

文章编号:1006-2467(2020)08-0866-07

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2019.106

# 考虑土水吸附效应的黏土收缩曲线方程

陈盼<sup>1</sup>, 向锐<sup>2</sup>, 魏小棋<sup>1,3</sup>, 韦昌富<sup>1,3</sup>, 王吉利<sup>1</sup>

(1. 岩土力学与工程国家重点实验室 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 中交城乡建设规划设计研究院有限公司, 武汉 430052; 3. 桂林理工大学 土木与建筑工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘要:** 在干燥条件下土体逐渐失水产生收缩变形, 对土体开裂、地基承载力及边坡稳定性产生重要的影响. 因此, 有效预测含水量变化下土体的体积收缩变形具有重要的意义. 本研究提出了能考虑土水吸附效应的全含水量范围内的土体收缩曲线数学方程. 该方程能够同时描述脱湿过程中结构性与非结构性黏土的收缩体变. 通过考虑土水吸附效应对土体收缩变形的影响, 引入1个参数描述低含水量条件下土体收缩斜率, 仅用1个方程即可预测从饱和到干燥条件下土体的完整收缩行为, 尤其是低含水量条件下土体的体变特性. 通过方程的预测曲线与文献中实测数据的对比, 证实了所提出黏土收缩曲线方程的可靠性. 同时, 与现有方程的预测能力进行对比, 表明提出的方程能够很好地描述低含水量条件下黏性土的非0收缩段与非0收缩斜率行为, 证实了低含水量条件下土体收缩变形预测中考虑土水吸附效应的必要性与重要性.

**关键词:** 土体收缩; 体变; 干燥条件; 收缩斜率; 非饱和土; 结构性黏土

**中图分类号:** TU 443

**文献标志码:** A

## Equation for Soil Shrinkage Curve of Clay Considering Soil-Water Adsorption Effect

CHEN Pan<sup>1</sup>, XIANG Rui<sup>2</sup>, WEI Xiaoqi<sup>1,3</sup>, WEI Changfu<sup>1,3</sup>, WANG Jili<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;  
2. China Communications Urban and Rural Construction Planning and Design Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430052, China; 3. Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China)

**Abstract:** Soil shrinkage occurs with the decrease of water content in soils under dry conditions, which has a great influence on soil cracking, bearing capacity, and slope stability. Hence, it is important to predict soil shrinkage effectively under the change of water content in soils. A novel mathematical equation is proposed for describing the soil shrinkage behavior within the full water content range considering the soil-water adsorption effect. The proposed equation can be used to characterize the soil shrinkage behavior of structural and non-structural clayey soils under dry conditions. An additional parameter is introduced into the proposed equation for characterizing the slope of soil shrinkage in low water content ranges, in which the effect of soil-water adsorption is considered. Only one equation is needed to predict the complete shrinkage behavior from saturated to zero water content conditions, especially for describing the volume

收稿日期: 2019-01-04

基金项目: 国家自然科学基金(41877269, 51939011)资助项目

作者简介: 陈盼(1984-), 男, 湖北省孝感市人, 副研究员. 主要从事非饱和土力学与降雨边坡稳定性方面的研究.

电话(Tel.): 13477058996; E-mail: pchen@whrsm.ac.cn

change of soils under low water content. The proposed equation has been validated by comparing the results between the predicted curves using the proposed model and the measured data in literatures. Comparing with existing equations for soil shrinkage curve, the results show that the proposed equation can describe the non-zero shrinkage and non-zero shrinkage slope behaviors very well under low water content conditions. Furthermore, the results show that the soil-water adsorption effect is important and necessary for prediction of soil shrinkage behavior under low water content conditions.

**Key words:** soil shrinkage; volume change; dry conditions; shrinkage slope; unsaturated soil; structural clay

在干燥脱湿条件下,随着含水量的降低,土体具有体积收缩的特性. 土体收缩曲线是定量描述土体收缩特性的数学方程,描述土体孔隙率与含水量之间本构关系<sup>[1]</sup>. 土体收缩曲线是土体水力学行为描述中的一个十分重要的本构关系,研究发现,土体收缩曲线在非饱和土力学中与土水特征关系曲线具有同等重要的地位. 因此,对于土体收缩曲线的研究逐渐得到研究者们的重视. 已有研究表明,土体的收缩变形特性对土体的力学与水力学特性均具有重要的影响<sup>[2-4]</sup>. 因此,土体收缩曲线的研究对土体体积收缩开裂、不均匀沉降、地基承载力与边坡稳定性的评估均具有重要的意义.

