

文章编号: 1000-7598 (2012) 增 2-0091-07

干密度对路基性能的影响研究

胡梦玲^{1,2}, 姚海林¹, 刘 杰¹, 卢 正¹, 游慧杰¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071; 2. 西安科技大学 建筑与土木工程学院, 西安 710054)

摘 要: 通过滤纸法试验, 测得 3 种干密度下的土-水特征曲线, 拟合得到 3 种干密度下的 Van Genuchten 模型参数, 分析干密度对土-水特征曲线及 Van Genuchten 模型参数的影响。通过室内回弹模量试验, 分析压实度和含水率对回弹模量的影响, 并建立回弹模量与压实度和含水率之间的关系式。基于水力耦合机制, 结合试验结果建立地下水位变化作用下的路基湿度及变形的动态响应模型, 计算地下水位从 -6 m 上升到 -3 m 后, 路基的含水率和回弹模量分布以及路基的变形。计算结果表明, 干密度对土-水特征曲线 Van Genuchten 模型参数产生显著影响, 饱和和体积含水率随着干密度的增大线性减小, 残余体积含水率随着干密度的增大线性增大, 参数 a 与进气值的倒数线性相关, 参数 n 随干密度的增大线性增大; 回弹模量随着含水率的增大而减小, 随着干密度的增大而增大; 地下水位上升导致路基土的含水率显著增加, 回弹模量明显下降, 引起不可忽视的路基变形; 不同填筑压实度下, 地下水位变化引起的路基变形差异很明显, 控制路基土的压实度是提高路基土性能的有效途径。

关 键 词: 干密度; 土-水特征曲线; 回弹模量; 路基

中图分类号: U 416

文献标识码: A

Research on influence of dry density on subgrade performance

HU Meng-ling^{1,2}, YAO Hai-lin¹, LIU Jie¹, LU Zheng¹, YOU Hui-jie¹

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanical, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 2. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 7110054, China)

Abstract: The soil-water characteristic curves in three dry densities are obtained with filter paper method; the parameters of Van Genuchten model are received by fitting test data; and the influence of dry density on soil-water characteristic curve and parameters of Van Genuchten model is analyzed. The effects of compactness and water content on resilient modulus are analyzed with laboratory test of resilient modulus; and the relationship between them is established. At last, based on hydromechanical coupling mechanism and combined with the test results, the dynamic response model of subgrade moisture and deformation under the variation of groundwater level is built; the distribution of water content and resilient modulus and the deformation of subgrade are calculated when the groundwater level rising from -6 m to -3 m. The results show that: dry density has great influence on parameters of Van Genuchten model of soil-water characteristic curve, the saturated water content linearly decreases, the residual water content and parameter n linearly increase with the increase of dry density; and the parameter a has a linear correlation with the reciprocal of air entry value; the resilient modulus decreases with the increase of water content and increases with the increase of compactness. The water content increases and resilient modulus decreases significantly caused by the rise of groundwater level; then it results in unnegligible deformation of subgrade. Under different filling compactness, the difference of deformation of subgrade caused by variation of groundwater level is obvious. Therefore, controlling compactness is an effective method to improve the performance of subgrade.

Key words: dry density; soil-water characteristic curve; resilient modulus; subgrade

1 引 言

路基是路面的支撑结构, 坚强而稳定的路基可为路面结构长期承受汽车荷载提供重要的保障。在

路面结构的变形中, 路基的变形约占 70%~90%, 常常出现的路面损坏现象大部分都是由路基湿度变化导致路基强度不足, 稳定性变差, 在外荷载作用下产生过量变形所致, 因此, 提高路基土的性能

收稿日期: 2012-03-13

基金项目: 西部交通建设科技项目资助 (No. 2011318493720, No. 20113184931700); 武汉市青年科技晨光计划项目资助 (No. 201150431070)。

