

填料分层对砂砾石坝渗流场的影响

陈 群¹, 张利民², 朱分清³

(1. 四川大学水电学院, 四川 成都 610065; 2. 香港科技大学土木工程系, 香港; 3. 铁道第二勘察设计院, 四川 成都 610031)

摘 要: 利用非饱和土渗流理论, 对沟后混凝土面板砂砾石坝进行瞬态渗流数值模拟。通过对均质坝体和坝料明显分层后坝体的渗流场进行对比分析, 研究了两种情况下坝体渗流场随时间的变化特性以及水力参数的分布特性。指出填料严重分层后对坝体渗流场的影响以及对坝坡渗透稳定性的不利影响。

关键词: 砂砾石坝; 非饱和土; 瞬态渗流; 数值模拟

中图分类号: TV139.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)02-0179-05

作者简介: 陈 群(1972-), 女, 重庆云阳人, 博士, 副教授, 主要从事岩土工程教学和科研工作。

Effects of material stratification on the seepage field in a rockfill dam

CHEN Qun¹, ZHANG Li-min², ZHU Fen-qing³

(1. College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Department of Civil Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong, China; 3. No. 2 Survey and Design Institute of Railway, Chengdu 610031, China)

Abstract: Transient seepage analyses for Gouhou concrete faced rockfill dam were conducted using the unsaturated soil seepage theory. Through comparison of the seepage fields in a uniform dam and an evidently stratified dam, the evolution of seepage with time and the distribution characteristics of the hydraulic parameters in the two cases were studied. The effects of the stratification of rockfill on the seepage field and the stability of the dam slope were highlighted.

Key words: rockfill dam; unsaturated soil; transient seepage; numerical simulation

0 前 言

据统计^[1,2], 除了洪水漫顶, 由于渗流产生的内部侵蚀和管涌是造成土石坝失事和溃坝的主要原因。1993年8月27日, 位于青海省共和县的沟后面板砂砾石坝在其初次高水位运行时发生了灾难性的溃坝事件, 造成了生命财产的巨大损失, 具体溃坝过程见文献[3, 4]。沟后面板砂砾石坝不是唯一的在初次蓄水或高水位运行而失事的土石坝, 而是众多由于渗透破坏失事的土石坝之一。美国的提堂(Teton)大坝就是由于初次蓄水时坝肩产生管涌而溃坝; 芳坦纳(Fontenelle)大坝也是因为土石料的渗透破坏而发生事故^[5]。1961年印度的潘赛特(Panshet)大坝在其一期施工竣工时溃坝, 管涌是溃坝的主要原因之一^[6]。

沟后面板堆石坝高71 m, 坝顶长265 m, 宽7 m, 高程为3281 m。设计、正常和校核洪水位都为3278 m, 相应的库容为310万m³。上、下游坝坡分别为1:1.61和1:1.5。最大设计横剖面见图1。堆石料被分为4个区, I区为过渡区, 其它3个区为主堆石区。坝体直接修建在河床砂卵石层上, 坝基高程为3220.0 m。

为了寻求沟后大坝失事的原因, 失事后开展了许

多相关的研究^[7~9]。研究结果表明, 沟后坝的坝顶结构和填料施工存在严重缺陷。首先, 防浪墙和面板顶端之间的接缝止水埋设不当, 使防浪墙和面板分离, 没有起到止水作用。其次, 面板分块之间的止水也未起到相应的作用, 尤其在靠坝顶的面板上部。再次, 由于填料的沉降、变形, 过渡料和面板之间在防浪墙以下几米的范围内发生分离。最后, 由于机械化施工, 造成填料的明显粗细分层, 在坝顶附近尤为严重。这些结构缺陷在坝体中造成了渗流通道, 因而渗透破坏被认为是诱发坝体失事的主要原因。