不少学者已经针对土体的收缩行为开展了大量的研究工作,主要包括试验测试<sup>[5-7]</sup>、机理分析<sup>[8-9]</sup>及数学模型等<sup>[10-11]</sup>. 一些学者还开展了盐分对黏性土收缩特性的影响<sup>[12]</sup>. 当前文献中土体的收缩曲线按照收缩变形的发展特征通常分为 4 个阶段:结构收缩、比例收缩、残余收缩及 0 收缩阶段<sup>[10]</sup>. 不少研究者根据这一分段特性建立了土体收缩曲线的分段模型,通过确定收缩变形的特征点,每个区段分别采用一个函数进行描述<sup>[13]</sup>. 这类模型的缺点是采用的模型参数较多,不便于推广应用. 因此,学者们进一步发展了用 1 个方程来描述土体的整个收缩过程. Fredlund 等<sup>[14]</sup>提出了 1 个可用于描述重塑土体收缩的曲线方程. Peng 等<sup>[15]</sup>提出了 1 个能够用于结构性土收缩特性描述的收缩曲线方程,该方程得到了广泛的应用<sup>[16-17]</sup>.

上述方程均假定土体在收缩过程中一定的含水量范围内必定满足 0 收缩阶段或 0 收缩斜率状态. 然而上述假定并不总是有效,试验已经证实低含水量条件下干燥的土体仍然能够发生持续的变形. 例如,持续干燥条件下黏土仍然会继续收缩,低含水量条件下的持续收缩体变在总体变中占的比较大,尤其对于膨胀土,低含水量条件下的体变不能忽

略<sup>[16,18-19]</sup>. 因此,现有的土体收缩曲线方程在描述这类土体的体变收缩时存在缺陷,并且不能准确预测全含水量变化下黏性土的体积变形. 研究表明,土体收缩行为与土体的土水特性关系密切,然而文献中较少考虑土体收缩与土水特性的关联机制,建立的数学模型多属于经验方程,缺乏一定的物理机制<sup>[16,20]</sup>. 此外,当前文献中采用分段预测收缩曲线的模型应用较为广泛,能够仅利用 1 个方程统一描述结构性与非结构性土体的收缩曲线的研究甚少.

本文提出 1 个描述从饱和到完全干燥状态下全含水量范围的土体收缩曲线方程. 该方程不仅能描述高含水率条件下结构性与非结构性黏土的收缩行为,而且能够描述低含水量条件下黏性土的持续收缩行为. 随后,利用文献中测得的土体收缩曲线数据,通过预测曲线与实测结果的对比验证本文提出收缩曲线的有效性与可靠性. 在此基础上,与文献中现有的方程进行对比,证实本文提出方程的优势所在. 本文的研究成果将为干旱与半干旱地区水分蒸发引起的地表土体变形开裂及核废料缓冲层在干燥过程中的变形老化等方面的研究及评估提供理论支持.

## 1 土体收缩曲线的基本概念

土体收缩曲线是指土体在干燥失水条件下土体体积变化与含水量的关系,见图 1,图中  $I_L$  为液限指数. 土体从泥浆(或完全饱和)状态开始失水收缩,其体积的收缩等于排出水的体积. 随着干燥过程的进行,由于气体进入土体孔隙,土体开始达到非饱和状态,土体的收缩体积大于排出水的体积. 随着含水量进一步降低,土体体积持续收缩,直至达到 0 含水量状态. 按照土体形态与界限含水量可将干燥收缩过程中泥浆经历的性态的变化分为 4 个状态:流态(液态)、可塑态、半固态和固态. 从图 1 中可以看出,流态与可塑态的界限含水量是土体的液限指标,塑限

是可塑态与半固态的分界,而缩限是半固态与固态的分界.值得一提的是,土力学中缩限的定义对黏土仍然值得探讨.

