

考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型

谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 高敬轩

The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction

TAN Weijia, WEI Yunjie, WANG Junhao, and GAO Jingxuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105022>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究

An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models

魏建柄, 刘卫斌 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 67-73

高应力区岩石统计损伤本构模型研究

A study of the statistical damage constitutive model of rock in high stress areas

贾逸, 魏良帅, 黄安邦, 和铭, 黄细超, 蓝康文 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 118-118

一种基于弹性能释放率的岩石新型统计损伤本构模型

A statistical damage constitutive rock model based on elastic energy release rate

刘文博, 孙博一, 陈雷, 张树光 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 88-95

考虑基质吸力作用的Newmark改进模型在地震滑坡风险评价中的应用

Application of Newmark improved model considering matrix suction in earthquake landslide risk assessment

冯卫, 唐亚明, 赵法锁, 陈新建 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 154-160

不同类型黏土的强度特性及其预测

Strength of different clayey soils and its prediction

陈嘉伟, 高游, 付俊杰, 李东映 水文地质工程地质. 2020, 47(3): 101-106

排弃物料力学性质大型三轴剪切试验研究

A study of large-scale triaxial shear test of the mechanical properties of abandoned materials

刘小平, 刘天林, 曹晓毅, 张宝元, 王玉涛 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 191-198



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202105022

谭维佳, 魏云杰, 王俊豪, 等. 考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型[J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(1): 84-91.
TAN Weijia, WEI Yunjie, WANG Junhao, *et al.* The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(1): 84-91.

考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤修正模型

谭维佳¹, 魏云杰², 王俊豪², 高敬轩¹

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 为反映非饱和地基土变形全过程, 以某基础工程非饱和土为研究对象, 开展固结排水三轴压缩试验。研究发现, 非饱和土的偏应力-应变曲线形态近似双曲线, 基质吸力对土体力学行为影响十分明显, 基质吸力越大, 土体偏应力越高。根据非饱和土变形特性及工程特点, 选取邓肯-张双曲线模型作为基础模型, 引入统计损伤理论, 假设非饱和土微元强度服从 Weibull 概率密度分布, 建立邓肯-张统计损伤模型。通过搭建初始切线模量与基质吸力的联系, 建立一种新的考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤模型。给出参数解析方法, 得到 Weibull 分布参数经验表达式, 从而修正模型。分析不同基质吸力条件下非饱和土损伤累积规律, 采用所建模型和传统邓肯-张模型对比验证非饱和土偏应力-应变试验曲线, 证明所建模型的可行性和合理性。研究成果为非饱和土的力学特性研究及辨识模拟提供一定参考。

关键词: 非饱和土; 基质吸力; 初始切线模量; 邓肯-张模型; 统计损伤

中图分类号: TU41

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)01-0084-08

The Duncan-Chang statistical damage correction model of unsaturated soil considering matric suction

TAN Weijia¹, WEI Yunjie², WANG Junhao², GAO Jingxuan¹

(1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to reflect the whole deformation process of unsaturated foundation soil, the consolidated drained triaxial compression test is carried out on the unsaturated soil of a foundation project. It is found that the partial stress-strain curve of unsaturated soil is similar to hyperbola, and the matrix suction has an obvious influence on the mechanical behavior of soil. The greater the matrix suction, the higher the partial stress of soil. According to the deformation characteristics and engineering characteristics of unsaturated soil, the Duncan-Chang hyperbolic model is selected as the basic model, and the statistical damage theory is introduced. Assuming that the micro element strength of unsaturated soil obeys the Weibull probability density distribution, the Duncan-Chang statistical damage model is established. By establishing the relationship between the initial tangent modulus and matrix suction, a new Duncan-Chang statistical damage model of the unsaturated soil considering matrix suction is established. The parameter analysis method is given, and the empirical expression of the Weibull

收稿日期: 2021-05-17; 修订日期: 2021-09-09

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 第二次青藏高原科考“重大工程扰动灾害及风险”(2019QZKK0904); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金(300102260105); 三峡后续工作地质灾害防治项目(0001212021CC60001); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190647)

第一作者: 谭维佳(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事工程地质及地质灾害防治研究。E-mail: tv7788@163.com

通讯作者: 魏云杰(1973-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事岩体结构特性、地质灾害防治技术、地下空间开发利用等研究。

E-mail: wyl1973@126.com

distribution parameters is obtained, which is used to modify the model. The damage accumulation law of unsaturated soil under different matrix suction conditions is analyzed, and the partial stress-strain test curve of unsaturated soil is compared with the traditional Duncan-Chang model, which proves the feasibility and rationality of the model. The research results provide a certain reference for the study of mechanical properties and identification simulation of unsaturated soil.

