

干湿循环下红砂岩路基填料回弹模量控制研究

陈龙旭,王帅,罗大天,邹静蓉*

(中南林业科技大学 土木工程学院,湖南 长沙 410004)

摘要: 经过多次干湿循环的红砂岩,其强度衰减特性十分明显,路用性能难以得到保障。该文基于室内干湿循环试验,揭示了3种红砂岩素土和不同水泥剂量改良土的强度变化规律。结果表明:红砂岩素土强度在干湿循环作用下衰减明显,回弹模量随干湿循环次数增加而减小;掺加一定量水泥可以有效遏制水活性,强度衰减幅度减小,随着水泥改良土龄期增长,第3次干湿循环后试件回弹模量缓慢回升。分析了路面与车辆的相互作用关系,根据路面的不平整度确定了车辆动态加载模型;基于动应变控制法和有限元法,针对3种不同路堤强度进行结构建模分析,得到了红砂岩改良层回弹模量和填筑深度的关系,通过幂函数拟合确定了重交通条件下满足动应变条件的改良层所需回弹模量的临界值,并于实际工程中得到验证。

关键词: 公路路基;回弹模量;数值分析;红砂岩;动应变控制法

1 引言

公路路基土大多处于非饱和状态,受季节性气候因素影响,如夏季暴雨汛期导致地下水位涨落,致使路基经受“增湿→脱湿→增湿→脱湿→”的重复循环,称为干湿循环(Drying-Wetting Cycles)。干湿循环普遍存在于工程界,如隧道工程、采矿工程、公铁路基、边坡岸坡等,其对岩土介质的物理力学特性和稳定性有着不可逆转的负面影响。红砂岩是一类水稳定性较差的岩土材料,当压实致密时具有良好的路用性能,但是如果经受干湿循环的影响则容易发生崩解致使强度损失,使用红砂岩填筑的路基若处理不善易出现边坡失稳和不均匀沉降等病害。因此在红砂岩分布区修筑路基往往需进行改良处理,水泥作为最常用的水稳定性材料便成为红砂岩改良材料首选。

针对干湿循环下路基填料力学性能劣化特性,国内外学者做了很多研究。Hale and Shakoor(2003)、Khanlari and Abdilor(2015)和 Özbek(2013)等进行了砂岩和凝灰岩的单轴抗压强度试验,结果表明:抗压强度随干湿循环次数增加而衰减;Zhang(2014)开展了

三峡地区的侏罗纪红层砂岩(Jurassic red-bed sandstone, JRS)在干湿循环作用下的三轴压缩试验,结果显示:JRS的峰值强度在第1次干湿循环后显著降低,而在后续的干湿循环过程中保持稳定;Ghobadi and Babazadeh(2015)、杜斌等(2018)分别研究了黏土和红砂岩的抗拉强度随干湿循环作用次数的变化规律;随后 Du 等(2019)探讨了砂岩静态和动态抗压强度在干湿循环下的劣化特性,结果表明:动态抗压强度随干湿循环次数增多而衰减,随着加载速率的提高而增加;徐志华等(2018)开展了红砂岩的强度劣化特性研究,结果表明:干湿循环作用下黏聚力下降导致了红砂岩抗压强度降低;杨俊等(2014)采用掺加风化砂的方法改良膨胀土,开展了无侧限抗压强度和直接剪切试验,结果表明:无侧限抗压强度和抗剪强度随干湿循环次数增加而衰减,其中第2、3次循环后抗剪强度衰减最明显;陈宾等(2018)通过直接剪切试验和 SEM 技术研究了红砂岩在常温状态、干湿循环作用下的微观结构变化规律和力学特性,结果表明:5次干湿循环前红砂岩的黏聚力和抗剪强度显著降低,5次干湿循环后则逐渐稳定;Zhou 等(2017)通过一系列岩石特性试验和动态压缩试验,探讨了细集料砂岩在多次干湿循环条

收稿日期:2019-02-19

基金项目:道路灾变防治及交通安全教育部工程研究中心开放基金资助项目(编号:kfj170405);中南林业科技大学土木工程学院学科前沿培育计划项目(编号:2017QY00)

