

非饱和压实土率敏性及蠕变时效特征试验研究

王智超^{1,2}, 罗 磊², 田英辉³, 张春会⁴

(1. 湘潭大学 岩土力学与工程安全湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411105;
3. 墨尔本大学 基础设施工程系, 澳大利亚 维多利亚; 4. 河北科技大学 建筑工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘 要: 为研究部分饱和状态下高填方回填土工后长期变形, 对非饱和压实土在可控基质吸力下分别开展率敏性和蠕变试验, 并分析两者间时效对应关系。率敏性试验采取不同加载速率的三轴剪切, 分析基质吸力 (0、100、200、300 kPa)、加载速率 (0.40、0.02 mm/min) 以及超固结比 (1、4 和 8) 对土体强度和变形特征的影响, 并确定三轴剪切蠕变的三级加载应力水平为抗剪强度的 0.45、0.65、0.85 倍; 在 4 种可控基质吸力 (0、100、200、300 kPa) 下参考陈氏加载法, 按三应力水平分级加载开展非饱和压实土三轴剪切蠕变试验。试验结果表明: 随着基质吸力的增加, 其率敏性参数 ρ 减小, 其率敏性降低; 随着基质吸力逐渐增大, 其蠕变初始最大速率、稳定蠕变速率以及蠕变变形量均显著减小; 蠕变试验确定的应变速率-应变关系线与率敏性试验获得的应变速率-应变数据点基本吻合, 证明两者间存在一定时效对应关系, 且随着基质吸力的增大, 这种时效对应关系更显著。

关 键 词: 非饱和土; 土-水特征; 基质吸力; 超固结; 率敏性; 蠕变; 时效对应关系

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2022) 07-1816-10

Experimental study on time-dependent characteristics of rate-sensitivity and creep of unsaturated compacted soil

WANG Zhi-chao^{1,2}, LUO Lei², TIAN Ying-hui³, ZHANG Chun-hui⁴

(1. Hunan Key Laboratory of Geomechanics and Engineering Safety, Xiangtan University Xiangtan, Hunan 411105, China; 2. School of Civil Engineering, Xiangtan University, Xiangtan, Hunan 411105, China; 3. Department of Infrastructure Engineering, The University of Melbourne, Victoria, Australia; 4. School of Civil Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050018, China)

Abstract: To study the long-term deformation after construction of high-filled soil under partial saturation, the rate sensitivity and creep tests of unsaturated compacted soil under controllable matric suction were carried out respectively, and the time-dependent corresponding relationship between them was analyzed. The rate-sensitivity tests used the triaxial shear method at different loading rates to analyze the effects of matric suction (0, 100, 200, and 300 kPa), loading rate (0.4 and 0.02 mm/min), and over-consolidation ratio (1, 4, and 8) on the strength and deformation characteristics of the soil. The 0.45, 0.65, and 0.85 times of shear strength are determined to be the third-order stress level loads of triaxial shear creep respectively. The triaxial shear creep tests of unsaturated compacted soil were carried out under four controllable matric suction forces (0, 100, 200, and 300 kPa), referring to the Chen loading method, and under three stress level graded loading. The results show that: 1) The rate sensitivity parameter ρ of unsaturated compacted soil decreases with the increase of matrix suction, and its rate sensitivity also decreases. 2) With the increasing of matric suction, the initial maximum creep rate, stable creep rate and creep deformation of unsaturated compacted soil decrease significantly. 3) The strain rate-strain relationship line determined by the creep test is consistent with the strain rate-strain data points obtained by the rate sensitivity test, which proves that there is a certain time-dependent corresponding relationship between the rate sensitivity and creep, and this relationship becomes more significant with the increase of matrix suction.

Keywords: unsaturated soil; soil-water characteristics; matric suction; over-consolidation; rate sensitivity; creep; time-dependent correspondence

1 引言

大量的试验表明, 饱和土体具有较为显著的率敏性及蠕变等时效特征^[1], 这些特征决定着公路、铁路和大坝等构筑物地基的工后变形、长期强度和稳定性^[2-3]。然而实际工程中浅表土层通常处于部分饱和状态, 考虑非饱和状态下基质吸力对土体时效特征的影响具有重要理论价值与工程实践意义^[4], 这已引起国内外学者的重点研究。Lai 等^[5]对三峡库区一个大型滑坡的黏土试样进行了一系列吸力控制的三轴蠕变试验; Li 等^[6]通过试验研究了基质吸力对非饱和红黏土蠕变特性的影响; Rezanian 等^[7]研究了饱和与非饱和条件下天然以及重塑伦敦黏土的一维蠕变特性; Wang 等^[8]研究了滑带土在不同应力水平和基质吸力条件下的非饱和蠕变特性。相较饱和土时效特征研究, 受非饱和试验难度及条件的限制, 目前对非饱和土的研究偏少, 且主要侧重探讨基质吸力对不同土类蠕变等时效特性影响, 还有待更多的试验对影响因素及其机制进行研究。

回填压实土是一种典型的非饱和土, 其在高填方路堤和土石坝填筑中所面临的工后沉降等时效问题突出^[9], 但一些研究较为关注压实土的干湿变化^[10]以及水分迁移^[11]对其变形影响, 且压实土在分层填筑中会形成较为复杂的应力历史^[12], 如何研究非饱和压实土的时效特征以及构建本构模型预测其长期变形是很有挑战的难题。尽管 Gennaro^[13]和 Liu^[14]等结合非饱和土的时效特征建立了考虑基质吸力的弹黏塑性模型, 但并未研究超固结等应力历史的影响, 不能反映非饱和压实土剪胀软化的变形特征。王智超等^[15-16]提出了一种利用三轴率敏性试验确定结构性土或超固结土的弹黏塑性本构模型参数, 并结合其三轴蠕变试验对模型参数进行必要校验, 从而形成了一套有效的时效本构模型构建方法, 该方法是否能拓展至非饱和压实土, 需要有一套完整的试验数据来进行验证。为此, 本文拟结合高填方非饱和压实土的土-水特征和应力历史, 采用轴平移技术量化含水率, 对其开展可控基质吸力下的率敏性和蠕变试验; 深入探讨基质吸力、应变速率和超固结比对土体时效变形的影响, 并通过应率敏性与蠕变试验数据来验证两者时效对应关系, 为构建非饱和压实土时效本构模型打下坚实的试验基础。

