

文章编号:1671-8879(2016)01-0008-06

泥质软岩土石弃渣路基填筑工艺 及质量检测方法

张莎莎¹, 杨晓华¹, 杜耀辉^{1,2}, 贾 雷³

(1. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 甘肃长达路业有限责任公司, 甘肃 兰州 730000;
3. 机械工业勘察设计研究院, 陕西 西安 710043)

摘 要:为了维护生态环境、保护土地资源、节约建设资金, 提供一种合理的泥质软岩土石混合料弃渣路基填筑工艺和有效的路基质量检测方法, 以成武(成县—武都)高速公路为工程依托, 基于土样的基本工程性质和大型击实试验结果, 通过不同含水率和压实度的动力触探检测试验、现场路基填筑试验、路基沉降监测及数值计算分析, 采用线性回归法对检测试验数据进行拟合分析。研究结果表明: 动力触探锤击数与路基含水率和压实度相关, 随着含水率的增加, 动力触探锤击数先增大后减小, 含水率对锤击数的影响较压实度显著; 40 cm 左右的泥质软岩土石弃渣路基松铺厚度, 填料粒径不大于 260 mm, 在现有施工机械条件下 8 遍碾压的路基填筑工艺是合理的; 提出了适用于泥质软岩土石混合料弃渣填筑路基的质量检测方法和检测标准。

关键词:道路工程; 泥质软岩土石弃渣; 动力触探试验; 质量检测; 数值计算

中图分类号: U416.1 **文献标志码:** A

Roadbed construction process and quality inspection for argillaceous soft rock earth mixture spoil

ZHANG Sha-sha¹, YANG Xiao-hua¹, DU Yao-hui^{1,2}, JIA Lei³

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China; 2. Gansu Changda Highway Co. Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China; 3. China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co. Ltd., Xi'an 710043, Shaanxi, China)

Abstract: In order to protect the ecological environment, protect land resources and save construction fund, a reasonable roadbed construction process and effective roadbed quality inspection for argillaceous soft rock earth mixture spoil need to be provided. The engineering background was from Chengxian to Wudu superhighway project, where tests of different dynamic sounding, subgrade filling processes, the monitoring tests of roadbed subsidence and numerical calculation were carried out on the basis of soil properties and large-scale compaction test results. And the experimental data was analyzed by using linear regression method. The results show that the hammer number of dynamic sounding tests is related to the moisture content and the degree of compaction of subgrade. It will first increase and then decrease with the increase of moisture content. The moisture content has a more notable influence on the hammer

收稿日期: 2015-09-10

基金项目: 甘肃省交通运输厅科技项目(2011-09); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2014G1211008)

作者简介: 张莎莎(1982-), 女, 山西运城人, 副教授, 工学博士, E-mail: zss_lx@126.com。

number of dynamic sounding tests compared with the degree of compaction. Subgrade pavement thickness of argillaceous soft rock earth mixture spoil should be controlled at about 40 cm. The particle size of filler should not be more than 260 mm. And 8 times rolling can reach the compaction standard of highway embankment under the current construction and mechanical condition. The quality inspection methods and standards are developed for argillaceous soft rock earth mixture spoil. 7 tabs, 5 figs, 20 refs.

Key words: road engineering; argillaceous soft rock earth mixture spoil; dynamic sounding test; quality inspection; numerical calculation

0 引 言

在泥质软岩地区修筑山区高速公路时,不可避免地会面临因开挖边坡或隧道而产生大量的泥质软岩土石混合料弃渣,能否有效利用这些工程弃渣将直接影响公路沿线的生态环境、土地资源和工程建设资金。一方面,隧道、边坡等挖方工程的施工开挖产生的大量渣料堆填对脆弱的山区生态环境影响巨大,其恢复过程十分漫长,渣料的堆填亦会造成土地资源的浪费;另一方面,山区路基填筑所需填料需要长途运输,势必增加运输材料的费用,导致工程建设资金较高。如果能将这些挖方弃渣加以合理利用,将会解决上述两大问题。但是,泥质软岩本身是一种特殊软岩,其工程特性会随含水率的变化而软化变差,按照现有研究成果分析可知,按照常规施工方法很难将其有效用于路基填料^[1-5]。同时,有些地区的泥质软岩中还夹杂有大量的其他土石混合料,使其工程性质更加复杂。