数值渗流分析是研究坝体是否发生渗流破坏以及提供坝坡稳定分析所需的水力条件的重要方法之一。目前国内采用非饱和渗流理论对土石坝体的瞬态渗流场的研究不多。国外对坝体的研究也渐渐减少, 非饱和土渗流理论多用于边坡稳定和地下水流动规律的数值模拟分析。本文以沟后砂砾石坝为例, 主要针对坝体填料分层对坝体渗流场的影响, 采用非饱和土渗流

基金项目: 国家自然科学基金委员会和香港研究资助局联合资助项目
(N-HKUST611/03)

收稿日期: 2005-05-24

理论研究均质坝体和填料分层后坝体的瞬态渗流场特性,为以后类似工程的施工和设计提供参考,也为同类型坝体渗流场和坝坡稳定分析提供借鉴。

1 非饱和土的渗流方程

非饱和土中的渗流与饱和土一样符合达西定律和连续方程。主要的区别在于,饱和土的渗流过程中,渗透系数为一常数;而在非饱和土中,渗透系数为一个变量,它是饱和度或含水率的函数,此函数称为非饱和土的渗透函数。将达西定律代入连续方程(忽略渗流过程中总应力的改变和土颗粒骨架的变形),并以总水头 h 作为未知量,当渗透的主方向与坐标轴一致时,非饱和土渗流的二维微分方程可表示如下^[10]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) = \gamma_w \frac{\partial \theta_w}{\partial \psi} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式中 k_x 和 k_y 分别为 x 和 y 方向的渗透系数; γ_w 为水的容重; θ_w 为体积含水量; ψ 为土的吸力; t 为时间。土的体积含水量与土的吸力之间的关系曲线称为土-水特征曲线。只要已知土的土-水特征曲线和渗透函数,以上微分方程就可以求解,得到非饱和土的渗流场。

2 计算模型

2.1 计算剖面的简化

沟后坝如图1所示为一座分区砂砾石坝,但失事后的调查发现^[8],由于施工时只对各分区的最大粒径进行控制,而实际料场的粗粒料比例较少,因此实际上坝体没有形成明显的分区,基本上是个均质坝。并且,坝体的填料发生严重粗细分层,因此砂砾石填料的颗粒分布曲线离散性较大。图2所示为施工过程中和失事后所取的坝体填料的平均级配、上限级配和下限级配。粗粒层厚约0.3~0.4 m,并从坝体上游延伸到下游,粗粒层的饱和渗透系数高达2~44 cm/s,比细粒层的饱和渗透系数约大1~3个量级。

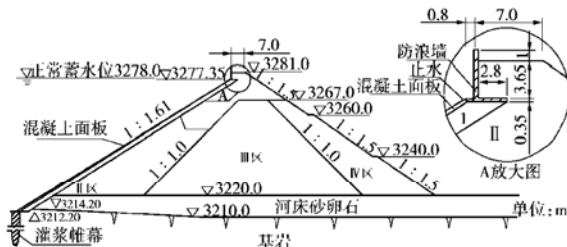


图1 坝体最大横剖面图

Fig. 1 Maximum cross-section of the dam

根据坝体的实际情况,选择两种工况进行瞬态渗流分析。工况1为均质坝体,即不考虑坝体的分区,

将整个坝体视为一个均质体,采用图2中上限级配的土料作为坝体填料。工况2为粗细粒料互层的分层砂砾石坝,计算简化剖面如图3所示,整个坝体分为7层,由坝顶向下第2、4、6层为粗粒料层,采用图2中下上级配的土料,即最粗的土料作为坝体填料;其余土层为细粒料层,采用图2中上限级配的土料(最细的土料)作为坝体填料。

2.2 填料特性

在渗流分析中,所用的土料为坝体填料的上上级配、下上级配填料和河床砂卵石料,这3种土料的有关物理性质指标见表1,其级配曲线见图2。

表1 渗流分析所用三种土料的物理性质指标

Table 1 Index properties of the three materials used in seepage analysis

土料	比重 G_s	初始 含水率 $w / \%$	孔隙率 $n / \%$	饱和 渗透系数 $k_{sat} / (m \cdot d^{-1})$
上限级配土	2.68	3.5	0.21	1.9
下上级配土	2.68	3.5	0.21	199.6
河床砂卵石	2.71	12.3	0.27	6.4