2 非饱和压实土的基本特征

本次试验采用湘潭地区路基回填土, 土质为黏

土。相关规程实施, 土的基本物理特征参数如表 1 所示。

表 1 土的基本物理性质指标
Table 1 Basic physical properties of soil

天然 干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	天然 含水率 /%	最大 干密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	最佳含 水率 /%	塑限 /%	液限 /%	土的相 对密度
1.57	20	1.61	24.6	26.7	49.3	2.74

为了确定实际工程中路基非饱和压实土所处基质吸力范围, 采用 ZFY-1 型非饱和土直剪仪压力室系统, 对其开展了土-水特征试验。首先饱和和陶土板, 将饱和的重塑土环刀试样安装在陶土板上, 再按照试验设定的吸力路径 (10→20→50→100→150→250→350→450 kPa) 进行逐级加压。通过排水管刻度与土样的重量, 判断试验的吸力平衡, 计算含水率和饱和度。同时, 为了比较和检验本文非饱和压实土的土-水特征的特点, 从文献中整理了不同亲水能力和压实状态的粉质黏土(M-SP)^[17]、红黏土(脱湿)^[18]、高岭土^[19]、基坑老黏土^[20]以及粉质路基土^[21]的土-水特征曲线, 如图 1 所示。

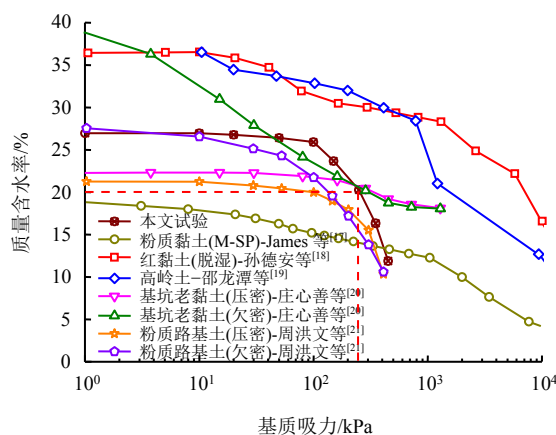


图 1 压实土的土-水特征曲线

Fig.1 Soil-water character curve of compacted clay

从图 1 可以看出: ①不同土体的基质吸力均随含水率的减小而增大; ②在同等含水率时亲水性强的红黏土、高岭土以及压密土的基质吸力更大; ③本文土样的土-水特征曲线变化规律与其他土类近似, 其进气值为 100 kPa, 在 20%天然含水率下对应的基质吸力为 262 kPa, 据此确定后续时效特征试验基质吸力范围。最终选择可控基质吸力分别为 100、200 和 300 kPa。

3 非饱和压实土时效特征试验

非饱和压实土时效特征试验装置采用 GDS 双压力室非饱和土动三轴仪,该仪器由底座动力系统、气压加载系统、双压力室以及量测和采集系统组成。试验中采用轴平移技术,通过上部顶帽施加孔隙气压,底座进气值 500 kPa 的陶土板阻隔土样孔隙中气压进入到孔隙水压量测系统中,从而达到基质吸力可控;通过差压传感器自动连续地测量内压力室里的水位变化来获得试样的体积变化,该体变系统的精度可达 0.04%^[22];轴向位移通过内压力室顶部的位移传感器进行量测,轴载范围为 0~2 kN。非饱和压实时效特征试验拟分两部分:①首先进行固结排水三轴剪切试验,确定剪切强度 q_f 为蠕变分级加载提供依据,并增加几组不同加载速率的三轴剪切试验研究其率敏性;②对试样在下同应力水平下进行三轴剪切蠕变试验。试验过程中(剪切和蠕变)超孔隙水压始终保持为 0,基质吸力均可控。其试验步骤如下:

(1) 饱和陶土板。施加 45 kPa 的反压,并用薄膜封闭陶土板,直至陶土板表面全部充满水再装样。

(2) 基质吸力平衡。试样安装完毕后,以恒定速率同时施加压力,整个试验过程中始终保持轴压>围压>孔隙气压>孔隙水压。当试验 24 h 内反压排水量变化值小于土样的体积的 0.05%^[22],可认为已达到平衡状态。该阶段所对应的应力路径为 $O-A$ 、 $O-A'$ 或 $O-A''$,如图 2 所示。

(3) 等吸力固结。继续施加围压和轴压到预定值,并保持气压不变,使试样在此压力下充分固结,固结稳定标准同吸力平衡标准。加压速率的大小可以利用下式估算^[23]:

$$R_L = \frac{2c_v^w u_{lim}}{h^2} \quad (1)$$

式中: R_L 为加压速率; u_{lim} 为试样顶部的超孔隙水压力的界限值,可取所控制吸力的 10%; c_v^w 为非饱和土样中水相的固结系数; h 为试样的高度。计算得出试验固结速率为 0.75 kPa/min,所对应的应力路径为 $A-B$ 、 $A'-B'$ 或 $A''-B''$,如图 2 所示。

(4) 等吸力加载。蠕变试验参考陈式加载方法进行分级加载;率敏性试验以等应变速率(CRS)进行三轴剪切,所对应的应力路径为 $B-C$ 、 $B'-C'$ 或 $B''-C''$,如图 2 所示。