目前,关于泥质软岩土石混合料弃渣路用性能方面的研究相对较少,类似研究主要是针对土石混合料或粗粒料的路用性能研究^[6-13],其研究方向亦集中于土质工程性质和物理力学强度方面,对于实际的路基填筑工艺和控制参数研究相对少见。针对粗粒料填筑路基的质量检测方法,现有研究成果提出了采用强夯法、面波勘探法等新型检测路基质量压实度的有效方法,丰富了该方面的科学技术,但是还是缺少快速和简便的粗粒料路基质量检测方法^[14-18],因此,针对山区修筑高速公路因开挖边坡、隧道等挖方工程而产生泥质软岩土石混合料的丢弃和利用问题,研究如何有效利用泥质软岩土石混合料弃渣作为路基填料,并提供相应的质量检测方法,

已引起工程界的广泛关注。

基于此,本文以成武(成县—武都)高速公路为工程依托,基于土样的基本工程性质试验,通过不同的现场路基填筑试验、路基沉降监测及数值计算方法,研究了泥质软岩土石弃渣的最佳路基填筑工艺;基于动力触探锤击数与不同含水率及不同压实度土样的对比试验,对比不同施工阶段动力触探锤击数和传统路基质量检测结果,采用线性回归方法对试验数据进行拟合分析,提出了适用于泥质软岩土石弃渣的路基质量检测方法和标准,为保护山区生态环境、土地资源和节约工程建设资金提供保障。

1 室内试验

1.1 试验土样基本工程性质

经过对成武高速公路沿线的调研,试验用泥质软岩土石弃渣采用 1 标、4 标和 5 标的土样,试验土样运回实验室后,充分搅拌均匀,根据《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)对试验用泥质软岩土石弃渣土样进行了常规工程性质试验。由于试验土样中大尺寸颗粒粒径的土样比重较大,为了使土样试验结果更具有广泛性和代表性,研制了针对巨砾土料大型击实试验的模型桶,模型桶的具体尺寸为:直径 30 cm、高度 35.4 cm、体积 25 000 cm³、击锤质量 4.5 kg;同时,设定大型击实锤的下落高度为 45 cm,击实锤的直径为 5 cm,所得击实功为 600 kN·m/m³。大型击实试验过程中,试验土样共分 5 层击实,每层击实次数为 151 次,每层击实完毕后对土层进行刮毛处理,再进行下一层击实。试验土样的常规试验结果和大型击实试验结果见表 1、下页表 2。

表 1 筛分试验结果

Tab. 1 Results of screening tests

粒径/mm	>60	60~40	40~20	20~10	10~5	5~2	2~1	1~0.5	0.5~0.25	0.25~0.075	<0.075	土类
含量/%	1.78	14.14	33.06	19.63	13.55	8.55	1.68	2.63	1.60	2.13	1.27	级配良好砾

表 2 试验土样的工程性质

Tab. 2 Engineering properties of test soil sample

标准重型击实		大型击实试验		CBR 试 验膨胀 量/%	CBR _{2.5} / %	CBR _{5.0} / %
最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含 水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)	最佳含 水率/%			
2.22	6.8	2.26	6.7	0.59	21.75	37.17

从土样的基本工程性质试验结果可知,成武高速公路泥质软岩石混合料弃渣的物理力学性质良好,其大型击实试验结果近似于标准重型击实试验结果。

1.2 不同工况下动力触探试验结果分析

目前,针对粗粒料填筑路基的质量检测方法主要有:轮迹法、灌砂法、灌水法等,这些质量检测手段有些检测质量不好掌控,有些检测时间过长。为了达到高效、快速的粗粒料路基质量检测目的和质量检测方法的后期推广,综合考虑泥质软岩石混合料弃渣的平均粒径与最大粒径,基于施工单位的常备仪器设备,选择采用重型动力触探设备开展粗粒料填筑路基的压实度检测研究。其方法为:记录 63.5 kg 重锤以 76 cm 落距锤击试验土样后,探头贯入土层 30 cm 深度时,其锤击数 $N_{63.5}$ 作为路基质量的检测指标。