第一作者简介: 胡梦玲, 女, 1985 年生, 博士, 主要从事非饱和土及路基稳定性方面的研究工作。E-mail: mihu5566@163.com

是保证公路整体使用和安全运营的重要工作。

在我国沥青路面和水泥混凝土路面的设计、施工质量以及使用性能的评价中,路基回弹模量是反映路基抗变形能力的主要力学参数。影响回弹模量的因素主要有土的类别、不同行车荷载或上部土体自重作用下的应力状态、压实状态以及地下水位变化和降雨入渗或蒸发等气候作用下的湿度状态等。在具体的工程应用中,压实度和含水率是最主要的影响因素。Lidingqing 等^[1]、Drumm 等^[2]、贾聿卿等^[3]基于试验资料的分析,研究了压实度和含水率对回弹模量的影响,建立了回弹模量的预估模型。但是,压实度除了从土体的密实状态方面影响土的强度外,还通过影响土体的持水性能影响含水率的分布^[4-8],从而影响回弹模量。本文通过室内试验,分析压实度(或干密度)对土-水特征曲线和回弹模量的影响,并结合水力耦合模型研究压实度对路基性能的影响。

2 试验研究

2.1 试验土样的基本物理性质

试验用土为武汉市小洪山低液限黏土样,其基本物理力学参数见表 1。

表 1 试验用土的基本物性指标

Table 1 Basic physical character index of soil sample

土粒相 对密度	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数	最大干密度 /(g/cm ³)	最优含水率 /%
2.762	44.41	21.11	19.58	1.88	15.71

2.2 土-水特征曲线试验

由于压力板、伺服流速渗透仪和 GCTS 压力仪等仪器施加的吸力不超过 1 500 kPa,对于在密实且较低含水率情况下的基质吸力远远大于 1 500 kPa 的小洪山黏土,不能满足试验要求,故采用滤纸法测定试验用土在密实状态下的土-水特征曲线。

滤纸法是建立在滤纸能够同具有一定吸力的土达到平衡(在水分流动意义上)的假设基础上的,当干滤纸放在土样上,滤纸与土样直接接触,水分便从土中流入滤纸,直至达到平衡。因此,只要测定滤纸平衡时的含水率,根据滤纸的率定曲线(滤纸含水率与基质吸力的函数关系),就可以得到滤纸中的基质吸力,也即是土样的基质吸力。

试验采用杭州新华造纸厂的“双圈”牌 NO.203 型滤纸,主要技术指标:直径为 70 mm;灰分为 0.000 035 克/张,占质量百分比为 0.01%;滤速为慢速;试验过程中保证室内温度为(25±1)℃,因

而不考虑温度的影响,湿度为 70%~75%。在这种环境下滤纸率定曲线如图 1 所示,率定曲线方程^[9]为

$$\left. \begin{aligned} \lg S &= 5.493 - 0.076 7w_f, (w_f \leq 47) \\ \lg S &= 2.470 - 0.012 0w_f, (w_f > 47) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: S 为吸力(kPa); w_f 为含水率(%)。

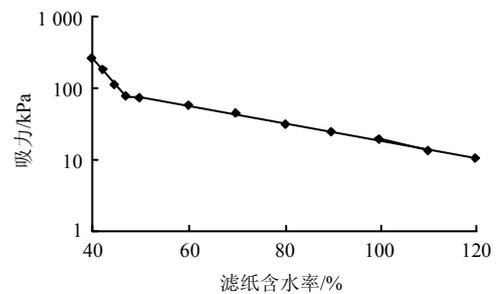


图 1 “双圈”牌 No.203 型滤纸率定曲线
Fig.1 The rating curve of “Shuangquan” No.203 filter paper

通过测定 3 种不同干密度下 6 种不同含水率对应的基质吸力,分析干密度对土-水特征曲线的影响。3 种干密度分别为 1.70、1.75、1.80 g/cm³(对应压实度为 90%、93%、96%),含水率分别为 14%、16%、18%、20%、22%、24%。将 3 种干密度和 6 种含水率进行组合,每个组合进行 3 组平行试验。试验得到了不同干密度下不同体积含水率的土样的吸力值,见表 2。

表 2 3 种干密度下不同含水率土样的吸力值

Table 2 The suction of samples with different water content in three dry densities

