

冬季停运期倒虹吸横向温度应力简化计算

柏文文, 季日臣, 徐志强

(兰州交通大学 土木工程学院, 兰州 730070)

摘要: 南水北调中线工程的大型倒虹吸一般采用深埋式, 在冬季停运期, 倒虹吸内表面边界条件属于第三类边界条件, 通过引入虚边界, 对第三类边界条件做了近似处理, 并简化温度场, 由应力自平衡和力法分别推导出了横向非线性温度自约束应力和框架约束应力, 整合这两部分温度应力, 得到倒虹吸横向温度应力简化计算公式。对勒马河倒虹吸的计算结果显示, 在冬季停运期, 其内表面会产生 2 MPa 的拉应力, 而且板厚越大, 内表面的拉应力越大, 对温度应力控制不利。

关键词: 南水北调中线工程; 倒虹吸; 温度应力; 第三类边界条件; 虚边界; 应力自平衡

中图分类号: TV672.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)03-0601-05

Simplified calculation of transverse thermal stress of inverted siphon in winter downtime

BAI Wenwen, JI Rìchen, XU Zhìqiang

(School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: The large inverted siphon in the Middle Route of South to North Water Transfer Project is usually buried. In winter downtime, the inner surface boundary condition belongs to the third type boundary conditions. Virtual boundary was introduced to perform the approximate treatment on the third type boundary conditions, and temperature field was simplified. According to the self balance of stress and force method, the transverse nonlinear thermal self constraint stress and framework constraint stress were derived. Integration of the two thermal stresses can provide the simplified formulas of transverse thermal stress of inverted siphon. The formula was applied to Lema River inverted siphon. The results showed that during the winter downtime, the tensile stress of 2 MPa occurs at the inner surface, and the tensile stress at the inner surface is larger when the slab thickness is higher, which is unfavorable to thermal stress control.

Key words: Middle Route of South to North Water Transfer Project; inverted siphon; thermal stress; third type boundary conditions; virtual boundary; self balance of stress

倒虹吸一般采用埋入式, 因此其温度应力通常被忽视。但近年来一系列的观测资料显示, 温度应力对倒虹吸结构影响较大^[1-3]。在冬季停运或检修期, 倒虹吸内表面与空气接触, 属于第三类边界; 外表面则与岩土接触。这与箱梁和渡槽的边界不同(箱梁内外表面都与空气接触; 渡槽内表面部分与水接触, 外表面与空气接触), 因此现有箱梁和渡槽的温度应力研究成果^[4-6]将不能直接应用于倒虹吸。在冬季停运期, 温度骤然降低时, 埋入式倒虹吸内表面因与大气接触, 其温度会迅速降低, 而外表面与岩土接触, 其温度等于地温, 在材料热胀冷缩作用下, 结构会产生温度变形, 当温度变形受到约束时, 结构会产生温度应力。本文通过引入渡槽的横向温度应力计算方法的同时, 将在对倒虹吸的温度边界条件的

简化, 以及大型倒虹吸结构在尺寸方面的特点, 近似认为其为板壁结构的基础上, 推导倒虹吸横向温度应力简化计算公式, 并进行实例计算。

1 温差计算

1.1 温度场函数表达

1.1.1 热传导方程

假设倒虹吸沿板壁方向的温度均匀, 其值为常数, 忽略角隅处复杂的热传导状态, 则板宽度方向温度分布也是均匀的, 因而只有在板厚方向有温度梯度, 从而将三维温度场问题简化为一维温度场问题。根据热传导理论, 一维温度场 $T(x, t)$ 必须满足如下拉普拉斯偏微分方程:

收稿日期: 2014-09-11 修回日期: 2014-11-12 网络出版时间: 2014-05-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150514.1118.012.html>

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助(IRT1139)

作者简介: 柏文文(1989-), 男, 甘肃天水人, 主要从事水工结构工程研究。E-mail: bw0517@126.com

$$\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = c\rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中: λ 为混凝土的导热系数; c 为混凝土的比热; ρ 为混凝土的密度; $\frac{\partial T}{\partial t}$ 为温度随时间的变化率。

