

DOI: 10.11779/CJGE2022S1004

非饱和含黏砂土不排水不排气力学特性三轴试验研究

苗强强¹, 陈正汉², 朱青青³

(1. 西北民族大学土木工程学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 陆军勤务学院军事设施系, 重庆 401311; 3. 西北民族大学化工学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为研究非饱和含黏砂土在不同含水率、压实度、不排水不排气条件下的强度、变形和回弹模量特性, 用改进的非饱和土三轴仪对广佛高速路基含黏砂土做了2类试验: ①不排水不排气三轴剪切试验, 控制干密度为 1.85 g/cm^3 , 含水率为 10.47%, 13.63%, 14.5% 和 16.02%, 围压为 50, 100, 200 kPa, 共 12 个试验; ②循环加卸载条件下回弹模量试验, 干密度控制为 $1.70, 1.80, 1.85 \text{ g/cm}^3$, 含水率控制为 10.47%, 13.63% 和 16.02%, 围压和偏应力分别控制为 100, 200 kPa, 共 9 个试验, 采用 6 级应力式加卸载方式, 每个试样在不排水不排气剪切条件下进行了 2 次加卸载循环。研究表明: 最优含水率是土样内摩擦角、黏聚力、破坏形态发生变化的临界值; 剪胀强弱与围压和含水率密切相关; 剪胀性随围压和含水率的增加而逐渐减弱; 随剪切的进行, 孔隙水压力和孔隙气压力都先增大再减小, 随剪胀的发生, 孔隙气压力与孔隙水压力曲线逐渐分开, 基质吸力增大; 相同含水率, 净围压越大, 孔隙气压力和孔隙水压力也越大。通过数据分析, 构建了含水率、压实度、回弹模量之间的多元非线性函数表达式; 分析比较了含水率、压实度对回弹模量影响的显著性, 发现含水率对回弹模量的影响远大于压实度的影响。本文的研究成果可为相关公路设计和施工提供有益的参考。

关键词: 非饱和含黏砂土; 不排水不排气三轴试验; 三轴循环加卸载试验; 变形强度特性; 回弹模量

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2022)S1-0017-07

作者简介: 苗强强(1979—), 男, 副研究员, 主要从事非饱和土力学和防护工程方面的科研与教学工作。E-mail: miaoqiang2008@qq.com。

Triaxial tests on mechanical properties of undrained and unvented unsaturated clayey sandy soil

MIAO Qiang-qiang¹, CHEN Zheng-han², ZHU Qing-qing³

(1. College of Civil Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730000, China; 2. Department of Military Installation, Army Logistics University, Chongqing 401311, China; 3. School of Chemical Engineering, Northwest Minzu University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: In order to study the characteristics of strength, deformation and resilience modulus of unsaturated clayey sands soil under the undrained and unvented condition at different water contents and compaction degrees, an improved unsaturated soil triaxial instrument is used. Two types of tests on the clayey sandy soil of the subgrade of Guangfo Expressway are carried out: (1) twelve undrained and unvented triaxial shear tests with the dry density of 1.85 g/cm^3 , the water contents of 10.47%, 13.63%, 14.5% and 16.02%, and the confining pressures of 50, 100 and 200 kPa; (2) nine resilience modulus tests under cyclic loading and unloading conditions with the dry densities of $1.70, 1.80, 1.85 \text{ g/cm}^3$, the water contents of 10.47%, 13.63% and 16.02%, the confining pressures and the deviatoric stresses of 100 and 200 kPa. The 6-level stress loading and unloading method is adopted, and each sample is subjected to 2 loading and unloading cycles under undrained and unvented shearing. The results show that the optimum water content is the critical value at the turning point of internal friction angle, cohesion and strength of soil. The strength of the dilatancy greatly relates with the confining pressure and the water content. With the increase of the confining pressure and the water content, the dilatancy gradually decreases. With the progress of shearing, the pore water pressure and pore gas pressure both increase first and then decrease, and with the occurrence of shear dilatation. The curves of the pore gas pressure and the pore water pressure are gradually separated, and the matrix suction increases. Under the same water content, the greater the net confining pressure, the greater the pore gas pressure and the pore water pressure. Through the data analysis, the multivariate nonlinear function expression for the water content, the compaction degree and the resilience modulus is established. The significance of the influences of the water content and the compaction degree on the resilience modulus is analyzed. The influences of the water content on the

基金项目: 甘肃省高等学校青年博士支持项目; 西北民族大学高层次人才引进项目

收稿日期: 2022-09-28

resilience modulus much greater than those of the compaction degree. The research results may provide a useful reference for the design and construction of the related highways.

