饱和多孔介质的单元体来说,其准静态下的应力平衡方程如式(7):

$$\nabla\cdot\boldsymbol{\sigma} + \rho\boldsymbol{g} = 0. \tag{7}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}$ 为总应力张量.

对于多孔介质非饱和状态下,总应力张量的增量形式可以用 Biot 有效应力原理来表示[23],即

$$\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma} = \mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}' - \alpha_{\mathrm{l}}\mathrm{d}p_{\mathrm{l}}\boldsymbol{\delta} - \alpha_{\mathrm{g}}\mathrm{d}p_{\mathrm{g}}\boldsymbol{\delta}. \tag{8}$$

式中:$\boldsymbol{\sigma}'$ 为有效应力张量;$\boldsymbol{\delta}$ 为 Kronecker 张量算子;α_{l},α_{g} 为有效应力增量系数;p_{l},p_{g} 分别为孔隙水压力和孔隙气压力.

将介质热应力应变关系代入式(8),并将总应力表示的平衡方程替换成有效应力表示的平衡方程,于是得到增量形式的变形场控制方程有:

$$\nabla\cdot[\boldsymbol{D}:\nabla\mathrm{d}\boldsymbol{u} - \boldsymbol{D}:\beta_{\mathrm{T}}\mathrm{d}T\boldsymbol{\delta} - \alpha_{\mathrm{l}}\mathrm{d}p_{\mathrm{l}} - \alpha_{\mathrm{g}}\mathrm{d}p_{\mathrm{g}}\boldsymbol{\delta}] + \mathrm{d}\rho\boldsymbol{g} = 0. \tag{9}$$

2.2 连续性方程

根据质量守恒方程可以得到液相介质的连续性方程:

$$-\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{l}}n^{\mathrm{l}}\,\boldsymbol{v}_{\mathrm{l}}) = \partial(\rho_{\mathrm{l}}n^{\mathrm{l}})/\partial t. \tag{10}$$

考虑到液体的密度是压力和温度的函数 $1/\rho_{\mathrm{l}}\mathrm{d}\rho_{\mathrm{l}} = c_{\mathrm{lp}}\mathrm{d}p_{\mathrm{l}} + c_{\mathrm{lT}}\mathrm{d}T$,式中 c_{lp} 为液体的压缩性系数、c_{lT} 为液体的热膨胀系数,二者满足 $c_{\mathrm{lp}} = \partial\rho_{\mathrm{l}}/\rho_{\mathrm{l}}\partial p_{\mathrm{l}}$,$c_{\mathrm{lT}} = -\partial\rho_{\mathrm{l}}/\rho_{\mathrm{l}}\partial p_{\mathrm{l}}$.

考虑到饱和度为温度、孔隙率以及吸力等的函数,而其中吸力和温度是影响饱和度的最重要因素,因此有:$\mathrm{d}S = c_{\mathrm{Sp}}\mathrm{d}(p_{\mathrm{g}} - p_{\mathrm{l}}) + c_{\mathrm{ST}}\mathrm{d}T$,式中 $c_{\mathrm{Sp}} = \partial S/\partial s$ 为吸力对饱和度的影响系数;$c_{\mathrm{ST}} = \partial S/\partial T$ 为温度对饱和度的影响系数.

引入物质导数 $D(\cdot)/Dt = \partial(\cdot)/\partial t + \boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}\cdot\nabla(\cdot)$,式中 $\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}$ 为固相介质的绝对速度向量. 由式(10)可以得到液相介质的连续性方程:

$$\begin{aligned}&\nabla\cdot\left[\rho_{\mathrm{l}}\frac{k_{\mathrm{rl}}\boldsymbol{k}}{\mu_{\mathrm{l}}}(\nabla p_{\mathrm{l}} - \rho_{\mathrm{l}}\boldsymbol{g}) + \rho_{\mathrm{l}}\,\boldsymbol{k}_{\mathrm{lt}}\,\nabla T\right] = \\ &\rho_{\mathrm{l}}nS\frac{\partial\varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial t} + \rho_{\mathrm{l}}n(Sc_{\mathrm{lp}} - c_{\mathrm{Sp}})\frac{\partial p_{\mathrm{l}}}{\partial t} + \rho_{\mathrm{l}}nc_{\mathrm{Sp}}\frac{\partial p_{\mathrm{g}}}{\partial t} + \\ &\rho_{\mathrm{l}}n(c_{\mathrm{ST}} - Sc_{\mathrm{lT}})\frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{\mathrm{l}}S\frac{\partial n}{\partial t}.\end{aligned} \tag{11}$$

式中:ε_{v} 为固体骨架的体积应变.

同样地,多孔介质中的气相介质的连续性方程可以写成:

$$\begin{aligned}-\nabla\cdot(\rho_{\mathrm{g}}\,\boldsymbol{v}^{\mathrm{gr}}) = {}&\rho_{\mathrm{g}}\frac{D[n(1-S)]}{Dt} + n(1-S)\frac{D\rho_{\mathrm{g}}}{Dt} + \\ &\rho_{\mathrm{g}}n(1-S)\,\nabla\cdot\boldsymbol{v}_{\mathrm{s}}.\end{aligned} \tag{12}$$

式中:$\boldsymbol{v}^{\mathrm{gr}}$ 为气体平均相对速度向量.

考虑到气相为理想状态下的气体,因此其状态可以用以下方程[24]来描述:

$$\rho_{\mathrm{g}} = p_{\mathrm{g}}m_{\mathrm{g}}/RT. \tag{13}$$

式中:m_{g} 为气体的分子量;R 为常数.