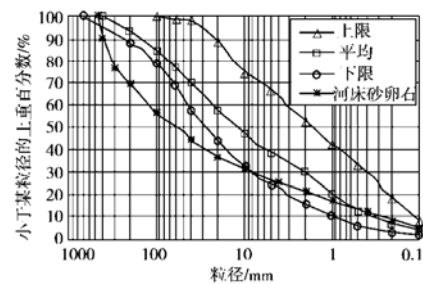


图2 坝体砂砾石料的平均、下限和上限级配曲线

Fig. 2 Average, lower and upper limits of the grain size distribution curves of the rockfill materials

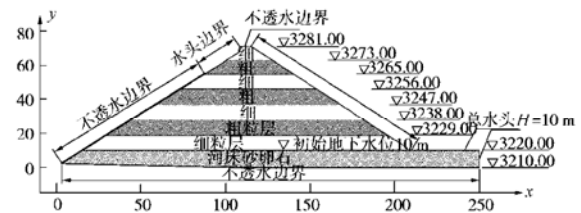


图3 瞬态渗流分析的简化剖面 and 边界条件

Fig. 3 Simplified profile and boundary conditions for transient seepage analysis

要在瞬态数值模拟过程中求解非饱和土的渗流控制方程,土的两个重要特性函数,即土-水特征曲线和渗透函数必须已知。当试验资料缺乏时,土-水特征曲线可由土的级配曲线和物理性质指标推得^[11, 12]。进而,渗透函数又可以依据土的饱和渗透系数和土-水特征曲线求出^[13]。本文中所用的土-水特征曲线和渗透函数就是分别根据文献[12, 13]的方法推出。推

求出的3种土料的土-水特征曲线和渗透函数绘于图4中。

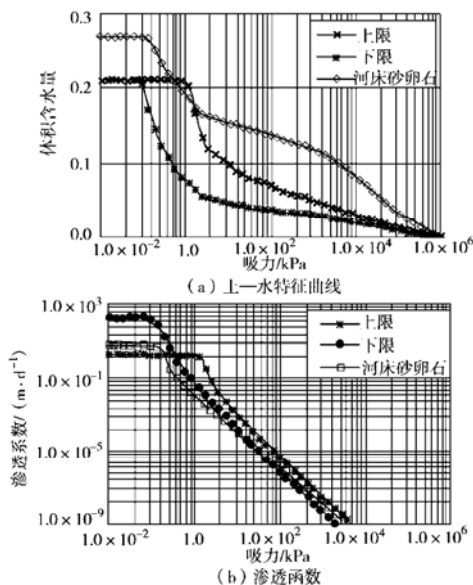


图4 推求的三种填料的土-水特征曲线和渗透函数

Fig. 4 Estimated soil-water characteristic curves and permeability functions for the three soils

2.3 初始条件和边界条件

本文研究中,假设初始地下水位与坝基齐平,整个厚10 m的河床砂卵石层都淹没在水下。在地下水位以上,土的吸力沿高程线性增大,但最大吸力限制为14.2 kPa,对应于施工时填料的平均含水率为3.5%时由土-水特征曲线得到的填料的平均吸力值。

瞬态渗流分析的边界条件也示于图3中。两种工况的边界条件基本上是相同的。考虑到上游坝坡面板上部止水和防浪墙与面板之间的止水失效,假设上游坝面上部为透水边界,下部为不透水边界。假设工况1和工况2分别在高程3260 m和3265 m以上的面板止水失效,为透水边界,库区的水头直接作用在坝体的填料上,即为已知水头边界,并且水头在第一天由防浪墙底板高程3277 m升高到失事前的最高水位3277.3 m,之后保持为常水头3277.3 m不变。坝顶为不透水边界。下游坝面为可变边界,即当总水头值低于高程时,为不透水边界,高于高程时为自由出流边界。下游河床顶面和侧面都为10 m常水头边界。河床以下的基岩面为不透水边界。