1.1.2 倒虹吸温度边界条件

在传热学上, 温度边界条件分为四类, 而倒虹吸的温度边界条件只有其中的第一类边界条件和第三类边界条件。

(1) 第一类边界条件。混凝土表面的温度 T 是时间 t 的已知函数。

$$T(t) = f(t) \quad (2)$$

板壁外表面混凝土与岩土接触时, 其表面温度等于地温, 即 $T_{\text{混凝土}} = T_{\text{地温}}$ 。

(2) 第三类边界条件。当混凝土与空气接触时, 表面热流量与混凝土表面温度 T 和气温 T_a 之差成正比。

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} + \beta(T - T_a) = 0 \quad (3)$$

式中: β 为混凝土表面散热系数; n 为板身外法线方向; λ 为混凝土导热系数。

(3) 边界条件的近似处理。第一类边界条件比较简单。第三类边界条件的处理, 在数学上是比较困难的。为简化计算, 在处理实际问题时, 往往采用近似算法, 将(3)式改为

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{T - T_a}{\lambda\beta} \quad (4)$$

可以看出, $d = \lambda\beta$ 具有长度量纲, 所以当遇到第三类边界条件时, 可以从真实边界向外拓展一个虚厚度 d , 得到一个虚边界(见图 1), 其温度等于外界温度, 则可以转化化为第一类边界条件。混凝土与空气接触时, $d = \lambda\beta = 0.1 \sim 0.2$ m。

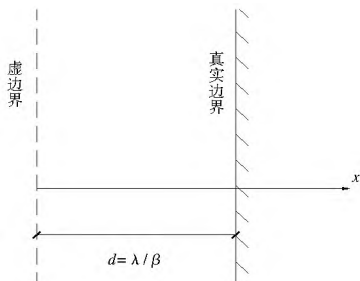


图 1 虚边界示意图

Fig. 1 Schematic diagram of virtual boundary

1.2 倒虹吸温度场

倒虹吸板壁内表面与大气接触, 其边界条件属于第三类边界条件。在近似认为板壁结构为一块半无限厚板, 并假定气温变化为谐波的情况下, 可得第三类边界条件下及第三类边界条件近似处理下的温度场解答^[1]。

(1) 第三类边界条件下的温度场解答。

$$T_0(x, t) = -A_0 e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \sin\left[\omega t - \left(x \sqrt{\frac{\omega}{2a}} + M\right)\right] \quad (5)$$

$$A_0 = A \left[1 + \frac{2\lambda}{\beta} \sqrt{\frac{\omega}{2a} + \frac{\omega\lambda^2}{a\beta^2}} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (6)$$

$$M = \tan^{-1} \left[\frac{1}{1 + \frac{\beta}{\lambda} \sqrt{\frac{2a}{\omega}}} \right] \quad (7)$$

式中: A 为气温变幅; a 为导温系数 (m^2/d); A_0 为板壁内表

面气温变幅 ($^{\circ}\text{C}$); ω 为气温变化的圆频率 ($1/\text{d}$); t 为时间 (d); x 为计算点至倒虹吸内表面距离 (m)。

(2) 第三类边界条件近似处理下的温度场解答。

$$T_1(x, t) = -A e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \sin(\omega t - \sqrt{\omega/2a}x) \quad (8)$$

式中: x 为计算点至虚边界表面距离 (m), 其余符号含义同式(7)。

(3) 温差分布函数。

温度应力是由于变温引起的, 所以求解出温度场以后, 还要求解结构在前后两个时间的温差。由于工程中往往只取最大温差作为控制荷载, 因此取式(5)和式(8)的指数式为最大温差, 即

$$T_0(x) = -A_0 e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \quad (9)$$

$$T_1(x) = -A e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \quad (10)$$

由于公式(8)的推导是建立在虚边界基础上的, 其坐标原点为虚边界表面, 但是所要计算的是倒虹吸板厚方向温差分布, 所以需要将坐标原点定在倒虹吸内表面。考虑到工程中的实用性, 将式(10)进行坐标变换, 得到倒虹吸沿板厚方向的温差为