Keywords: unsaturated soil; matric suction; initial tangent modulus; Duncan-Chang model; statistical damage

非饱和土是一种固液气三相体系土,其力学性能明显复杂于固液二相体系饱和土^[1-2],基质吸力是研究非饱和土力学特性的重要参数,将基质吸力有机地纳入非饱和土变形过程模拟预测是非饱和土力学的重难点^[3-4]。

目前国内外考虑基质吸力的非饱和土力学特性研究结果较为丰硕。Liu 等^[5]分析了基质吸力对非饱和土抗剪强度的影响。孙德安^[6]研究了饱和度对非饱和土对应力-应变关系和强度的影响。宋友建等^[7]探索不同吸力路径下非饱和土的强度变化规律。刘文化^[8]研究了干湿循环作用下非饱和土的力学性能。杨庆^[9]开展了初始状态对非饱和土宏观力学特性的影响研究。张庆海^[10]以冻融干湿作为试验因素,探讨对非饱和土力学特性的影响。以上工作丰富了不同试验条件下非饱和土力学特性的研究,非饱和土力学特性研究还应与本构模型相结合。赵成刚等^[11]将非饱和土本构模型归纳为弹塑性模型、广义吸力模型、损伤模型以及基于热力学的混合物理论模型。魏建柄等^[12]基于粉质黏土的非饱和蠕变试验,尝试改进 Mesri 模型和 Log-Modified 模型,改进后的 2 个模型为应力-基质吸力-应变-时间模型。Farouk 等^[13]通过数值模拟建立了预测非饱和土体含水量和基质吸力的模型。李顺群等^[14]通过 Brooks 和 Corey 所建基质吸力与饱和度的经验关系,引入到 Fredlund 模型之中,构建一种考虑基质吸力变化的非饱和土本构模型。Hamid 等^[15]提出一种基质吸力、净正应力双变量的非饱和土界面本构模型。秦冰等^[16]推导了基于混合物理论同时考虑热-水-力的本构模型。杨明辉等^[17]采用扩展 Mohr-Coulomb 准则模拟非饱和土微单元的承载能力,考虑外部荷载和基质吸力对非饱和土变形的影响,建立考虑基质吸力的统计损伤模型。章志荣^[18]将三剪统一准则应用于非饱和土,建立考虑基质吸力的修正剑桥模型。上述工作丰富了非饱和土本构模型研究,所建本构模型尽管能考虑基质吸力的变化,但多数模型未考虑土体内部损伤的累积。

邓肯-张模型是一种双曲线形态的弹性本构模型,

在基础工程、边坡工程中应用广泛。本文开展非饱和土三轴固结排水试验,根据非饱和土变形特性及工程特点,在传统邓肯-张模型的基础上,引入统计损伤理论,将非饱和土力学性态的变化简化为损伤累积扩展的过程,构建邓肯-张统计损伤模型。通过搭建初始切线模量与基质吸力的联系,建立一种新的考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤模型。给出参数解析方法,得到概率密度分布参数经验表达式,从而修正模型。分析损伤累积过程,辨识验证模型可行性和合理性。研究成果为非饱和土的力学特性研究及辨识模拟提供一定参考。

1 非饱和土固结排水三轴压缩试验

试验土样取自重庆某基坑工地现场,土样物理力学指标为:平均湿密度 2.13 g/cm^3 ,干密度 1.54 g/cm^3 ,孔隙比 1.6,含水率 16.7%,液限 28.7%,塑限 16.9%,塑性指数为 11.8,为粉质黏土,黏聚力 54.9 kPa ,内摩擦角 31.3° 。在实验室先风干土样,待自然风干后将其碾碎过 2 mm 筛,通过击实法制备直径 60 mm 、高 120 mm 的圆柱体重塑试样。击实后以干密度 1.54 g/cm^3 称取所需质量的土样分 4 层装入饱和容器,分层击实直至最后一层,干密度误差控制在 0.02 g/cm^3 以内,然后抽气饱和,保鲜膜密封静置 1 d,使水分均匀扩散。

采用 FSR-6 型非饱和土三轴蠕变仪开展基质吸力控制下的非饱和土固结排水三轴压缩试验,将围压设置为 100 kPa 。参照已有研究结果^[7, 17-18], $100 \sim 400 \text{ kPa}$ 是一般非饱和土的基质吸力常见范围,故将本文试验中基质吸力分别设为 $100, 200, 300, 400 \text{ kPa}$,不同基质吸力下的试验结果如图 1 所示。

