

文章编号: 1000-4750(2011)04-0076-06

有挤压墙面板堆石坝的面板温度应力分析及改善措施研究

*程 嵩, 张 嘎, 张建民, 侯文峻

(清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 该文在综合考虑挤压式边墙、面板、坝体相互作用的基础上开发了面板堆石坝面板温度应力的数值模拟方法并验证了其合理有效性, 然后重点分析了挤压式边墙这种结构对于面板堆石坝面板温度应力的影响规律。分别采用沈珠江双屈服面弹塑性模型和清华弹塑性损伤模型描述堆石料和土与结构接触面, 结合三维有限元分析方法计算了设置挤压式边墙以及面板与挤压墙之间采用不同填料时面板的温度应力。在此基础之上, 从挤压墙与面板接触面的角度, 提出了减小面板温度应力的措施, 并进行了计算论证。结果表明: 挤压式边墙对于面板温度应力会产生不利的影响; 面板与挤压墙之间的不同填料对面板温度应力有一定的影响; 面板与挤压墙之间设置沥青油毡等填料有利于减小面板的温度应力。

关键词: 水工结构工程; 面板堆石坝; 数值模拟; 挤压式边墙; 温度应力; 改善措施

中图分类号: TV315; TV641.4 **文献标识码:** A

THE ANALYSIS AND AMENDATORY MEASURES OF TEMPERATURE STRESS OF FACE SLAB OF A CONCRETE-FACED ROCKFILL DAM WITH EXTRUSION WALL

*CHENG Song, ZHANG Ga, ZHANG Jian-min, HOU Wen-jun

(State Key Laboratory of Hydrosiences and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The interaction between the extrusion wall and face slab and a dam body itself is considered to develop a numerical method for the temperature stress of the face slab of CFRD and verify its rationality. The influence of the extrusion wall on the temperature wall of the face slab is then emphatically analyzed. The behaviors of the rockfill and soil-structure interface were described by Shen's two-yield surfaces model and Tsinghua's elasto-plasticity damage model, respectively. The 3D FEM analysis shows the temperature stress of the face slab with an extrusion wall and different filling materials between the face slab and extrusion wall. The method of decreasing the temperature stress of the face slab is brought forward and verified from the point of view of the interface between the extrusion wall and face slab. The results show that the extrusion wall have a negative effect on the temperature stress of the face slab. Different filling materials have rather different effects on the temperature stress. The filling materials like asphalt felt can decrease the temperature stress of the face slab.

Key words: hydraulic structural engineering; CFRD; numerical simulation; filling materials; temperature stress; improvements

收稿日期: 2009-09-22; 修改日期: 2009-10-28

基金项目: 973 课题项目(2007CB714108); 国家自然科学基金项目(50778105)

作者简介: *程 嵩(1984—), 男, 湖北人, 博士生, 主要从事岩土工程等方面的研究(E-mail: s-cheng06@mails.thu.edu.cn);

张 嘎(1976—), 男, 山东人, 副教授, 博士, 主要从事岩土工程等方面的研究(E-mail: zhangga@tsinghua.edu.cn);

张建民(1960—), 男, 陕西人, 教授, 博士, 博导, 主要从事岩土工程等方面的研究(E-mail: zhangjm@tsinghua.edu.cn).

侯文峻(1981—), 男, 山东人, 博士生, 主要从事岩土工程等方面的研究(E-mail: hwj02@mails.tsinghua.edu.cn).

混凝土面板是面板堆石坝的防渗主体,其安全性关系到大坝工程能否正常运行。研究表明,温度应力是引起面板裂缝的重要原因^[1-3]。例如,寒冷地区中裸露在大气中的混凝土面板,如果在入冬之前表面没有采取任何保温措施,则由于昼夜温差引起的温度应力足以令面板开裂。因此,在面板安全性评价中,有必要对混凝土面板的温度应力进行模拟分析。目前面板温度应力计算中,有限元法得到了广泛应用^[1-4]。

近年来,挤压式边墙作为一种新的面板堆石坝施工技术,已经被越来越多的面板堆石坝所采用。该技术具有能够加快施工进度,提高垫层料碾压质量,保护上游坡面等优点。不过,由于挤压式边墙直接位于垫层和面板之间,其对面板可能产生一定约束,从而对面板的温度应力产生重要影响,需要加以评估和论证。截至目前,尚缺乏综合考虑挤压式边墙、面板、坝体相互作用的面板温度应力的模拟方法。