3 计算结果和分析

3.1 瞬态渗流过程和孔隙水压力分布

图5是工况1情况下坝体中孔隙水压力等值线随时间 t 的变化过程。孔隙水压力为0的等值线表示

瞬态的滞水面,负孔隙水压力即为吸力。库水由止水失效的上游坝面上部渗入坝体,逐渐向四周渗流。在滞水面到达河床中的初始地下水位之前,整个坝体被滞水面分成两个区域:①是由滞水面包围的饱和区,其中的孔隙水压力为正;②是滞水面之外的非饱和区,其中的孔隙水压力为负。孔隙水压力的最大值就在坝面的3260 m高程处,由此处到滞水面,孔隙水压力由最大值逐渐减小到0。

5 d后,滞水面的底部与河床地下水位相连(图5(b)),坝体内很快形成了从上游坝面到河床的渗水通道(图5(c))。坝体内的饱和区域不断增大,最后整个坝体上游面基本都已饱和。18 d后,水压力从自由水面到坝体底部单调增大,渗流基本上达到了稳态。由渗流过程可知,渗透水流没有从下游坝坡上部出逸,而是向下流动最终与初始地下水位汇合。这与坝体失事前在现场观察到的渗透水流从下游坝坡约3260 m高程处出逸的渗流模式不一致。

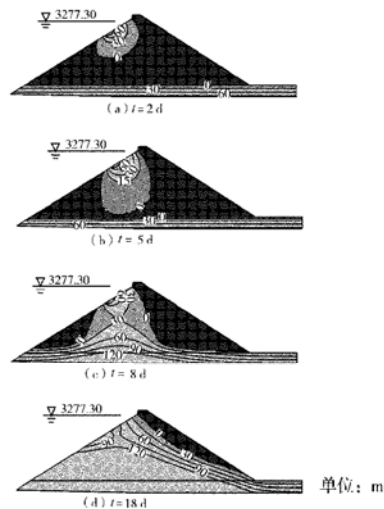


图5 工况1不同时刻孔隙水压力等值线

Fig. 5 Pore-water pressure contours at different time (Case One)

图6为工况2情况下坝体中孔隙水压力等值线随时间的变化过程。库水由上游坝面上部渗入坝体后,与工况1类似形成了滞水面,同时把坝体分为饱和区和非饱和区两个区域。但渗透水流在坝体内的渗透模式与工况1不同,由于坝体填料的粗细水平分层,渗流沿水平方向的渗流速度远大于沿竖向的渗流速度,渗流前锋明显沿粗粒和细粒交界面延伸。在这种情况下,渗透水流就会从下游坝坡较高的高程处出逸,这与坝体失事前在现场观察到的渗透水流从下游坝坡出逸的现象一致。由工况2的渗流模拟计算结果可知,坝体确实存在严重的粗、细粒料的水平分层情况,否则,如果坝体为均质坝,即符合工况1的情况,渗透

水流就不会从下游坝坡上部出逸,而是向下流动与地下水位汇合后从下游坡脚或河床出逸。

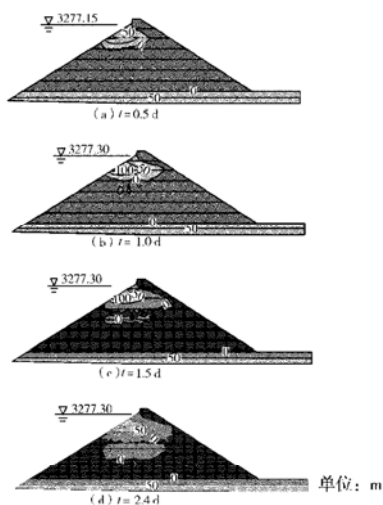


图 6 工况 2 不同时刻孔隙水压力等值线

Fig. 6 Pore-water pressure contours at different time (Case Two)