作者简介:陈龙旭,男,硕士研究生, E-mail:blzs201211@163.com

* 通信作者:邹静蓉,女,副教授, E-mail:zoujingr97@126.com

件下的物理力学特性变化规律,并采用 SEM 扫描电镜观察分析了岩石微观裂隙在不同干湿循环次数下的发育情况;李冬雪等(2013)设计了黏质路基土的干湿循环试验并测得了不同干湿循环次数下的回弹模量,结果表明:黏质土回弹模量随干湿循环次数的增加而减少。

纵观上述研究结果,主要集中在抗压强度、抗剪强度、抗拉强度和微观裂隙发育等方面,各类岩土介质呈现了不同的劣化特性,JTG D30—2015《公路路基设计规范》规定采用路基顶面回弹模量作为路基设计的强度控制指标,而目前对于红砂岩及其水泥改良土回弹模量的研究与设计却少之又少。

鉴于此,该文开展室内干湿循环作用下红砂岩的回弹模量试验,研究 3 种红砂岩素土和其中一种水泥改良土的回弹模量随干湿循环作用次数的变化规律。根据路面的不平整度得到车辆动态加载模型,基于动应变控制法,采用有限元法进行建模分析,确定红砂岩路床改良层不同填筑深度的回弹模量临界值,并在实际工程中推广应用。

2 红砂岩回弹模量试验研究

2.1 工程概况

依托湖南怀化—芷江高速公路项目(简称怀芷高速),主线全长 33.25 km,采用双向四车道高速公路标准,设计速度 100 km/h,路面结构层设计如图 1 所示。怀芷高速公路穿越丘陵区,分布有大量风化红砂岩,高填深挖路段较多,为了满足挖填平衡,深路堑的挖方往往要用作路堤填料,由于挖方的深度不同,受光照、水和风的作用程度不同,所以风化的程度有所差异,最终导致各标段路基填料的粒径、成分和强度各不相同,如何合理运用这类填料是一个亟待解决的难题。

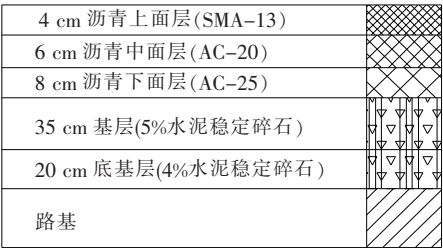


图 1 怀芷高速路面结构层示意图

2.2 干湿循环条件下红砂岩回弹模量变化规律研究

公路投入运营后,路基土含水率将发生变化,由碾压时的最佳含水率(Optimal Moisture Content,

OMC)逐渐增加至平衡含水率(Equilibrium Moisture Content,EMC),并随着运营期的增长,路基土含水率始终在平衡含水率 w_{emc} 附近波动,对于红砂岩路基而言,含水率的反复波动变化将影响土体的微观结构,从而影响路基的力学性能。

2.2.1 素土回弹模量试验研究

对怀芷高速 K24 标段、K30 标段和 K31 标段 3 处红砂岩进行取样和筛分试验,各标段土样和级配曲线如图 2、3 所示。由图 2、3 可知:这 3 种土均为粗粒土,整体粒径大小为 $K24>K30>K31$ 。