$$T_1(x) = -A_1 e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \quad (11)$$

$$A_1(x) = -A e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \quad (12)$$

在突然降温作用下, 温差分布为指数函数, 并且随着板厚的增加, 呈衰减趋势。假设气温变幅为 14°C , a 取 $0.10 \text{ m}^2/\text{d}$, 气温变化的圆频率 ω 为 6.28×10^{-7} , 温差变化情况见图 2。可以看出, 在板厚为 1 m 范围内, 温差分布衰减很快, 气温骤降几乎对 1 m 以外的范围内的混凝土没有影响, 因而可以将上述按半无限厚板推导出来的解答应用于有限厚度的实际工程。

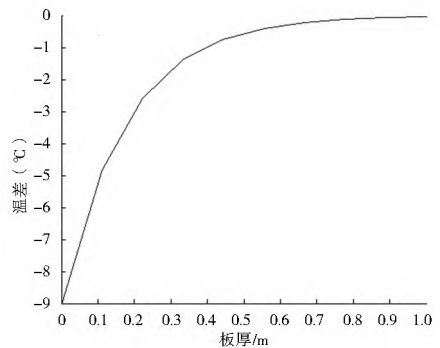


图 2 温差分布

Fig. 2 Distribution of temperature difference

2 横向温度应力计算

温度降低作用下, 忽略周围岩土对结构的约束作用, 则板壁横向温度应力计算应分成横向板厚范围内非线性温差自约束应力和板身横向框架约束应力两部分。

2.1 板身厚度方向非线性温差自约束应力

由于边界条件处理的不同, 得到的温度场形式虽然相同, 但具体数值不同。自约束应力的推导是基于材料力学和结构力学, 即结构在温差作用下, 处于静力平衡状态而得到的, 这里不再赘述。

(1) 由第三类边界条件简化的温度场, 得到其自约束应力表达式^[8]如下:

$$\sigma_0(x) = \alpha A_0 E \left[\frac{K_1}{\delta} + \frac{12K_2}{\delta^3} \left(\frac{\delta}{2} - x \right) - e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \right] \quad (13)$$

式中： δ 为板厚(m)； $K_1、K_2$ 为系数； α 为材料的线膨胀系数； E 为材料的弹性模量。

其中，

$$K_1 = \frac{1 - e^{-\sqrt{\omega/2a\delta}}}{\sqrt{\omega/2a}} \quad (14)$$

$$K_2 = \frac{1 - e^{-\sqrt{\omega/2a\delta}}}{\sqrt{\omega/2a}} \left(\frac{\delta}{2} - \frac{1 - e^{-\sqrt{\omega/2a\delta}}(1 + \sqrt{a/2a\delta})}{\sqrt{\omega/2a}(1 - e^{-\sqrt{\omega/2a\delta}})} \right) \quad (15)$$

(2)由第三类边界条件近似处理简化的温度场，得到其自约束应力表达式如下：

$$\sigma_1(x) = \alpha A_1 E \left[\frac{K_1}{\delta} + \frac{12K_2}{\delta^3} \left(\frac{\delta}{2} - x \right) - e^{-\sqrt{\omega/2a}x} \right] \quad (16)$$

2.2 板身横向框架约束应力

倒虹吸结构横向为超静定结构，在温差作用下，不仅会产生自约束应力，还会产生框架约束应力。温度分布是非线性的，因此可以通过等效代替，即在线性温差和非线性温差产生同样的结构变形条件下，按线性温差计算结构温度应力，最后再乘以非线性温差修正系数。

