

文章编号:0559-9350(2009)09-1091-05

复合土工膜缺陷渗漏试验的饱和-非饱和渗流有限元模拟

沈振中^{1,2}, 江 沅², 沈长松²

(1. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学 水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要:介绍了复合土工膜缺陷渗漏量室内物理模型试验以及缺陷渗漏量的经验拟合公式等成果。应用非稳定饱和-非饱和渗流理论和 Galerkin 有限元法, 建立了三维有限元数值计算模型, 对该试验进行数值模拟。根据物理模型试验试样的轴对称性, 选取中心角 10 度的试样建立精细三维有限元模型, 详细模拟了室内试验条件下不同压力水头作用的渗漏在砂土试样中变化情况, 并计算了渗漏达到稳定时的渗漏量。数值模型计算成果与物理模型试验结果变化规律一致, 论证了数值饱和-非饱和渗流方法可以较好地模拟复合土工膜缺陷渗流场, 并计算缺陷渗漏量。

关键词:复合土工膜; 缺陷渗漏量; 非稳定饱和-非饱和渗流; 数值模拟

中图分类号:TV139.1

文献标识码:A

复合土工膜防渗性能好、施工速度快, 经济性明显, 在水利工程建设中已越来越多地被采用。但复合土工膜易被刺破而产生缺陷, 且不易发现。根据国内外工程渗漏量实测数据的统计分析, 施工产生的缺陷约 4 000m² 出现一个^[1]。缺陷的尺寸一般用等效孔径表示, 其值约为 1~3mm。目前, 复合土工膜缺陷渗漏量较难计算, 其解析法计算十分复杂, 大多采用经验公式估算^[2-4]。但是, 该课题研究还处于发展初期, 现有的经验公式和理论分析结果尚不成熟。鉴于此, 也有根据工程的具体情况, 采用室内试验法对复合土工膜的缺陷渗漏量进行观测, 得到一定数量的试验观测值, 再经过理论分析, 推算出适于该工程的试验成果。但是室内试验法通常受到条件限制且耗时较多, 因此, 寻求一种可靠的数值模拟方法极为必要。目前, 还没有采用非稳定饱和-非饱和渗流来分析复合土工膜缺陷渗漏量的报道。这里引用某复合土工膜缺陷渗漏量室内物理模型试验^[1,5], 应用三维非稳定饱和-非饱和渗流有限元法, 建立数学模型, 对其试验模型进行计算分析, 模拟不同压力水头作用下复合土工膜破损后水流的渗漏发展过程, 计算稳定渗漏量, 以验证数值分析的合理性。计算证明, 采用三维非稳定饱和-非饱和渗流有限元法可以较好地模拟复合土工膜的缺陷渗流场, 为计算复合土工膜的缺陷渗漏量提供了新的有效途径。

1 非稳定饱和-非饱和渗流有限元法

1.1 非稳定饱和-非饱和渗流定解问题 忽略水的压缩性和空隙气体对水流运动的影响, 服从达西定律的非均质各向异性饱和-非饱和土的渗流基本微分方程为^[6]

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

式中: h_c 为压力水头; k_{ij}^s 为饱和渗透系数张量; k_r 为相对透水率, 为同一种土非饱和渗透系数与饱和渗透系数的比值, 在非饱和区 $0 < k_r < 1$, 在饱和区 $k_r = 1$; $C = \frac{\partial \theta}{\partial h}$ 为容水度, θ 为介质含水率, 在正压区 $C = 0$; β 为饱和-非饱和选择常数, 在非饱和区为 0, 在饱和区为 1; S_s 为弹性贮水率, 饱和土的 S_s 为常数,

收稿日期: 2008-05-16

基金项目: 国家科技支撑计划课题“基于风险的大坝安全评价技术开发”(2006BAC14B03)

作者简介: 沈振中(1968—), 男, 江苏吴江人, 博士, 教授, 主要从事水工结构和岩土工程的研究。E-mail: zhzhshen@hhu.edu.cn

在非饱和土中 $S_s=0$, 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; $i, j=3$ 为垂直坐标; t 为时间变量。