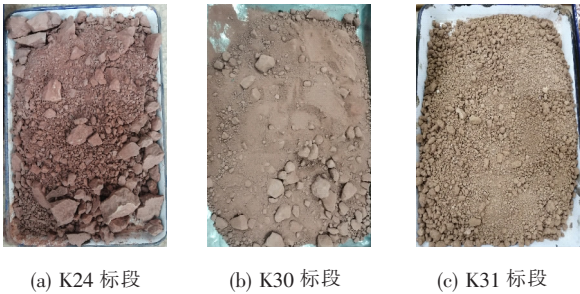


图 2 3 种红砂岩土样

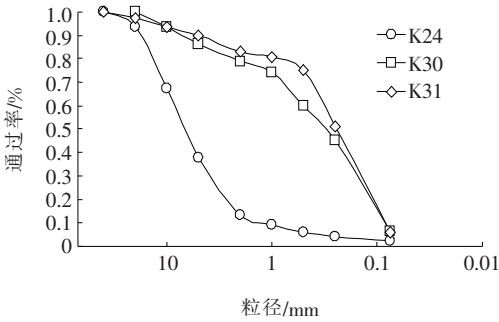


图 3 3 种红砂岩的级配曲线

为模拟路基土含水率在运营期间处于平衡含水率附近波动的情况,进行了室内重型击实试验和干湿循环条件下红砂岩素土的回弹模量试验。试验方案如下:① 通过重型击实试验得到 3 种土样的最佳含水量 w_{omc} 和最大干密度 ρ_d ,如表 1 所示;② 使用 CMT5105 万能压力机静压成型试件,成型条件为最佳含水率和目标压实度,此压实度即为路床层的设计压实度 96%;③ 向试件模具两端放置透水石并从顶部加水至平衡含水量 w_{emc} 附近,静置一段时间至试件底部透水石湿润,确保水分渗透至试件底部;④ 在 40℃ 的烘箱内脱水至目标含水率,期间每隔 30 min 取出试件称重,保证含水率波动在目标范围内,反复重复“加水→渗透→静置→脱水”的一系列干湿循环流程以模拟路基含水率波动情况。

表 1 3 种红砂岩最佳含水率和最大干密度

标段	$w_{omc}/\%$	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$
K24	8.01	1.93
K30	9.39	1.97
K31	10.40	1.86

由于路基土大多为非饱和土,平衡含水率 w_{emc} 处于 $w_{omc} \sim (w_{omc} + 7\%)$ 之间,因此该文 3 种土的平衡含水率依据表 1 的最佳含水率设置为:K24 为 15%、K30 为 16%、K31 为 17%,干湿循环波动幅度(Transition Moisture Content, TMC)为 $\pm 3\%$ 。所以 1 次干湿循环中试件含水率变化为“ $w_{emc} + 3\% \rightarrow w_{emc} - 3\% \rightarrow w_{emc}$ ”,2 次循环试件含水率变化为“ $w_{emc} + 3\% \rightarrow w_{emc} - 3\% \rightarrow w_{emc} \rightarrow w_{emc} + 3\% \rightarrow w_{emc} - 3\% \rightarrow w_{emc}$ ”,以此类推,进行了 0、1、3、5、7 次干湿循环后按文献[19]的方法测试回弹模量,试验结果如图 4 所示。

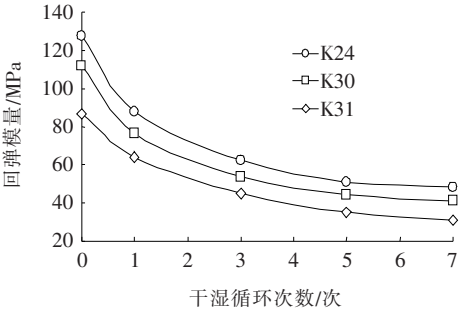


图 4 红砂岩回弹模量与干湿循环次数的关系

图 4 结果表明:3 种填料的强度有相同的变化规律,红砂岩的回弹模量随着干湿循环次数的增加逐渐降低,在第 1 次干湿循环后衰减幅度最大,第 3 次干湿循环后回弹模量衰减趋势逐渐平缓;并且经过第 7 次干湿循环后,红砂岩的强度趋于稳定,7 次干湿循环后的 3 种土样的回弹模量分别为 48、41、36 MPa,相较于未经干湿循环的试样分别降低了 63.6%、62.4% 和 62.5%。分析认为干湿循环作用导致岩石粒度变小,表面积增大,直接导致单位表面积岩石进一步崩解所需吸收的能量越来越大,崩解难度随之增加,当岩石吸收的能量小于其崩解所需能量时,崩解便会停止,最终红砂岩的强度维持在一个较稳定的状态。

2.2.2 水泥改良土回弹模量试验研究

鉴于以上研究结果,选取 K24 段红砂岩试样掺加 3%、4%、5% 共 3 个剂量的水泥进行改良研究,按照上述方法成型试件,养生 7 d 进行 1、3、5、7 次干湿循环后测试回弹模量,试验结果如图 5 所示。分析图 5 可

知:掺加水泥不仅可以大幅增强红砂岩强度,还能缓解干湿循环作用引起的回弹模量劣化特性,在第 3 次干湿循环后改良土的强度出现小幅回升,并在第 7 次循环后保持稳定。这表明水泥改良法可有效抑制红砂岩的水活性,因为水泥发生的水化作用吸收了一部分水,产生的水化产物也具有胶结能力,一方面提高了土体的强度,同时在土颗粒的细小空隙中相互交织搭接,阻塞了排水通道,降低了土体的渗水性能,因此隔绝了红砂岩与外界水的能量交换,而随着水泥改良土龄期的增长,试件表面的水分已经很难渗透到内层,所以土体强度随之增缓慢长。