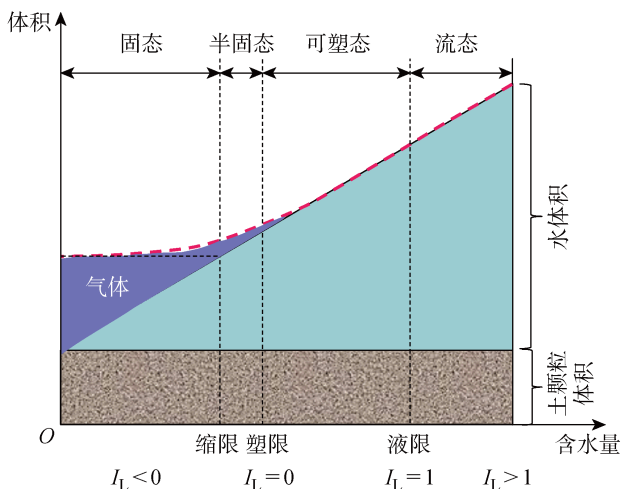


图1 土体收缩曲线示意图

Fig. 1 Schematic map for soil shrinkage curve

对于结构性黏土,从饱和状态开始失水收缩,土体的收缩体积小于排出水的体积,导致收缩曲线偏离饱和线,并不会出现像泥浆等非结构性黏土沿饱和线的收缩阶段<sup>[10-11]</sup>.此外,黏土收缩曲线的4阶段划分法中,通常最后1个阶段均定为0收缩阶段.然而试验结果表明,并不是所有的土类均具备0收缩阶段或0收缩斜率的变形特征,失水收缩过程与土体的矿物组成与含量密切相关.对于黏性土(尤其是膨胀土),即使在较低的含水量条件下,由于黏土矿物团聚体及层间的水分在较为干燥的大气环境下,土中吸附水也能够迁移出来,土体仍会发生持续的收缩<sup>[16, 18-19]</sup>.这些研究结果表明被广泛采用的4阶段土体收缩曲线的划分方法存在明显的局限性.

文献中土体收缩曲线的描述主要有以下3种:质量含水率  $w$ -孔隙率  $e$ (图2(a))、体积含水率  $\theta$ -孔隙率  $e$ (图2(b)),水土体积比  $\delta$ -孔隙率  $e$ (图2(c))<sup>[11, 14, 16, 20]</sup>.其中  $e = V_v/V_s$ ,水土体积比  $\delta = V_w/V_s$ ,  $V_v$  为孔隙的体积,  $V_s$  为固体颗粒的体积,  $V_w$  为孔隙水的体积.在  $\delta$ - $e$  描述框架下,土体处于完全饱和状态时,  $\delta_s = e_s$ ,  $\delta_s$  为饱和时水土体积比,  $e_s$  为饱和时孔隙率.土体开始干燥,仍然处于饱和状态,将沿着对角线即饱和线  $\delta = e$  收缩,直到气体进入土体,出现非饱和状态,收缩曲线偏离饱和线,见图3(c).采用  $\delta$ - $e$  定义土体收缩曲线可以清晰地描述土体收缩过程中从饱和到非饱和状态的转变.因此,本文采用  $\delta$ - $e$  来表达土体收缩曲线.

