

不同排水方式的湿陷性黄土力学特性试验及邓肯-张模型的改进

丁旭升^{1,2}, 张凌凯^{1,2}, 樊培培^{1,2}

(1. 新疆农业大学水利与土木工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830052;
2. 新疆水利工程安全与水灾害防治重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830052)

摘要:为分析渠坡变形破坏机理,针对新疆某输水明渠工程的湿陷性黄土进行了固结排水和固结不排水三轴剪切试验,并通过改进的邓肯-张模型对三轴剪切试验曲线进行了模拟,同时与邓肯-张模型和驼峰型三次曲线模型进行了对比分析。研究表明:随着围压增大,固结排水试验的应力-应变曲线和体变曲线均由软化型转变为硬化型;固结不排水试验应力-应变曲线均为硬化型,孔压曲线均表现为软化型;固结排水试验得到的有效黏聚力大于固结不排水试验得到的黏聚力,固结排水试验得到的有效内摩擦角与固结不排水试验得到的内摩擦角相差较小;改进后的邓肯-张模型参数共有9个;邓肯-张模型不能合理描述软化型三轴试验曲线,驼峰型三次曲线模型对强软化型三轴试验曲线契合度较差,而改进的邓肯-张模型能够较好地描述各种形态的湿陷性黄土三轴试验曲线,有较好的准确性。

关键词:湿陷性黄土;排水方式;三轴试验;非线性泊松比函数;邓肯-张模型

中图分类号:TU411.3;P642.13⁺1 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2024)06-0020-07

Mechanical property test of collapsible loess with different drainage methods and improvement of Duncan-Chang model//DING Xusheng^{1,2}, ZHANG Lingkai^{1,2}, FAN Peipei^{1,2} (1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to analyze the deformation and failure mechanism of canal slopes, the consolidated drained and consolidated undrained triaxial shear tests were carried out on the collapsible loess of an open-channel water transfer project in Xinjiang. The triaxial test shear curve was simulated by the improved Duncan-Chang model and compared with those obtained from the Duncan-Chang model and the hump-type cubic curve model. The results show that with the increase of confining pressure, the stress-strain curve and volume change curve of consolidated drained test change from softening type to hardening type. The stress-strain curves of consolidated undrained test are all hardening type, and the pore pressure curves are all softening type. The effective cohesion obtained by the consolidated drained test is greater than that obtained by the consolidated undrained test, and the effective internal friction angle obtained by the consolidated drained test is slightly different from that obtained by the consolidated undrained test. There are nine parameters in the improved Duncan-Chang model. The Duncan-Chang model cannot reasonably describe the softening triaxial test curve, and the hump-type cubic curve model has a poor fit to the strong softening triaxial test curve, while the improved Duncan-Chang model can better describe various types of triaxial test curves of collapsible loess and has good accuracy.

Key words: collapsible loess; drainage method; triaxial test; nonlinear Poisson's ratio function; Duncan-Chang model

近年来,黄土变形规律的研究成为热点,并取得了丰富的研究成果^[1-3]。张林等^[4-5]针对重塑黄土进行了不同排水条件下的三轴试验,分析了不同排

水方式对重塑黄土的变形规律和抗剪强度的影响。Zhang等^[6]进行了原状黄土、重塑黄土的固结排水及固结不排水三轴剪切试验,讨论了原状样、重塑样

基金项目:新疆维吾尔自治区杰出青年科学基金项目(2022D01E45);新疆维吾尔自治区水利科技专项(XSXJ-2023-22);新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B03024-3)

作者简介:丁旭升(1998—),男,博士研究生,主要从事黄土的力学特性试验研究。E-mail:1759432720@qq.com

通信作者:张凌凯(1987—),男,副教授,博士,主要从事环境岩土工程研究。E-mail:xjau_zlk@163.com

在不同排水条件下的应力-应变曲线以及抗剪强度的不同。Xu 等^[7]为研究灌溉条件下黄土滑坡的机理,对原状黄土进行了各向异性固结不排水三轴试验和恒定剪切排水试验,结果表明不排水条件下的黄土强度损失与孔隙水压力的变化有关。魏世杰等^[8]通过不固结不排水三轴剪切试验研究了木质素磺酸钙掺量和养护时间对低液限黏土力学特性的影响。刘宏泰等^[9]、Zheng 等^[10]分别研究了干湿循环和冻融循环对黄土变形规律和抗剪强度的影响。

选用合适的本构模型反映岩土体的应力-应变关系,有助于保障岩土工程中数值模拟计算结果的正确性。非线性本构模型由于参数相对较少且易于获取,在岩土工程中的应用较为广泛,但其局限性也较为明显。Duncan 等^[11]根据双曲线应力-应变关系建立的邓肯-张非线性本构模型在岩土工程中的应用较为广泛,但不能对软化现象进行描述,对硬化型曲线的描述也有较大的偏差。因此众多学者针对邓肯-张非线性本构模型的局限性进行了大量的研究。陈存礼等^[12-13]基于黄土的结构性,通过引入损伤参数来对邓肯-张模型进行改进。Xu 等^[14]、刘军定等^[15]分别在邓肯-张模型中引入 Mohr-Coulomb 强度准则和联合强度准则,为考虑黄土结构性强度提供了新的方法和途径。许萍等^[16-18]对邓肯-张模型公式进行了修正,得出适合多种类型曲线的非线性模型。王丽琴等^[19]在指数型模型的基础上对模型公式进行了改进,为形态各异的黄土应力-应变曲线提供了统一的非线性模型。除此之外,也有部分学者建立了新的非线性本构模型^[20],但这些研究尚未得到广泛应用。