2.2.1 非线性温差修正系数计算

在两种不同的边界条件处理下，推导出来的温度场都是指数分布形式，因而其修正系数相同，见图3。根据等效变形的原则，可得到修正系数 m' 为

$$m = \frac{12}{\delta^2} K_2 \quad (17)$$

则

$$A'_0 = mA_0 \quad (18)$$

$$A'_1 = mA_1 \quad (19)$$

式中： m 为非线性温差分布修正系数； A'_0 为板表面第三类边界条件下修正后的变温； A'_1 为板表面第三类边界近似处理条件下修正后的变温。

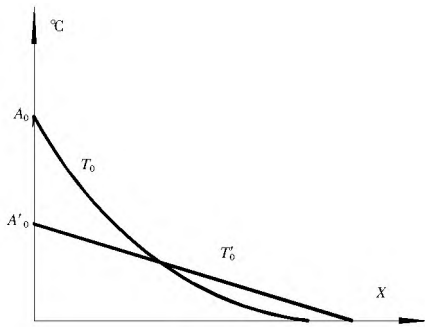


图3 修正系数关系

Fig. 3 Relationship between correction factors

2.2.2 结构框架约束应力计算

线性温差分布作用下，横向框架约束应力的计算见图2。

表1 第三类边界条件下板壁横向温度应力分布

Tab. 1 Siding transverse thermal stress distribution under the third boundary conditions

工况	部位	自约束应力函数	框架应力函数	自约束应力/MPa		框架约束应力/MPa		内表面应力比例(%)		内表面总应力 /MPa	外表面总应力 /MPa
				内表面	外表面	内表面	外表面	自应力	框架应力		
1	顶板	$2.53\exp(-5.6x) + 2.46x - 1.54$	$2.46(\delta/2 - x)$	0.99	0.45	0.98	-0.98	50	50	1.97	-0.53
	腹板	$2.53\exp(-5.6x) + 2.46x - 1.54$	$2.46(\delta/2 - x)$	0.99	0.45	0.98	-0.98	50	50	1.97	-0.53
	底板	$2.53\exp(-5.6x) + 2.07x - 1.43$	$2.07(\delta/2 - x)$	1.10	0.45	0.93	-0.93	54	46	2.03	-0.48
2	顶板	$1.81\exp(-5.6x) + 1.75x - 1.10$	$1.75(\delta/2 - x)$	0.71	0.32	0.70	-0.70	50	50	1.41	-0.38
	腹板	$1.81\exp(-5.6x) + 1.75x - 1.10$	$1.75(\delta/2 - x)$	0.71	0.32	0.70	-0.70	50	50	1.41	-0.38
	底板	$1.81\exp(-5.6x) + 1.48x - 1.02$	$1.48(\delta/2 - x)$	0.79	0.32	0.67	-0.67	54	46	1.46	0.35

取倒虹吸各板厚度相等，截面为正方形截面，建立力法方程如下：

$$\begin{cases} X_1\delta_{11} + X_2\delta_{12} + X_3\delta_{13} + X_4\delta_{14} + \Delta_{1r} = 0 \\ X_1\delta_{21} + X_2\delta_{22} + X_3\delta_{23} + X_4\delta_{24} + \Delta_{2r} = 0 \\ X_1\delta_{31} + X_2\delta_{32} + X_3\delta_{33} + X_4\delta_{34} + \Delta_{3r} = 0 \\ X_1\delta_{41} + X_2\delta_{42} + X_3\delta_{43} + X_4\delta_{44} + \Delta_{4r} = 0 \end{cases} \quad (20)$$

由结构对称性得：
$$\begin{cases} X_1 = X_3 \\ X_2 = X_4 \end{cases} \quad (21)$$

计算结构的各柔度系数，解得：
$$\begin{cases} X_1 = X_3 = \frac{\alpha A'_0 EI}{\delta} \\ X_2 = X_4 = 0 \end{cases} \quad (22)$$

3 计算实例

3.1 原始资料

南水北调勒马河倒虹吸总长255.4m，水平投影长度132.9m，倒虹吸断面形式为2孔矩形，单孔过水断面尺寸为4.0m×4.0m(宽×高)，外腹板厚度0.8m，内腹板厚度0.6m，底板厚度0.9m，顶板厚0.8m，倒角尺寸为0.3m×0.3m。结构采用预应力钢筋混凝土结构，混凝土为C30^[9,10]。

骤然降温作用下，计算两种工况下板身的横向温度应力：工况1为气温骤降14℃；工况2为气温骤降10℃。计算材料参数为：热膨胀系数 α 为0.00001，弹性模量为 3.0×10^4 MPa，混凝土导热系数 λ 为8kJ/(m²·h·℃)。混凝土表面散热系数 β 为80kJ/(m²·h·℃)， a 取0.10m²/d，气温变化的圆频率 ω 为6.28。

