

DOI: 10.11779/CJGE201501006

非饱和土一维压缩试验及变形规律探讨

章峻豪^{1,2}, 陈正汉^{1,2}, 田志敏^{1,3}, 江世永^{1,2}, 李春海^{1,2}

(1. 后勤工程学院, 重庆 401311; 2. 岩土力学与地质环境保护重庆市重点实验室, 重庆 401311; 3. 总参工程兵科研四所, 北京 100850)

摘 要: 为研究非饱和土在侧限条件下的变形规律, 进行了控制初始干密度和基质吸力的一维压缩试验, 提出切线压缩系数和切线体积压缩系数的概念, 发现切线压缩系数和切线体积压缩系数均随净竖向压力的增大呈指数衰减规律, 建立了描述孔隙比-净竖向压力关系和竖向应变-净竖向压力关系的经验模型, 结合国内外文献中的试验数据对模型的合理性及其对不同类别非饱和土的适用性进行了验证。提出的模型可用于计算任意压力间隔内非饱和土的平均压缩性指标, 计算非饱和土由于浸水产生的一维湿化变形, 还可用于描述非饱和土随基质吸力增大的一维收缩变形规律。

关键词: 侧限; 切线压缩系数; 切线体积压缩系数; 干密度; 基质吸力

中图分类号: TU411

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)01-0061-06

作者简介: 章峻豪(1986-), 男, 博士研究生, 主要从事岩土本构关系和地下工程稳定性的研究。E-mail: comes001@sina.com。

One-dimensional compression tests and deformation rules of unsaturated soils

ZHANG Jun-hao^{1,2}, CHEN Zheng-han^{1,2}, TIAN Zhi-min^{1,3}, JIANG Shi-yong^{1,2}, LI Chun-hai^{1,2}

(1. Logistical Engineering University, Chongqing 401311, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Geomechanics & Geoenvironmental Protection, Chongqing 401311, China; 3. The Fourth Engineering Scientific Research Institute of the Headquarters of the General Staff, Beijing 100850, China)

Abstract: In order to study the deformation rules of unsaturated soils under lateral confinement, a series of one-dimensional compression tests are carried out under controlled initial dry density and matric suction. The concepts of tangent compressibility coefficient and tangent volume compression coefficient are proposed. Results of the study indicate that the tangent compressibility coefficient and tangent volume compression coefficient decay exponentially with the increasing net vertical pressure. Based on this law, two empirical models, which can describe the variations of void ratio and vertical strain with the net vertical stress, are established. The rationality of the proposed models and their applicability to various types of unsaturated soils are verified using the test data in other literatures. The proposed models can be used to calculate the mean compressibility indexes within arbitrary pressure interval, to compute the slaking deformation of unsaturated soils due to the increase of moisture content, and also to describe the variation of void ratio with the matric suction.

Key words: lateral confinement; tangent compressibility coefficient; tangent volume compression coefficient; dry density; matric suction

0 引 言

土体的压缩特性和建(构)筑物的沉降一直是实际工程关心的问题。研究土体的压缩特性以及确定其压缩性指标时,可借助于室内一维压缩试验,探究土体孔隙比随时间的变化规律^[1]。另一方面,土体的压缩特性也可从孔隙比、竖向应变与竖向压力的变化关系来研究。文献[2]基于亚塑性理论,推导出了适合于无黏性土的应力-应变方程。而文献[3]提出了描述黏土一维压缩竖向应变和竖向压力变化的双曲线模型。

实际工程中,土体并不是均质的,也常常是非饱和的,土体压缩特性还受到密实度和饱和度的影响。

文献[4]研究了残积土的压缩特性随深度的变化规律。文献[5]研究了黏土的压缩性指标随基质吸力和净竖向压力的变化关系。此外,土体的压缩特性还与其矿物成分等因素有关^[6]。

本文从孔隙比与净竖向压力变化关系的角度,对非饱和土的压缩特性进行了试验研究,分析了初始干密度和基质吸力的影响,提出了能描述非饱和土一维压缩变形规律的经验模型,并结合国内外文献中的数

基金项目: 国家自然科学基金项目(11072265, 11272353)