为了探究动力触探试验测试不同压实度土样的可行性和有效性,开展了不同含水率和不同干密度条件下的大型击实试验。同时,针对不同工况进行动力触探试验,并对其结果进行对比分析。试验方法为配制不同含水率的土样,以大试筒重型击实标准对土样进行击实,制成不同压实度的土样;其后,采用动力触探试验对不同土样进行动探测试,以分析在不同工况下,泥质软岩石混合料弃渣试样随含水率和压实度变化的动力触探锤击数的规律特征,试验结果见图 1 和图 2。

2 现场试验

2.1 泥质软岩石弃渣路基施工工艺

为了给出基于现有机械设备,采用泥质软岩石

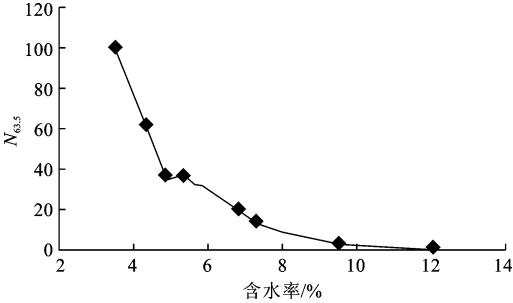


图 1 动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 与土样含水率的关系

Fig. 1 Relationship between dynamic sounding hammer number $N_{63.5}$ and soil moisture

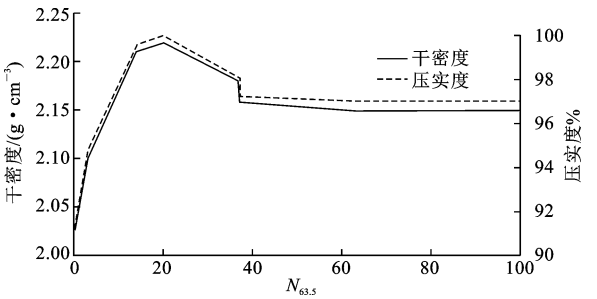


图 2 动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 与土样干密度及压实度的关系

Fig. 2 Relationship between dynamic sounding hammer number $N_{63.5}$ and dry density & compactness of soil

石混合料弃渣填筑路基的合理施工工艺,通过对成武高速沿线的调研,选择成武高速某标段的路桥过渡处高填路基开展现场试验研究。具体试验程序如下:①将试验段分别以不同的松铺厚度摊铺成 3 个不同的区段(I 区松铺厚度为 30 cm,Ⅱ区松铺厚度为 40 cm,Ⅲ区松铺厚度为 50 cm),每个区段长度均为 20 m,整体呈梯形分布;②采用相同的碾压施工工艺;③检测各个区段的路基压实度和相应沉降量;④综合考虑技术和经济因素确定泥质软岩石混合料弃渣填筑路基最合理的松铺厚度,即施工工艺。

路基的主要施工机械有:ZL50 装载机、PY160 平地机和山推 220 型压路机。压实机械的主要技术参数有:①激振力与静压力采用 1:1;②20 t 振动压路机的激振力为 374 kN 或 290 kN;③频率 30 Hz;④振幅 1.5 ~ 2.0 mm;⑤错轮宽度为 1/3 轮宽;⑥碾压行进速度 5 km/h。

现场试验步骤:①按照试验方案要求,分别摊铺松铺厚度为 30、40、50 cm 的泥质软岩石混合料弃渣并整平;②对试验段路基洒水 2 遍,羊角碾震动碾压 2 遍,光面震动碾压 2 遍,并测量 3 个区段的标高、压实度(灌砂法)、动力触探锤击数;③洒水 2 遍,羊角碾震动碾压 1 遍,光面震动碾压 1 遍,并测量 3 个区段的标高、压实度(灌砂法)、动力触探锤击数;④洒水 2 遍,光面震动碾压 2 遍,并测量 3 个区段的标高、压实度(灌砂法)、动力触探锤击数;⑤洒水 2 遍,光面震动碾压 2 遍,然后测量 3 个区段的标高、压实度(灌砂法)、动力触探锤击数;⑥最后采用轮迹法确定路基碾压结束。

