

DOI: 10.11779/CJGE2016S2017

一个简化的土水特征曲面模型及其在非饱和渗流分析中的应用

王英男^{1, 2}, 陈曦¹, 王冬勇¹, 于玉贞³

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 中国土木工程集团有限公司, 北京 100038;

3. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084)

摘要: 土体变形对土水特征曲线 (SWCC) 的影响显著, 采用初始孔隙比作为变形指标, 利用 VJ Tech 固结仪对粉质砂土进行 SWCC 曲线的室内试验, 研究了不同初始孔隙比对 SWCC 的影响。试验结果表明: 不同初始孔隙比对 SWCC 的影响在低吸力范围比较显著, 在高吸力范围则不明显。通过将孔隙比引入到与进气值有关的模型参数中对 Fredlund-Xing 模型进行了修正, 建立了不同孔隙比影响下的基质吸力-含水率-孔隙比空间的土水特征曲面模型, 即 SWCS 数学模型, 并采用所提出的 SWCS 模型来预测土体变形后渗透系数的变化。采用所提出的 SWCS 模型分析了坝体心墙的压实程度对防渗效果的影响, 模拟结果表明: 当心墙的压实程度不同时, 同一时刻心墙截面的流量与主要受饱和渗透系数支配, 即与 $e^3/(1+e)$ 成正比。

关键词: 非饱和土; 土水特征曲线; 土体变形; VJ Tech 固结仪; 土水特征曲面 (SWCS) 模型

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2016)S2-0104-06

作者简介: 王英男 (1988-), 男, 硕士, 助理工程师, 从事非饱和土理论研究工作。E-mail: wangyingnan@ccecc.com.cn。

Simplified soil water characteristic surface (SWCS) model and its applications to seepage analysis of unsaturated soil

WANG Ying-nan^{1, 2}, CHEN Xi¹, WANG Dong-yong¹, YU Yu-zhen³

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. China Civil Engineering Construction Corporation,

Beijing 100038, China; 3. State Key Laboratory of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To study the effect of soil deformation, the soil-water characteristic curves (SWCC) are tested using VJ Tech consolidation apparatus with the initial void ratio taken as the deformation index. The test results show that in low suction range the effect of the initial void ratio on SWCC is significant, while in high suction range the effect is not remarkable. By introducing the void ratio into the model parameter related to the air entry value, a new soil-water characteristic surface (SWCS) model is proposed based on the Fredlund-Xing model so that the new model can be utilized to predict the varied coefficient of permeability during soil deformation. The new model is also applied to the seepage analysis of a soil dam with core wall, and it is found that for different degrees of compaction, the seepage flow flux is dependent on the saturated coefficient of permeability or is proportional to $e^3/(1+e)$.

Key words: unsaturated soil; soil-water characteristic curve; soil deformation; VJ Tech consolidation apparatus; soil-water characteristic surface (SWCS) model

0 引言

土水特征曲线 (SWCC) 描述了饱和度 S_r 、体积含水率 θ 或重力含水率 w 与基质吸力 ψ 之间的关系, 是非饱和土最重要的本构关系之一, 决定着非饱和土的体变、渗透系数、强度和应力等性状。影响非饱和土水特征曲线的因素很多, 其中土体变形对土水特征曲线的影响十分显著, 最早的研究可以追溯到 Croney 和 Coleman^[1]。Laliberte^[2]对不同孔隙率条件下土体的

持水性和非饱和渗透系数进行了试验研究。发现在较大的孔隙率变化范围内, 孔隙分布指数改变十分微小, 而进气值和渗透系数却可以有几个量级的变化。

关于土体变形对土水特征曲线影响方面的研究方法一般可分为4大类。第一类是经验公式法: 这种方法

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51379103); 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2016JBM043)

