

确定堤坝工程地基渗透系数的敏感分析法

张宜虎,杨裕云,王亮清,尹红梅

中国地质大学工程学院,湖北武汉 430074

摘要: 堤坝工程中地基渗透系数的选取具较大随机性,为了解决这个问题,采用敏感性分析理论建立了求解渗透系数敏感性因子的数学模型,该模型在河南省燕山水库水利工程中的应用表明:覆盖层渗透系数的敏感性最大($>10^{-2}$),设计应取试验值的大值;其他部分渗透系数的敏感性相对较小($10^{-6} \sim 10^{-3}$),设计中可取试验值的均值;对于防渗设施,只要达到一定密实度,再降低其渗透系数,防渗效果不会再有明显改善。

关键词: 坝基渗流;渗透系数;敏感性分析。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2004)03-0375-04

收稿日期: 2003-09-22

Determination of Penetration Parameters of a Bank or Dam Foundation with Sensitivity Analyzing Method

ZHANG Yi-hu, YANG Yu-yun, WANG Liang-qing, YIN Hong-mei

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: There appears to be random to design the penetration parameters for a bank or dam foundation. To solve this problem, this paper introduces a sensitivity analyzing method to calculate the penetration parameter's sensitivity factor of each part in the calculation model. The application of the method in Yanshan reservoir indicates that the covering layer's penetration parameter's sensitivity factor ($>10^{-2}$) is the biggest, whose design parameter should then be the biggest of the testing values. The sensitivity factors ($10^{-6} - 10^{-3}$) of other parts are relatively small, whose design parameters can then be the mean values. As for the anti-penetration objects, if dense enough, the decrease of the penetration parameters will be insignificant.

Key words: dam foundation seepage; penetration parameter; sensitivity analyzing method.

堤防工程或水库坝基渗流模拟中,要取得符合实际的模拟结果,计算模型的建立与计算参数的选取同等重要。计算参数又可划分为几何尺寸参数和水力学参数两大类,其中,尺寸参数大多为人工控制参数,易于量测;而水力学参数,如渗透系数等,则因介质的不均一性和测量手段的不合理等原因,往往具有离散性大、不易准确确定的特点。因此如何确定合理的渗透系数一直是一个困扰工程界的难题。目前比较成熟的做法是通过反演的手段确定合理的渗透系数组合。反演是以一定的实际水位观测资料为基础的,通过调整计算模型各部分的渗透系数,使模

拟结果最终与实际观测结果吻合,此时模型各部分的渗透系数即可用作实际模拟时的计算参数。然而,对于那些尚处于规划设计阶段的水库工程,显然不具备反演的条件,此时,即可采用敏感性分析的方法。

1 敏感性分析的一般思路

敏感性分析(谭晓慧,2001)是系统分析方法的一种,它以一定的数学模型为基础。对于一固定系统,可设其影响变量的集合为 (x_1, x_2, \dots, x_n) ,系统特征用变量 Z 表示;影响变量的基准值集合为 $(x'_1,$

x'_2, \dots, x'_n), 与之对应的系统特征变量取值为 z' . 分析变量 x_k 对系统特征的影响时, 可令其余变量取基准值且固定不变, x_k 在其可能的范围内变动, 进而可得变量 x_k 对系统特征的影响曲线

$$Z = g(x'_1, x'_2, \dots, x'_{k-1}, x_k, x'_{k+1}, \dots, x'_n) = \varphi_k(x_k), \quad (k = 1, \dots, n). \quad (1)$$

由此可得变量的敏感度函数

$$S_k(x_k) = \left(\frac{\Delta z}{z} \right) / \left(\frac{\Delta x_k}{x_k} \right) = \left| \varphi'_k(x_k) \right| \cdot \frac{x_k}{z}. \quad (2)$$

取 $x_k = x'_k$, 即得变量 x_k 的敏感因子 S'_k

$$S'_k = S_k(x'_k) = \left| \varphi'_k(x'_k) \right| \cdot x'_k / z'. \quad (3)$$

上述理论应用于水库坝基渗流分析中, 可令坝基最大水力比降 J 为系统特征值, 其影响变量则为计算模型各部分的渗透系数 (k_1, k_2, \dots, k_n). 对于第 i 部分的渗透系数 k_i , 套用式(3)可得其敏感性因子 S'_i

$$S'_i = S_i(k'_i) = \left| \varphi'_i(k'_i) \right| \cdot k'_i / J'. \quad (4)$$