3.2 计算结果分析

由上述推导的横向温度计算公式，按第三类边界条件计算两种工况下的横向温度应力，结果见表1；工况1时的自约束应力和框架约束应力变化见图4、图5。按第三类边界近似处理条件下计算两种工况下的横向温度应力，结果见表2。表中应力为正表示受拉，为负表示受压，应力方向均与图6中的 X_2 方向平行。

由表1、表2及图4、图5可以看出如下结果。

(1)冬季停运期，寒流侵袭，会在倒虹吸内表面产生2MPa左右的拉应力，这对结构抗渗尤为不利，必须采取必要的措施，防止混凝土开裂。

(2)板厚越大，内表面温度应力越大，而其外表面温度应力越小，应力分布范围趋大，对温度应力控制不利。

(3)近似处理第三类边界条件，计算的温度应力是其准确边界应力的95%，且与准确边界的温度应力变化趋势相同，表明本文对第三类边界条件的近似处理方式可行。

表 2 第三类边界近似处理条件下板壁横向温度应力分布

Tab. 2 Siding transverse thermal stress distribution under the approximate treatment of the third boundary conditions

工况	部位	自约束应力函数	框架应力函数	自约束应力/MPa		框架约束应力/MPa		内表面应力比例(%)		内表面总应力 /MPa	外表面总应力 /MPa
				内表面	外表面	内表面	外表面	自应力	框架应力		
工况 1	顶板	$2.40\exp(-5.6x) + 2.33x - 1.46$	$2.33(\delta/2 - x)$	0.94	0.43	0.93	-0.93	50	50	1.87	-0.50
	腹板	$2.40\exp(-5.6x) + 2.33x - 1.46$	$2.33(\delta/2 - x)$	0.94	0.43	0.93	-0.93	50	50	1.87	-0.50
	底板	$2.40\exp(-5.6x) + 1.96x - 1.35$	$1.96(\delta/2 - x)$	1.05	0.42	0.88	-0.88	54	46	1.93	-0.46
工况 2	顶板	$1.71\exp(-5.6x) + 1.66x - 1.04$	$1.66(\delta/2 - x)$	0.67	0.30	0.66	-0.66	50	50	1.33	-0.36
	腹板	$1.71\exp(-5.6x) + 1.66x - 1.04$	$1.66(\delta/2 - x)$	0.67	0.30	0.66	-0.66	50	50	1.33	-0.36
	底板	$1.71\exp(-5.6x) + 1.40x - 0.97$	$1.40(\delta/2 - x)$	0.74	0.30	0.63	-0.63	54	46	1.37	-0.33