一般地,R/m_{g} 为常数,于是可以得到:$1/\rho_{\mathrm{g}}\mathrm{d}\rho_{\mathrm{g}} = 1/p_{\mathrm{g}}\mathrm{d}p_{\mathrm{g}} - 1/T\mathrm{d}T$,且定义 $c_{\mathrm{gp}} = 1/p_{\mathrm{g}}$,$c_{\mathrm{gT}} = 1/T$ 分别为气体的压缩系数和温度膨胀系数,结合式(10)~(13),可以得到多孔介质中理想气体的连续性方程:

$$\begin{aligned}&\nabla\cdot\left[\rho_{\mathrm{g}}\frac{k_{\mathrm{rg}}k}{\mu_{\mathrm{g}}}\nabla p_{\mathrm{g}} + \rho_{\mathrm{g}}\,\boldsymbol{k}_{\mathrm{gT}}\,\nabla T\right] = \rho_{\mathrm{g}}n(1-S)\frac{\partial\varepsilon_{\mathrm{v}}}{\partial t} + \\ &\rho_{\mathrm{g}}n[(1-S)c_{\mathrm{gp}} - c_{\mathrm{sp}}]\frac{\partial p_{\mathrm{g}}}{\partial t} + \rho_{\mathrm{g}}nc_{\mathrm{Sp}}\frac{\partial p_{\mathrm{l}}}{\partial t} - \\ &\rho_{\mathrm{g}}n[(1-S)c_{\mathrm{gT}} + c_{\mathrm{ST}}]\frac{\partial T}{\partial t} + \rho_{\mathrm{g}}(1-S)\frac{\partial n}{\partial t}.\end{aligned} \tag{14}$$

同样地,将固相介质的连续性方程写为:

$$D(1-n)/Dt+(1-n)D\rho_s/\rho_s Dt+(1-n)\nabla\cdot \boldsymbol{v}_s=0. \tag{15}$$

固相介质的密度[25]可以写为：

$$\frac{\rho_s}{\rho_{s0}}=1+\frac{\alpha_l p_l+\alpha_g p_g}{K_s}-\beta_T(T-T_0)-\frac{\mathrm{tr}\boldsymbol{\sigma}'-\mathrm{tr}\,\boldsymbol{\sigma}_0'}{3(1-n)K_s}. \tag{16}$$

式中：K_s 为固体颗粒的压缩模量.

考虑混凝土为弹性介质，则固相介质连续性方程为：

$$\frac{\partial n}{\partial t}-(\alpha-n)\left(\frac{\partial\varepsilon_v}{\partial t}+\frac{\alpha_l}{K_s}\frac{\partial p_l}{\partial t}+\frac{\alpha_g}{K_s}\frac{\partial p_g}{\partial t}-\beta_T\frac{\partial T}{\partial t}\right)=0. \tag{17}$$

式中：$\alpha=1-K/K_s$ 为 Biot 系数.

2.3　能量守恒方程

根据能量守恒，任意选取的单元体中固相介质的能量守恒方程可以写为：

$$(1-n)C_s\rho_s\partial T/\partial t+\nabla\cdot \boldsymbol{q}_s=Q^s+\boldsymbol{\sigma}^s:\nabla\boldsymbol{v}_s. \tag{18}$$

式中：$\boldsymbol{q}_s$ 为流入单元体中固相的热通量；C_s 为固相介质的比热；ρ_s 为固相介质的密度；t 为时间；$\boldsymbol{\sigma}^s$ 为作用于单元体中固相的应力；Q^s 为混凝土内部热源，主要是水泥的水化热.

非饱和介质单元体中液相的能量守恒方程为：

$$nSC_l\rho_l\partial T/\partial t+C_l\rho_l\,\boldsymbol{v}^{lr}\cdot\nabla T+\nabla\cdot \boldsymbol{q}_l=\boldsymbol{\sigma}^l:\nabla(\boldsymbol{v}_l^r+\boldsymbol{v}_s). \tag{19}$$

式中：σ^l 为作用于单元体中液相的应力.

非饱和多孔介质单元体中气相的能量守恒方程为：

$$n(1-S)C_g\rho_g\partial T/\partial t+C_g\rho_g\,\boldsymbol{v}^{gr}\cdot\nabla T+\nabla\cdot \boldsymbol{q}_g=\boldsymbol{\sigma}^g:\nabla(\boldsymbol{v}_g^r+\boldsymbol{v}_s). \tag{20}$$

式中：$\boldsymbol{\sigma}^g$ 为作用于单元体中气相的应力.

可以看出，$\boldsymbol{\sigma}^s$，$\boldsymbol{\sigma}^l$ 和 $\boldsymbol{\sigma}^g$ 满足式：$\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{\sigma}^s+\boldsymbol{\sigma}^l+\boldsymbol{\sigma}^g$，$\boldsymbol{\sigma}^l=-nSp_l\delta$，$\boldsymbol{\sigma}^g=-n(1-S)p_g\boldsymbol{\delta}$ 且有

$$\boldsymbol{\sigma}:\nabla\boldsymbol{v}_s=\nabla\cdot(\sigma\boldsymbol{v}_s)+\rho g\cdot\boldsymbol{v}_s$$

$$\boldsymbol{\sigma}^l:\nabla\boldsymbol{v}_l^r=-\nabla\cdot(p_l\,\boldsymbol{v}^{lr})+\boldsymbol{v}_l^r\cdot\nabla(nSp_l)$$

$$\boldsymbol{\sigma}^g:\nabla\boldsymbol{v}_g^r=-\nabla\cdot(p_g\,\boldsymbol{v}^{gr})+\boldsymbol{v}_g^r\cdot\nabla(n(1-S)p_g).$$

根据广义 Fourier 定律，多孔介质的总热通量可以写成：

$$\boldsymbol{q}=\boldsymbol{q}_s+\boldsymbol{q}_l+\boldsymbol{q}_g=-\lambda\nabla T. \tag{21}$$

式中：$\boldsymbol{q}$，$\boldsymbol{q}_s$，$\boldsymbol{q}_l$ 和 $\boldsymbol{q}_g$ 分别为多孔介质总热通量、固相的热通量、液相的热通量和气相的热通量；$\boldsymbol{\lambda}$ 为多孔介质的导热向量，是由固相、液相、气相的导热通量集合而成的，通常认为是多孔介质饱和度 S 的函数.