Key words: unsaturated clayey sand; undrained and unvented triaxial test; triaxial cyclic loading and unloading test; characteristic of deformation and strength; resilience modulus

0 引言

不排水不排气条件下的非饱和土力学特性与公路、铁路、机场、水利、建筑等行业实际工程问题紧密相关,伴随中国基建高速发展的步伐,非饱和土不排水不排气剪切条件下的变形、强度、回弹模量变化特性研究显得较为重要。近年来非饱和土理论、试验、工程方面得到了高速发展。如陈正汉等^[1]以压实黄土为对象,系统研究了非饱和黄土渗气性、渗水性、孔隙水压和孔隙气压在三轴不排水不排气剪切过程中的演化特性,苗强强等^[2]对广佛高速非饱和含黏砂土的水气运移规律和力学特性进行了系统研究,杨松等^[3]对云南非饱和红黏土的不排气、不排水三轴剪切特性进行了试验研究,刘文化等^[4]借助于数值模拟研究了不排水条件下非饱和土水力-力学耦合特性对非饱和土的不排水、不排气三轴剪切特性进行预测,詹良通等^[5]对深圳花岗岩风化料弃土快速堆填过程中不排水抗剪强度进行了评估。与此同时,回弹模量的测定和取值研究也是国内外众多道路科研机构 and 施工单位长期关切的问题。2002 年,由美国材料试验协会(ASTM)举办路面材料回弹模量研讨出版了论文集^[6]。在 AASHTO2002 路面设计指南中^[7],考虑了湿度对路基回弹模量的影响。WAI 用于干湿循环模拟路基土湿度变化^[8-9],湿度增大,路基回弹模量减小;干湿循环对路基回弹模量也有影响。杨树荣等^[10]利用 MTS 动力三轴试验系统,探讨了非饱和黏性路基土之回弹模量特性及基质吸力对回弹模量之影响。李丹枫等^[11]提出了基于便携式落锤弯沉仪模量控制的路基承载力动力学指标评价方法。刘君等^[12]对 3 类计算模型的可靠性及适用性进行对比评价。

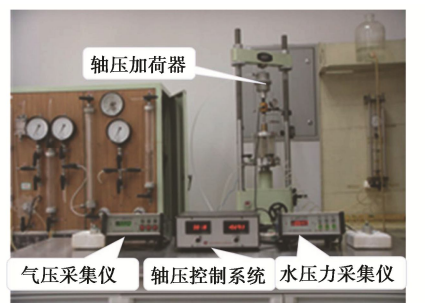
综合国内外研究现状,对非饱和土不排水不排气三轴剪切试验孔压、体变、回弹模量等特性演化过程和机理研究还相对滞后并缺少相关配套仪器设备支撑研究试验。故本文使用自行改进的循环加卸载非饱和土三轴仪系统,探讨高速公路车辆运行过程中含黏砂土在不同含水率和压实度不排水不排气条件下,强度、变形和回弹模量变化特性。

1 试验设备

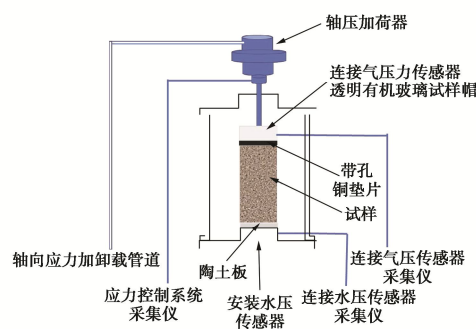
试验设备系在后勤工程学院非饱和土三轴仪^[1]的

基础上改进而成的循环加卸载非饱和土三轴仪系统(图 1)。该仪器主要组成部分有非饱和土三轴双层压力室、加卸载系统、围压控制系统、反压控制系统及数据采集系统等,主要部件的特色简介如下。

(1) 双层压力室,分为内压力室和外压力室,通过量测内压力室的水量变化计算试样的体积变化。内压力室试样底座上安装有高进气值陶土板,陶土板下面有螺旋槽,用以冲洗陶土板下面的气泡。



(a) 试验设备照片



(b) 试验设备示意图

图 1 不排水不排气非饱和土三轴试验系统

Fig. 1 Triaxial test system for undrained and unvented unsaturated soil

(2) 轴向加载装置,采用活塞式加荷器,由空气压缩机提供压力源,用高精度气压调压阀和精密气压表控制施加的气压力。试验前用量力环对加荷器的输出压力进行了标定。加荷器可提供 0~30 kN 的轴向压力,相应的偏应力为 0~2500 kPa。