干密度 1.70 g/cm ³		干密度 1.75 g/cm ³		干密度 1.80 g/cm ³	
体积含水率 /%	吸力 /kPa	体积含水率 /%	吸力 /kPa	体积含水率 /%	吸力 /kPa
24.28	4 038.29	24.99	3 690.07	25.70	3 377.70
24.92	3 725.38	25.66	3 299.27	26.39	3 096.61
30.82	933.80	31.73	1 767.21	32.63	1 592.90
34.07	396.18	35.07	618.08	34.83	1.00
37.23	120.78	36.65	1.00		
38.44	1.00				

采用 VG 模型(Van Genuchten 模型),即式(2),分别对 1.70、1.75、1.80 g/cm³ 三种干密度下的体积含水率和吸力之间的关系进行拟合:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (a\varphi)^n\right]^{(1-1/n)}} \quad (2)$$

式中: θ_r 为残余体积含水率; θ_s 为饱和体积含水率;

a 、 n 为曲线拟合参数。

3 种干密度下的土-水特征曲线拟合参数见表 3，拟合曲线如图 2 所示。从图中可以看出，3 种干密度下的试验数据点与拟合曲线吻合较好，残差平方和分别为 8.83×10^{-6} 、 5.34×10^{-5} 和 4.36×10^{-7} 。干密度对土-水特征曲线有很大影响，干密度越大，饱和含水率越小，进气值越大，超过进气值后的脱湿速率(曲线斜率)越大，土体的持水性能越强。这是因为土体干密度越大，单位体积内的土粒越多，孔隙越少，孔隙率也就越小，导致饱和体积含水率减小；土样干密度越大，孔隙率越小，而土中最可能的孔隙率减小方式是减小土中的大孔隙，土中最大孔隙越小，导致气体开始进入土体时对应的吸力值，即进气值越大。另外，当孔隙率减小，土中的平均孔隙尺寸也会减小，导致土体的持水性能增强，脱湿速率减慢。

表 3 3 种干密度的土-水特征曲线拟合参数

Table 3 The fitting parameters of soil water characteristic curves in three dry densities

拟合参数	干密度/(g/cm ³)		
	1.70	1.75	1.80
θ_s	0.384 5	0.3665	0.3483
θ_r	0.057 6	0.0593	0.0610
a	2.768×10^{-3}	3.981×10^{-4}	2.838×10^{-4}
n	1.228 2	1.792 5	2.450 3

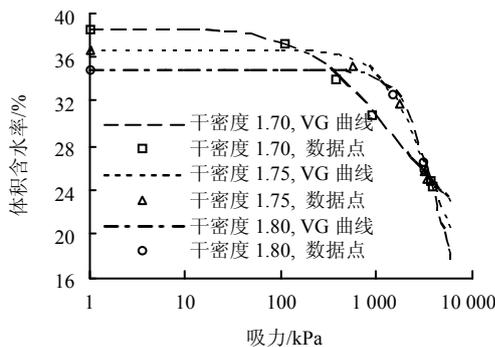


图 2 3 种干密度下的土-水特征曲线拟合曲线(单位: g/cm³)
Fig.2 The fitting curves of soil water characteristic curves in three dry densities (unit: g/cm³)

由表 3 中 3 种干密度下的土-水特征曲线 VG 模型参数的拟合结果可见，干密度对 VG 模型的参数有很大影响。下面逐一分析干密度对 VG 模型 4 个拟合参数的影响。

饱和体积含水率与干密度之间存在以下关系：

$$\theta_s = \frac{G_s \rho_w - \rho_d}{G_s \rho_w} = 1 - \frac{\rho_d}{G_s \rho_w} \quad (3)$$

式中： G_s 为土粒的相对密度； ρ_d 为压实样的干密度 (g/cm³)； ρ_w 为在标准大气压、3.98℃ 时水的密度 (g/cm³)。

由式 (3) 可知，饱和体积含水率随干密度增大而线性减小。图 3 也验证了饱和体积含水率与干密度之间的关系。

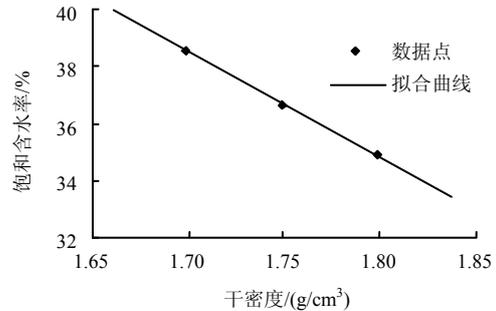


图 3 饱和体积含水率随干密度的变化曲线
Fig.3 The change curve of saturated water content with dry density