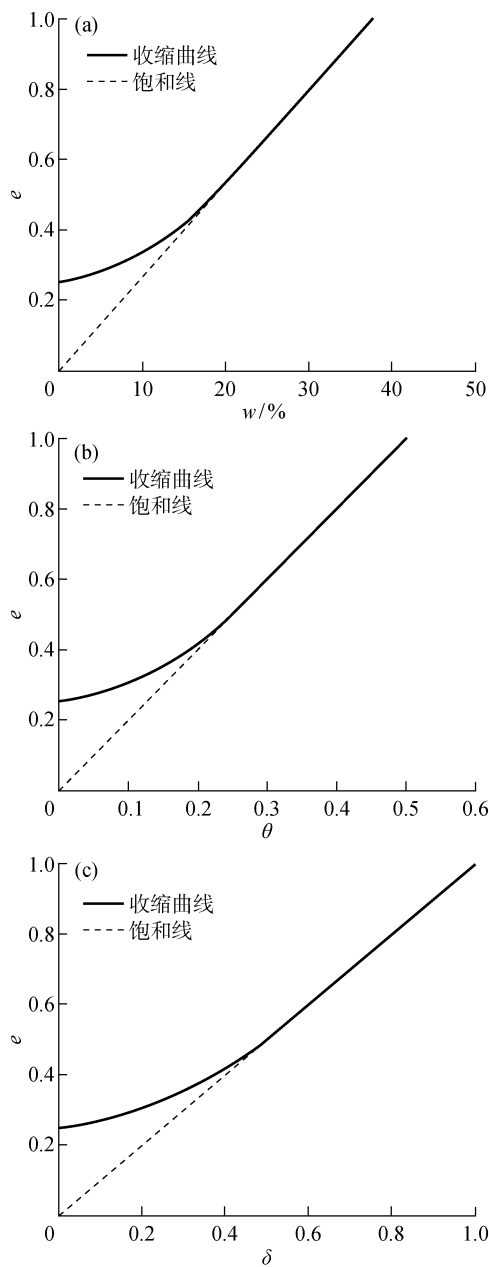


图2 收缩曲线的3种典型表达形式

Fig. 2 Three typical descriptions for soil shrinkage curve

## 2 考虑土水吸附效应的土体收缩曲线方程

试验表明,低含水量条件下土体的收缩变形及收缩斜率并不为0,土体在低含水量条件下的收缩由吸附水控制,而在高含水量条件下,土体的收缩行为主要受毛细水影响.因此,土体的收缩可以分为毛细水变化引起的收缩与吸附水变化引起的收缩两部分<sup>[19-20]</sup>.土体从饱和状态开始脱湿,收缩主要由毛细水控制,脱湿到一定含水量状态,毛细水排干,对土体收缩的贡献可忽略不计.由于Fredlund等的模型不能很好地描述结构性黏土的收缩行为,而Peng

等<sup>[15]</sup>建立的 S 型的土体收缩曲线方程能很好地描述结构性与非结构性黏土由毛细水主导的土体收缩过程的孔隙率演化:

$$e = e_r \frac{e_s - e_r}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \delta}{e_s - \delta}\right)^{-\gamma}\right]^\beta} \tag{1}$$

式中: $e_r$  为毛细水排干土体收缩达到的孔隙率; $\alpha$ 、 $\beta$  及  $\gamma$  为模型参数.

考虑吸附含水量对毛细收缩过程中孔隙率变化的影响,基于式(1),提出毛细水变化引起的土体孔隙率  $e_1$  演化方程:

$$e_1 = e_r + \frac{e_s - e_r - x}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \delta}{e_s - \delta}\right)^{-\gamma}\right]^\beta} \tag{2}$$

式中: $x$  为考虑吸附含水量对毛细水控制的孔隙率变化的影响量.

持续脱湿过程中,当土体中毛细水已全部排出,土中吸附水含量开始排出,此时土体的含水量定义为  $\delta_a^{\max}$ ,此时土体的收缩与膨胀主要受吸附水控制.为了简化模型,假设吸附水控制阶段土体的收缩斜率为常数  $k$ .由吸附水排出引起的土体孔隙率的变化量  $\Delta e$  为:

$$\Delta e = k(\delta - \delta_a^{\max}) \tag{3}$$

因此,脱湿过程中土体收缩曲线的方程为

$$e = e_1 + \Delta e \tag{4}$$

式(4)必须满足如下限制条件:当  $\delta = \delta_s$  时,  $\delta_s = e_s$ , 因此,  $x = k(\delta_s - \delta_a^{\max})$ , 式(4)变为

$$e = e_r + \frac{e_s - e_r - k(e_s - \delta_a^{\max})}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \delta}{e_s - \delta}\right)^{-\gamma}\right]^\beta} + k(\delta - \delta_a^{\max}) \tag{5}$$

当  $\delta = 0$  时土体的孔隙率为

$$e_0 = e_r - k\delta_a^{\max} \tag{6}$$

对式(5)求导可得土体的收缩率:

$$e' = \frac{\partial e}{\partial \delta} = \alpha \beta \gamma [e_s - e_r - d(e_s - \delta_a^{\max})] \times \left[1 + \left(\frac{\alpha \delta}{e_s - \delta}\right)^{-\gamma}\right]^{-\beta-1} \left(\frac{\alpha \delta}{e_s - \delta}\right)^{-\gamma-1} \frac{e_s}{(e_s - \delta)^2} + k \tag{7}$$

当  $\delta = 0$  时,吸附收缩斜率为

$$e'_0 = k \tag{8}$$

将式(6)代入式(5),得到本文建立的收缩曲线的简单表达形式为

$$e = e_0 + \frac{(1 - k)e_s - e_0}{\left[1 + \left(\frac{\alpha \delta}{e_s - \delta}\right)^{-\gamma}\right]^\beta} + k\delta \tag{9}$$

式(9)共有 5 个参数  $e_0$ 、 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  及  $k$ .与分段收缩曲线方程相比<sup>[11, 13]</sup>,本文仅用 1 个方程即可描述考虑土水吸附效应的全含水量变化范围内土体的收

缩特性.与文献中建立的单一收缩曲线方程相比<sup>[14, 15]</sup>,本文仅引入参数吸附收缩斜率  $k$ ,即能够描述由于土水吸附效应控制的土体持续收缩及非 0 收缩斜率的行为.以下将对上述方程的准确性与适用性进行验证,并对土体的收缩特性进行分析与讨论.