3.2 总水头和速度分布

图 7 是工况 1 情况下不同时刻坝体中总水头等值线和速度矢量图。在滞水面没有与地下水位汇合之前,渗透水流向下渗流的模式基本上没有大的变化(图 7 (a) 和 (b))。渗流前锋都是向四周扩散,但向下的扩散速度最快。当滞水面与初始地下水位汇合后,渗流方向逐渐由向上、下游坝面两个方向(图 7 (c))变为向下游坡脚 1 个方向(图 7 (d))。坝体内饱和区的渗透速度远大于非饱和区,这是因为土饱和时的渗透系数远比非饱和时大。在整个渗流过程中,总水头都是沿渗径方向逐渐减小。在饱和区中,由于渗流的作用,总水头等值线不服从静水压力分布。

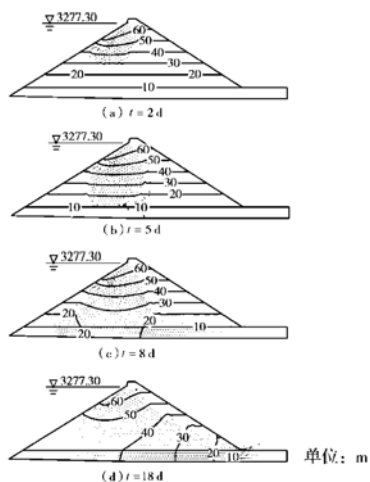


图 7 工况 1 不同时刻总水头等值线和速度矢量图

Fig. 7 Total head contours and velocity vectors at different time (Case One)

图 8 是工况 2 情况下不同时刻坝体中总水头等值线和速度矢量图。从速度的方向可以看出,在粗细粒层交界面上有较大的水平速度分量,致使水流方向近似水平,尤其是在渗流开始的阶段(图 8 (a) 和 (b))。这与图 7 中向下渗透为主方向的渗流模式是不同的。由于坝体填料的分层,使速度沿渗流方向的分布很不均匀,在粗、细粒层交界面上,向下的渗流速度较小,水平渗透速度分量较大;而在细、粗粒层交界面上,向下的渗流速度较大。水流一方面向下渗透,另一方面沿水平分层的粗、细粒土层向下游坝坡渗透,并且渗流前锋先到达下游坝面,而后才与地下水位汇合。在这种渗流模式下,就会出现坝体失事前现场观察到的渗流从下游坝坡上部出逸的现象。

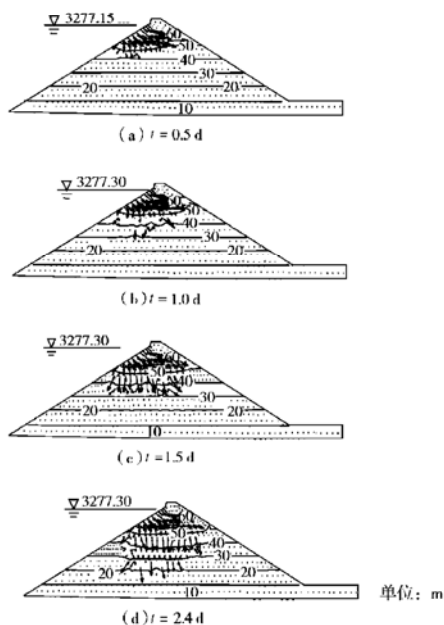


图 8 工况 2 不同时刻总水头等值线和速度矢量图

Fig. 8 Total head contours and velocity vectors at different time (Case Two)

