

宁夏中部干旱风沙区砾砂混合料筑坝分析

张维江¹, 卜崇德², 郭文锋², 马升东³, 马延云³, 周莉¹, 赵学士¹

(1 宁夏大学, 宁夏 银川 750021; 2 宁夏回族自治区水土保持局, 宁夏 银川 750001;

3 宁夏同心县水利水保局, 宁夏 同心 751300)

摘要: 在干旱风沙区修建水土保持治沟骨干工程, 可同时起到拦泥与蓄水的作用, 并对改善风沙区生态环境, 发展绿洲农业起到促进作用。用沟道内洪水冲积形成的砾砂混合料作为筑坝材料, 既可以就地取材, 又可以充分发挥土料透水性强的优势达到雨洪转化的目的。通过野外和室内试验获得的数据和资料, 应用多种方法对宁夏同心县长沙河流域的上流水骨干工程的坝坡稳定性和渗透稳定性进行了分析, 结果表明, 干旱风沙区砾砂混合料用于修建水土保持治沟骨干工程能满足坝坡稳定和渗透稳定的要求。

关键词: 骨干工程; 砾砂混合料; 坝坡稳定; 渗透稳定

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X(2004)04—0059—04

中图分类号: S284

Dam Building Using Gravel-Sand Mixture in Dry Aeolian Sand Region in Central Ningxia Hui Autonomous Region

ZHANG Wei-jiang¹, BO Chong-de², GUO Wen-feng², MA Sheng-dong³,

MA Yan-yun³, ZHOU Li¹, Zhao Xue-shi¹

(1 Ningxia University, Yinchuan 750021, Ningxia Hui Autonomous Region, China; 2 Soil and Water

Conservation Bureau of Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, Ningxia Hui Autonomous Region,

China; 3 Water Conservancy Bureau of Tongxin County, Tongxin 751300, Ningxia Hui Autonomous Region, China)

Abstract: In the dry aeolian sand region, check dams for soil and water conservation can store water and mud, improve the natural environment and enable oasis agriculture. Using a gravel-sand mixture from channel bottoms as a building material for check dams allows use of readily available material and may also facilitate use of flood water. Following a series of experiments work, the stability of the sides and seepage flow of Shangliushui check dam were analyzed. The results indicate that gravel-sand mix can fulfil the goals of dam stability and controlled seepage flow in the dry aeolian sand region.

Keywords: check dam; gravel-sand mixture; dam slide stabilization; seepage flow stabilization

1 自然条件

受腾格里沙漠和毛乌素沙地的两面夹击, 在宁夏境内形成西起中卫县的香山, 跨过同心县的大罗山, 东至盐池县麻黄山西北麓的腹部干旱风沙带。该区为土石质山区及干旱草原区, 属于典型的水蚀风蚀交错带, 地表覆盖有数 10 cm 厚的风积沙, 植被较差, 地形较平缓, 气候干燥, 风大沙多, 降水量少, 多年平均降雨量为 250 mm 左右, 多年平均水面蒸发量达到 1 400 mm 以上, 且降雨分配极不均匀, 常以暴雨形式出现, 历时短, 强度大, 所形成的洪水洪峰流量大, 利用率极低, 水资源十分缺乏, 水土流失严重, 生态环境极为恶劣。为了保持水土, 促进雨洪的转化利用, 区内从 20 世纪 90 年代开始有规模地建设拦泥蓄水工程

——水土保持治沟骨干工程。为弥补筑坝适宜土料的不足, 探求用洪水冲积形成的砾砂混合料能否作为合适的筑坝材料成为坝系建设中一个亟需解决的课题。

我们选择了位于该区西部的长沙河流域内已建成的骨干工程进行观测和试验, 对砾砂混合料建坝的可能性进行分析。长沙河流域是清水河水系的一级支流, 控制流域面积 574 km², 流域中心地理位置为东经 105°25', 北纬 37°06', 流域内沟道开阔, 流域呈葫芦形。主沟道内沉积有 4~15 m 厚的砂砾石, 透水性较强, 下伏基岩层为弱风化岩层, 岩性多为中厚层细砂岩夹薄层板岩、页岩, 透水性弱。主沟道内分布的地下水属第 4 系砂砾石孔隙潜水类型, 采样分析结果为中等良好的饮用水。现已用砾砂混合料建成了上流水、下流水、北沿口、喊叫水等骨干工程, 拦泥的同时