本文在土石坝静动力有限元分析程序的基础上,基于挤压墙概化分析模型,开发了统一考虑挤压式边墙、面板、坝体相互作用的面板温度应力的模拟方法,并验证了其有效性,在此基础上,依托马来西亚巴贡面板堆石坝,进行了面板温度应力分析,研究了挤压墙对于面板温度应力的影响规律,探讨了减小面板温度应力的措施。

巴贡面板堆石坝位于东马来西亚的砂捞越州BALUI河上,大坝为混凝土面板堆石坝,最大坝高205m,坝顶全长740m,河谷宽高比为3.6。图1给出了巴贡面板堆石坝最大剖面图。

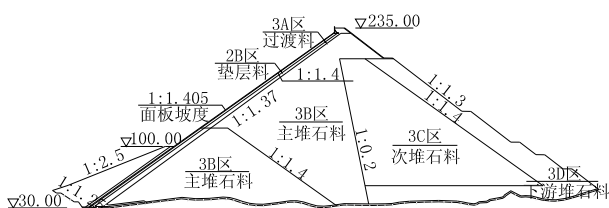


图1 巴贡面板堆石坝最大剖面图

Fig.1 The maximum profile of BAKUN dam

1 计算模型及参数

坝体的各种堆石料采用沈珠江双屈服面模型描述^[5]。该模型引入体积屈服面和剪切屈服面,能够较好地描述堆石料的力学特性,在国内堆石坝计算中得到广泛应用。该模型有8个参数,可通过一组

大型三轴试验确定。根据试验和现场监测资料分析,本文计算采用表1所示的模型参数。

表1 大坝堆石料模型参数
Table 1 Parameters of rockfill materials

材料	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	K	n	$\phi_0/(\circ)$	$\Delta\phi/(\circ)$	R_f	R_d	$c_d/(\%)$
2A	22	808	0.32	50.3	6.6	0.61	0.58	0.34
2B	22	757	0.39	50.4	6.8	0.66	0.65	0.42
3A	21.9	912	0.32	50.4	7.4	0.66	0.62	0.47
3B(高程80m下)	21.4	944	0.28	50.6	7.8	0.64	0.61	0.47
3B(高程80m上)	21.5	486	0.42	48.4	7.8	0.69	0.69	0.87
3C	21.66	389	0.45	45.6	5.7	0.62	0.61	0.96
3D	21.4	944	0.28	50.6	7.8	0.64	0.61	0.47

挤压墙采用清华大学提出的等效数值模型描述^[6]。该数值模型由等效板和等效接触面组成,分别采用了线弹性模型和清华接触面弹塑性损伤模型^[7-8]加以描述,形状简单,并且可以反映挤压墙的主要力学特性。等效模型的等效板厚度取24cm,采用线弹性模型描述,弹性模量为5GPa,泊松比为0.167。等效接触面采用清华弹塑性损伤接触面模型描述^[7-8]。模型参数通过工程类比确定,如表2所示。

表2 挤压墙等效接触面模型参数
Table 2 Parameters of equivalent interface model of the extrusion wall

$\epsilon_{vd,ir,ult}$	α	β	b	C_{e0}	ϕ_0	G_0	n_0
0.16	150	0.5	0.15	0.005	43	102	0.7
μ_0	m_0	$b_{\mu 0}$	$n_{b\mu}$	k_0	m_{k0}	C_0	
80	0.3	0.045	0.2	0.005	-0.3	0.005	

根据面板与挤压墙间不同填料的接触面试验结果,本文采用修正理想弹塑性模型^[9]模拟该接触面的力学特性。该模型共有 k_0 、 n 和粘聚力 c 、摩擦角 ϕ 四个参数,弹性剪切劲度按下式计算,能够考虑法向应力对接触面的动力响应的影响。

$$k_{st} = k_0 \cdot \gamma_w \left(\frac{\sigma}{p_a} \right)^n \quad (1)$$

式中, γ_w 为水的容重。通过对不同填料的大型接触面试验结果,确定的模型参数如表3所示。

表3 不同填料的面板与挤压墙接触面模型参数
Table 3 Interface model parameters of different filling materials between face slab and extrusion wall