残余含水率是土体中含水率随着吸力的增加降低到一临界值后，含水率的继续减少需要增加很大的吸力，这一临界含水率称为残余含水率。这说明，土体在含水率大于残余含水率时的脱水速率比达到残余含水率以后的脱水速率大得多，土体对残余阶段土中水的吸附作用比快速脱水阶段排出水的吸附作用大得多，因此可以认为在快速脱水阶段在吸力作用下排出的那部分是土中的自由水，而在残余阶段排出的水是土中的结合水，即紧密吸附于土颗粒表面的那部分水。单位体积内结合水的体积只与单位体积中的土粒的表面积成正比，土体为均匀介质时，土粒的表面积与土粒的质量成正比，从而得到

$$\frac{m_{w-res} \rho_w}{m_s} = w_{res} = \text{常数} \quad (4)$$

式中： m_{w-res} 为单位体积中残余水的质量； m_s 为单位体积中土粒的质量； w_{res} 为残余质量含水率。

再根据质量含水率和体积含水率关系，得到

$$\theta_{res} = w_{res} \rho_d \quad (5)$$

可知残余体积含水率与干密度呈线性相关。用式 (5) 拟合以上试验得到的 3 种干密度下的残余体积含水率如图 4 所示。从图中可以看出，试验数据与拟合曲线吻合较好，这也验证了以上对残余含水率的分析及残余体积含水率与干密度之间的关系。

进气值是土-水特征曲线边界效应段渐近线与转化段渐近线交点对应的吸力值^[10]。在 VG 模型

中, 参数 a 是与土的进气值 ψ_a 相关的参数。从 3 种不同干密度时的 a 值来看, 干密度为 1.70 g/cm^3 时的 a 值远远大于干密度为 1.75 、 1.80 g/cm^3 时的 a 值, 根据作图法, 得到 3 条土-水特征曲线的进气值分别为 168.13 、 1134.66 、 1787.07 kPa 。这些数据说明, 干密度越大, 土体的进气值越大。通过数据分析, a 与进气值的倒数之间的相关系数 $R^2 = 0.999$, a 与进气值的倒数之间有很好的线性相关性。通过拟合得到 a 与进气值 ψ_a 之间的关系式为式 (6), 拟合曲线如图 5 所示。

$$a = \frac{0.4635}{\psi_a} \quad (6)$$

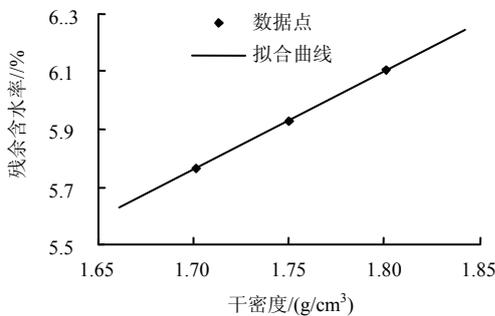


图 4 残余体积含水率随干密度的变化曲线
Fig.4 The change curve of residual volumetric water content with dry density

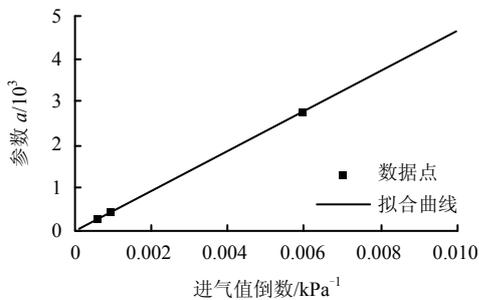


图 5 参数 a 与进气值的倒数 ψ_a^{-1} 的关系曲线
Fig.5 The relation curve of parameter a with the reciprocal of air entry value ψ_a^{-1}