### 3 模型的验证及结果分析

#### 3.1 采用的试验土样及基本物性参数

本文用于验证模型的试验数据来自文献[18, 21-22].采用了黏土、膨胀土与高岭土共 7 种土样,其中伦敦黏土、伦敦黏土与粉土混合土及蓝黏土 3 种土样来自文献[21],3 种膨胀土来自文献[22],Norwegian clay 来自文献[18].这 7 种土样的基本物理特性参数列于表 1.

表 1 土样物理特性参数

Tab. 1 Physical property index for used soils

编号	土样	孔隙率	土粒比重	液限/%	塑限/%
1	伦敦黏土	1.30	2.75	77	29
2	伦敦黏土 粉土混合	0.90	2.70	43	22
3	膨胀土 1	1.19	2.72	81	25
4	膨胀土 2	1.17	2.72	81	25
5	膨胀土 3	1.01	2.72	81	25
6	蓝黏土	1.04	2.75	63	27
7	挪威黏土	1.10	2.60	—	—

注:2 号伦敦黏土与粉土混合土是指伦敦黏土与 40%(质量分数)粉土的混合土样.

#### 3.2 模型验证及结果讨论

利用式(9)对实测结果进行预测,利用 Excel 中的 Solver 通过最小二乘法获得式(9)的各个参数.获得的方程模型参数及相关系数见表 2.不同黏土收缩体变的预测曲线与实测数据对比见图 3,其中饱和线表示  $e = \delta$  曲线.从图 3(a)可以看出初始处于饱和状态的伦敦黏土不具有结构性,预测曲线与实测结果具有很高的相关性,表明式(9)能很好地预测伦敦黏土从饱和到完全干燥过程中土体孔隙率的变化.尽管低含水量条件下土体收缩变化较缓,但伦敦黏土在低含水量条件下仍继续收缩.因此,拟合获得的斜率  $k$  值较小.而对于伦敦黏土与粉土混合土样,初始状态稍有结构性(起始状态偏离饱和线).在干燥过程中土体持续收缩,特别是低含水量条件下土体收缩较伦敦黏土更为明显,建立的方程能很好地定量描述这种具有初始结构的混合土样从饱和到干燥过程中土体的体积收缩.同时捕捉到了黏性土干

燥过程中的非 0 收缩过程及非零收缩斜率,见图 3 (b). 同时预测的  $k$  也比伦敦黏土的收缩斜率大,表明  $k$  是 1 个反映低含水量条件下黏土收缩强烈程度的表征量.

随后采用文献[22]中的 3 种膨胀土对提出的收缩曲线方程进行了进一步的验证,预测曲线与实测结果见图 4,方程的模型参数与相关系数见表 2. 表中  $R^2$  为决定系数. 从图 4 中可以看出 3 种膨胀土均具有一定的结构性. 初期脱湿干燥过程中,土体孔隙率的降低小于土体排出水体积的变化. 从表 2 的相关性系数可以看出,式(9)很好地预测了 3 种具有初始结构性的膨胀土在干燥条件下的完整收缩行为. 从低含水量条件下的收缩体变来看,膨胀土 2 收缩程度较大,膨胀土 1 与 3 收缩程度较为接近,这种变化趋势也体现在方程的  $k$  上.