新疆某地的输水明渠工程穿越大面积的湿陷性黄土区域,经多年运行,渠坡经常发生变形,严重制约着输水明渠的正常运行。因此,本文对该地区湿陷性黄土进行固结排水和固结不排水三轴剪切试验,分析不同排水方式条件下黄土的变形规律、破坏形式和抗剪强度参数,并利用得到的三轴剪切试验曲线对邓肯-张模型进行改进,以更好地描述黄土的三轴试验曲线,为黄土渠坡工程施工和维护提供理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 黄土的基本物理性质

试验所用湿陷性黄土取自输水明渠工程的挖方段,颜色呈淡黄色,具有中等湿陷性。取少量黄土进行基本物理力学性质试验和 X 射线衍射试验,得到黄土的基本物理力学性质指标如下:半径小于 0.005 mm、0.005~0.075 mm 和大于 0.075 mm 的颗

粒质量分数分别为 16.3%、83.1%和 0.6%,比重为 2.71,液限为 27.92%,塑限为 15.24%,塑性指数为 12.68,最大干密度为 1.74 g/cm³,最优含水率为 15.1%;黄土的矿物组成为:石英 32.3%、伊利石 22.2%、钠长石 21.8%、方解石 13.7%、白云石 4%、亚硝酸盐 3.2%、高岭石 2.8%;不均匀系数为 10.34,曲率系数为 1.82,属于颗粒级配良好的低液限粉质黏土。

1.2 试验方案

a. 土样制备。制备试样前先将黄土烘干,通过喷水法使黄土达到最优含水率,随后密封闷料 24 h。按天然干密度计算并称取适量的黄土,分 5 次放入高 80 mm、直径为 39.1 mm 的三轴击实器中,进行分层击实和刮毛。

b. 三轴试验。三轴试验仪器为 TSZ 全自动三轴仪。对制备好的试样先采用抽气饱和法饱和 24 h,然后分别设置 100、200、300、400 kPa 4 个围压进行固结排水和固结不排水试验,当轴向应变达到 20%时试验停止。每组试样均进行一组重复试验,其中固结排水试验的剪切速率设为 0.012%/min,固结不排水试验的剪切速率设为 0.1%/min。

2 试验结果与分析

2.1 固结排水试验

图 1 为固结排水试验黄土试样的应力(q)-应变(ε_1)曲线和体积应变(ε_v)曲线(以下简称“体变曲线”)。由图 1(a)可知,轴向应变较小时($\varepsilon_1 \leq 3\%$),应力-应变曲线随着偏应力的增大呈线性增长的趋势;随着轴向应变的进一步增大($\varepsilon_1 > 3\%$),应力-应变曲线的增长趋势逐渐由线性转变为非线性。应力-应变曲线在低围压下呈弱的软化型,在高围压下转变为硬化型,这说明随着围压的增大,会导致黄土的结构发生破坏,应力-应变曲线由弱软化型过渡为弱硬化型。由图 1(b)可知,不同围压条件下的体变曲线在前期($\varepsilon_1 \leq 3\%$)表现出短暂的线性关系,随着轴向应变的增大,不同围压条件下的体变曲线发展规律各不相同,当围压为 100 kPa 和 200 kPa 时,轴向应变分别在 5%和 7%附近时出现明显的剪胀现象,当围压为 300 kPa 时,轴向应变在 10%附近时出现微弱的剪胀现象。由剪胀到剪缩的现象称为相变,在应力-应变曲线中相对应的点称为相变点(在图中用填充点表示相变点位置)。当围压为 400 kPa 时,并未出现剪胀现象,可见,相同初始干密度黄土的剪胀现象受围压的影响显著。由图 2 可知,当围压为 100、200 kPa 时,黄土试样表面出现明显的剪切破坏带,破坏模式为剪切破坏,围压为 300、400 kPa 时,

