

文章编号:1671-6833(2010)05-0027-05

南水北调大沙河渠道排水非稳定渗流计算分析

高丹盈¹, 杨素娟¹, 李占松¹, 赵廷华²

(1. 郑州大学 水利与环境学院, 河南 郑州 450001; 2. 河南省水利勘测设计研究有限公司, 河南 郑州 450008)

摘要: 用有限元方法进行了南水北调工程大沙河段渠道排水非稳定渗流计算, 分析了排水管间距、砂层厚度、基础土层的渗透性对渠道内外水头差的影响。结果表明: 在一定范围内增加排水管间距, 衬砌内外最大水头差增大; 增加砂层厚度可以有效减小渠道内外水头差; 随着基础土体渗透系数的减小, 粗砂层的排水通道作用更加突出, 渠道内外水头差明显减小; 非稳定渗流对渠道衬砌稳定影响较大, 在渠道排水结构设计中应作为控制工况。

关键词: 有限元; 排水系统; 非稳定渗流

中图分类号: TV223.5 **文献标识码:** A

0 引言

非稳定渗流是导致堤坝边坡失稳的主要原因, 国内外学者进行了大量的计算方法研究, 通常采用扩散方程、布辛内斯克方程、固结方程及拉普拉斯方程等几种型式^[1]。

南水北调中线工程线路总长 1 272 km, 穿越黄、淮、海及长江四大水系, 其规模之大举世瞩目。南水北调中线工程在河南省境内长 731 km, 渠道穿行于山地与丘陵、岗地及山前倾斜平原, 沿线的地质条件复杂, 不可避免地存在一些渠段堤外相对高水位情况, 由此引起的渗流场压力将影响渠道衬砌结构的稳定性, 并可能使混凝土衬砌板发生顶托破坏。为确保工程安全, 需设置有效的处理措施。笔者运用黏滞流模型及有限元法对南水北调大沙河段渠道进行了渗流计算, 计算水位骤降的情况下, 渠道外部渗流场压力对渠道衬砌结构的影响。

1 渠道衬砌排水计算原理及方法

非稳定渗流是渗流场内各点的流速等水力要素随时间而变化的流动。当渠内水位骤降, 渠基浸润线也随之逐渐下降, 属于非稳定渗流。渗流计算主要是求得渗流场内的渗流量、水头、压力和坡降等水力要素, 以便在渠道设计及运行管理中进行

渗透稳定分析, 选择合理的防渗和排渗方案, 进而有效地控制渗流。

渠道衬砌排水计算可采用有限单元法^[2]。采用该法能考虑复杂的边界条件、非均匀土层以及第二类流量边界, 不需要专门处理而能自动满足, 并能系统地编制程序。

考虑土和水的压缩性, 符合达西定律的二向非均质各向异性土体渗流的基本方程为^[3]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_t \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)是土坝非稳定渗流的基本方程式。当水和土不可压缩时, 式(1)变为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0 \quad (2)$$

式(2)即为土坝稳定渗流的基本方程式。式中, x, z 是空间坐标; K_x, K_z 是 x, z 方向的渗透系数; S_t 是单位贮存量; h 是水头函数; t 是时间函数。结合变动的渗流自由面边界条件, 式(1)和式(2)可用来求解有渗流自由面的土坝无压渗流。非稳定渗流边界条件如下。

初始边界条件:

$$h|_{t=0} = h_0(x, z, t) \quad (3)$$

水头边界条件:

$$h|_{r_1=0} = f_1(x, z, t) \quad (4)$$

流量边界条件:

收稿日期: 2010-03-06; 修订日期: 2010-06-05

基金项目: 河南省重大公益性科研项目(8110912600)