(3) 微型压力传感器(气压和水压)(图 2)。探头直径都是 3 mm,用黏结剂胶接在外直径 8 mm 的空心螺母中。螺母下端约 2 mm 长的一段,用以保护传感器探头。气压传感器的引线从三轴仪底座原来安装排水管出口的地方引出。把量测气压的微型传感器装在试样帽上,从而提高了量测气压的精度,并实现了

试样的小型化, 这是该设备的一个重要特色。

(4) 数字应变仪 (图 1), 分别与孔隙水压力传感器和孔隙气压力传感器连接 (图 2), 采集孔压数据。试验前对微型传压力感器进行了标定, 传感器与应变仪在工作中性能稳定, 外界干扰对其几乎无影响, 压力和输出数值之间有良好的线性关系, 传感器的标定曲线如图 3 所示。



图 2 微型压力传感器

Fig. 2 Micro-sensors

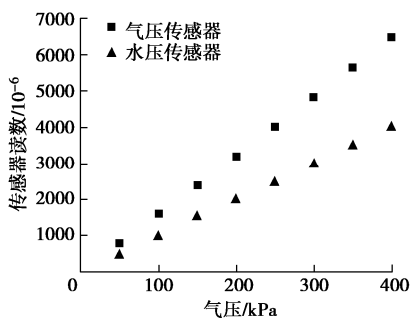


图 3 传感器标定

Fig. 3 Calibration of sensors

2 试验研究方案

本文以广州—佛山高速公路路基含黏砂土为研究对象, 其物性指标如表 1 所示。该土的最优含水率为 13.63%, 最大干密度为 1.89 g/cm³。

表 1 试验所用含黏砂土的颗粒组成^[13]

Table 1 Grain sizes of clayey sand used in tests^[13]

G_s	颗粒组成/%				
	>2 mm	0.5~2 mm	0.2~0.5 mm	0.2~0.075 mm	<0.075 mm
2.68	10.39	19.58	32.46	22.75	14.82

研究试样为重塑土样。采用后勤工程学院的重塑土制样设备和模具, 把预先配制成一定含水率的土料分 5 层压实。试样的直径为 39.1 mm, 高 80 mm。共做了 2 类 21 个试验: ①12 个不排水不排气三轴剪切试验, 控制 1.85 g/cm³, 含水率分别为 10.47%, 13.63%, 14.5%和 16.02 %, 控制分别围压为 50, 100, 200 kPa; ②9 个循环加卸载条件下回弹模量试验, 干密度控制为 1.70, 1.80, 1.85 g/cm³ 分别对应压实度 90%, 95% 和 98%; 对每一干密度配制 3 个含水率: 10.47%, 13.63%和 16.02%;, 试验控制围压 100 kPa, 最大偏应

力 200 kPa, 采用应力控制式分 6 级进行加卸载。

第 1 类试验是为了探讨压实度和含水率在最优含水率附近变动对该土变形强度的影响, 试样初始吸力为 50 kPa。考虑到施加围压后试样体积压缩, 饱和度提高, 吸力有所降低, 故可用传感器直接量测。若对含水率更低试样进行不排水剪切试验, 量测吸力就需采用轴平移技术, 施加适当的气压力使水压力变为正值或大于-70 kPa 进行测定。为了与控制吸力的三轴试验相区别, 将不排水不排气试验的围压称为总围压, 用 σ_3 表示; 相应的, 将该试验的平均应力称为总平均应力, 用 p 表示。剪切速率为 0.015 mm/min, 剪切至轴向应变达 15%需要 13.5 h。

3 试验结果及分析

3.1 不排水不排气三轴剪切试验

图 4 是干密度为 1.85 g/cm³ 的砂土在不同含水率、不排水不排气条件下, 在 $p_f - q_f$ 平面内的强度包络线关系曲线, 含水率相同、不同净围压的一组实验几乎在同一直线上, 可由式 (1), (2) 和 (3) 描述。

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad , \quad (1)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad , \quad (2)$$

$$q_f = \xi + p_f \tan \varpi \quad . \quad (3)$$

式中 p, q 分别为总平均应力和偏应力; σ_1, σ_2 和 σ_3 是 3 个总主应力。 p_f 破坏时总平均应力, q_f 破坏时偏应力, ξ 和 $\tan \varpi$ 分别为 $p_f - q_f$ 平面上直线的截距和斜率。