收稿日期: 2014-03-07

据对模型合理性及适用性进行了验证。

1 试验方案

试验采用的土样取自南水北调中线工程安阳段,液限为 28.48%, 塑限为 14.97%, 塑性指数为 13.51, 为低液限黏土。试样采用静力压实模具制备, 在环刀中一次成型, 其直径为 61.8 mm, 高度为 20 mm, 随后采用抽气饱和法对其进行饱和。不同干密度试样的土水特征曲线见图 1。图中的 w 和 s 分别表示含水率和基质吸力, ρ_d 表示干密度。试验仪器采用后勤工程学院研制的 FGJ-20 型非饱和固结仪, 其详细介绍见文献[7]。进行了 3 种初始干密度 (1.70, 1.80, 1.90 g/cm³)、4 种基质吸力 (0, 100, 200, 400 kPa) 共 12 个一维压缩试验。对于基质吸力为 0 kPa 的试样, 加载采用 24 h 稳定标准^[8]; 对于基质吸力为 100, 200, 400 kPa 的试样, 每一级荷载下, 变形稳定标准为土样压缩变形在 2 h 内小于 0.01 mm^[9-10]。

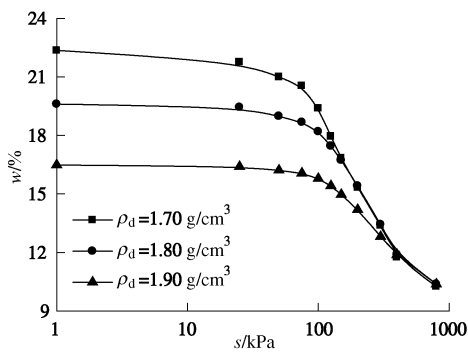


图 1 不同干密度试样的土水特征曲线

Fig. 1 Soil-water characteristic curves under various dry densities

2 试验结果分析

提出切线压缩系数的概念:

$$a_t = \partial(\Delta e) / \partial p \quad (1)$$

式中 a_t 为切线压缩系数; Δe 为压缩过程中的孔隙比变化量, $\Delta e = e_i - e$, e_i 为施加第一级荷载前的初始孔隙比, e 为某一级荷载下土样变形稳定后的孔隙比; p 为净竖向压力, $p = \sigma_v - u_a$, σ_v 和 u_a 分别为总竖向压力和孔隙气压力。

发现切线压缩系数随净竖向压力的增大呈指数衰减规律, 表示为

$$a_t = \partial(\Delta e) / \partial p = a_i [(1-r) \exp(-\beta p) + r] \quad (2)$$

式中 a_i 为初始压缩系数, $a_i = a_t(p \rightarrow 0)$; r 为终了切线压缩系数与初始切线压缩系数的比值, $r = a_t(p \rightarrow \infty) / a_i$, 简称压缩系数比; β 为压缩系数衰减指标, β 越大, 表示 a_t 随 p 的增大衰减得越快。

试验数据与式 (2) 的拟合效果见图 2, 由图可见,

式 (2) 与试验数据基本一致。对式 (2) 在区间 $[0, p]$ 上进行积分可得:

$$\Delta e = \frac{a_i}{\beta} \{ (1-r)[1 - \exp(-\beta p)] + r\beta p \} \quad (3)$$

