

DOI: 10.11779/CJGE201409020

# 土坝温度场反馈渗流场可行性研究

谷艳昌<sup>1,2</sup>, 王士军<sup>1,2</sup>, 庞琼<sup>1,2</sup>, 周春煦<sup>3</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029; 2. 水利部大坝安全管理中心, 江苏 南京 210029; 3. 南通航运职业技术学院, 江苏 南通 226010)

**摘要:** 利用温度场连续分布监测成果反馈渗流场, 能够克服传统渗流场点式监测的不足。通过实验室筑建均质土坝模型, 并在模型内敷设分布式测温光纤及测压管等, 同步获取渗流场与温度场信息。通过理论分析均质土坝温度场分布及变化与渗流梯度、水土温差、渗透系数、导热系数、比热以及时间等因素的关系, 构建了均质土坝温度场反馈渗流场的数学模型, 并进行了室内试验成果验证分析, 实现了由温度场信息反馈渗流场信息。研究成果表明: 土坝温度场信息推求渗流场信息是可行的, 构建的土坝温度场反馈渗流场的数学模型是成立的。

**关键词:** 室内实验; 均质土坝; 温度场; 渗流场; 反馈; 数学模型

中图分类号: TV31

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2014)09-1721-06

**作者简介:** 谷艳昌(1980-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水库大坝安全监控与管理领域的科研工作。E-mail: ycgu@nhri.cn。

## Feasibility of temperature field feeding back seepage field for earth dams

GU Yan-chang<sup>1,2</sup>, WANG Shi-jun<sup>1,2</sup>, PANG Qiong<sup>1,2</sup>, ZHOU Chun-xu<sup>3</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Dam Safety Management Center of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Nantong Shipping College, Nantong 226010, China)

**Abstract:** Through the feedback from the continuous distributed temperature field observed on seepage field, the deficiency of the traditional seepage field monitoring can be overcome. Based on an indoor homogeneous earth dam model built for experiment, with distributed fiber temperature sensors and piezometers arranged within the model, information of seepage field and temperature field can be obtained simultaneously. A mathematical model for the temporal and spatial distribution of the temperature field of the homogeneous earth dam is established after analyzing the following factors: temperature variation and seepage gradient, temperature difference between seepage water and soil, permeability coefficient, thermal conductivity, specific heat, time and so on. In view of the above, the seepage field is fed back. Using the experimental observation data of the model, coefficients of the mathematical model for earth dams are estimated, and information of the seepage field fed back from the temperature field can be achieved. The verification results show that the proposed mathematical model for the temperature field feeding back the seepage field is feasible, and that the mathematical model built for the seepage field fed back from the temperature field of earth dams is tenable.

**Key words:** laboratory experiment; homogeneous earth dam; temperature field; seepage field; feedback; mathematical model

## 0 引言

渗流隐患是土坝安全的主要威胁, 国际上由管涌和渗漏造成大坝事故或失事所占比例高达 52.5%。而中国 3 万多座病险水库中, 有约 40% 的大坝存在渗流安全问题<sup>[1-2]</sup>。

利用坝体温度监测成果反馈大坝渗漏, 是现有渗流监测主要方法之一。典型应用有温度示踪渗流监测技术(地球物理学探测技术)、渗流热监测技术(点式温度计测坝体温度、热脉冲渗流监测、分布式测温光纤监测等)。而分布式温度监测系统具有精度高、长距离分布式、连续监测的优点, 在大坝渗流监测中得到

较为广泛应用, 且前景广阔。日本、加拿大、瑞士以及德国等研制开发智能分布式光纤温度监测系统<sup>[3]</sup>。Sam Johansson 等探讨光纤温度监测技术研究, 并利用坝体埋管监测的长期温度数据反馈了多座水库大坝的渗流状况<sup>[4]</sup>。Aufleger 等进行加热光纤温度监测技术研究<sup>[5-6]</sup>。中国很多学者对分布式渗流热监测技术进行研究与应用, 在三峡大坝、小湾混凝土拱坝、石门子

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2011DFA72810); 国家自然科学基金项目(51209143); 南京水利科学研究院重点基金项目(Y713007)