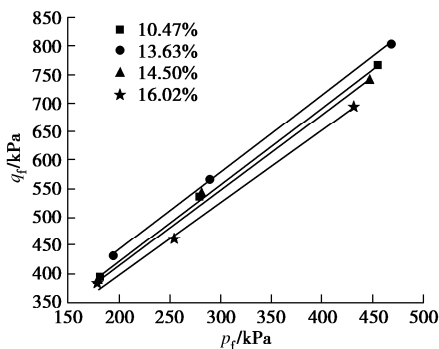


图 4 $p_f - q_f$ 平面内的强度包络线

Fig. 4 Curves of strength on $p_f - q_f$ plane

土的不排水不排气内摩擦角、黏聚力分别由下式得出

$$\sin \varphi_{uu} = \frac{3 \tan \varpi}{6 + \tan \varpi} \quad , \quad (4)$$

$$c_{uu} = \frac{3 - \sin \varphi_{uu}}{6 \cos \varphi_{uu}} \quad . \quad (5)$$

图5为含黏砂土的 $c_{uu} - w$ 关系曲线, 由图5可知,

在最优含水率范围,随含水率的增加,黏聚力增加,超过最优含水率后,随含水率的提高,黏聚力逐渐减小;图6为含黏砂土的 $\varphi_{uu} - w$ 关系曲线,由图6可知,在小于最优含水率时,随含水率的增加内摩擦角增大,但变化较小。超过最优含水率后,随含水率的提高,内摩擦角急剧减小。图5, 6共同反应了最优含水率是黏聚力和内摩擦角发生变化的临界值。

图7为不同含水率时孔隙水压力和孔隙气压力随轴向应变的变化曲线,其中,图中实心符号为气压力,空心符号为水压力。图7可知,孔隙气压力和孔隙水压力与试样的体变密切相关,试样的体变峰值点基本上对应于孔隙气压力峰值点;剪缩时孔隙气压力升高,剪胀时孔隙气压降低。含水率越大,孔隙中水分就越多,气体占据量就较少,在相同围压作用下,含水率越大试样的初始孔隙压力也就越大。随试样剪切的进行,孔隙水压力和孔隙气压力都先增大再减小;伴随剪胀的发生,孔隙气压力与孔隙水压力曲线逐渐分开,这是由于发生剪胀,含水率不变,体积增大,相应基质吸力也增大;在相同含水率时,净围压越大,孔隙气压力和孔隙水压力也越大。

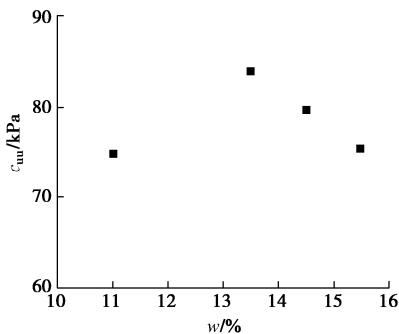


图5 $c_{uu} - w$ 关系曲线

Fig. 5 Relationship between c_{uu} and w

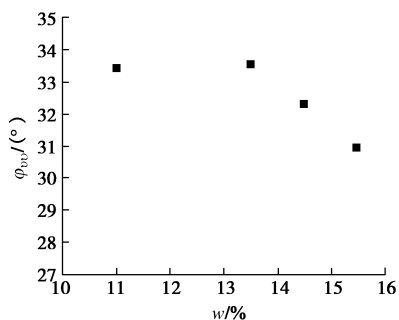
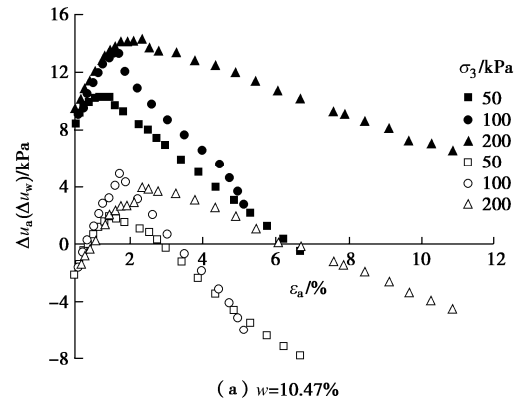


图6 $\varphi_{uu} - w$ 关系曲线

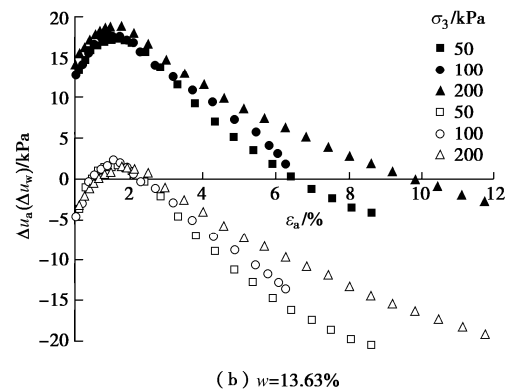
Fig. 6 Relationship between φ_{uu} and w