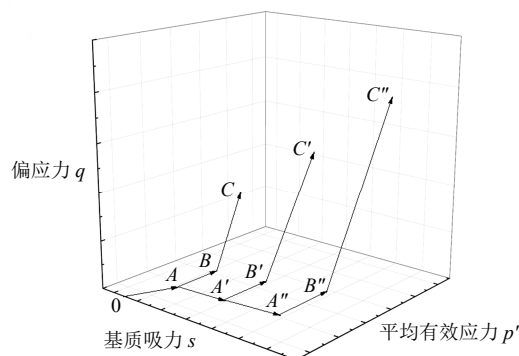


图 2 非饱和土三轴试验的应力路径

Fig.2 Stress path of triaxial test of unsaturated soil

3.1 非饱和压实土率敏性试验

为了揭示基质吸力和超固结应力历史对非饱和压实土率敏性的影响,拟开展可控基质吸力下非饱和压实土的固结排水三轴剪切试验,具体试验方案见表 2。表中不同超固结比压实土试样的制备,参考文献[12]确定的压实土应力历史,采取先在 400 kPa 有效围压下等向固结,再卸载至预定的净围压。

表 2 非饱和压实土率敏性试验方案

Table 2 Rate sensitivity test scheme of unsaturated compacted clay

试样 编号	净围压 σ_3 /kPa	基质吸力 s /kPa	超固结比 OCR	加载速率 /(mm·min ⁻¹)
TG1	50	100	8	0.02
TG2	100	100	4	0.02
TG3	400	100	1	0.02
TG4	100	0	1	0.02
RG1	100	100	1	0.40、0.02
RG2	100	200	1	0.40、0.02
RG3	100	300	1	0.40、0.02

3.2 非饱和压实土蠕变试验

为了研究基质吸力对非饱和压实土蠕变的影响,选择与开展率敏性试验同批土样,在净围压 $\sigma_3 = 100$ kPa、基质吸力 s 分别为 0、100、200 和 300 kPa 条件下正常固结,再分别开展恒定偏应力的三级加载蠕变试验,具体试验方案见表 3。

表 3 非饱和压实土蠕变试验加载方案

Table 3 Creep test loading scheme of unsaturated compacted clay

试样 编号	基质吸力 s /kPa	净围压 σ_3 /kPa	剪切强度 q_r /kPa	分级蠕变偏应力/kPa		
				q_{cI}	q_{cII}	q_{cIII}
CG1	0	100	241	108	156	205
CG2	100	100	461	205	295	395
CG3	200	100	511	240	340	440
CG4	300	100	641	285	420	545

注: q_{cI} 、 q_{cII} 、 q_{cIII} 分别为第 1、2、3 级蠕变偏应力。

考虑到非饱和压实土达到基质吸力平衡的时间较长 (10 d 左右), 且蠕变持续时间一般为 5~7 d, 为了能在有限的时间内获得更多应力水平的蠕变规律, 降低试验土样离散性影响, 本试验拟参考陈氏加载法^[24]对每一个非饱和土样分 3 级加载恒定蠕变偏应力。其中, 第 1 级蠕变偏应力 q_{cI} 为土样强度 q_f 的 0.45 倍, 第 2 级蠕变偏应力 q_{cII} 为土样强度 q_f 的 0.65 倍, 第 3 级蠕变偏应力 q_{cIII} 为土样强度 q_f 的 0.85 倍; 每级蠕变试验稳定标准为轴向变形 24 h 内变化小于 0.01 mm, 试验蠕变曲线处理如图 3 所示。

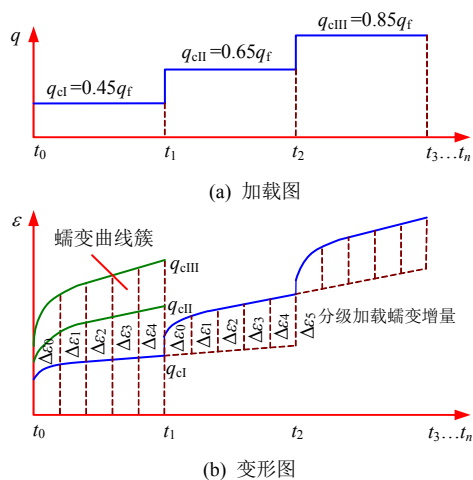


图 3 分级加载蠕变曲线处理方法

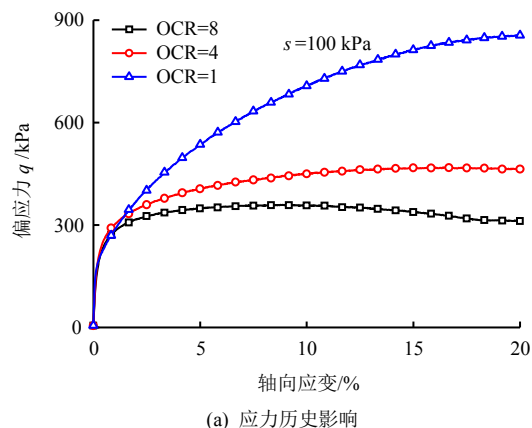
Fig.3 Creep curve treatment method with graded loading

4 非饱和压实土时效特征试验结果

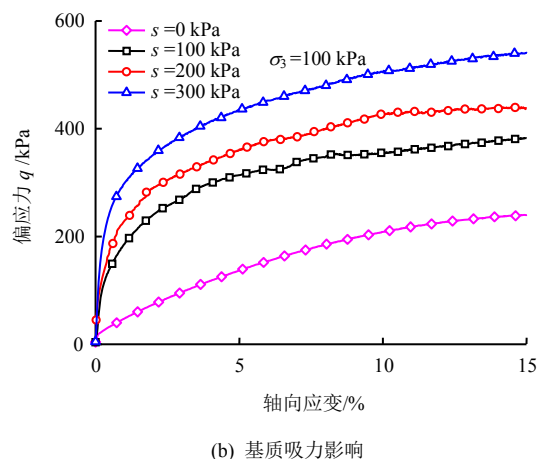
4.1 可控基质吸力下强度特征

按照表 2 的试验方案可以获得非饱和压实土的强度特征变化规律, 如图 4 所示。

图 4(a)为基质吸力 $s=100$ kPa 情况下, 非饱和压实土在 3 种超固结比 (1、4、8) 下的应力-应变曲线。从图中可以看出, 在相同应力历史 400 kPa 条件下, 非饱和土体的强度随着超固结比的增大而减小, 超固结比为 1 的非饱和和正常固结土呈现应变硬化, 而超固结比为 8 的非饱和土在剪切过程中出现了明显的应变软化, 超固结比为 4 时介于硬化和软化之间。图 4(b)为不同基质吸力 (0、100、200、300 kPa, 其中 0 kPa 为饱和土) 非饱和压实土在加载速率为 0.02 mm/min 条件下的应力-应变曲线。从图中可以看出应力-应变曲线都呈现应变硬化, 并随基质吸力增大, 其峰值强度显著增加, 表明基质吸力对非饱和压实土的强度具有很大贡献。将图 4(b)中试验数据按 Fredlund 的抗剪强度理论整理, 可得到本文非饱和压实土的抗剪强度 τ_{ff} 公式为