作者简介: 高丹盈(1962-), 男, 河南三门峡人, 郑州大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事新型建筑复合材料及其结构性能研究。

$$k_n \frac{\partial h}{\partial n} \Big|_{r_2} = f_2(x, z, t) \quad (5)$$

在有限单元法计算中,把微分方程式(1)和边界条件按变分原理转变为一个泛函求极值的问题.计算时先对渗流场进行三角形剖分,同一三角形单元中渗流系数取为常数,不同土层分界线作为单元边界.剖分单元后,采用多项式插值函数,得到传导矩阵 $[K]$,对所有单元的泛函数式(6)求微分,并使之等于零(求极小值)得到泛函数对结点水头进行微分的方程式(7),即

$$J(h) = \iint_n \left\{ \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x \left\{ \frac{\partial h}{\partial x} \right\}^2 + k_z \left\{ \frac{\partial h}{\partial z} \right\}^2 \right] + S_v h \frac{\partial h}{\partial t} \right\} dx dz + \int_{r_2} q h d\Gamma \quad (6)$$

$$\frac{\partial J}{\partial h} = \sum_e \frac{\partial J}{\partial h} = [K] \{h\} + [S] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} + [P] \left\{ \frac{\partial h}{\partial t} \right\} = 0 \quad (7)$$

式中: $[K]$ 为传导矩阵; $[S]$ 为单元的土体可压缩系数矩阵; $[P]$ 为非稳定渗流边界系数; h 为水头势函数; J 为关于 h 的泛函数; n 为结点总数; \sum_e 表示对所有单元求和.

根据上述原理和方法编制计算程序,可以计算出不同工况下不同节点渠道衬砌内外水头差.

2 计算段的选择和计算条件

选择南水北调工程的IV28+500.0~IV28+758.1段为计算段.该段位于大沙河工程地质段,属于黏性土均一结构.本段渠道设计以半挖半填为主,渠道挖深为5~10 m.渠底板主要位于重粉质壤土(Q14)中,边坡岩性主要由重粉质壤土和轻粉质壤土夹卵石(Q14)组成.渠道地下水位高于渠底板约4~7 m,轻粉质壤土多呈饱水状态,渠道开挖后可能发生流土和管涌等渗透破坏现象,边坡稳定性较差.土体渗透系数 $K=3.63 \times 10^{-6}$ m/s,选取典型计算断面为IV28+500.0,渠底高程98.92 m,渠道设计水位105.92 m,地下水位106.14 m,渠道单侧单位长度集水流量0.093 m³/d.

参考文献[4-5]介绍的排水系统,渠道排水结构平面布置、排水结构剖面分别如图1和图2所示,计算条件如下:

(1)选取一个排水单元进行模拟计算,并且假定相邻排水单元对其无流量和水头影响;

(2)以渠外地下水位、渠内设计水位,及15

min水位下降0.3 m为计算工况,大致对应于不同渠段节制闸关闭且退水闸参与运行的工况;

(3)模拟计算过程中,需考虑粗砂、软式透水管滤布、软式透水管和逆止式排水器的排水能力及其消耗的水头的耦合情况;

(4)排水管网共选取46个单元,32个节点,平面二维横剖面渗流计算由渠中心线对称轴剖开计算一半区域,采用三角形网格,共计46 580个单元,23 604个节点;

(5)计算范围为:水平方向由渠中心线算起111.013 m,垂直方向由原地下水位算起98.914 m.

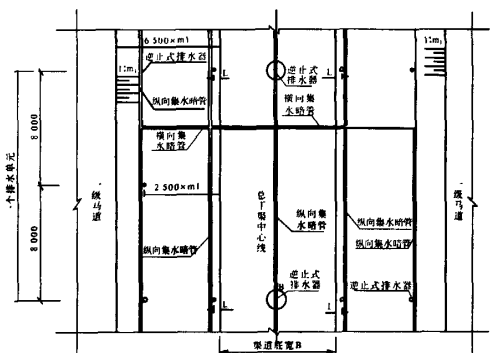


图1 排水结构平面布置图

Fig.1 The plan of the drainage unit

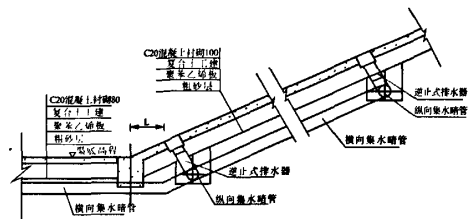


图2 排水结构剖面图

Fig.2 The sectional drawing of the drainage unit

3 计算结果分析

3.1 非稳定渗流集流管间距对最大水头差的影响

在基础土体渗透系数为 3.63×10^{-6} m/s,砂层渗透系数为 1.0×10^{-4} m/s,砂层厚度为0.1 m,及水位在15 min内骤降0.3 m的情况下,集流管间距改变时,渠内外最大水头差的计算结果见图3.可以看出,管间距2 m时,渠底最大水头差为0.147 m;管间距为4 m时为0.255 m,比管间距为2 m时增大了73.5%;管间距为6 m时渠底最大水头差为0.222 m,比管间距为2 m时增大

了 51%,但比 4 m 时有所减小.边坡内外水头差变化趋势与渠底大致相同,说明管间距对渠底和边坡水头的影响比较明显.因此在一定范围内增加管间距,衬砌内外最大水头差增大,会影响衬砌结构的安全.