由图7(a)可以看出,3组数据气压力出现峰值早于孔隙水压力,图7(b)几乎相同,图7(c)孔隙水压力略早于孔隙气压力,图7(d)明显的是孔隙水压力出现的峰值早于孔隙气压力,而本文的试样最优含水率是13.63%,出现这种现象的原因可能是在最优含水率之前土样内部流体形式是气相占优,主要决定

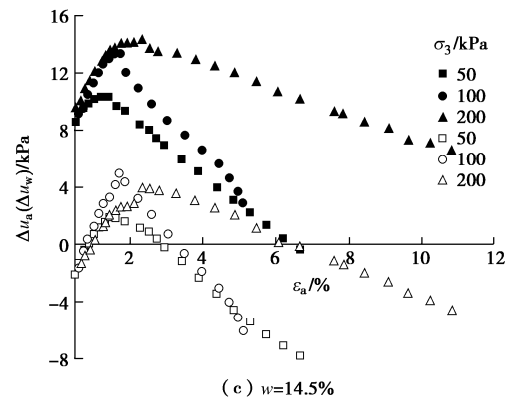
因素是气相,而水相可能不连续,当气相气压力稳定之后挤压水相,最终水相也达到峰值点;处于最优含水率时水气两相均连续分布较好,当外力作用时,两者同时达到峰值点;当水相占优势时和气相占优势同理孔隙水压力到达峰值点先于孔隙气压力。



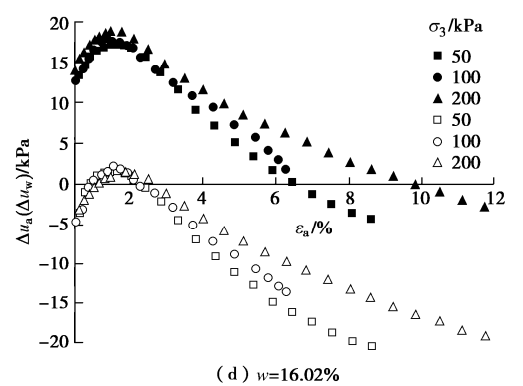
(a) $w=10.47\%$



(b) $w=13.63\%$



(c) $w=14.5\%$



(d) $w=16.02\%$

图7 孔隙压力 - 轴向应变关系曲线^[2]

Fig. 7 Relationship between pore pressure and axial strain^[2]

3.2 循环加卸载条件下回弹模量试验

在不排水不排气剪切过程中, 每个试样进行两次加卸载循环, 采用加卸载应力-应变滞回圈上下两端点的连线 AC 的斜率表示回弹模量, 如图 8 (a) 所示。回弹模量用式 (6) 计算。

$$E_t = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (6)$$

式中, E_t 回弹模量, $\Delta\sigma$ 循环加卸载中应力变化, $\Delta\varepsilon$ 循环加卸载中应变变化。

图8为含水率10.47%时, 初始压实度分别为98%, 95%和90%的3个土样, 经过2次循环加卸载时应力应变曲线。由图8可以得出, 相同含水率不同压实度的试样, 压实度越大, 试样首次加载到200 kPa时曲线越陡; 滞回圈长轴连线(第一次卸载和第二次加载交点连线)斜率数值越大; 随着压实度的减小, 滞回圈轴向的斜率越来越小。

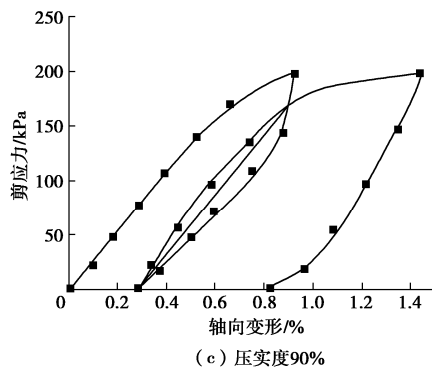
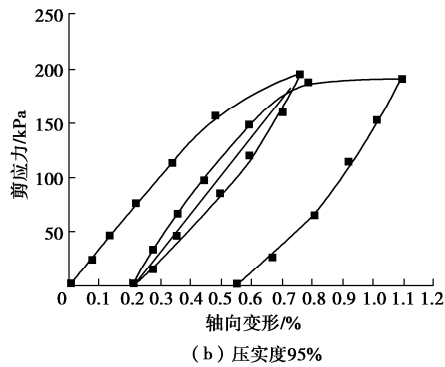
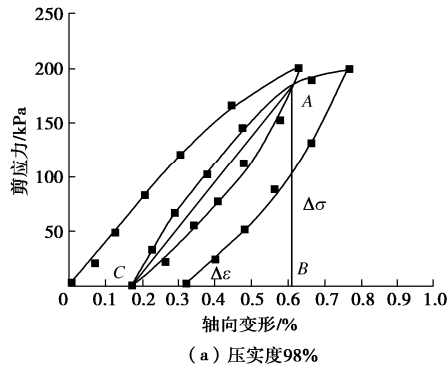