试样表面未见剪切破坏带,试样的中间位置出现明显的鼓胀变形,破坏模式为侧胀破坏,这说明随着围压增大,试样的脆性减弱,塑性增强。

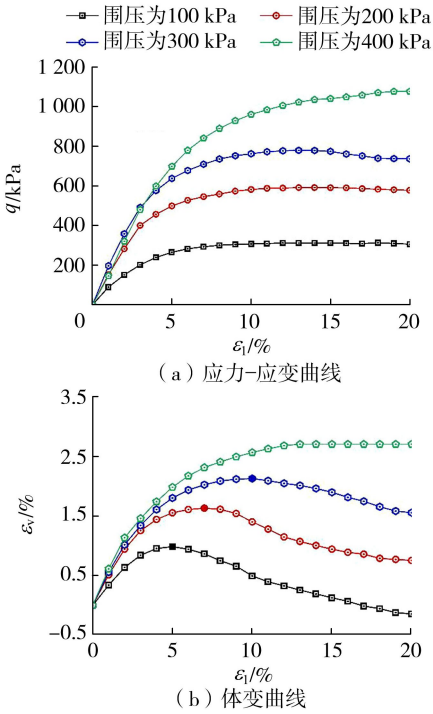


图 1 固结排水试验黄土试样的三轴变化曲线

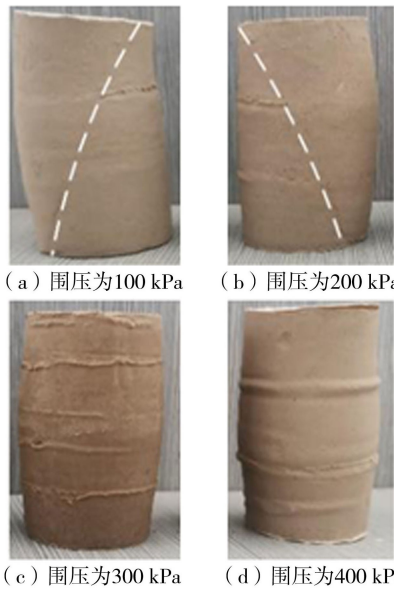


图 2 固结排水试验黄土试样加载变形结果

2.2 固结不排水试验

图 3 为固结不排水试验黄土试样的应力-应变曲线和孔压(u)曲线。由图 3(a)可知,不同围压条件下的应力-应变曲线均表现为弱硬化型,曲线未出现明显的峰值点,且随着围压的增大,应力-应变曲线的硬化现象更明显。由图 3(b)可知,不同围压条件下的孔压曲线均在前期的($\varepsilon_1 \leq 3\%$)呈现线性增长的趋势,随着围压的增大,轴向应变分别在 4%、7%、9%、12%附近时达到峰值(图中用填充点表示孔压

峰值点位置)。随后不同围压条件下的孔压曲线随着轴向应变的增大均呈现出稳定减小的变化趋势。这主要是因为剪切过程中,黄土的结构发生破坏,导致土体内部颗粒重组,孔隙体积增大,容纳孔隙水的能力增大,进而导致孔压下降。由图 4 可见,不同围压条件下的黄土试样表面均未表现出明显的剪切破坏带破坏面,中间位置出现明显的鼓胀变形,其破坏模式为侧胀破坏。

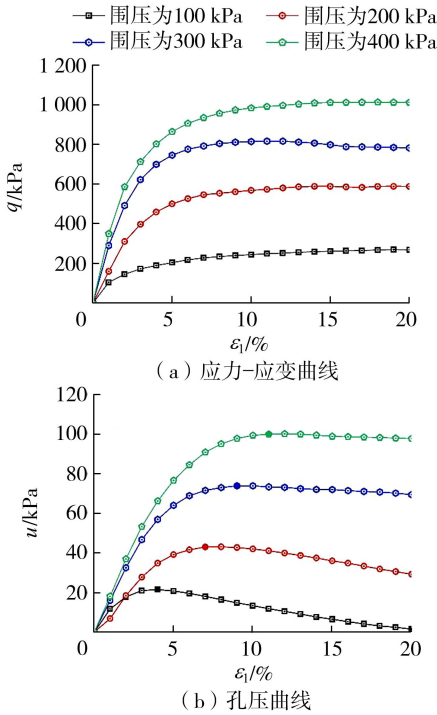


图 3 固结不排水试验黄土试样的三轴变化曲线

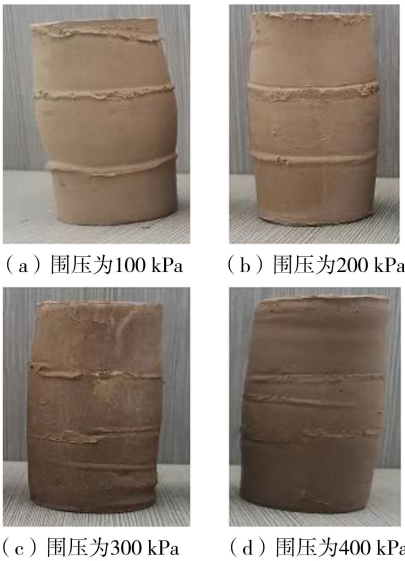


图 4 固结不排水试验黄土试样加载变形结果

2.3 不同排水方式抗剪强度参数对比

表 1 为不同排水方式黄土的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 对比,固结排水试验得到的有效黏聚力和有效内摩擦角均大于固结不排水试验的黏聚力和内摩擦

角,可见排水方式对黄土试样抗剪强度参数的影响较为显著。其中,不同排水方式对黏聚力的影响较大,对内摩擦角的影响较小。究其原因,固结排水试验在剪切过程中将土颗粒间的自由水排出,土体结构愈发紧密,土颗粒间的间距减小,其机械咬合力增大;此外,由于自由水得以大量的排出,土颗粒间的水分则以结合水为主,由于结合水的胶结作用和联结作用的影响,得到的黏聚力较大。而固结不排水试验剪切过程中自由水充斥在颗粒间,土样的密实程度未发生改变,因此其黏聚力较小。

表 1 不同排水方式黄土试样抗剪强度参数对比

排水方式	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
固结排水	18.16	33.68
固结不排水	14.64	33.55

3 邓肯-张模型的改进

3.1 常用的非线性模型

土体因其性质、应力历史等原因,三轴试验曲线的形态各不相同,一般分为硬化型曲线和软化型曲线两大类,难以通过同一个数学模型进行描述,因此刘祖典等^[21]认为最恰当的方式是根据曲线的不同形态来拟定其数学模型。因此,根据曲线的不同形态,总结现阶段常用的非线性模型公式如表 2 所示。