由图 1 可看出,本次试验非饱和土的偏应力-应变曲线形态近似双曲线,基质吸力对土体力学行为影响十分明显,基质吸力越大,土体偏应力越高。在应变值小于 1% 时,土体偏应力-应变曲线近似表现为线弹性,随着土体的持续受压,曲线斜率逐渐递减,逐渐向非线性弹性转变。在应力作用下,非饱和土力学性态发生改变,土体内部微缺陷、微裂隙不断发育延展,内部

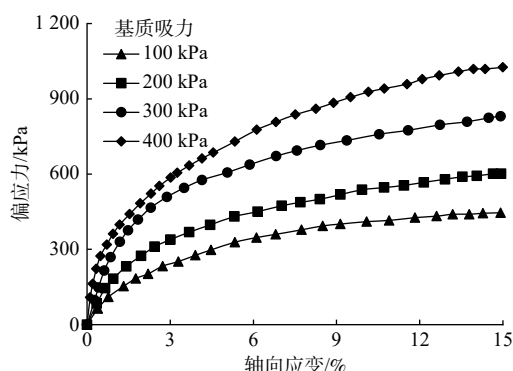


图 1 非饱和土偏应力-应变曲线

Fig. 1 Deviatoric stress-strain curves of unsaturated soil

损伤不断累积扩展。传统邓肯-张模型是双曲线形态的本构模型, 尽管在土力学和基础工程中广泛应用, 但未考虑土体力学性态在应力作用下的改变, 统计损伤理论可将这种力学性态改变的过程简化为损伤累积扩展, 由此在邓肯-张双曲线模型的基础上, 引入统计损伤理论, 同时考虑基质吸力的变化, 以期建立较为全面的非饱和土邓肯-张统计损伤本构模型。

2 考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤模型

2.1 邓肯-张模型及损伤变量

根据 Lemaitre 应变等效性假说^[19], 宏观应力 σ 作用导致材料受损部分发生的应变 ε 与有效应力 σ' 作用导致材料未受损部分发生的应变 ε' 相等, 于是有:

$$\varepsilon = \varepsilon' \quad (1)$$

$$\sigma' = \frac{\sigma}{1-D} \quad (2)$$

$$D = \frac{N_t}{N} \quad (3)$$

式中: D ——损伤变量;

N_t ——土体受损单元数;

N ——土体微单元总数, 其中 $N_t \leq N$, 故 $D \in [0, 1]$ 。

考虑到非饱和土应力-应变关系的双曲线形态, 传统邓肯-张模型是一种双曲线非线性模型, 故引用传统邓肯-张模型作为本文非饱和土的基础模型, 其应力-应变关系表示为:

$$\sigma'_1 - \sigma'_3 = \frac{\varepsilon'_1}{a + b\varepsilon'_1} \quad (4)$$

式中: a 、 b ——可通过试验成果确定的相关参数;

σ_1 、 σ_3 ——最大和最小主应力;

σ'_1 、 σ'_3 ——最大和最小主应力有效应力;

ε_1 ——轴向应变;

ε'_1 ——土体未受损伤部分的轴向应变。

利用式(2)对式(4)进行损伤演化可得:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} (1-D) \quad (5)$$

实际上, 若通过式(3)描述损伤发展具有操作难度, 土体材料受损微单元数目难以测定, 故从土体微元强度的随机性出发, 假设非饱和土微元强度 F 服从某一类概率分布函数 $Q(F)$, 于是将 D 定义为:

$$D = \int_0^F Q(F) d\sigma' \quad (6)$$

式中: F ——非饱和土微元强度。

F 与有效应力 σ' 可表示为如下关系:

$$F = f(\sigma') \quad (7)$$

2.2 邓肯-张统计损伤模型

统计分布主要有 Weibull 分布、幂函数分布、正态分布等^[20], Weibull 分布因形式简练、结构简单得到广泛应用, Weibull 概率密度函数为:

$$Q(F) = \frac{m}{F_0} \left(\frac{F}{F_0} \right)^{m-1} \exp \left[-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (8)$$

式中: m 、 F_0 ——Weibull 分布参数。

将式(8)代入式(7)有:

$$D = 1 - \exp \left[-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (9)$$

参考文献[21], 结合非饱和土变形破坏特征, 引入 Mises 屈服准则, 于是将 F 表示为:

$$F = f(\sigma') = \sqrt{J_2} \quad (10)$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2] \quad (11)$$

式中: J_2 ——应力偏量第二不变量;

σ_2 ——中间主应力。

在土体三轴压缩试验中有 $\sigma_2 = \sigma_3$, 则式(11)可写为:

$$J_2 = \frac{1}{3} [(\sigma'_1 - \sigma'_3)^2] \quad (12)$$

将式(9)代入式(5)可得:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b\varepsilon_1} \exp \left[-\left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (13)$$