图8 含水率10.47%时2次循环加卸载剪应力与轴向应变关系^[2]
Fig. 8 Relationship between shear stress and axial strain under 2 loading-unloading cycles and of 10.47% water content^[2]

图9, 10 分别为含水率13.63%和16.02%时, 初始压实度分别为98%, 95%和90%的3个试样经过2次循环加卸载时应力-应变曲线图。由该图可清晰看出, 相同含水率不同压实度的试样反映的规律和图8规律基本一致。这说明含水率一定时, 压实度越大试样的回弹模量数值越大; 在试验加卸载范围内, 压实度小的试样所对应的滞回圈长轴连线的斜率越小; 在试验含水率范围, 含水率相同时, 不同压实度试样回弹模量最大相差不超过2倍。从图8~10和表2可看出相同压实度, 不同含水率的试样回弹模量相差较大, 含水率10.47%和含水率16.02%的两种土样回弹模量最大可相差接近5倍, 这说明含水率对回弹模量的影响较为显著。

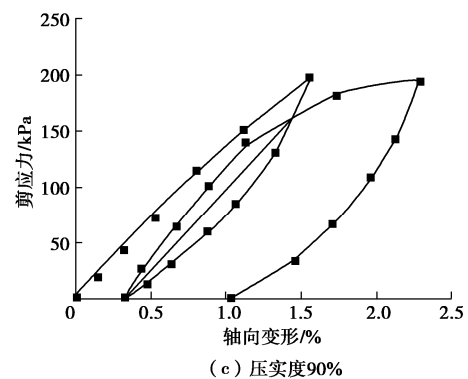
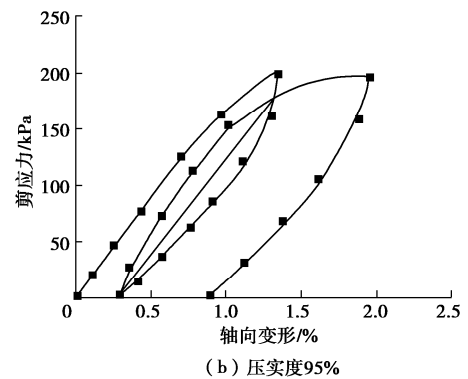
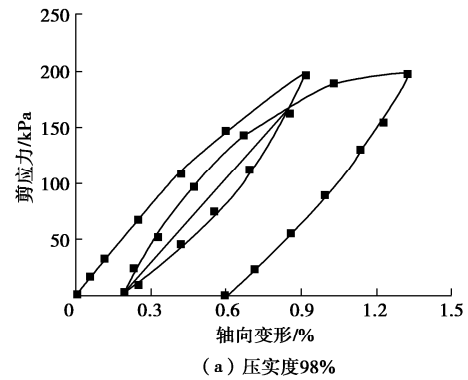


图9 含水率13.63%时2次循环加卸载剪应力与轴向应变关系^[2]
Fig. 9 Relationship between shear stress and axial strain under 2 loading-unloading cycles and water content of 13.63%^[2]