收稿日期: 2016-05-19

通过拟合手段得到含水率、基质吸力和孔隙比之间的经验关系, 如广西膨胀土^[3]、合肥膨胀土以及扰动黄土的研究^[4]。第二类为模型修正法: 该方法比较常见, 主要做法是在Brooks-Corey(BC)、van Genuchten(VG)等模型基础上通过引入孔隙比与模型参数间的关系来反映土水特征曲线随孔隙比的变化。Huang^[5]分析了Lalibert^[2]的试验规律, 认为土体进气值的对数与初始孔隙比呈线性关系, 并假设孔隙分布指数 λ 与孔隙比成线性关系, 在BC模型基础上进行修正, 得到了考虑孔隙比影响下的土水特征曲线模型, 然而这种方法只能用到如BC一类可显式表达进气值的模型。Gallipoli^[6]对VG模型进行了修正, 认为不同的干密度(本质上是孔隙比不同)对其他参数的影响不大因而可以忽略, 只对与进气值有关的参数 a 有较大的影响, 并认为 a 可以简化为孔隙比的幂函数, 即 $a=Ae^B$ 。第三类为图解法: 这种方法根据不同初始孔隙比的土水特征曲线形状变化趋势, 以一条土水特征曲线为基础采用图解手段来预测不同初始孔隙比的土水特征曲线^[7]。第四类为孔隙分布函数法: 这种方法通过假设变形后土体孔隙的分布函数由变形之前经过平移缩放而得, 通过对变形之后的孔隙分布函数进行积分来获得土水特征曲线^[8]。本文针对粉质砂土进行土水特征曲线试验获得土水特征曲线随孔隙比的变化规律。进而构建了土体变形条件下的土水特征曲面模型, 通过试验对比和数值应用验证了该模型具有较好的适用性。

1 土水特征曲线的试验研究

试验仪器采用北京交通大学的VJ Tech固结仪。土样为取自北京某建筑工地的粉质砂土, SWCC测试前对试验所用粉质砂土的基本物理指标进行了测定, 如表1所示, 其中实测最大干密度高于一般的粉质砂土。

表 1 土样基本物理参数

Table 1 Basic physical parameters of soil						
土体类别	土粒比重 G_s	最优含水率 /%	最大干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	砂粒含量 /%	粉粒含量 /%	黏粒含量 /%
粉质砂土	2.67	10	2.06	75	20.5	4.5

本次试验选用 3 种不同干密度的土样进行测试, 为了获得更大的孔隙比范围, 选择最优含水率下三种不同的干密度作为制样密度(见表 2)。由于土样粉土和黏土的比重为 25%, 为了得到较为完整的土水特征曲线, 选择进气值为 500 kPa 的陶土板进行土水特征曲线的测试。干密度确定之后, 孔隙比按下式计算:

$$e = G_s \cdot \rho_w / \rho_d - 1 \quad (1)$$

每级吸力平衡结束后可根据初始含水率和各级吸力下

的累积排水量计算出每级基质吸力所对应的平衡含水率, 进而获得如图 1 所示的土水特征曲线。由于砂土进气值较小, 为了使结果清晰, 选取了对数坐标, 并假设吸力为 1 kPa 时对应的土样为饱和状态, 体积含水率与孔隙率相等。如图 1 所示, 在小基质吸力范围内, 不同初始孔隙比的土水特征曲线差别比较大, 基质吸力相同时孔隙比大的试样体积含水率较高, 这种差别将随基质吸力的增加而减小, 当基质吸力超过某一临界值时(本次试验对应值约为 20 kPa), 不同初始孔隙比的土水特征曲线的差别已经很小, 可以近似认为重合, 土水特征曲线呈“扫帚型”分布^[7]。

表 2 试验方案

Table 2 Test schemes				
试样编号	初始含水率	制样干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	孔隙比	吸力加载等级 /kPa
1	10%	1.70	0.57	5、10、20、50、100、 150、250、350
2	10%	1.80	0.48	
3	10%	1.90	0.41	

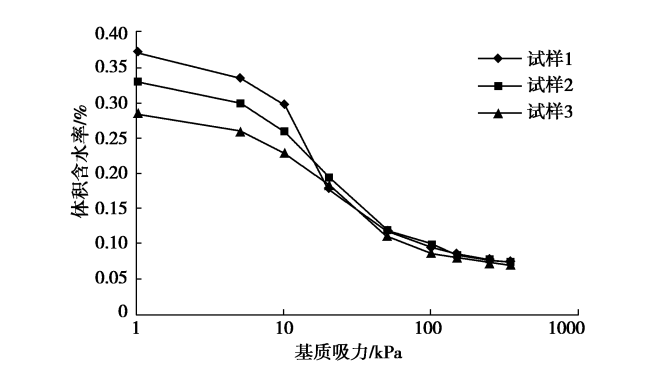


图 1 不同初始孔隙比的土水特征曲线
Fig. 1 SWCCs for different initial void ratios

2 土水特征曲面概念与模型

2.1 土水特征曲面模型

将土水特征曲面(Soil-Water Characteristic Surface或SWCS)定义为表达基质吸力、含水率与土水特征曲线影响因素之间关系的多维曲面。为了简化土水特征曲面模型的研究, 本文仅研究初始孔隙比的影响, 即一种狭义的基质吸力-含水率-孔隙比的三维空间曲面。以Fredlund-Xing(或FX)模型为基础, 修正得到初始孔隙比影响下的土水特征曲面:

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[2.718 + (\psi / a)^n \right] \right\}^m}, \quad (2)$$

式中 a, m, n 为拟合参数; $C(\psi)$ 为修正因子, 为确保基质吸力达到 10^6 kPa时体积含水率为0, 定义

$$C(\psi) = \left[1 - \ln(1 + \psi / \psi_r) / \ln(1 + 10^6 / \psi_r) \right] \quad (3)$$

根据Nuth和Laloui^[9]的假设, 由饱和度表达的不同

孔隙状态下的土水特征曲线都可以由某一个特定孔隙状态的土水特征曲线平移得到, 并且平移量和体应变有关。FX模型中参数 a 是和进气值有关的参数, 仅改变参数 a 时, 进气值改变而土水特征曲线的形状可近似认为不变, 符合上述Nuth和Laloui的假设, 如图2所示。

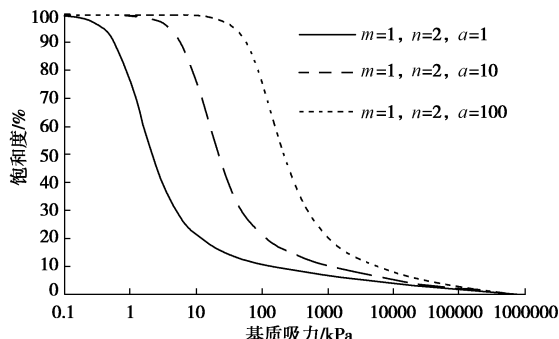


图2 参数 a 对土水特征曲线的影响

Fig. 2 Influence of parameter a on SWCC

当假设土水特征曲线的平移量与体变有关, 首先要得到体变与 FX 模型参数 a 之间的关系。Huang^[5]基于 Laliberte^[2]的试验结果, 发现孔隙比与进气值满足式(4)的关系, 并在试验中得到了验证, 如图3。

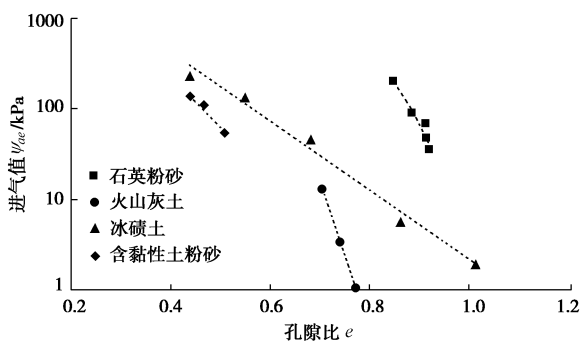


图3 不同土体进气值与孔隙比的关系^[10-13]

Fig. 3 Relationship between air entry value and void ratio

$$\log(\psi_{ae}) = \log(\psi_{ae_0}) + \lambda(e - e_0) \quad (4)$$

式中, ψ_{ae} 代表孔隙比为 e 时的进气值, ψ_{ae_0} 代表孔隙比为 e_0 时的进气值, λ 代表经验常数。FX 模型参数 a 与进气值有关, 但严格来讲 a 并不等于进气值 ψ_{ae} , 为此, 必须确定 a 与进气值的关系才能对 FX 模型进行修正。Tinjum^[14]研究了 VG 模型参数 a 与进气值的关系, 发现进气值与 a 成如下反比关系:

$$a = (0.78/\psi_{ae})^{-1.26} \quad (5)$$

根据 Tinjum 的结论, 本文将 FX 参数 a 与进气值泛化为如下的幂函数关系:

$$a = A \cdot (\psi_{ae})^B \quad (6)$$

式中, A 和 B 为经验常数。对应于孔隙比为 e 和 e_0 时, 式(6)可表示为

$$\left. \begin{aligned} a(e) &= A(\psi_{ae}(e))^B \\ a(e_0) &= A(\psi_{ae}(e_0))^B \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

