

# 压实度对高速公路路基粗粒土水力特性的影响

司马军

(湖南宏特试验检测有限公司, 湖南 长沙 410118)

**摘要:** 公路路基的稳定性受路基土体含水量的影响很大, 含水量的变化直接影响路基土体的水力特性。路堤由压实度高的粗粒土组成, 而目前对粗粒土水力性质的研究不充分。文中采用可同时测量体积含水量和基质吸力的大型柱体, 对压实度分别为 85%、90% 和 93% 的 3 种粗粒土的水力特性进行研究, 利用瞬时剖面法得到土壤—水分特征曲线(SWCC), 计算土壤的导水率。结果表明, 压实度对 SWCC 和非饱和和渗透性均有影响, 压实度越高, SWCC 曲线越平缓; 随土壤基质吸力增大, 含水率变化较小; 压实度较低土壤的导水率较大; 压实度对非饱和电导率的影响较小。

**关键词:** 公路; 路基; 粗粒土; 压实度; 水力特性; 瞬时剖面法

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)06-0073-03

由粗土和细土(粉土和黏土)混合而成的路堤广泛应用于高速公路基础设施中。根据 JTG B01—2003《公路工程技术标准》, 细料占干重的比例小于 30%, 路堤主体压实度大于 92%。在高速公路使用寿命期内, 雨天可能会有水从上部路面板裂缝流入路堤, 影响其使用性能, 这是因为粗粒土的力学性质很大程度上依赖于含水量。因此, 确定路堤中水分分布非常必要, 这就需要了解粗粒土的水力特性。压实度和细粒含量是影响粗粒土水力特性的主要因素。而目前对压实度对高速公路路堤粗粒土影响的研究鲜见。该文采用大型渗透柱测定不同压实度粗粒土的水力性质, 采用瞬时剖面法得到土工建筑物的水工系数, 并计算其导水率, 分析压实度的影响。

## 1 试验材料

研究路段为冷水江—新化公路, 起止桩号为 K4+230—K13+009.5, 全长 8.779 5 km。以该路段的白云岩和细粉为原料配制试验土, 并作为模型的填料。土体中细粉含量(粒径 $\leq 0.075$  mm)为 15%, 土体颗粒最大粒径为 60 mm。出于实际原因, 将直径大于 20 mm 的土壤切断。这些土壤的粒度分布见图 1。对土样进行标准土壤压实试验, 结果显示: 在最佳含水量为 6% 时, 最大干密度为  $2.33 \text{ g/cm}^3$ 。

## 2 试验程序

采用大型渗透柱(见图 2)测定不同压实度粗粒土的水力性质。渗透柱的内径为 300 mm, 壁厚为 10 mm, 高度为 600 mm。配有 5 个体积含水量传

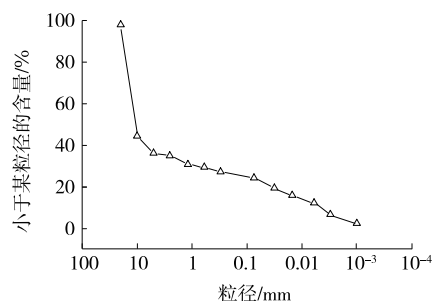


图 1 研究土壤的粒度分布

感器(TDR1~TDR5)和 5 个基质吸入传感器(T1~T5), 以 100 mm 等距布置。顶部钻一个直径为 50 mm 的孔, 以便在需要时安装吸入传感器。中心的第二个孔允许排水或排气。TDR 传感器由 3 根杆组成, 直径 6 mm, 长度 200 mm, 精度 2%。试验前进行 TDR 定标, 确定介电常数  $K_a$  与体积含水量  $\theta$  之间的关系, 试验过程中通过测定的介电常数  $K_a$  确定体积含水量。试验采用 2100F 型张力计, 其工作压力为 0~100 kPa, 精度为  $\pm 2 \text{ kPa}$ 。

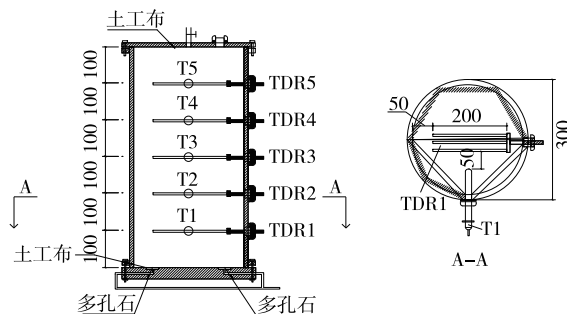


图 2 渗透柱示意图(单位:mm)

将土壤烘干 24 h, 确保土壤完全干燥; 在干燥

的土壤上喷洒一定量与最佳含水量相对应的水,再将湿润的土壤密封 72 h,使其均匀化。将制备好的土逐层压实成柱状,共 6 层,前 5 层每层高度为 100 mm,第 6 层高度为 150 mm。压实度分别为 85%、90%和 93%,3 种压实度土样分别记为 D85、D90 和 D93。一层压实完成后,在该层顶部以 90°的交叉角安装 TDR 探头和张计, TDR1~TDR5、T1~T5 距离底座的高度分别为 100、200、300、400 和 500 mm。