通过对现场试验段路基的沉降监测和质量检测,从技术和经济角度考虑,泥质软岩石混合料弃渣填筑路基的松铺厚度宜控制在 40 cm 左右,填料粒径小于等于 260 mm,基于现有机械设备,8 遍碾压可达到高速公路、一级公路 1.5 m 以下路堤压实度标准 93% 的要求。

2.2 路基质量检测方法研究

以动力触探试验与击实试验的对比分析结果为基础,通过现场动力触探试验测得的贯入锤击数,与灌砂法及轮迹法测得的压实度相对比,建立起动力触探锤击数与不同含水率的泥质软岩土石混合料弃渣路基压实度的对应关系,以达到高效、快速的路基质量检测目的。灌砂法试验结果、动力触探试验结果及现场路基沉降监测数据如表 3~表 5 所示。

表 3 灌砂法试验结果

Tab. 3 Test results of sand replacement method

区段	不同碾压遍数(遍)的压实度/%			
	4	6	8	10
I 区(松铺厚度 30 cm)	83.2	84.9	85.8	85.8
II 区(松铺厚度 40 cm)	88.7	91.3	93.5	93.9
III 区(松铺厚度 50 cm)	87.9	90.4	92.3	92.7

注:压实度为 3 个测点的均值。

表 4 动力触探试验结果

Tab. 4 Test results of dynamic sounding

区段	不同碾压遍数(遍)的 $N_{63.5}$			
	4	6	8	10
I 区(松铺厚度 30 cm)	4	7	9	9
II 区(松铺厚度 40 cm)	26	33	40	42
III 区(松铺厚度 50 cm)	23	30	35	37

注: $N_{63.5}$ 的锤击数为 5 个测点的均值。

表 5 路基沉降量

Tab. 5 Subgrade settlement

区段	不同碾压遍数(遍)的沉降量/cm			
	4	6	8	10
I 区(松铺厚度 30 cm)	1.4	0.6	0.3	0.1
II 区(松铺厚度 40 cm)	3.2	1.0	0.7	0.5
III 区(松铺厚度 50 cm)	3.7	1.1	0.8	0.5

以现场路基试验结果为基础,采用路基压实度作为拟合方程的自变量 x ,以动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 作为拟合方程的因变量 y ,压实度与锤击数的关系如图 3 所示。由图 3 可知,试验所得样本点(即压实

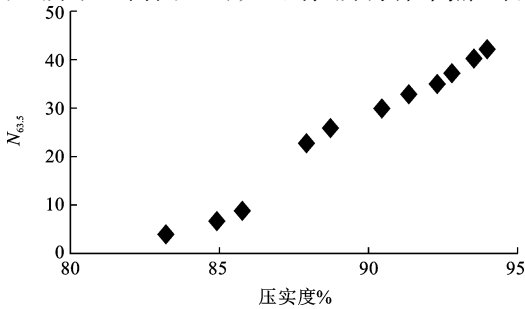


图 3 压实度与动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 的关系散点

Fig. 3 Scatterplot of relationship between dynamic sounding hammer number $N_{63.5}$ and compactness of soil

度与动力触探锤击数 $N_{63.5}$ 的关系)近似线性分布,可采用线性回归方程 $y=a+bx$ 来模拟样本点之间的关系, a 、 b 为待定系数,即

$$a=\bar{y}-b\bar{x} \tag{1}$$

$$b=\frac{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^n(x_i-\bar{x})^2} \tag{2}$$

式中: $\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nx_i$; $\bar{y}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^ny_i$; (\bar{x},\bar{y}) 为样本点的中心。

