

花岗岩残积土填料压实含水率控制方法

赵亚党¹, 王欢²

(1.广东省长大公路工程有限公司, 广东 广州 510620; 2.公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114)

摘要:以广东广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路花岗岩残积土为研究对象,基于土与大气相互作用的实际工况,提出填料压实含水率控制方法和计算几何模型,开展南方典型湿热气候条件下花岗岩残积土填料现场翻晒数值模拟并与现场试验结果进行比较。结果表明,填料翻晒与单层松铺厚度、土块粒径等有一定关系;填料存在最佳翻拌时刻,持水性越弱,越宜尽早翻拌;合理控制粒径和翻拌时刻,可提高南方多雨地区路基施工效率。

关键词:公路;花岗岩残积土;填料;压实含水率;控制方法

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2019)04-0070-04

中国南方公路建设中,花岗岩残积土等细粒土较常见,其天然含水率高。而南方地区气候潮湿多雨,不利于填料的自然降湿。因此,在满足路基填料强度和变形指标要求的前提下,如何通过翻拌晾晒将细粒土从高天然含水率降至压实控制含水率成为有效填筑路基的关键步骤。

填料的翻晒是土与大气相互作用及非饱和土湿热耦合的过程,受外部环境即气象条件、内在因素即土的水热力学性质的共同影响。针对细粒土填料如何由天然含水量降至压实控制含水率这一过程还没有开展过专门研究,现行施工中只能通过技术人员的经验进行判断,在南方多雨地区,受天气变化的影响,经常造成晾晒时间过长而导致工期延误、路基含水率不均匀等问题。该文基于土与大气相互作用理论和填料翻晒实际工况,以广东广佛肇(广州—佛山—肇庆)高速公路花岗岩残积土为研究对象,采用 Geo-Studio 软件进行填料翻晒数值模拟,分析南方特定气候条件下花岗岩残积土的含水率随翻晒时间的变化及松铺厚度、粒径大小和翻拌对总的翻晒时间和填料内外含水率均匀性的影响。

1 土样的工程性质

1.1 物理性质

在广佛肇高速公路 K117+200 段取样,对土样进行基本物理指标测试,结果见表 1。由于土样的取样深度为 3 m 左右,即在当地大气干湿循环显著影响区以下,土样的天然含水率相对稳定,故将其作为翻晒的初始含水率。

根据测试结果,花岗岩残积土天然稠度仅为

表 1 花岗岩残积土的基本物理性质

项目	试验值
天然含水率/%	26.0
天然湿密度/(g·cm ⁻³)	1.82
天然孔隙比	0.86
饱和度/%	81.8
饱和含水率/%	38.9
液限/%	58.1
塑限/%	28.7
塑性指数	29.4
砾石(2~5 mm)	28.8
不同颗粒组成/%	
砂粒(0.075~2 mm)	17.7
粉粒(0.002~0.075 mm)	34.6
黏粒(<0.002 mm)	18.9
自由膨胀率/%	28
土样定名	含砾高液限黏土(CHG)

0.84,不具有可压实性,需将填料翻晒至其压实控制含水率即翻晒目标含水率。

1.2 土样水热力学参数测定与验证

为确定填料翻晒数值模拟计算所需参数,通过试验实测花岗岩残积土在天然密度下的土水特征、饱和渗透系数、导热系数及体积比热容。

采用 500 kPa 压力板仪对花岗岩残积土的原状样进行土水特性试验,利用 Fredlund & Xing 数学模型对土—水特征曲线进行拟合,结果见图 1。

花岗岩残积土的饱和渗透系数由常水头法测定;导热系数利用导热系数仪测试;比热容则采用 BRR 比热容测试仪进行测试,利用已知的水的比热容推导计算土样的比热容。测试结果见表 2。

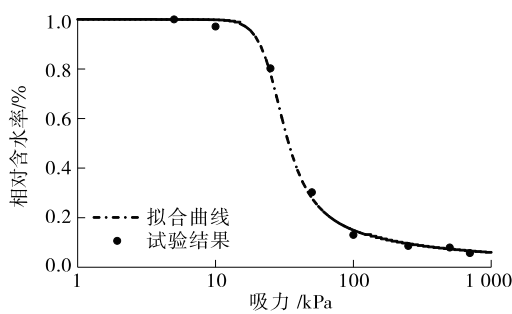


图 1 花岗岩残积土水特性试验结果及其拟合曲线

表 2 花岗岩残积土水热力学参数测试结果

项目	试验值
渗透系数/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	1×10^{-5}
导热系数/[$\text{J} \cdot (\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$]	1.25
体积比热容/($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	2.85×10^6