挤压墙与面板接触面	k_0	n	c/kPa	$\phi/(\circ)$
乳化沥青	13000	1.25	2.0	32
土工膜	18000	1.13	0	29
沥青油毡	7000	1.10	1.0	4

面板混凝土采用线弹性模型模拟,弹性模量为 30GPa,泊松比为 0.167。中部压性面板竖缝的填料为硬木板,缝宽 12mm,采用线弹性模型描述,模量取为 1.1GPa。其他面板分缝采用硬平缝连接。

为了探讨挤压墙对面板温度应力的影响,本文还计算不采用挤压墙时的传统施工方式的面板温度应力分布,此时面板与垫层接触面采用清华弹塑性损伤模型描述,其参数与挤压墙等效接触面的参数来源相同,以具有可比性,如表 4 所示。

表 4 面板与垫层接触面模型参数

Table 4 Interface model parameters between face slab and bedding cushion

$\varepsilon_{vd,ir,ult}$	α	β	b	C_{e0}	ϕ_0	G_0	n_0
0.16	150	0.5	0.15	0.005	43	102	0.7
μ_0	m_0	$b_{\mu 0}$	$n_{b\mu}$	k_0	m_{k0}	C_0	
80	0.3	0.045	0.2	0.005	-0.3	0.005	

2 温度应力模拟方法

2.1 温度应力的有限元模拟

令弹性体内各点的变温为 ΔT ,则其产生的自由变形为 $\alpha\Delta T$ (α 为热胀系数),在各向同性体中 α 不随方向而改变,因而各向正应变均相同,且不产生角变形。而温度引起的初应变可以计算如下:

$$\varepsilon^0 = \alpha\Delta T \quad (2)$$

按有限单元法计算一般弹性体应力问题的表达式为:

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon\} = [D][B]\{\delta\}^e \quad (3)$$

式中: $\{\sigma\}$ 为单元应力矩阵; $\{\varepsilon\}$ 为单元应变矩阵; $\{\delta\}^e$ 为单元节点位移矩阵; $[D]$ 为弹性矩阵; $[B]$ 为应变矩阵。

节点力与节点位移之间的关系为:

$$\{F\}^e = \iint_e [B]^T [D] [B] \{\delta\}^e dx dy = [k]^e \{\delta\}^e \quad (4)$$

式中: $\{F\}^e$ 为单元节点力向量; $[k]^e$ 为单元刚度矩阵,由下式计算:

$$[k]^e = \iint_e [B]^T [D] [B] dx dy \quad (5)$$

采用初应变法,将变温引起的应变视作初应变,以 $\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^0\}$ 代替式(3)中的 $\{\varepsilon\}$,则式(3)变为:

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}^e - [D]\{\varepsilon^0\} \quad (6)$$

同理,式(4)可变为:

$$\{F\}^e = [k]^e \{\delta\}^e - \iint_e [B]^T [D] \{\varepsilon^0\} dx dy \quad (7)$$

显然,上式右端第二项即为由变温 T 引起的等

效节点荷载,它与其他外力叠加后和节点位移引起的节点内力相平衡。

求解变温应力时,首先要求得变温引起的等效节点荷载,再按式(7)求得节点位移,然后按式(6)计算应力。

2.2 温度应力模拟方法验证

根据理论分析和试验研究,当混凝土板厚度小于 0.1 倍的面板长度时,在温度变形条件下,全截面近似为均匀受力^[10-11]。对于二维无限平面混凝土板温度应力近似计算公式如下:

$$\sigma = -\frac{E \times \alpha \times \Delta T}{1 - \mu} S_{h(\tau)} \times R_K \quad (8)$$

式中: E 为混凝土的弹性模量; α 为线膨胀系数(通常取 0.00001); ΔT 为温度变化值; μ 为泊松比; $S_{h(\tau)}$ 为混凝土徐变松弛系数; R_K 为混凝土外约束系数,岩石取 1。