图 6 为参数 n 随干密度变化的曲线。在 VG 模型中, 参数 n 与曲线的斜率相关。从图 6 中可以看出, 随着干密度增大, 参数 n 也增大, 且参数 n 与干密度之间有良好的线性关系。通过曲线拟合, 得到参数 n 与干密度之间的关系式:

$$n = 12.2217\rho_d - 19.5642 \quad (7)$$

相关系数 $R^2 = 0.999$ 。

2.3 回弹模量试验

通过室内用回弹模量测定仪测得 5 种含水率的

土样在 1.70 、 1.75 、 1.80 g/cm^3 三种干密度下的回弹模量值, 见表 4。

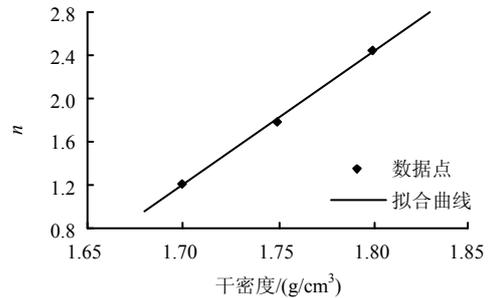


图 6 参数 n 随干密度的变化曲线
Fig.6 The change curve of parameter n with dry density

表 4 不同含水率土样在不同干密度下的回弹模量
Table 4 Resilient modulus of soil samples in different water contents and dry densities

干密度 /(g/cm³)	不同含水率(%)时土样回弹模量/MPa				
	14.41	15.71	17.71	19.20	21.80
1.70	66.39	57.20	43.51	26.50	21.20
1.75	78.00	62.00	42.07	29.22	
1.80	87.47	64.58	43.62	30.32	

试验结果表明, 含水率和干密度均对土体的回弹模量产生影响, 因此, 可以建立一个回弹模量与含水率和干密度之间的关系式。在公路设计中, 通常用压实度来表示土体的密实状态, 故用压实度来代替干密度。通过数据分析, 回弹模量与含水率和压实度之间具有较好的幂函数关系, 用 matlab 进行拟合, 得到回弹模量与含水率和压实度之间的关系式:

$$E = 0.08335W^{-3.6303}K^{1.7519} \quad (8)$$

式中: E 为回弹模量 (MPa); W 为含水率 (%); K 为压实度。3 种压实度下的拟合曲线如图 7 所示。

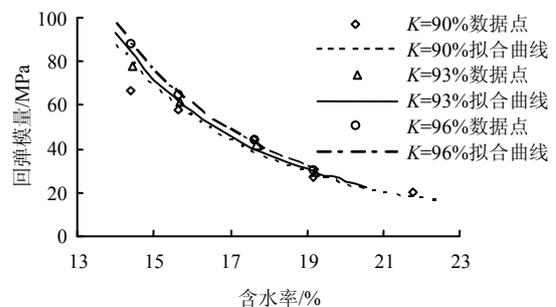


图 7 回弹模量随含水率的变化曲线
Fig.7 The change curves of resilient modulus with water contents

由图 7 可以看出, 3 种干密度下回弹模量均随

着含水率的增大而减小，含水率增大，土体的强度降低。当含水率较小时，含水率的变化对回弹模量的影响很大，随着含水率的增大，含水率的变化对回弹模量的影响逐渐减小。比较 3 种不同干密度下的回弹模量随含水率的变化曲线，在含水率较小时，干密度越大，回弹模量越大，且含水率越小，干密度对回弹模量的影响越大；随着含水率的增大，干密度对回弹模量的影响逐渐减小，当含水率增加到一定程度以后，回弹模量基本不受干密度的影响。

3 数值模拟分析

由以上的试验分析可知，干密度对土体的持水性能和回弹模量均有影响。干密度越大，土体的持水性能越强；干密度越大，土体的回弹模量越大。另外，干密度变化引起的持水性能的变化影响土体含水率的分布，也对回弹模量产生影响，可见干密度对土体性能的影响是复杂的。下面结合水力耦合模型分析不同填筑压实度下，地下水位变化对路基含水率和回弹模量分布以及路基变形的影响。