初始条件为

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

边界条件为

$$h_c(x_i, t) \Big|_{\Gamma_1} = h_{cl}(x_i, t) \quad (3)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{33}^s k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_2} = q_n \quad (4)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{33}^s k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_3} \geq 0 \text{ 且 } h_c \Big|_{\Gamma_3} = 0 \quad (5)$$

$$-\left[k_{ij}^s k_r(h_c) \frac{\partial h_c}{\partial x_j} + k_{33}^s k_r(h_c) \right] n_i \Big|_{\Gamma_4} = q_r(t) \quad (6)$$

式中: n_i 为边界外法线方向余弦; t_0 为初始时刻; h_{cl} 为已知水头; q_n 为已知流量; $q_r(t)$ 为降雨入渗流量; $h_c(t_0)$ 为初始时刻 t_0 的渗流场水头; Γ_1 为已知水头边界; Γ_2 为已知流量边界; Γ_3 为饱和逸出面边界; Γ_4 为降雨入渗边界。

1.2 有限元法 应用 Galerkin 加权余量法及格林第一公式, 可以导出以下有限元方程

$$[A]\{h_c\} + [B]\left\{\frac{\partial h_c}{\partial t}\right\} = [P] \quad (7)$$

对时间采用隐式有限差分格式, 即 $\frac{\partial h_c}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t}[(h_c)_{t+\Delta t} - (h_c)_t]$, 代入式(7)可得

$$\left([A] + \frac{1}{\Delta t}[B]\right)\{h_c\}_{t+\Delta t} = \{P\} + \frac{1}{\Delta t}[B]\{h_c\}_t \quad (8)$$

其中: $[A] = \sum_{e=1}^{NE} \left[N_e \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^3 k_r(h_c) k_{ij}^s \frac{\partial N_n}{\partial x_i} \frac{\partial N_m}{\partial x_j} d\Omega \right]$; $[B] = \sum_{e=1}^{NE} \left[N_e N_n N_m [C(h_c) + \beta S_s] d\Omega \right]$; $\{P\} = - \sum_{e=1}^{NE} \left[N_e \sum_{j=1}^3 k_r(h_c) k_{3j}^s \frac{\partial N}{\partial x_j} d\Omega \right] - \sum_{e=1}^{NE} \left[N_e N_n Q d\Omega + M_2 q_n N_n ds \right]$; NE 为单元总数; N_n 和 N_m 为单元结点 n 和 m 的形函数; t 为时间变量, Δt 为时间增量; $(h_c)_t$ 和 $(h_c)_{t+\Delta t}$ 分别为时刻 t 和 $t+\Delta t$ 时节点的压力水头; Ω 为计算空间域, s 为计算域边界。

式(8)即为非稳定饱和-非饱和渗流有限元法的基本方程^[7-10]。

2 复合土工膜缺陷渗漏试验

文献[1,5]报道了一复合土工膜缺陷渗漏的室内物理模型试验, 这里采用非稳定饱和-非饱和渗流有限元法对该试验进行数值模拟, 验证计算模型和渗流量的经验公式。详细的试验过程和成果可参见文献, 这里为了便于比较, 简要介绍试验的材料特性和装置要点。

2.1 试验材料 试验材料根据颗分曲线配制, 选中细砂和砂砾石两种土料。中细砂的颗分曲线如图1所示。中细砂的相对密度按0.7控制, 其中中细砂重度 $\gamma_s = 16 \text{ kN/m}^3$, 砂砾石重度 $\gamma_s = 20.5 \text{ kN/m}^3$ 。所选用的复合土工膜为某厂出产的 $300\text{g}/0.8\text{mm}/300\text{g}$ 。中细砂的渗透系数 $k_s = 0.88 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 。

2.2 试验模型及装置 试验前在选用的复合土工膜上钻好小孔(2mm)、中孔(5mm)和大孔(10mm)。根据试验

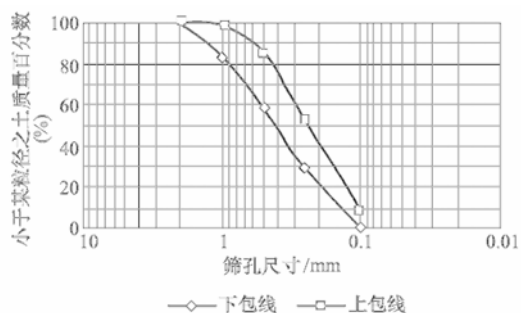


图1 中细砂颗分曲线

条件,复合土工膜上的作用水头采用分级加载法模拟,其压力水头分别为 1.0m、1.5m、2.0m、4.0m、5.0m、7.06m、10.0m。

试验装置的主体部分如图 2 所示。试验土料装在一个采用有机玻璃制作的圆筒中,该圆筒的内径为1 000mm,高1 020mm;圆筒壁上密集钻孔,孔径 $\Phi 2\text{mm}$,铅直方向间距为 80mm,水平方向间距为 50mm,以模拟自由出渗边界。压力水只能通过调压设备从图中箭头处流入该装置中。