联合式(18)～(21)可以得到非饱和多孔介质的能量守恒方程：

$$\begin{aligned}&\nabla\cdot\Big[\boldsymbol{\sigma}\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+p_l\frac{k_{rl}\boldsymbol{k}}{\mu_l}(\nabla p_l-\rho_l g)+p_g\frac{k_{rg}\boldsymbol{k}}{\mu_g}\nabla p_g+\\&(\boldsymbol{\lambda}+p_l\,\boldsymbol{k}_{lT}+p_g\,\boldsymbol{k}_{gT})\nabla T\Big]=-\rho\boldsymbol{g}\cdot\frac{\partial\boldsymbol{u}}{\partial t}+\\&\Big[(1-n)\rho_sC_s+nS\rho_lC_l+n(1-S)\rho_gC_g\Big]\frac{\partial T}{\partial t}-\\&\Big[\boldsymbol{v}^{lr}-c_{Sp}\Big(\frac{1}{S}p_l\,\boldsymbol{v}^{lr}-\frac{1}{1-S}p_g\,\boldsymbol{v}^{gr}\Big)\Big]\cdot\nabla p_l-\\&\Big[\boldsymbol{v}^{gr}+c_{Sp}\Big(\frac{1}{S}p_l\,\boldsymbol{v}^{lr}-\frac{1}{1-S}p_g\,\boldsymbol{v}^{gr}\Big)\Big]\cdot\nabla p_g-\\&\frac{1}{n}(p_l\,\boldsymbol{v}^{lr}+p_g\,\boldsymbol{v}^{gr})\cdot\nabla n+\Big[\rho_lC_l\,\boldsymbol{v}^{lr}+\rho_gC_g\,\boldsymbol{v}^{gr}-\\&c_{ST}\Big(\frac{1}{S}p_l\,\boldsymbol{v}^{lr}-\frac{1}{1-S}p_g\,\boldsymbol{v}^{gr}\Big)\Big]\cdot\nabla T-Q^s.\end{aligned} \tag{22}$$

综上所述，混凝土非饱和多孔介质 THM 耦合的控制方程主要由式(9)，(11)，(12)，(17)和(22)构成，其中包含位移向量 $\boldsymbol{u}$、孔隙水压力 p_l、孔隙气压力 p_g、温度 T 和孔隙率 n 等 7 个基本未知量.

2.4　定解条件

1)非稳定非饱和状态下的初值条件，即 $t=0$ 时刻在 Ω 内有：

位移初值条件：$\boldsymbol{u}(0)=\boldsymbol{u}_0$，　(23)

孔隙水压初值条件：$p_l(0)=p_{l0}$，　(24)

孔隙气压初值条件：$p_g(0)=p_{g0}$，　(25)

温度初值条件：$T(0)=T_0$，　(26)

孔隙率初值条件：$n(0)=n_0$.　(27)

式中：$\boldsymbol{u}_0$，p_{l0}，p_{g0}，T_0，n_0 分别为初始位移向量、孔隙水压力、孔隙气压力、温度和孔隙率.

2)非稳定非饱和状态下的边界条件($t=0$)：

位移边界条件：$\boldsymbol{u}|_{\Gamma_u}=\hat{\boldsymbol{u}}$，　(28)

应力边界条件：$\boldsymbol{t}|_{\Gamma_\sigma}=\boldsymbol{\sigma}\cdot\boldsymbol{n}=\hat{\boldsymbol{t}}$，　(29)

孔隙水压力边界条件：$p_l|_{\Gamma_l}=\hat{p}_l$，　(30)

孔隙气压力边界条件：$p_g|_{\Gamma_g}=\hat{p}_g$，　(31)

温度边界条件：$T|_{\Gamma_T}=\hat{T}$，　(32)

液流量边界条件：$q_l|_{\Gamma_l^q}=\hat{q}_l$，　(33)

气流量边界条件：$q_g|_{\Gamma_g^q}=\hat{q}_g$，　(34)

热通量边界条件：$q_T|_{\Gamma_T^q}=\hat{q}_T$.　(35)

式中：$\boldsymbol{t}$，$\hat{\boldsymbol{t}}$ 分别为面力向量和已知面力向量；q_l，$\hat{q}_l$ 分别为边界液体流量和已知边界液体流量；q_g，$\hat{q}_g$ 分别为边界气体流量和已知边界气体流量；q_T，$\hat{q}_T$ 分别为边界热通量和已知边界热通量；$\boldsymbol{n}$ 为边界面的外法向向量.