表 2 常用非线性本构模型公式

曲线形态	模型名称	模型公式
硬化型	邓肯-张模型 ^[11]	$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1}$
	指数模型 ^[19]	$\sigma_1 - \sigma_3 = a [1 - \exp(-b\varepsilon_1)]$
软化型	驼峰型三次曲线模型 ^[20]	$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1(a + c\varepsilon_1)}{(a + b\varepsilon_1)^2}$

注: σ_1 、 σ_3 分别为大小主应力; a 、 b 、 c 为模型参数。

邓肯-张模型计算简单,其参数意义明确,应用较为广泛,但该模型不能对软化型曲线进行模拟,对硬化型曲线的描述误差较大,在实际应用中具有一定的局限性^[22-23]。指数模型的参数虽然比邓肯-张模型少,但其同样有不能描述软化型曲线的缺点,参数确定不明确^[19]。驼峰型三次曲线模型虽然可以描述软化型曲线,但误差较大,未被广泛使用^[15,19]。

3.2 邓肯-张模型的改进过程

Kondner^[24]通过大量的三轴试验发现三轴试验的应力-应变曲线近似于双曲线,Duncan 等在此基础上,建立了一种目前被广泛使用的非线性弹性模型,称为邓肯-张模型。在邓肯-张模型中,包含 K 、 n 、 R_t 、 G 、 F 、 D 、 c 、 φ 等 8 个均可由常规三轴试验得到的参数。

众多学者的研究表明,邓肯-张模型局限性在于不能对部分剪胀型应力-应变曲线和体变曲线进行

拟合。本文在赖远明等^[18]提出的改进邓肯-张模型的基础上进行二次改进,应力-应变关系公式如下:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \varepsilon_1 / (m + n\varepsilon_1 + l\varepsilon_1^2) \tag{1}$$

式中 m 、 n 、 l 为模型参数,其具体求解公式如下:

$$m = 1/E_i \tag{2}$$

$$n = 1/(\sigma_1 - \sigma_3)_m - 2/\varepsilon_{1m}E_i \tag{3}$$

$$l = 1/\varepsilon_{1m}^2E_i \tag{4}$$

式中: E_i 为模型曲线的初始切线模量; $(\sigma_1 - \sigma_3)_m$ 、 ε_{1m} 分别为峰值偏应力和达到峰值偏应力时的轴向应变。

对式(1)进行微分求解,求出切线模量 E_i ,即

$$E_i = \frac{d\sigma_1}{d\varepsilon_1} = \frac{m - l\varepsilon_1^2}{(m + n\varepsilon_1 + l\varepsilon_1^2)^2} \tag{5}$$

依据 Janbu 公式, E_i 为

$$E_i = Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n \tag{6}$$

式中 p_a 为大气压强。在不同围压下,土体破坏时的强度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ 不同,因此根据摩尔-库伦准则,峰值偏应力可由黏聚力与内摩擦角表示,即

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_m = \frac{2ccos\varphi + 2\sigma_3sin\varphi}{1 - sin\varphi} \tag{7}$$

将式(6)代入式(2)~(4),式(7)代入式(3),经整理后代入式(5),可得切线模量表达式:

$$E_i = \frac{(\varepsilon_{1m}^2 - \varepsilon_1^2)\varepsilon_{1m}^2Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n}{\left[(\varepsilon_{1m} - \varepsilon_1)^2 + \frac{\varepsilon_{1m}^2\varepsilon_1Kp_a \left(\frac{\sigma_3}{p_a} \right)^n (1 - sin\varphi)}{2ccos\varphi + 2\sigma_3sin\varphi} \right]^2} \tag{8}$$

由式(8)可知, $E_i = f(c, \varphi, \varepsilon_{1m}, K, n)$,土体的切线模量 E_i 与 5 个参数相关。

邓肯-张 $E-\nu$ 模型假定轴向应变 ε_1 和侧向应变 ε_3 呈双曲线关系,由此推导出 $-\varepsilon_3/\varepsilon_1$ 与 ε_3 呈线性关系,即

$$-\varepsilon_3/\varepsilon_1 = F - D\varepsilon_3 \tag{9}$$

式中 F 、 D 为模型参数。

对试验体变结果进行分析计算时发现 ε_1 和 $-\varepsilon_3$ 并不是呈简单的双曲线关系, $-\varepsilon_3$ 随着 ε_1 的增大呈现出“S”形上升的趋势,因而不能简单地推导出 $-\varepsilon_3/\varepsilon_1$ 与 $-\varepsilon_3$ 呈线性关系,这可能是邓肯-张模型体变部分模拟效果较差的主要原因。图 5 为切线泊松比 ν_t 随轴向应变 ε_1 的变化曲线,可见 ν_t 随 ε_1 的增大呈现出先快速上升、后上升速率变缓的变化规律,部分 ν_t 随 ε_1 的变化曲线会在最后阶段出现略有下降的现象,可通过应力-应变模型公式表示 ν_t 与 ε_1

的变化曲线,即

$$\nu_i = -d\varepsilon_3/d\varepsilon_1 = \varepsilon_i/(r + s\varepsilon_1 + t\varepsilon_1^2) \quad (10)$$

