

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201700680

## 膨胀性土壤饱和水分运动参数计算模型

甘永德<sup>1</sup>, 刘欢<sup>2</sup>, 贾仰文<sup>2\*</sup>, 牛存稳<sup>2</sup>, 仇亚琴<sup>2</sup>, 魏娜<sup>3</sup>

(1.青海大学 省部共建三江源生态与高原农牧业国家重点实验室,青海 西宁 810016; 2.中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038; 3.西安理工大学 水利水电学院,陕西 西安 710048)

**摘要:**膨胀性土壤吸水膨胀变形,具有复杂的水文特性及力学性质,其分布范围广泛,对国民经济有着重大影响,开展膨胀性土壤水分运动研究具有重要的实际意义和理论意义。目前的土壤水分运动研究多针对非膨胀性土壤,相关研究成果不适用于描述膨胀性土壤水分运动过程。土壤膨胀变形主要是土壤膨胀力和自重应力综合作用的结果,土壤受力变形特征随土壤深度的变化而变化。为量化土壤膨胀变形对土壤水分运动参数的影响,采用土壤膨胀特征曲线和土壤应力-应变关系曲线建立包括饱和含水量、饱和导水系数、饱和比容等在内的膨胀性土壤饱和水分运动参数计算模型。以黄绵土和娄土为典型膨胀性土壤,基于室内试验开展不同厚度土壤饱和水分运动参数的测定,验证所提出的参数计算模型的适用性和可靠性。结果表明:土壤饱和水分运动参数的计算值与实测值间的相对误差均小于10%,Nash效率系数均大于0.85,均方根误差均小于0.07,说明该模型可以较好地模拟计算膨胀性土壤饱和水分运动参数。研究成果既丰富了土壤水分运动理论研究,也为膨胀性土壤水分的利用和管理提供参考。未来研究将深入探讨不同初始含水量和初始容重下,土壤自重应力和膨胀力对饱和水分运动的影响,以期进一步提高模型性能。

**关键词:**膨胀性土壤;土壤水分运动;饱和含水量;饱和导水率;饱和比容

中图分类号:TU43

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)02-0077-07

### Swelling Soil Saturated Water Movement Parameters Calculating Models

GAN Yongde<sup>1</sup>, LIU Huan<sup>2</sup>, JIA Yangwen<sup>2\*</sup>, NIU Cunwen<sup>2</sup>, QIU Yaqin<sup>2</sup>, WEI Na<sup>3</sup>

(1.State Key Lab. of Plateau Ecology and Agriculture,Qinghai Univ.,Xining 810016,China; 2.National Key Lab. of Basin Water Cycle Simulation and Control,China Inst. of Water Resources & Hydropower Research,Beijing 100038,China; 3.Inst.of Water Conservancy and Hydroelectric Power,Xi'an Univ.of Technol.,Xi'an 710048,China)

**Abstract:** The soil swelling deformation will happen when swelling soils absorb water. Swelling soils are widely distributed in the world, which have complex hydrological characteristics and mechanical properties, and have significant influence on the national economy. As the current research on soil water movement is mostly aimed at non-swelling soil, the related research results are not suitable for describing the process of swelling soil water movement. Consequently, it is of great practical and theoretical significance to carry out the study of swelling soil moisture movement. The soil swelling deformation is mainly the result of the combined effect of the soil swelling pressure and self-weight stress, and the stress and deformation characteristics of swelling soils vary with the soil depth. To quantify the effect of the soil swelling deformation on water movement parameters, the calculating models of parameters including saturated water content, saturated water conductivity and saturated ratio of volume were established by using soil swelling characteristic curve and soil stress-strain relationship curve. Then, Loessial soil and Lou soil were selected as typical swelling soils, and their saturated water movement parameters in different soil thickness were measured based on the indoor experiment, and the applicability and reliability of the parameters were verified. The results show that the relative error are less than 10%, RSME are less than 0.07, and Nash efficiency coefficient are larger than 0.85 between the observed and predicted values of the three parameters, which in-

收稿日期:2017-08-24

基金项目:“流域水循环模拟与调控”国家重点实验室自主研究课题资助项目(2016ZY03);国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB452701);国家自然科学基金资助项目(51379215; 51779272)

作者简介:甘永德(1985—),男,博士.研究方向:水文模型. E-mail: bjiangyd@163.com

\*通信联系人 E-mail: jiaYW@iwhr.com

网络出版时间:2018-03-19 10:31:18

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180319.1031.001.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

indicates that the calculating models can be applied to simulate swelling soil saturated water movement parameters. The results enrich the theoretical research of soil water movement, and provide reference for swelling soil water utilization and management. In future, to improve the performance of the model, the effect of the soil swelling pressure and self-weight stress on saturated water movement parameters under different initial water content and different initial bulk density needs to be explored.