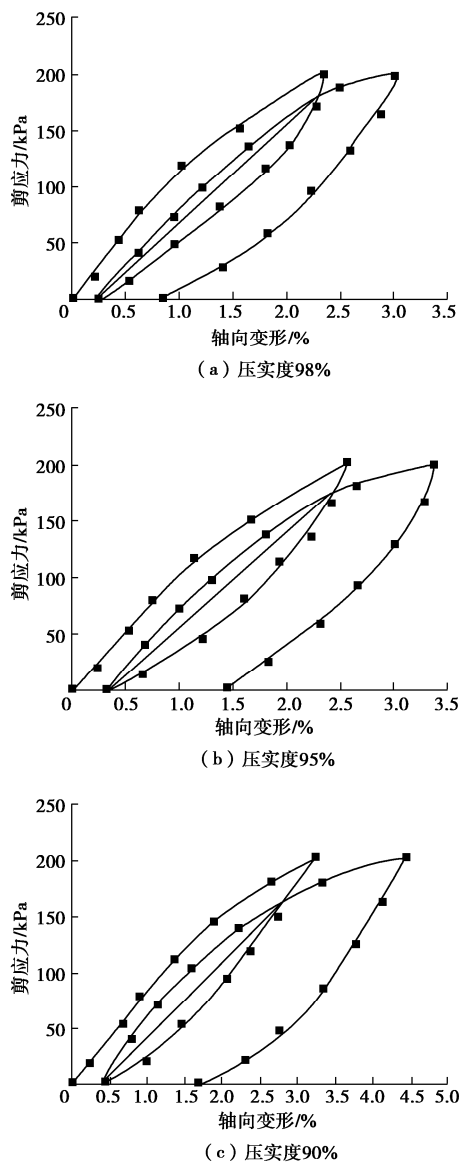


图 10 含水率 16.02% 时 2 次循环加卸载剪应力与轴向应变关系^[2]
Fig. 10 Relationship between shear stress and axial strain under 2 loading-unloading cycles and water content of 16.02%^[2]

表 2 回弹模量汇总

Table 2 Values of resilience modulus (MPa)			
压实度/%	含水率/%		
	10.47	13.63	16.02
98	40.48	24.48	8.55
95	31.76	16.33	7.78
90	24.69	12.56	5.68

为了更深入分析三者之间的关系,将压实度与回弹模量之间采用线性关系,将含水率与回弹模量之间的关系假定为指数函数关系,其关系表达为

$$\frac{E_t}{10p_a} = A + B\lambda + C \exp\left(\frac{(w-D)}{F}\right) \quad (7)$$

式中, E_t 回弹模量,单位为 MPa, p_a 为标准大气压约等于 0.1 MPa, λ 为压实度用百分数表示, w 为含水率用百分数表示, A, B, C, D, F 分别为与含水率、压实度相关的拟合系数。

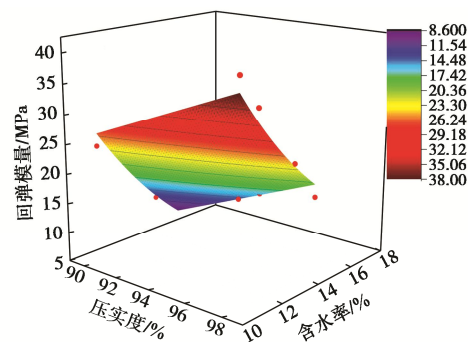


图 11 含水率、压实度与回弹模量拟合与试验数据关系图
Fig. 11 Relationship between fitting and test data of moisture content, compaction degree and resilience modulus

将含水率、压实度和回弹模量试验数据,采用 origin2016 自定义函数非线性多元方式(即式(7))进行拟合,得到含水率、压实度与回弹模量之间的函数关系的具体表达式如式(8)所示。其中 $A=-139.295$, $B=1.395$, $C=114.742$, $D=3.569$, $F=6.896$, $R^2=0.9121$ 。

$$\frac{E_t}{10p_a} = -139.295 + 1.395\lambda + 114.72 \exp\left(-\frac{(w-3.569)}{6.896}\right) \quad (8)$$

式(8)拟合的曲面与试验数值之间的关系如图 11 所示,拟合曲面与试验数值较为接近,拟合效果较好,说明本文所提含水率、压实度、回弹模量的函数表达式是可行的,有一定的实际推广价值和工程应用前景。

4 结 论

(1) 改进的非饱和土应力控制式三轴仪系统能够满足研究非饱和土在不排水不排气条件下的强度、变形、孔压演化和循环加卸载的回弹模量试验的要求。

(2) 最优含水率是土样内摩擦角、黏聚力、破坏形态发生变化的临界值;剪胀强弱与围压和含水率有密切关系,围压越大、含水率越高,剪胀性越小;随剪切的进行,孔隙水压力和孔隙气压力都先增大再减小;伴随剪胀的发生,孔隙气压力与孔隙水压力曲线逐渐分开,吸力增大。

(3) 通过对试验数据分析,构建了含水率、压实度、回弹模量之间的多元非线性函数表达式,拟合结果和试验数据较为接近。

(4) 非饱和含黏砂土含水率和压实度均对回弹模量有显著影响,且含水率的影响远大于干密度的影响。故在公路建设施工中,在确保压实度满足工程要求的前提下,选择合适的含水率甚为重要。