试验数据与式 (3) 的拟合效果见图 3。

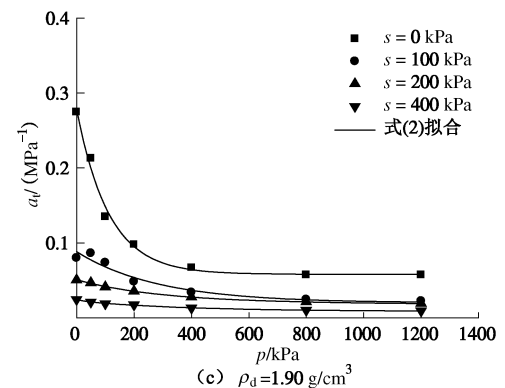
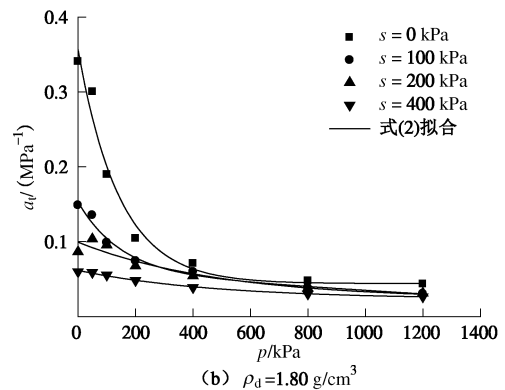
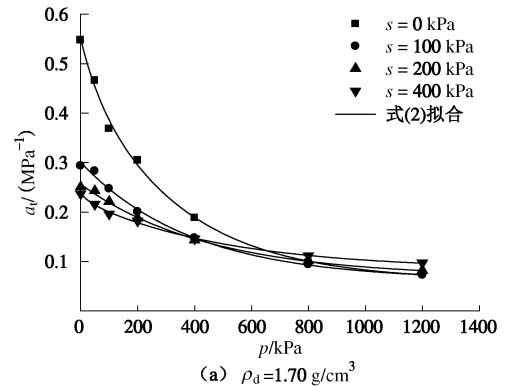


图 2 试验数据与式 (2) 的拟合效果

Fig. 2 Test data and fitting effectiveness of Eq. (2)

如图 3 所示, Δe 随净竖向压力的增大而非线性增大, 对于同一净竖向压力增量, 初始干密度和基质吸力越小, Δe 越大。由图 3 可见, 式 (3) 与试验数据吻合良好。另一方面, 由于:

$$e = e_i - (1 + e_i)\varepsilon \quad (4)$$

式中, ε 为竖向加载方向上试样的应变, $\varepsilon = \Delta h / h_i$, Δh 和 h_i 分别为试样高度变化量和初始高度。

将式 (4) 代入式 (2) 可得

$$m_{vt} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial p} = m_{vi} [(1-r) \exp(-\beta p) + r] \quad (5)$$

式中 m_{vt} 定义为切线体积压缩系数 (即切线压缩模量 E_{st} 的倒数), $m_{vt} = 1/E_{st} = \partial \varepsilon / \partial p$; m_{vi} 为初始切线体积压缩系数, $m_{vi} = m_{vt}(p \rightarrow 0) = a_i / (1 + e_i)$ 。

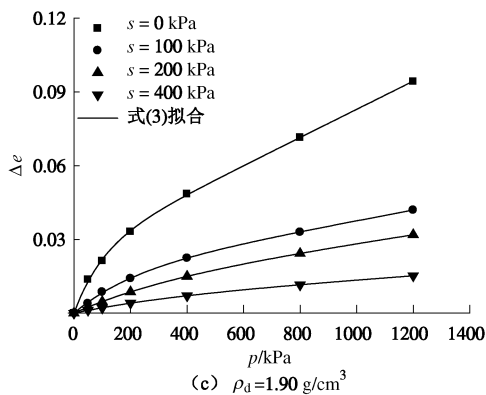
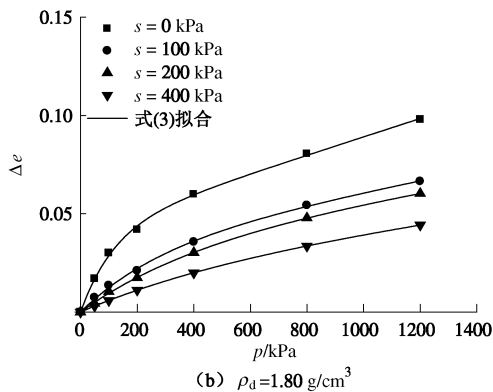
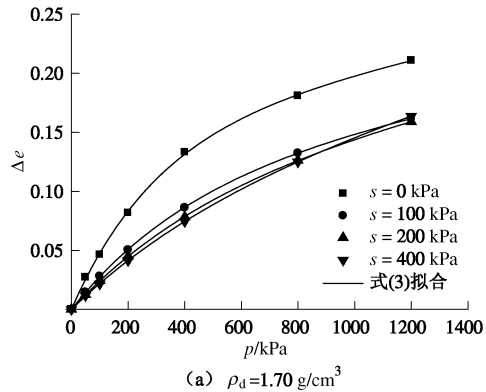


图 3 试验数据与式 (3) 的拟合效果

Fig. 3 Test data and fitting effectiveness of Eq. (3)