图 4 为砂层厚度 0.1 m 时,不同集流管间距对渠道内外水头差的影响.从图 4 可以看出,渠底与边坡水头差分布较规律,布置集流管处水头差最小,基本上不超过 0.05 m,最大值出现在两相邻集流管中点.当管间距为 2 m 时渠底最大内外水头差为 0.160 m,边坡最大水头差为 0.216 m;管间距为 4 m 时,渠底和边坡最大水头差分别为 0.252 m 和 0.297 m;当管间距为 6 m 时,最大水头差分别为 0.261 m 和 0.290 m,与现实情况符合较好.

由图 3 和图 4 可以得出以下结论:边坡的水头差大于渠底的水头差;在计算工况下,集流管间距布置为 4 m 时渠道内外水头差最大,对渠道衬砌结构破坏最大;而集流管间距为 6 m 时,渠道内外水头差稍有减小,可能是编制程序过程中计算精度的不同造成的.因此,管间距对渠底和边坡水头的影响比较明显,在一定范围内减小管间距,对降低渠道内外大水头差有着显著的影响.

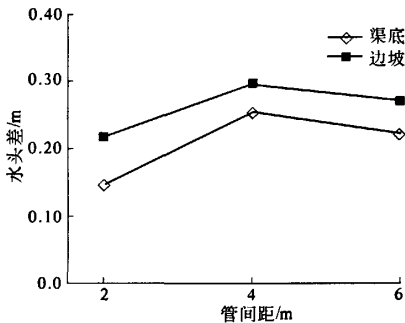
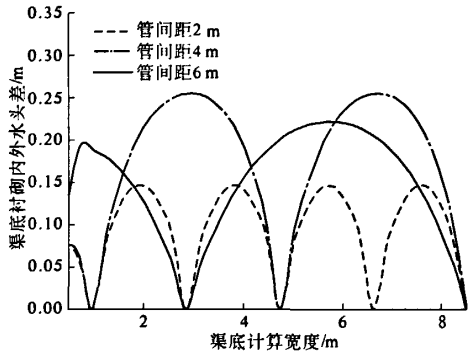


图 3 渠内外水头差与管间距的关系
Fig. 3 Relationships between the maximum water - head of canal lining and the drainage pipe span

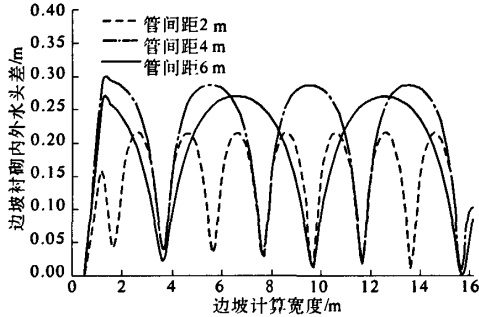
3.2 非稳定渗流粗砂层厚度对最大水头差的影响

计算工况为非稳定渗流,15 min 内水位骤降 0.3 m,砂层渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ m/s,基础土体渗透系数取 3.63×10^{-7} m/s,管间距为 6 m 的情况下,不同砂层厚度时的最大水头差如图 5 所示.不同砂层厚度对渠底和边坡内外水头差的影响如图 6 所示.不同砂层厚度对应的是排水垫层过流断面的大小,砂层越厚,过流断面越大,排渗

能力越强,则对应的渠道内外水头差越小(图 5).在计算工况下,当渗出流量一定且集流管间距保持 6 m 不变时,渠道内外的最大水头差随着砂层厚度的增加而递减.



