

(复合)土工膜防渗土石坝饱和-非饱和渗流特性

岑威钧¹, 王 蒙¹, 杨志祥²

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 杭州市闲林水库筹建处, 浙江 杭州 310017)

摘要 :分别采用完全饱和渗流及饱和-非饱和渗流有限元计算理论,对(复合)土工膜防渗土石坝进行渗流场仿真分析,重点研究土工膜等效处理时不同厚度放大倍数下大坝渗流场变化规律,同时结合坝体土石料不同渗透特性,计算得到大坝渗流量和浸润线与土工膜厚度放大倍数之间的关系,并比较了按完全饱和渗流理论与饱和-非饱和渗流理论计算结果的差别。结果表明:在坝体土石料渗透特性相同的情况下,土工膜不同厚度放大倍数时浸润线仅在土工膜等效区有较大差别,在膜后坝体部位基本保持不变;大坝渗流量与土工膜厚度放大倍数及坝体填料的渗透特性相关,按饱和渗流理论计算所得的大坝渗流量大于按饱和-非饱和渗流理论计算得到的渗流量。

关键词 (复合)土工膜;土石坝;饱和渗流;饱和-非饱和渗流;等效算法;有限元模拟

中图分类号 :TV314;TV641

文献标志码 :A

文章编号 :1006-7647(2012)03-0006-04

Partial saturated seepage properties of (composite) geomembrane earth-rock dams // CEN Wei-jun¹, WANG Meng¹, YANG Zhi-xiang² (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ; 2. Hangzhou Xianlin Reservoir Administration Office, Hangzhou 310017, China)

Abstract : In this study, the seepage field of earth-rock dams with impervious (composite) geomembrane was analyzed with the finite element method based on the full saturated and partial saturated seepage theory respectively. The variation of the dam seepage with different amplified thicknesses of the geomembrane was mainly studied. The relationship between the dam seepage flux, the phreatic line and the magnification of the thickness was obtained by the calculations with regard to different permeability values of the dam body materials. The computational results based on the full saturated and partial saturated seepage theories were also compared. The results show that the position of the phreatic line is significantly different in the equivalent zone and remains unchanged in the zone behind the geomembrane if the magnification of the geomembrane thickness is different and the seepage properties of the dam body material are identical. The dam seepage flux is correlated to the magnification of the geomembrane thickness and the permeability of the dam body materials. The seepage flux calculated with the full saturated seepage theory is greater than that with the partial saturated seepage theory.

Key words : (composite) geomembrane ; earth-rock dams ; full saturated seepage ; partial saturated seepage ; equivalent algorithm ; finite element simulation

与黏土、混凝土或沥青混凝土等土石坝传统的防渗材料相比,(复合)土工膜具有更为优越的防渗性能。质量良好的土工膜的渗透系数一般不超过 10^{-11} cm/s。土石坝采用(复合)土工膜防渗方案具有工程施工速度快、造价低廉等优点^[1]。国内外已有不少土石坝工程采用(复合)土工膜进行新坝防渗或老坝渗漏加固^[2-4]。为了科学合理地评价(复合)土工膜的防渗效果,势必要对其防渗特性进行计算分析。目前土石坝渗流分析一般多采用有限元法,而用于土石坝防渗的土工膜厚度一般在1 mm左右,

低坝则更薄,如何在有限元法渗流计算时正确表述土工膜的防渗效果成为核心问题。由于土工膜厚度太小,无法在常有限元网格剖分和计算时直接反映。通常的做法是按照某种等效原则将土工膜放大成有一定厚度的土体介质,但放大到多少合适具有很大的经验性^[5-6]。另外,这种近似处理是否符合实际情况,等效处理后坝体的渗流场分布规律、渗流量、浸润线(逸出点)等是否发生明显变化,目前还缺乏细致研究。本文采用饱和-非饱和渗流计算理论,借助某复合土工膜防渗土石坝工程,按照土工膜防