**Key words:** swelling soils; soil water movement; soil saturated water content; soil saturated hydraulic conductivity; soil saturated ratio of volume

土壤饱和和水分运动参数与土壤水分运动过程紧密相关,对其准确的描述是进行流域水文过程模拟的关键,也可为农田灌溉、生态环境建设、建筑施工等提供重要参考。在开展刚性土壤水分运动过程研究方面,国内外学者做了大量室内和野外试验及相关理论研究,如Green<sup>[1]</sup>、Richards<sup>[2]</sup>、Philip<sup>[3]</sup>、Jia<sup>[4]</sup>、甘永德<sup>[5]</sup>等。然而,这些研究多针对非变形土壤,相关研究成果不适于描述膨胀性土壤水分运动过程。膨胀性土壤因具有吸水膨胀、失水收缩的性质而影响土壤孔隙的分布和水分运动过程。膨胀性土壤在世界范围内分布广泛,存在于40多个国家,遍及六大洲,中国也是世界上膨胀土分布最广、面积最大的国家之一。膨胀性土壤给当地的工程建设带来一系列问题,多年来一直是工程地质学、土力学、土壤学等学界重点关注的问题。膨胀变形主要与土壤初始干容重、初始含水量和上覆荷载有关,膨胀力和膨胀变形随土壤增湿程度增加而增加<sup>[6]</sup>。在吸水膨胀过程中,土壤膨胀变形多反映为垂直向上<sup>[7]</sup>。Garnier等<sup>[8]</sup>基于欧拉描述(ED)和拉格朗日描述(LD)模拟分析了变形土壤的水力传导率。McGarry等<sup>[9]</sup>提出用于描述土壤收缩特征变化的三直线模型。Tahasildar等<sup>[10]</sup>利用土壤水分特征曲线的斜率分析测定了土壤的膨胀性。Al-Yaqoub等<sup>[11]</sup>设计室内试验分析了润湿速率、润湿类型、附加压力和侧向约束对膨胀性土膨胀变形的影响。崔颖等<sup>[12]</sup>对压实膨胀性黏土水渗透系数进行量化。周葆春等<sup>[13]</sup>利用Fredlund-Xing模型分析了荆门膨胀性土壤的土-水特征曲线参数。Su<sup>[14]</sup>采用分数阶偏微分方程(fFPE)建立了降雨累积入渗方程,分析了水分在变形土壤中的运动。陈明霞等<sup>[15]</sup>从剖面形态、颗粒组成及水分物理性质等方面系统地揭示了漳州平原变性土的胀缩特征。曾志雄等<sup>[16]</sup>选取影响膨胀土胀缩等级分类的5个主要因素,建立膨胀土胀缩等级分类的遗传投影寻踪模型。土壤吸水膨胀变形主要受膨胀力和自重应力作用,其中膨胀力随土壤含水量变化而变化,自重应力随土壤深度变化而变化。随土壤深度的增加,土壤受力变形特征发生改变,引起土壤饱和含水量、饱和导水系数、饱和比容等参数变化。当前针对膨胀性土壤水分运动参数模型研究仍处于探索阶段,相关概念和理论尚不完善。

本文基于膨胀性土壤受力变形特征分析,提出考虑土壤膨胀变形的饱和和水分运动参数模型,包括土壤饱和含水量、饱和导水系数、饱和比容等参数计算模型;通过室内不同厚度土壤饱和和水分运动参数测定试验验证了该模型。相关研究有助于完善土壤水分运动理论,对膨胀性土壤水分管理与调控具有一定的指导价值。

## 1 膨胀性土壤饱和和水分运动参数模型

土壤吸水膨胀变形是土壤膨胀力和自重应力共同作用的结果,假设土壤膨胀变形是由土壤孔隙度的变化引起的,则当土壤饱和时,土壤膨胀力引起的孔隙度变化量可以表示为:

$$de_w = \Delta e_w = e - e_0 = 1 - \frac{\rho_{sw}}{\rho_d} - e_0 \quad (1)$$

式中: $\rho_d$ 为土粒密度,  $g/cm^3$ ;  $e_0$ 为土壤初始孔隙度;  $e_w$ 为由土壤吸水膨胀导致的孔隙度变化量;  $\rho_{sw}$ 为由土壤吸水膨胀导致的容重变化量,可以采用土壤膨胀特征曲线计算(三直线模型结构段<sup>[9]</sup>):

$$\rho_{sw} = \frac{1}{c + \alpha_3 U} \quad (2)$$

式中: $c$ 和 $\alpha_3$ 为三直线模型参数;  $U$ 为土壤质量含水量;  $\rho_{sw}$ 为由土壤膨胀导致的孔隙度变化量,  $g/cm^3$ 。

同理,土壤自重应力引起的孔隙度变化量可表示为:

$$de_p = \Delta e_p = e - e_0 = 1 - \frac{\rho_{sp}}{\rho_d} - e_0 \quad (3)$$

式中,  $e_p$ 为由土壤自重应力产生的孔隙度变化量,  $\rho_{sp}$ 为由土壤自重应力导致的容重变化量,可采用土壤应力-应变关系曲线计算<sup>[17]</sup>:

$$\rho_{sp} = A + B \ln(\gamma Z) \quad (4)$$

式中: $\gamma$ 为土壤湿比重,  $N/cm^3$ ;  $Z$ 为土壤深度,  $cm$ ;  $A$ 和 $B$ 均为参数;其他符号意义同前。

土壤膨胀变形是膨胀力和自重应力共同作用的结果,结合式(1)和(3),合力导致的土壤空隙变化量可以表示为:

$$\begin{cases} de = de_w + de_p = \Delta e_w + \Delta e_p, \\ de_w = \alpha dU, \\ de_p = \gamma \beta dZ \end{cases} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{de}{dU}, \beta = \frac{de}{d\sigma} = \frac{de}{\gamma dZ} \quad (6)$$