式中 r 、 s 、 t 为模型参数,其具体求解公式如下:

$$r = 1/d\nu_i \quad (11)$$

$$s = 1/\nu_{in} - 2/\varepsilon_{in}d\nu_i \quad (12)$$

$$t = 1/\varepsilon_{in}^2d\nu_i \quad (13)$$

式中: ν_i 为初始泊松比, $d\nu_i$ 为初始泊松比的斜率; ν_{in} 、 ε_{in} 分别为峰值泊松比和达到峰值泊松比时的轴向应变。

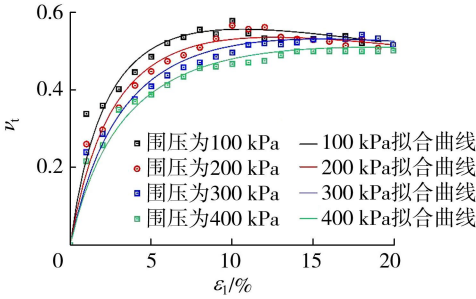


图 5 切线泊松比随轴向应变的变化曲线

设泊松比的初始斜率 $d\nu_i$ 为

$$d\nu_i = \frac{1}{r} = G - Flg \frac{\sigma_3}{p_a} \quad (14)$$

将式(14)代入式(11)~(13),经整理后代入式(10),得

$$\nu_i = \frac{\varepsilon_i \nu_{in} \varepsilon_{in}^2 \left(G - Flg \frac{\sigma_3}{p_a} \right)}{\varepsilon_i \varepsilon_{in}^2 \left(G - Flg \frac{\sigma_3}{p_a} \right) + \nu_{in} (\varepsilon_{in} - \varepsilon_i)^2} \quad (15)$$

由式(1)~(5)整合可得:

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 \varepsilon_{1m}^2}{E_i E_t \varepsilon_{1m}^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)可求出切线泊松比的完整计算公式,由于公式较为复杂,此处不进行展示。由此可知, $\nu_t = f(\varepsilon_{in}, \varepsilon_{1m}, \nu_{in}, G, F)$, 土体的切线泊松比与 5 个参数相关。

改进邓肯-张模型需要的参数有 ε_{in} 、 ε_{1m} 、 ν_{in} 、 c 、 φ 、 G 、 F 、 K 、 n 等共 9 个,比邓肯-张 E - ν 模型多一个参数。

4 模型曲线对比分析

4.1 本文试验结果拟合对比分析

4.1.1 应力-应变曲线

图 6 为不同模型应力-应变拟合曲线与本文试验结果对比。由图 6 可知:①无论是围压小于 300 kPa 的弱软化型应力-应变曲线还是围压为 400 kPa 的硬化型应力-应变曲线,改进邓肯-张模型的拟合效果都很好,邓肯-张模型不能合理描述出弱

软化型应力-应变曲线的变化趋势,驼峰型三次曲线模型的拟合效果较好。②邓肯-张模型。对于围压在 100~300 kPa 之间的弱软化型曲线,模型拟合曲线在轴向应变较大时与试验值基本接近,轴向应变较小时,拟合曲线明显大于试验值,当应力-应变曲线达到峰值点时,拟合曲线远小于试验值。对于围压为 400 kPa 的硬化型曲线,模型拟合曲线较好地描述了曲线的变化规律,但整体大于试验值。③驼峰型三次曲线模型。对于弱软化型曲线,模型拟合曲线与试验值一致,模拟效果很好;对于围压为 400 kPa 的硬化型曲线,模型拟合曲线与试验值有一定的误差,轴向应变较小时,模型拟合曲线高于试验值,随着轴向应变的增大,模型拟合曲线与试验值接近。④改进邓肯-张模型。对于弱软化型曲线,轴向应变较小时模型拟合曲线略小于试验值,但整体拟合曲线与试验值的契合度较高;对于硬化型曲线,模型拟合曲线与试验值一致。

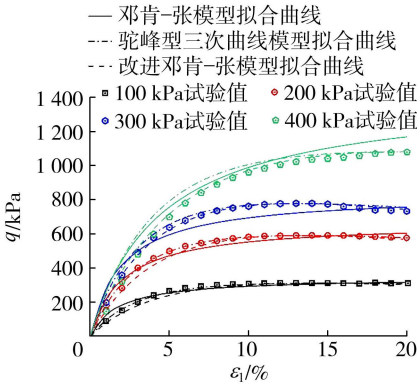


图 6 不同模型应力-应变拟合曲线与本文试验结果对比

4.1.2 体变曲线

图 7 为不同模型体变拟合曲线与本文试验结果对比。由图 7 可知:①邓肯-张模型对软化型体变曲线的拟合效果极差,对围压为 400 kPa 的硬化型体变曲线拟合效果较为理想。②驼峰型三次曲线模型对硬化型体变曲线和围压为 300 kPa 的弱软化型体变曲线拟合效果较好,对围压为 100 kPa 和 200 kPa 的强软化型体变曲线,在峰值体变点后拟合曲线与试验值相差较大,这说明驼峰型三次曲线模型不能克服描述强软化型体变曲线的不足。③改进邓肯-张模型对于硬化型体变曲线的拟合效果较好,对软化型体变曲线,模拟结果合理地反映了体变曲线达到峰值时的轴向应变位置以及峰值体变后到残余应变阶段的变化规律,克服了以往非线性模型在描述软化型体变曲线时的不足,但对于体变峰值位置,改进邓肯-张模型的体变拟合曲线略低于试验值。