3 多场耦合模型有限元离散及程序编制

3.1 有限元离散

对混凝土类非饱和多孔介质水-热-力全耦合数学模型采用加权余量法进行有限元计算公式的推导[22],并进行时域离散后,得到如下迭代求解格式:

$$\boldsymbol{G}\Delta \boldsymbol{X}^{i+1} = \Delta \overline{\boldsymbol{F}}^{i+1}. \tag{36}$$

式中:

$$\Delta\overline{F}^{i+1} = \begin{Bmatrix} \Delta t^{i+1}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{u}}^{i} + \alpha\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{u}}^{i+1}) \\ \Delta t^{i+1}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{l}}^{i} + \alpha\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{l}}^{i+1} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{u}}\overline{p}_{\mathrm{l}}^{i} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{lT}}\overline{T}^{i}) \\ \Delta t^{i+1}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{g}}^{i} + \alpha\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{g}}^{i+1} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{gg}}\overline{p}_{\mathrm{g}}^{i} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{gT}}\overline{T}^{i}) \\ \Delta t^{i+1}(\boldsymbol{F}_{\mathrm{T}}^{i} + \alpha\Delta\boldsymbol{F}_{\mathrm{T}}^{i+1} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{Tl}}\overline{p}_{\mathrm{l}}^{i} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{Tg}}\overline{p}_{\mathrm{g}}^{i} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{TT}}\overline{T}_{\mathrm{l}}^{i} - \boldsymbol{K}_{\mathrm{Tn}}\overline{n}^{i}) \\ 0 \end{Bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} \boldsymbol{K}_{\mathrm{uu}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{ul}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{ug}} & \boldsymbol{K}_{\mathrm{uT}} & 0 \\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{lu}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{ll}} + \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{ll}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{lg}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{lT}} + \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{lT}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{ln}} \\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{gu}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{gl}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{gg}} + \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{gg}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{gT}} + \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{gT}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{gn}} \\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{Tu}} & \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{Tl}} & \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{Tg}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{TT}} + \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{TT}} & \alpha\Delta t^{i+1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{Tn}} \\ \boldsymbol{C}_{\mathrm{nu}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{nl}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{ng}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{nT}} & \boldsymbol{C}_{\mathrm{nn}} \end{bmatrix}.$$

α 为差分系数,在 0～1 之间变化,本文取 $\alpha = 1$ 即后差分格式.

3.2 有限元求解程序编制

本文基于上述有限元离散成果利用 FORTRAN 语言研发了多孔介质多场耦合求解程序 THM-3D,该程序采用模块式开发,每块均具有独立、明确的功能含义,以充分满足实际工程中问题复杂的要求,主要算法流程图如图 1 所示,限于篇幅,该程序的验证将在其他文章给出.

4 工程算例

假设有一大体积碾压混凝土块,如图 2 所示,该混凝土块高 94.0 m,上游侧假定有蓄水至 77.0 m,下游侧无水.

该碾压混凝土块为浇筑式施工,在 4 月 1 日起开始浇筑,混凝土入仓温度在气温的基础上加 3 ℃,分层浇筑至顶部后 30 d 拆模. 坝体在 430 d 内浇筑完成,之后将在 10 d 内分 3 段快速蓄水至正常蓄水位:在第 3 d 蓄水至 25.0 m;第 6 d 蓄水至 50.0 m;在第 10 d 蓄至 77.0 m. 计算周期为蓄水至 2 a,该混凝土块体由 3 种级配的混凝土浇筑而成,从块体上游至下游依次为变态混凝土、二级配混凝土和三级配混凝土. 考虑到大体积混凝土主要关注的是温度应力的变化,因此应力场将主要考虑温度应力.

4.1 计算条件

根据文献[26]提出的水温计算基本公式:

$$T(z,t) = T_{\mathrm{m}}(z) + A(z)\cos\omega(t - t_0 - \varepsilon). \tag{37}$$

式中:z 为水深,m;t 为时间,月;$\omega = \pi/6$;$T_{\mathrm{m}}(y)$ 为年平均水温,℃;ε 为相位差,$\varepsilon = 2.15 - 1.30\mathrm{e}^{-0.085z}$;任意深度年均水温为 $T_{\mathrm{m}}(z) = c + (T_{\mathrm{s}} - c)\mathrm{e}^{-0.04z} = 9.682 + 6.918\mathrm{e}^{-0.04z}$;水温年变幅 $A(z) = A_0\mathrm{e}^{-0.018z} = 6.425\mathrm{e}^{-0.018z}$.

气温计算条件拟合公式为:

$$T_{\mathrm{a}} = 18.95 + 14.83\cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 6.379)\right]. \tag{38}$$

各类型的混凝土弹模变化规律满足下列拟合公式(单位:GPa):

变态混凝土:$E(\tau) = 35.04[1 - \mathrm{e}^{-0.258\tau^{0.433}}]$. (39)

二级配混凝土:$E(\tau) = 43.08[1 - \mathrm{e}^{-0.428\tau^{0.315}}]$. (40)

三级配混凝土:$E(\tau) = 38.88[1 - \mathrm{e}^{-0.431\tau^{0.307}}]$. (41)

混凝土的绝热温升按下述拟合式计算(单位:℃):

变态混凝土:$\theta(\tau) = 21.1[1 - \mathrm{e}^{-0.175\tau^{0.872}}]$. (42)

二级配混凝土:$\theta(\tau) = 19.4[1 - \mathrm{e}^{-0.175\tau^{0.872}}]$. (43)

三级配混凝土:$\theta(\tau) = 17.5[1 - \mathrm{e}^{-0.189\tau^{0.804}}]$. (44)

