

DOI: 10.11779/CJGE2022S2045

# 非饱和膨胀土-桩界面大型剪切试验与本构模拟

张致远<sup>1, 2</sup>, 钱建固<sup>\*1, 2</sup>, 王 成<sup>1, 2</sup>

(1. 同济大学地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092)

**摘 要:** 目前对于膨胀土-桩接触面的研究较少, 没有合适的接触面本构模型能够考虑土体含水率对接触面的影响, 为揭示含水率影响下的膨胀土-桩接触面的强度特性以及在剪切过程中的剪胀性, 对膨胀土-桩接触面开展不同含水率的大型直剪试验。试验结果表明, 不同含水率和法向压力下的接触面剪切强度曲线均呈现硬化的特性, 接触面法向位移均呈现先剪缩, 达到相变状态后再发生剪胀, 最终趋于临界状态的现象。提出了一个接触面弹塑性硬化本构模型, 并将所提出模型通过 Fortran 语言编写为 ABAQUS 有限元软件的 UINTER 子程序, 并对试验结果进行了应力-应变模拟, 合理地再现了含水率对桩-土界面力学行为的影响规律。

**关键词:** 膨胀土; 桩-土界面; 大型剪切试验; 本构模型

中图分类号: TU443

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S2-0207-04

**作者简介:** 张致远(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事膨胀土-桩接触面的室内试验以及本构模型研究工作。E-mail: 2032487@tongji.edu.cn。

## Large-scale shear tests and constitutive modeling of unsaturated expansive soil-pile interface

ZHANG Zhi-yuan<sup>1, 2</sup>, QIAN Jian-gu<sup>1, 2</sup>, WANG Cheng<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Without suitable interface constitutive model that can consider the influence of moistures content on the interface, there are few studies on the expansive soil-pile interface. For the purpose of carrying out the strength properties and dilatancy of expansive soil-pile interface under the influences of moisture content, the large-scale direct shear tests under different moisture contents are conducted. The test results show that the shear strength curves all exhibit the characteristics of hardening under different moisture contents and normal pressures. The normal displacement of the interface shrinks till reaching the phase transition state and then dilates, finally the interface tends to the critical state. An elastoplastic hardening constitutive model for the expansive soil-pile interface is proposed. The proposed model is compiled into the UINTER subroutine of ABAQUS through Fortran and validated by the test results. It is shown that the proposed model is capable to reproduce the mechanical behaviors of pile-soil interface under various water contents.

**Key words:** expansive soil; pile-soil interface; large-scale shear test; constitutive model

## 0 引 言

在岩土工程领域中经常会遇到土与结构物的接触面问题, 常见的如桩基础、挡土墙等结构物在施工过程中都会与土体产生接触面, 土体与结构物刚度的不同会造成接触面土体力学特性与接触面外的土体力学特性有较大差别。膨胀土地区中的基础形式多为桩基础, 而膨胀土对地基湿化尤为敏感, 因此, 有必要从试验和理论两方面开展地基湿化条件下的膨胀土-桩接触面研究。

当前学者们提出了许多关于饱和土-结构物接触面的本构模型, 但针对非饱和土与结构物接触面的本

构关系较为欠缺。Lashkari<sup>[1]</sup>分别采用两个屈服面描述非饱和土-结构物接触面中的体积屈服和剪切屈服现象, 但在描述剪胀性方面略有不足。广吸力范围的量测无论在原位试验中还是室内试验中都极为困难。

在非饱和膨胀土的工程实践中, 桩-土剪切破坏过程时间较短, 非饱和膨胀土的渗透系数低, 桩-土剪切过程可近似为常含水率状态, 在实际工程的剪切破坏分析时, 可采用含水率作为变量。本文开展了膨胀土-

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41877252); 国网河南电网项目 (5217L0160001)

收稿日期: 2022-12-07

\*通信作者 (E-mail: qianjiangu@tongji.edu.cn)