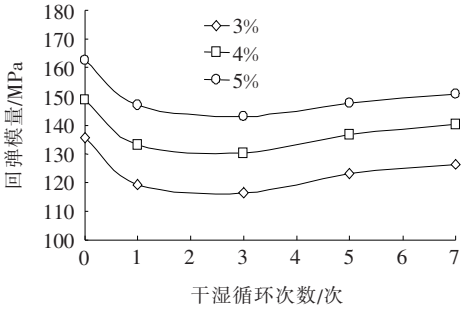


图 5 红砂岩改良土回弹模量与干湿循环次数关系

3 动应变控制计算方法介绍

3.1 动荷载

中国现行公路设计是基于弹性层状体系设计理论,把各结构层视为单层弹性体,将车辆荷载简化为双圆荷载的加载模式,当路面完全平整时,车辆在行驶过程中产生的荷载可视为静载,而实际公路在运营中经过重载车辆碾压及高温和水的长期作用后,路面或多或少会出现不平整,随着时间推移,不平整度逐渐加大,这种情况下行驶的车辆对路面造成的实际作用力和理想平整状态下的静力加载模式存在差异。路基动力设计目的在于保证土体结构本身不发生破坏,防止路基因交通荷载引起过大的变形而导致路面结构破坏。

文献[21]对两条运营中的高速公路的真实路型进行了研究,发现高速公路路面的不平整变形可由多个幅值和周期不同的正弦函数叠加来近似表示。当车辆在实际路面行驶时,由于路面不平整而产生振动,因此车辆实际对路面的作用要大于静荷载,超出的那部分称之为附加动荷载。通过对高速公路路面实测不平整状况的谱分析发现,高频部分几乎不产生附加动荷载,低频部分对应的正是路面不平整度较大的部分,产

生了大量的附加荷载。因此,在分析车辆动荷载时,可以忽略路面不平整度较小的部分,将路面某一点的动荷载视为周期性的正弦函数,根据文献[22-23]的研究,冲击系数取0.2,动载幅值 F 表达式如式(1)所示:

$$F=A+a\sin(\omega t)$$

(1)

式中: A 为初始幅值; a 为冲击系数; $\omega=2\pi/T$, T 为荷载周期,根据高速公路车速设计标准为100 km/h,则 T =轮迹长/车速。

3.2 应变控制法

应变控制法就是以交通荷载作用下路基顶面的动应变变量不大于允许应变量为控制条件,即 $\epsilon\leq[\epsilon_z]$,对公路路基结构进行设计,此应变允许量 $[\epsilon_z]$ 即为公路沥青路面设计规范对路基顶面竖向压应变的控制值,按式(2)计算:

$$[\epsilon_z]=1.25\times10^{4-0.1\beta}(k_TN_e)^{-0.21}$$

(2)

式中: $[\epsilon_z]$ 为路基顶面容许竖向压应变; β 为目标可靠指标,根据公路等级而定; k_T 为温度调整系数; N_e 为设计年限内单车道当量轴载累计作用次数。

应变控制法的目的在于保证路基结构不会产生过大的塑性变形而导致使用寿命缩短,且变形不会反射到路面致使路面开裂,在公路的使用年限末期仍能达到服务等级要求,保证行车的安全性和舒适性。路基顶面允许应变变量与公路等级、公路所处气候划分以及公路设计年限的累计轴载有关。

根据怀芷高速的交通等级、地理位置及气候条件,按照文献[24]的规定,参数 β 取1.65,温度调整系数 k_T 取1.24。根据文献[18]对交通荷载的分级,按式(2)计算各级交通荷载条件下对应的允许应变变量,结果如表2所示。

表2 各级交通荷载下动应变设计值

交通等级	$N_e/(万次\cdot车道^{-1})$	$\epsilon_z/\mu\epsilon$
轻	<400	>335.6
中	400~800	335.6~290.2
重	800~1 900	290.2~242.0
特重	1 900~5 000	242.0~197.5
极重	>5 000	<197.5