基于式(1)、式(2)可得到线性回归方程为

$$y=3.673x-302.766 \tag{3}$$

以线性方程式(3)为基础,并结合《公路路基施工技术规范》(JTGF10—2006)对路堤压实度的要求,得到泥质软岩土石混合料动力触探检测标准,见表 6。

表 6 动力触探检测标准

Tab. 6 Quality inspection standards of dynamic sounding

含水率/%	2.4~5.8						
压实度/%	<85	85~90	90~93	93~94	94~95	95~96	>96
$N_{63.5}$	<9	9~27	27~38	38~42	42~46	46~50	>50

3 路基沉降分析

为了明确泥质软岩土石混合料弃渣路基填筑工艺的合理性和动力触探检测标准的准确性,针对试验路段进行了路基沉降观测和数值计算分析。其中,路基沉降的现场观测仪器是水准仪,通过对现场试验路段进行近 3 个月的沉降观测,发现试验路段的沉降量较小,其中某半幅路基的沉降观测数据如下页图 4 所示。由图 4 可知,路基的最大沉降量为 0.014 m,随时间增长的比较缓慢,最后趋于平缓。

同时,为了研究泥质软岩土石混合料弃渣填筑路基的最终稳定性,采用有限差分软件 FLAC3D 对路基进行数值模拟分析。其中,路基模型采用摩尔-库伦塑性模型,路基在施工过程中的分层填筑采用空模型模拟,并采用分阶段弹塑性求解法进行初始地应力的模拟计算^[19-20],土体材料计算参数见表 7,计算结果如下页图 5 所示。

由图 5 可知,随路基填筑产生的沉降量增大值

表 7 土体材料计算参数

Tab. 7 Calculated parameter of soil material

土样	密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粘聚力/ MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)	压缩模 量/MPa	泊松比	体积模 量/MPa	剪切模 量/MPa
地基	1.8	11.3	20.0	3.9	0.35	2.70	0.90
路堤	2.1	0.9	18.0	5.4	0.30	3.34	1.54

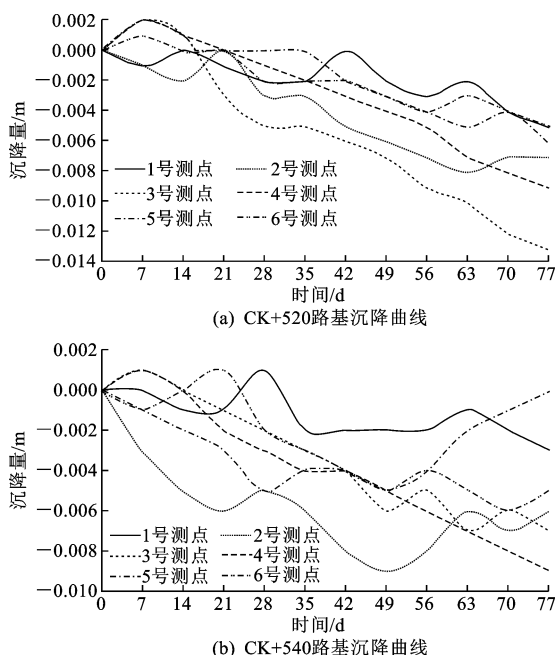


图4 试验路段半幅路基沉降观测曲线

Fig. 4 Settlement observation curves for test sections subgrade

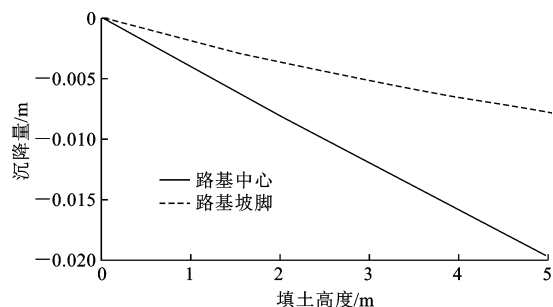


图5 路基关键点的沉降曲线

Fig. 5 Key point curves of subgrade settlement

较均匀,现场试验推荐的路基填筑厚度是合理的。路基中心沉降大于路基坡脚沉降,路基中心处的最大沉降量为 0.019 7 m。综合上述分析,本文给出的泥质软岩土石混合料弃渣填筑路基的施工工艺合理,采用动力触探对路基质量进行检测可行。