式中:  $e$ 为土壤孔隙度;  $e_w$ 为由土壤吸水膨胀导致的孔隙度变化量;  $e_p$ 为由土壤自重应力导致的孔隙度变化量;  $U$ 为土壤质量含水量;  $\alpha$ 为土壤膨胀特征曲线斜率;  $\beta$ 为土壤应力-应变关系曲线斜率;  $\gamma$ 为土壤湿比重,  $\text{N/cm}^3$ ;  $Z$ 为土壤深度,  $\text{cm}$ 。

### 1.1 土壤饱和含水量计算模型

当土壤饱和时,土壤孔隙被水分充满,即土壤饱和含水量等于孔隙度。根据式(5),土壤剖面饱和含水量总量可表示为:

$$\theta_T = \int_0^Z e dZ = \int_0^Z (e_0 + \Delta e_w + \Delta e_p) dZ = (2-e_0)Z - \frac{(A-B)Z}{\rho_d} - \frac{BZ \ln(\gamma Z)}{\rho_d} - \frac{Z}{\rho_d(c + \alpha_3 U)} \quad (7)$$

式中,  $\theta_T$ 为土壤深度 $Z$ 以上区域的饱和含水量,其他符号含义同前。

### 1.2 土壤饱和导水系数计算模型

受土壤孔隙度随土壤深度变化的影响,导致土壤非饱和导水系数随深度的变化而变化。根据式(5),改进Lambe模型<sup>[18]</sup>得到膨胀性土壤饱和导水系数模型:

$$K_s(e) = K_0 10^{m(e_z - e_0)} \quad (8)$$

$$e_z = 2 - e_0 - \frac{1}{\rho_d(c + \alpha_3 U)} - \frac{A + B \ln(\gamma Z)}{\rho_d} \quad (9)$$

式中:  $K_s(e)$ 为孔隙度为 $e_z$ 时土壤饱和导水系数,  $\text{cm/min}$ ;  $e_z$ 为土壤深度为 $Z$ 时土壤饱和膨胀变形后的孔隙度;  $K_0$ 为孔隙度为 $e_0$ 时土壤饱和导水系数,  $\text{cm/min}$ ;  $m$ 为与土壤孔隙度性质有关的参数。

### 1.3 土壤饱和比容计算模型

土壤容重在土壤膨胀力和自重应力的共同作用下随土壤深度的不同有所不同,其变化量可表示为:

$$d\rho_s = d\rho_{sw} + d\rho_{sp} \quad (10)$$

则在某一土壤深度下:

$$\begin{cases} \rho_s = \rho_{s0} + d\rho_s = \rho_{s0} + d\rho_{sw} + d\rho_{sp}, \\ v = \frac{1}{\rho_s} = \frac{1}{\rho_{s0} + d\rho_{sw} + d\rho_{sp}} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $v$ 为土壤饱和比容,  $\text{cm}^3/\text{g}$ ;  $\rho_s$ 为土壤容重,  $\text{g/cm}^3$ ;  $\rho_{sw}$ 为由土壤吸水膨胀导致的容重变化量,可采用三直线模型计算<sup>[9]</sup>;  $\rho_{sp}$ 为由土壤自重应力导致的容重变化量,可采用应力-应变关系曲线计算<sup>[17]</sup>;  $\rho_{s0}$ 为初始土壤容重,  $\text{g/cm}^3$ 。

## 2 模型验证

### 2.1 材料与方法

黄土具有膨胀性<sup>[19-21]</sup>,但不同黄土的膨胀性与其黏土矿物成分有关。黄绵土和娄土作为典型黄土,

其膨胀性有所差别。其中黄绵土的黏土矿物成分以伊利石和绿泥石为主,黏粒含量为17.69%,属粉质砂壤土;娄土的黏土矿物成分以伊利石和蛭石为主,黏粒比例为45.47%,属粉质黏壤土。由于娄土中膨胀性矿物成分含量较高,蛭石的吸水膨胀性较强,娄土的膨胀性要高于黄绵土<sup>[22]</sup>。这一结果也得到了黄传琴等<sup>[19]</sup>的试验验证。以黄绵土和娄土作为试验土体,进行土壤膨胀性对土壤饱和和水分运动参数影响试验,两种土壤的基本物理性质见表1。

表1 土壤基本物理性质

Tab.1 Basic physical properties of soils

土壤种类	粒级分布/%			干容重/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	土密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	饱和导水系数/ ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
	>50 $\mu\text{m}$	2~50 $\mu\text{m}$	<2 $\mu\text{m}$			
黄绵土	3.50	52.00	44.5	1.40	2.628	0.014
娄土	31.3	46.20	22.5	1.40	2.669	0.017