(a) 对渠底内外水头差的影响



(b) 对边坡内外水头差的影响

图 4 不同管间距对渠底和边坡内外水头差的影响
Fig. 4 Influences of drainage pipe span on the water - head of canal bottom and canal brae

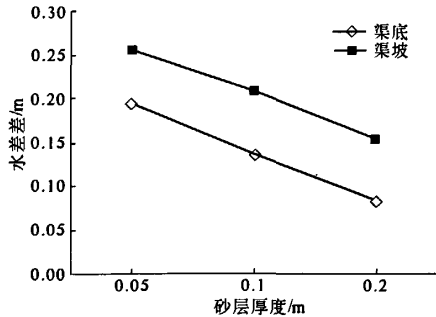
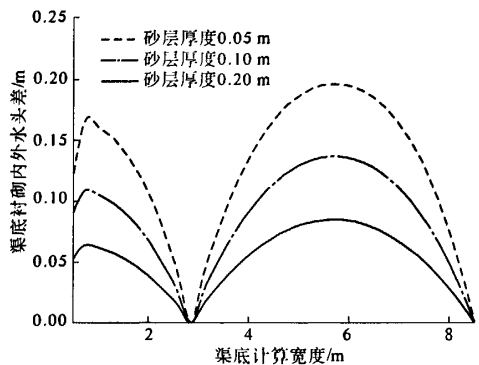


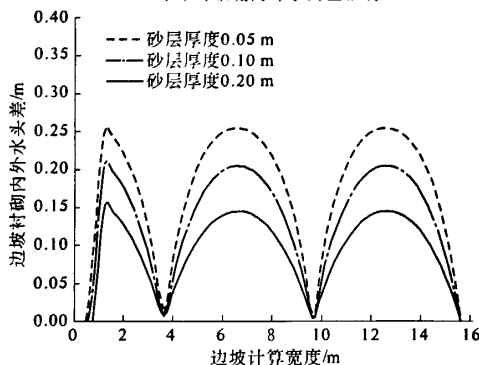
图 5 最大水头差与砂层厚度关系
Fig. 5 Relationships between the maximum water - head of canal lining and the thickness of the coarse sand layer

从图 6 渠底和边坡砂层厚度对渠道内外水头差的影响可以看出,当砂层厚度为 0.05 m 时,渠底边坡衬砌内外水头差分别为 0.196 m 和 0.255

m;当砂层厚度增加到 0.1 m 时,水头差降到 0.137 m 和 0.209 m,分别减小了 30% 和 18%;当砂层厚度增加到 0.2 m 时,水头差为 0.085 m 和 0.154 m,比砂层厚度为 0.05 m 时减小了 56.6% 和 39.6%。由以上结果可知,砂层厚度对渠道衬砌内外水头差的影响明显,增加砂层厚度可以有效减小渠道内外水头差。



(a) 对渠底内外水头差影响



(b) 对边坡内外水头差影响

图 6 不同砂层厚度对渠底和边坡内外水头差影响

Fig.6 Influences of different thickness of coarse sand layer on the water - head of cancel bottom and canal brae

3.3 基础土体渗透性对最大水头差的影响

在计算工况为非稳定渗流,水位在 15 min 内骤降 0.3 m,砂层渗透系数 $k = 1.0 \times 10^{-4}$ m/s,初始渠内设计水位,粗砂层厚度 0.2 m 的条件下,当基础土体的渗透系数分别为 $K_1 = 3.63 \times 10^{-6}$ m/s 和 $K_2 = 3.63 \times 10^{-7}$ m/s 时,渠底、边坡最大水头差的计算结果见图 7。可以看出,基础土体的渗透系数越大,则需要排出的渗出流量也越大,因而渠道内外的水头差也越大。当砂层厚度一定,基础土体的渗透系数从 3.63×10^{-6} m/s 减小到 3.63×10^{-7} m/s 时,排水管的排渗减压作用明显,渠底

和边坡的内外水头差显著降低,最大可减小 87%。基础土体的渗透系数对渠道内外水头差的影响较大。因此,根据工程地质的变化,改变排水结构的设计是非常必要的。

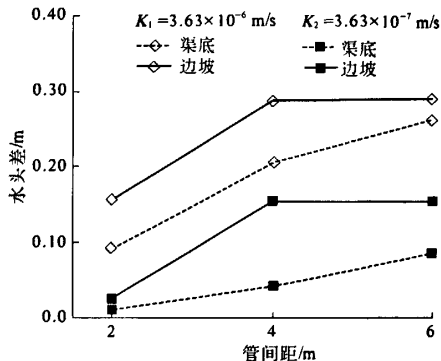


图 7 基础土体渗透系数对渠底及边坡最大水头差影响

Fig.7 Influences of the seepage parameters of brae soil on the maximum water - head of canal