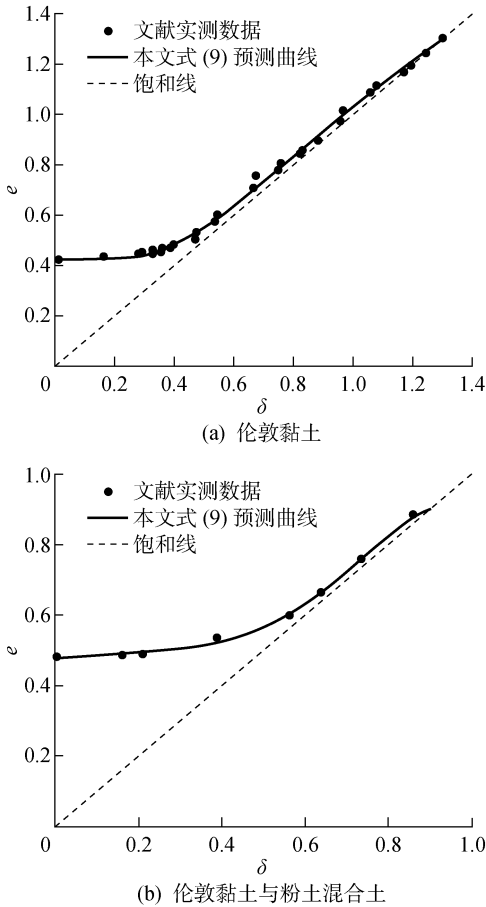


图 3 黏土预测收缩曲线与实测数据对比  
Fig. 3 Comparison of predicted shrinkage curves and measured data of clayey soils

3.3 与现有收缩曲线方程的比较

本节将式(9)与文献中较为常见的两个收缩曲线方程进行对比. Peng 等提出的方程已在式(1)中给出,而 Fredlund 等提出的方程以  $\delta$  为自变量,表

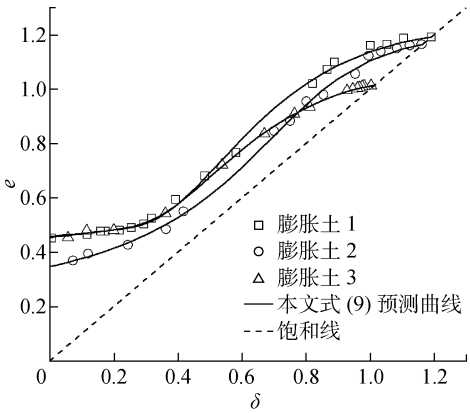


图 4 膨胀土预测收缩曲线与实测数据对比  
Fig. 4 Comparison of predicted shrinkage curves and measured data of expansive soils

表 2 式(9)的模型参数与模型预测的相关系数

Tab. 2 Model parameters and correlation coefficients for Eq. (9)

编号	土样	模型参数					相关系数
		$e_0$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$k$	
1	伦敦黏土	0.423	52.75	72.53	1.02	0.04	0.998
2	伦敦黏土 粉土混和	0.475	1.32	5.06	1.32	0.10	0.998
3	膨胀土 1	0.458	7.47	18.49	1.59	0.12	0.998
4	膨胀土 2	0.348	0.64	0.75	2.18	0.24	0.998
5	膨胀土 3	0.454	11.83	40.24	1.50	0.14	1.000

示如下:

$$e = e_0 \left[ 1 + \left( \frac{\delta}{a} \right)^b \right]^{-1/b} \tag{10}$$

式中:  $a$ 、 $b$  是方程的模型参数.

3 个收缩曲线方程预测曲线与实测结果对比见图 5,模型参数及相关系数见表 3. 图 5(a)给出的蓝黏土属非结构性黏土,含水比低于 0.2 条件下仍有明显的收缩. 从预测结果与实测数据的对比可以看出,本文提出的方程很好地预测了蓝黏土从饱和到完全干燥过程中的体积收缩,特别是低含水量范围内的持续收缩与非 0 收缩斜率的行为. Fredlund 等与 Peng 等提出的方程在一定含水量范围内均预测到 0 收缩阶段,并不能较好地描述低含水量条件下黏土的持续收缩行为. 图 5(b)所示为 1 种结构性黏土的收缩曲线. 从饱和到干燥条件下也观察到了挪威黏土的持续收缩过程. 预测结果表明,本文提出的方程预测曲线与实测数据相比,具有最高的相关性系数,主要原因在于式(9)更好地预测了结构性挪威黏土在干燥过程中展示的非零收缩段及非 0 收缩斜

率的行为. Fredlund 等提出的方程的预测效果最差,相关性系数最低. 主要原因在于 Fredlund 等提出的方程并不适合用来描述结构性黏土的收缩行为. 同样 Fredlund 等与 Peng 等提出的方程也不能

较好地描述低含水量条件下黏土的非 0 收缩段及非 0 收缩斜率的行为. 上述结果表明本文建立的方程在定量描述结构性与非结构性黏土收缩行为上更为合理与适用.

