

长江荆江段大堤三维渗流有限元计算分析

宋志远¹, 赵维炳², 吴跃东¹

(1. 河海大学土木工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要:通过有限元计算设计工况下堤防的渗流状态, 得到堤坝在三维条件下的等势线、浸润线、垂直及水平方向的水力梯度。通过与同等工程的对比, 分析指出了本计算段存在着险情隐患, 为大堤的设计、安全加固和监测布点提供指导。

关键词:堤防; 有限元; 三维渗流; 水力梯度; 等势线; 浸润线

中图分类号: TV871

文献标识码: A

文章编号: 1006-7647(2003)01-0030-02

长江干流重要堤防有 3 000 多 km, 很多堤段的堤基条件和堤身质量填筑质量较差, 当遭遇洪水时, 经常发生各种险情。为保障人民生命财产安全及经济正常发展, 有针对性地进行堤防加固, 进行安全监测, 发现潜在安全险情, 及早采取有效的治理措施, 是我国长江堤防抗险的重要内容之一。但是长江堤防堤线长, 监测断面不可能太多, 这是观测所面对的困难。

有限元应用于水力学数值计算可以有效地模拟工程的实际状态。通过对构筑物 and 基础的物理和数学模拟, 利用有限元可以有效地计算等势线的分布、浸润线的位置, 且其相对成本较低, 这为有效布点观测提供了指导, 从而能够节省大量的监测费用。

本文即应用有限元, 通过对长江大堤荆江段堤基堤身的物理数学模拟, 对边界条件的简化, 计算在三维情况下的等势线、浸润线和水力梯度, 为大堤观测提供理论依据和指导, 并为堤防工程渗流控制的技术发展积累资料。

1 模拟堤基及堤身概况

堤基土层的地质结构为双层结构, 是由厚度一般为 2 m 左右的粘土、壤土、砂壤土或砂性土呈互层或夹层透镜状组成的复杂结构, 抗渗性能取决于表层粘性土的厚度及砂壤土、砂性土的水力联系。堤基结构如图 1 所示。

堤基主要坐落在第四纪冲积平原上, 堤基表层相对隔水层一般只有 1 ~ 10 m, 下部通常有深厚的砂及砂砾石层, 江水与地下水通过砂、砂砾石层联系紧密。

堤身高度普遍为 8 ~ 12 m, 最高达 15 m, 主要由

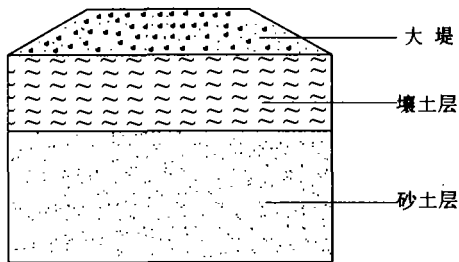


图 1 堤基土层地质剖面

素填土堆积而成, 半数以上堤段的堤顶高程、宽度及堤身坡度未达标, 堤身隐患、基础渗漏、河岸崩塌威胁着大堤的安全。

2 三维渗流有限元分析

2.1 渗流场基本方程

多年来堆积而成的大堤, 堤内已形成较稳定的渗流场, 建立在达西(Darcy)定律及质量守恒基础上的稳定渗流场 Ω 域内, 满足不可压缩流体的达西渗流控制方程为^[1]

$$\nabla \cdot (k \Delta h) = 0 \quad (1)$$

边界条件为

$$h(x, y, z) = h_0(x, y, z) \quad x, y, z \in L_1 \quad (2)$$

$$\left[k_x \frac{\partial h}{\partial x}, k_y \frac{\partial h}{\partial y}, k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right] \begin{Bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{Bmatrix} = -q_n(x, y, z)$$

$$x, y, z \in L_2 \quad (3)$$

式中: h 为总水头函数; k_x, k_y, k_z 为 x, y, z 方向的渗透系数; h_0 和 q_n 为边界上的已知水头和流量条件; L_1, L_2 为 Ω 内饱和域上已知水头和流量条件的面

表 4 径流小区土壤侵蚀各主要因素之间的关系

相关关系	径流小区	1992 年	1993 年	1994 年
降水量(x) 与 径流量(y)	A	$y = -0.504 + 0.309x, r = 0.912^{①}$	$y = 3.713 + 0.269x, r = 0.882^{②}$	$y = -1.626 + 0.341x, r = 0.956^{①}$
	B	$y = -0.252 + 0.308x, r = 0.906^{①}$	$y = 3.845 + 0.267x, r = 0.877^{②}$	$y = -1.725 + 0.341x, r = 0.956^{①}$
径流量(x) 与 含沙量(y)	A	$y = -0.679 + 0.642x, r = 0.985^{①}$	$y = -4.413 + 0.942x, r = 0.803^{②}$	$y = -4.160 + 0.943x, r = 0.966^{②}$
	B	$y = -0.713 + 0.610x, r = 0.982^{①}$	$y = -4.478 + 0.946x, r = 0.800^{②}$	$y = -3.734 + 0.894x, r = 0.967^{②}$
覆盖率(x) 与 含沙量(y)	A		$y = 20.371 - 0.171x, r = -0.771^{②}$	
	B		$y = 20.462 - 0.171x, r = -0.769^{②}$	