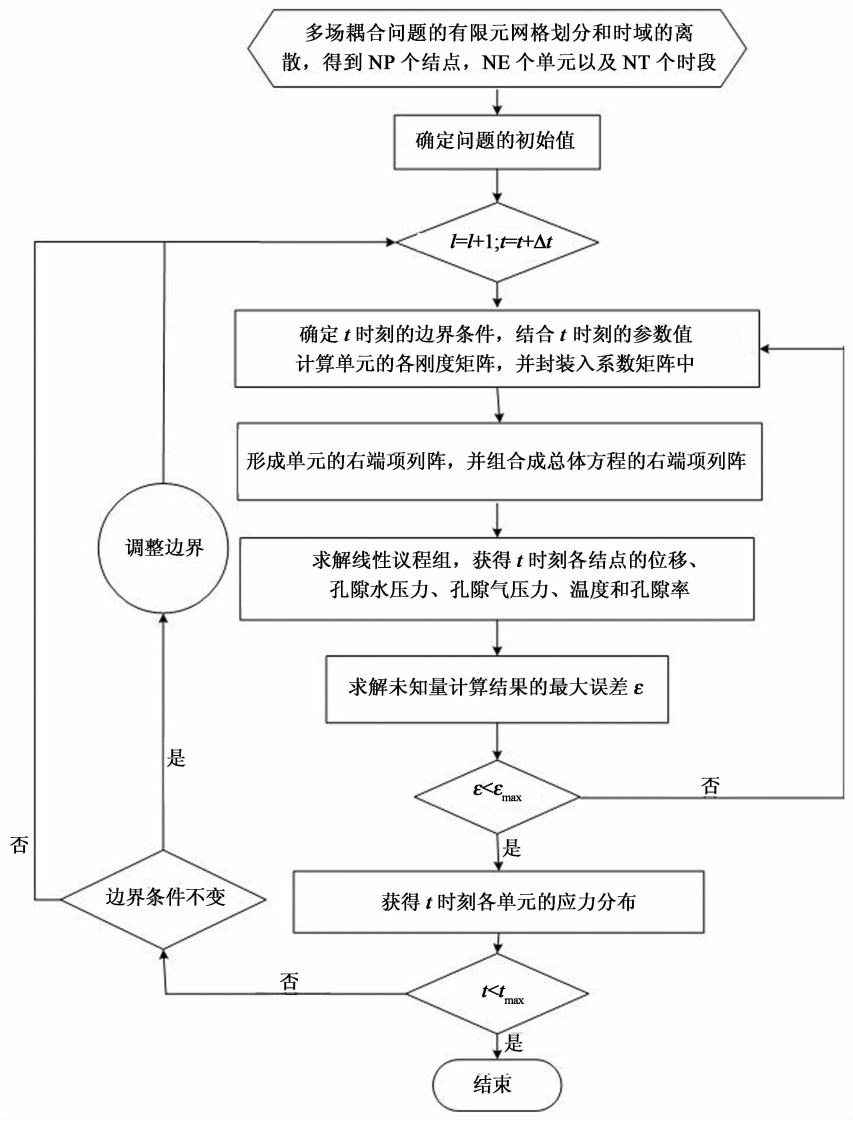


图 1　多场耦合求解程序 THM-3D 算法流程

Fig. 1　Process of multi-field coupling analysis code THM-3D

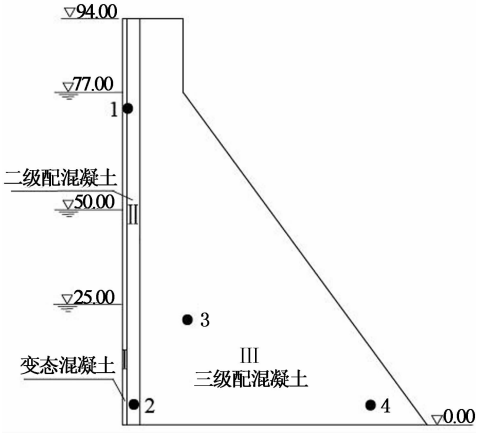


图 2　大体积混凝土块体模型和特征点分布

Fig. 2　Mass concrete model and the distribution of related feature points

其他计算参数如表 1 所示.

表 1　混凝土相关计算参数

Tab. 1　The related analysis parameters of concrete

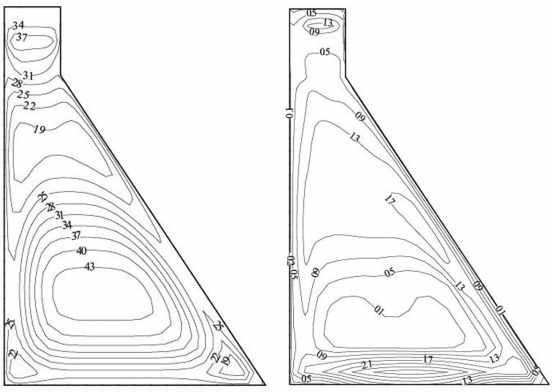
混凝土类型	λ/(kJ·m^{-1}·h^{-1}·℃$^{-1}$)	C/(kJ·kg^{-1}·℃$^{-1}$)	a/(10^{-6}·℃$^{-1}$)	ρ/(kg·m^{-3})	K/(10^{-9}m·s^{-1})	υ
变态混凝土	7.91	0.94	7.86	2 795.7	1.0	0.167
二级配	8.31	1.00	7.14	2 716.3	切向:5.0 法向:1.0	0.167
三级配	8.65	1.00	7.30	2 713.6	切向:10.0 法向:1.0	0.167

4.2　计算结果分析

4.2.1　混凝土浇筑完成

混凝土块浇筑完成时的温度和应力计算结果如

下图 3(a),(b)所示,其中温度单位为℃,应力单位为 MPa.可以看出,在浇筑完成时,混凝土块体温度场的高温区位于中下部和顶部位置,其中中下部的最高温度达到 44 ℃,主要是由于本算例中没有考虑温控设施,该处的浇筑温度较高,且混凝土仍处于升温阶段,水泥水化热产生的热量无法散出;同时,块体中均为拉应力,但整体水平不高.