为确定实测和通过土—水特征曲线预估的水热力学参数的准确性,进行现场填料晾晒试验和数值模拟。采用有限元计算软件 Geo-Studio2012 中的 Seep/W 和 Vadose/W 模块建立晾晒模拟计算几何模型(见图 2),其中粒径 D 为 2 cm,高度 H 根据晾晒模型试验的松铺厚度设为 27 cm。计算模拟花岗岩残积土 74 h 的晾晒过程,以 3 600 s 为一个计算时步,并设置自适应时步,每个时步存储一次结果。

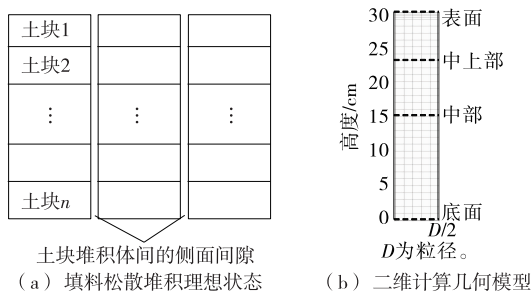


图 2 现场晒晒数值模拟计算几何模型

根据晾晒试验中花岗岩残积土的初始状态,先在 Seep/W 模块中设置晾晒模拟计算土体材料的属性(渗透系数及土—水特征曲线),根据土—水特征曲线查询土体在天然状态下对应的孔隙水压力,对每层单元施加相应的水压力,模拟土体的初始含水率。然后在 Vadose/W 模块中对模型上表面施加晾晒的温度、湿度边界条件。根据模拟结果计算花岗岩残积土各松铺厚度下从上至下各节点每小时的含水率,再根据下式计算几何模型的平均含水率:

$$\bar{w} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(w_i + w_{i+1}) h_i}{2}}{H}$$

式中: \bar{w} 为计算平均含水率(%); w_i 为节点 i 处含水率(%); h_i 为节点 i 和节点 $i+1$ 之间的垂直距离(cm); H 为堆积体高度(cm)。

花岗岩残积土晾晒试验数值模拟计算结果与实测结果见图 3。

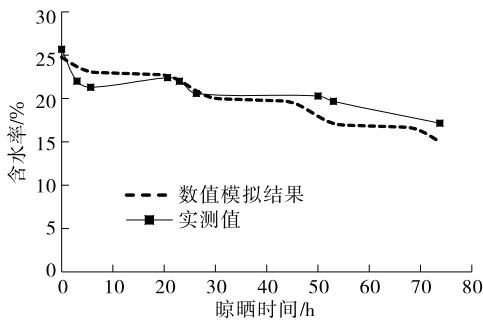


图 3 花岗岩残积土平均含水率随时间的变化

由图 3 可知:模拟计算得到的花岗岩残积土含水率随时间变化的趋势与实测结果一致,相关系数达 0.9。说明数值模拟方法及所选参数合理,可将其用于花岗岩残积土现场翻晒数值模拟。

2 压实含水率确定方法

传统方法中,一般由干法击实试验确定填料的最大干密度(先将填料烘干,再通过加水将填料的含水率逐步增大,得到不同含水率下的击实曲线,得到最大干密度),其对应的含水率即为路基压实控制含水率。但在南方典型湿热气候条件下,路基填料的天然含水率较高,一般需通过晾晒才可降低其含水率,故不采用该方法进行制样与试验。

目前较主流的压实含水率确定方法为湿法击实试验,该方法通过取天然状态下的填料土,分别晾晒至不同含水率并进行击实试验得到击实曲线,曲线中最大干密度对应的含水率即为路基压实控制含水率。图 4 为花岗岩残积土湿法击实曲线,据此得压实控制含水率为 12.5%。

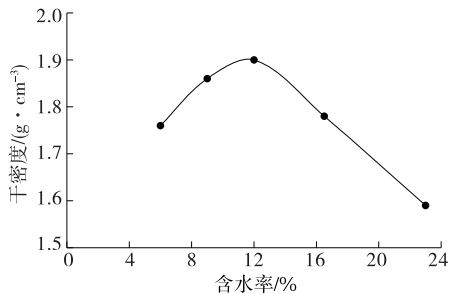


图 4 花岗岩残积土湿法击实曲线

虽然湿法击实的制样过程符合施工中填料的降湿过程,但由于南方地区降雨较多,路基在浸水后其干密度和承载力显著降低,不利于道路的长久运营。故采用文献[4]中以最大承载力为目标的压实含水率控制方法。按该方法得到的花岗岩残积土 CBR 曲线见图 5,从中可见,最大承载力对应的含水率为 16.3%,将最佳含水率+2%作为压实控制含水率,则花岗岩残积土的翻晒目标含水率为 18.3%。该土体的天然含水率为 26%,含水率需降低 7.7%。