式(13)即本文所建未考虑基质吸力的邓肯-张统计损伤模型。

2.3 考虑基质吸力的邓肯-张统计损伤模型

根据 Hooke 定律确定初始切线模量 E_u , 由于本文对传统邓肯-张模型进行了损伤演化, 故 E_u 为:

$$E_u = \frac{d[(\sigma_1 - \sigma_3)(1 - D)]}{d\varepsilon_1} \Big|_{\varepsilon_1=0} \quad (14)$$

土体三轴压缩试验刚开始时,认为此时土体材料内部未受损,对应 $D=0$,于是变形式(14)可得:

$$E_u = \frac{d(\sigma_1 - \sigma_3)}{d\varepsilon_1} \Big|_{\varepsilon_1=0} = \frac{a}{(a + b\varepsilon_1)^2} \Big|_{\varepsilon_1=0} = \frac{1}{a} \quad (15)$$

将式(15)代入式(13)有:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{E_u} + b\varepsilon_1} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (16)$$

非饱和土是固液气三项体系土,其力学行为受基质吸力 s 影响尤为明显,由此应建立应力-基质吸力-应变力学模型,将 s 作为独立变量体现在本构模型中。Janbu^[22] 研究发现初始切线模量 E_u 与 σ_3 在双对数坐标中线性相关,即 E_u 是 σ_3 的幂函数,文献[23]认为 E_u 与 s 之间亦同样存在幂函数关系,于是将本文及相关文献[23][24]中土体的 E_u 和 s 进行拟合,得到拟合曲线如图2所示。

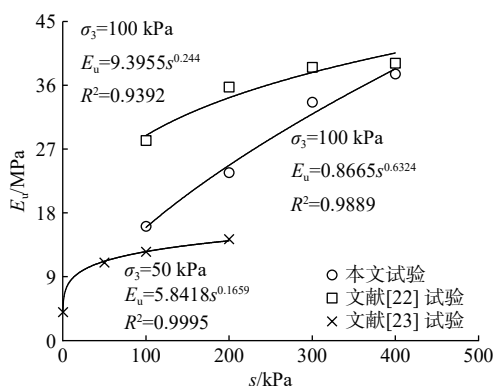


图2 E_u 和 s 拟合曲线

Fig. 2 Fitting curves between E_u and s

由图2可看出,本文及文献[23][24]中土体的 E_u 和 s 之间幂次拟合关系良好,故将 E_u 与 s 之间采用如下幂函数关系表达式^[22-23]:

$$E_u = T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c \quad (17)$$

式中: p_a ——大气压(101.33 kPa);

T 、 c ——与基质吸力 s 有关的常数。

将式(17)代入式(16)可得:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b\varepsilon_1} \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (18)$$

式(18)即为本文所建考虑基质吸力的邓肯-张统

计损伤模型。

3 模型参数求解

本文所建模型参数有 b 、 c 、 T 、 m 和 F_0 , 其中 b 为邓肯-张模型参数, c 和 T 为与基质吸力 s 有关的常数, m 和 F_0 为 Weibull 分布参数。

3.1 参数 b 、 c 和 T

依照邓肯-张模型中求取参数 b 的方法,取图1中偏应力-应变曲线的极限偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 为:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \lim_{\varepsilon_1 \rightarrow \infty} (\sigma_1 - \sigma_3) = \lim_{\varepsilon_1 \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon_1 (1 - D)}{\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b\varepsilon_1} \quad (19)$$

土体三轴压缩试验中,一般以 15% 应变值为标准求取土体强度,尽管土体实际应变值能达到 15% 以上,但永远不可能从物理意义上满足 $\varepsilon_1 \rightarrow \infty$ 的条件,故 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的取值范围为:

$$\lim_{\varepsilon_1 \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon_1 (1 - D)}{\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b\varepsilon_1} \leq (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \leq \lim_{\varepsilon_1 \rightarrow \infty} \frac{\varepsilon_1}{\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b\varepsilon_1} \quad (20)$$

根据分数极限求导的数学计算方法,化简式(20)可得:

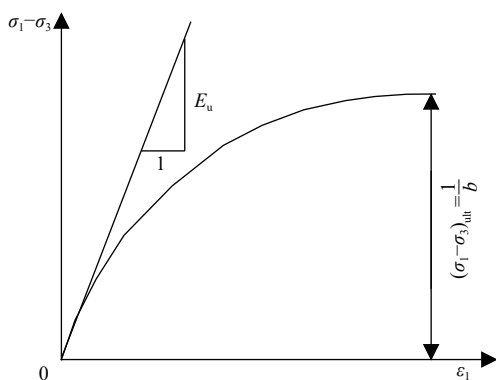
$$\frac{1 - D}{b} \leq (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \leq \frac{1}{b} \quad (21)$$