桩接触面的大型直剪试验,以含水率为变量,基于临界状态概念提出非饱和膨胀土-桩接触面模型,并基于有限元程序进行二次开发,对模型进行了模拟验证。

1 膨胀土-桩接触大型剪切试验

1.1 试验准备

试验采用同济大学岩土实验室的多功能界面剪切仪 SJW-200,该仪器能够满足对膨胀土-桩接触面开展试验模拟的要求,如图 1 所示。



图 1 试验仪器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test instruments

试验所用膨胀土样取自河南省内乡县 220KV 变电站附近,根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GB 50112—2013)判定其属于弱膨胀土。为了模拟膨胀土-桩接触面的剪切行为,本文还制备了混凝土板以模拟桩界面。

1.2 试验过程

试验目的是探究含水率变化对膨胀土-桩接触面剪切特性的影响,因此开展了土样初始干密度  $\rho_d = 1.50 \text{ g/cm}^3$ ,初始含水率分别为 15% 和 20% 的膨胀土-混凝土板接触面大型直剪试验。开展法向压力为 50, 150, 300 kPa 下的 CNL (恒定法向压力) 剪切试验,待法向位移稳定后 (法向位移变化率小于  $0.001 \text{ mm/min}$ ), 开始进行剪切,控制剪切速率为  $0.8 \text{ mm/min}$ ,当剪切位移达到 35 mm 时停止剪切。

1.3 试验结果与分析

图 2 中的点为不同含水率条件下的膨胀土-混凝土板接触面剪切试验结果。由图 2 可知,不同条件下的接触面  $\tau - U_t$  曲线均呈双曲线硬化型,未出现明显应变软化现象。在含水率相同的条件下,法向应力越大,接触面剪切强度就越高;而在法向应力相同的情况下,接触面剪切强度随着含水率的提高而降低;观察图 2 中膨胀土-混凝土板接触面在  $w=15\%$ ,  $20\%$  条件下的  $U_n - U_t$  曲线可知,随着剪切的进行,不同条件下的膨胀土-混凝土板接触面均先发生剪缩,到达某个剪切位移后转而发生剪胀。 $U_n - U_t$  曲线的大体趋势是法向压力越大,越容易发生剪缩。当剪切位移达到 30 mm 左右时,接触面的法向位移-剪切位移曲线斜率有