结合式(7)中两式, 可得

$$a(e)/a(e_0) = (\psi_{ae}(e)/\psi_{ae}(e_0))^B \quad (8)$$

将式(4)带入式(8), 则有

$$a(e)/a(e_0) = 10^{B\lambda(e-e_0)} = 10^{\beta(e_0-e)} \quad (9)$$

式中, $\beta = B\lambda$, 为一新的经验常数。式(9)表明, FX 模型参数 a 与初始孔隙比在半对数空间成线性关系。将式(9)带入式(2)中, 可得修正的 FX 模型:

$$\theta = C(\psi) \frac{\theta_s}{\left\{ \ln \left[2.718 + (\psi/a(e_0) \cdot 10^{\beta(e_0-e)})^n \right] \right\}^m} \quad (10)$$

式(10)反映了不同初始孔隙比对土水特征曲线的影响, 对应了一种简化的基质吸力-含水率-初始孔隙比空间的土水特征曲面模型, 如图4所示。

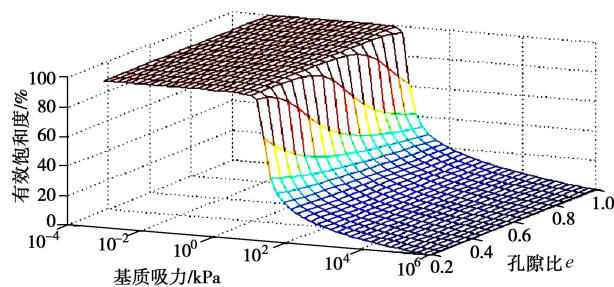


图4 初始孔隙比影响下的土水特征曲面模型

Fig. 4 SWCS model under influence of initial void ratio

显然, 式(10)提供了一种利用两条已知的初始孔隙比土水特征曲线去预测其它孔隙比条件下的土水特征曲线的方法。应用式(10)时应遵循以下步骤:

(1) 基于初始孔隙比为 e_0 的土水特征曲线用 FX 模型拟合, 获得模型参数 $a(e_0)$, m , n 。

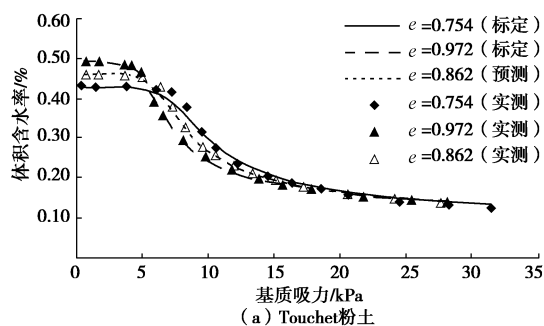
(2) 令 m , n 不变, 基于另一条初始孔隙比为 e 的土水特征曲线用 FX 模型拟合得到参数 $a(e)$ 。

(3) 利用式(9)求出参数 β 。

(4) 将 e_0 , $a(e_0)$, m , n , β 代入公式(10)来获得其它初始孔隙比的土水特征曲线(即 SWCS)。

2.2 模型验证

利用 Touchet 粉土、Columbia 砂质粉土、广西膨胀土、Adana 黏土、2号粉砂以及本次试验所用的粉质砂土对所提出的模型进行验证, 验证方案以及验证结果分别如表3和图5所示。由于篇幅所限, 图5仅列出其中三种。