采用一个简化的混凝土板温度应力来验证本文所提出计算方法的有效性。其中混凝土板的尺寸为: 10m×100m×100m。边界约束条件为底部全部固定,顶部结点自由。计算中假定混凝土降温 13℃,算得的混凝土板温度应力分布如图 2 所示。可以看出温度应力的分布是从中心向四周逐渐减小,最大值约为 -3MPa。基于理论式(8)算得的温度应力最大值为 -3.1MPa。有限元计算和理论预测值相差在 5%以内,表明本文建立的温度应力模拟方法是有效的。

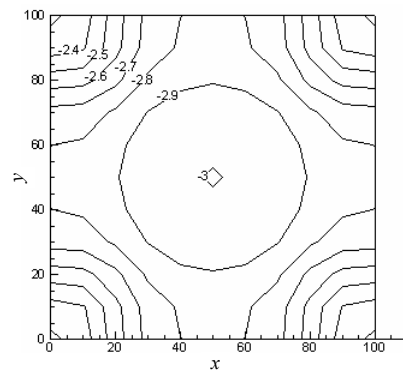


图 2 温度应力的分布 /MPa

Fig.2 The distribution of temperature stress

3 分析结果

3.1 计算条件

计算模拟大坝的实际施工过程(图 3),面板浇筑完成后计算面板温度应力的分布,不考虑蓄水过程。根据地形和施工过程模拟需要,建立了巴贡面板堆石坝的三维有限元网格(图 4)。单元形式以六面体单

元及其退化单元为主,其中结点总数 9056,单元总数 8553,而接触面单元采用有厚度单元模拟。

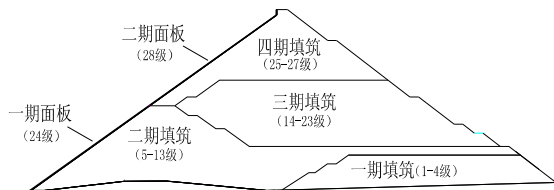


图3 大坝填筑过程及加载过程示意图

Fig.3 The process of dam constructing and loading

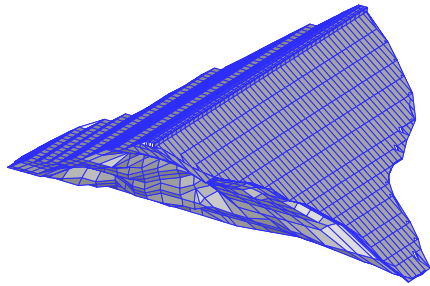


图4 巴贡坝体三维有限元离散网格

Fig.4 Three-dimensional mesh of BAKUN dam

为了重点研究温度应力的影响规律,本文将温度变化过程进行了一定的简化,考虑一种极限情况,即反映当地的环境条件和极端温降的影响。计算采用的温度变化过程如图 5 所示。计算的边界约束条件为坝体底部结点为固定约束,其余结点自由。

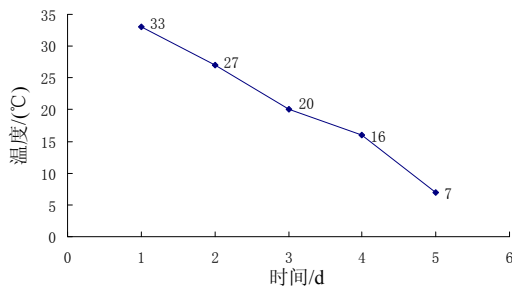


图5 假定的温变过程

Fig.5 Assumed temperature changes

3.2 挤压墙影响规律分析

表 5 给出了设置挤压墙(面板和挤压墙之间设置乳化沥青填料)和没有设置挤压墙时面板温度应力的计算结果,图 6 给出了竣工期在设置挤压墙时面板温度应力的分布,图 7 给出了没有设置挤压墙所产生的面板温度应力及其增量(相对设置挤压墙方案)的分布,图 8 给出了两种方案面板温度应力随坝体高程的分布情况。从图 6 可以看出在降温导致面板产生了较大的顺坡向拉应力,最大值出现在面板的左下部,面板上部的温度拉应力相对较小。图 7 和图 8 表明,设置挤压墙后,导致面板的中上部的顺坡向温度拉应力增大。这意味着采用挤压墙施工

方案会在一定程度上增大面板的温度拉应力。

表 5 挤压墙方案竣工期的面板温度应力最大值

Table 5 The extreme results of temperature stress of face slab after completion with and without extrusion wall