渗效果等价的原则对土工膜的计算厚度进行不同程度的放大处理,进行多方案比较计算,得到大坝渗流量和浸润线高度随土工膜厚度放大倍数的变化规律。同时,针对筑坝材料不同渗透特性的情况,进行大坝渗流特性的对比分析,以揭示土工膜用于不同渗透特性土石料(如堆石、砂砾石、砾质土、壤土、黏土等)填筑土石坝时的防渗效果和渗流变化规律。

1 饱和-非饱和渗流场求解理论

1.1 控制方程

多孔介质各向异性饱和-非饱和非恒定达西渗流控制方程^[7-8]为

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[k_{ij}^s k_f(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_f(h_c) \right] - Q = [\alpha(h_c) + \beta S_s] \frac{\partial h_c}{\partial t} \quad (1)$$

其中 $\alpha(h_c) = \partial \theta / \partial h_c$ (2)

式中: h_c 为压力水头; k_{ij}^s 为饱和渗透系数; $k_f(h_c)$ 为相对透水率, $0 < k_r \leq 1$; $C(h_c)$ 为比容水度,在正压区 $\alpha(h_c) = 0$; β 为饱和-非饱和选择常数,在非饱和区为0,在饱和区为1; θ 为体积含水率; S_s 为弹性贮水率,饱和土体的 S_s 为一个常数,在非饱和土体中 $S_s = 0$,当忽略土体骨架及水的压缩性时对于饱和区也有 $S_s = 0$; Q 为源汇项。

当计算稳定渗流场时,只需令控制方程式(1)右端项为零即可。对于土石坝工程,坝体坝基内部一般不存在渗流源汇项,因此式(1)中 $Q = 0$ 。如果按饱和渗流场求解,只需令式(1)中 $k_f(h_c) = 1$ 即可。

1.2 定解条件

非恒定饱和-非饱和渗流求解时的定解条件如下:

初始条件

$$h_c(x_i, 0) = h_c(x_i, t_0) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

边界条件

$$h_c(x_i, t)|_{\Gamma_1} = h_{ci}(x_i, t) \quad (4)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_f(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_f(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_2} = q_n(t) \quad (5)$$

当问题简化为只按饱和渗流理论计算渗流场时,相对渗透系数 $k_f(h_c) = 1$,除满足式(3)~(5)外,还需增加逸出面边界和自由面边界,分别为

$$-\left[k_{ij}^s k_f(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_f(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_3} \geq 0 \text{ 且 } h_c \Big|_{\Gamma_3} = 0 \quad (6)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_f(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{i3}^s k_f(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_4} = 0 \text{ 且 } h_c \Big|_{\Gamma_4} = 0 \quad (7)$$

2 (复合)土工膜防渗土石坝结构形式及土工膜渗透特性模拟

图1为典型的(复合)土工膜坝面防渗土石坝的结构布置图^[9]。(复合)土工膜有上、下垫层保护,表面再覆盖保护层,以尽可能地确保(复合)土工膜不受损伤破坏。当上游坝坡较陡时,需采用胶黏剂等措施将(复合)土工膜与坝面及上保护层牢固结合,确保(复合)土工膜的抗滑稳定性。

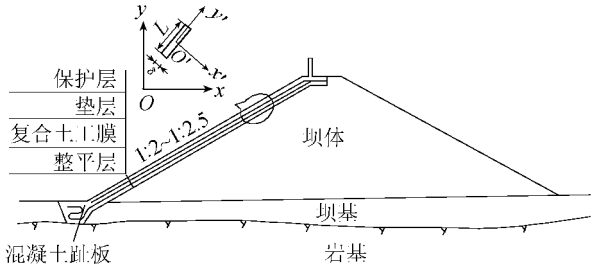


图1 (复合)土工膜坝面防渗土石坝结构形式

室内试验表明,质量完好的土工膜是几乎不透水的,而实际土工膜防渗土石坝是有一定程度的渗漏。这除了施工不良等原因引起的各种缺陷损伤渗漏外,一般认为渗漏是由于土工膜生产过程中产品质量的不均匀性导致的细微孔眼造成的。这些孔眼的孔径一般明显小于土工膜厚度,渗流量计算时可将孔眼视为小管,理论上可利用 Poiseuille 公式计算这些细微的缺陷孔眼引起的渗流量。对于土工膜防渗土石坝,仅知道渗流量是不够的,还需详细了解大坝渗流场分布规律,进而进行防渗效果和防渗安全性的评价。