也拦蓄了部分洪水,通过坝基透水层转化为下游的地下潜水,形成了沿主河道的近 700 hm² 井灌区,达到“雨洪利用”的目的。本文选择坝高最大的上流水骨干工程进行坝坡稳定和渗透稳定性分析。

2 坝基与筑坝材料勘探与试验

2.1 坝基与坝体土料的物理性质指标

包括土壤含水量和土壤容重,含水量采用烘干法进行测定,土壤湿容重采用现场灌水法进行测定,土粒比重参照已建工程的试验资料取 2.65,干容重、孔隙率和饱和容重为换算值,其结果见表 1。

表 1 坝基与坝体土料的物理性质指标

项目	湿容重/ (kN · m ⁻³)	含水量/ %	干容重/ (kN · m ⁻³)	饱和容重/ (kN · m ⁻³)	孔隙率
坝体	19.894	4	18.522	21.854	0.287
坝基	18.424	4	18.032	20.972	0.306

注:坝体各参数值取坝顶与坝体 1/2 高度平均值。

2.2 坝体及坝基的渗透系数测定

在野外用试坑法测定坝基与坝体的渗透系数,其结果为:坝体 0.006 cm/s; 坝基 0.013 cm/s。

2.3 颗粒大小分析试验

用筛分法进行,坝体和坝基土料的试验结果见表 2。颗粒分析结果表明,坝基和坝体土料粒径 > 0.1 mm 的颗粒含量超过 50%,细粒(< 0.10 mm)含量小于 5%,并且大于 2 mm 的含量超过全重的 50%,属于砾石类,坝体土料 C_u = 18.6(5),C_c = 1.12(= 1~3); 坝基土料 C_u = 9.63(5),C_c = 0.95(1~3),均为级配良好砾(GW)。

2.4 大型直剪试验

委托水利部西北水利科学研究所实验中心采用大型直剪仪进行坝基和坝体土料的饱和、非饱和快剪试验。试样所能制备的最大干容重为 γ_d = 20.58 kN/m³。试样的制样容重、含水量及抗剪强度指标见表 3 和图 1。

表 2 上流水骨干工程颗粒分析试验成果

指标	D ₃	D ₅	D ₂₀	D ₁₀	D ₃₀ /mm	D ₅₀	D ₆₀	D _n	D _{100-n}	C _u	C _c
坝体	0.27	0.35	2.00	0.50~0.70	2.50~3.00	6.09~8.00	8.50~14.00	2.80~3.40	14.00~17.00	18.60	1.12
坝基	0.20	0.25	0.65~0.90	0.34~0.75	0.90~2.40	3.80~5.00	4.50~6.00	1.60~2.50	7.30~9.00	9.63	0.95