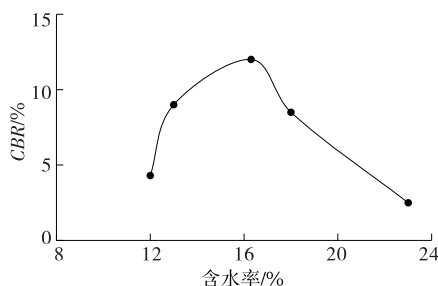


图 5 花岗岩残积土 CBR 曲线

3 填料施工含水率控制方法

3.1 研究方案

填料翻晒是土与大气相互作用的过程。根据非饱和土湿热耦合偏微分控制方程,考虑花岗岩残积土填料现场翻晒时的实际工况,即土块堆积形态和大气作用边界,提出填料翻晒数值模拟方法及二维计算几何模型(见图 2)。

采用 Geo-Studio2012 中的 Vadose/W 模块对图 2(b)进行建模,考虑土体表面是受大气影响剧烈的区域,在表层设置 4 层表层单元,每个单元每层 0.25 cm,以下每 1 cm 划分一层单元。

(1) 分析参数的设定。在 Seep/W 模块输入分析参数设定中,选择分析类型为稳态,持续时间为 1 s。以 Seep/W 模块为母目录,其下增加 Vadose/W 模块分析,选择分析类型为瞬态耦合,设置初始水压力为上级目录即 Seep/W 模块的最后计算结果,持续时间为晾晒时间。

(2) 材料参数的设定。在几何模型中输入材料参数。在 Seep/W 模块中,选择材料模型为饱和/不饱和,设置水压传递系数 F_n (即渗透系数曲线)、单位体积水含量 F_n (即土-水特征曲线),根据室内试验结果输入相关渗透系数 K 、土-水特征曲线、导热系数及体积比热容。在 Vadose/W 模块中,选择材料模型为全热,设置水力特性参数 $K-F_n$ (即渗

透系数曲线)、 $W.C.-F_n$ (即土-水特征曲线)、热性能 $K-F_n$ (即导热系数曲线)、 $S.H.-F_n$ (即体积比热容曲线)。为保证数值模拟的准确性,所有参数建议根据室内试验实测得到。

(3) 边界条件的设定。数值模拟计算方法的边界条件主要有水力和气候边界条件两种,前者用于设置路基填料的初始含水率状态,后者用以模拟土与大气的相互作用。在 Seep/W 模块中,对所有单元施加一定水头压力,以控制路基填料模型的初始含水率。该水头压力通过模型的土-水特征曲线查得,将某含水率状态下该模型材料的基质吸力值换算成相应的水头值,即为该模型材料的初始水头压力值。再在 Vadose/W 模块中设置相应的气象边界条件,由于堆积体的表面与大气直接接触,填料翻晒数值模拟时在图 2(b)所示土块堆积体的顶面施加全气象边界条件 I(日平均太阳辐射、日最高和最低气温、日最高和最低相对湿度、日平均风速);侧面主要受大气温度和湿度的影响,数值模拟时在堆积体的左右两侧分别施加部分边界条件 II(日最高和最低气温、日最高和最低相对湿度);下表面与已达到压实控制含水率的土层接触,施加定水头边界条件,水头由压实控制含水率和填料的土-水特征曲线共同确定。

结合广佛肇高速公路路堤试验段的修筑,统计分析填筑期间非降雨日的气象数据,以此作为填料翻晒数值模拟的特定气候条件(见表 3)。利用上述填料翻晒数值模拟方法、实测水热力学性质参数及选定的气候条件,计算分析同一气候条件下松铺厚度、粒径和翻拌时刻对花岗岩残积土填料翻晒时间的影响,为填料翻晒控制提供依据。

表 3 花岗岩残积土填料数值模拟气象边界条件

项目		试验值
气温/℃	最高	33
	最低	25
相对湿度/%	最高	83
	最低	62
风速/(m·s ⁻¹)		6
净辐射量/(MJ·m ⁻² ·d ⁻¹)		20