(a) 应力历史影响



(b) 基质吸力影响

图 4 非饱和压实土强度特征曲线

Fig.4 Strength characteristic curves of unsaturated compacted soil

$$\tau_{ff} = 36.79 + (\sigma_f - u_a) \tan 25.98^\circ + (u_a - u_w) \tan 15.60^\circ \quad (2)$$

式中: σ_f 为法向应力; u_a 和 u_w 分别为非饱和土的孔隙气压和水压, 基质吸力 $s = u_a - u_w$ 。可绘制本文非饱和压实土的总黏聚力 c 与基质吸力 s 的关系如图 5 所示。

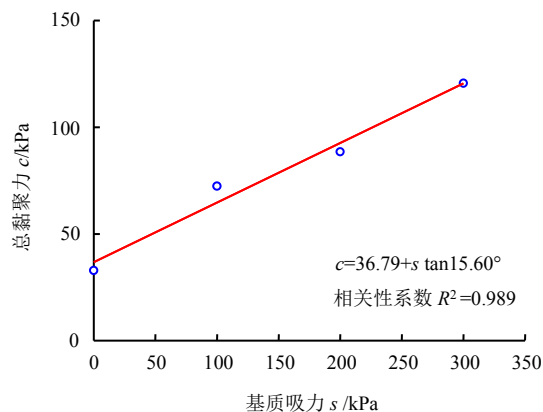


图 5 总黏聚力与基质吸力的关系

Fig.5 Relationship between total cohesion and matric suction

4.2 可控基质吸力下率敏感性特征

非饱和压实土在基质吸力 $s=100$ kPa 下的三轴剪切率敏感性试验结果如图 6 所示。其中, 非饱和压实土的三轴剪切加载速率分别为 0.4 mm/min 和 0.02 mm/min, 试样均为直径为 38 mm、高度为 80 mm 的标准试样, 非饱和土应力比 $\eta=q/s$ 。从图中可以看出: ①在同一基质吸力条件下, 加载速率

越大, 相应的应力-应变曲线越高, 而相应体变越小, 剪缩现象越不明显; ②在同一加载速率下, 均随基质吸力的增加强度增强, 而相应体变则变大, 剪缩现象越显著; ③随着基质吸力的增加, 试样在不同加载速率下的应力-应变的差异减少, 因而率敏感性在降低。Zhang 等^[25]对非饱和路基粗粒土研究结果也有类似规律。由此可见, 非饱和土的率敏感性