压实后,试样经历水分均匀化、饱和、排水、蒸发 4 个阶段,在这些阶段的开始记录 TDR 探针和张计计的响应。水分均匀化持续 50 h。随后将水从底部注入柱中,启动饱和过程,在 1 h 后在试样顶部能观察到水。24 h 后形成恒定流,认为试样完全饱和,得到饱和导水率。然后对试样进行另一次水分均匀化。最后将试样置于排水和蒸发阶段,这个阶段需要 165 h。在排水阶段,打开阀门排水,每级排水 300 mL。蒸发阶段采用风机加速,张计 T5 达到 50 kPa 时蒸发阶段结束。

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 体积含水量和基质吸力的变化

由于 4 个阶段的体积含水量和基质吸力的变化对所有土样都是相似的,选择 D85 的结果(见图 3)进行分析。

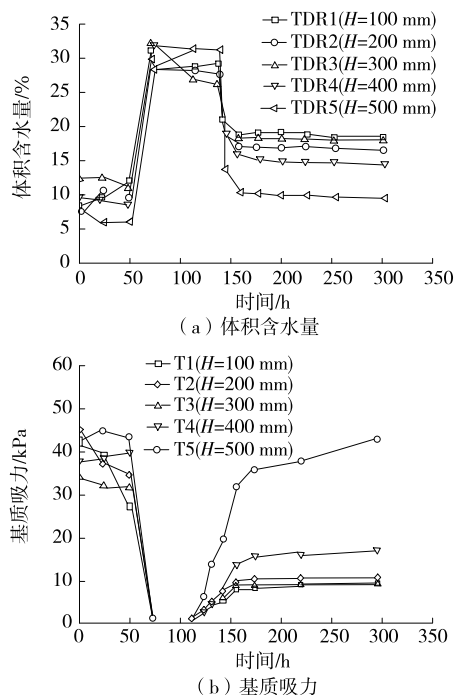


图 3 D85 土样的体积含水量和基质吸力

由图 3 可知:开始时,TDR 测量的体积含水量无明显变化,说明水分沿水平方向分散,没有沿垂直方向的扩散趋势,这可能是由压实过程中的不均匀性造成的;在饱和阶段,体积含水量在不到 1 h 的时间内增加到 29.5%~30.6%,之后由于土样处于饱和阶段,体积含水量保持相对恒定;在排水和蒸发过程中,体积含水量大幅下降,直至达到一个常数。基质吸力则呈相反的趋势。当该层含水量变化较大时,应特别注意 TDR5 和 T5 的变化。

#### 3.2 压实度对 SWCC 的影响

不同压实度土样的土壤-水分特征曲线(SWCC)见图 4。

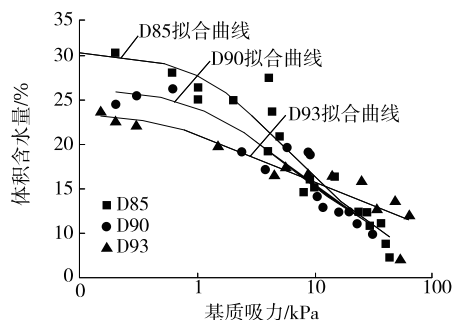


图 4 不同压实度土样的 SWCC 曲线

采用 van Genuchten 模型通过 SWCC 曲线进行拟合,拟合模型见式(1),拟合参数见表 1,拟合结果见图 4。

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (1)$$

式中: $\theta$ 、 $\theta_r$ 、 $\theta_s$  分别为体积含水量、残余含水量和饱和含水量,这里假设  $\theta_r = 0$ ;  $\psi$  为基质吸力; $\alpha$  为与空气进入值相关的参数; $n$  为与储水量相关的参数, $m = 1 - 1/n$ 。

表 1 van Genuchten 模型参数

土样	$\theta_s/\%$	$\alpha$	$\psi/\text{kPa}$	$n$	$m$
D85	31.0	0.50	2.00	1.38	0.28
D90	26.8	0.52	1.92	1.32	0.24
D93	24.1	1.13	0.88	1.17	0.15

从图 4 可以看出: D85 土样的饱和含水量高于 D90、D93 土样。这是因为随着压实度的增加,毛孔特别是大毛孔的体积变小。对于下降范围内的 SWCC,压实度越高的试样该曲线越平坦。说明 SWCC 在下降范围内的形状主要与细颗粒的压实状态有关,较高的压实度会导致细颗粒呈致密状态。