对图1中坝面土工膜典型段,根据土工膜防渗效果等效原则,即渗流量保持不变,要求土工膜在厚度方向(主要防渗方向)上满足^[10]:

$$k'_{x'} = \frac{t}{\delta} k_{x'} = M k_{x'} \quad (8)$$

式中: $k'_{x'}$ 为土工膜厚度方向的等效渗透系数; $k_{x'}$ 为土工膜厚度方向的渗透系数; δ 为土工膜的厚度; t 为等效厚度; M 为土工膜厚度放大倍数。

类似地,在土工膜平面内,即图1中的 y' 方向,也有类似的要求,即

$$k'_{y'} = \frac{\delta}{t} k_{y'} = \frac{1}{M} k_{y'} \quad (9)$$

式中: $k'_{y'}$ 为土工膜平面内的等效渗透系数; $k_{y'}$ 为土工膜平面内的渗透系数。

由式(8)和式(9)可知,等效处理后的土工膜在厚度放大 M 倍的同时,在厚度方向上的渗透系数也放大 M 倍,而平面内的渗透系数则减小为原来的 $1/M$ 。计算表明,由于土工膜的渗透系数已到达

10^{-11}cm/s 量级,平面内的渗透系数再减小也不会新增防渗效果,可予以忽略。

进行有限元渗流场计算时,由于土工膜渗透系数的等效处理是在局部坐标系下完成的,实际编程计算时需将其转换至整体坐标系下,式(10)为渗透系数坐标旋转公式。

$$k_{ij} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \alpha_{ii'} \alpha_{jj'} k_{i'j'} \quad (10)$$

式中: k_{ij} 和 $k_{i'j'}$ 分别为整体和局部坐标系下的渗透系数; $\alpha_{ii'}$ 和 $\alpha_{jj'}$ 分别为相应坐标轴间的方向余弦。

3 计算分析

计算对象为一高 30 m 的复合土工膜防渗土石坝,上下游坝坡均为 1:2。坝面复合土工膜有效防渗厚度为 1 mm,室内试验测定复合土工膜渗透系数为 10^{-10}cm/s 。根据土工膜防渗土石坝(含渗漏加固)的实际可能使用情况,将坝体土石料的渗透系数分别假定为 10^{-2}cm/s , 10^{-3}cm/s , 10^{-4}cm/s , 10^{-5}cm/s ,记为方案 1 2 3 4,以模拟土工膜用于不同渗透特性土石坝的防渗或渗漏修复。每组方案将土工膜厚度从实际的 1 mm 分别放大至 50 mm, 100 mm, 200 mm, 500 mm, 1 000 mm, 2 000 mm 和 4 000 mm 等 7 种工况,相应的厚度方向等效渗透系数分别为 $5 \times 10^{-9}\text{cm/s}$, $1 \times 10^{-8}\text{cm/s}$, $2 \times 10^{-8}\text{cm/s}$, $5 \times 10^{-8}\text{cm/s}$, $1 \times 10^{-7}\text{cm/s}$, $2 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 和 $4 \times 10^{-7}\text{cm/s}$ 。计算分析中不考虑坝面土工膜可能存在的缺陷损伤引起的集中渗漏效应。

图 2 给出了 4 组不同计算方案的大坝渗流量与土工膜厚度放大倍数的关系曲线。由图 2 可见,在土工膜同一厚度放大倍数下,大坝渗流量随坝体渗透系数的减小而减小,各组方案中大坝渗流量均随土工膜厚度放大倍数的增加而减小。这个计算结果反映的工程背景为:当坝体材料为透水性好的砂砾石时,渗流量随土工膜厚度放大倍数的增大而明显减小,对于壤土等渗透性较弱的材料,土工膜厚度放大倍数对渗流量的影响很微小。