试验土料采用分层夯击填实。先按照材料要求和圆筒的体积,配制好砂砾石、中细砂等试验土料,并分成五等份逐层夯实到规定的高度,保证土料的密度和颗分曲线符合要求。试验时必须采取有效措施,使得有压水只能经过复合土工膜的开孔才能渗入到试验土料中去。

3 复合土工膜缺陷渗漏试验的数值模拟

根据复合土工膜缺陷渗漏量室内物理模型试验的实际情况建立数学模型。实际的试验工况较多,数据量大^[1]。从试验结果来看,在孔口较大时试验结果规律性较差,且缺乏砂砾石土料相应的土水特性关系曲线,因此,这里仅详细模拟计算小孔(2mm)、中细砂垫层情况下各种不同压力水头作用的工况,分析复合土工膜破损条件下的水流从孔内渗漏的发展过程,并计算稳定渗漏量。试验土料中细砂的土水特性关系曲线用渗透系数相近的砂掺合料的土水特性关系来代替^[6]。体积含水率 θ 与负压 h 的关系,以及体积含水率与相对透水率 k_r 的关系如表 1 所示。考虑到试验装置具有轴对称性,取以圆筒中心(孔口)为中心轴、中心角 10° 的试样范围建立三维有限元模型,计算模型网格图如图 3 所示。不同压力水头作用下稳定期的剖面($Y=0$)压力水头等值线如图 4 所示,图中水平径向为 X 轴,垂直向为 Z 轴,左上角为压力水头作用点。试验结果与计算成果的比较如图 5 所示。

从计算过程来看,各时刻渗流场连续变化,没有出现振荡等现象,表明计算程序稳定性良好。如图 4 所示,稳定期剖面($Y=0$)的压力水头等值线均光滑平顺,图中各等值线清晰地表现了不同压力水头作用下复合土工膜破损孔口渗漏稳定时的饱和一非饱和渗流场。由于孔口面积较小,因此孔口附近土体饱和区很小,在试验开始时饱和区迅速增大。随着时间的增长,负压区的负压力逐渐减少,在垫层底部出现饱和区,饱和区逐渐增大,浸润面升高,经过一定时间后达到稳定。孔口附近土体坡降较大。

表 1 中细砂的土水特性关系

h/cm	-200.00	-100.00	-70.00	-50.00	-40.00	-35.00	-30.00	-25.00	-15.00	-13.00	0
k_r	0	0.0001	0.001	0.01	0.03	0.082	0.225	0.55	0.886	0.963	1
θ	0.028	0.062	0.100	0.150	0.175	0.201	0.225	0.255	0.288	0.300	0.35

孔口压力水头小于 2m 时,孔口附近饱和区很小,孔口压力水头大于 4m 时,孔口附近饱和区迅速增大。孔口附近饱和区和底部饱和区随着孔口压力水头的增加而逐渐增大。

稳定时,缺陷渗漏量的试验结果与计算成果变化规律基本一致,缺陷渗漏量的大小随着压力水头的增大而增大,但是没有呈线性关系,如图 5 所示。文献[1]利用此试验的大量数据,采用非线性回归拟合方法,得到了复合土工膜缺陷渗漏量试验的经验公式,即当试验土料为中细砂时

$$Q = 44 k H^{0.59} h^{-0.18} r^{0.84} \tag{9}$$

式中: Q 为缺陷渗漏量, m^3/s ; k 为试验筒内填料的渗透系数, m/s ; h 为复合土工膜至筒壁出水面的距离,

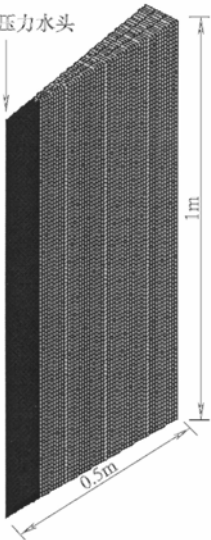
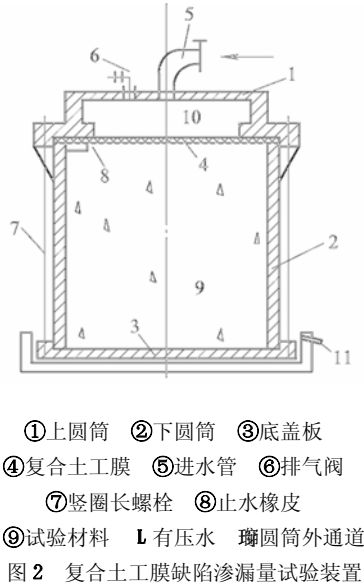