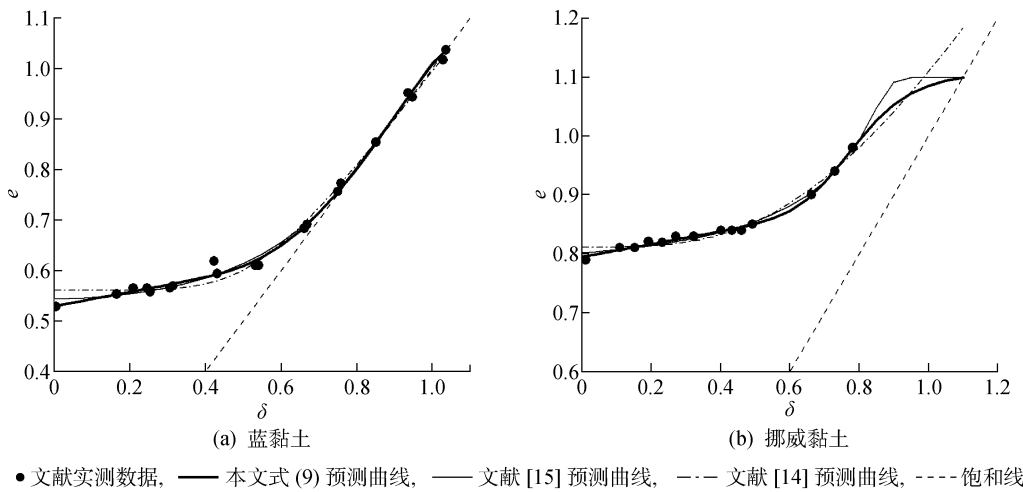


图 5 方程预测结果与已有方程预测结果的对比

Fig. 5 Comparison of predicted shrinkage curves from proposed equation and existing equations

表 3 不同方程的模型参数与相关系数

Tab. 3 Model parameters and correlation coefficients for different equations

编号	土样	公式	$e_0$	$\alpha$	$\beta$	$a$	$b$	$\gamma$	$k$	$R^2$
1	蓝黏土	(9)	0.530	13.96	77.58	—	—	1.18	0.14	0.997
2	挪威黏土		0.795	0.71	2.89	—	—	2.57	0.11	0.996
3	蓝黏土	(1)	0.544	0.35	1.12	—	—	1.37	—	0.995
4	挪威黏土		0.802	0.25	0.12	—	—	9.56	—	0.989
5	蓝黏土	(10)	0.561	—	—	0.57	5.74	—	—	0.993
6	挪威黏土		0.812	—	—	0.84	3.28	—	—	0.972

4 结论

通过总结试验测定的土体收缩曲线数据,克服现有土体收缩曲线方程的局限性,本文提出了 1 个能够描述从完全饱和到干燥条件下土体收缩行为的数学方程. 通过与文献中实测数据及现有模型的对比分析,验证了本文提出方程的可靠性与有效性. 主要结论如下:

- (1) 在低含水量条件下,土水吸附效应主导土体的收缩变形行为,使得黏性土仍能够发生持续体变,具有非 0 收缩段及非 0 收缩斜率的典型特征.
- (2) 本文建立的方程不仅能够描述非结构性黏土的收缩曲线,同时也能够描述结构性黏土的收缩变形特性.
- (3) 由于考虑了土水吸附效应对收缩变形的影响,本文建立的方程能够很好地描述低含水量条件

下黏土的非 0 收缩段及非 0 收缩斜率行为.

参考文献:

[ 1 ] HAINES W B. The volume-changes associated with variations of water content in soil[J]. **The Journal of Agricultural Science**, 1923, 13(3): 296-310.

[ 2 ] 唐朝生,崔玉军, TANG Anh-Minh, 等. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. **岩土工程学报**, 2011, 33(8): 1271-1279.

TANG Chaosheng, CUI Yujun, TANG Anh-Minh, *et al.* Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(8): 1271-1279.

[ 3 ] 张校通,郑东生,夏小和,等. 非均质饱和-非饱和土的变形特性[J]. **上海交通大学学报**, 2012, 46(10): 1544-1547.