4 结 论

通过对沟后砂砾石坝两种工况的瞬态渗流数值模拟分析,可得到以下一些可供类似工程参考的结论。

(1) 当库水由上游坝面渗入坝体时,坝体内会形成滞水面。滞水面随时间向四周延伸,并将坝体分为饱和区和非饱和区两个区域。

(2) 如果坝体是完全均质的(工况 1),渗透水流会优先向下流动并与初始地下水位汇合,不会从下游坝坡的上部出逸。当坝体填料出现水平分层时(工况 2),会造成沿水平方向的优势渗透水流,尤其是在粗、

细粒的交界面上, 致使水流从坝体上游渗透到下游, 并从下游坝坡的上部出逸。

(3) 坝体中从下游坝坡出逸的近似水平的渗流对下游坝坡的稳定非常不利, 会增大坝坡的下滑力, 并造成下游坝坡的冲蚀破坏。因此在施工中应该严格控制砂砾石料的填筑和碾压, 防止因机械化施工造成填料的水平分层, 给渗透水流提供水平渗透通道。

参考文献:

- [1] FELL R, MACGREGOR P, STAPLEDON D. Geotechnical Engineering of Embankment Dams [M]. Netherlands: Balkema, Rotterdam, 1992.
- [2] FOSTER M, FELL R, SPANNAGLE M. The statistics of embankment dam failures and accidents [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 37(5): 1000 - 1024.
- [3] 陈祖煜. 沟后水库大坝失事实录[J]. 水力发电, 1994,(2): 46 - 48. (CHEN Z Y. Failure memoir of the dam for Gouhou reservoir [J]. Water Power, 1994, (2): 46 - 48.)
- [4] 刘 杰, 丁留谦, 缪良娟, 杨凯虹. 沟后面板砂砾石坝溃坝机理及经验教训[J]. 水利水电技术, 1998, 29(3): 4 - 9. (LIU J, DING L Q, MIAO L J, YANG K H. Failure mechanisms and lessons of the Gouhou faced rockfill dam [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29 (3): 4 - 9.)
- [5] USCOLD. Lessons from dam incidents, USA-II [C]// Committee on Dam Safety of the United States Committee on Large Dams. New York, 1988.
- [6] SINGH B, VARSHNEY R S. Engineering for Embankment Dams [M]. USA: Balkema, Brookfield, 1995.
- [7] 陈祖煜, 赵毓芝. 沟后水库坝坡稳定研究(一)确定性模型[J]. 青海水力发电, 1996,(1): 37 - 42. (CHEN Z Y, ZHAO Y Z. Slope stability study of Gouhou dam (1) deterministic model [J]. Qinghai Water Power, 1996,(1): 37 - 42.)
- [8] 刘 杰, 缪良娟. 大坝砂砾料的力学特性试验研究[M]// 沟后水库砂砾石面板坝—设计、施工、运行与失事. 北京: 中国水利水电出版社, 1996. 18 - 25. (LIU J, MIAO L J. Experimental study of mechanical properties of Gouhou rockfill materials [M]// Faced Rockfill Dam of Gouhou Reservoir - Design, Construction, Operation and Failure. Beijing: Water Resources and Hydropower Press, 1996, 18 - 25.)
- [9] 刘 杰, 丁留谦, 缪良娟, 杨凯虹. 沟后面板砂砾石坝溃坝机理模型试验研究[J]. 水利学报, 1998,(11): 69 - 75. (LIU J, DING L Q, MIAO L J, YANG K H. Model study on failure mechanisms of the Gouhou faced rockfill dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (11): 69 - 75.)
- [10] FREDLUND D G, RAHARDJO H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc, 1993.
- [11] GUPTA S C, LARSON W E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density [J]. Water Resources Research, 1979, 15(6): 1633 - 1635.
- [12] FREDLUND M D, WILSON G W, FREDLUND D G. Use of the grain-size distribution for estimation of the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(5): 1103 - 1117.
- [13] FREDLUND D G, XING A, HUANG S. Predicting the permeability function of unsaturated soils using soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 533 - 546.