对式 (5) 在区间 $[0, p]$ 上进行积分得

$$\varepsilon = \frac{m_{vi}}{\beta} \{ (1-r)[1 - \exp(-\beta p)] + r\beta p \} \quad (6)$$

文献[3]曾提出了式 (7) 对土样一维压缩的 $\varepsilon - p$ 关系进行描述:

$$p/\varepsilon = a + bp \quad (7)$$

式中, a , b 分别为 $p/\varepsilon - p$ 关系直线的截距和斜率。

由于式 (7) 的数学形式为双曲线, 因此只有当 $\varepsilon - p$ 曲线的末段近似水平, 即压缩变形随净竖向压力变化不明显或者土样压缩性很小时才能获得良好的拟合效果, 而对于这种情况, 式 (6) 中的 $rm_{vi} \rightarrow 0$, 式 (6) 可简化为

$$\varepsilon = \frac{m_{vi}}{\beta} [1 - \exp(-\beta p)] \quad (8)$$

不同公式对 $\varepsilon - p$ 关系的拟合效果见图 4。

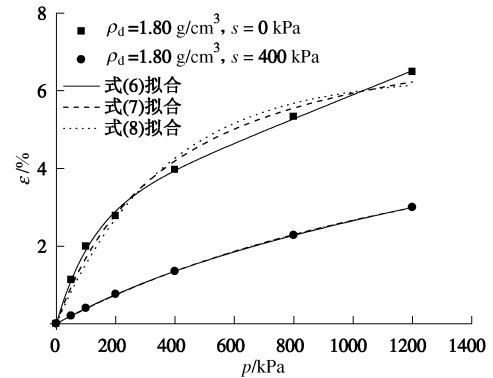


图 4 试验数据与各式的拟合效果

Fig. 4 Test data and fitting effectiveness of different equations

由图 4 可知, 对于初始干密度为 1.80 g/cm^3 、基质吸力为 400 kPa 的 $\varepsilon - p$ 曲线, 式 (6) ~ (8) 均与试验数据吻合良好, 各式的拟合曲线几乎重合; 但当基质吸力为 0 kPa 时, 式 (6) 的拟合效果较好。这是因为, 基质吸力较小时, 试样压缩性较大, 在常见的压力范围内, $\varepsilon - p$ 曲线的末段近似为上升直线, 此时用式 (7)、(8) 将会引起较大误差。总的来看, 式 (6) 与试验数据较为吻合, 适用性较强。

3 模型参数的确定及其影响因素分析

确定参数 a_i , β 和 r 只需应用式 (3) 对土样一维压缩的 $\Delta e - p$ 关系曲线进行拟合, 或采用式 (6) 来拟合 $\varepsilon - p$ 关系曲线。由于式 (3)、(6) 实质是同一规律的不同表述形式, 故所得参数值是相同的, 本文采用第一种方法确定模型参数。由于拟合结果的决定系数 R^2 均在 0.95 以上, 且残差散点图显示无序, 故认为拟合效果良好, 所得数值可靠。

3.1 a_i 的影响因素分析

a_i 与初始干密度和基质吸力的关系见图 5。

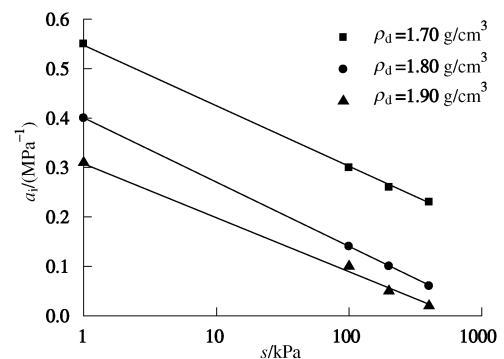


图 5 初始压缩系数与初始干密度和基质吸力的关系

Fig. 5 Variation of a_i with ρ_d and s

如图 5 所示, ρ_d 相等时, a_i 随 s 的增大而减小;