减小的趋势,法向位移变化率趋向于 0,接触面接近临界状态。

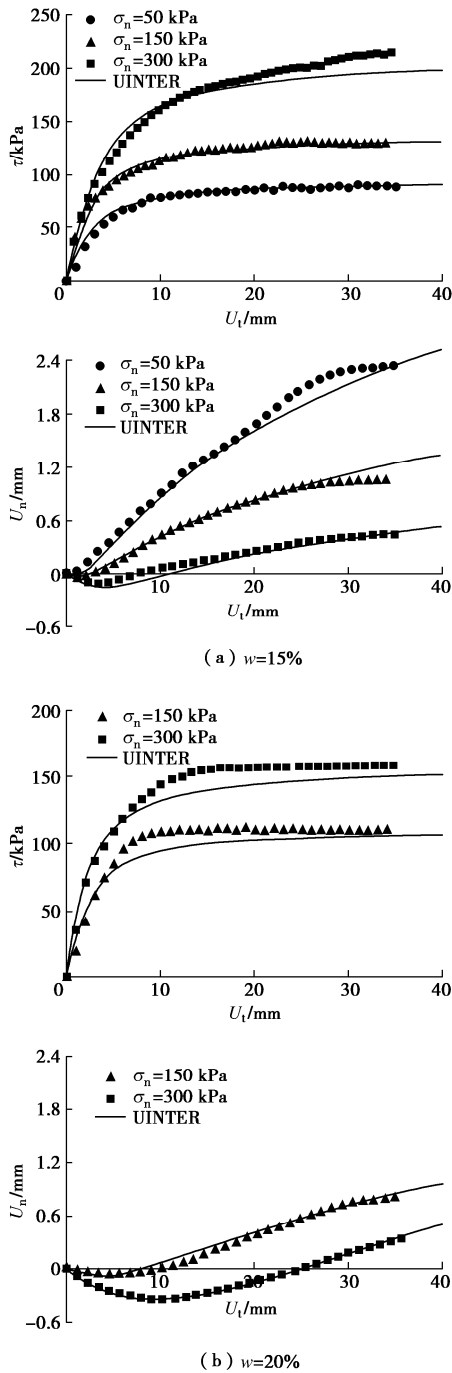


图 2 试验结果与数值模拟结果

Fig. 2 Test and numerical results

2 膨胀土-桩接触面本构模型

2.1 弹性行为

弹性刚度矩阵  $D_e = \begin{bmatrix} D_n & 0 & 0 \\ 0 & D_s & 0 \\ 0 & 0 & D_t \end{bmatrix}$ , 其中  $D_n$  为法向弹性模量,  $D_s$  和  $D_t$  分别为两个切向方向的弹性模量,结合前人的研究<sup>[2-3]</sup>,弹性模量取值如下:

向弹性模量,  $D_s$  和  $D_t$  分别为两个切向方向的弹性模量,结合前人的研究<sup>[2-3]</sup>,弹性模量取值如下:

$$D_n = K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = \frac{(1+e_0) \cdot \sigma_n}{\kappa} \quad (1)$$

$$D_s = D_t = G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{3(1-2\nu)}{2(1+\nu)} \cdot D_n \quad (2)$$

式中,  $E$  为土体弹性模量,  $\nu$  为土体泊松比,  $e_0$  为初始孔隙比,  $\kappa$  为土体一维侧限压缩曲线 ( $e - \ln p$  坐标系) 的回弹段斜率。

根据莫尔-库仑强度准则, 不同含水率下的接触面强度表达式如下:

$$\tau_f = \sigma_n \tan \varphi_i + c_i \quad (3)$$

式中,  $\varphi_i$  和  $c_i$  为接触面的内摩擦角和黏聚力, 通过不同含水率下的接触面大型剪切试验获取, 为了考虑黏聚力的影响, 将式 (3) 表达为如下形式:

$$\tau_f = (\sigma_n + c_i \cot \varphi_i) \tan \varphi_i = \sigma_n^* \tan \varphi_i \quad (4)$$

## 2.2 屈服函数

在桩土接触面的剪切过程中, 由于桩体约束了膨胀土在垂直于接触面方向上的法向位移, 因此接触面土体在法向几乎没有发生位移, 本文提出的屈服面以塑性剪应变  $\gamma^p$  ( $\gamma^p = \sqrt{\gamma_s^{p2} + \gamma_t^{p2}}$ ) 为硬化参量。由第一节开展的大型试验结果可知, 膨胀土-桩接触面的剪切强度-剪切位移曲线均为硬化型, 因此本文提出了一个双曲线型的屈服函数:

$$f = \tau - \frac{\gamma^p}{k_p + \gamma^p} \cdot \eta_c \cdot \sigma_n + c_i \cot(\varphi_i) = 0 \quad (5)$$

式中,  $\eta_c = \tan \varphi_i$  为接触面的临界状态应力比,  $k_p$  为控制硬化速率的模型参数。

## 2.3 塑性势函数

许多学者采用剪胀方程描述塑性应变分量之间的关系<sup>[4-5]</sup>, 将塑性法向位移矢量与塑性切向位移标量之比定义为剪胀因子  $D$  ( $D = \frac{d\epsilon_n^p}{d\gamma^p}$ ), 本文的剪胀因子

基于已有文献提出的形式<sup>[5]</sup>进行改进:

$$D = A_d \cdot (\eta_d^m - \eta^m) \cdot (\eta_c - \eta) \quad (6)$$

式中  $A_d$  为剪胀参数, 控制模型的剪胀速率;  $\eta = \frac{\tau}{\sigma_n + c_i \cot \varphi_i}$  为接触面应力比;  $\eta_d$  为剪缩剪胀转变点的应力比;  $m$  是控制剪胀曲线形态的参数。