鉴于极限偏差应力的极限性,同时考虑到模型计算可行性,取 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的最大值,于是有:

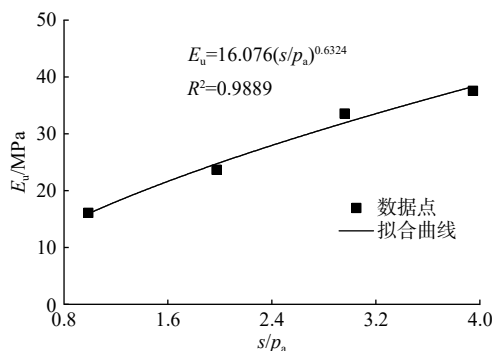
$$(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} = \frac{1}{b} \quad (22)$$

由式(22)可看出,参数 b 为 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数,参数 c 、 T 与 E_u 紧密关联,而 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 和 E_u 皆可通过试验结果确定,求解示意图如图3所示。 E_u 取偏应力-应变曲线的初始切线, b 取偏应力-应变曲线的极限偏差应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 的倒数, E_u 和 b 如表1所示。

本文模型基于式(17)搭建了初始切线模量 E_u 和基质吸力 s 之间的联系,在式(17)中 E_u 表现出与参数 T 和 c 之间的幂次关系,因此模型改进后,仍可用式(17)求解参数 T 和 c 。采用式(17)拟合不同 s/p_a 值下的 E_u 值,绘制拟合曲线,如图4所示。由图4可看出, E_u 与参数 T 和 c 之间的幂次关系拟合良好, R^2 达到 0.988 9,采用本文所建考虑基质吸力的邓肯-张统计损伤模型进行曲线辨识时,不同基质吸力条件下的参数 T 取为 16.076, c 取为 0.632 4。

图 3 $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ 和 E_u 求解示意图Fig. 3 Schematic diagram of solving $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ult}$ and E_u 表 1 E_u 和 b 值Table 1 E_u and b values

s/kPa	E_u/MPa	$b/10^{-4}$
100	16.113	22.436
200	23.684	16.628
300	33.601	12.041
400	37.583	9.747

图 4 E_u 和 s/p_a 之间的拟合曲线Fig. 4 Fitting curves between E_u and s/p_a

3.2 参数 m 、 F_0

式(18)可变形为:

$$\frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \left[\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b \varepsilon_1 \right]}{\varepsilon_1} = \exp \left[- \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \right] \quad (23)$$

在式(23)等号两侧同时取对数,有:

$$\ln \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \left[\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b \varepsilon_1 \right]}{\varepsilon_1} \right\} = - \left(\frac{F}{F_0} \right)^m \quad (24)$$

对式(24)等号两侧再次取对数,有:

$$\ln \left\{ \ln \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \left[\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b \varepsilon_1 \right]}{\varepsilon_1} \right\} \right\} = m \ln F - m \ln F_0 \quad (25)$$

式(25)实际是一个线性方程,将式(25)变形为:

$$Y = mX + \beta \quad (26)$$

$$Y = \ln \left\{ \ln \left\{ \frac{(\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \left[\frac{1}{T p_a \left(\frac{s}{p_a} \right)^c} + b \varepsilon_1 \right]}{\varepsilon_1} \right\} \right\},$$

$$X = \ln F, \quad \beta = -m \ln F_0$$

首先求取参数 b 、 c 和 T , 代入式(26)后通过线性拟合的方法, 可得到参数 m 、 F_0 , 线性拟合结果如表 2 所列。

表 2 参数 m 和 F_0 值Table 2 Values of parameters m and F_0

s/kPa	m	F_0/kPa	β	R^2
100	0.364	385.720	-1.569	0.976 2
200	0.487	527.936	-2.376	0.984 1
300	0.612	656.831	-4.083	0.982 5
400	0.793	703.367	-5.954	0.976 3

3.3 模型修正

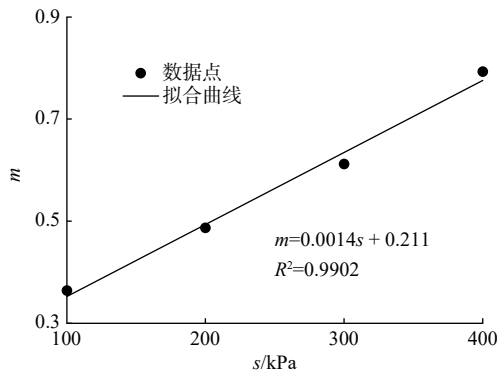
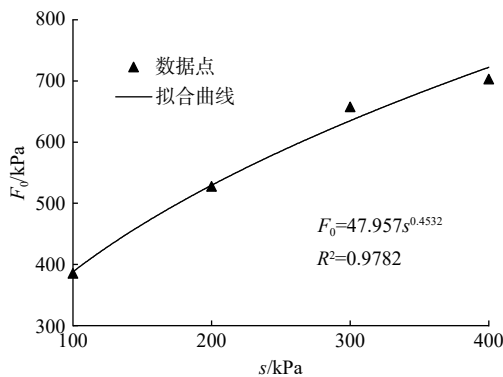
表 2 中给出了不同基质吸力下的 m 、 F_0 值, 分别拟合回归 m 、 F_0 与 s 之间的关系, 拟合曲线分别如图 5、图 6 所示, 拟合回归得到的修正后经验公式为:

$$\left. \begin{aligned} m &= 0.0014s + 0.211 \\ F_0 &= 47.957s^{0.4532} \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

从图 5、图 6 可看出, m 与 s 线性相关, R^2 为 0.990 2, F_0 与 s 表现为幂次关系, R^2 为 0.978 2。将式(27)代入式(18), 在本文所建模型中添加 m 、 F_0 的修正后经验公式, 便能得到修正后的邓肯-张统计损伤模型的经验表达式, 此时经验表达式未知参数仅有 b 、 c 和 T , b 、 c 和 T 通过试验结果确定, 与偏应力和应变紧密关联, 便于在工程实践中应用。

4 损伤分析及模型验证

将已确定的模型参数代入式(9), 绘制损伤变量

图 5 m 与 s 的拟合关系曲线Fig. 5 Fitting relationship between m and s 图 6 F_0 与 s 的拟合关系曲线Fig. 6 Relationship between F_0 and s

累积曲线, 如图 7 所示。

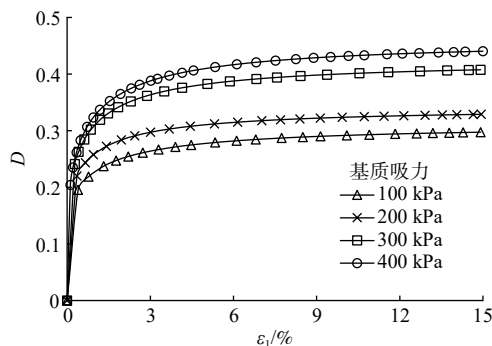


图 7 损伤变量累积曲线

Fig. 7 Cumulative curves of damage variables

由图 7 可看出, 随着应变的增加, 土体损伤变量逐渐递增。在 1% 应变值以前, 损伤变量急剧累积, 应变值 1% 以后损伤变量累积速度逐渐放缓, 当应变达到 15% 时, 损伤变量已趋于收敛。同一应变值时, 较高基质吸力的损伤变量总是大于较低基质吸力, 这说明基质吸力对非饱和土的损伤累积起促进作用, 工程实践中应引起重视。

为验证所建模型的可行性和合理性, 通过所建模

型和传统邓肯-张模型对本文非饱和土偏应力-应变曲线进行辨识, 得到计算值和试验值对比曲线, 如图 8 所示。

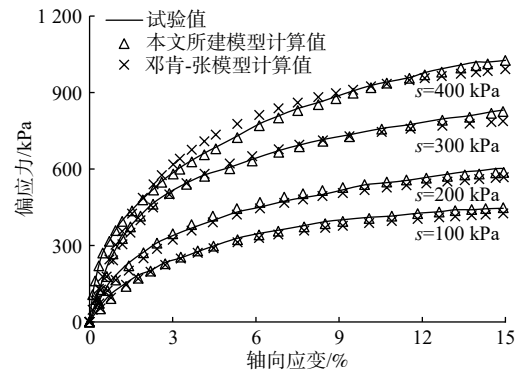


图 8 本文非饱和黏土计算值与试验值对比曲线

Fig. 8 Comparison curves between the calculated values and experimental values of the unsaturated soil of this paper

由图 8 可看出, 本文所建模型的辨识能力较强, 平均 R^2 为 0.979 8, 能较好地描述非饱和土偏应力-应变曲线, 传统邓肯-张模型辨识非饱和土偏应力-应变曲线时存在较大偏差, 平均 R^2 为 0.942 6, 其计算值在应变 10% 以后略低于试验值。总体上, 本文所建模型拟合效果较好, 精度较高, 能较为准确地描述非饱和土的变形破坏全过程。

本文试验土样为非饱和粉质黏土, 为进一步验证所建模型的适用性, 引用文献 [24] 中的非饱和粉质黏土在围压 200 kPa 下的试验数据, 通过本文模型和邓肯-张模型进行辨识, 得到计算值和试验值对比曲线, 如图 9 所示。