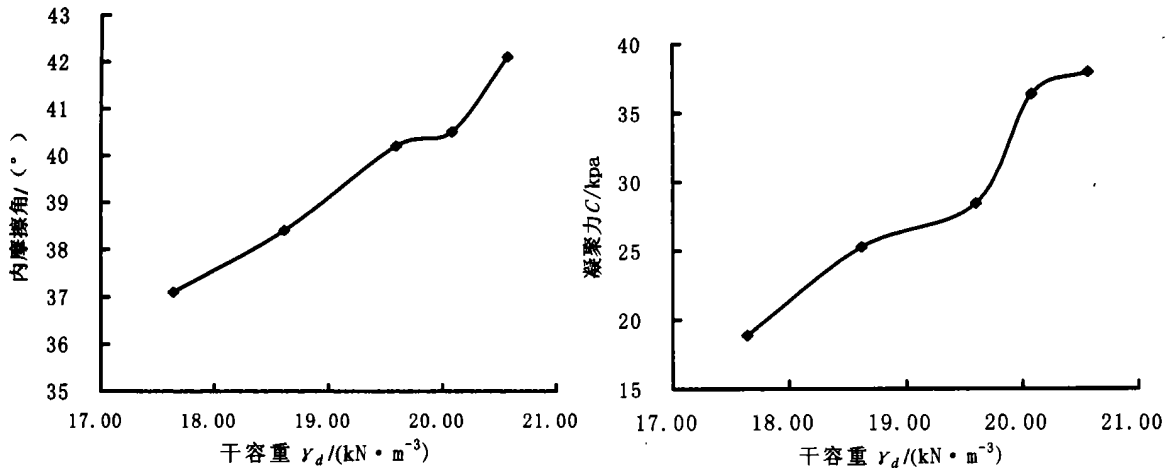


图 1 坝体土料干容重与抗剪强度关系曲线

3 坝坡稳定与渗透稳定分析

3.1 坝坡稳定分析

3.1.1 基本资料 上流水骨干工程坝顶高程 1770 m, 坝基高程 1744.0 m, 最大坝高 26 m, 设计洪水位 1765.1 m, 设计水深 H = 21.10 m, 上游坝坡坡率 m₁ = 2.75, 下游坝坡坡率 m₂ = 2.25, 在 1756 m 处设一条 2 m 宽的马路, 实测坝顶长 240 m。

实测坝体和坝基平均湿容重分别为 19.89 kN/m³ 和 18.42 kN/m³, 平均含水量均为 ω = 4%, 干容重分别为 18.54 kN/m³ 和 18.03 kN/m³。根据对该坝体的剪切实验测试结果, 认为该坝体的抗剪强度指标取值应为: 坝体浸润线以上 C = 26.92 kPa/m², φ = 38.27°; 坝体浸润线以下, 下游水位以上 C = 25.27 kPa/m², φ = 32.6°; 坝基 C = 23.67 kPa/m², φ = 29.8°(饱和)。

表3 直剪试验结果

试样名称	干容重 $\gamma_d / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	含水量 $W / \%$	抗剪强度	
			C / kPa	$\varphi / (^\circ)$
坝基	18.03	4.0	33.22	33.90
	29.80	18.03	饱和	23.67
	17.64	4.0	18.90	37.10
坝体	38.40	18.62	4.0	22.13
	40.20	19.60	4.0	28.44
	40.50	20.09	4.0	36.38
	42.10	20.58	4.0	37.99
	32.60	18.52	饱和	25.27

根据野外试坑法测得的结果:坝体的渗透系数 $k_1 = 0.006 \text{ cm/s}$, 坝基渗透系数 $k_2 = 0.013 \text{ m/s}$ 。参阅有关资料,砾质土渗透系数一般为 $0.10 \sim 0.01 \text{ cm/s}$, 坝基实测值在此范围内,野外实测碾压后的坝体渗透系数小于坝基渗透系数是符合实际的。因此,上流水骨干工程渗流计算中渗透系数取实测值。

3.1.2 分析方法与结果 用圆弧滑动法分析下游坝坡在稳定渗流期的稳定性,分析方法采用总应力法,浸润线计算采用水力学解法。

确定了坝体浸润线方程以后,采用 Microsoft Visual Basic 6.0 (中文版) 编制圆弧滑动法分析下游坝坡稳定渗流期的稳定分析程序,通过计算机自动寻找最危险圆弧,得最小安全系数为 2.21。

3.2 渗透稳定分析

土的渗透变形主要类型有流土、管涌、接触流土和接触冲刷 4 种。但就单一土层而言,渗透变形的形式有流土和管涌 2 类。管涌是指在一定的渗透力作用下,土体中的细颗粒沿着骨架颗粒所形成的孔隙管道的移动或被渗流带走的现象;流土是指在一定渗透力作用下,土体颗粒群同时起动而流失的现象。渗透变形产生的主要条件取决于土颗粒的组成和结构—几何条件,作用于土体上的渗透力—水动力条件和渗流出口是否有适当保护—出口条件,渗透变形的判别方法是首先根据土料的性质来初步判定是否易产生渗透变形及其类型,然后根据水动力条件确定临界水力坡度,进一步加以判断。