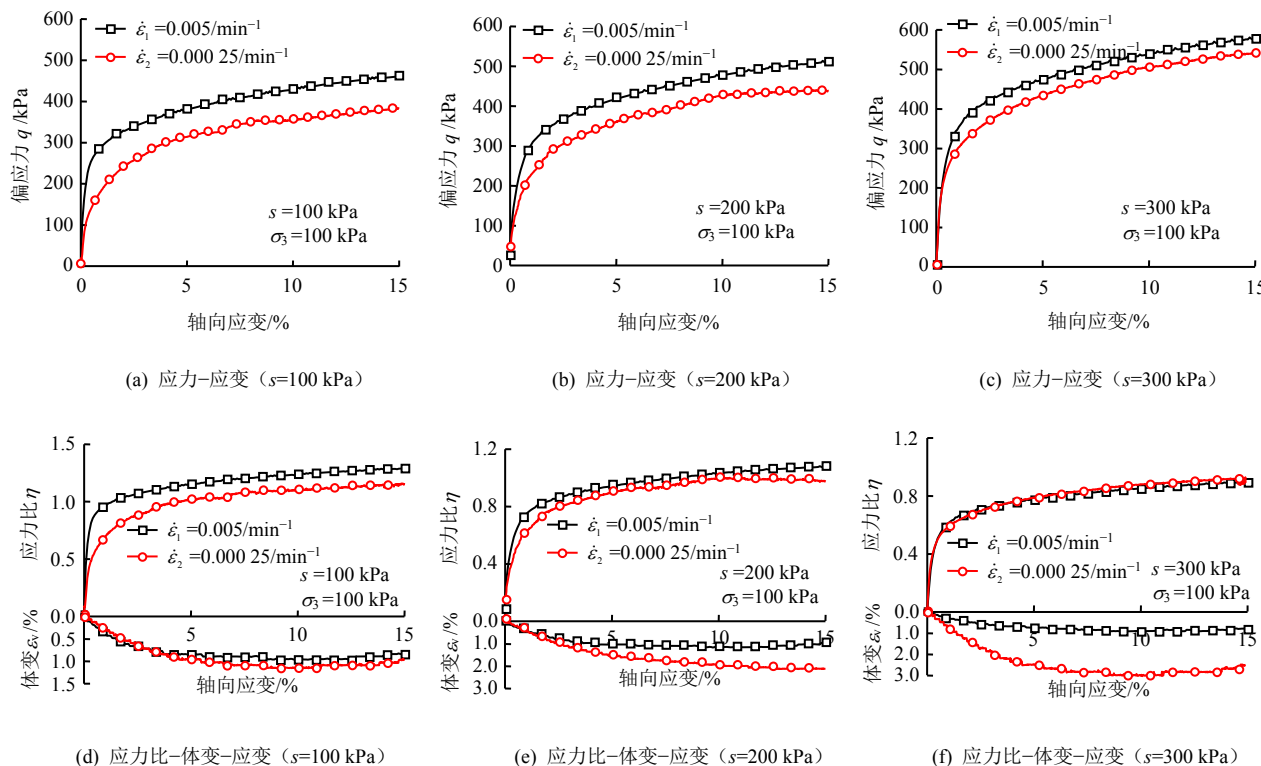


图 6 非饱和压实土率敏感性试验结果

Fig.6 Rate sensitivity test results of unsaturated compacted soil

和变形特征均受基质吸力影响较大。

4.3 可控基质吸力下蠕变特征

非饱和压实土在基质吸力 s 分别为 0 、 100 、 200 、 300 kPa 这 4 种条件下的分级三轴剪切蠕变试验结果如图 7 所示。从图中可知: ① 3 种应力水平下的 (0.45 、 0.65 、 0.85 倍) q_f , 非饱和压实土均未出现加速蠕变现象; ②在加载瞬间会产生初始蠕变, 初始蠕变变形越大, 其稳定蠕变变形也越大; ③基质吸力越大, 其相应应力水平下的蠕变量越小, 表明基质吸力对其蠕变也有显著影响。

5 时效特征试验结果分析

5.1 吸力对压实土率敏感性的影响

为了量化评价基质吸力对非饱和压实土的率敏

性影响, 可通过图 6(a)、6(b)和 6(c)中不同基质吸力条件下三轴剪切偏应力强度与应变速率的关系, 获得应变率参数 ρ , 即

$$\rho = \frac{\Delta q_f / q_{f0}}{\Delta(\lg \dot{\epsilon}_1)} \quad (3)$$

式中: q_{f0} 为参考应变速率的抗剪强度; Δq_f 为不排水抗剪强度随应变速率对数变化的增量, 即 $q_f - q_{f0}$ 。

本文非饱和压实土三轴剪切轴向应变速率分别为 0.005 $00/\text{min}$ 和 0.000 $25/\text{min}$, 可绘制抗剪强度-应变速率关系如图 8 所示, 并计算出不同基质吸力下非饱和土应变率参数, 如表 4 所示。可见, 随着基质吸力的增加, 非饱和压实土应变率参数 ρ 大小在减少, 也表明基质吸力对其率敏感性有显著抑制作用。

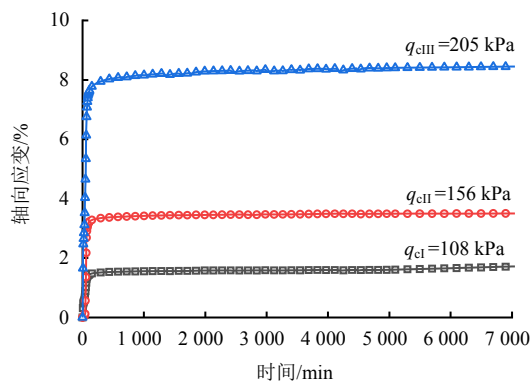
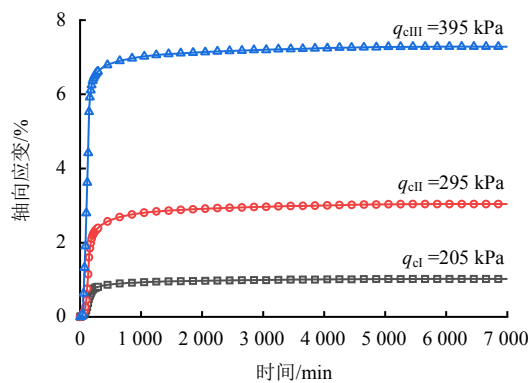
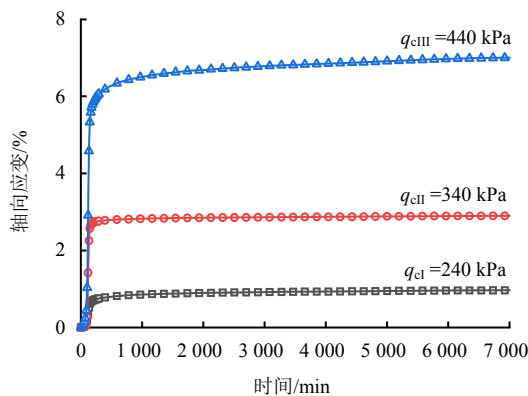
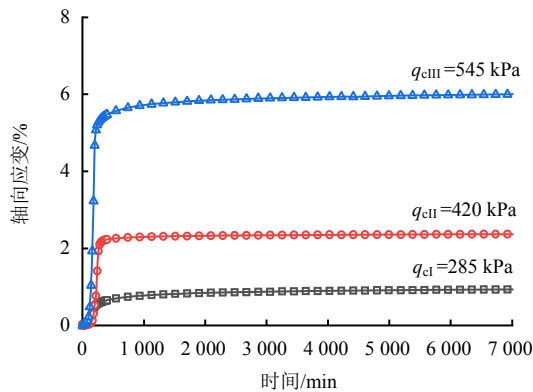
(a) 基质吸力 $s=0$ kPa(b) 基质吸力 $s=100$ kPa(c) 基质吸力 $s=200$ kPa(d) 基质吸力 $s=300$ kPa

图7 可控基质吸力下非饱和压实土蠕变试验结果
Fig.7 Creep test results of unsaturated compacted soil under controllable matrix suction