对应于同一 s , ρ_d 越大时, a_i 越小。同一 ρ_d 下, a_i 与 $\lg s$ 呈良好的线性关系, 可用下式拟合:

$$a_i = m_1 + n_1 \lg s \quad , \quad (9)$$

式中, m_1 和 n_1 分别为图 5 中拟合直线的截距和斜率。对于饱和试样, $a_i = m_1$, 故 m_1 表示饱和试样的初始压缩系数; 而 n_1 为负数, 反映了 a_i 随基质吸力增大而降低的快慢。

3.2 β 的影响因素分析

β 与 ρ_d 和 s 的关系见图 6。

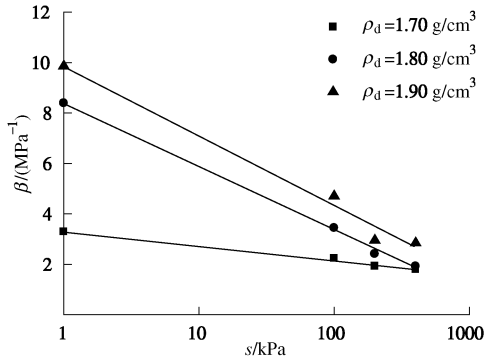


图 6 β 与初始干密度和基质吸力的关系
Fig. 6 Variation of β with ρ_d and s

由图 6 可知, ρ_d 相等时, β 随 s 的增大而减小; 对应于同一 s , ρ_d 越大时, β 越大。同一 ρ_d 下, β 与 $\lg s$ 呈良好的线性关系, 可用下式拟合:

$$\beta = m_2 + n_2 \lg s \quad , \quad (10)$$

式中, m_2 和 n_2 分别为图 6 中拟合直线的截距和斜率。对于饱和试样, $\beta = m_2$, 即 m_2 表示饱和试样的压缩系数衰减指标; 而 n_2 为负数, 反映了 β 随基质吸力增大而降低的快慢。

3.3 r 的影响因素分析

r 与 ρ_d 和 s 的关系见图 7。

如图 7 所示, r 随 s 的增大而增大; 对应于同一 s , ρ_d 越大时, r 越大。同一 ρ_d 下, r 与归一化基质吸力呈良好的线性关系, 可用下式拟合:

$$r = m_3 + n_3 (s / p_{atm}) \quad , \quad (11)$$

式中, m_3 和 n_3 分别为图 7 中拟合直线的截距和斜率, s / p_{atm} 为归一化基质吸力, p_{atm} 为标准大气压值。对于饱和试样, $r = m_3$, 即 m_3 表示饱和试样的压缩系数比;

而 n_3 为正, 反映了 r 随基质吸力提高而增加的快慢。

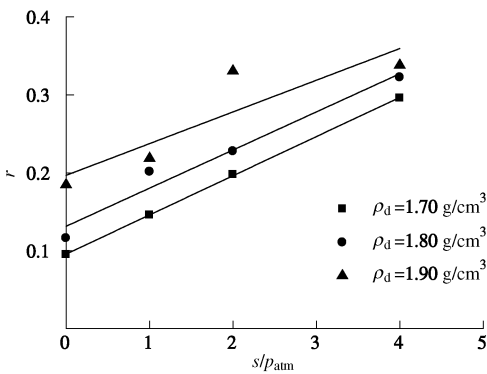


图 7 r 与初始干密度和基质吸力的关系
Fig. 7 Variation of r with ρ_d and s

应用文献[5, 10~12]中的数据对式(2)、(3)以及式(5)、(6)进行了验证, 试验数据与拟合式吻合良好, 所得参数值汇于表 1。

由表 1 可知, 模型参数的具体数值因土样类别和密实度等因素的影响而存在差异, 但不同文献的试验数据所反映的规律是一致的。安阳低液限黏土与土耳其低液限黏土的类别相同, 参数值较为接近; 高庙子膨润土的参数值与其余土样的相差最大; 上海软土的饱和初始压缩系数 m_1 约为高庙子膨润土的 60 倍, 且前者的饱和压缩系数衰减指标 m_2 约为后者的 130 倍, 说明上海软土的初始压缩性明显大于高庙子膨润土, 且随净竖向压力的增大, 前者的压缩性衰减速率要远高于后者; 表 1 所列的 5 种土中, 高庙子膨润土的 n_1 , n_2 和 n_3 的绝对值最小, 说明其压缩特性受基质吸力的影响最小。在实际工程中, 应针对具体情况选择合理的参数值。