4.2 其他文献试验结果拟合对比分析

为进一步分析改进邓肯-张模型对软化型曲线

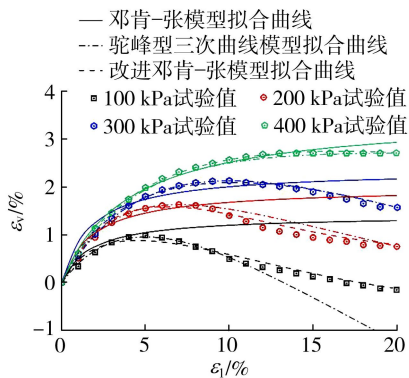


图7 不同模型体变拟合曲线与本文试验结果对比

拟合的优越性,选取文献[25]中湿陷性黄土的三轴试验曲线进行拟合。因为邓肯-张模型对软化型曲线的拟合效果不好,因此仅用驼峰型三次曲线模型与改进邓肯-张模型进行对比。

4.2.1 应力-应变曲线

图8为两模型应力-应变拟合曲线与试验值的对比。由图8可知:①不同围压下湿陷性黄土的应力-应变曲线均表现为软化型,随着围压的增大,软化现象变弱。②驼峰型三次曲线模型的拟合曲线与试验值相差较大,尤其在轴向应变较小时及峰值点后应力-应变曲线快速下降时,模型拟合曲线均高于试验值,这说明驼峰型三次曲线模型不能合理地反映出结构未破坏时土体强度上升及结构破坏后土体强度迅速下降阶段的变化规律。③在轴向应变较小时以及峰值点后应力-应变曲线快速下降时,改进邓肯-张模型拟合曲线与试验值接近,邓肯-张模型对软化型曲线的拟合效果较好,这说明了改进邓肯-张模型克服了非线性模型对软化型应力-应变曲线描述的不足,准确性及适应性较好。

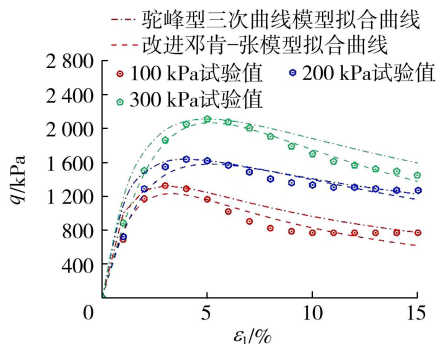


图8 两模型应力-应变拟合曲线与试验值对比

4.2.2 体变曲线

图9为两模型体变拟合曲线与试验值的对比。由图9可知:①当围压为100 kPa和200 kPa时,湿陷性黄土的体变曲线为明显的软化型曲线,在初始阶段表现为剪缩现象,随着轴向应变的增大,体变曲线由剪缩现象转变为剪胀现象,随着围压的升高,剪

胀现象变得更弱;当围压为400 kPa时,体变曲线仅表现出剪缩现象。②无论是硬化型曲线还是软化型曲线,驼峰型三次曲线模型和改进邓肯-张模型的拟合曲线与试验值基本一致,两种模型的拟合效果都较好,但在轴向应变较小时,改进邓肯-张模型的拟合曲线与试验值的契合程度好于驼峰型三次曲线模型。可见改进邓肯-张模型能够更合理地描述各种形态的三轴试验曲线。

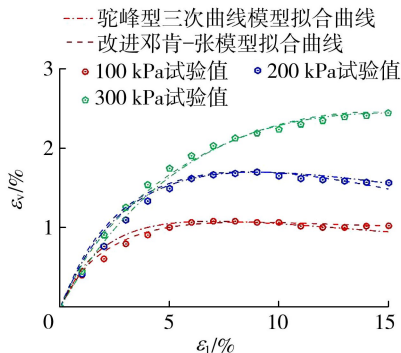


图9 两模型体变拟合曲线与试验值对比

5 结论

a. 随着围压增大,固结排水试验应力-应变曲线和体变曲线由软化型转变为硬化型,试样破坏形式由剪切破坏转变为鼓胀破坏;固结不排水试验应力-应变曲线均表现为硬化型,孔压曲线均表现为软化型,试样破坏形式均为鼓胀破坏;固结不排水试验的有效黏聚力大于固结不排水试验的黏聚力,排水方式对内摩擦角的影响较小。

b. 通过提出新的非线性泊松比函数对邓肯-张模型进行改进,并给出了模型参数的求解方法,解决了传统邓肯-张模型对软化型应力-应变曲线和体变曲线描述不足的问题。本文改进邓肯-张模型参数有 ε_{1n} 、 ε_{1m} 、 ν_{1n} 、 c 、 φ 、 G 、 F 、 K 、 n 共9个。

c. 传统邓肯-张模型不能合理描述软化型三轴试验曲线的变化趋势,驼峰型三次曲线模型对强软化型三轴试验曲线契合度较差,而改进邓肯-张模型对软化型和硬化型三轴试验曲线的拟合效果均较好。

参考文献:

[1] 王燕,姚仰平,胡玉定,等. 不同含水率原状黄土的强度与变形特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2022, 54(3): 325-330. (WANG Yan, YAO Yangping, HU Yuding, et al. Experimental study on strength and deformation characteristics of intact loess with different water content[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition),