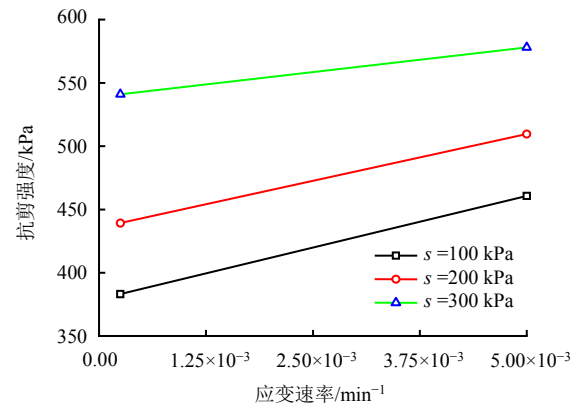


图8 抗剪强度-应变速率关系

Fig.8 Relationship between shear strength and strain rate

表4 非饱和压实土应变率参数

Table 4 Strain rate parameters of unsaturated compacted soil

基质吸力 s /kPa	应变率参数 ρ
100	0.175
200	0.142
300	0.065

5.2 吸力对压实土蠕变过程的影响

为了深入分析基质吸力对非饱和压实土蠕变过程影响,可通过图7蠕变中某个时刻不同应力水平下的应力-应变关系曲线获得等时曲线簇,从而观察基质吸力引起的等时曲线变化。本文分别选择蠕变过程中变化较为显著中的两个时间 $t=150$ min 和 $t=750$ min 时刻绘制等时曲线簇如图9所示。从图中可以看出:①等时曲线均呈现相似变化趋势规律,具有显著的非线性特征;②在同一基质吸力下,等时曲线轴向应变随着时间增长其变化幅度在减小,基质吸力为300 kPa时尤为明显;③在同一应力水平下,随着基质吸力增加其等时曲线簇间距变大,表明基质吸力对其蠕变影响在增强。

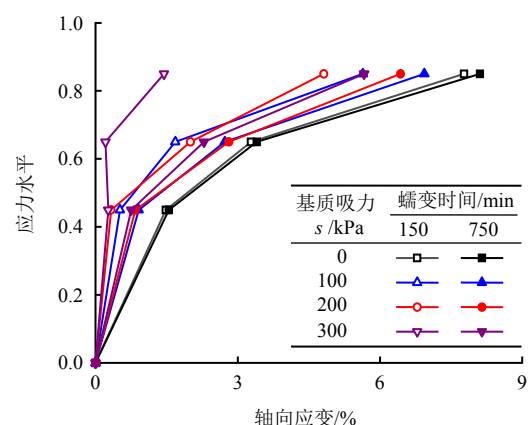


图9 非饱和压实土蠕变等时曲线

Fig.9 Isochronous curves of unsaturated compacted soil creep

5.3 吸力对压实土蠕变速率的影响

蠕变速率对土体长期强度及其稳定性有重要影响, 将图 7 中蠕变曲线对时间求导, 可得到不同基质吸力下非饱和压实土的蠕变速率变化规律如图 10。该图为非饱和压实土在 0.85 倍蠕变应力水平时, 不同基质吸力下的蠕变速率变化图, 采用相同办法还可获得应力水平为 0.65 倍、0.45 倍的蠕变速率变化图。从图中可看出: ①在加载初期蠕变速率急剧增大, 到达最大蠕变速率后又逐渐减小, 直至进入稳定蠕变阶段; ②蠕变速率与基质吸力有着密切关系, 其中基质吸力为 0 kPa 出现最大蠕变速率 0.106 3%/min; ③蠕变速率的转折点(最大蠕变速率)随着基质吸力增大而减小, 表明基质吸力使土体黏滞性有所提高, 导致其变形速度减慢, 进而对其长期变形有一定的抑制作用。

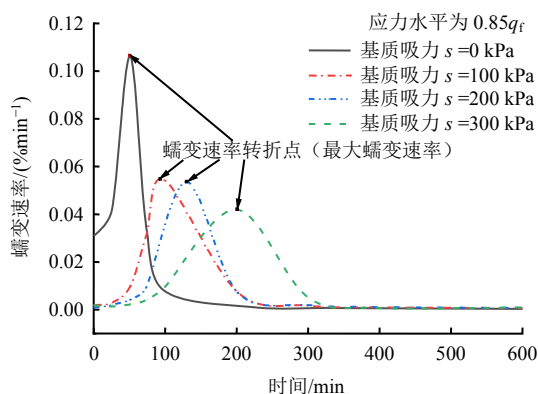


图 10 非饱和压实土蠕变速率

Fig.10 Creep rate of unsaturated compacted soil creep

考虑到图 10 绘制的蠕变速率在 600 min 以内, 为非饱和压实土的蠕变初始阶段, 而从图 7 可以看出非饱和压实土一般在蠕变时长 7 000 min 以上进入蠕变相对稳定阶段, 可绘制此时的稳定蠕变速率变化, 见图 11, 其大小约比初始蠕变阶段的最大速率小 3~4 个数量级, 且随基质吸力的增大而减小。

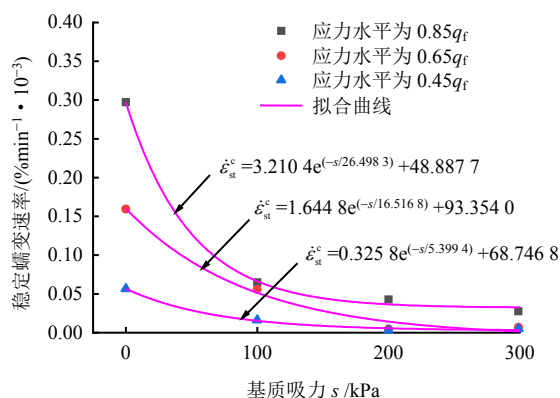


图 11 非饱和压实土稳定蠕变速率

Fig.11 Stable creep rate of unsaturated compacted soil

根据图 11 中非饱和压实土的稳定蠕变速率与基质吸力 s 的变化趋势, 拟采用指数函数对其进行拟合:

$$\dot{\varepsilon}_{st}^c = ae^{-\frac{s}{b}} + c \quad (4)$$

式中: $\dot{\varepsilon}_{st}^c$ 为稳定蠕变速率; a 、 b 和 c 为拟合参数。最终可得到蠕变应力水平分别为 0.45、0.65 和 0.85 的拟合参数, 如表 5 所示, 拟合结果如图 11 所示。表 5 中, R^2 为相关系数, 均在 0.97 以上, 表明拟合函数吻合良好。