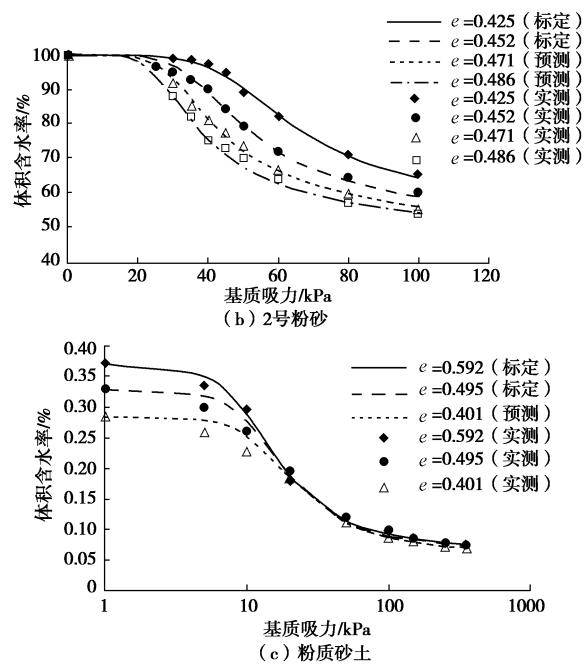


图 5 针对不同土的 SWCS 模型验证结果

Fig. 5 Validation results of SWCS model for different soils

表 3 本文提出的土水特征曲面模型的验证方案

Table 3 Verification schemes of SWCS model

土体名称	标定孔隙比		$a(e_0)$	$a(e)$	m	n	β
	e_0	e					
Touchet 粉土 ^[2]	0.972	0.754	5.44	7.87	0.54	5.98	0.74
Columbia 砂质壤土 ^[2]	1.193	0.984	3.38	4.97	0.56	6.94	0.81
广西膨胀土 ^[3]	0.753	0.901	193.7	112.2	1.31	1.37	1.60
Adana 黏土 ^[15]	0.250	0.176	369.8	621.4	0.89	1.09	2.63
2 号粉砂 ^[5]	0.425	0.452	47.55	36.81	0.29	5.88	4.12
粉质砂土	0.592	0.495	8.51	10.81	0.67	3.00	1.07

3 工程应用

3.1 预测土体变形后的渗透系数

土体发生变形会导致渗透系数发生相应的改变, 非饱和土渗透系数通常可由下式表示:

$$k(S_e) = k_s \cdot k_r(S_e) \quad , \quad (11)$$

式中 k 为非饱和土渗透系数; k_s 为饱和渗透系数; k_r 为相对渗透系数; S_e 为有效饱和度。Taylor^[16]曾给出土骨架变形条件下饱和土渗透系数经验公式:

$$k_s = A \frac{e^3}{1+e} \quad , \quad (12)$$

式中 $A = c\gamma_w / \mu$, c 为经验常数, γ_w 为水的重度, μ 为黏滞系数; e 为孔隙比。相对渗透系数可通过统计模型由土水特征曲线获得, 如 Mualem 模型:

$$k_r(S_e) = S_e^{1/2} \left(\int_0^{S_e} \psi^{-1} ds \bigg/ \int_0^1 \psi^{-1} ds \right)^2 \quad . \quad (13)$$

土体变形后渗透系数的改变可遵循如下步骤确定:

(1)测得孔隙比为 e_0 时对应的饱和渗透系数 k_{s0} , 然后通过式 (12) 计算出经验常数 A , 将 A 带回式 (12) 可以计算任意孔隙比的饱和渗透系数 $k_s(e)$ 。

(2)利用前述预测任意孔隙比下土水特征曲线的方法, 确定任意孔隙比的土水特征曲线, $S_e = S_e(\psi, e)$, 然后将 S_e 带入式 (13) 来确定相对渗透系数 $k_r = k_r(\psi, e)$ 。

(3) 将步 (1), (2) 的结果带入式 (11) 得 $k(\psi, e) = k_s(e) k_r(\psi, e)$ 。

3.2 心墙压实度对防渗效果影响的模拟

采用 Geostudio 软件模拟坝体心墙在不同压实程度下的防渗效果。由于是饱和-非饱和下的瞬态渗流分析, 需要采用孔隙比改变时的土水特征曲线和渗透系数函数。图 6 所示为土坝的几何尺寸, 两侧填料为粗粒土, 心墙为压实黏土, 大坝右侧坝趾处 12 m 范围内为滤水层, 左侧为水位上游, 水位在 6 个月内由 0 m 升至 10 m, 并维持在 10 m 水位处 5 年。图 7 为模型的有限元网格, 虚线为渗流量测定截面。