3.1 理论方程

路基的变形与渗流作用下的湿度变化是一个相互耦合的过程，地下水位变化或降雨入渗破坏了路基初始的势能平衡，引起渗流，使路基的含水率发生变化。渗流过程中产生的渗流力对路基的应力分布产生影响，含水率的变化对路基的强度特性产生影响，引起路基的变形。路基的变形导致土体的孔隙率发生变化，改变土中孔隙以及孔隙连接通道的大小，引起土体渗透特性的变化，对路基的渗流产生影响。因此，分析地下水位变化引起的路基变形问题，必须考虑渗流和变形的耦合作用，建立水力耦合模型。

对于非饱和土，有

$$k_w = k_{sat} k_r \tag{9}$$

式中： k_{sat} 为饱和渗透系数； k_r 为与饱和度相关的系数，这里取 $k_r = S^3$ ， S 为饱和度。

在外荷载的作用下，土体会产生一定的压缩变形，导致土体的孔隙率发生变化，从而改变土中的孔隙以及孔隙连接通道的大小，这必然会引起饱和渗透系数的变化。Rivera 等^[11]提出了饱和渗透系数随孔隙率变化的经验公式，即

$$k_{sat} = k'_{sat} \left(\frac{e}{e'} \right)^m \tag{10}$$

式中： k'_{sat} 、 e' 分别为初始饱和渗透系数和初始孔

隙比； k_{sat} 、 e 分别为当前状态的饱和渗透系数和孔隙比。因此，平面应变问题的水力耦合模型的控制方程为

$$\left. \begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x} \left(c_{11} \frac{\partial u}{\partial x} + c_{12} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + c_{33} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ & c_{44} \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial x} = 0 \\ & c_{33} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(c_{12} \frac{\partial u}{\partial x} + c_{22} \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \\ & c_{44} \frac{\partial (u_a - u_w)}{\partial y} - (1 - nS) \rho_w g + (1 - n) \rho_s g = 0 \\ & \frac{\partial}{\partial x} \left(k_w^x \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u_w}{\rho_w g} + y \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_w^y \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{u_w}{\rho_w g} + y \right) \right) = \\ & \frac{\partial \theta}{\partial u_w} \frac{\partial u_w}{\partial t} \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

式中： u 、 v 分别为 x 、 y 方向的位移； u_a 、 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力； n 为孔隙率； ρ_w 为水的密度； ρ_s 为土颗粒的密度； g 为重力加速度； k_w^x 、 k_w^y 分别为 x 、 y 方向的渗透系数； $c_{11} = c_{22} = \frac{(1 - \mu)E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$ ； $c_{12} = \frac{\mu E}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$ ； $c_{33} = G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$ ； $c_{44} = 1 - S$ ； μ 为泊松比。

3.2 算例分析

路基分析模型尺寸：根据路基的对称性，选取 1/2 路基作为分析模型，如图 8 所示。上部梯形为路面和路堤结构断面图，路面宽度为 12.25 m，路面结构由 5 种材料组成，各层厚度参考文献[12]。路堤高 2 m，路面和路堤坡面坡率为 1:1.5。下部矩形为所受影响土层，厚 10 m，宽 30 m。

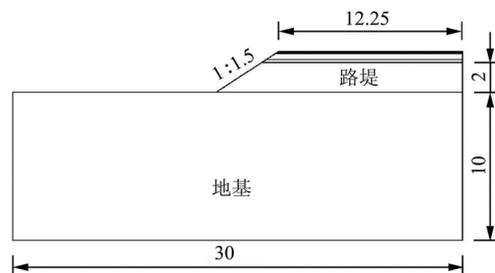


图 8 路基分析模型 (单位: m)
Fig.8 Analysis model of subgrade (unit: m)