根据一致性条件  $df = 0$ , 推导得出弹塑性矩阵  $D_{ep}$  的表达式:

$$D_{ep} = D_e - \frac{D_e \cdot n_g \cdot n_f^T \cdot D_e}{n_f^T \cdot D_e \cdot n_g - \frac{\partial f}{\partial \gamma^p}} \quad (7)$$

以上提出了一个能合理描述膨胀土-桩接触面的本构模型, 该模型具有参数意义明确、能够反映接触面黏聚行为等优点。

## 3 模型参数确定

将所建立的接触面本构模型进行子程序编写, 对所开展的大型直剪试验进行数值模拟。接触面参数通过室内试验与数值模拟获取。

### 3.1 接触面厚度 $t$

本文试验设计时在上剪切盒视口位置处注入彩砂, 并在大型直剪试验剪切结束后对视口进行拍照。如图 3 所示, 根据接触面附近土体的破坏层厚度确定接触面的厚度  $t$  约为 5 mm。



图 3 试验结束后视口照片

Fig. 3 Photo of viewport after tests

### 3.2 弹性参数 $\kappa$

$\kappa$  为回弹系数, 表征土体变形的弹性部分。本文试验考虑了含水率对  $\kappa$  值的影响, 通过一维压缩试验获取不同含水率下的  $\kappa$  值。

### 3.3 强度参数: $c_i$ , $\varphi_i$

通过开展不同含水率下的桩土接触面大型直剪试验以获得不同含水率下的接触面强度参数  $c_i$  和  $\varphi_i$ 。

### 3.4 硬化控制参数: $k_p$

$k_p$  的大小决定接触面剪切应力随剪切应变的发展速度, 能够控制硬化速率。其取值可从大型剪切试验结果得出, 将试验结果绘制为  $\frac{\tau}{\tau_f} - \gamma^p$  平面上的曲线, 其中  $\gamma^p$  通过下式计算:

$$\gamma^p = \gamma - \gamma^e = \frac{U_t}{t} - \frac{\tau}{G} \quad (8)$$

$k_p$  的取值方法如图 4 所示。

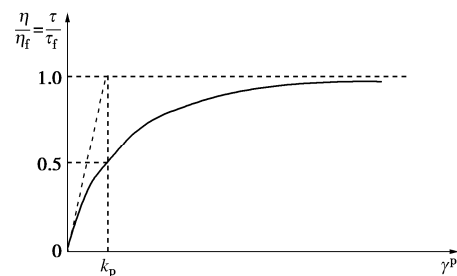


图 4 参数  $k_p$  的物理意义及确定

Fig. 4 Physical meaning and determination of parameter  $k_p$

### 3.5 剪胀控制参数: $A_d$ , $\eta_d$ , $m$

由剪胀因子的表示形式可知, 接触面土体的剪胀性主要由  $A_d$ ,  $\eta_d$  和  $m$  3 个控制剪胀性的参数决定。

$\eta_d$  可通过剪胀剪缩分界点的剪应力  $\tau_d$  计算得出:

$$\eta_d = \frac{\tau_d}{\sigma_n + c_i \cot \varphi_i} \quad (9)$$

图5(a)为不同 $\eta_d$ 取值的数值模拟结果,引入参数 $m$ 对最大剪胀量与最大剪缩量的比值进行调整以改变剪胀曲线的形态。如图5(b)所示,随着 $m$ 的增大,接触面最大剪胀量和最大剪缩量的比值逐渐增大,根据试验结果, $m$ 取20~30倍的 $\eta_d$ 较合适。