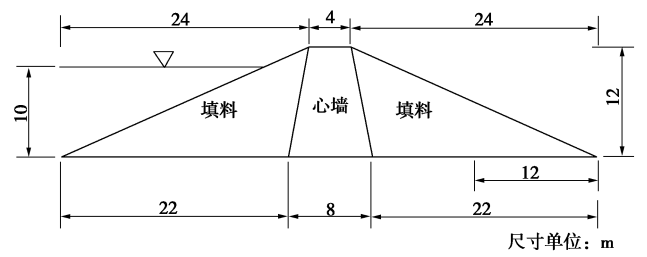


图 6 心墙坝体几何尺寸

Fig. 6 Geometry of core-wall dam

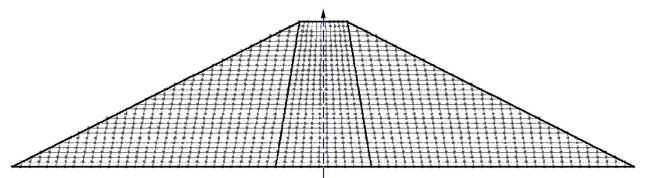


图 7 坝体的有限元网格

Fig. 7 Finite element mesh of core-wall dam

为了研究心墙压实程度对防渗效果的影响, 拟分析两方面内容: ①无心墙时的渗流场; ②具有不同压实程度 (不同孔隙比下) 的心墙条件下的渗流场, 并将心墙的孔隙比分为代表不同压实度的五个等级。

某坝体心墙实测孔隙比 $e=0.395$, 饱和渗透系数 $k_s=1.0 \times 10^{-10}$ cm/s, FX 模型参数为 $a=100$ kPa, $m=0.853$, $n=0.572$ 。仅出于演示目的, 根据前面提出的 SWCS 模型 (即式 (10)), 设经验系数 $\beta=2.0$, 可确定不同初始孔隙比的土水特征曲线。根据当前的饱和渗透系数可计算出式 (12) 的参数 $A=0.02$ m/d, 进而计算出不同初始孔隙比下的饱和渗透系数。假设初始孔隙比的级差为 0.2, 可以计算出不同初始孔隙比下的土水特征曲线和渗透系数函数, 将其作为参数输入到

Seep/W 模块进行计算，具体模型参数取值见表 4。

表 4 坝体材料参数

坝体材料	孔隙比	Fredlund-Xing 模型参数			k_s $/(m \cdot d^{-1})$	土体类别
		a/kPa	m	n		
填料	0.333	2.0	2.00	2.00	1.00	砂土
心墙 1	1.195	2.5			1.52×10^{-2}	
心墙 2	0.995	6.3			9.65×10^{-3}	
心墙 3	0.795	15.8	0.85	0.57	5.47×10^{-3}	黏土
心墙 4	0.595	39.8			2.58×10^{-3}	
心墙 5	0.395	100.0			8.63×10^{-4}	

初始水位位于坝体底面，初始吸力为高度的线性函数；坝体上游（左）坡面水位以下设置为总水头边界，并随时间而变，液面以上无渗流量，设置为 0 流量边界。由于滤水层或心墙的存在，坝体内浸润线一般不会与下游坡面交汇，即下游（右）坡面为无渗流量坡面，设置为 0 流量边界；假设坝体底面从左向右 0~40 m 范围为不透水层，设置为 0 流量边界，40~52 m 范围有滤水层（无水压力），将其设置为 0 压力边界；坝体顶面为无渗流量顶面，设置为 0 流量边界。

为了解防渗效果，分别研究无心墙、心墙材料为心墙 1 和心墙 5 三种工况在分别达到 10 m 蓄水位时和 5 年之后的渗流场。如图 8 所示，坝体内部浸润线上升滞后于水位的上升；由于心墙的存在，明显减缓了饱和区的发展速度，也相应地减少了渗流量；相比无心墙的情况，由于受心墙阻隔，左侧水流有向上攀升的趋势。由于渗流场在第 6 个月时没有发展完全，两种心墙的渗流场对比并不明显。蓄水位在 10 m 处维持 5 年后，坝体渗流已趋于稳定。由图 9 可知，心墙的存在极大地减少了饱和区的发展范围和渗流量；对比两种心墙所对应的渗流场可知，较密实心墙（图 9（c））内部浸润线下降的速度和程度都要比疏松心墙（图 9（b））对应的浸润线变化剧烈。