另一方面, 如第 2 节所述, 双曲线模型(式(7))以及指数模型(式(8))存在严格的适用条件: 即土样终了切线体积压缩系数 rm_{vi} 或终了切线压缩系数 ra_i 的数值接近于 0。例如, 对于表 1 中的高庙子膨润土的参数值, 用式(9)计算所得的 a_i 和用式(11)计算所得的 r 均很小, ra_i 的数值接近于 0, 此时可简单地用式(7)、(8)对土样变形规律进行描述。但对于高压缩性土样, 或者当土样的初始干密度和基质吸

表 1 对文献中数据的分析验证结果

Table 1 Results of analysis and verification of test data in other literatures

数据来源	土样类别	ρ_d /(g·cm ⁻³)	m_1 /(MPa ⁻¹)	n_1	m_2 /(MPa ⁻¹)	n_2	m_3	n_3	决定系数 R^2
本文	安阳低液限黏土	1.70	0.549	-0.124	3.301	-0.573	0.095	0.0500	0.95
		1.80	0.400	-0.130	8.390	-2.521	0.131	0.0490	0.95
		1.90	0.312	-0.111	9.884	-2.779	0.197	0.0410	0.95
文献[5]	土耳其低液限黏土	1.84	0.789	-0.334	8.414	-1.581	0.230	0.3700	0.86
文献[10]	上海软土	1.13	5.981	-2.193	26.244	-10.062	0.114	0.0060	0.95
文献[11]	高庙子膨润土	1.70	0.097	-0.020	0.201	-0.042	0.025	0.0005	0.90
文献[12]	绵竹粉质砂土	1.61	1.241	-0.460	25.160	-8.677	0.055	0.1720	0.82

力较小时(见图4),式(7)、(8)并不适用。相比之下,式(3)、(6)的适用性较强。

4 模型的其它应用

4.1 压缩性指标的计算

由式(2)可方便地求出任意压力间隔内土样的平均压缩性指标。如工程实践中常采用压力间隔由 $p_1 = 0.1 \text{ MPa}$ 增加到 $p_2 = 0.2 \text{ MPa}$ 时所得的压缩系数^[13]:

$$a_{1-2} = (e_1 - e_2) / (p_2 - p_1) \quad (12)$$

式中, e_1 和 e_2 分别为 p_1 和 p_2 对应的孔隙比。

此时,可取 p_1 和 p_2 的平均值,采用式(2)来计算 p_1 和 p_2 间隔内的平均压缩系数,即

$$a_m = a_i [(1-r) \exp(-0.15\beta) + r] \quad (13)$$

式中, a_m 为 $(p_1 + p_2)/2$ 对应的切线压缩系数。

a_m 和 a_{1-2} 与 ρ_d 和 s 的关系见图8。

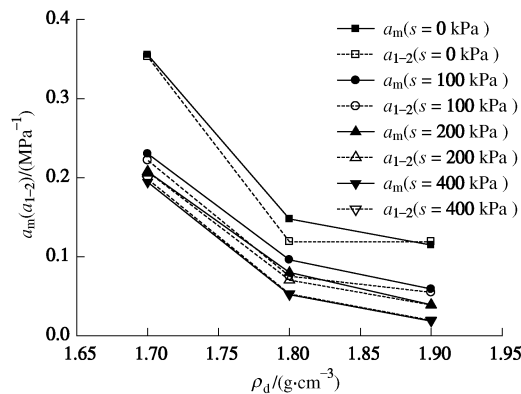


图8 a_m 和 a_{1-2} 与 ρ_d 和 s 的关系

Fig. 8 Variation of a_m and a_{1-2} with ρ_d and s

由图8可知,除了初始干密度为 1.80 g/cm^3 和基质吸力为 $0, 100 \text{ kPa}$ 两个数据点以外, a_m 与 a_{1-2} 相差小于 10% , 故认为二者基本相同。另一方面,同一基质吸力下, a_m 和 a_{1-2} 均随初始干密度的增大而呈二次曲线减小,这与文献[14]的结论基本一致。