3.3 计算模型及参数

该文采用Abaqus有限元软件,建立三维对称模型,模型长1.5 m,宽1.5 m。模型单元类型为C3D8I单元,边界条件为:左边界为对称面,右边界为竖直向自由,水平向固定,底边界为竖直和水平向均固定,各

层材料使用理想弹性材料。轮胎接地模型近似为矩形,接地面积按照比利时经验公式计算: $A=0.008P+152$, $P=25$ kN,接地面积为352 cm²,近似等效为18 cm×20 cm的矩形荷载。

当公路结构层数过多,有限元程序计算时对于各层接触的分析会占用太多资源,容易导致计算不收敛,给分析和计算带来不便。由于路面结构各层的力学性能相似,如:回弹模量、泊松比和密度均相差不大,且假设各层完全连续,因此利用Odemark当量模量假定,将沥青面层折算成与底基层模量相同的当量结构层,按式(3)计算。所以公路结构计算模型就可以简化为3层:当量路面层、路床改良层、路堤层,如图6所示。

$$H_e=\left(\frac{E}{E_b}\right)^{\frac{1}{3}}\cdot H$$

(3)

式中: H_e 为等效厚度; E 、 H 分别为需换算的路面结构层模量和厚度; E_b 为选取的当量模量。

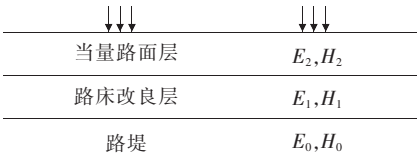


图6 路面当量层示意图

将路堤回弹模量记为 E_0 ,厚度记为 H_0 ,路床回弹模量记为 E_1 ,厚度记为 H_1 ;路面回弹模量记为 E_2 ,厚度记为 H_2 ,路面各层参数取值如表3所示,经换算后的面层当量模量为1 100 MPa,等效深度为76.2 cm。

表3 公路结构层参数

各层名称	回弹模量/MPa	厚度/cm	泊松比
SMA-13	1 400	4	0.25
AC-13	1 200	6	0.25
AC-20	1 000	8	0.25
5%水稳基层	1 400	35	0.30
4%水稳底基层	1 100	20	0.30
路床(水泥改良土)	E_1	H_1	0.35
路堤	E_0	H_0	0.40

4 计算结果分析

该文在路堤回弹模量 $E_0=90、60、30$ MPa, $H_0=150$ cm时,由小到大改变红砂岩水泥改良层的回弹模量,根据有限元模型计算出重交通下满足 $\epsilon\leq[\epsilon_z]$ 时