3.2.1 用土料的性质判断

(1) 用土料的不均匀系数 C_u 来判断(伊斯妥明娜法)

$$C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

当 $C_u < 10$ 时可能发生流土, $C_u > 20$ 时可能发生管涌, $10 < C_u < 20$ 时流土和管涌均可能发生。

从不均匀系数的分布看,坝基 $C_u = 9.63 < 10$, 坝体 $C_u = 18.6$ 在 $10 \sim 20$ 之间,因此该坝坝体既可

能发生流土现象也可能发生管涌现象,坝基可能发生流土现象。

(2) 用土的细粒含量 P_z 来判断。对于连续级配的土,我国学者提出用土的孔隙平均直径 D_0 与最细部分颗粒粒径 d_s 相比较,以判断土的渗透变形类型。 D_0 可用以下经验公式计算

$$D_0 = 0.25d_{20}$$

当 $D_0 < d_3$ 时为非管涌土, $D_0 > d_5$ 时为管涌土, $D_0 = d_3 - d_5$ 时为过渡型土。

对坝体土, $D_0 = 0.50 \text{ mm} > d_5 = 0.35 \text{ mm}$ 为管涌土;对坝基土, $D_0 = 0.16 \sim 0.225 \text{ mm}$, 平均值小于 $d_5 = 0.20 \text{ mm}$ 为非管涌土。

(3) 南京水利科学研究院方法。从土体细颗粒体积等于骨架孔隙这一概念出发,导出下列判别式:

$$P_z = \alpha \frac{n}{1+n}$$

式中: n ——土体孔隙率; α ——公式修正系数, $\alpha = 0.95 \sim 1.00$ 。

令土体中实有细粒含量为 P_z , 则当 $P_z > P_z$ 时为流土, $P_z < P_z$ 为管涌。

这种方法,粗、细粒径区分的界限取 $d = 2 \text{ mm}$ 。对于坝体 $P_z = 20\% < P_z = 33.14\%$, 对于坝基 $P_z = 27\% \sim 34\% < P_z = 33.84\%$, 则坝体与坝基土均为管涌土。

上述 3 种判断方法从土壤的几何条件出发,就坝体与坝基土发生渗透变形的可能性进行初步分析,结果表明坝体有可能发生管涌现象,而坝基有可能发生流土破坏,但仅仅用几何条件作为判断土料渗透变形形式的指标,还不能完全反映出土的渗透性能,因为是否发生渗透变形还决定于水动力条件和出口条件。

3.2.2 依据土体的临界坡降来判定 渗流作用下,砾砂混合料发生渗透变形的水力坡降,称为临界水力坡降(简称临界坡降)。由于流土发展时间较短,且破坏时某部位砾砂混合料会突然抬起或冲毁,按试验方法和理论公式确定的临界坡降应除以较大的安全系数(2~3)作为容许渗透坡降(简称容许坡降)。但对管涌而言,它的发展变化有一个过程,随着细粒跳动,直至破坏要经过一段时间,因此按试验方法和理论公式确定的临界坡降除以较小的安全系数(1.5~2)作为容许渗透坡降。

(1) 流土临界坡降计算。用太沙基公式:

$$J_c = \left(\frac{G}{\gamma_w} - 1 \right) (1 - n)$$

式中: G ——土粒比重,取 2.65; n ——土的空隙率; γ_w ——水的容重,为 9.8 kN/m^3 。

该式计算的 J_c 偏小, 大约小于试验值的 15% ~ 25%, 用于设计是偏安全的。

扎马林在太沙基公式的基础上根据经验进行了修正, 提出了以下的修正公式, 其计算结果和试验值相一致。

$$J_{c1} = \left(\frac{G}{\gamma_w} - 1\right) (1 - n) + 0.5n \quad (1)$$

南京水科院对太沙基公式提出了以下的修正公式:

$$J_{c2} = \left(\frac{G}{\gamma_w} - 1\right) (1 - n) + (1 + \xi \operatorname{tg} \varphi) \quad (2)$$

式中: ξ, φ ——为土的侧压力系数和内摩擦角。试验资料表明 $1 + \xi \operatorname{tg} \varphi = 1.17$ 。

(2) 管涌临界坡降的计算。南京水利水电科学研究院在总结国内外试验研究的基础上得到管涌临界坡降计算公式为:

$$J_{c3} = 42 \cdot d / \frac{K}{n^3} \quad (3)$$

式中: d ——管涌时流失的土体颗粒粒径, 一般取 d_{30} 计算 (cm); K ——为渗透系数 (cm/s); n ——为土体的孔隙率。

康特拉契夫计算管涌的公式为:

$$J_{c4} = \frac{(G/\gamma_w) - 1}{[1 + 0.43(\frac{d_0}{d})^2]} \quad (4)$$

$$d_0 = 0.241 \frac{d_n}{d_{100-n}} \cdot d_{50}$$

式中: d_{50} ——土体中值粒径; d_n, d_{100-n} ——为相应土体颗粒级配曲线百分含量为 n 及 $100 - n$ 的粒径 (n 为孔隙率)。