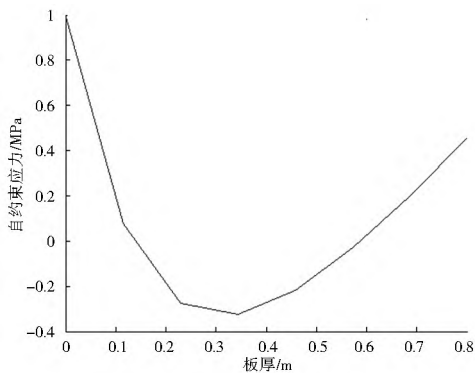


图 4 自约束应力变化

Fig. 4 Variation of self constraint stress

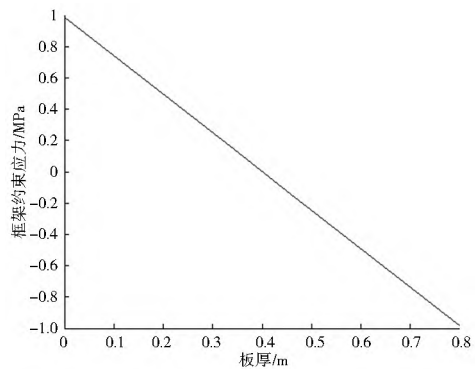


图 5 框架约束应力变化

Fig. 5 Variation of framework constraint stress

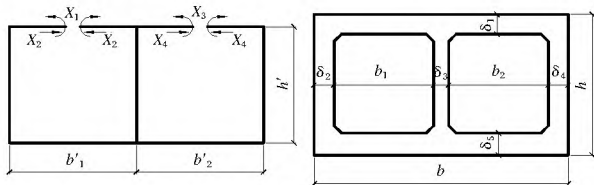


图 6 倒虹吸结构计算简图

Fig. 6 Simplified diagram of inverted siphon calculation

4 结语

倒虹吸的温度应力计算一般是用软件计算,文章推导的倒虹吸横向温度应力计算公式,填补了倒虹吸温度应力手算方法中的空白,并且该方法计算简便,计算精度较高,具有一定的适用性。

利用推导的公式,计算了在冬季停运期勒马河倒虹吸的温度应力,发现其内表面可产生 2 MPa 左右的拉应力,计算精度完全能够满足实际工程,因而本文采用的方法为第三类

边界条件的处理提供了一种新的选择。

参考文献(References):

[1] 张龙飞,姚贤华,岳超然,等.温度变化对大型预应力混凝土倒虹吸结构受力的影响[J].南水北调与水利科技,2013,11(4):196-199. (ZHANG Long fei, YAO Xi ar hu a, YUE Cha o ran, et al. Infulence of temperature change on behaviors large prestressed concrete inverted siphon [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(4): 196-199. (in Chinese))

[2] Verma Vishnu, Ghosh A K, kushwaha H S, Temperature Distribution and Thermal Stress Analysis of Ball tank Subjected to Solar Radiation [J]. Journal of Vessel Technology, 2005, 127: 119-122.

[3] Lee Y S, Choi M H, et al. A Structural Analysis of the Circular Cylinder with Multi Holes Under Thermal Loading [J]. Nuclear Engineering and Design, 2002, 212: 273-279.

[4] 严娟,季日臣,马虎迎.箱形渡槽越冬期间表面保温能力计算 [J]. 水利水运工程学报, 2013(6): 88-91. (YAN Juan, JI Ri chen, MA Hu ying. Calculation of superficial insulation capacity for box aqueduct during the winter [J]. Hydrorscience and engineering, 2013(6): 88-91. (in Chinese))

[5] 王长德,冯晓波.水工渡槽的温度应力问题 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1998, 31(5): 7-11. (WANG Chang de, FENG Xiao bo. Research on thermal stress of aqueduct [J]. Wuhan Univ. of Hdr. & Elec. Eng. 1998, 31(5): 7-11. (in Chinese))

[6] 张元海,李乔.桥梁结构日照温差二次力及温度应力计算方法的研究 [J]. 中国公路学, 2004, 17(1): 49-52. (ZHANG Yuan hai, LI Qiao. Study of the method for calculation of the thermal stress and secondary force of bridge structure by solar radiation [J]. China Journal of Highway and Transport, 2004, 17(1): 49-52. (in Chinese))

[7] 王同生,于子忠.涵闸混凝土的温度应力与温度控制 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010. (WANG Tong sheng, YU Zi zhong. The thermal stress and temperature control of culvert concrete [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2010. (in Chinese))

[8] 季日臣,夏修身,陈尧隆,等.骤然降温作用下混凝土箱形渡槽横向温度应力分析 [J]. 水利水电技术, 2007, 38(1): 50-52. (JI Ri chen, XIA Xi u shen, CHEN Ya o long, et al. Analysis on transverse thermal stress of concrete box aqueduct under sudden drop in temperature [J]. Water resources and hydropower engineering, 2007, 38(1): 50-52. (in Chinese))