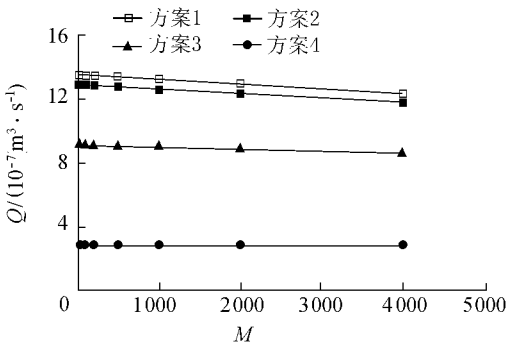


图 2 不同方案下大坝渗流量与土工膜厚度放大倍数的关系

图 3 给出了 4 组计算方案的坝体浸润线分布,图中浸润线附近标注的数据 50, 100, 200, 500, 1 000, 2 000 和 4 000 为土工膜厚度放大倍数。由图 3 可见,在同一计算方案中不同土工膜厚度放大倍数下,浸润线在土工膜等效处理部位变化较大,而膜后坝体内浸润线分布规律基本保持不变,下游逸出点高度也基本不变。对比 4 组计算方案,其膜后浸润线分布高度和逸出点均随坝体土石料的渗透系数减小而增加。

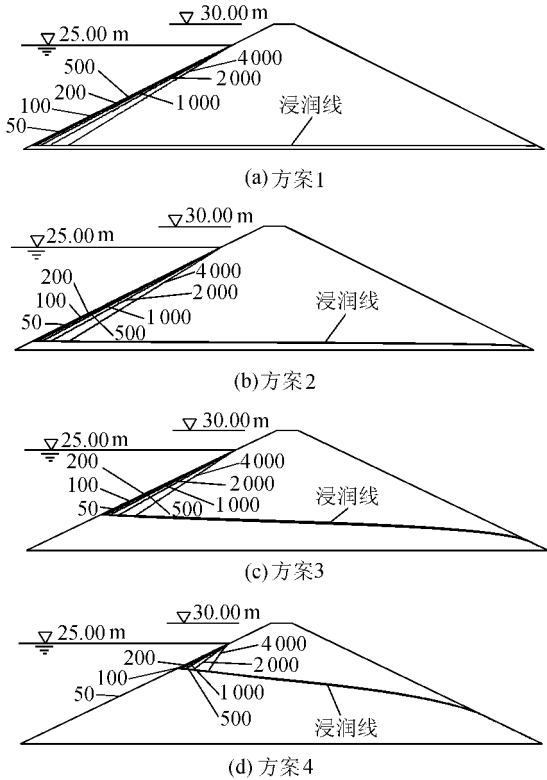


图 3 坝体浸润线分布规律

图 4 为 4 组计算方案膜后浸润线高度与 $k_{\text{坝}}/k_{\text{膜}}$ 的关系曲线,其中 $k_{\text{坝}}/k_{\text{膜}}$ 表示筑坝土石料渗透系数与土工膜的等效渗透系数的比值,用于反映两者渗透特性的差异程度,例如方案 1 中土工膜厚度放大 500 倍时的 $k_{\text{坝}}/k_{\text{膜}}$ 值与方案 2 中土工膜厚度放大 50 倍时的 $k_{\text{坝}}/k_{\text{膜}}$ 值相同,同为 200 000。由图 4 可见,膜后浸润线高度受土工膜厚度放大倍数的影响很小,不同方案之间浸润线高度却相差很大,说明坝内浸润线高度是受坝体材料渗透特性控制,而不是土工膜的渗透性能。

此外,对各组方案进行了完全饱和与饱和-非饱和渗流特性对比计算^[11],图 5 给出方案 4 两种渗流计算理论下的渗流量变化规律。由图 5 可见,采用饱和渗流理论与采用饱和-非饱和渗流理论计算所得的渗流量有一定差异。在相同土工膜厚度放大倍数下,饱和渗流理论得到的渗流量大于非饱和情况