表 5 坝体浸润线及渗透坡降计算成果

x/m	2	4	6	8	10	20	30	40	50	55
h/m	3.70	4.39	5.04	5.67	6.27	8.95	11.28	13.36	15.26	16.16
J	0.345	0.325	0.315	0.300	0.268	0.233	0.208	0.190	0.180	

下游坝坡渗出段的出渗坡降可按式计算:

$$J_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + m_2^2}} \left(\frac{a_0 - h_0}{y - h_0}\right)^{0.25}$$

逸出点和坝趾处出渗坡降分别为 0.406 和 0.533。

下游坝基的逸出坡降可近似按下式计算:

$$J_2 = \frac{H - h_0}{L + m_1 H + 0.88T} \cdot \frac{1}{\sqrt{E^{\frac{m}{T}} - 1}}$$

式中: $L + m_1 H = 132m$, x 为计算点距坝趾距离, 离坝趾 5, 10m 处逸出坡降分别为 0.02, 0.003。

由于坝体内各点的实际渗透坡降和下游坝坡出渗坡降均小于坝体和坝基的容许水力坡降值, 因此坝

用上式公式分别计算坝体及坝基的临界坡降及容许坡降 [J] 见表 4。

表 4 砾砂混合料临界坡降及容许坡降

水力坡降	坝体		坝基	
	流土	管涌	流土	管涌
J_{c1}	1.320	—	0.992	—
J_{c2}	2.346	—	2.315	—
J_{c3}	—	2.250	—	1.247
J_{c4}	—	0.988	—	0.790
[J]	0.53~0.94	0.57~1.29	0.40~0.93	0.45~0.71

3.2 骨干工程的渗流计算与分析

骨干工程的渗流计算按有限深透水地基上的均质土坝进行, 如图 2。

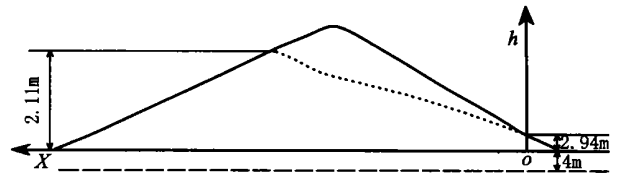


图 2 上流水骨干工程渗流计算简图

其浸润线方程为:

$$h = \sqrt{(a_0 + h_0 + \frac{k_1}{k_2} T)^2 + 2 \frac{q}{k_1} x - \frac{k_1}{k_2} T}$$

总渗流量 $q = 0.00026227 (m^3/s \cdot m)$, 坝体 $k_1 = 0.006 \text{ cm/s}$, 坝基 $k_2 = 0.013 \text{ cm/s}$, 下游坡逸出点高度 $a_0 = 2.94m$, 下游水深 $h_0 = 0$, 坝基透水层厚度 $T = 4m$ 。坝体内各点的浸润线高度及分段平均渗透坡降值 J 见表 5。

体和坝基不会发生渗流破坏; 下游坝基的逸出坡降小于坝基的容许水力坡降, 因此下游坝基也不会发生流土破坏。

4 结 论

干旱风沙区降雨量少, 经洪水的分选作用使沟道洪积物层理分布很明显, 但分层厚度较小, 经挖掘、装运、上坝摊铺等干扰后, 作为筑坝材料具有良好的级配特性、较大的抗剪强度和较好的抗渗透变形能力。上流水骨干工程坝体与坝基渗流分析结果表明, 砾砂混合料用于筑坝材料时不发生渗透变形。

(下转第 80 页)