收稿日期: 2013-10-28

碾压混凝土拱坝、思安江混凝土面板堆石坝和长调水电站混凝土面板的监测加以应用<sup>[7-15]</sup>。

但是该渗流监测技术,只能用于渗漏点位置的定性确定<sup>[16]</sup>。目前,分布式光纤监测技术研究与应用主要限于大坝渗漏位置定位方面以及数学模型探索阶段,而对温度场与渗流场间的互馈耦合试验研究鲜见报道。文中通过理论分析坝体温度场变化与渗流梯度、水土温差、渗透系数、导热系数、比热以及时间等因素的关系,构建土坝温度场反馈渗流场的数学模型;基于实验室均质土坝模型的分布式测温光纤及测压管同步观测的温度场及渗流场信息,建立与验证了坝体温度场反馈渗流场的数学模型,为分布式光纤测温技术应用于土坝渗流监测,提供量化理论基础。

## 1 室内均质土坝模型实验

### 1.1 土坝模型概况

土坝设计模型尺寸为:高 70 cm,顶宽 30 cm,上下游坡度为 1:1.5(具体尺寸见图 1,图中圆点表示分布式光纤位置)。模型铺设在水槽中,两侧为有机玻璃,底部为钢板,顶端开口(参见图 2)。坝体材料为均质粉细砂,其渗透系数  $k=5 \times 10^{-3}$  cm/s<sup>[17]</sup>。

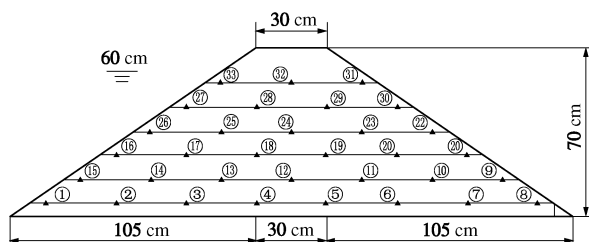


图 1 均质土坝模型光纤布置

Fig. 1 Arrangement of distributed optical fiber in homogeneous earth dam model



图 2 室内均质土坝模型

Fig. 2 Laboratory model of homogeneous earth dam

### 1.2 分布式测温光纤布置

由于本试验采用的分布式光纤测温设备空间分辨率为 1.0 m,若采用线性敷设,在较小尺寸的模型试验中,无法准确测量模型中某点温度,为此本试验中

采用一段长度的光纤用来测量获取模型中某一点处的温度。根据试验研究<sup>[18]</sup>,采用 3 m 光纤束成一捆作为一测点,可以测量代表模型某测点的温度。本试验内光纤束布设水平向间隔 30 cm,垂向间隔为 10 cm,共敷设光纤 6 层,33 处光纤束(详见图 1),可获取坝体 33 个测点的温度。

### 1.3 试验方法与过程

试验工况为:坝体上游水位 60 cm,库水温 40℃,下游无水,实验室环境温度 17.48℃。试验过程为,坝体上游水开始入渗坝体直至形成稳定渗流全过程,试验过程中维持上游水位(60 cm)不变。

分布式光纤测温测量间隔时间为 1 min,共持续 360 min。同时,每隔 10 min 观测一次测压管水位与坝体渗流量,其中坝体流量一次观测 3 个样本,采用定水量(300 mL)记时间的方式。

### 1.4 室内实验初步成果

根据室内模型观测获取的数据,分别进行渗流场与温度场分析。图 3,4 给出了 120 min 时刻典型渗流场与温度场的分布图,其他分析成果见文献[17]。

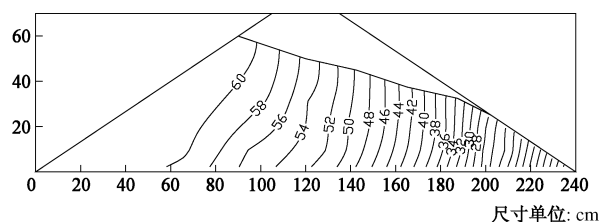


图 3 室内均质土坝典型渗流场分布图

Fig. 3 Distribution of typical seepage field of laboratory homogeneous earth dam

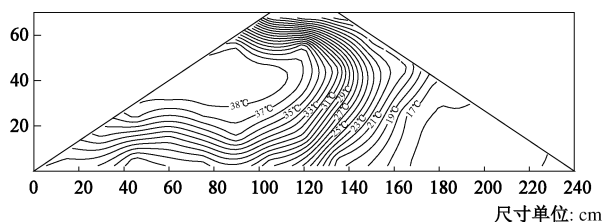


图 4 室内均质土坝典型温度场分布图

Fig. 4 Distribution of typical temperature field of laboratory homogeneous earth dam