表 5 非饱和压实土稳定蠕变速率拟合参数
Table 5 Fitting parameters of stable creep rate of unsaturated compacted soil

蠕变应力水平	a	b	c	R^2
0.85	3.210 4	26.498 3	48.887 7	0.996 0
0.65	1.644 8	16.516 8	93.354 0	0.973 1
0.45	0.325 8	5.399 4	68.746 8	0.983 8

6 率敏性和蠕变时效对应关系

非饱和压实土的率敏性和蠕变试验是表征其时效特征的两种典型形式, 均揭示了土体的塑性黏滞效应。其中, 三轴率敏性试验能较方便地获得土体的强度指标以及不同应力水平的短期时效规律, 而蠕变试验加载条件简单, 能获得更多土体长期变形特征, 但较为耗时。文献[26]证明: 有些材料可利用其短期松弛试验来近似预测其长期蠕变变形。借鉴松弛与蠕变的对应关系, 本文拟利用已开展的非饱和压实土率敏性试验和蠕变试验数据, 来探讨两者之间可能存在的对应关系。率敏性和蠕变时效对应关系的基本原理示意如图 12 所示。通过率敏性试验可获得某一应力水平下土体的应变和应变速率, 同时利用蠕变试验也能获得某一蠕变应力水平下的应变和应变速率, 如果两组应变和应变速率数据能基本吻合, 则表明率敏性和蠕变两者存在时效对应关系。

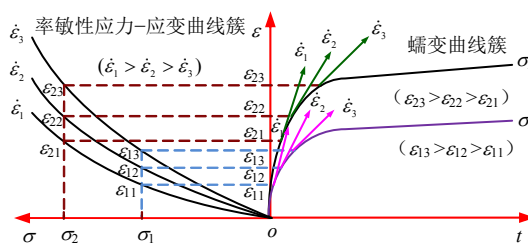


图 12 率敏性和蠕变时效对应关系的基本原理

Fig.12 Basic principles of time-dependent correspondence between rate sensitivity and creep

6.1 饱和土的时效对应关系

由于本文非饱和压实土受试验条件的限制, 只开展了两个加载速率的率敏性试验, 探讨率敏性与蠕变之间对应关系的数据偏少。因此, 本文先选择了文献[16、27]中饱和正常固结土与超固结土的率敏性和蠕变试验数据进行分析, 结果如图 13 所示。从图中可以看出, 饱和正常固结土与超固结土在一定的应力水平下, 由蠕变试验确定的应变速率-应变关系线与由率敏性试验获得的应变速率和应变数据点基本吻合, 表明两者存在一定时效对应关系, 但由于土体非线性及试验中的离散性, 这种时效对应关系的稳定性稍弱。

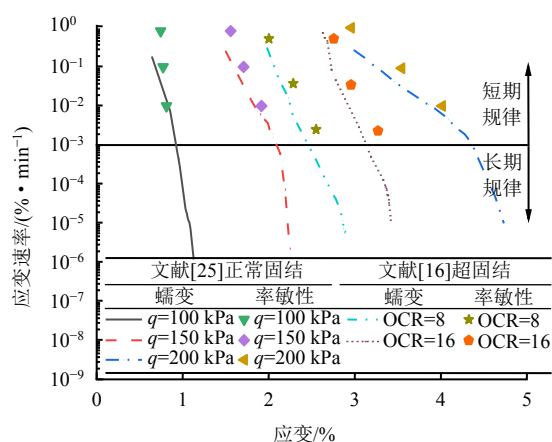


图 13 饱和土时效对应关系

Fig.13 Time-dependent correspondence of saturated soil

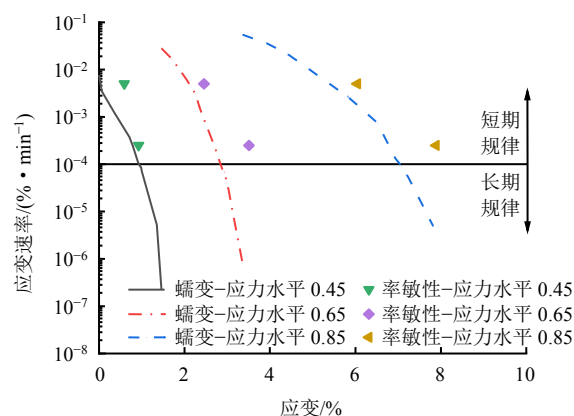
6.2 非饱和土的时效对应关系

通过本文非饱和压实土的率敏性和蠕变试验数据, 可绘制 3 种基质吸力 s 分别为 100、200、300 kPa 的应变速率-应变关系, 如图 14 所示。从图中可以看出: ①非饱和压实土在低应力水平较高应力水平时效对应关系显著; ②随着基质吸力的增大, 非饱和和压实土的时效对应关系也有增强。

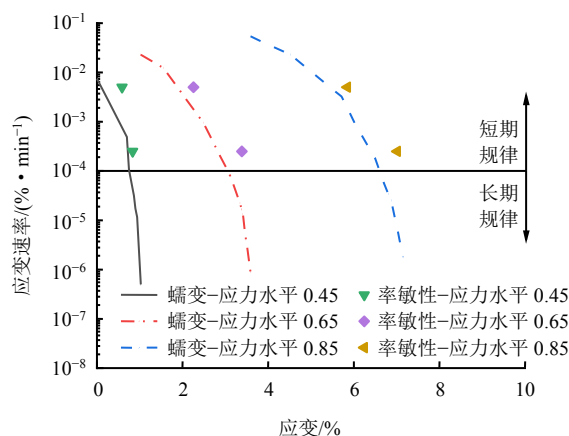
7 结 论

(1) 非饱和压实土在可控基质吸力在 100、200、300 kPa 下均表现较为显著的率相关与蠕变变形特征。随着基质吸力的增加, 非饱和压实土的率敏性与蠕变速率以及变形量都有相应降低。