对应的红砂岩改良层深度,得到红砂岩改良层回弹模量 E_1 和改良深度 H_1 的关系曲线如图 7 所示。

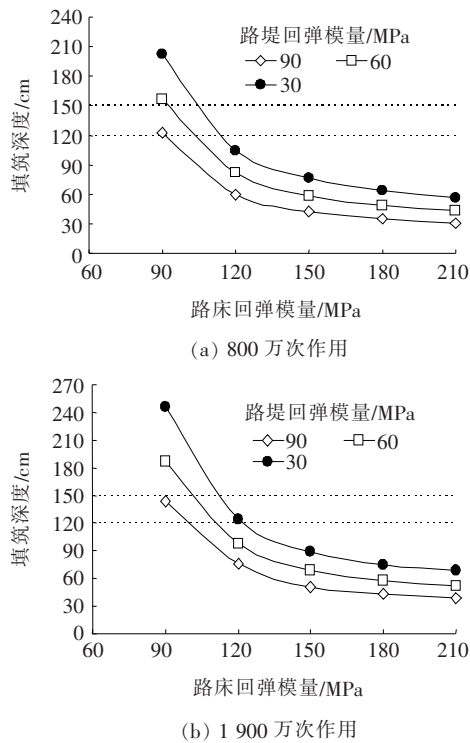


图 7 路床回弹模量和改良深度关系曲线

分析图 7 可知:改良层填筑深度随着路床回弹模量提高而降低,且改良层回弹模量 E_1 小于 150 MPa 时,在 $\epsilon \leq [\epsilon_z]$ 条件下,提高改良层模量可以显著降低填筑深度 H_1 ,在路堤模量为 90 MPa 时,改良层回弹模量 E_1 从 90 MPa 提高到 120 MPa,相应的填筑深度降低了 63 cm,而当路床模量 E_1 大于 150 MPa 时,增加模量对减小路床填筑深度的效果不太明显。另外,在满足 $\epsilon \leq [\epsilon_z]$ 条件下,路堤强度对公路结构设计影响较大,当 $E_1 = 90$ MPa 时,随着路堤模量 E_0 从 90 MPa 降低到 60 MPa 和 30 MPa,路床的填筑高度分别提高了 34、80 cm,因此在公路动应变设计时,要注重路床与路堤强度的相互协调,合理过渡。

在重交通条件下,对图 7 的数据使用幂函数进行拟合,如表 4 所示,再使用二分法求解,得到不同改良深度下的红砂岩回弹模量的临界值,如表 5 所示。

表 5 的用法如下:

(1) 在现场使用便携式落锤弯沉仪测出路堤顶面动变形模量 E_{vd} ,使用文献[25]的方法将 E_{vd} 换算成路堤顶面回弹模量 E_0 。

(2) 根据路堤顶面回弹模量 E_0 的大小和交通等级选择表 5 中对应的区间,再按照设计要求的路床改

表 4 路床改良层回弹模量和填筑深度的关系

路堤回弹模量/MPa	$N_e=800$ 万次/车道		$N_e=1\,900$ 万次/车道	
	拟合函数	R^2	拟合函数	R^2
90	$y = 152\,637x^{-1.613}$	0.949 9	$y = 152\,546x^{-1.572}$	0.961 6
60	$y = 118\,779x^{-1.498}$	0.956 6	$y = 148\,750x^{-1.509}$	0.955 1
30	$y = 147\,722x^{-1.49}$	0.956 8	$y = 192\,311x^{-1.509}$	0.944 4

表 5 重交通下红砂岩改良层不同填筑深度的回弹模量临界值

H_1/m	E_1/MPa					
	$N_e=800$ 万次/车道			$N_e=1\,900$ 万次/车道		
	$E_0=90$ MPa	$E_0=60$ MPa	$E_0=30$ MPa	$E_0=90$ MPa	$E_0=60$ MPa	$E_0=30$ MPa
0.3	198.5	252.0	300.0	227.9	281.0	333.0
0.6	144.8	158.7	188.7	146.5	177.5	211.0
0.8	108.1	131.0	155.7	122.1	146.7	174.0
1.2	84.0	100.0	118.6	94.3	112.2	133.0
1.5	73.2	86.1	102.1	81.8	96.7	114.7

良层深度,采用线性插值法计算出所需的路床改良层回弹模量。

采用此方法在交通量等级为重交通的怀芷高速 K24 段的实际应用中,设计年限内累计轴载为 1 900 万次/车道,实测 $E_{vd}=79.2$ MPa,经换算后得到 $E_0=56.6$ MPa,设计要求改良深度 $H_1=0.8$ m,则经线性插值法得 $E_1=149.8$ MPa,再根据图 4 中 7 次干湿循环后改良土的回弹模量值,可取水泥剂量为 5%,试验段掺 5% 水泥改良后的路基通过了弯沉检测,并在全线得到推广,取得了良好的应用效果,研究成果可为类似的红砂岩工程提供参考。

5 结论

(1) 提出红砂岩路基土室内干湿循环试验方案,进行了干湿循环下素土和水泥改良土的回弹模量试验。含水率周期波动对素土的回弹模量影响较大,对水泥改良土影响较小。素土的回弹模量随循环次数增加而逐渐降低,前 3 次干湿循环下降明显,第 7 次干湿循环后基本保持稳定;水泥改良土回弹模量在 3 次干湿循环后缓慢回升,并在 7 次循环后逐渐稳定。

(2) 路面不平整是车辆产生附加动荷载的主要原因,给出了动荷载设计的参数建议值和加载模型,结合沥青路面设计规范,提出了动态荷载下红砂岩路基动应变设计方法,并计算了重交通下路基顶面压应变控制指标。

(3) 采用有限元方法,在路堤模量为 30、60、90 MPa 下,确定了红砂岩改良层回弹模量和改良深度的关系曲线,通过幂函数拟合得到了重交通下红砂岩改良层不同改良深度的回弹模量临界值,并在怀芷高速公路路基填筑工程中得到应用,为红砂岩的科学利用提供了依据。