在此方面也取得一定成效,如深圳市日前研究出石壁复绿新技术,并在两广地区进行大面积推广应用,取得了较好效果。还有,利用煤矸石生产建筑用砖技术已取得成功,并已投入市场。但须看到目前还有好多治理难题亟待解决,矿区恢复治理科研力量薄弱,资金投入不足,须加大投入和支持力度。今后应针对矿区水土流失特征、再塑地貌特点、地面物质的物理化学组成等,在对不同条件采矿区恢复治理的可行性进行客观准确的评价与分析的基础上,开展不同类型矿区再塑地貌的土地整治技术、植被恢复与重建技术、适宜植物种类筛选等方面的研究工作以及将“3S”技术应用到矿区的管理规划和恢复治理中等等,为矿区的恢复治理提供可靠的技术支撑,从而加快我省矿区恢复治理的步伐。

3.5 软硬兼施,综合治理

在加强治理技术和治理模式研究的同时,要加强相关政策法规的研究和制定,治理技术和政策法规一硬一软,相辅相成,不可偏废。一方面要加大对不进行环评、不制定水土保持方案和拒不实施水土保持措施矿山企业的处罚力度,防止新的人为水土流失的产生。另一方面要制定相关政策,鼓励相关企业进行废

物再利用,变废为宝;鼓励水土保持科研工作者联合相关领域技术人员,组织精干力量,研究实用矿区恢复治理技术,为矿区恢复治理提供技术支撑和服务。

4 结 语

辽宁省采矿业为促进辽宁省和我国国民经济发展做出了巨大贡献,但同时也带来了严重的生态灾难,对辽宁省社会经济可持续发展、全面实现重振老工业基地的战略目标和全面实现小康社会的宏伟目标构成极大威胁。目前辽宁省矿区生态重建面临最突出的问题是企业历史包袱重,资金投入严重不足,治理技术落后,费宏效微。为此,一方面要建立多元投资机制,加大资金投入额度,另一方面要加强矿区恢复治理技术研究,降低治理成本,提高治理速度,以科技促治理,加快矿区生态重建步伐。

[参 考 文 献]

- [1] 李文银,王治国,蔡继清. 工矿区水土保持[M]. 北京: 中国科学出版社, 1996
- [2] 焦居仁. 开发建设项目水土保持[M]. 北京: 中国法制出版社, 1998

(上接第 62 页)

目前的抗渗透变形分析的理论和方法尚不成熟,尽管上流水骨干工程在运行中未发现明显的渗流破坏,但坝趾附近的坝坡上有少量渗水出现,鉴于该坝建成后还未经历过设计洪水,为安全起见,建议下游坝坡逸出点以下做贴坡排水体。

就坝坡稳定性而言,干旱风沙地区砾砂混合料作为筑坝材料可用于各种规模的水库和水土保持治沟骨干工程建设中;但就渗透稳定性而言,本文所涉及的骨干工程高度为 26m,在相同或相似地区同等规模小水库建设中若配合修建贴坡排水体是安全的。但对于坝高大于 26m 及其中型以上的水库,砾砂混合料的抗渗透变形设计应做专门研究。由于水土保持治沟骨干工程的设计标准低,工程等级在 4 等以下,加之砾砂混合料渗透系数大,设计中一般不进行坝体变形验算,对于中型以上的水库工程应作专门研究。

类似长沙河流域河床沉积现象在宁夏中部分布范围较广,面积达 $1.50 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上,由于地形较优越,适宜建设 20m 左右的各类治沟骨干工程。本文提供的砾砂混合料的剪切试验结果和坝坡、渗流稳定分析结果可用于同类地区治沟骨干工程的设计中。

致谢:参加资料调查的人员还有宁夏大学水利系 2003 届毕业生马孝林、李娟、王东等,大型直剪试验得到了水利部西北水利科学研究所实验中心的大力支持和帮助,在此一并致谢!

[参 考 文 献]

- [1] 白永年,等编著. 中国堤坝防渗加固新技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [2] 毛昶熙主编. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [3] 屈智炯,何昌荣,刘双光,胡德金. 新型土石坝—粗粒土筑坝的理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002
- [4] 水利电力部规范. 碾压式土石坝设计规范(SDJ218—84)[S]. 北京: 水利电力出版社, 1985
- [5] 水利水电部第五工程局. 水利电力部东北勘测设计院. 土坝设计(上册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1978
- [6] 苑莲菊,李振柱,武胜忠,等. 工程渗流力学及应用[M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2001
- [7] 中华人民共和国行业标准. 土工试验规程(SL 237—1999)[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999