## 2 数学模型构建

渗流作用下坝体内部某一点温度变化分别与渗流梯度、渗流水温与土体温度的差值、渗透系数、导热系数、比热以及时间等因素有关,即

$$\Delta T = F(J, k, \lambda, C, T_{ws}, t) \quad (1)$$

式中  $J$  为渗流梯度;  $k$  为渗透系数;  $\lambda$  为导热系数;

$C$  为比热;  $T_{ws}$  为水体与土体的温差;  $t$  为时间。

对于均质土坝模型,当渗流稳定情况下,可以认为  $k$ ,  $\lambda$ ,  $C$  为常量,而影响坝体不同部位温度变化的因子为  $J$ ,  $T_{ws}$ ,  $t$ 。

## 2.1 温度与渗流梯度 $J$ 的关系

在渗流场影响下,坝体温度场数学模型为<sup>[19-20]</sup>

$$\left( \lambda \frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial T^2}{\partial y^2} \right) + C_w \rho_w \left[ \frac{\partial(v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y T)}{\partial y} \right] + Q = C \rho \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

式中  $x$ ,  $y$  为测点的坐标;  $\rho_w$ ,  $\rho$  分别为水体与土体的密度;  $C_w$ ,  $C$  分别为水体与土体的比热;  $v_x$ ,  $v_y$  分别为  $x$  向与  $y$  向的渗流速度;  $Q$  为坝体内部热源项,

其他符号意义同前;  $\left( \lambda \frac{\partial T^2}{\partial x^2} + \lambda \frac{\partial T^2}{\partial y^2} \right)$  表示微元体热传导作用导入的热量;  $C_w \rho_w \left[ \frac{\partial(v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y T)}{\partial y} \right]$  表示由于水体流入与流出微元体所带走或留下的热量。

截取式(2)中与渗流梯度有关的左边第二项与右端项,建立如下关系表达式:

$$C \rho \frac{\partial T}{\partial t} \propto C_w \rho_w \left[ \frac{\partial(v_x T)}{\partial x} + \frac{\partial(v_y T)}{\partial y} \right], \quad (3)$$

对于某一点  $(x, y)$ , 将  $v_x = kJ_x$ ,  $v_y = kJ_y$  代入式(3), 并进行积分, 可得

$$C \rho \Delta T(t) \propto C_w \rho_w k [J_x G_1(t) + J_y G_2(t)], \quad (4)$$

式中,  $G_i(t)$  为与时间  $t$  有关的积分常量。

由式(4)可以看出,渗流梯度越大,温度变化越快,即测点温度变化与该点渗流梯度成正相关关系。从上式还可以看出,温度变化的速度与水的比热也成正相关关系,而与自身比热成反相关关系。同理可以推出,温度变化速度与热传导系数成正相关关系。

## 2.2 温度与水土温差 $T_{ws}$ 的关系

土体中某一点的温度值,实际上是渗流水温与土颗粒温度的混合温度。显然,渗流水温与土体温差越大,实测温度变化越快,土体温度变化也越快。实验室内土坝模型,库水从上游面渗透到下游面,温度逐渐变低,水体与土体的温差由大变小,热流锋面传递的速度也越来越慢,也即坝体温度变化与某点到上游面的距离成负相关关系。为了反映这一现象,以所建模型的系统坐标表示,即某处坐标点距离上游越近处,其渗流水温与土体温差就越大、温度变化就快,反之,则越小。也即

$$\Delta T(t) \propto T_{ws} = \Phi(x, y), \quad (5)$$

式中,  $\Phi(x, y)$  为模型所建系统坐标的函数,  $(x, y)$  为坐标。

## 2.3 温度变化与时间 $t$ 的关系

根据典型测点温度变化的过程线分布,选取温度变化与时间的关系如下<sup>[21]</sup>:

$$\Delta T(t) = b'_1 \theta(t) + b'_2 \ln \theta(t) \quad (6)$$

式中  $\theta(t)$  为观测时刻  $t_i$  与初始时刻  $t_0$  之间的时间差  $\Delta t$  (min) 乘以 0.01;  $b'_1$ ,  $b'_2$  为待求系数。