参考文献:

- [1] 李聪. 基于非饱和土理论的路基回弹模量研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2007.
- [2] 骆俊晖,米德才,刘先林,等. 软土工程特性研究与评价[J]. 中外公路,2017(6).
- [3] 赵明华,邓颢宇,曹文贵. 红砂岩崩解特性及其路堤填筑技术研究[J]. 中国公路学报,2003(3).
- [4] 黄东,吴勇,匡波. 降雨条件下包盖法填筑炭质泥岩路堤稳定性分析[J]. 中外公路,2017(6).
- [5] P. A. Hale, A. Shakoor. A Laboratory Investigation of the Effects of Cyclic Heating and Cooling, Wetting and Drying, and Freezing and Thawing on the Compressive Strength of Selected Sandstones [J]. Environmental & Engineering Geo-Science, 2003, 9(2): 117—130.
- [6] Khanlari G, Abdilor Y. Influence of Wet—Dry, Freeze—Thaw, and Heat—Cool Cycles on the Physical and Mechanical Properties of Upper Red Sandstones in Central Iran[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2015, 74(4): 1 287—1 300.
- [7] A. Özbek. Investigation of the Effects of Wetting—Drying and Freezing—Thawing Cycles on Some Physical and Mechanical Properties of Selected Ignimbrites[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2014, 73(2): 595—609.
- [8] Zhang Z, Jiang Q, Zhou C, et al. Strength and Failure Characteristics of Jurassic Red—Bed Sandstone under Cyclic Wetting—Drying Conditions[J]. Geophysical Journal International, 2014, 198(2): 1 034—1 044.
- [9] Ghobadi M H, Babazadeh R. An Investigation on the Effect of Accelerated Weathering on Strength and Durability of Tertiary Sandstones (Qazvin Province, Iran)[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 73(8): 4 237—4 250.
- [10] 杜彬,白海波,马占国,等. 干湿循环作用下红砂岩动态拉伸力学性能试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018(7).
- [11] Du B, Bai H, Wu G. Dynamic Compression Properties and Deterioration of Red—Sandstone Subject to Cyclic Wet—Dry Treatment[J]. Advances in Civil Engineering, vol. 2016, Article ID 1487156, 10 Pages.
- [12] 徐志华,张国栋,孙钱程,等. 干湿循环作用下红砂岩强度劣化特性试验[J]. 中国公路学报,2018(2).
- [13] 杨俊,童磊,张国栋,等. 干湿循环效应对风化砂改良膨胀土抗剪强度影响研究[J]. 长江科学院院报,2014(4).
- [14] 杨俊,童磊,张国栋,等. 干湿循环对风化砂改良膨胀土无侧限抗压强度的影响[J]. 武汉大学学报(工学版),2014(4).
- [15] 陈宾,周乐意,赵延林,等. 干湿循环条件下红砂岩软弱夹层微结构与剪切强度的关联性[J]. 岩土力学,2018(5).
- [16] Zhou Z, Cai X, Chen L, et al. Influence of Cyclic Wetting and Drying on Physical and Dynamic Compressive Properties of Sandstone [J]. Engineering Geology, 2017, 220: 1—12.
- [17] 李冬雪,凌建明,钱劲松,等. 湿度循环下黏质路基土回弹模量演化规律[J]. 同济大学学报(自然科学版),2013(7).
- [18] JTG D30—2015 公路路基设计规范[S].
- [19] JTG E40—2007 公路土工试验规程[S].
- [20] 黄晓明. 路基路面工程[M]. 4版. 北京:人民交通出版社,2014.
- [21] 邓学钧,孙璐. 车辆—地面结构系统动力学[M]. 北京:人民交通出版社,2000.
- [22] 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(9).
- [23] 张静波,何荷,王鹏,等. 路基动压应力的现场测试分析[J]. 中外公路,2017(2).
- [24] JTG D50—2017 公路沥青路面设计规范[S].
- [25] 陈龙旭,雷润杰,喻雅琴,等. 便携式落锤弯沉仪在湘西风化红砂岩路基模量检测中的应用[J]. 湖南交通科技,2018(3).