#### 3.3 压实度对导水率的影响

同时测量含水量和吸力,获得不同时刻的含水

量和吸水剖面,采用瞬时剖面法确定导水率。先通过吸力剖面按式(2)计算一定高度的水力坡降 $i$ ,再利用含水量剖面按式(3)计算 $\Delta t$ 时间内通过一定高度的水通量 $Q$ ,最后按式(4)计算某一时刻某一高度的导水率 $k$ 。图5为不同压实度土样的导水率。

$$i = \frac{dH}{dx} \quad (2)$$

式中: $H$ 为从吸入剖面获得的液压头; $x$ 为从柱底部开始的高度。

$$Q = \frac{\int_{x_i}^L \theta_{t+\Delta t} dx - \int_{x_i}^L \theta_t dx}{\Delta t} \cdot A \quad (3)$$

式中: $L$ 为柱的高度; $A$ 为柱的横截面积。

$$k = -\frac{1}{A} \cdot \frac{Q}{(i_t + i_{t+\Delta t})/2} \quad (4)$$

式中: $i_t$ 、 $i_{t+\Delta t}$ 分别为 $t$ 和 $t+\Delta t$ 时的水力梯度。

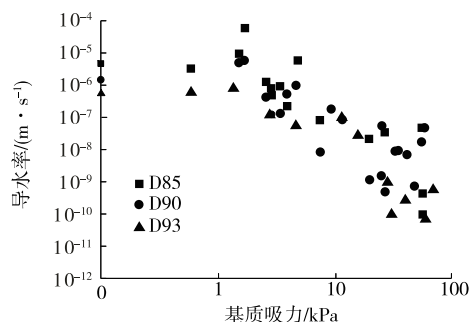


图5 不同压实度土样的导水率

从图5可以看出:D85土样的饱和电导率最高,

这主要是因为密实度较低的土样存在较多的大空隙,这些大空隙是水通过的主要通道。在非饱和和导水率方面,数据相互交织,差别不大,压实度的影响很小。

## 4 结论

考虑85%、90%和93%的压实度,采用大型渗透柱分析压实度对粗粒土水力性质的影响。结论如下:1)较高的压实度使SWCC曲线更平坦,这种现象与细颗粒的致密状态有关;2)压实度较低土体的饱和导水率较高,可能是因为压实度较低土体的空隙更大。压实度对非饱和电导率的影响不大。

## 参考文献:

- [1] 李小刚.影响土壤水分特征曲线的因素[J].甘肃农业大学学报,1994,29(3):273-278.
- [2] 徐绍辉,刘建立.土壤水力性质确定方法研究进展[J].水科学进展,2003,14(4):394-401.
- [3] 余冬立,邵明安.成垄压实耕作条件下土壤水分分布的试验研究[J].水土保持学报,2007,21(5):110-113.
- [4] 王协群,邹维列,骆以道,等.压实度与级配对接基重塑黏土土-水特征曲线的影响[J].岩土力学,2011,32(增刊1):181-184.
- [5] 黄雪峰,孔洋,李旭东,等.压实黄土变形特性研究与应用[J].岩土力学学报,2014,35(增刊2):37-44.

收稿日期:2020-03-06

\*\*\*\*\*

(上接第72页)

- tent of air-dry soils measured by thermal analysis[J]. Soil Science Society of America Journal, 2011, 75(2): 481-487.
- [3] MITCHELL J, SOGA K. Fundamentals of soil behaviour [M]. Third Edition. New Jersey: John Wiley & Sons Inc, 2005.
  - [4] MIN F, PENG C, SONG S. Hydration layers on clay mineral surfaces in aqueous solutions: A review[J]. Archives of Mining Sciences, 2014, 59(2): 489-500.
  - [5] ZHANG C, LU N. What is the range of soil water density? Critical reviews with a unified model[J]. Reviews of Geophysics, 2018, 56(3): 532-562.
  - [6] GERMAINE J T, WHITTLE A J, ZYMNIS D M. Measurement of temperature-dependent bound water in clays [J]. Geotechnical Testing Journal, 2018, 42(6): 14-27.
  - [7] 张锐, 吴梦丽, 刘闯, 等. 结合水对高液限土固结压缩特

- 性的试验研究[J].长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(4): 48-56.
- [8] 吴立坚, 钟发林, 吴昌兴, 等. 高液限土的路用特性研究 [J]. 岩土工程学报, 2003, 25(2): 193-195.
  - [9] 吕海波, 钱立义, 常红帅, 等. 黏性土几种比表面积测试方法的比较[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 124-130.
  - [10] JAYADEVA M S, SRIDHARAN A. Double layer theory and compressibility of clays [J]. Géotechnique, 1982, 32(2): 133-144.
  - [11] 袁建滨. 黏土中结合水特性及其测试方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
  - [12] ZHANG Y, CHEN T L, ZHANG Y J, et al. Calculation methods of seepage coefficient for clay based on the permeation mechanism [J]. Advances in Civil Engineering, 2019, 2019: 6034526.1-6034526.9.

收稿日期:2020-04-28