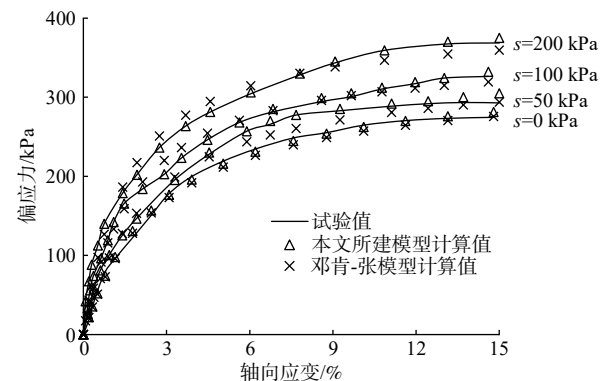


图 9 文献 [24] 非饱和黏土数据的计算值与试验值对比曲线

Fig. 9 Comparison curves between calculated value and experimental value of the unsaturated soil with the data from reference [24]

由图 9 可看出, 所建模型对不同基质吸力下的非

饱和土偏应力-应变曲线的拟合能力较强, 计算值与试验值吻合较好, 平均 R^2 为 0.983 4, 传统邓肯-张模型存在较大偏差, 平均 R^2 为 0.939 5。

总体上, 所建模型能较好地反映不同基质吸力下的非饱和土变形破坏过程, 由此验证了所建模型描述不同类型非饱和粉质黏土的适用性。由于本文试验及验证对象为非饱和粉质黏土, 今后还应探讨研究本文 m 、 F_0 与 s 之间的经验公式对不同类型非饱和土的适用情况、模型适用范围以及在实际工程中的应用。

5 结论

(1) 非饱和粉质黏土偏应力-应变曲线近似双曲线, 基质吸力越大, 土体偏应力越高。结合应力-应变曲线形态, 选择邓肯-张双曲线模型作为非饱和土基础模型。假设非饱和土微元强度服从 Weibull 概率密度分布, 将非饱和土力学性质的变化简化为损伤累积扩展的过程, 从而建立邓肯-张统计损伤模型。

(2) 在邓肯-张统计损伤模型的基础上, 通过搭建初始切线模量与基质吸力的联系, 建立考虑基质吸力的非饱和土邓肯-张统计损伤模型。给出参数解析方法, 拟合 m 、 F_0 与基质吸力之间的关系, 从而修正模型, 得到未知参数仅有 b 、 c 和 T 的模型经验公式, 参数 b 、 c 和 T 通过试验结果可确定, 便于实际应用。

(3) 非饱和土在应力加载作用下, 损伤变量先急剧累积, 再逐渐趋于平缓, 基质吸力促进损伤累积。本文所建损伤模型结构简单, 参数较少, 便于计算和应用, 利用该模型对比辨识本文以及相关文献中非饱和粉质黏土试验数据, 验证所建模型的合理性和适用性。

参考文献 (References) :

- [1] 李修磊, 陈洪凯, 李金凤, 等. 基于非饱和土强度理论的土质边坡浅层破坏稳定性分析[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(2): 61 – 70. [LI Xiulei, CHEN Hongkai, LI Jinfeng, et al. Stability analysis on shallow layer failure of soil slope based on unsaturated soil strength theory[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(2): 61 – 70. (in Chinese with English abstract)]
- [2] LLORET-CABOT M, WHEELER S J, SÁNCHEZ M. A unified mechanical and retention model for saturated and unsaturated soil behaviour[J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(1): 1 – 21.
- [3] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的新进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1 – 54. [CHEN Zhenghan, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1 – 54. (in Chinese with English abstract)]
- [4] HAYATI E, ABDI E, SARAVI M M, et al. Temporal pattern of soil matric suction in the unsaturated soil slope under different forest cover[C]// European Geosciences Union General Assembly, 2017.
- [5] 刘东燕, 郑志明, 侯龙, 等. 路基非饱和土抗剪强度的吸力效应[J]. 土木建筑与环境工程, 2012, 34(4): 1 – 5. [LIU Dongyan, ZHENG Zhiming, HOU Long, et al. Matric suction effect on shear strength of roadbed unsaturated soil[J]. Journal of Civil, Architectural & Environmental Engineering, 2012, 34(4): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 孙德安. 饱和度对非饱和土力学性质的影响[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 13–16. [SUN De'an. Effect of saturation degree on mechanical behaviours of unsaturated soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(Sup 2): 13–16. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 宋友建, 胡新丽, 郭利娜, 等. 吸力路径对非饱和土力学性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(5): 64 – 68. [SONG Youjian, HU Xinli, GUO Lina, et al. Effect of suction path on mechanical behaviors of unsaturated soils[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(5): 64 – 68. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 刘文化. 干湿循环对非饱和土力学特性影响及非饱和土本构关系探讨[D]. 大连: 大连理工大学, 2015. [LIU Wenhua. Effect of drying/wetting on the mechanical behaviors of unsaturated soils and study on the constitutive relationship of unsaturated soils[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 杨庆. 初始状态对非饱和土力学特性的影响研究[C]// 非饱和土的应力-强度理论与变形特性学术研讨会, 2016. [YANG Qing. Influence of initial state on mechanical properties of unsaturated soil[C]// Symposium on stress strength theory and deformation characteristics of unsaturated soils, 2016. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 张庆海. 基于冻融干湿作用的非饱和黄土力学性质试验及工程应用研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018. [ZHANG Qinghai. Study on mechanical properties experiment and engineering application of unsaturated