在求得平均压缩系数后,可换算得到平均压缩指数、压缩模量,如果已知泊松比,还可得到变形模量。

4.2 一维湿化变形规律的描述

非饱和土体在浸水饱和时将产生湿化变形,应用本文提出的模型可方便地对这一现象进行描述。湿化变形系数定义如下:

$$\delta_h = \frac{h - h'}{h_i} \quad (14)$$

式中, δ_h 为湿化变形系数, h 和 h' 分别为非饱和和饱和试样在一定净竖向压力下变形稳定后的高度, h_i 为试样的初始高度。

对式(14)进行变换可得:

$$\delta_h = \frac{(h_i - h') - (h_i - h)}{h_i} = \varepsilon' - \varepsilon \quad (15)$$

式中, ε' 和 ε 分别为饱和试样和非饱和试样在一定净竖向压力下产生的竖向应变,可由式(6)求出。

以干密度为 1.80 g/cm^3 的安阳低液限黏土为例,用式(15)可计算出不同基质吸力的试样浸水饱和后的湿化变形系数,见图9。由图9可知,在同一净竖向压力下,试样的基质吸力越大,湿化变形系数越大;而基质吸力为一定值时,湿化变形系数随净竖向压力的增大而增大。

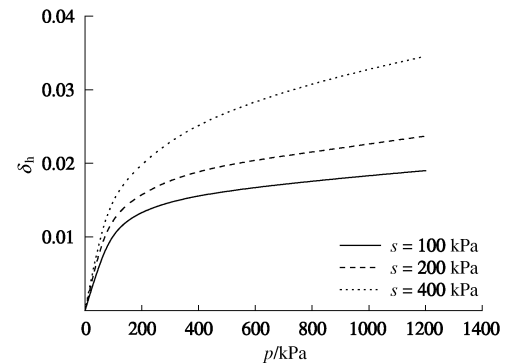


图9 不同基质吸力下的 δ_h 随净竖向压力 p 的变化关系

Fig. 9 Variation of δ_h with p under various matric suctions

4.3 一维收缩变形规律的描述

在分析文献[5]的数据时,发现土样在净竖向压力不变时,孔隙比变化量 Δe (即收缩变形)与基质吸力 s 的关系可采用类似式(3)的关系式进行描述:

$$\Delta e = \frac{a_{si}}{\beta_s} \{ (1-r_s) [1 - \exp(-\beta_s s)] + r_s \beta_s s \} \quad (16)$$

式中, a_{si} , β_s 和 r_s 分别为一维收缩试验中,与基质吸力 s 相关的初始压缩系数、压缩系数衰减指标和压缩系数比。由图10可知,式(16)与文献[5]中的试验数据基本一致。

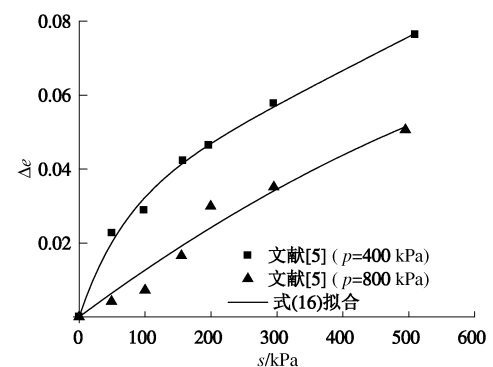


图10 Δe 与基质吸力的关系

Fig. 10 Variation of Δe with s

5 结 论

(1) 发现切线压缩系数 a_i 和切线体积压缩系数 m_{vi} 均随净竖向压力的增大呈指数衰减,初始切线压缩系数 a_i 和压缩系数衰减指标 β 均随对数基质吸力

的增大近似呈线性衰减, 压缩系数比 r 随归一化基质吸力的增大近似呈线性增大。

(2) 双曲线模型(式(7))和指数模型(式(8))存在严格的适用条件: 即土样终了切线体积压缩系数 rm_{vi} 或终了切线压缩系数 ra_i 的数值接近于 0。相比之下, 提出的式(3)、(6)对不同类别的(非)饱和土适用性较强。

(3) 式(2)可用于计算任意压力间隔内的平均压缩性指标; 式(6)、(15)可用于计算非饱和土在浸水饱和时产生的一维湿化变形; 式(16)可用于描述非饱和土随基质吸力增大的一维收缩变形规律。