其中: k'_i 为第 i 部分渗透系数基准值(可取试验值的均值或大值均值); J' 为各部分渗透系数取基准值时的坝基最大水力比降; $\varphi'_i(k'_i)$ 为坝基最大水力比降表达式对 k_i 取偏导后, 再令 $k_i = k'_i$ 时的计算结果; 对于难以作微分处理的复杂系统而言, 可按以下差分格式作近似处理

$$\varphi'_i(k'_i) \approx \frac{\varphi_i(k_{i\text{上限值}}) - \varphi_i(k_{i\text{下限值}})}{k_{i\text{上限值}} - k_{i\text{下限值}}}. \quad (5)$$

由式(4)、式(5)结合有限元分析方法, 即可确定计算模型各部分渗透系数对整个坝基渗流场的敏感性因子, 进而找出最不利的参数组合。

2 计算模型及相关试验参数

燕山水库位于淮河流域支流沙颍河主要支流澧

河上游甘江河上, 其不仅是历次淮河流域规划所选定的以防洪为主的大型水库, 而且还是南水北调中线引汉工程所选定的反调节水库之一. 该坝基存在大规模顺河断层带, 宽 100 余 m, 具渗透变形问题, 是人们关心的重要隐患。

于河槽位置选一垂直于坝轴线的剖面为计算剖面, 上游水位取一期工程正常蓄水位 108.14 m, 下游水位取河床地表高程 85.48 m. 结合《燕山水库项目建议书》中的一期工程坝体结构和现场所作的勘查工作, 得计算模型, 如图 1 所示。

模型中坝基各层的渗透系数由试验确定, 坝体各部分的渗透系数为设计控制值, 具体取值如表 1; 依此可确定敏感分析时的取值范围和基准值。

3 渗透系数敏感性分析

编制有限元计算程序(毛昶熙, 1990; 陈崇希和唐仲华, 1993), 按前述敏感性分析思路对模型各部分渗透系数逐一作敏感性分析, 结果如下:

图 2 对比列出了粘土斜墙取 3 种不同渗透系数时的渗流场模拟结果: 点划线对应渗透系数最小值 6×10^{-7} cm/s, 虚线对应大值均值 1×10^{-6} cm/s, 实线对应最大值 3×10^{-6} cm/s. 模拟中其他部分的渗

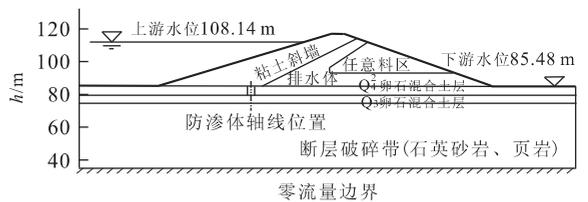


图 1 燕山水库渗流计算模型

Fig. 1 Seepage model of Yanshan reservoir

表 1 计算模型各部分渗透系数试验值

Table 1 Calculation model's testing penetration parameters

名称	物质组成	渗透系数/(cm · s ⁻¹)			说明
		最大值	最小值	大值平均	
粘土斜墙	低液限粘土	3×10^{-6}	6×10^{-7}	1×10^{-6}	
排水体	砾质中、粗砂	5×10^{-2}	1×10^{-2}	3×10^{-2}	
任意料区	风化片麻岩、第三纪砂砾岩	7.5×10^{-5}	2.5×10^{-5}	5.0×10^{-5}	代替料可能 采用 2 种方案
	河床卵石、溢洪道等开挖出的碎石			3.5×10^{-1}	
Q ₁	卵石混合土	6.0×10^{-1}	2.0×10^{-1}	6.0×10^{-1}	
Q ₂	砂卵石夹少量泥	1.84×10^{-2}	3.35×10^{-4}	5.0×10^{-3}	
破碎带	泥岩、砂岩	4.53×10^{-4}	2.5×10^{-5}	2.71×10^{-4}	
防渗体		1×10^{-5}	1×10^{-8}		

透系数均取大值均值. 不难看出,当粘土斜墙渗透系数取 3 个不同值时,其所对应的水头等值线模拟结果基本重合,说明粘土斜墙只要达到了一定的密实度,其渗透系数的改变对渗流场状态不会再产生明显的影响.

图 3 对比列出了排水体取 3 种不同渗透系数时的渗流场模拟结果(对应关系如图 3);模拟时其他部分的渗透系数亦取大值均值. 可以看出,随着排水体渗透系数的加大,水头等值线在坝底的水平渗流段会向上游偏移,但任意 2 组等值线间的间隔却变化甚小;也就是说,排水体渗透系数在其变化范围内的改变会影响水头值的分布,但不会造成水力比降的显著提高或降低.