## 2.4 数学模型构建

综合式(4)、(5)以及式(6)的关系表达式,考虑到室内土坝模型的均质性、温度场分布的连续性,将渗流梯度、时间因子分别与坐标函数相组合。据此,构建室内均质土坝由温度场反馈渗流场的数学模型为

$$\Delta T(x, y, t) = a_0 + J(x, y) \Phi_1 + \theta \Phi_2 + \ln(\theta) \Phi_3 \quad (7)$$

式中  $a_0$  为常数项;  $J(x, y)$  为  $(x, y)$  处的渗流梯度;  $\Phi_i$  为系统坐标表达式 ( $\Phi_i = b_{i0} + b_{i1}x + b_{i2}y + b_{i3}x^2 + b_{i4}y^2 + b_{i5}xy$ ,  $i=1,2,3$ ), 其他符号意义同前。

由式(7)便可以推求出某点处的渗透梯度,即

$$J(x, y) = \frac{\Delta T(x, y, t) - (a_0 + \theta \Phi_2 + \ln(\theta) \Phi_3)}{\Phi_1} \quad (8)$$

式(7)即为室内均质土坝温度场反馈渗流场的数学模型,根据该模型可通过式(8)反推求出渗流场的分布。

## 3 数学模型应用

采用上述室内模型试验成果,验证所构建的反馈数学模型的可行性。

### 3.1 反馈数学模型

#### (1) 观测资料选取

室内模型试验中获取了 33 个测点的温度资料,经过资料分析,剔除观测资料不佳的#3, #17 测点,以及处于浸润线以外的#22, #30, #31 与#32 测点,并以#9, #19 两个测点作为模型效果的预留验证点。

因此,建模所选用的测点号为#1~#8, #10~#18, #20, #21, #23~#29, #33, 共 25 个测点,表 1 为各个测点相应的坐标与渗流梯度;建模所选用的时间序列为 183~423 min,间隔设为 10 min。

#### (2) 反馈数学模型估计

根据选取的观测资料,对式(7)的待定系数进行反演(采用逐步回归方法),据此,获得该室内均质土坝模型的反馈数学模型如下:

$$\Delta T = 18.233 + J(59.823 - 1.249x + 2.966y + 0.004x^2 - 0.022xy) + \ln(\theta)(-5.925 + 0.16y - 0.007y^2 + 0.003xy) \quad (9)$$

该模型复相关系数  $R = 0.962$ , 剩余标准差  $S = 1.41$ 。取显著性水平 0.01, 对回归模型进行检验,其  $F$  值为 763.523, 明显大于临界值  $F(18, 606) = 1.99$ , 因此,所建模型的精度较高。

表 1 测点坐标与梯度

Table 1 Coordinates and seepage gradients at measuring points			
测点	坐标 $x$	坐标 $y$	渗流梯度 $J$
#1	15	5	0.009
#2	45	5	0.055
#4	105	5	0.191
#5	135	5	0.249
#6	165	5	0.311
#7	195	5	0.439
#8	225	5	0.627
#10	180	15	0.356
#11	150	15	0.274
#12	120	15	0.224
#13	90	15	0.165
#14	60	15	0.091
#15	30	15	0.033
#16	45	25	0.067
#18	105	25	0.205
#20	165	25	0.300
#21	195	25	0.384
#23	150	35	0.262
#24	120	35	0.236
#25	90	35	0.195
#26	60	35	0.113
#27	75	45	0.179
#28	105	45	0.245
#29	135	45	0.236
#33	90	55	0.322

3.2 温度场反馈渗流场

(1) #9 与 #19 测点温度验证

表 2 给出了#9 与#19 两个测点基于回归模型 (9) 的拟合值与实测结果的对比。由表 2 看出, 预测结果与实测结果整体上比较接近, 尤其是#19 测点, 平均误差只有 4.05%, 而位于坝体下游部位的#9 测点误差相对较大, 究其原因可能是下游坡脚区域样本测点相对上游部位较少所致, 但是整体来讲, 验证了模型的可靠性。

(2) 推求渗流梯度

以#19 测点为例, 预测该点的渗流梯度。由式 (8) 可知, 只要给出该点的坐标、时间及其对应的温度变化量, 便可以求出其相应的渗流梯度。表 3 给出了#19 测点处的不同时间渗流梯度计算结果。

由表 1 可以看出, 不同时间所计算出的渗流梯度不尽相同, 但是与实测梯度 0.249 比较, 相对误差一般在 10%以内, 较为接近。因此, 可以认为基于式 (9) 的反馈数学模型, 可以定量计算出该室内均质土坝模型相应测点处的渗流梯度。再将渗流梯度与渗透系数相结合, 便可以求出该点处的渗流速度。