- 2022,54(3):325-330. (in Chinese))
- [2] 贺登芳,黄英,唐芸黎,等. 干湿循环作用下土体的三轴剪切特性研究现状[J]. 中国水运:下半月,2021,21(5):144-145. (HE Dengfang, HUANG Ying, TANG Yunli, et al. Research status of triaxial shear characteristics of soil under dry-wet cycle [J]. China Water Transport,2021,21(5):144-145. (in Chinese))
- [3] 李春海,方祥位,汪龙,等. Q_2 黄土力学性质的研究进展与展望[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(增刊1):1788-1793. (LI Chunhai, FANG Xiangwei, WANG Long, et al. Review of recent studies on mechanical properties of Q_2 loess and its research prospects[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9 (Sup1): 1788-1793. (in Chinese))
- [4] 张林,游子龙,陈存礼,等. 不同排水条件下饱和重塑黄土的三轴剪切强度特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版),2022,58(5):600-606. (ZHANG Lin, YOU Zilong, CHEN Cunli, et al. Triaxial shear strength characteristics of saturated remolded loess under different drainage conditions[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences),2022,58(5):600-606. (in Chinese))
- [5] 张林,陈存礼,张登飞,等. 饱和重塑黄土在部分排水条件下的力学特性研究[J]. 水力发电学报,2019,38(12):112-120. (ZHANG Lin, CHEN Cunli, ZHANG Dengfei, et al. Mechanical properties of saturated remolded loess under partial drainage conditions [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38 (12): 112-120. (in Chinese))
- [6] ZHANG Shuo, LIANG Chunhang, ZHENG Chao, et al. Comparative study on triaxial test of undisturbed and remolded loess [J]. Mathematical Problems in Engineering,2022,2022:6392909.
- [7] XU Ling, DAI Fuchu, THAM L G, et al. Landslides in the transitional slopes between a loess platform and river terrace, Northwest China [J]. Environmental & Engineering Geoscience,2011,17(3):267-279.
- [8] 魏世杰,赵洪岩,郝社锋,等. 木质素磺酸钙改良的低液限黏土三轴压缩特性[J]. 水利水电科技进展,2023,43(5):100-106. (WEI Shijie, ZHAO Hongyan, HAO Shefeng, et al. Triaxial compression properties of calcium lignosulfonate-modified low liquid limit clay[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2023,43(5):100-106. (in Chinese))
- [9] 刘宏泰,张爱军,段涛,等. 干湿循环对重塑黄土强度和渗透性的影响[J]. 水利水运工程学报,2010(4):38-42. (LIU Hongtai, ZHANG Aijun, DUAN Tao, et al. The influence of alternate dry-wet on the strength and permeability of remolded loess [J]. Hydro-Science and Engineering,2010(4):38-42. (in Chinese))
- [10] ZHENG Fang, SHAO Shengjun, WANG Songhe. Effect of freeze-thaw cycles on the strength behaviour of recompacted loess in true triaxial tests[J]. Cold Regions Science and Technology,2021,181:103172.
- [11] DUNCAN J M, CHANG C Y. Nonlinear analysis of stress and strain in soils[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division,1970,96(5):1629-1653.
- [12] 陈存礼,何军芳,杨鹏. 考虑结构性影响的原状黄土本构关系[J]. 岩土力学,2007,28(11):2284-2290. (CHEN Cunli, HE Junfang, YANG Peng. Constitutive relationship of intact loess considering structural effect [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28 (11): 2284-2290. (in Chinese))
- [13] 张秋敏,裴利华,桂跃,等. 适用于强结构性黏土的修正邓肯-张模型研究[J]. 水利水运工程学报,2022(2):117-125. (ZHANG Qiumin, PEI Lihua, GUI Yue, et al. Research on modified Duncan-Chang model for strong structural clay [J]. Hydro-Science and Engineering, 2022 (2):117-125. (in Chinese))
- [14] XU X, DAI Z H, CHEN L J, et al. Nonlinear elastic-perfectly plastic model of soil and its numerical implementation and application[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering,2022,59(3):215-223.
- [15] 刘军定,李荣建,孙萍,等. 基于结构性黄土联合强度的邓肯-张非线性本构模型[J]. 岩土工程学报,2018,40(增刊1):124-128. (LIU Junding, LI Rongjian, SUN Ping, et al. Duncan-Chang nonlinear constitutive model based on joint strength theory of structural loess [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (Sup1):124-128. (in Chinese))
- [16] 许萍,邵生俊,张喆,等. 真三轴应力条件下修正邓肯-张模型的试验研究[J]. 岩土力学,2013,34(12):3359-3364. (XU Ping, SHAO Shengjun, ZHANG Zhe, et al. Experimental study on modified Duncan-Chang model under true triaxial stresses[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013,34(12):3359-3364. (in Chinese))
- [17] 毛国成,陈晓斌,王暄,等. 基于非线性泊松比修正的邓肯-张 $E-\nu$ 模型及应用研究[J]. 铁道科学与工程学报,2019,16(1):71-78. (MAO Guocheng, CHEN Xiaobin, WANG Xuan, et al. Modified Duncan-Chang $E-\nu$ constitutive model using nonlinear Poisson's ratio and its application analysis [J]. Journal of Railway Science and Engineering,2019,16(1):71-78. (in Chinese))
- [18] 赖远明,程红彬,高志华,等. 冻结砂土的应力-应变关系及非线性莫尔强度准则[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(8):1612-1617. (LAI Yuanming, CHENG Hongbin, GAO Zhihua, et al. Stress-strain relationship and nonlinear Mohr strength criterion of frozen sand clay [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(8):1612-1617. (in Chinese))