图 4 对比列出的是任意料区渗透系数分别取 $5 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ (填料方案 1 的大值均值)和 $3.5 \times$

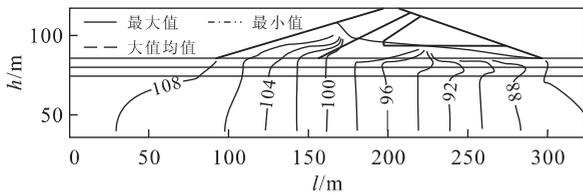


图 2 粘土斜墙渗透系数敏感性分析结果(3 组等值线基本重合)

Fig. 2 Sensitivity analyzing results of clay wall's penetration parameters (the three groups are almost overlapped)

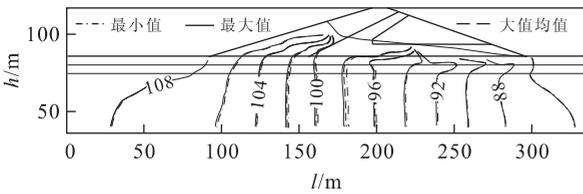


图 3 排水体渗透系数敏感性分析结果

Fig. 3 Sensitivity analyzing results of the drainage part's penetration parameters

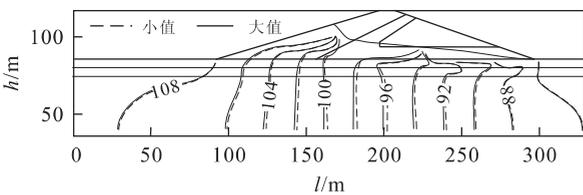


图 4 任意料区渗透系数敏感性分析结果

Fig. 4 Sensitivity analyzing results of the discretionarily filled part's penetration parameters

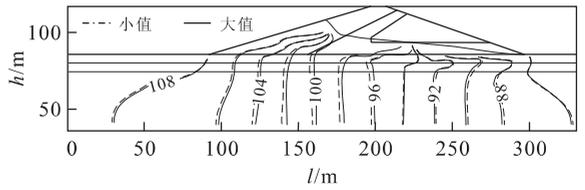


图 5 Q_1^2 卵石混合土渗透系数敏感性分析结果

Fig. 5 Sensitivity analyzing results of Q_1^2 's penetration parameters

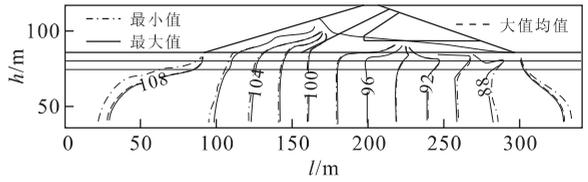


图 6 Q_3 卵石混合土渗透系数敏感性分析结果

Fig. 6 Sensitivity analyzing results of Q_3 's penetration parameters

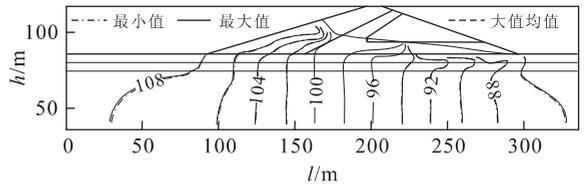


图 7 破碎带渗透系数敏感性分析结果(3 组等值线基本重合)

Fig. 7 Sensitivity analyzing results of fault area's penetration parameters (the three groups are almost overlapped)

10^{-1} cm/s (填料方案 2)时的水头等值线. 虽然 2 个渗透系数间隔几个数量级,但从图 4 中可以看出,渗流场的变化并不十分明显. 而且与图 4 的规律类似,任意料区渗透系数的改变只会影响水头的分布,而不会造成水力比降的提高或降低.

图 5 为 Q_1^2 卵石混合土渗透系数敏感性分析结果. 从图 5 中不难看出,虽然其渗透系数只在同一数量级中变化($2.0 \times 10^{-1} \sim 6.0 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$),但整个坝基的渗流场却发生了显著的改变:随着渗透系数的加大,水头等值线间隔明显减小,即对应位置的水力比降会有明显的提高.

图 6 为 Q_3 卵石混合土渗透系数敏感性分析结果. 该层渗透系数的改变对整个坝基渗流场(尤其是坝头与坝脚部位)亦会有较大的影响,渗透系数的加大会导致坝基平均水力比降的提高.