此外, 可以采用类似的方法, 建立其他工况下温度场反馈渗流场的数学模型。

表 2 #9 与 #19 测点温度验证结果

Table 2 Temperature verification results at point No. 9 and 19						
时间 /min	测点					
	#9			#19		
	实测 /°C	预测 /°C	误差 /%	实测 /°C	预测 /°C	误差 /%
183	15.256	13.654	10.50	26.893	29.062	8.07
193	15.308	14.231	7.04	27.845	29.410	5.62
203	15.337	14.796	3.53	28.621	29.747	3.93
213	15.394	15.350	0.29	29.359	30.075	2.44
223	15.536	15.894	2.30	30.045	30.394	1.16
233	15.580	16.429	5.45	30.707	30.705	0.01
243	15.680	16.956	8.14	31.174	31.010	0.53
253	15.845	17.476	10.29	31.618	31.307	0.98
263	16.019	17.988	12.29	31.833	31.598	0.74
273	16.155	18.494	14.48	32.097	31.884	0.66
283	16.441	18.994	15.53	32.243	32.164	0.25
293	16.703	19.488	16.67	32.428	32.440	0.04
303	17.166	19.978	16.38	32.368	32.710	1.06
313	17.431	20.462	17.39	32.476	32.977	1.54
323	17.875	20.942	17.16	32.487	33.240	2.32
333	18.341	21.418	16.78	32.477	33.499	3.15
343	18.946	21.889	15.53	32.560	33.754	3.67
353	19.452	22.357	14.93	32.479	34.006	4.70
363	20.052	22.821	13.81	32.359	34.255	5.86
373	20.597	23.282	13.04	32.258	34.501	6.95
383	21.057	23.74	12.74	32.274	34.745	7.66
393	21.564	24.195	12.20	32.167	34.985	8.76
403	22.116	24.647	11.44	32.113	35.223	9.68
413	22.516	25.096	11.46	32.103	35.459	10.45
423	23.026	25.543	10.93	32.160	35.692	10.98
平均误差: 11.61%			平均误差: 4.05%			

表 3 #19 测点渗流梯度

Table 3 Seepage gradients at point No. 19						
参数	取值					
时间/min	213	223	233	243	253	263
梯度	0.272	0.261	0.252	0.247	0.243	0.245
误差/%	9.07	4.95	1.01	0.83	2.49	1.66
时间/min	273	283	293	303	313	323
梯度	0.245	0.249	0.252	0.261	0.265	0.272
误差/%	1.43	0.05	1.04	4.72	6.48	9.27

4 结论与建议

(1) 根据理论分析, 推导了均质土坝温度变化与渗流梯度、渗流水与土体之间的温差、渗透系数、导

热系数、比热以及时间等因素的关系,建立了室内均质土坝模型的温度场反馈渗流场的数学模型。

(2) 利用室内均质土坝模型试验的温度场与渗流场实测资料,进行了土坝温度场反馈渗流场数学模型的参数确定,经分析,该回归模型的精度较高。

(3) 室内均质土坝反馈数学模型推求渗流梯度的计算结果表明,利用本文提出的反馈数学模型,实现由坝体温度信息推求渗流场信息,是可行的,分布式光纤测温技术是土坝渗流监测的新途径。