由于试验中无法直接得到不同土壤深度下的水分运动参数,考虑设置一组由小到大的土壤厚度序列,通过测定每一土壤厚度下的饱和和水分运动参数,近似计算不同土壤深度的饱和和水分运动参数。其中,饱和含水量和饱和比容采用质量守恒定理计算;饱和导水系数采用通量相等原理计算,即调和平均数计算。每种土壤设置14个厚度处理,分别为2、4、6、8、10、15、20、25、30、35、40、45、50、55  $\text{cm}$ 。整个试验过程设置3个重复。

土壤膨胀变形主要受土壤膨胀力和自重应力影响,土壤膨胀力和自重应力均与土壤初始容重、初始含水量有关。为便于对比分析,试验只考虑相同初始含水量(烘干土)和相同初始容重下( $1.4 \text{ g/cm}^3$ ),土壤自重应力和膨胀力对土壤饱和和水分运动参数的影响。试验时将经碾压、过筛(2  $\text{mm}$ )、烘干的土样,按一定容重( $1.4 \text{ g/cm}^3$ )分层均匀装入直径为10  $\text{cm}$ 的土柱中(图1)。

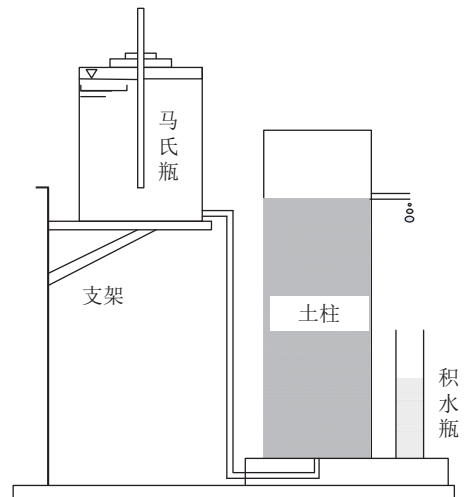


图1 原状土饱和导水率试验装置

Fig.1 Schematic representation of the experimental setup

然后将土柱下口与带有出水口的PVC板焊接在仪器上,且保证焊接处不漏水。PVC底板由上、下底板构成,中间由直径10 cm的圆弧连接(壁厚为0.5 cm);上底板布满约1 mm的圆孔,起到支撑土壤及导流的作用;下底板上表面下凹,下表面水平,中心连接有直径约1 cm的软管,以便收集出流。试验进行前,打开阀门,用马氏瓶从PVC底板出水口处向土柱供水(发泡点水头与土面齐平),待土柱达到饱和,且其膨胀量达到相应含水量最大膨胀量后(土柱饱和后,连续测定土柱深度,平均2 d/次,当连续5次测定深度不变时,认为土壤膨胀量达到了最大),采用称重法测定饱和含水量,采用定水头法(厚度为2 cm的土柱水头为2 cm, 4、6、8、10 cm的土柱积水深度为4 cm, 15、20、25、30、35、40、45、50、55 cm的土柱水头为10 cm)测定饱和导水系数,采用游标卡尺测量土面变化量

表 2 三直线模型拟合参数

Tab.2 Fitted parameters of the three straight-line model

土壤种类	$a$	$\alpha_1$	$R^2$	$b$	$\alpha_2$	$R^2$	$c$	$\alpha_3$	$R^2$	$U_A$	$U_B$	$U_S$
黄绵土	0.7	0.05	0.95	0.62	0.39	0.96	0.73	0.03	0.89	0.24	0.32	0.34
娄土	0.61	0.21	0.99	0.55	0.62	0.92	0.63	0.38	0.97	0.18	0.25	0.33

采用恒压法(图2)测定土壤应力-应变关系曲线。

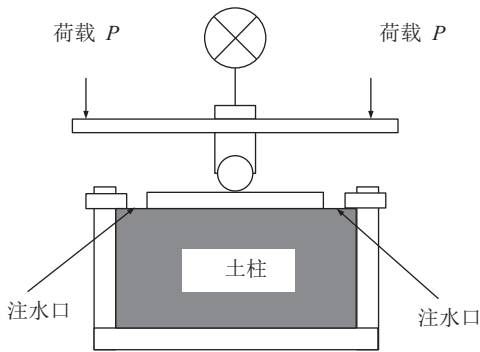


图 2 土壤应力-应变关系测定装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of measuring device of soil stress-strain relationship curve

由于降雨影响土柱深度较小(小于1 m),自重应力不超过25 kPa,因此恒定压力取值范围为0~25 kPa。采用对数函数<sup>[17]</sup>进行拟合:

$$\begin{cases} \rho_s = A + B \ln p, \\ p = \gamma Z \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\rho_s$ 为土壤容重,  $g/cm^3$ ;  $p$ 为应力,  $N/cm^2$ ;  $\gamma$ 为土壤湿比重,  $N/cm^3$ ;  $Z$ 为土壤深度,  $cm$ ;  $A$ 和 $B$ 为参数, 参见表3。