方案	最大顺坡向应力/MPa	
	拉	压
有挤压墙	3	—
无挤压墙	2.4	—

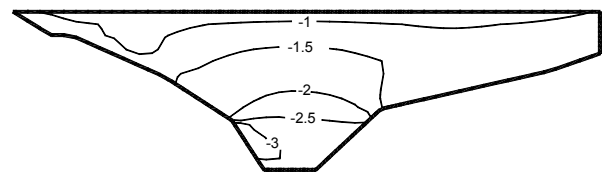
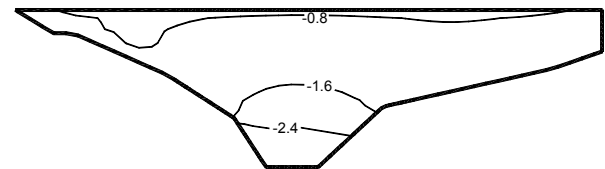
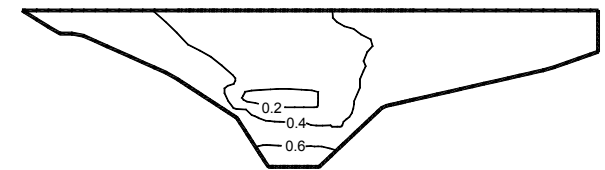


图6 竣工期设置挤压墙时面板顺坡向温度应力的分布 /MPa

Fig.6 The distribution of slope-direction temperature stress of face slab after completion with extrusion wall



(a) 面板顺坡向温度应力分布 /MPa



(b) 面板顺坡向温度应力增量分布 /MPa

图7 无挤压墙时面板温度应力及其变化分布

Fig.7 The distribution of temperature stress without extrusion wall

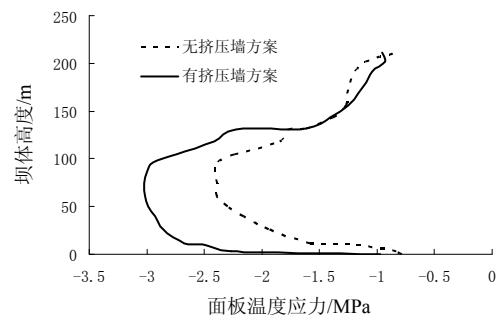


图8 最大横断面面板顺坡向温度应力沿高程分布

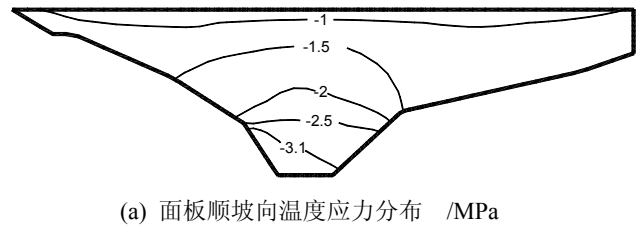
Fig.8 The distribution of slope-direction temperature stress along the elevation

3.3 减小面板温度应力的措施分析

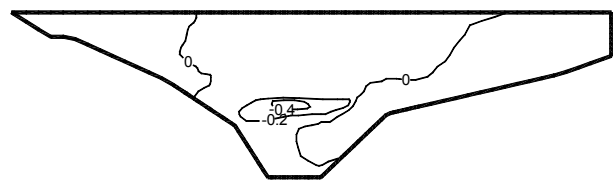
由于挤压墙的约束导致面板的温度应力增大,因此有必要采取措施减小挤压墙对面板的约束,从而降低温度应力。目前常用的措施包括在挤压墙与面板的表面涂抹沥青、铺设土工膜和沥青油毡。本

文根据系统试验基础上得到的相关模型参数(表 3),算得了不同填料方案时面板温度应力(表 6)。图 9 和图 10 分别给出了在面板与挤压墙之间设置土工膜填料和沥青油毡填料所产生的面板温度应力增量(相对乳化沥青方案)的分布。乳化沥青方案的温度拉应力分布同 3.2 中设置挤压墙的方案分布。而图 11 给出了三种填料下面板温度应力随坝体高程的分布情况。图 9 和图 11 表明,面板与挤压墙之间设置土工膜时,相对乳化沥青方案,温度应力的变化很小,仅在面板中部有较小的变化。图 10 和图 11 表明,相对乳化沥青方案,面板与挤压墙之间设置沥青油毡时的面板温度应力表现出如下特点:

1) 对于顺坡向温度应力,面板下部主要是压应力增量,上部出现少部分拉应力增量; 2) 总的来看,沥青油毡填料条件下面板由于温降产生的拉应力较小,这表明在面板与挤压墙之间设置沥青油毡填料有利于减小面板的温度拉应力。

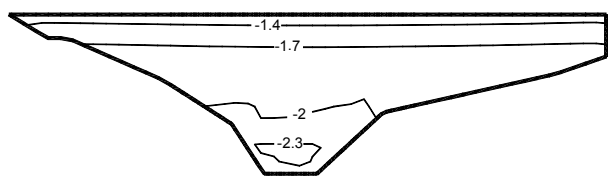


(a) 面板顺坡向温度应力分布 /MPa

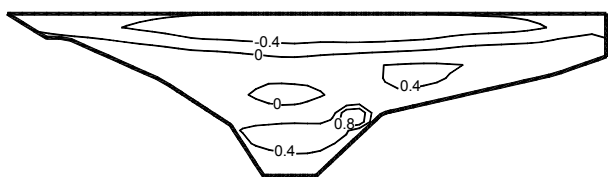


(b) 面板顺坝坡向温度应力增量分布 /MPa

图 9 设置土工膜产生的面板应力及其变化分布
Fig.9 The distribution of stress of face slab due to PE membrane



(a) 面板顺坡向温度应力分布 /MPa



(b) 面板顺坝坡向温度应力增量分布 /MPa

图 10 设置沥青油毡产生的面板应力及其变化分布
Fig.10 The distribution of stress of face slab due to asphalt felt

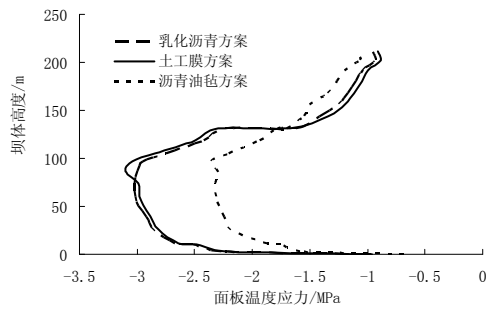


图 11 各方案最大横断面面板顺坡向温度应力沿高程分布
Fig.11 The distribution of slope-direction temperature stress along the elevation with different filling materials

表 6 不同填料方案竣工期的面板温度应力最大值
Table 6 The extreme results of temperature stress of face slab after completion with different filling materials

方案	最大顺坡向应力/MPa	
	拉	压
乳化沥青	3	—
土工膜	3.1	—
沥青油毡	2.3	—

4 结 论

本文在综合考虑挤压式边墙、面板、坝体相互作用的基础上开发了计算温度应力的模拟方法。在此基础上研究了挤压墙结构以及面板和挤压墙接触面填料对于面板温度应力的影响规律。根据计算结果,可得到以下结论:

- (1) 通过典型算例的分析验证了温度应力模拟的合理性和有效性。
- (2) 温度降低会使得面板产生较为明显的拉应力,最大值发生在面板中部附近。
- (3) 采用挤压墙结果在一定程度上增大了面板的温度拉应力,需要采取较好的温度控制措施。
- (4) 面板与挤压墙之间设置沥青油毡等填料有利于减小面板的温度应力。不同填料对面板的温度应力有较大影响,但基本分布规律是一致的。

参考文献:

[1] 麦家焯, 孙立勋. 西北口堆石坝裂缝成因的研究[J]. 水利水电技术, 1999, 30(5): 30—34.
Mai Jiaxuan, Sun Lixun. Research on causes of fractures of concrete plates faced on xibeikou rock-fill dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1999, 30(5): 30—34. (in Chinese)

[2] 蒋国澄, 傅志安, 凤家骥. 混凝土面板坝工程[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997.
Jiang Guocheng, Fu Zhi'an, Feng Jiaji. Concrete face