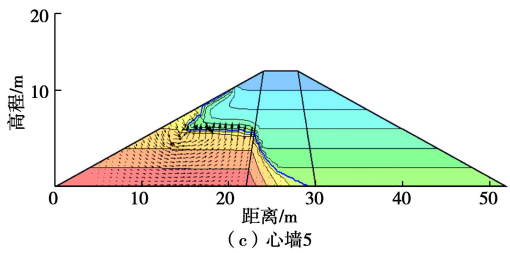
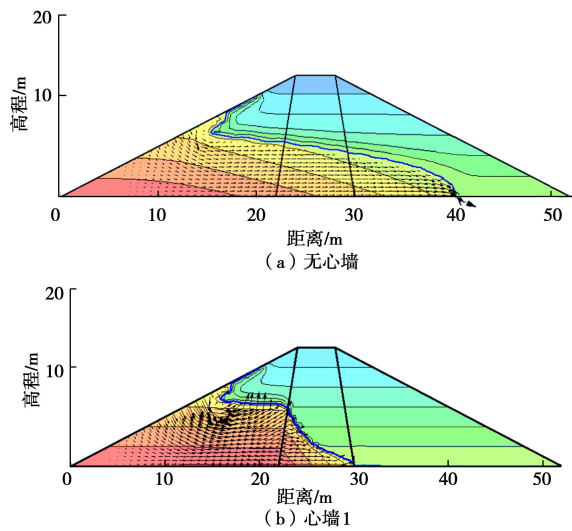


图 8 第 6 月的渗流场

Fig. 8 Seepage field at the 6th month

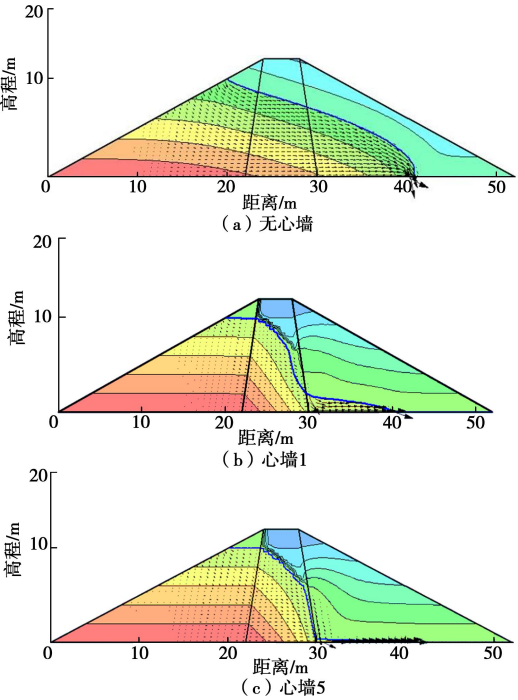


图 9 达到 10 m 蓄水位后第 5 年的渗流场

Fig. 9 Seepage fields at 5th year for water level of 10 m

为了研究心墙及其压实度对坝体防渗效果的影响，分析了图 7 虚线处截面在不同工况和时间节点下的渗流量变化。如图 10 所示，无心墙时，坝体截面渗流量在第 30 个月就可达到稳定，最终流量大约为 2 m³/d；有心墙时，渗流量都非常低。由表 4 可知，心墙和填料的渗透系数具有约两个数量级的差别。

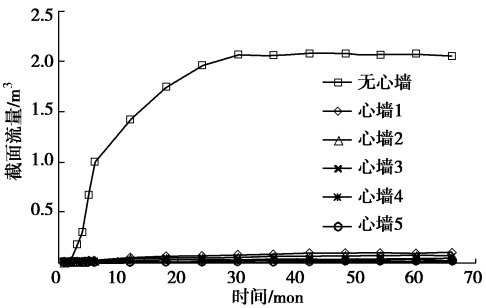


图 10 不同心墙压实度条件下指定截面的渗流量

Fig. 10 Seepage flow at specified section

取第 18 月、36 月、66 月的流量进行分析，发现同一时间截面渗流量与 $e^3/(1+e)$ 基本成线性关系，这与公式（12）所示的孔隙比和饱和渗透系数之间的关系相吻合，表明渗流量主要是由饱和和渗透系数所支配。

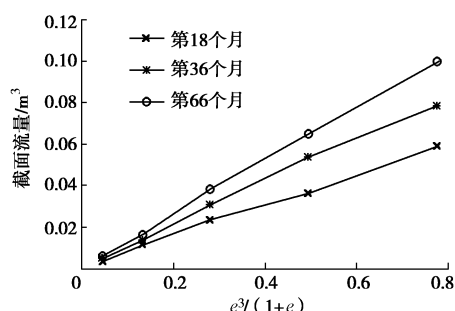


图 11 孔隙比与截面流量的关系

Fig. 11 Relationship between void ratio and sectional flow

4 结 论

具体研究结论如下:

(1) 土水特征曲线试验表明, 不同初始孔隙比对土水特征曲线的影响在低吸力范围比较明显, 在高吸力范围则不显著。

(2) 提出了土水特征曲面的概念, 通过修正 Fredlund-Xing 模型建立了土体变形影响下的土水特征曲面模型, 该模型可以看作是一种狭义的土水特征曲面模型, 为进一步发展广义土水特征曲面模型奠定了基础。

(3) 研究了不同心墙材料和压实程度对坝体防渗效果的影响。结果表明, 相比填料, 如果心墙渗透性很小, 继续增加压实程度对防渗效果的提升并不显著。因此, 在进行工程设计时, 应进行心墙压实度与造价的优化设计。当心墙的压实程度不同时, 同一时刻心墙截面的渗流量主要由心墙的饱和渗透系数支配。

参考文献:

- [1] CRONEY D, COLEMAN J D. Soil structure in relation to soil suction (pF)[J]. Journal of Soil Science, 1954, **5**(1): 75 - 84.
- [2] LALIBERTE G E. Properties of unsaturated porous media[D]. Fort Collins: Colorado State University, 1966.
- [3] MIAO L, JING F, HOUSTON S L. Soil-water characteristic curve of remolded expansive soils[C]// Unsaturated Soils 2006. ASCE, 2006: 997 - 1004.
- [4] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(1): 1 - 5. (WANG Tie-hang, LU Jing, YUE cai-kun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(1): 1 - 5. (in Chinese))
- [5] HUANG S, BARBOUR S L, FREDLUND D G. Development and verification of a coefficient of permeability function for a deformable unsaturated soil[J]. Canadian

Geotechnical Journal, 1998, **35**(3): 411 - 425.

- [6] GALLIPOLI D, WHEELER S J, KARSTUNEN M. Modelling the variation of degree of saturation in a deformable unsaturated soil[J]. Géotechnique, 2003, **53**(1): 105 - 112.
- [7] 陶高梁, 张季如, 庄心善, 等. 压缩变形影响下的土-水特征曲线及其简化表征方法[J]. 水利学报, 2014, **45**(10): 1239 - 1245. (TAO Gao-liang, ZHANG Ji-ru, ZHUANG Xin-shan, et al. Influence of compression on the soil-water characteristic curve and its simplified representation method[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, **45**(10): 1239 - 1245. (in Chinese))
- [8] 胡冉, 陈益峰, 周创兵. 基于孔隙分布的变形土土水特征曲线模型[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(8): 1451 - 1462. (HU Ran, CHEN Yi-feng, ZHOU Chuang-bing. A water retention curve model for deformable soils based on pore size distribution[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(8): 1451 - 1462. (in Chinese))
- [9] NUTH M, LALLOUI L. Advances in modelling hysteretic water retention curve in deformable soils[J]. Computers and Geotechnics, 2008, **35**(6): 835 - 844.
- [10] NG C W W, PANG Y W. Influence of stress state on soil-water characteristics and slope stability[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2000, **126**(2): 157 - 166.
- [11] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E. The influence of soil structure and stress history on the soil - water characteristics of a compacted till[J]. Géotechnique, 1999, **49**(2): 143 - 159.
- [12] SALAGER S, EL YOUSOUFI M S, SAIX C. Definition and experimental determination of a soil-water retention surface[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2010, **47**(6): 609 - 622.
- [13] CABARKAPA Z, CUCCOVILLO T. Automated triaxial apparatus for testing unsaturated soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, **29**(1): 21.
- [14] TINJUM J M, BENSON C H, BLOTZ L R. Soil-water characteristic curves for compacted clays[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, **123**(11): 1060 - 1069.
- [15] KAYADELEN C. The consolidation characteristics of an unsaturated compacted soil[J]. Environmental Geology, 2008, **54**(2): 325 - 334.
- [16] TAYLOR D W. Fundamentals of soil mechanics[J]. Soil Science, 1948, **66**(2): 161.

(责任编辑 明经平)