图 7 为断层破碎带渗透系数的敏感性分析结

表 2 计算模型各部分渗透系数敏感性分析结果

Table 2 Sensitivity analyzing results of penetration parameters

名称	粘土斜墙	排水体	任意料区	Q_1^2	Q_3	破碎带	防渗体
比降计算位置	坝基水平渗流段						防渗体底部
$k_i' / (\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	1.0×10^{-6}	3.0×10^{-2}	5.0×10^{-5}	6.0×10^{-1}	5.0×10^{-3}	2.71×10^{-4}	1.0×10^{-5}
坝基最大比降 J'	0.109 8	0.109 8	0.109 8	0.109 8	0.109 8	0.109 8	4.702 3
$\varphi_i'(k_i')$	2.50E+02	5.00E-03	1.20E-02	7.50E-03	5.30E-01	2.10E+00	4.00E+03
敏感因子 S_i'	2.28E-03	1.37E-03	5.46E-06	4.10E-02	2.42E-02	5.21E-03	8.51E-03
敏感性评价	不敏感	不敏感	不敏感	敏感	敏感	较敏感	较敏感
建议值 $/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	1×10^{-6}	3×10^{-2}	5.0×10^{-5}	6.0×10^{-1}	1.84×10^{-2}	2.71×10^{-4}	1×10^{-5}

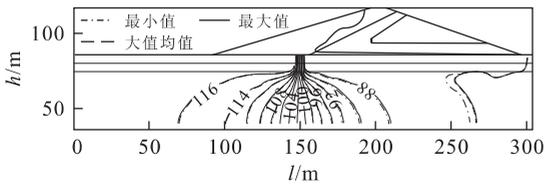


图 8 垂直防渗体渗透系数敏感性分析结果

Fig. 8 Sensitivity analyzing result of seepage-proof body's penetration parameters

果。从图 7 中可以看出 3 组等值线基本重合,这说明破碎带渗透系数在其变化范围内的取值对整个坝基渗流场无显著影响。

为更好地指导设计,还进行了垂直防渗体渗透系数的敏感性分析。模拟时,上游水位取校核洪水位 116.78 m,下游水位仍取河床地表高程 85.48 m;防渗体厚 4 m,打入 Q_3 卵石混合土层底部。当防渗体渗透系数取 10^{-4} , 10^{-5} 和 10^{-8} cm/s 时,其水头等值线模拟结果如图 8 所示,当渗透系数小于 10^{-5} cm/s 后,再减小其渗透系数,防渗效果不再有明显改变,图 8 中 10^{-5} cm/s 所对应的等值线(虚线)与 10^{-8} cm/s 所对应的等值线(点划线)基本重合。表 2 中, k_i' 为渗透系数基准值; J' 为各部分渗透系数取基准值时坝基最大水力比降; $\varphi_i'(k_i')$ 为比降表达式对 k_i' 偏导后再令 $k_i = k_i'$ 时的计算结果; S_i' 为敏感性因子。

4 结论

堤防工程及水库坝基渗流模拟时,如不具备反演条件,可在试验参数的基础上,采用敏感性分析的方法确定计算模型各部分渗透系数的最不利组合,然后以此作为实际渗流模拟时的计算参数。

计算模型不同部位渗透系数的改变对整个坝基渗流场的影响差异很大,所以在模拟计算时其各自渗透系数的取值标准也应有所不同。对于燕山水库,

有如下分析结论:(1)粘土斜墙及断层破碎带的渗透系数在其变化范围内发生改变时,对整个坝基的渗流场特征不会产生显著影响。计算时其渗透系数可取最大值。(2)随排水体或任意料区的渗透系数的加大,在坝底水平渗流段,水头等值线会发生向上游的整体偏移,但其偏移幅度很小。这说明排水体和任意料区渗透系数的改变亦不会对坝基渗流场特征产生显著影响,在具体计算时其渗透系数亦可取最大值。(3)坝基覆盖层 Q_1^2 及 Q_3 卵石混合土渗透系数的改变对整个坝基渗流场会产生较大的影响。其中, Q_1^2 渗透系数的加大主要导致了坝基水平渗流段水力比降的大幅度增加,而 Q_3 渗透系数的加大则会导致坝前和坝后部分水力比降的提高。为了使评价结果偏安全,在具体计算时两部分的渗透系数均应取最大值。(4)就粘土斜墙和垂直防渗体而言,只要它们的渗透系数小于一定值之后,再降低其渗透系数,其防渗效果不再会有明显提高。

References

- Chen, C. X., Tang, Z. H., 1993. Numerical analysis of underground water seepage. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- Mao, C. X., 1990. Seepage calculation analyzing and controlling. Water Conservancy and Hydroelectric Power Press, Beijing (in Chinese).
- Tan, X. H., 2001. Reliability calculation and sensitivity analysis of a plane sliding slope. *Geology of Anhui*, 11(1): 49-54 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈崇希,唐仲华,1993. 地下水流动问题数值分析. 武汉:中国地质大学出版社.
- 毛昶熙,1990. 渗流计算分析与控制. 北京:水利水电出版社.
- 谭晓慧,2001. 平面滑动边坡的可靠度计算及敏感性分析. 安徽地质,11(1): 49-54.