(a) 温度分布 (b) 温度大主应力分布

图 3 浇筑完成时的温度和应力计算结果

Fig. 3 Results of temperature and stress at the end of construction

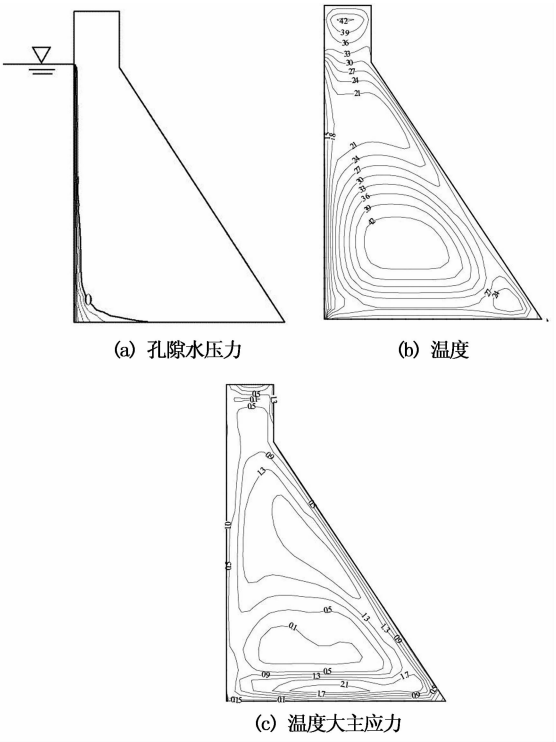
4.2.2 初次蓄水一段时间

混凝土块浇筑初次蓄水 30 d,2 a 的孔隙水压力、温度和应力计算结果如图 4(a)～(c)和 5(a)～(c)所示.

从渗流场的计算结果来看,随着蓄水时间的延长和库水温、气温的变化,库水在块体内逐渐向下游侧渗流,蓄水 2 a 后库水仍然没有在块体的下表面逸出,说明蓄水后混凝土块体内的渗流场在较长的时间内不会达到稳定状态,也不会有水从下游面逸出.

从温度场的计算结果来看,在水库蓄水后,随着蓄水时间的延长,块体上游侧的温度等值线逐渐向内部延伸,这体现出了库水对块体温度的影响过程.同时,块体温度场在库水作用下,内部温度整体水平下降,并且上游侧降温比下游侧明显较快;块体上游库水以上部位在库水和外界气温共同影响下温度下降较快,此处的最高温度由浇筑完成时的 38 ℃降至蓄水 2 a 后的 18 ℃.

从耦合条件下块体温度应力分布的变化过程可以看出,随着蓄水时间的延长,块体上游侧表面处的温度由于受较低的库水温控制,与内部相邻部位的混凝土之间存在着温差,蓄水后不同时期上表面出现了不同程度的拉应力,局部拉应力较大,可能对该部位的温控防裂不利.

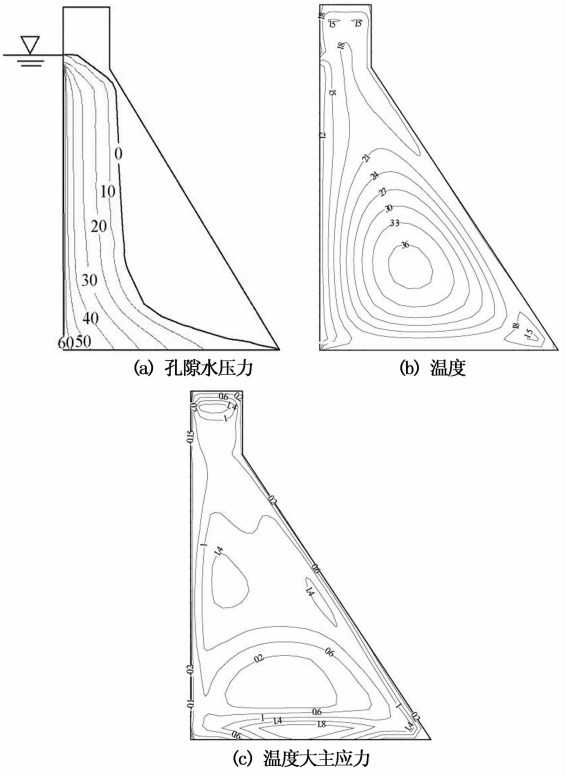


(a) 孔隙水压力 (b) 温度

(c) 温度大主应力

图 4 蓄水 30 d 的计算结果

Fig. 4 Analysis results at the end of storage for 30 d



(a) 孔隙水压力 (b) 温度

(c) 温度大主应力

图 5 蓄水 2 a 的计算结果

Fig. 5 Analysis results at the end of storage for 2 years

4.2.3 特征点温度变化过程

特征点 1～4 在耦合与非耦合条件下的温度计

算结果对比如图 6～9 所示. 通过对比可以看出,特征点 1 在非耦合条件下得到的温度较耦合条件高,最大差值为 1.5 ℃;特征点 2 在非耦合条件下的得到的温度较耦合条件高,最大差值为 1.8 ℃;特征点 3 在非耦合条件下得到的温度较耦合条件高,最大差值为 3.3 ℃,;特征点 4 在非耦合条件与耦合条件下得到的温度计算结果吻合得较好,最大差值约 0.56 ℃. 可见,非耦合的方法对于上游面附近库水浸没区域以及其他库水未浸没区域的温度计算结果较好,对于被库水浸没的块体内部区域的温度计算结果则明显高于耦合计算得到的结果.