表 3 土壤应力-应变关系曲线

Tab.3 Soil stress-strain relationship curve

土壤种类	$A$	$B$	$R^2$
黄绵土	1.093	0.104 4	0.99
娄土	1.023	0.121 6	0.99

测定土壤膨胀量。测定土壤饱和含水量时,为防止土柱漏水,关闭阀门,然后将整个土柱取出,测定整个土柱重量。为便于计算,试验开展前,预先测定好土柱重量、PVC上下底板重量等各部件重量,以及上下底板储水量。

为便于分析饱和水分运动参数,采用比重瓶法测定土密度。土壤膨胀特征曲线采用游标卡尺法测定<sup>[19]</sup>,并采用三直线模型<sup>[9]</sup>进行拟合:

$$\begin{cases} v = a + \alpha_1 U, & 0 < U < U_A; \\ v = b + \alpha_2 U, & U_A < U < U_B; \\ v = c + \alpha_3 U, & U_B < U < U_S \end{cases} \quad (12)$$

式中: $v$ 为比容积,为土壤容重的倒数,  $cm^3/g$ ;  $U$ 为质量含水量,  $g$ ;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 为土壤膨胀特征曲线斜率;  $U_A$ 、 $U_B$ 、 $U_S$ 分别为拐点处质量含水量;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 为参数。各变量值见表2。

采用恒体积法(图3)测定容重-饱和导水系数关系曲线(容重分别为1.1、1.2、1.3、1.4、1.5  $g/cm^3$ ),采用Lambe模型<sup>[17]</sup>进行拟合:

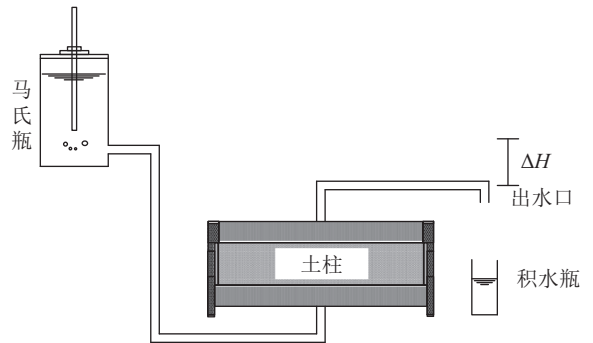


图 3 恒体积法测定土壤导水系数装置

Fig.3 Schematic diagram of measuring device of soil hydraulic conductivity

$$K_{se} = K_0 10^{m(e-e_0)} \quad (14)$$

式中: $K_{se}$ 为孔隙度为 $e$ 时的土壤饱和导水系数,  $cm/min$ ;  $e$ 为孔隙度;  $K_0$ 为孔隙度为 $e_0$ 时的土壤饱和导水系数,  $cm/min$ ;  $m$ 为参数。各参数取值见表4。

表 4 Lambe模型拟合参数

Tab.4 Fitted parameters of the Lambe model

土壤种类	饱和导水系数/ $(cm \cdot min^{-1})$	$m$	$R^2$
黄绵土	0.014	6.18	0.97
娄土	0.017	12.20	0.98

另外,为便于对比分析膨胀与非膨胀条件下土壤孔隙度变化量,测定厚2 cm的土柱在非膨胀条件

下的孔隙度(将土柱采用食用油饱和)和膨胀条件下的土壤孔隙度(将土柱采用纯净水饱和),饱和过程同前。表5为土壤膨胀和非膨胀条件下孔隙度变化统计。

表5 膨胀和非膨胀条件下土壤孔隙度变化统计

Tab.5 Statistical changes of soil porosity under the expansive and non expansive conditions

土壤种类	非膨胀孔隙度	膨胀孔隙度	变化率/%
黄绵土	0.41	0.50	21.95
娄土	0.42	0.52	23.80

由表5可知,娄土和黄绵土均具有膨胀性,土壤吸水膨胀,体积增大。娄土膨胀性大于黄绵土,其原因在于黄土含有蒙脱石、蛭石等膨胀性黏土矿物,土壤吸水膨胀,导致土壤体积增大,孔隙度增大。同时,娄土黏粒含量较高,相应的膨胀性矿物成分含量更高。吸水膨胀性的差异使得相同土壤深度下两种土壤的土壤膨胀力和自重应力也不相同,娄土的膨胀孔隙度要大于黄绵土。

## 2.2 模型参数

计算膨胀性土壤饱和含水量和饱和比容积时,

表6 膨胀性土壤饱和水分运动参数计算模型输入参数

Tab.6 Input parameters of swelling soil saturated water movement parameters calculating models

土壤种类	$c$	$\alpha_3$	$U_s$	$A$	$B$	$m$	$\rho_d(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$\gamma(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$K_0(\text{cm}\cdot\text{min}^{-1})$
黄绵土	0.73	0.03	0.34	1.093	0.104	6.18	2.669	1.87	0.014
娄土	0.63	0.38	0.33	1.023	0.121	12.2	2.628	1.87	0.017

## 3 结果与讨论

通过计算,得到黄绵土和娄土的土壤饱和和水分运动参数实测值与计算值间的相对误差(ARE)、Nash效率系数和均方根误差(RMSE),见表7。由表7可知,3个参数的计算值与实测值之间相对误差小于10%,Nash效率系数大于0.85,均方根误差小于0.07;结合图4~6,认为模型计算值与实测值比较吻合,说明该计算模型能较好地估计膨胀性土壤的饱和含水量、饱和导水系数和饱和比容积。