须指出, 本文所得结论是基于非饱和土一维压缩试验, 对于非饱和土在三轴条件下的变形规律, 其适用性还有待考证。

参考文献:

- [1] 吴宏伟, 李 青, 刘国彬. 上海黏土一维压缩特性的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(4): 630 - 636. (NG C W W, LI Qing, LIU Guo-bin. Characteristics of one-dimensional compressibility of Shanghai clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(4): 630 - 636. (in Chinese))
- [2] 王洪波, 邵龙潭, 张学增. 基于亚塑性理论的无黏性土压缩试验应力应变的研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(6): 780 - 783. (WANG Hong-bo, SHAO Long-tan, ZHANG Xue-zeng. Studies on stress-strain equation of noncohesive soils obtained from oedometer tests based on hypoplastic constitutive model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(6): 780 - 783. (in Chinese))
- [3] SRIDHARAN A, GURTUG Y. Compressibility characteristics of soils[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2005, **23**(5): 615 - 634.
- [4] MOHAMEDZEIN Y E A, ABOUD M H. Compressibility and shear strength of a residual soil[J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, **24**(5): 1385 - 1401.
- [5] KAYADELEN C. The consolidation characteristics of an unsaturated compacted soil[J]. Environmental Geology, 2008, **54**(2): 325 - 334.
- [6] 金银富, 张爱军, 尹振宇, 等. 矿物成分相关的黏土一维压缩特性分析[J]. 岩土工程学报, 2013, **35**(1): 131 - 136. (JIN Yin-fu, ZHANG Ai-jun, YIN Zhen-yu, et al. One-dimensional compressibility of soft clay related to clay minerals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, **35**(1): 131 - 136. (in Chinese))
- [7] 陈正汉, 扈胜霞, 孙树国, 等. 非饱和土固结仪和直剪仪的研制及应用[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(2): 161 - 166. (CHEN Zheng-han, HU Sheng-xia, SUN Shu-guo, et al. Development & application of consolidation apparatus and direct shear apparatus for unsaturated soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(2): 161 - 166. (in Chinese))
- [8] GB/T50123—1999 土工试验方法标准[S]. 1999. (GB/T50123—1999 Specification of soil test[S]. 1999. (in Chinese))
- [9] 苗强强, 张 磊, 陈正汉, 等. 非饱和含黏砂土的广义土-水特征曲线试验研究[J]. 岩土力学, 2010, **31**(1): 102 - 106, 112. (MIAO Qiang-qiang, ZHANG Lei, CHEN Zheng-han, et al. Experimental study of generalized SWCC of unsaturated sand and containing clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, **31**(1): 102 - 106, 112. (in Chinese))
- [10] 叶为民, 朱悦铭, 陈 宝, 等. 上海软土非饱和压缩特征[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, **39**(10): 1458 - 1462. (YE Wei-min, ZHU Yue-ming, CHEN Bao, et al. Compressibility of Shanghai unsaturated soft soil[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2011, **39**(10): 1458 - 1462. (in Chinese))
- [11] YE W M, ZHANG Y W, CHEN B, et al. Investigation on compression behaviour of highly compacted GMZ01 bentonite with suction and temperature control[J]. Nuclear Engineering and Design, 2012, **252**: 11 - 18.
- [12] 唐延贵, 吴礼舟. 粉质砂土的土-水特征及一维应力变形试验研究[J]. 长江科学院院报, 2013, **30**(10): 62 - 65. (TANG Yan-gui, WU Li-zhou. Experimental study on the soil water characteristics and deformation of silty sand under 1D stress[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, **30**(10): 62 - 65. (in Chinese))
- [13] 赵明华, 俞 晓. 土力学与基础工程[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2004: 70 - 74. (ZHAO Ming-hua, YU Xiao. Soil mechanics and foundation engineering[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2004: 70 - 74. (in Chinese))
- [14] 张虎元, 贾灵艳, 周 浪. 高效废物处置库的混合型缓冲回填材料压缩特性研究[J]. 岩土力学, 2013, **34**(6): 1546 - 1552. (ZHANG Hu-yuan, JIA Ling-yan, ZHOU Lang. Compression behaviors of compacted bentonite-sand mixtures as buffer material for HLW disposal[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, **34**(6): 1546 - 1552. (in Chinese))