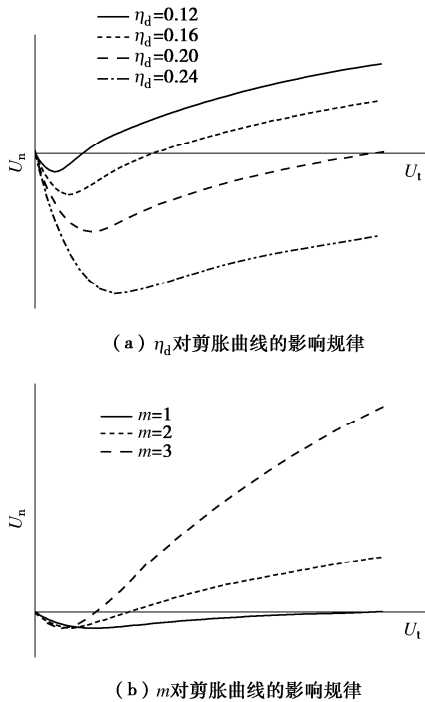


图5 参数 $\eta_d$ 和 $m$ 对 $U_n - U_t$ 曲线的影响

Fig. 5 Influences of parameters  $\eta_d$  and  $m$  on  $U_n - U_t$  curves

参数 $A_d$ 的增大或减小可以控制接触面 $U_n - U_t$ 曲线整体的增大或减小。确定合适的 $m$ 值后,取 $A_d$ 的值为1进行数值模拟,通过数值模拟结果与试验结果之间的倍数关系确定参数 $A_d$ 的值。

提出的屈服面及剪胀因子的形式能较好地模拟膨胀土-混凝土界面的大型剪切试验结果,数值模拟拟合的结果如图2中的实线所示,两者的对比验证了本文所提出本构模型的合理性。

## 4 结 论

本文通过开展膨胀土-混凝土界面的大型剪切试验来模拟膨胀土-桩接触面的剪切特性,提出了一个能够考虑含水率影响的接触面本构模型,并基于有限元进行二次开发,对试验结果进行数值模拟。研究表明:

(1) 膨胀土-混凝土接触面的剪切强度会随着法

向压力的提高而提高,随着含水率的增加而降低;随着法向压力的提高和含水率的增加接触面土体都会产生更大的剪缩量。

(2) 膨胀土-混凝土的剪切强度曲线均呈现硬化的趋势,但 $U_n - U_t$ 曲线却呈现先剪缩再剪胀的发展趋势,接触面土体的剪胀并未伴随剪切强度的明显软化。

(3) 提出的接触面本构模型能够模拟膨胀土-混凝土接触面的剪切特性,模型参数较少且都具有明确的物理意义。该模型不仅能够合理描述接触面的剪胀和剪缩行为,还能考虑接触面的临界状态。

(4) 基于有限元程序的二次开发,实现了接触本构模型子程序 UINTER 的嵌入,并对试验结果进行数值模拟,再现了不同含水率下桩-土接触面的剪切力学行为,也表明接触面本构模型具有较好的应用性。

## 参考文献:

- [1] LASHKARI A. A critical state model for saturated and unsaturated interfaces[J]. Scientia Iranica, 2012, 19(5): 1147 - 1156.
- [2] GENNARO V D, et al. Elasto-plastic analysis of the interface behaviour between granular media and structure[J]. Computers and Geotechnics, 2002, 29(7): 547 - 572.
- [3] 路德春, 罗 磊, 王 欣, 等. 土与结构接触面土体软/硬化本构模型及数值实现[J]. 工程力学, 2017, 34(7): 41 - 50. (LU De-chun, LUO Lei, WANG Xin, et al. Softening/hardening constitutive model for soil-structure interface and numerical implementation[J]. Engineering Mechanics, 2017, 34(7): 41 - 50. (in Chinese))
- [4] SABERI M, et al. A critical state two-surface plasticity model for gravelly soil-structure interfaces under monotonic and cyclic loading[J]. Computers and Geotechnics, 2016, 80: 71 - 82.
- [5] 赵春风, 龚 辉, 赵 程, 等. 考虑法向应力历史的黏土-混凝土界面弹塑性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(4): 848 - 855. (ZHAO Chun-feng, GONG Hui, ZHAO Cheng, et al. Elastoplastic analysis of interface between clay and concrete considering effect of normal stress history[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(4): 848 - 855. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)