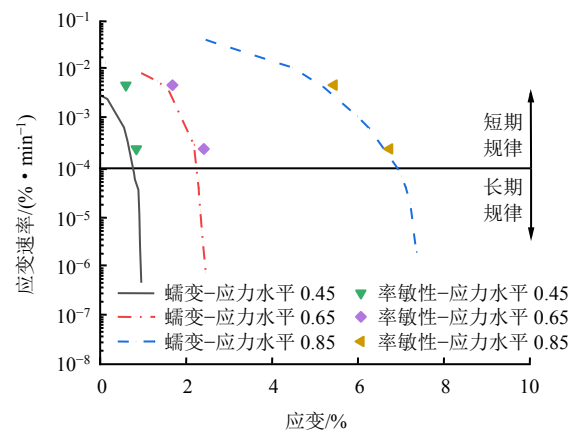
(2) 试验测得非饱和压实土在基质吸力为 100、200、300 kPa 时, 其率敏性参数 ρ 分别为 0.175、0.142 和 0.065; 其初始最大蠕变速率和稳定蠕变速率均随基质吸力增大而降低, 且各蠕变应力水平的稳定蠕变速率与基质吸力满足指数函数关系公式 (4)。



(a) 基质吸力 $s=100$ kPa



(b) 基质吸力 $s=200$ kPa



(c) 基质吸力 $s=300$ kPa

图 14 非饱和土时效对应关系

Fig.14 Time-dependent correspondence of unsaturated soil

(3) 非饱和压实土蠕变试验确定的应变速率-应变关系线与率敏性试验获得的应变速率-应变数据点基本吻合, 表明两者间存在一定时效对应关系, 且随着基质吸力的增大, 这种时效对应关系更显著。

参 考 文 献

[1] HICHER P Y. Experimental study of viscoplastic

- mechanisms in clay under complex loading[J]. **Geotechnique**, 2016, 66(8): 661-669.
- [2] MIRJALILI M, KIMOTO S, OKA F, et al. Long-term consolidation analysis of a large-scale embankment construction on soft clay deposits using an elasto-viscoplastic model[J]. **Soils and Foundations**, 2012, 52(1): 18-37.
- [3] REZANIA M, NGUYEN H, ZANGANEH H, et al. Numerical analysis of Ballina test embankment on a soft structured clay foundation[J]. **Computers and Geotechnics**, 2018, 93: 61-74.
- [4] BAGHERI M. Experimental investigation of the time- and rate-dependent behaviour of unsaturated clays[D]. Nottingham: University of Nottingham, 2018.
- [5] LAI X L, WANG S M, YE W M, et al. Experimental investigation on the creep behavior of an unsaturated clay[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2014, 51(6): 621-628.
- [6] LI J Z, YANG Y L. Creep behavior of unsaturated reticulate red clay under matric suction[J]. **KSCE Journal of Civil Engineering**, 2017, 22(2): 582-587.
- [7] REZANIA M, BAGHERI M, MOUSAVI N M. Creep and consolidation of a stiff clay under saturated and unsaturated conditions[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2020, 57(5): 728-741.
- [8] WANG S M, ZHAN Q H, WANG L, et al. Unsaturated creep behaviors and creep model of slip-surface soil of a landslide in Three Gorges Reservoir area, China[J]. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 2021, 80(7): 5423-5435.
- [9] ZHU C H, LI N. Ranking of influence factors and control technologies for the post-construction settlement of loess high-filling embankments[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 118: 103320-19.
- [10] 谈云志, 孔令伟, 郭爱国, 等. 压实红黏土的湿化变形试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(3): 483-489.
TAN Zhi-yun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Experimental study on wetting deformation of compacted laterite[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2011, 33(3): 483-489.
- [11] 杨志浩, 岳祖润, 冯怀平. 非饱和粉土路基内水分迁移规律试验研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2241-2251.
YANG Zhi-hao, YUE Zu-run, FENG Huai-ping. Experimental study on moisture migration properties in unsaturated silty subgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(7): 2241-2251.
- [12] WANG Z C, JIN G, DENG X H, et al. Experimental study on the over-consolidation stress history of subgrade compacted clay[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2016, 10(1): 26-32.
- [13] GENNARO V D, PEREIRA J M. A viscoplastic constitutive model for unsaturated geomaterials[J]. **Computers and Geotechnics**, 2013, 54: 143-151.
- [14] LIU M D, SUCHED L, SUKSUN H, et al. 1D constitutive model for expansive soils[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2021, 21(3): 04020260-7.
- [15] 王智超, 蒋明镜, 陈双林, 等. 基于上下负荷面的弹黏塑性本构模型及应力积分算法实现[J]. 岩土力学, 2016, 37(2): 357-366.
WANG Zhi-chao, JIANG Ming-jing, CHEN Shuang-lin, et al. An elastic-viscoplastic constitutive model and its stress integration algorithm based on super-subloading yield surface[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 357-366.
- [16] 王智超, 胡茜, 郑军星, 等. 一种基于土体率敏性的长期变形预测方法[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(5): 99-103.
WANG Zhi-chao, HU Qian, ZHENG Jun-xing, et al. A method of predicting long-term deformation of clay based on rate sensitivity[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2019, 36(5): 99-103.
- [17] JAMES M T, CRAIG H B, LISA R B. Soil-water characteristic curves for compacted clays[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(11): 1060-1069.
- [18] 孙德安, 刘文捷, 吕海波. 桂林红黏土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学, 2014, 35(12): 3345-3341.
SUN De-an, LIU Wen-jie, LU Hai-bo. Soil-water characteristic curve of Guilin lateritic clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(12): 3345-3341.
- [19] 邵龙潭, 郑国锋, 张钧达. 压实高岭土干燥收缩特性试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(5): 1-8.
SHAO Long-tan, ZHENG Guo-feng, ZHANG Jun-da. Experiment on drying shrinkage characteristics of compacted kaolin[J]. **Journal of Architecture and Civil Engineering**, 2018, 35(5): 1-8.