3.2 松铺厚度对翻晒时间的影响

工程实践中松铺厚度为 22~30 cm。为研究松铺厚度对填料翻晒时间的影响,选定 21、24、27、30 cm 4 种厚度对花岗岩残积土进行翻晒数值模拟,结

果见图6。

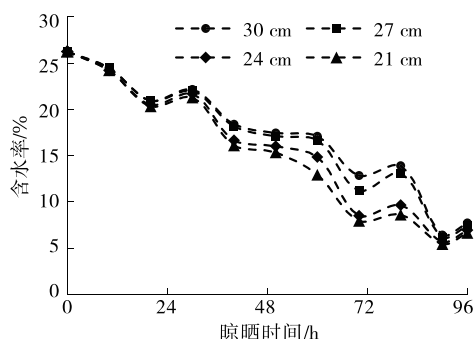


图6 花岗岩残积土晾晒时间随松铺厚度的变化

由图6可知:松铺厚度对花岗岩残积土的晾晒时间有一定影响。松铺厚度由30 cm每减少3 cm直至21 cm时,达到目标含水率的时间分别为41、40、38、36 h。由于粒径减小,晾晒时间最多减少5%左右。由于水在土中的迁移距离减少,花岗岩残积土因其渗透系数相对较大,迁移速度较快,对松铺层厚度不是非常敏感。

3.3 土块粒径对翻晒时间的影响

对花岗岩残积土在平均粒径为4、6、8和10 cm情况下的现场晾晒(未翻拌)过程进行模拟,获得不同粒径下花岗岩残积土的含水率随时间的变化规律(见图7)。

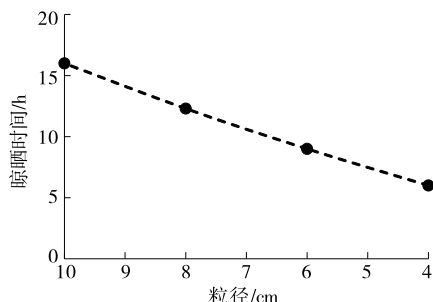


图7 花岗岩残积土晾晒时间随土块粒径的变化

由图7可知:土块粒径对花岗岩残积土晾晒过程中含水率随时间的变化有影响,粒径由10 cm每减少2 cm至4 cm时,晾晒时间分别缩短3.7、3.3、3 h;平均粒径每减少2 cm,晾晒时间缩短30%左右。

3.4 翻拌对翻晒时间的影响

填料的现场翻晒包括晾晒和翻拌两个过程,工程实践表明翻拌时刻的选择将影响总的翻晒时间。根据花岗岩残积土在大气环境下含水率下降结果对其进行翻拌模拟计算。先选定时刻,在该时刻假设填料被上下翻拌一次,根据最初各层位的含水率下降趋势得到翻拌一次之后在相近初始含水率状态下

各层位的含水率下降规律,并根据面积法得出翻拌后花岗岩残积土填料的平均含水率下降情况。

计算结果如下:花岗岩残积土在第2 h翻拌一次,总的翻晒时间为3 h。花岗岩残积土有其最佳翻拌时刻,在晾晒1 h后即可翻拌一次,且从1 h后的任何时刻开始翻拌,翻拌后均只需1 h或更短时间其含水率即可达到压实控制含水率。

对于渗透系数相对较大、持水性相对较弱的填料,越早翻拌越有利于缩短总的翻晒时间。

3.5 填料现场翻晒效果

结合广佛肇高速公路花岗岩残积土路堤试验段的修筑,于2015年10月对花岗岩残积土进行现场翻晒试验。试验期间的气温为28~32℃,平均相对湿度65%左右,风速为4级左右。填料翻晒时松铺厚度为30 cm。花岗岩残积土填料的平均粒径为2 cm,翻晒初始含水率为26%。

翻晒试验分两段进行,每段长50 m。一段择时采用旋耕犁翻拌填料一次,另一段则采用自然晾晒。

试验结果表明:花岗岩残积土在第1 h翻拌后,累计花费2 h达到相应压实控制含水率;而现场未翻拌的花岗岩残积土累计花费5 h才能达到压实控制含水率,且未翻拌的膨胀土填料外干内湿,含水率不均匀。由此可见,通过翻拌及根据填料性质合理选择翻拌时机,可有效缩短总的翻晒时间,从而提高路基施工效率。

4 结语

根据南方特定气候条件下花岗岩残积土的现场翻晒数值模拟结果,填料的单层松铺厚度、土块粒径及开始翻拌时刻对填料的晾晒时间均有影响,花岗岩残积土由于其持水性较弱,渗透系数较高,对后两者的敏感度较高。根据现场翻晒试验结果,通过翻拌及根据填料性质合理选择翻拌时机,可缩短花岗岩残积土总的翻晒时间,从而提高路基施工效率。

该文主要研究特定气候条件下填料松铺厚度、平均粒径和翻拌时机对花岗岩残积土填料翻晒性能的影响。膨胀土、高液限红黏土等特殊土的敏感翻晒因素及气象条件变化对填料翻晒的影响有待进一步研究。