表7 参数实测值与计算值间相对误差(ARE)、Nash效率系数和均方根误差(RMSE)

Tab.7 Relative error (ARE), root mean square error (ARE) and Nash efficiency coefficient between the observed and predicted values of the parameters

土壤种类	饱和和水分特征参数	ARE/%	Nash效率系数	RMSE
娄土	饱和导水系数	-7.61	0.96	0.001
	饱和含水量	-0.57	0.95	0.006
	饱和比容积	9.12	0.86	0.070
黄绵土	饱和导水系数	3.05	0.94	0.001
	饱和含水量	3.21	0.93	0.030
	饱和比容积	5.55	0.97	0.041

需要测定土壤膨胀性特征曲线和应力-应变关系曲线,以及土密度、湿容重等。计算膨胀性土壤饱和和导水系数时,需要额外测定初始孔隙度所对应的导水系数,以及与孔隙度相关的参数 $m$ 。土壤饱和含水量和饱和比容积计算中,土壤膨胀特征曲线和应力-应变关系曲线均采用测定曲线,土密度采用测定值,湿容重采用装填容重对应土壤饱和后的湿容重代替;饱和和导水系数计算中, $K_0$ 采用恒体积法测定值, $m$ 采用拟合值。

基于土壤膨胀特征曲线、应力-应变关系曲线,以及土密度、湿容重 $\gamma$ 、 $K_0$ 和 $m$ 的测定结果(表6),将膨胀性土壤水分运动参数计算模型应用于计算黄绵土和娄土在不同土壤深度下的土壤饱和含水量、饱和导水系数和饱和比容积值,通过加权平均计算得到各土壤厚度的土壤饱和含水量和饱和比容积,与相应土壤厚度的实测结果进行对比;采用Nash效率系数、均方根误差RMSE和相对误差ARE判断模型的效果和精度。

### 3.1 土壤饱和含水量随土壤厚度变化关系分析

不同厚度下的土壤饱和含水量变化情况如图4所示。由图4可知,土壤饱和含水量随土壤厚度的增大而呈减小趋势。黄绵土和娄土均属膨胀性土壤,其吸水膨胀变形过程是土壤膨胀力和自重应力共同作用的结果。随着土壤深度的增大,自重应力越来越大,其作用也越来越大,导致土壤容重随土壤深度增大而增大。因此,随着土壤深度增加,土壤容重增大,造成土壤孔隙度减小,进而使得土壤饱和含水量随土壤深度的增大而减小,导致土壤厚度越大,土壤饱和含水量越小。

### 3.2 土壤饱和导水系数随土壤深度变化关系分析

不同深度下的土壤饱和导水系数变化情况见图5。由图5可知,土壤饱和导水系数随土壤深度增大而减小。这是由于随着土壤深度的增大,土壤孔隙度逐渐变小,导致土壤饱和导水系数越来越小。

### 3.3 土壤饱和比容积随土壤厚度变化关系分析

不同土壤厚度下的土壤饱和比容积变化情况如图6所示。由图6可知,土壤饱和比容积随土壤厚度增大而减小,也即土壤容重随着深度的增大而增大。这与前文针对土壤饱和含水量和饱和导水系数的分析结果是一致的,符合实际情况。

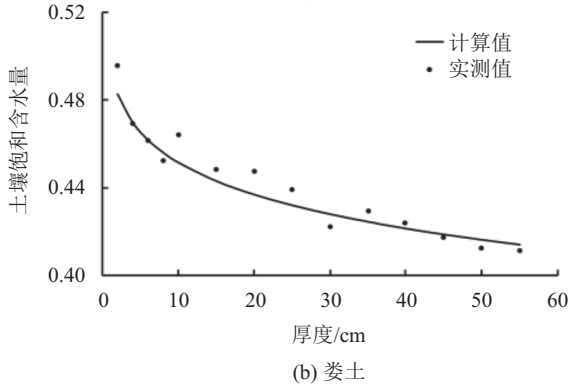
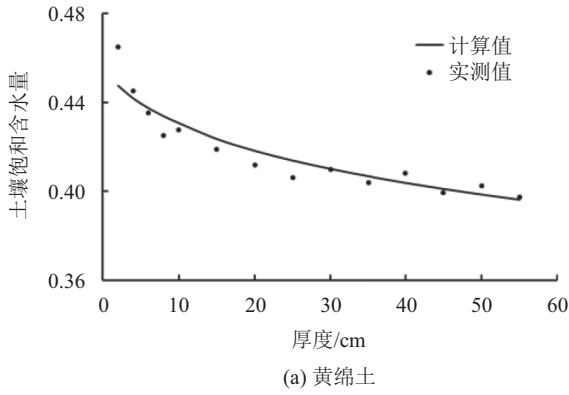