图 3 有限元模型网格

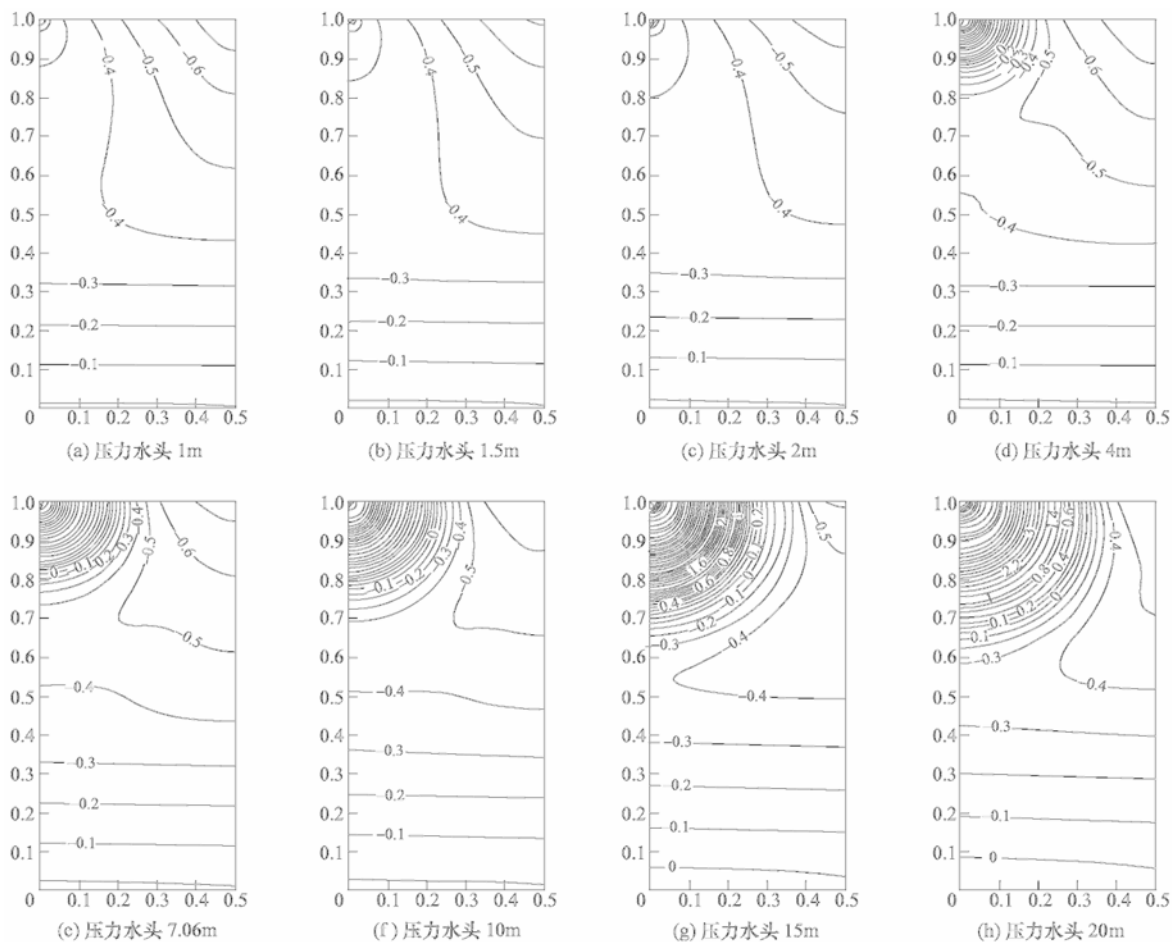


图4 小孔(2mm)不同压力水头作用下稳定期的渗流场(单位:m)

m ; H 为加载压力水头, m ; r 为缺陷孔半径, m 。

由图5可见,孔口压力水头较低时,试验结果、计算成果、拟合公式值三者基本一致,当孔口压力水头较高时,计算成果与拟合公式计算值偏差较大,但仍属同一数量级。说明这里采用三维非稳定饱和一非饱和渗流有限元法模拟复合土工膜缺陷渗漏试验的数值计算是可行的,拟合的经验公式是合理的,计算结果具有参考价值。