(下转第 40 页)

- chloride solutions [J]. Construction and Building Materials, 2017, 144: 238-251.
- [15] CAI H, LIU X. Freeze-thaw durability of concrete; ice formation process in pores [J]. Cement and Concrete Research, 1998, 28(9): 1281-1287.
- [16] MCCARTER W J, STARRS G, CHRISP T M, et al. Conductivity/activation energy relationships for cement-based materials undergoing cyclic thermal excursions [J]. Journal of Materials Science, 2015, 50(3): 1129-1140.
- [17] DIAMOND S, DOLCH W L. Generalized log-normal distribution of pore sizes in hydrated cement paste [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1972, 28(1): 234-244.
- [18] 王萧萧,刘畅,张菊,等. 常年冻土区混凝土孔隙结冰规律对抗压强度的影响 [J]. 工业建筑, 2021, 51(9): 197-201. (WANG Xiaoxiao, LIU Chang, ZHANG Ju, et al. Effect of freezing laws for concrete pores on compressive strength in permafrost regions [J]. Industrial Construction, 2021, 51(9): 197-201. (in Chinese))
- [19] SHEN Yanjun, LYU You, YANG Hongwei, et al. Effect of different ice contents on heat transfer and mechanical properties of concrete [J]. Cold Regions Science and Technology, 2022, 199: 103570.
- [20] 王腾. 碱矿渣混凝土介质传输性能及氯离子传输试验方法研究 [D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- [21] LI Wenting, POUR-GHAZ M, CASTRO J, et al. Water absorption and critical degree of saturation relating to freeze-thaw damage in concrete pavement joints [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 24(3): 299-307.
- [22] WANG Yi, GONG Fuyuan, ZHANG Dawei, et al. Estimation of ice content in mortar based on electrical measurements under freeze-thaw cycle [J]. Journal of Advanced Concrete Technology, 2016, 14(2): 35-46.
- [23] 姜春萌,宫经伟,唐新军,等. 基于 PPR 的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法 [J]. 建筑材料学报, 2019, 22(3): 333-340. (JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression [J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(3): 333-340. (in Chinese))
- [24] 杨志豪,何建新,李志华,等. 基于 PPR-TOPSIS 分析法的沥青混凝土配合比方案优选 [J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(2): 82-88. (YANG Zhihao, HE Jianxin, LI Zhihua, et al. Scheme optimization of mix proportion for asphalt concrete based on PPR-TOPSIS analysis [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43(2): 82-88. (in Chinese))
- [25] 郭晓芳. 混凝土快冻与慢冻试验方法浅析 [J]. 四川水泥, 2016(12): 336-337. (GUO Xiaofang. Simple analyzed researching on the speediness and low speed frost of concrete [J]. Sichuan Cement, 2016(12): 336-337. (in Chinese))
- [26] LIU Lin, SUN Can, GENG Guoqing, et al. Influence of decalcification on structural and mechanical properties of synthetic calcium silicate hydrate (C-S-H) [J]. Cement and Concrete Research, 2019, 123: 105793.
- (收稿日期: 2023 - 11 - 24 编辑: 俞云利)

(上接第 26 页)

- [19] 王丽琴,鹿忠刚,邵生俊. 黄土非线性应力-应变新模型及对比研究 [J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1724-1730. (WANG Liqin, LU Zhonggang, SHAO Shengjun. New nonlinear stress-strain model of loess and comparative research [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1724-1730. (in Chinese))
- [20] 沈珠江. 考虑剪胀性的土和石料的非线性应力应变模式 [J]. 水利水运科学研究, 1986(4): 1-14. (SHEN Zhujiang. A nonlinear dilatant stress-strain model for soils and rock materials [J]. Hydro-Science and Engineering, 1986(4): 1-14. (in Chinese))
- [21] 刘祖典,李靖,郭增玉,等. 陕西关中黄土变形特性和变形参数的探讨 [J]. 岩土工程学报, 1984, 6(3): 24-34. (LIU Zudian, LI Jing, GUO Zengyu, et al. Deformation behaviours and deformation parameter of loess in Shaanxi district [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 6(3): 24-34. (in Chinese))
- [22] AL-SHAYEA N, ABDULJAUWAD S, BASHIR R, et al. Determination of parameters for a hyperbolic model of soils [J]. Geotechnical Engineering, 2003, 156(2): 105-117.
- [23] LEE K H, JU Y T, SHIN D S, et al. Development of a modified Duncan-Chang model for soils [C] // BLOSS D M. Proceedings of the 10th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics. Leiden, Netherlands: Taylor and Francis, 2007: 93-98.
- [24] KONDRER R L. Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils [J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1963, 89(1): 115-143.
- [25] 罗爱忠,邵生俊,陈昌禄,等. 黄土的修正上下加载面模型研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 128-133. (LUO Aizhong, SHAO Shengjun, CHEN Changlu, et al. Research on modified super-loading and sub-loading yield surface model of loess [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Sup2): 128-133. (in Chinese))
- (收稿日期: 2023 - 11 - 04 编辑: 熊水斌)