图 4 土壤饱和含水量随土壤厚度变化关系

Fig.4 Changes in soil saturated water content with soil thickness

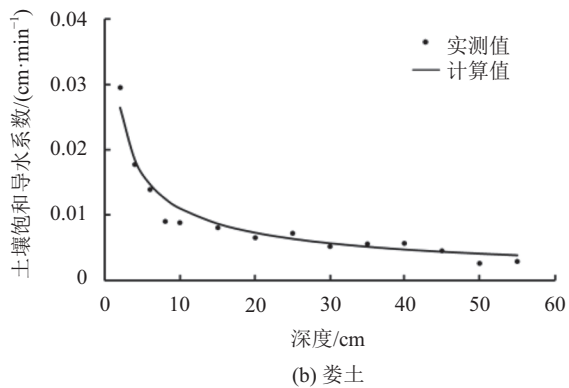
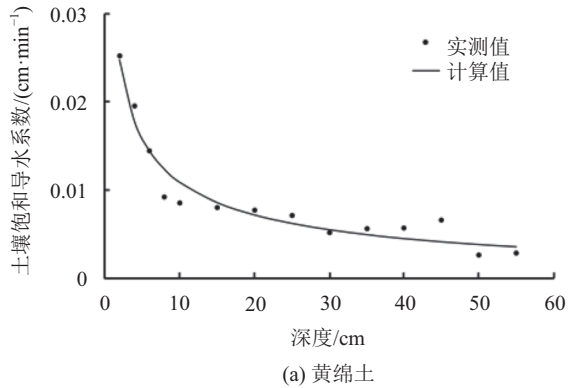


图 5 土壤饱和导水系数随土壤深度变化关系

Fig.5 Changes in soil saturated hydraulic conductivity with soil depth

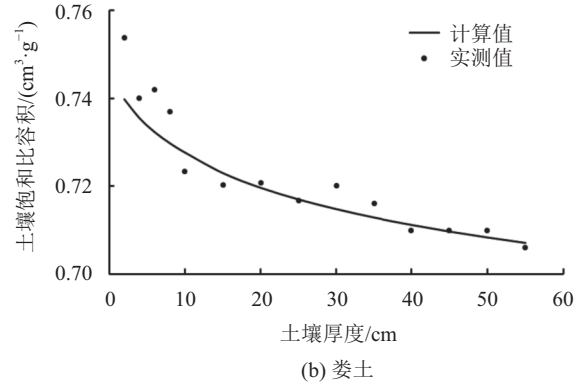
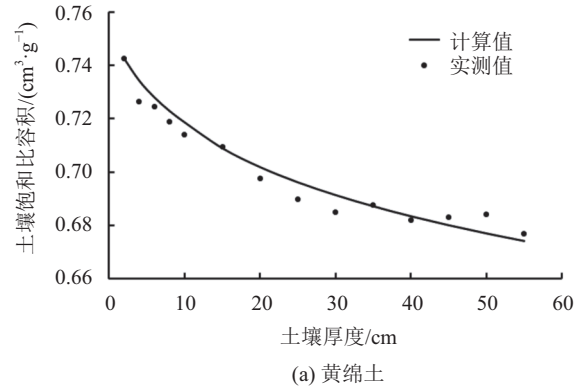


图 6 土壤饱和比容积随土壤厚度变化关系

Fig.6 Changes in soil saturated ratio of volume with soil thickness

## 4 结论与讨论

相较于非膨胀性土壤,膨胀性土壤中含有蒙脱石、蛭石等膨胀性矿物成分。这些矿物成分吸水膨胀引起土体发生变形,土体内孔隙结构随土壤含水量变化而变化。在此过程中,土壤将受到膨胀力和自重应力的共同作用。当自重应力较小时,土壤在膨胀力作用下,土壤体积增大,导致土壤孔隙度增大,饱和含水量增大,饱和比容积增大,饱和导水系数增大;随着深度的增大,自重应力增大,导致土壤孔隙度减小,饱和含水量减小,饱和比容积减小,饱和导水系数减小。

分析膨胀性土壤的受力变形特征,采用土壤膨胀特征曲线和土壤应力-应变关系曲线,提出包含饱和含水量、饱和导水系数和饱和比容积在内的膨胀性土壤饱和和水分运动参数计算模型。选择黄绵土和娄土作为典型膨胀性土壤开展室内试验,模拟计算两种土壤的饱和含水量、饱和导水系数和饱和比容积,并与参数实测值比较分析,验证模型可靠性和适用性。结果表明:该模型结果与实际吻合,能够用于膨胀性土壤饱和和水分运动参数计算。研究结果既丰富了土壤水分运动的理论研究,又可为更高效地利用和管理土壤水分提供参考。

本文分析了相同含水量和相同容重下,土壤自重应力和膨胀力对土壤饱和水分运动参数的影响,但尚未深入探讨不同初始含水量、不同初始容重下,土壤自重应力和膨胀力对饱和水分运动的影响。因此未来模型需进一步采用野外原状土进行试验验证,提高模型适用性。