模型材料参数：路面结构参数见文献[12]，路堤和地基材料均采用小洪山黏土，基本物理特性参数见表 1，土-水特征曲线见图 2，回弹模量 E 与压

实度和含水率的关系为式(8),泊松比 μ 取1/3,初始孔隙比0.499时渗透系数取 4.07×10^{-4} m/d。

工况分析:分析3种不同填筑压实度(90%、93%、96%)下,地下水位以1 m/d的速度从-6 m上升到-3 m后路基的含水率和回弹模量分布变化以及路基的变形。

图9为3种压实度下地下水位变化前后路基中心线上的质量含水率分布。从图中可以看出,水位变化前后,3种填筑压实度下路基含水率沿高度分布的趋势是一样的,即在水位以下含水率基本保持不变,水位以上沿着高度减小。比较3种不同压实度下水位变化前后的含水率分布,水位上升后,初始水位以上的非饱和区含水率均显著增大,这必然导致路基土强度降低。比较水位变化前后3种不同压实度下的含水率分布,压实度越大,路基中的含水率越小,且水位以上含水率随高度减小越缓慢,这主要是由于提高压实度能提高土体的持水性能导致的。

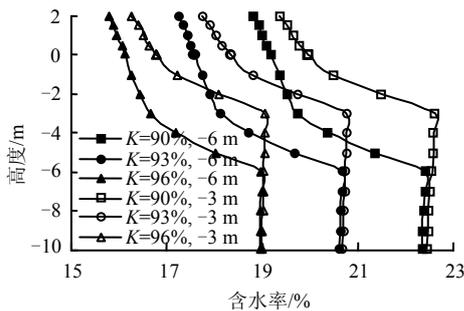


图9 3种压实度下路基中心线的含水率分布
Fig.9 The water content distribution of subgrade center line in three compactness

图10为3种不同填筑压实度下地下水位变化前后路基中心线上的回弹模量分布。从图中可以看出,地下水位变化前后3种压实度下的模量分布趋势是一致的,水位以下土体模量基本相同,水位以上沿着高度快速增大。这是由于水位以下含水率基本相同,水位以上含水率沿高度逐渐减小所致。比较水位变化前后的回弹模量分布,水位位于-3 m时3种压实度下的模量均比初始模量小得多,最大模量分别减小了10%、9.9%、9.8%。虽然3种压实度下的模量减小百分数基本相同,但在低压实度下,初始模量值较小,水位变化引起模量的减小对路基的变形影响较大;在高压实度下,初始模量较大,路基有较强的抗变形能力。

图11为地下水位上升后3种不同填筑压实度下路基顶面内车道中心点的竖向位移随时间的变化。

从图中可以看出,压实度为90%时的竖向变形比压实度为93%和96%时的大得多,这是因为水位上升后,3种压实度下路基的模量均有所减小,但是,压实度为90%的路基模量比93%和96%小得多,因而产生的变形较大。通过计算得出,在3种压实度下,地下水位从-6 m上升到-3 m时,引起路基顶面内车道中心点的竖向位移分别为2.59、1.81、1.26 mm,说明提高路基土的压实度,能有效地提高路基土的持水性能和强度,达到提高路基抗变形性能的目的。

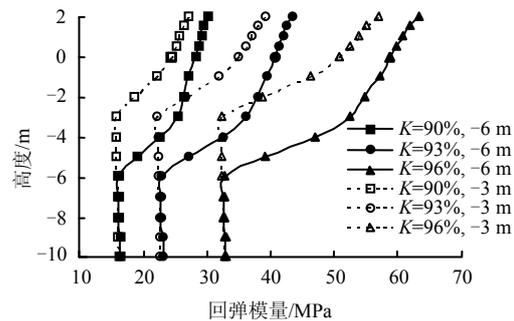


图10 3种压实度下路基中心线的回弹模量分布
Fig.10 The modulus distribution of subgrade center line in three compactness

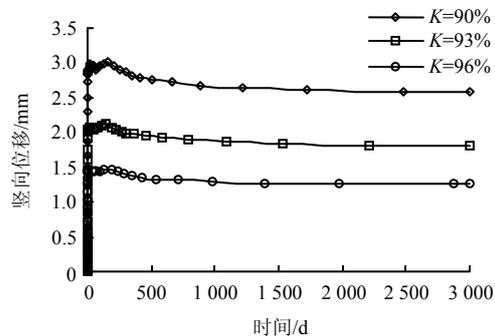


图11 竖向位移随时间的变化
Fig.11 The change curves of vertical displacements with times

4 结论

(1) 干密度对土-水特征曲线产生显著影响,干密度越大,饱和含水率越小,进气值越大,土体的持水性能越强。饱和含水率随干密度的增大线性减小,残余含水率随干密度的增大线性增大,参数 a 与进气值的倒数线性相关,参数 n 随干密度的增大线性增大。