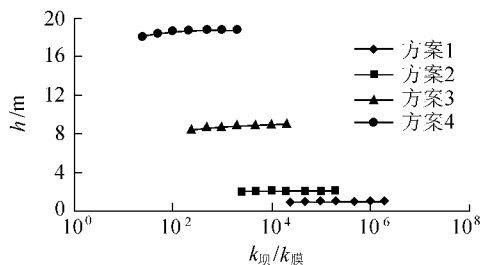


图4 膜后浸润线高度随 $k_{顶}/k_{膜}$ 的变化

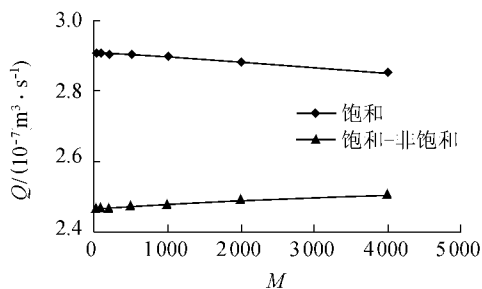


图5 不同计算理论下大坝渗流量与土工膜厚度放大倍数的关系

下的渗流量。饱和渗流计算结果中,渗流量随土工膜厚度放大倍数的增加而减小,而非饱和渗流计算结果中,渗流量随土工膜厚度放大倍数的增加而增加。随着放大倍数的增加,两者渗流量有趋近趋势。

4 结 论

a. 计算中将土工膜厚度放大处理后,不同放大倍数下浸润线在土工膜等效区有较大差别,在坝体部位分布很接近,包括膜后浸润线高度和逸出点高度。

b. 膜后坝体浸润线的高度主要受坝体土石料渗透特性控制,而不是土工膜的渗透性能,计算结果受土工膜厚度放大倍数影响不大。

c. 当坝体土石料渗透系数较大时,渗流量随土工膜厚度放大倍数的增加而减小;当坝体土石料的渗透系数较小时,大坝渗流量几乎不随土工膜厚度放大倍数变化。

d. 采用饱和渗流理论与饱和-非饱和渗流理论计算得到的坝内渗流场分布规律接近,同一土工膜厚度放大倍数下,饱和渗流理论计算得到的渗流量要比饱和-非饱和渗流理论计算得到的渗流量大。随着放大倍数的增加,两者有趋近趋势。

综上所述,在对(复合)土工膜防渗土石坝进行渗流有限元计算分析时,按流量等效的原则将土工膜厚度放大处理是可行的。根据计算成果的对比分析及考虑合理的大坝结构布局,建议土工膜的厚度放大以不超过2 m为宜。此外,本文的计算分析是基于坝面(复合)土工膜质量完好无损的理想情况,

不考虑施工不良等原因引起的集中缺陷渗漏。实际工程中,这些缺陷渗漏很难完全避免,需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1]《土工合成材料工程应用手册》编委会.土工合成材料工程应用手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000:118-127.
- [2]顾淦臣.复合土工膜或土工膜堤坝实例述评[J].水利水电技术,2003(12):26-32.
- [3]顾淦臣.复合土工膜或土工膜堤坝实例述评(续)[J].水利水电技术,2003(1):55-61.
- [4]顾淦臣.土工膜用于水库防渗工程的经验[J].水利水电科技进展,2009,29(6):34-38.
- [5]岑威钧,沈长松,童建文.深厚覆盖层上复合土工膜防渗堆石坝筑坝特性研究[J].岩土力学,2009,30(1):175-180.
- [6]程颢,王党在.复合土工膜土石坝渗流分析[J].水利与建筑工程学报,2005,3(1):41-44.
- [7]毛昶熙,段祥宝,李祖貽,等.渗流数值计算与程序应用[M].南京:河海大学出版社,1999:22-24.
- [8]沈振中,江沅,沈长松.复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟[J].水利学报,2009,40(9):1091-1095.
- [9]岑威钧,沈长松,李星,等.堤坝中防渗(复合)土工膜的布置型式及计算理论研究[J].红水河,2004,22(3):70-74.
- [10]介玉新,李广信.有限元计算中土工合成材料渗流问题的处理[J].水利水电科技进展,2009,29(6):42-43.
- [11]FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(8):521-532.

(收稿日期:2011-11-17 编辑:周红梅)