#### 参考文献:

- [1] Green W H,Ampt G A.Studies on soil physics:Part I—The flow of air and water through soils[J].The Journal of Agricultural Science,1911,4(1):1–24.
- [2] Richards L A.Capillary conduction of liquids through porous mediums[J].Journal of Applied Physics,1931,1(5): 318–333.
- [3] Philip J R.Theory of infiltration[J].Advances in Hydrosceince,1969,5:215–296.
- [4] Jia Y W,Tamai N.Modeling infiltration into a multi-layered soil during an unsteady rain[J].Journal of Hydrosceince and Hydraulic Engineering,1998,16:1–10.
- [5] Gan Yongde,Jia Yangwen,Liu Huan,et al.Infiltration-runoff model affected by air resistance for layered soil during unsteady rainfall[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2017,48(8):933–944.[甘永德,贾仰文,刘欢,等.空气阻力影响下的分层土壤非稳定降雨入渗产流模型[J].水利学报,2017,48(8):933–944.]
- [6] Ding Zhenzhou,Li Lisheng,Zheng Yingren.Deformation of expansive soils due to moistening and its formula[J].Journal of Geotechnical Investigation & Surveying,2006(7): 13–16.[丁振洲,李利晟,郑颖人.膨胀土增湿变形规律及计算公式[J].工程勘察,2006(7):13–16.]
- [7] Long Anbao.On the stress-strain appearance of expansibility clay when expand-shrink transform[J].Building Science Research of Sichuan,2003,29(4):49–52.[龙安宝.浅论膨胀土在胀缩变形过程中的应力应变状态[J].四川建筑科学研究,2003,29(4):49–52.]
- [8] Garnier P,Perrier E,Jaramillo R A,et al.Numerical model of 3-dimensional anisotropic deformation and 1-dimensional water flow in swelling soils[J].Soil Science,1997,162(6): 410–420.
- [9] McGarry D,Malfant K W J.The analysis of volume change in unconfined units of soil[J].Soil Science Society of America Journal,1987,51(2):290–297.
- [10] Tahasildar J,Rao B H.Determination of swelling characteristics using soil water characteristic curve parameter[J].Indian Geotechnical Journal,2016,46(3):319–326.
- [11] Al-Yaqoub T H,Parol J,Znidarcic D.Experimental investigation of volume change behavior of swelling soil[J].Applied Clay Science,2017,137:22–29.
- [12] Cui Ying,Miao Linchang.Testing study of permeability characteristics of unsaturated compacted expansive soils[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(7):2007–2012.[崔颖,缪林昌.非饱和压实膨胀土渗透特性的试验研究[J].岩土力学,2011,32(7):2007–2012.]
- [13] Zhou Baochun,Kong Lingwei,Chen Wei,et al.Analysis of characteristic parameters of soil-water characteristic curve and unsaturated shear strength prediction of Jingmen expansive soil[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2010,29(5):1052–1059.[周葆春,孔令伟,陈伟,等.荆门膨胀土土-水特征曲线特征参数分析与非饱和抗剪强度预测[J].岩石力学与工程学报,2010,29(5): 1052–1059.]
- [14] Su N.Theory of infiltration:Infiltration into swelling soils in a material coordinate[J].Journal of Hydrology,2010, 395(1):103–108.
- [15] Chen Mingxia,Yang Zhishuo,Zhu Hejian.Shrinking and swelling characteristics of vertisols in Zhangzhou plain[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2016,14(2):143–146.[陈明霞,杨智硕,朱鹤健.漳州平原变性土胀缩特性研究[J].水利与建筑工程学报,2016, 14(2):143–146.]
- [16] Zeng Zhixiong,Tian Hai,Jiang Mingjin.Classification of the swelling-shrinkage grade of expansive soils based on genetic projection pursuit model[J].South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2017,15(1):155– 160.[曾志雄,田海,江名金.基于遗传投影寻踪模型的膨胀土胀缩等级分类[J].南水北调与水利科技,2017,15(1): 155–160.]
- [17] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [18] 薛禹群,谢春红.地下水数值模拟[M].北京:科学出版社,2007.
- [19] Huang Chuanqin,Shao Ming'an.Experimental study on soil shrinking and swelling characteristics during the alternative drying and wetting processes[J].Chinese Journal of Soil Science,2008,39(6):1243–1247.[黄传琴,邵明安.干湿交替过程中土壤胀缩特征的实验研究[J].土壤通报,2008, 39(6):1243–1247.]
- [20] Yang Yunlai.Research on loess collapibility mechanism[J]. Science in China (Series B),1988(7):756–766.[杨运来.黄土湿陷机理的研究[J].中国科学(B辑),1988(7):756–766.]
- [21] Xie Wanli,Wang Yanshou,Ma Zhonghao,et al.Research status and prospect of loess collapibility mechanism[J].Geoscience, 2015,29(2):397–407.[谢婉丽,王延寿,马忠豪,等.黄土湿陷机理研究现状及发展趋势[J].现代地质,2015,29(2): 397–407.]
- [22] 陕西省土壤普查办公室.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992.

(编辑 李轶楠)

引用格式:Gan Yongde,Liu Huan,Jia Yangwen,et al.Swelling soil saturated water movement parameters calculating models[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(2):77–83.[甘永德,刘欢,贾仰文,等.膨胀性土壤饱和水分运动参数计算模型[J].工程科学与技术,2018,50(2):77–83.]