(2) 土体在快速脱水阶段在吸力作用下排出的那部分水是土中的自由水,而在残余段排出的水是土中的结合水。土体在不同干密度下的残余质量含水率为常数。

(3) 回弹模量随含水率的增大而减小, 随干密度的增大而增大, 含水率对回弹模量的影响较干密度显著。

(4) 地下水位上升导致路基含水率显著增加, 路基土的回弹模量明显下降, 引起了不可忽视的路基变形。提高路基土的压实度, 能有效提高路基土的持水性能和强度, 从而达到提高路基抗变形性能的目的。

参 考 文 献

- [1] LI Ding-qing, SELIG E T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 120(6): 939—957.
- [2] DRUMM E C, REEVES J S. Subgrade resilient modulus correction for saturation effects[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 1997, 123(7): 663—670.
- [3] 贾聿卿, 李志农, 金昌宁, 等. 风积沙路基回弹模量与压实度、含水率的关系研究[J]. 新疆农业大学学报, 2010, 33(1): 88—94.
JIA Yu-qing, LI Zhi-nong, JIN Chang-ning, et al. Study on relations between rebound modulus, compactness and moisture content of aeolian sand roadbed[J]. **Journal of Xinjiang Agricultural University**, 2010, 33(1): 88—94.
- [4] 刘小文, 常立君, 胡小荣. 非饱和和红土基质吸力与含水率及密度关系试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(11): 3302—3306.
LIU Xiao-wen, CHANG Li-jun, HU Xiao-rong. Experimental research of matric suction with water content and dry density of unsaturated laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(11): 3302—3306.
- [5] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 1—5.
WANG Tie-hang, LU Jing, YUE Cai-kun. Soil-water characteristic curve for unsaturated soil considering temperature and dry density[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(1): 1—5.
- [6] 刘奉银, 张昭, 周冬, 等. 密度和干湿循环对黄土土-水特征曲线的影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 132—137.
LIU Feng-yin, ZHANG Zhao, ZHOU Dong, et al. Effects of initial density and drying-wetting cycle on soil water characteristic curve of unsaturated loess[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(Supp. 2): 132—137.
- [7] 汪东林, 栾茂田, 杨庆. 重塑非饱和黏土的土-水特征曲线及其影响因素研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(3): 751—756.
WANG Dong-lin, LUAN Mao-tian, YANG Qing. Experimental study of soil-water characteristic curve of remolded unsaturated clay[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(3): 751—756.
- [8] 张雪东, 赵成刚, 蔡国庆, 等. 土体密实状态对土-水特征曲线影响规律研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1463—1468.
ZHANG Xue-dong, ZHAO Cheng-gang, CAI Guo-qing, et al. Research on influence of soil density on soil-water characteristic curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(5): 1463—1468.
- [9] 王钊, 杨金鑫, 况娟娟, 等. 滤纸法在现场基质吸力量测中的应用[J]. 岩土工程学报, 2003, 25(4): 405—408.
WANG Zhao, YANG Jin-xin, KUANG Juan-juan, et al. Application of filter paper method in field measurement of matric suction[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(4): 405—408.
- [10] FREDLUND D G, XING A. Equations for the soil-water characteristic curve[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1994, 31: 521—532.
- [11] RIVERA A, LEDOUX E. Nonlinear modeling of groundwater flow and total subsidence of the Mexico city aquifer-aquitard system. Land subsidence[C]// Proceedings of the Fourth International Symposium on Land Subsidence. Houston: USA IAHS Pub., 1991: 45—58.
- [12] 卢正, 姚海林, 吴万平, 等. 高速公路路基结构分析及动变形设计方法[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2907—2912.
LU Zheng, YAO Hai-lin, WU Wan-ping, et al. Structural analysis and design method of dynamic deformation of expressway surgrade[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(9): 2907—2912.