- slab dam construction [M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Publishing Company, 1997. (in Chinese)
- [3] 朱伯芳, 王同生. 水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1976.
- Zhu Bofang, Wang Tongsheng. Hydraulic concrete structure of temperature stress and temperature control [M]. Beijing: Water Power Press, 1976. (in Chinese)
- [4] Li Shouyi, Zhang Jinkai, Wang Ting. Effect of pouring temperature on temperature stress of RCC gravity dam [C]. 2008 Fourth International Conference on Natural Computation (ICNC). Jinan, IEEE, 2008(2): 355—359.
- [5] 沈珠江. 土体应力应变分析中的一种新模型[C]. 第 5 届土力学及基础工程学术讨论会论文集, 厦门, 中国建筑工业出版社, 1990: 101—105.
- Shen Zhujiang. A new model for stress-strain relationship analysis of soil [C]. Proceedings of the 5th Soil Mechanics and Foundation Engrg, Xiamen, China Architecture & Building Press, 1990: 101—105. (in Chinese)
- [6] 张建民, 张嘎, 刘芳. 面板堆石坝挤压式边墙的概化数值模型及应用[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(3): 249—253.
- Zhang Jianmin, Zhang Ga, Liu Fang. A simplified equivalent numerical model of extrusion-sidewall for CFRD and its application [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(3): 249—253. (in Chinese)
- [7] 张嘎, 张建民. 粗粒土与结构接触面统一本构模型及试验验证[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(10): 1175—1179.
- Zhang Ga, Zhang Jianmin. Unified modeling of soil-structure interface and its test confirmation [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(10): 1175—1179. (in Chinese)
- [8] 张嘎, 张建民. 接触面弹塑性损伤模型在面板堆石坝应力变形分析中的应用[J]. 水力发电学报, 2005, 24(4): 5—10.
- Zhang Ga, Zhang Jianmin. Application of elastoplasticity damage interface model in stress-strain analysis of CFRD [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 24(4): 5—10. (in Chinese)
- [9] 侯文峻, 张建民, 张嘎. 采用挤压式边墙结构的面板堆石坝的动力反应分析[J]. 水力发电学报, 2008, 27(2): 50—54, 109.
- Hou Wenjun, Zhang Jianmin, Zhang Ga. Dynamics response analysis of CFRD with extrusion-sidewall structure [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 27(2): 50—54, 109. (in Chinese)
- [10] 叶琳昌, 沈义. 大体积混凝土施工[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1987.
- Ye Linchang, Shen Yi. Mass concrete construction [M]. Beijing: China Construction Industry Publisher, 1987. (in Chinese)
- [11] 杨德福, 马锋玲. 面板混凝土抗裂及耐久性研究[J]. 水利发电, 2001, 30(8): 42—44.
- Yang Defu, Ma Fengling. The research on crack resistance and durability of face-slab concrete [J]. Water Power 2001, 30(8): 42—44. (in Chinese)

(上接第 62 页)

- [6] 徐世烺, 吴智敏, 丁生根. 混凝土双 K 断裂参数的实用解析方法[J]. 工程力学, 2003, 20(3): 54—61.
- Xu Shilang, Wu Zhimin, Ding Shenggen. A practical analytical approach to the determination of double-K fracture parameters of concrete [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(3): 54—61. (in Chinese)
- [7] Kumar Shailendra, Barai S V. Determining double-K fracture parameters of concrete for compact tension and wedge splitting tests using weight function [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009, 76: 935—948.
- [8] Xu S. Determination of parameters in the Bilinear, Reinhardt's and exponentially nonlinear softening curves and their physical meanings [C]. Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen, Hamburg, Libri BOD, 1999: 410—424.
- [9] 卜丹. 楔入式紧凑拉伸断裂试验研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2006.
- Bu Dan. Fracture experiment study using wedge-splitting test on compact tension specimens [D]. Liaoning: Dalian University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [10] CEB-Comite Euro-International du Beton-EB-FIP Model Code 1990 [S]. Bulletin D Information No.213/214, Lausanne, 1993.
- [11] Rice J R. Some remarks on elastic crack-tip stress fields [J]. International Journal of Solids Structures, 1972, 8: 751—758.
- [12] Glinka G, Shen G. Universal features of weight functions for cracks in mode I [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1978, 10: 257—266.
- [13] Hiroshi Tada, Paris P C, Irwin G R. The stress analysis of cracks handbook [M]. New York: ASME Press, 2000.