注:① $t = 0.05$;② $t = 0.01$;③表中降水量和径流量单位为 mm;含沙量为 kg;覆盖率为百分值。

沙占了很大比例.这种情况由表 1 可以清楚地看出来,农田沟道淤积量是输出量的 47.3~56.6 倍,说明泥沙就近淤积量远大于输出量.而径流小区由于面积小,虽然也有搬运—沉积—搬运的现象,但悬移质沉积少,故输出的泥沙多.因此,在苏北平原高沙土地区,由径流小区推算的径流泥沙输出量不能完全反映农田土壤侵蚀的实际情况,应以田间试验为准.

3.2.2 径流小区土壤侵蚀各因子之间的关系

a. 降水量与径流量之间的关系.如前所述,当降水量超过土壤渗透能力时,就会产生地表径流,因而径流量与降水量有良好的相关关系(见表 4).无论 A 区还是 B 区,1993 年方程的相关系数均达极显著性水平($t = 0.01$),即 A、B 径流小区相关系数分别为 0.882 和 0.877,1992 年和 1994 年也可达显著性水平($t = 0.05$),说明降水量越大径流量也越大.

b. 径流量与含沙量之间的关系.在径流小区中,泥沙输出量与径流量密切相关(见表 4),这是因为径流量大,流速快,冲刷能力强,因而径流中夹带的泥沙多,输出量也大.从 1992 年到 1994 年,A、B 两个径流小区回归方程的相关关系均达极显著水平,如 1992 年其方程的相关系数分别为 0.985 和 0.982.

c. 覆盖率与含沙量之间的关系.农作物覆盖率越高,其阻挡雨滴击溅侵蚀的能力越强,即使降水量大于渗透能力,产生了地表径流,径流流速缓慢,因而径流中含沙量少,1993 年 A、B 径流小区中,覆盖率与含沙量的相关系数分别为 -0.771 和 -0.769,均达极显著水平.

4 结 论

用田间试验测得 1988 年、1989 年和 1991 年随径流带走的泥沙量分别为 1079.3 kg/hm², 966.1 kg/hm² 和 2 914.5 kg/hm²,淤积的泥沙分别为 57.1 t/hm²,45.7 t/hm² 和 165.0 t/hm²,淤积量为输出量的 47.3~56.6 倍,虽然输出量不大,但总侵蚀量已达强度至极强度水平.运用径流小区法测得的泥沙输出量远大于田间试验法,而又远小于田间试验法的清淤量,因而用径流小区法测得的土壤侵蚀量不能完全反映高沙土土壤侵蚀的规律.无论用哪种方法,降水量与径流量、径流量与含沙量都有着密切的相关关系.

参考文献:

[1] 胡海波,林文棟,张金池.江苏沿海平原沙土区土壤侵蚀规律的研究[J].南京林业大学学报,1992,16(2):25~30.
[2] 胡海波,魏勇,仇才楼.苏北沿海防护林土壤可蚀性研究[J].水土保持研究,2001,8(1):150~154.
[3] 水利电力部农村水利水土保持司.水土保持试验规范[S].北京:水利电力出版社,1988.
[4] 林业部科技司.森林生态系统定位研究方法[M].北京:中国科学技术出版社,1994.
[5] 彭珂珊.黄土高原地区农田土壤水分高效调控技术[J].水利水电科技进展,2001,21(1):5~8.
[6] 李国芳,夏自强,郝振纯,等.田间土壤含水率的统计特性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2002,30(1):11~14.
(收稿日期:2002-03-04 编辑:熊水斌)

(上接第 31 页)

域渗透坡降值大于 -0.15,这对堤身主要为素填土而言已经超过了经验上的破坏坡降值,极有可能引起坡脚处的滑坡及坍塌,造成险情.

3 结 论

通过对长江干堤某段堤坝进行三维有限元渗流分析,计算了堤坝在三维条件下的等势线、浸润线和垂直及水平方向的水力梯度,可得到以下结论:

a. 等势线分布及浸润线形状符合堤防工程的

渗流规律,在渗透系数差异大的材料分区处等势线有形状突变.

b. 在上游堤脚处垂直渗透坡降较大,大于同类工程下的破坏渗透坡降值,建议采取一定的垂直防渗措施.

c. 水平渗透坡降在堤身两侧堤脚处均有较大的超过同类工程允许水平渗透坡降值的区域,建议加强检测,采取合理的防渗措施,避免险情发生.

参考文献:

[1] 薛禹群,朱学愚.地下水动力学[M].北京:地质出版社,1979.21~25.
(收稿日期:2002-07-10 编辑:傅伟群)