(4) 本文建立的由温度场反馈渗流场的数学模型,有待实际土坝工程中应用与进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 张启岳. 土石坝加固技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999. (ZHANG Qi-yue. Reinforcement technologies for earth-rockfill dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese))
- [2] 汝乃华, 牛运光. 大坝事故与安全·土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997. (RU Nai-hua, NIU Yun-guang. Dam accidents and safety-earth-rockfill dams[M]. Beijing: China Water & Power Press, 1997. (in Chinese))
- [3] 赵 坚. 德国运用地温测控技术进行堤坝渗漏探测[J]. 水利水电科技进步, 2002(5): 46. (ZHAO Jian. Introduction about the application of ground temperature measurement and control technology for dam leakage detection in Germany[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2002(5): 46. (in Chinese))
- [4] JOHANSSON S, FARHADIROUSHAN M. Seepage and strain monitoring in embankment dams using distributed sensing in optical fibres-theoretical background and experiences from some installations in Sweden[C]// International Symposium on Dam Safety and Detection of Hidden Troubles, Xi'an, 2005: 1400 - 1284.
- [5] AUFLEGER M, PERZLMAIER S, DORNSTÄDTER J, et al. A leakage detection system for concrete faced rockfill dams[C]// Proceedings of Symposium on Concrete Faced Rockfill Dams. Yichang, 2005(5): 255 - 264. (in China)
- [6] PERZLMAIER S, AUFLEGER M, CONRAD M. Distributed fibre optic temperature measurements in hydraulic engineering-prospects of the heat-up method[C]// Proceedings of the 72nd Annual Meeting of the International Commission on Large Dams (ICOLD). Seoul, 2004: 16 - 22. (in Korea)
- [7] 蔡德所. 光纤传感技术在大坝工程中的应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002. (CAI De-suo. Applications of the optical fiber sensing technology in dam engineering[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2002. (in Chinese))
- [8] 魏德荣, 赵花城, 秦一涛, 等. 分布式光纤监测技术在中国的发展[J]. 贵州水力发电, 2005, 19(1): 7 - 9. (WEI De-rong, ZHAO Hua-cheng, QIN Yi-tao, et al. Development of distributed optical fiber monitoring technology in China[J]. Guizhou Water Power, 2005, 19(1): 7 - 9. (in Chinese))
- [9] 袁培进, 董泽荣, 赵 华, 等. 小湾水电站混凝土双曲拱坝施工期坝体温控监测[C]// 2008 年大坝安全监测设计与施工技术交流会论文集. 杭州, 2008: 163 - 169. (YUAN Pei-jin, DONG Ze-rong, ZHAO Hua, et al. Temperature control monitoring of concrete hyperbolic arch dam of the Xiaowan hydropower station during the construction[C]// Proceedings of Exchange Meeting About Dam Safety Monitoring Design and Construction Technology. Hangzhou, 2008: 163 - 169 (in Chinese))
- [10] 李端有, 熊 健, 於三大, 等. 土石坝渗流热监测技术研究[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(6): 29 - 33. (LI Duan-you, XIONG Jian, YU San-da, et al. Study on seepage monitoring technology with temperature in embankment dam[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2005, 22(6): 29 - 33. (in Chinese))
- [11] 李端有, 王 煌. 分布式光纤测温技术在土石坝渗流监测中的应用[C]// 2008 年大坝安全监测设计与施工技术交流会论文集. 杭州, 2008. (LI Duan-you, WANG Huang. Application of distributed optical fiber temperature measurement technology in earth-rockfill dam seepage monitoring[C]// Proceedings of Exchange Meeting About Dam Safety Monitoring Design and Construction Technology. Hangzhou, 2008. (in Chinese))
- [12] 秦一涛, 刘剑鸣, 夏旭鹏, 等. 分布式光纤温度监测系统在长调水电站的应用实践[J]. 大坝与安全, 2004(1): 45 - 48. (QIN Yi-tao, LIU Jian-ming, XIA Xu-peng, et al. Distributed optical fiber temperature monitoring system and its application[J]. Dam and Safety, 2004(1): 45 - 48. (in Chinese))
- [13] 肖衡林, 蔡德所, 刘秋满. 用分布式光纤测温系统测量混凝土面板坝渗流的建议[J]. 水电自动化与大坝监测, 2004, 28(6): 21 - 23. (XIAO Heng-lin, CAI De-suo, LIU Qiu-man. Distributed optical fiber temperature measurement system for leakage measurement of concrete face rockfill dams [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2004, 28(6): 21 - 23. (in Chinese))
- [14] 徐卫军, 李端有, 侯建国. 分布式光纤测温系统在混凝土