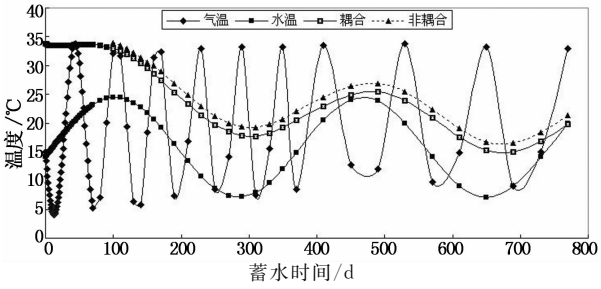


图 6　耦合与非耦合条件下特征点 1 温度结果
Fig. 6　Temperature results of feature point 1 under coupling and un-coupling

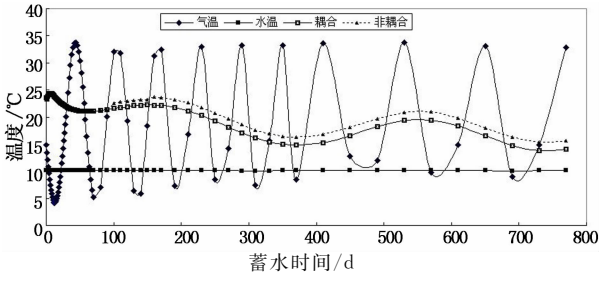


图 7　耦合与非耦合条件下特征点 2 温度结果
Fig. 7　Temperature results of feature point 2 under coupling and un-coupling

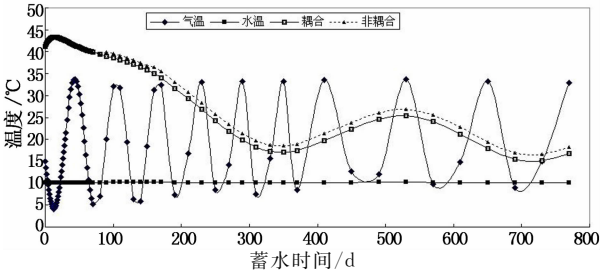


图 8　耦合与非耦合条件下特征点 3 温度结果
Fig. 8　Temperature results of feature point 3 under coupling and un-coupling

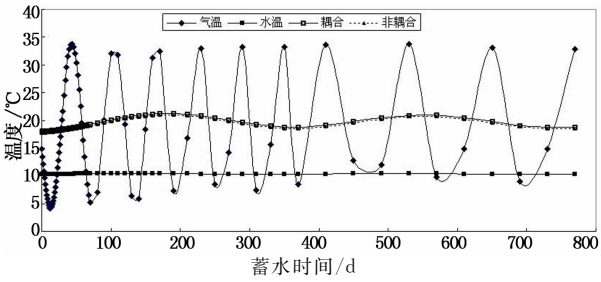


图 9　耦合与非耦合条件下特征点 4 温度结果
Fig. 9　Temperature results of feature point 4 under coupling and un-coupling

5　结论与建议

混凝土类多孔介质多场耦合作用的数学模型,研究的主要是某一物理场方程中因变量或源汇项受其他物理场作用其变化的数学描述,也包括本构规律的影响在控制方程中的反映,因此该类数学模型较为复杂,必定包含多个控制方程:

1)本文根据连续介质方法给出了混凝土类多孔介质的概念模型,在给出基本假设的基础上,依据热本构关系模型、流体运动的广义 Darcy 定律以及温度场热传导的广义 Fourier 建立了以位移、孔隙水压力、孔隙气压力、温度、孔隙率为未知量的非饱和多孔介质多相多场全耦合研究的数学模型,并给出了相应的定解条件,获得了有限元格式的多场耦合求解方程组,并编制了有限元求解程序.

2)对一大体积碾压混凝土块的渗流场、温度场和应力场进行了耦合分析. 结果表明,考虑耦合后块体入渗区域内特征点的温降幅度较不考虑耦合条件下大,最大温降差达到 3.3 ℃;而且考虑耦合效应得到的特征点温度大主应力也较非耦合大,最大差值达到 0.32 MPa.

3)对于蓄水初期的实际大体积混凝土工程而言,影响其真实工作状态的因素是极其复杂的,其中,作用在其上游侧的低温库水则是众多影响因素中最直接、最重要的因素. 因此为了更为准确地计算分析蓄水初期坝体温度场和温度应力分布,应该考虑渗流场的影响,本文采用耦合分析的方法为以后大体积混凝土坝蓄水后的温控防裂研究提供了一种新的思路.

参考文献

[1]　BRUNNER W J ,WU K H. Cracking of revelstoke concrete gravity dam mass concrete[R]. London, UR:15th International Congress on Large Dams, Vol. Ⅱ ,1985:201－206.

[2]　HONGTON D L. Measures being taken for prevention of cracks in mass concrete at dworshak and libby dam[R]. Mont-

real, Canada: 10th International Congress on Large Dams, 1979:1062－1066.

[3] ZHU B F. Allowable temperature difference, cooling capacity, inspection and treatment of cracks, and administration of temperature control [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 439－467.