参考文献:

- [1] ZHENG Jian-long, ZHANG Rui, YANG He-ping. Highway (下转第76页)

板满贴在已施工的墙身侧面,保证粘贴牢固可靠,浇筑砼时注意防止泡沫板脱落和破坏。

(2) 墙身施工中保证挡土墙沉降缝顺直,不能出现斜缝、错台。

(3) 从墙顶到基底沿墙的内、外、顶三侧填塞沥青麻絮,深 30 cm。沥青麻絮按设计要求采购,并经实验室取样试验合格后方可使用。

3 结语

为促进公路建设“发展理念人本化、项目管理专业化、工程施工标准化、管理手段信息化、日常管理精细化”目标的实现,近年来中国公路建设中施工标准化越来越受到重视,以标准化的施工方式提高项目管理水平、保证施工质量成为公路工程建设的一个趋势。而挡土墙是公路项目建设中最常用的路基防护措施之一,施工作业相关人员应严格按照挡土墙标准化施工工艺流程把控好每个细节,保证片石砼挡土墙的质量。

参考文献:

- [1] 王铁梦.工程结构裂缝控制:“抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [2] 徐荣年,徐欣磊.工程结构裂缝控制:“王铁梦法”应用

实例集[M].北京:中国建筑工业出版社,2010.

- [3] 王吉生.关于挡土墙排水设计的改进研究[J].工程与建设,2017,31(4).
- [4] 胡永强.浅谈山区公路片石砼高挡墙施工技术控制[J].门窗,2013(9).
- [5] JTJ/T 019—98,公路土工合成材料应用技术规范[S].
- [6] 《建筑施工手册》编写组.建筑施工手册[M].第5版.北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [7] 江正荣.建筑施工计算手册[M].第3版.北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [8] 武心智.浅谈挡土墙排水工艺[J].四川水泥,2018(9).
- [9] 魏伟文.山区高速公路挡土墙施工技术[J].中国建设信息,2018(1).
- [10] DB51/T 2428—2017,高速公路施工标准化技术指南[S].
- [11] JTG F10—2006,公路路基施工技术规范[S].
- [12] 肖雁征,雷鸣.加筋土挡土墙边坡加固的有限元计算研究[J].公路与汽运,2017(5).
- [13] 陈页开.挡土墙上土压力的试验研究与数值分析[D].杭州:浙江大学,2001.
- [14] 罗渝,许强,何思明,等.重力式挡墙加固边坡的动力稳定性分析[J].工程力学,2013,30(9).
- [15] 宋鑫华.浆砌块石挡土墙边坡稳定性因素的研究[D].贵阳:贵州大学,2016.

收稿日期:2019-01-04

(上接第73页)

- subgrade construction in expansive soil areas[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2009,21(4).
- [2] 郑健龙.公路膨胀土工程理论与技术[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [3] 吴立坚,钟发林,吴昌兴,等.高液限土路基填筑技术研究[J].中国公路学报,2003,16(1).
- [4] 陈杰,刘正楠,张锐.花岗岩残积土路基压实控制方法研究[J].交通科学与工程,2016,32(1).
- [5] 吴立坚,陈礼彪,张燕清,等.高塑性土路基压实与压实标准[J].公路,2007(3).
- [6] Khengboon C, Engchoon L, Rahardjo H. A simplified method to estimate the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal,2010,47(12).
- [7] Zhou J, Yu J. Influences affecting the soil-water characteristic curve [J]. Journal of Zhejiang University: Science,2005,6A(8).
- [8] Weeks B, Wilson G W. Prediction of evaporation from soil slopes[J]. Canadian Geotechnical Journal,2011,43(8).

- [9] Liu S, Graham W D, Jacobs J M. Daily potential evapotranspiration and diurnal climate forcings: influence on the numerical modelling of soil water dynamics and evapotranspiration [J]. Journal of Hydrology, 2005, 309 (1-4).
- [10] Wilson G W, Fredlund D G, Barbour S L. Coupled soil-atmosphere modelling for soil evaporation [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, 31(2).
- [11] 刘杰,姚海林,胡梦玲,等.大气作用下非饱和土路基湿度及影响因素分析[J].上海交通大学学报,2011,45(5).
- [12] 赵铭.六盘山地区过湿土路基压实控制指标研究[J].公路交通技术,2009(3).
- [13] Xing D G F A. Equations for the soil-water characteristic curve [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31 (4).
- [14] 唐炜,邓小钊,刘辉.南岳高速全风化花岗岩路基填料工程性质试验研究[J].公路与汽运,2013(5).

收稿日期:2019-01-25