- loess based on freeze-thaw and dry-wet[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 赵成刚, 刘艳, 周贵荣, 等. 非饱和土本构模型研究进展[J]. 北京工业大学学报, 2008, 34(8): 820 – 829. [ZHAO Chenggang, LIU Yan, ZHOU Guirong, et al. Research progress of constitutive models for unsaturated soils[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2008, 34(8): 820 – 829. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 魏建柄, 刘卫斌. 非饱和土蠕变力学特性试验及经验模型研究[J]. 水文地质工程地质, 2019, 46(6): 67 – 73. [WEI Jianbing, LIU Weibin. An experimental study of the creep mechanical properties of unsaturated soil and empirical models[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2019, 46(6): 67 – 73. (in Chinese with English abstract)]
- [13] FAROUK A, LAMBOJ L, KOS J. A numerical model to predict matric suction inside unsaturated soils[J]. *Acta Polytechnica*, 2004, 44(4): 4 – 10.
- [14] 李顺群, 栾茂田, 杨庆. 考虑基质吸力变化时非饱和土的一维本构模型[J]. *岩土力学*, 2006, 27(9): 1575 – 1578. [LI Shunqun, LUAN Maotian, YANG Qing. One-dimensional constitutive model of unsaturated soil considering change of matric suction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(9): 1575 – 1578. (in Chinese with English abstract)]
- [15] HAMID T B, MILLER G A. A constitutive model for unsaturated soil interfaces[J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2008, 32(13): 1693 – 1714.
- [16] 秦冰, 陈正汉, 方振东, 等. 基于混合物理理论的非饱和土的热-水-力耦合分析模型 I [J]. *应用数学和力学*, 2010, 31(12): 1476 – 1488. [QIN Bing, CHEN Zhenghan, FANG Zhendong, et al. Analysis of coupled thermo-hydro-mechanical behavior of unsaturated soils based on theory of mixtures I [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2010, 31(12): 1476 – 1488. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 杨明辉, 孙龙, 赵明华, 等. 基于统计损伤理论的非饱和土简易本构模型[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(3): 43 – 48. [YANG Minghui, SUN Long, ZHAO Minghua, et al. A simplified unsaturated soil constitutive model based on statistical damage theory[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 43 – 48. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 章志荣. 非饱和土的三剪统一弹塑性本构模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2019. [ZHANG Zhirong. Approaches to the triple-shear unified elasto-plastic constitutive models for unsaturated soils[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019. (in Chinese with English abstract)]
- [19] JEAN L. How to use damage mechanics[J]. *Nuclear Engineering and Design*, 1984, 80(2): 233 – 245.
- [20] 李俊玲, 卢芳云, 赵鹏铎, 等. 含能材料的损伤本构模型研究进展[J]. *含能材料*, 2010, 18(2): 229 – 235. [LI Junling, LU Fangyun, ZHAO Pengduo, et al. Progress in the constitutive models including damage of energetic materials[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2010, 18(2): 229 – 235. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 孙龙. 非饱和土统计损伤本构模型试验研究及工程应用[D]. 长沙: 湖南大学, 2014. [SUN Long. Test research and engineering applications of unsaturated soil constitutive model based on statistical damage theory[D]. Changsha: Hunan University, 2014. (in Chinese with English abstract)]
- [22] JANBU N. Soil compressibility as determined by oedometer and triaxial tests[C]// Proceedings of European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Wiesbaden, 1963, 1: 19–25.
- [23] 祝艳波, 余宏明. 巴东组碎屑土夹层的非饱和蠕变经验模型[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(4): 22 – 29. [ZHU Yanbo, YU Hongming. Empirical unsaturated creep models for weak intercalated soils of Badong formation[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(4): 22 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张芳枝, 陈晓平. 非饱和黏土变形和强度特性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊2): 3808 – 3814. [ZHANG Fangzhi, CHEN Xiaoping. Experimental study on characteristics of deformation and strength of unsaturated clay[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(Sup2): 3808 – 3814. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张明霞