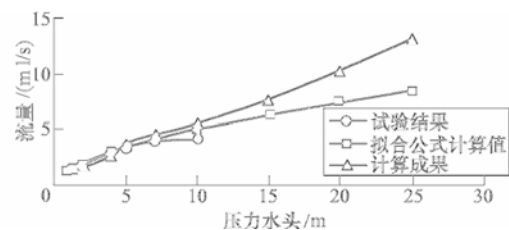


图5 小孔(2mm)中细砂垫层缺陷渗漏量

4 结语

(1)采用三维非稳定饱和一非饱和渗流有限元法,详细模拟了某复合土工膜缺陷渗漏量室内物理模型试验,分析了计算成果。计算的渗漏量与试验结果基本吻合;(2)计算中用砂掺合料的土水特性关系来代替中细砂的土水特性关系,两者差异较小,数值模拟的结果接近试验成果。但是在高压水头作用下孔口附近的流态可能与数值模型不一致,因此,数值计算成果与试验值偏差较大,该部分工况尚需进一步研究;(3)由于物理模型试验条件的限制,孔口高压水头的试验十分困难,在进一步研究砂砾石垫层料的缺陷渗漏模拟的基础上,采用三维非稳定饱和一非饱和渗流有限元法模拟复合土工膜缺陷渗漏的渗流场,并计算缺陷渗漏量,可以较好地弥补室内物理模型试验的不足,并可以获得较为准确的结果。该方法可为复合土工膜缺陷渗漏量的计算提供一种较为有效的路径,为设计和研究提供参考。

参 考 文 献:

- [1] 刘凤茹. 复合土工膜选型及缺陷渗漏量试验研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [2] 《土工合成材料工程应用手册》编写委员会. 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.
- [3] 吴景海, 陈环. 土工膜防渗层渗漏量的计算[J]. 岩土工程学报, 1995, 17(2): 93—99.
- [4] Giroud J P, et al. Rate of leakage through a composite liner due to geomembrane defects [J]. Geotextiles and Geomembranes, 1992, 11(1): 1—28.
- [5] 刘凤茹, 沈洪俊, 王铁强. 复合土工膜缺陷渗透量试验观测[J]. 南水北调与水利科技, 2004, 2(2): 49—51.
- [6] 毛昶熙. 渗流数值计算与程序应用[M]. 南京: 河海大学出版社, 1999.
- [7] 姜媛媛. 饱和-非饱和渗流影响下非连续性岩体边坡稳定分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [8] 沈振中, 林伟斌, 杨海林. 考虑降雨入渗的非连续性岩体边坡稳定分析[J]. 岩土力学, 2006, 27(S2): 269—274.
- [9] 吴梦喜, 高莲士. 饱和-非饱和土体非稳定数值分析[J]. 水利学报, 1999(12): 38—42.
- [10] 张培文, 刘德富, 黄达海, 等. 饱和-非饱和-非稳定渗流的数值模拟[J]. 岩土力学, 2003, 24(6): 927—930.

Numerical simulation of composite geomembrane defect leakage experiment based on saturated-unsaturated seepage theory

SHEN Zhen-zhong^{1,2}, JIANG Hang², SHEN Chang-song²

(1. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China;

2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A physical model experiment on composite geomembrane defect leakage was carried out. Based on the unsteady saturated-unsaturated seepage theory and Galerkin finite element method, a 3-D FEM calculation model for simulating the experiment was established. Since the physical model is axial symmetric, the seepage through the defect hole in a section of sand sample with central angle 10° was selected to carry out the FEM calculation. The seepage fields and the seepage fluxes under different water head when seepage flow reached the stable situation were obtained. The calculated leakage fluxes are in good agreement with the experimental results. It demonstrates that the numerical simulation approach is reliable.

Key words: composite geomembrane; defect leakage flux; unstable saturated-unsaturated seepage; numerical simulation

(责任编辑: 王冰伟)