[9] 杨俊成,郭磊,何定,等.倒虹吸混凝土冬季施工工期温控防裂研

- 究[J]. 混凝土, 2010, 254(12): 111-113. (YANG Jur cheng, GUO Lei, HE Ding, et al. Study on concrete's temperature control measures for the inverted siphon project in winter[J]. concrete, 2010, 254(12): 111-113. (in Chinese))
- [10] 季日臣, 严娟, 苏小凤. 混凝土箱形渡槽日照高温下结构安全研究[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(6): 90-92, 109. (JI Ri chen, YAN Juan, SU Xiaofeng. Structural safety research of concrete box aqueduct under solar radiayion with high temperature[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(6): 90-92, 109. (in Chinese))
- [11] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998. (ZHU Borfang. Thermal stress and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Water Power Press, 1998. (in Chinese))
- [12] 朱伯芳, 吴龙坤, 李玥, 等. 混凝土坝施工工期坝块越冬温度应力及表面保温计算方法[J]. 水利水电技术, 2007(8): 34-37. (ZHU Borfang, WU Longsheng, LI Yue, et al. The thermal stress and superficial thermal insulation of concrete dam under construction in winter in temperature control of cold regions [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007(8): 34-37. (in Chinese))
- [13] 张晓飞, 陈尧隆, 李守义, 等. 寒冷地区混凝土坝表面保温效果研究[J]. 河北农业大学学报. 2010, 33(1): 98-103. (ZHANG Xiaofei, CHEN Yaolong, LI Shouyi, et al. A study of the effect of superficial insulation RCC dam in cold area[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2010, 33(1): 98-103. (in Chinese))
- [14] 毛松鹤. 混凝土箱形输水桥日照温度场及温度应力研究[J]. 山西建筑, 2012(33): 190-191. (MAO Songhe. The solar radiation temperature field and thermal stresses research of concrete box water bridge [J]. Shanxi Architecture, 2012(33): 190-191. (in Chinese))

(上接第 596 页)

- [14] 蔡健民. 福建水资源的特点与面临的挑战[J]. 水利科技, 2003, 25(3): 1-3. (CAI Jianmin. Fujian water characteristics and challenges[J]. Hydraulic Science and Technology, 2003, 25(3): 1-3. (in Chinese))
- [15] 王惠文, 黄薇. 成分数据的线性回归模型[J]. 系统工程, 2003, 21(2): 102-106. (WANG Huiwen, HUANG Wei. A simple linear regression model based on the compositional data systems engineering[J]. 2003, 21(2): 102-106. (in Chinese))
- [16] 福建省水利厅. 福建省水资源公报[R]. 2010. (Ministry of water resources in Fujian province. Water Resources Bulletin [R]. 2010. (in Chinese))
- [17] 福建省统计局. 福建统计年鉴[G]. 中国统计出版社, 2010. (Department of statistics of Fujian province. Statistical Yearbook in Fujian province[R]. China statistics press, 2010. (in Chinese))
- [18] 陈佳贵, 黄群惠. 工业发展、国情变化与经济现代化战略[J]. 中国社会科学, 2005(4): 56-61. (CHEN Jiagui, HUANG Qunhui. Industrial development, conditions change and economic modernization strategy [J]. Social Sciences in China. 2005, 25(4): 56-61. (in Chinese))

(上接第 600 页)

- [27] 张俊然, 许强, 孙德安. 吸力历史对非饱和土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2013, 34(10): 2810-2814. (ZHANG Juran, XU Qiang, SUN De'an. Effect of suction history on mechanical behavior of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(10): 2810-2814. (in Chinese))
- [28] Bocking K A, Fredlund D G. Limitations of the axis translations technique[C]// Proceedings of 4th International Conference on Expansive Soils. Denver: ASCE, 1980: 117-135.
- [29] 赵成刚, 李舰, 刘艳, 等. 非饱和土力学中几个基本问题的探讨[J]. 岩土力学, 2013, 34(7): 1825-1831. (ZHAO Chenggang, LI Jian, LIU Yan, et al. Discussion on some fundamental problems in unsaturated soil mechanics [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(7): 1825-1831. (in Chinese))
- [30] 谢定义, 冯志焱. 对非饱和土有效应力研究中若干基本观点的思辨[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(2): 170-173. (XIE Dingyi, FENG Zhiyan. Consideration of some fundamental view points in studying effective stress of unsaturated soils [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(2): 170-173. (in Chinese))