4 结论

(1)渠基二维渗流与排水管的耦合计算方法是可行和有效的,在集流管间距、砂层厚度和基础土体渗透系数都相同的条件下,边坡的内外水头差大于渠底的内外水头差。建议渠底和边坡的集流管采用不同间距,边坡集流管间距比渠底相应减小;当边坡集流管间距从 4 m 变为 6 m 时,边坡衬砌内外水头差变化并不明显,甚至减小,其原因可能在于在编制程序迭代计算过程中的计算精度不同而产生的计算误差。

(2)非稳定渗流模拟节制闸关闭下渠道内水位降低情况,渠道内外的水头差较大,是排水计算的控制工况,在排水设计及以后的运行中应给予足够的重视,以免渠道顶托破坏,造成不必要的损失。

(3)渠道内外水头差随着管间距的增大而增大,通过增加集流管数目形成排水管网可以满足工程的需要,但是集流管数目增多,同时也增加了施工的难度和造价,须在满足工程需要的前提下,进行经济性比较。

(4)随着砂层厚度的增加,过水断面增大,透水排渗能力增大,渠道内外压差减小。当砂层厚度为 0.2 m,排水管 6 m 等间距布置时,渠道内外压差最大为 0.154 m,已经能满足工程要求。

(5)当基础土体渗透系数减小时,粗砂层的排水通道作用更加突出,渠道内外水头差明显减

小.因此,根据工程实际情况,在不同的设计段采用不同的砂层厚度,可以减少工程投资和施工难度,具有现实意义.

参考文献:

- [1] DESAI C S. Free surface seepage through foundation and berm of cofferdams[J]. Indian Geotechnical Journal, 1975, 5(1): 1-10.
- [2] 胡静. 水工结构中含排水孔渗流场的分析方法研

究[D]. 武汉: 武汉大学水利水电学院, 2003.

- [3] 毛昶熙. 渗流计算分析与控制[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 306-318.
- [4] 董勤瑞. 混凝土衬砌渠道的排水技术[J]. 水利水电技术, 1990(8): 45-50.
- [5] 韩凤来, 高德刚. 济平干渠渠道衬砌排水减扬压技术研究[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(3): 25-27.

Calculation and Analysis of the Unsteady Seepage Drainage in the Dashahe Part Channel of the South - to - North Water Transfer Project

GAO Dan - ying¹, YANG Su - juan¹, LI Zhan - song, ZHAO Ting - hua²

(1. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Henan Water and Power Consulting Engineering Co. Ltd., Zhengzhou 450008, China)

Abstract: The FEM is used in the calculation of the unsteady seepage drainage in the canal of Dashahe part of the South - to - North Water Transfer Project. The influences of drainage pipe spans, thicknesses of the coarse sand layer and seepage parameters of the brae soil on the water - head of canal lining are analyzed. The results indicated that the water - head of canal lining increased with the increase of drainage pipe span. Thickening the coarse sand layer led to the decrease of the water - head. The water - head declined significantly with the decrease of the seepage parameter of the brae soil. The role of the coarse sand layer acting as the drainage channel was obvious. Unsteady seepage has a great effect on the stability of the canal lining and should be the control operating mode in drainage layouts.

Key words: FEM; drainage system; unsteady seepage

(上接第21页)

Analysis of Flow Fields and Internal Attachments in Pressure Leaching Reactor

ZHANG Jun, HUANG Liu - gang, WANG Ding - biao

(School of Chemical and Energy Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Pressure leaching reactor is the key equipment employed in hydrometallurgical industry. The flow field and attachment strength are important for the application of equipment. The flow field in the compartments and the stirring effect of the vertical - axis agitator in horizontal vessel were studied by the computational fluid dynamics (CFD) method, and the agitation momentum loaded on partition wall and baffle was obtained. Taking the agitation momentum and liquid static pressure as the loaded condition, the stress intensity and deformation state of partition wall and baffle were analyzed by finite element method (FEM), then the structure and size of attachment were determined. In this paper, a theoretical basis for the design, manufacture and application of pressure leaching reactor was suggested.

Key words: pressure leaching reactor; agitation flow field; coupling load; strength analysis