- 温度监测的应用[J]. 云南水力发电, 2005, 21(6): 41 - 46. (XU Wei-jun, LI Duan-you, HOU Jian-guo. Application of distributed optical fiber temperature monitoring system to monitoring of concrete temperature[J]. Yunnan Water Power, 2005, 21(6): 41 - 46. (in Chinese))
- [15] 肖衡林, 蔡德所, 范 瑛. 分布式光纤温度传感技术用于面板堆石坝面板渗漏监测[J]. 水电自动化与大坝监测, 2006, 30(6): 53 - 57. (XIAO Heng-lin, CAI De-suo, FAN Ying. Application of distributed optical fiber temperature sensing technology to leakage monitoring for rock-fill dams with face slabs[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2006, 30(6): 53 - 57. (in Chinese))
- [16] 房纯纲, 姚成林, 贾永梅. 堤坝隐患及渗漏无损检测技术与仪器[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010. (FANG Chun-gang, YAO Cheng-lin, JIA Yong-mei. Nondestructive testing technology and instruments for dam leakage and hidden dangers[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2010. (in Chinese))
- [17] 王士军, 周春煦, 谷艳昌. 基于分布式光纤测温技术反馈土坝渗流场模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2009. (WANG Shi-jun, ZHOU Chun-xu, GU Yan-chang. Study on experimental model feeding back seepage field of earth dam based on distributed optical fiber temperature measurement technology[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [18] GU Yan-chang, WANG Shi-jun, ZHOU Chun-xu. Study on feasibility of distributed optical fiber in small scale laboratory model[C]// Proceedings of International Symposium "Dam and Sustainable Water Development". Hanoi: Vietnam National Committee on Large Dams & Water Resources Development, 2010: 76 - 77. (in Vietnam)
- [19] 朱明善, 林兆庄, 刘 颖, 等. 工程热力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995. (ZHU Ming-shan, LIN Zhao-zhuang, LIU Ying, et al. Engineering thermodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995. (in Chinese))
- [20] ZHOU Chun-xu, WANG Shi-jun, DUAN Xiang-bao. Study on relationship of seepage field and temperature field in sand cylinder experiment[C]// International Conference on Dam Safety Management. Nanjing: Nanjing University Press, 2008: 63 - 68. (in China)
- [21] 吴中如. 水工建筑物安全监控理论及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001. (WU Zhong-ru. Safety monitoring theory and its application of hydraulic structures[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001. (in Chinese))

## 第二届全国大学生加筋土挡墙设计大赛（旭域杯） （2015 年 5 月 22~25 日 成都）

**主办单位:** 中国土工合成材料工程协会。

**承办单位:** 同济大学; 西南交通大学; 青岛旭域土工材料股份有限公司。

**宗旨:** 全国大学生加筋土挡墙设计大赛是培养大学生创新意识、合作精神和工程实践能力的学科性竞赛。本竞赛对高等学校开展创新教育和实践教学改革、加强高校与企业之间联系、推动学科创新活动将起到积极的示范作用。

**参赛对象:** 全日制在校土木工程或相关专业的本科生和硕士研究生。每个参赛队由 2 至 3 名学生和 1 名指导老师组成。

**参赛流程:** 报名 → 组委会审核 → 提交参赛作品设计方案 → 专家组初选, 产生入围决赛名单 → 成都决赛, 产生优胜者及各级奖项 → 颁奖。

**大赛时间安排:** 报名截止日期: 2014 年 9 月 15 日, 通过 E-mail 报名。参赛资格确认日期: 2014 年 10 月 31 日, 组委会审核后, 确认参赛资格。设计方案截止日期: 2014 年 12 月 31 日, 以当地邮戳为准。设计方案按组委会提供的模板撰写。入围决赛资格: 对提交的所有有效作品, 组委会组织专家匿名评审, 确定获得决赛资格的参赛队名单, 通过 E-mail 通知参赛队

员, 并同时在本次大赛网站公告。决赛时间和地点: 2015 年 5 月 22~25 日 (第五届全国土工合成材料加筋土学术研讨会期间), 在西南交通大学进行现场决赛。

**参赛费用:** 本次大赛不对参赛队收取报名费、参赛费、专家评审费等费用。对于入围决赛的参赛队, 组委会免收参赛学生“第五届全国土工合成材料加筋土学术研讨会”会议注册费, 并适当补助差旅费。决赛阶段, 除组委会提供的基本材料外 (详见比赛规则), 其他材料和简单工具购置费由参赛队自行解决。

**比赛规则:** 各参赛队务必仔细阅读本次大赛的比赛规则, 以免提交不符合要求的作品。本次大赛比赛规则、参赛报名表、参赛作品设计方案模板等可从本次大赛网站下载。

**联系方式:** 网址: <http://www.bostd.com.cn>; E-mail: 71zhangwan@tongji.edu.cn, techservice@bostd.com。地址 1: 上海市杨浦区四平路 1239 号同济大学地下建筑与工程系, 邮编 200092, 联系人: 张琬 (15221835081); 地址 2: 青岛旭域土工材料股份有限公司, 联系人: 陈丽丽 (0532-87907189; 13626428415)。

(同济大学 供稿)