ZHANG Xiaotong, ZHENG Dongsheng, XIA Xiao-

- he, *et al.* Deformation characteristics of non-homogeneously saturated-unsaturated soils [J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2012, 46(10): 1544-1547.
- [4] 程演, 张璐璐, 张磊, 等. 基于随机场的非饱和土固结分析[J]. **上海交通大学学报**, 2014, 48(11): 1528-1535.
- CHENG Yan, ZHANG Lulu, ZHANG Lei, *et al.* Coupled consolidation in unsaturated soils based on random field theory[J]. **Journal of Shanghai Jiao Tong University**, 2014, 48(11): 1528-1535.
- [5] 刘平, 张虎元, 严耿升, 等. 土建筑遗址表部土体收缩特征曲线测定[J]. **岩石力学与工程学报**, 2010, 29(4): 842-849.
- LIU Ping, ZHANG Huyuan, YAN Gengsheng, *et al.* Determination of soil shrinkage characteristic curve of surface soil on ancient earthen architectures [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(4): 842-849.
- [6] 汪贤恩, 谭晓慧, 辛志宇, 等. 膨胀土收缩性质的试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2015, 37(Sup. 2): 107-114.
- WANG Xianen, TAN Xiaohui, XIN Zhiyu, *et al.* Experimental study on shrinkage properties of expansive soils [J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2015, 37(Sup. 2): 107-114.
- [7] LIU X F, BUZZI O. Use of hand-spray plaster as a coating for soil bulk volume measurement [J]. **Geotechnical Testing Journal**, 2014, 37(3): 522-528.
- [8] SRIDHARAN A, RAO G V. Effective stress theory of shrinkage phenomena [J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1971, 8(4): 503-513.
- [9] 唐朝生, 施斌, 崔玉军. 土体干缩裂隙的形成发育过程及机理[J]. **岩土工程学报**, 2018, 40(8): 1415-1423.
- TANG Chaosheng, SHI Bin, CUI Yujun. Behaviors and mechanisms of desiccation cracking of soils [J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(8): 1415-1423.
- [10] BRAUDEAU E, COSTANTINI J M, BELLIER G, *et al.* New device and method for soil shrinkage curve measurement and characterization [J]. **Soil Science Society American Journal**, 1999, 63: 525-535.
- [11] CORNELIS W M, CORLUIY J, MEDINA H, *et al.* Measuring and modelling the soil shrinkage characteristic curve [J]. **Geoderma**, 2006, 137(1/2): 179-191.
- [12] 邢旭光, 马孝义, 康端刚. 盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果 [J]. **农业工程学报**, 2016, 32(9): 115-122.
- XING Xuguang, MA Xiaoyi, KANG Duangang. Impacts of type and concentration of salt cations on soil water retention and desiccation cracking [J]. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, 2016, 32(9): 115-122.
- [13] LEONG E C, WIJAYA M. Universal soil shrinkage curve equation [J]. **Geoderma**, 2015, 237: 78-87.
- [14] FREDLUND M D, WILSON G W, FREDLUND D G. Representation and estimation of the shrinkage curve [C] // **Proceedings of the Third International Conference on Unsaturated Soils**. Florida: CRC Press, 2002: 145-149.
- [15] PENG X, HORN R. Modeling soil shrinkage curve across a wide range of soil types [J]. **Soil Science Society America Journal**, 2005, 69: 584-592.
- [16] BOIVIN P, GARNIER P, VAUCLIN M. Modeling the soil shrinkage and water retention curves with the same equations [J]. **Soil Science Society American Journal**, 2006, 70(4): 1082-1093.
- [17] 戴明月, 陈勇, 王智炜. 不同初始状态下膨胀土体收缩变形拟合模型 [J]. **人民长江**, 2018, 49(8): 83-87.
- DAI Mingyue, CHEN Yong, WANG Zhiwei. A fitting model for shrinkage of expansive soil in different initial states [J]. **Yangtze River**, 2018, 49(8): 83-87.
- [18] OLSEN P A, HAUGEN L E. A new model of the shrinkage characteristic applied to some Norwegian soils [J]. **Geoderma**, 1998, 83: 67-81.
- [19] LU N, DONG Y. Correlation between soil shrinkage curve and water-retention characteristics [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2017, 143(9): 04017054.
- [20] CHEN P, LU N. Generalized equation for soil shrinkage curve [J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2018, 144(8): 04018046.
- [21] MARINHO F A. Fundamentals of soil shrinkage [C] // **Second Pan American Conference on Unsaturated Soils Conference Proceedings**. Virginia: ASCE Press U. S., 2017: 198-222.
- [22] THYAGARAJ T, THOMAS S R, DAS A P. Physico-chemical effects on shrinkage behavior of compacted expansive clay [J]. **International Journal of Geomechanics**, 2017, 17(2): 06016013.

(本文编辑:陈晓燕)