[4] 朱伯芳. 重力坝的劈头裂缝[J]. 水力发电学报,1997(59):85－93.
ZHU Bo-fang. Cracks on the upstream face of concrete gravity dams[J]. Joural of Hydroelectric Engineering, 1997(59):85－93. (In Chinese)

[5] 柴军瑞. 混凝土坝渗流场与稳定温度场耦合分析的数学模型[J]. 水力发电学报,2009,19(1):27－35.
CHAI Jun-rui. Research on mathematical model forcoupled seepage and temperature field in concrete dam[J]. Joural of Hydroelectric Engineering,2009,19(1):27－35. (In Chinese)

[6] 陈建余,朱岳明,张建斌. 考虑渗流场影响的混凝土坝温度场分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2003,3(2):119－123.
CHEN Jian-yu,ZHU Yue-ming,ZHANG Jian-bi. Temperature fields in concrete dams with consideration of seepage fields[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,2003,3(2):119－123. (In Chinese)

[7] 崔皓东,朱岳明. 蓄水初期的坝体非稳定渗流场与温度场耦合的理论模型及数值模拟[J]. 水利学报,2009,15(2):238－243.
CUI Hao-dong,ZHU Yue-ming. Theoretical model and numerical simulation by coupling unsteady seepage field with temperature field during initial impounding period of concrete dams [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009,15(2):238－243. (In Chinese)

[8] 李守义,陈尧隆,王长江. 碾压混凝土坝渗流对温度应力的影响[J]. 西安理工大学学报,1996,12(5):41－46.
LI Shou-yi, CHEN Yao-long, WANG Chang-jiang. Effect of RCC dam seepage upon temperature stress[J]. Journal of Xi'an University of Technology,1996,12(5):41－46. (In Chinese)

[9] HICKS T W, PINE R J, WILLIS-RICHARDS J, *et al*. A hydro-thermo-mechanical numerical model for HDR geothermal reservoir[J]. International Journal of Rock Mechanics and Sciences, 1996,33(5): 499－511.

[10] CHAPULIOT S, GOURDIN C, PAYEN T, *et al*. Hydro-thermal-mechanical analysis of thermal fatigue in a mixing tee [J]. Nuclear Engineering and Design, 2005, 235(2):575－596.

[11] MILLARD A,DURIN M,STIETEL A,*et al*. Discrete and continuum approaches to simulate the thermo-hydro-mechanical couplings in a large, fractured rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Sciences,1995,32(5):409－434.

[12] NGUYEN T S, SELVADURAI A P S, ARMAND G. Modelling the FEBEX THM experiment using a state surface approach [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,2005,42(5): 639－651.

[13] RUTQVIST J, BÖRGESSON L, CHIJIMATSU M, *et al*. Thermohydromechanics of partially saturated geological media: governing equations and formulation of four finite element models [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001, 38(6): 105－127.

[14] 刘亚晨. 核废料贮存围岩介质 THM 耦合过程的数值模拟[J]. 地质灾害与环境保护,2006,17(2):78－82.
LIU Ya-chen. Numerical simulation for THM coupling of fractured rock mass surrounding nuclear waste repositories[J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2006,17(2):78－82. (In Chinese)

[15] POLTRONIERI F, PICCOLROAZ A, BIGONI D, *et al*. A simple and robust elastoplastic constitutive model for concrete [J]. Engineering Structures,2014, 60(5):81－84.

[16] ZHOU Y W,WU Y F. General model for constitutive relationships of concrete and Its composite structures[J]. Composite Structures, 2012,94(3):580－592.

[17] THOMAS G, ALAIN M, JEANMAC F, *et al*. A multiaxial constitutive model for concrete in the fire situation:theoretical formulation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2013,50(6):3659－3673.

[18] ZHAI Y,DENG Z C. Study on compressive mechanical capabilities of concrete after high temperature exposure and thermo-damage constitutive model[J]. Construction and Building Materials,2014, 68(3):777－782.

[19] 张勇,薛禹群,谢春红. 高温差条件下达西定律的理论推导[J]. 水科学进展,1999,10(4):362－367.
ZHANG Yong, XUE Yu-qun, XIE Chun-hong. Dervation of darcy's law for high-temperatures situation[J]. Advances in Water Science, 1999,10(4):362－367. (In Chinese)

[20] CHEN Y F, ZHOU C B, JING L R. Modeling coupled THM processes of geological porous media with multiphase flow: theory and validation against laboratory and field scale experiments [J]. Computers and Geotechnics, 2009, 36(4): 1308－1329.

[21] FOURIER J. The analytical theory of heat[M]. New York: Dove Publications Inc,1955:158－160.

[22] YAN J, WEI Y Q, CAI H. A mathematical thermal-hydraulic-machanical coupling model for unsaturated porous media [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 602(8):365－369.

[23] 周创兵,陈益峰,姜清辉,等. 复杂岩体多场广义耦合分析[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:1－10.
ZHOU Chuang-bing,CHEN Yi-feng,JIANG Qing-hui,*et al*. Introduction to generalized multi-field coupling analysis of complex rock mass[M]. Beijing:China Water & Power Press, 2008:1－10. (In Chinese)

[24] ZERMANSKY M W. Heat and thermodynamics[M]. New York:McGraw-Hill Publishing,1968:34－35.

[25] RUTQVIST J, BÖRGESSON L, CHIJIMATSU M, *et al*. Coupled thermo-hydro-mechanical analysis of a heater test in fractured rock and bentonite at Kamaishi Mine-comparison of field results to predictions of four finite element codes[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2001,38(5):129－142.

[26] 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,2003:17－34.
ZHU Bo-fang. Thermal stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press,2003:17－34. (In Chinese)