参考文献:

[1] 陈正汉, 谢定义, 王永胜. 非饱和土的水气运动规律及其

- 工程性质研究[J]. 岩土工程学报, 1993, **15**(3): 9 - 20. (CHEN Zheng-han, XIE Ding-yi, WANG Yong-sheng. Experimental studies of laws of fluid motion, suction and pore pressures in unsaturated soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, **15**(3): 9 - 20. (in Chinese))
- [2] 苗强强. 非饱和含黏砂土的水气运移规律和力学特性研究[D]. 重庆: 后勤工程学院, 2011. (MIAO Qiang-qiang. Study on Water-Gas Transfer Laws and Mechanics Properties of Unsaturated Clayey Sand[D]. Chongqing: Logistical Engineering University, 2011. (in Chinese))
- [3] 杨松, 吴珺华, 卢廷浩, 等. 非饱和和云南红黏土的不排气不排水变形特性研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2012, **33**(5): 53 - 56. (YANG Song, WU Jun-hua, LU Ting-hao, et al. Study on unventilated-undrained deformation behavior of Yunnan red cohesive soil[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2012, **33**(5): 53 - 56. (in Chinese))
- [4] 刘文化, 杨庆, 唐小微, 等. 不排水条件下非饱和土水力-力学耦合特性数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(3): 486 - 494. (LIU Wen-hua, YANG Qing, TANG Xiao-wei, et al. Numerical simulation of hydro-mechanical behaviors of unsaturated soils under fully undrained conditions[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(3): 486 - 494. (in Chinese))
- [5] 詹良通, 孙倩倩, 郭晓刚, 等. 花岗岩风化石弃土快速堆填过程中不排水抗剪强度评估[J]. 岩土力学, 2021, **42**(1): 50 - 58. (ZHAN Liang-tong, SUN Qian-qian, GUO Xiao-gang, et al. Estimation of undrained shear strength of completely decomposed granite waste during rapid landfilling[J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, **42**(1): 50 - 58. (in Chinese))
- [6] PNG W V. Effect of moisture on resilient characteristics of compacted granular subgrades[C]// 77th Annual Meeting of Transportation Research Board. CDROM, 1998.
- [7] Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures. National Cooperative Highway Research Program NCHRP Project 1 -37A Rep[D]. Washington D C: Transportation Research Board, 2004.
- [8] WAI Y Y G, JORGEAC A C. Soil suction and insitu resilient modulus-A study developed at a full-scale pavement test facility in southern Brazil[C]// International Symposium on Subdrainage in Roadway Road sand Subgrades. Espana, World Road Association, 1998: 129 - 135.
- [9] WAI Y Y G, JORGEAC A C. A study of the influence of suction on the resilient modulus of pavement subgrade soils [C]// International Symposium on Subdrainage in Roadway Roads and Subgrades. Espana, World Road Association, 1998: 137 - 144.
- [10] 杨树荣, 拱祥生, 黄伟庆, 等. 非饱和黏性路基土回弹模量之研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(2): 225 - 229. (YANG Shu-rong, KUNG Johnson H S, HUANG Wei-qing, et al. Resilient modulus of unsaturated cohesive subgrade soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(2): 225 - 229. (in Chinese))
- [11] 李丹枫, 杨广庆, 刘伟超. PFWD 模量控制的路基承载力动力学指标评价方法[J]. 土木工程学报, 2021, **54**(6): 117 - 128. (LI Dan-feng, YANG Guang-qing, LIU Wei-chao. Dynamic index evaluation method for subgrade bearing capacity controlled by PFWD modulus[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, **54**(6): 117 - 128. (in Chinese))
- [12] 刘君, 牛军贤, 崔明. 路基非饱和土动态回弹模量计算模型对比研究[J]. 科学技术与工程, 2021, **21**(31): 13491 - 13496. (LIU Jun, NIU Jun-xian, CUI Ming. Classification and comparison of modulus of resilience calculation models of subgrade unsaturated soil[J]. Science Technology and Engineering, 2021, **21**(31): 13491 - 13496. (in Chinese))
- [13] 朱青青, 苗强强, 陈正汉, 等. 非饱和含黏砂土的弹塑性剪胀特性研究[J]. 岩土工程学报, 2018, **40**(增刊 1): 65 - 72. (ZHU Qing-qing, MIAO Qiang-qiang, CHEN Zheng-han, et al. Elastoplastic dilatancy relations of unsaturated clayey sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, **40**(S1): 65 - 72. (in Chinese))

(编校: 黄贤沙)