4 结 语

(1)通过室内动力触探和大型击实试验结果的对比分析可知,动力触探锤击数随含水率的增加而减小,与压实度的关系亦受到含水率的控制。在实际施工过程中,动力触探试验可以测试路基填土的含水率和压实度,并且可以较好地控制路基土样处于最佳含水率范围。

(2)通过路基沉降监测和数值计算分析可知,由现场试验得到的 40 cm 左右的泥质软岩土石弃渣路基松铺厚度,填料粒径不大于 260 mm,在现有施工机械条件下 8 遍碾压的路基填筑工艺是合理的。

(3)基于室内动力触探和大型击实试验结果,通过现场在不同施工阶段对路基压实度传统检测方法和动力触探方法结果的对比,采用线性回归方法对试验数据进行统计分析,提出了适用于泥质软岩土石弃渣填筑路基的快速质量检测方法及标准。

(4)本文针对泥质软岩土石混合料弃渣填筑路基的施工工艺和快速检测方法开展研究,研究结果表明提出的快速检测方法是有效的,今后可以开展其他粗粒料在不同含水率和不同压实度条件下的动力触探试验,建立相应的关系,使本检测方法得到推广。

参考文献:

References:

- [1] 周翠英,邓毅梅,谭祥韶,等. 饱水软岩力学性质软化的试验研究与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(1): 33-38.
ZHOU Cui-ying, DENG Yi-mei, TAN Xiang-shao, et al. Experimental research on the softening of mechanical properties of saturated soft rocks and application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(1): 33-38. (in Chinese)
- [2] 刘长武,陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 28-31.
LIU Chang-wu, LU Shi-liang. Research on mechanism of mudstone degradation and softening in water[J]. Rock and Soil Mechanics, 2000, 21(1): 28-31. (in Chinese)
- [3] 杨超,崔新明,徐水平. 软岩应变软化数值模型的建立与研究[J]. 岩土力学, 2002, 23(6): 695-697, 701.
YANG Chao, CUI Xin-ming, XU Shui-ping. Establishment and study of strain-softening numerical constitutive model for soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(6): 695-697, 701. (in Chinese)
- [4] 郝刚立,王维早. 泥岩含量对昔格达土路基强度指标的影响[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30(2): 53-57.
HAO Gang-li, WANG Wei-zao. Effect of content of mud rock on intensity index of Xigeda filling in road subgrade[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30(2): 53-57. (in Chinese)
- [5] 范秋雁,杨钦杰,朱真. 泥质软岩地基水平抗力系数研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增2): 137-142.
FAN Qiu-yan, YANG Qin-jie, ZHU Zhen. Study of foundation horizontal resistance coefficient for argillaceous soft rocks[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S2): 137-142. (in Chinese)
- [6] 王东耀,刘丽萍,叶万军. 山渣料路用性能试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2007, 27(1): 15-18.
WANG Dong-yao, LIU Li-ping, YE Wan-jun. Road performance experiment of rock slag mixture[J].

- Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2007, 27(1): 15-18. (in Chinese)
- [7] 曹豪荣, 李新明, 樊友杰, 等. 考虑干湿循环路径的石灰改性红黏土路用性能试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(9): 2619-2624.
- CAO Hao-rong, LI Xin-ming, FAN You-jie, et al. Experimental study of pavement performances of lime-treated laterite soil considering drying-wetting cycle paths[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(9): 2619-2624. (in Chinese)
- [8] 杨建林, 王来贵, 李喜林, 等. 遇水-风干循环作用下泥岩断裂的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(增2): 3606-3612.
- YANG Jian-lin, WANG Lai-gui, LI Xi-lin, et al. Research on micro-fracture mechanism of mudstone after wet-dry cycles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 3606-3612. (in Chinese)
- [9] 张莎莎, 杨晓华, 王明皎, 等. 泥质软岩石混合料弃渣路用性能研究[J]. 公路交通科技, 2015, 32(2): 55-59.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua, WANG Ming-jiao, et al. Study on road performance of argillaceous soft rock earth mixture spoil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2015, 32(2): 55-59. (in Chinese)
- [10] 张莎莎, 杨晓华. 粗粒盐渍土大型冻融循环剪切试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2012, 32(3): 11-16.
- ZHANG Sha-sha, YANG Xiao-hua. Large shear test on coarse saline soil with freeze-thaw cycle[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2012, 32(3): 11-16. (in Chinese)
- [11] 苑伟娜, 李 晓, 赫建明, 等. 土石混合体变形破坏结构效应的CT试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(增2): 3134-3140.
- YUAN Wei-na, LI Xiao, HE Jian-ming, et al. Structure effect study of deformation and failure of rock and soil aggregate with CT technique[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(S2): 3134-3140. (in Chinese)
- [12] 田恒蛟, 薛亚东. 路用土石混合料的剪切特性试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2014, 10(1): 30-35.
- TIAN Heng-jiao, XUE Ya-dong. Experimental research on shear behavior of soil-rock mixture for road construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014, 10(1): 30-35. (in Chinese)
- [13] 赵金凤, 严 颖, 季顺迎. 基于离散元模型的土石混合体直剪试验分析[J]. 固体力学学报, 2014, 35(2): 124-134.
- ZHAO Jin-feng, YAN Ying, JI Shun-ying. Analysis of direct shear test of soil-rock mixture based on discrete element model[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2014, 35(2): 124-134. (in Chinese)
- [14] 周军平, 汪 魁, 刘运来. 面波勘探方法在填方路基压实质量检测中的应用[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2013, 32(1): 50-53.
- ZHOU Jun-ping, WANG Kui, LIU Yun-lai. Application of surface wave exploration method in quality detection of filling embankment compaction[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University; Natural Science, 2013, 32(1): 50-53. (in Chinese)
- [15] 刘丽萍, 王东耀. 土石混合料压实质量控制方法[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2006, 26(1): 35-37, 48.
- LIU Li-ping, WANG Dong-yao. Compaction quality control methods of earth-rock mixture[J]. Journal of Chang'an University; Natural Science Edition, 2006, 26(1): 35-37, 48. (in Chinese)
- [16] 曹文贵, 罗 宏, 张峻崧, 等. 基于 Duncan-Chang 模型的静力贯入路基压实度确定方法[J]. 中国公路学报, 2013, 26(5): 1-8.
- CAO Wen-gui, LUO Hong, ZHANG Jun-song, et al. Determination method for subgrade compactness with static penetration based on Duncan-Chang constitutive model[J]. China Journal of Highway and Transport, 2013, 26(5): 1-8. (in Chinese)
- [17] 倪宏革, 李璞晟, 李桂花. 强夯法加固风化花岗岩高路堤现场试验检测[J]. 应用基础与工程科学学报, 2014, 22(1): 150-159.
- NI Hong-ge, LI Pu-sheng, LI Gui-hua. On testing high embankment with weathered granite fills treated by dynamic compaction[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2014, 22(1): 150-159. (in Chinese)
- [18] 张志耕, 闫澍旺, 崔 澂. 瑞雷面波法在路基质量检测中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2006(5): 117-119.
- ZHANG Zhi-geng, YAN Shu-wang, CUI Wei. Application of Rayleigh wave method in inspection of road-bed disease[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006(5): 117-119. (in Chinese)
- [19] 汤连生, 徐 通, 林沛元, 等. 交通荷载下层状道路系统动应力特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增2): 3876-3884.
- TANG Lian-sheng, XU Tong, LIN Pei-yuan, et al. Studies on dynamic stress characters of layered road system under traffic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3876-3884. (in Chinese)
- [20] 唐朝生, 刘义怀, 施 斌, 等. 新老路基拼接中差异沉降的数值模拟[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 13-17.
- TANG Chao-sheng, LIU Yi-huai, SHI Bin, et al. Numerical simulation on differential settlement of jointing of new and old roadbed[J]. China Journal of Highway and Transport, 2007, 20(2): 13-17. (in Chinese)