

全风化软岩填料级配对压实与破碎特性的影响

张荣¹, 郭志玉¹, 郑博文¹, 南凯¹, 王俊杰², 李莎²

1. 中铁十二局集团第四工程有限公司, 陕西 西安 710000;

2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074

摘要:为研究颗粒级配对全风化软岩填料的压实特性及破碎特性的影响,对不同级配的全风化软岩进行击实、筛分及承载比试验。结果表明:全风化软岩最大干密度为 $1.86\sim 2.05\text{ g/cm}^3$,最佳含水率为 $9.50\%\sim 11.23\%$ 。最大干密度随粗颗粒质量分数的增大而增大,随有效粒径和限制粒径的增大而增大,随不均匀系数的增大而增大,随曲率系数的增大先减小后增大;最佳含水率随粗颗粒质量分数的增大而减小,随有效粒径和限制粒径的增大而减小,随不均匀系数的增大而减小,随曲率系数的增大先增大后减小;4种级配的全风化软岩填料击实后的平均破碎率为 $0\sim 30\%$,击实后级配曲线均向上限偏移,含水率对填料破碎率的影响较小,且粗颗粒质量分数越小破碎率越小;不同级配的加州承载比(california bearing ratio, CBR)为 $2.90\sim 12.36$,填料在压实过程中存在一定破碎,但含石量较大的土体仍能满足路堤填料填筑要求。在路堤填筑过程中提高含石量能取得较好的压实效果,可提高路堤承载比。

关键词:颗粒级配;压实特性;破碎特性;CBR;全风化软岩

中图分类号:U416.1⁺2

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)02-0081-08

引用格式:张荣,郭志玉,郑博文,等.全风化软岩填料级配对压实与破碎特性的影响[J].山东交通学院学报,2023,31(2):81-88.

ZHANG Rong, GUO Zhiyu, ZHENG Bowen, et al. Effect of packing stages on compaction and crushing characteristics of fully weathered argillaceous sandstone[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023, 31(2):81-88.

0 引言

随着我国社会经济的不断发展与进步,高速公路等交通基础设施的设计和建造已经向西部山区转移,高速公路沿线地形已从平原微丘区转向山岭重丘区。德遂高速 TJ4 标段沿线山区地质条件复杂,路基填筑就地取材,该路基填料主要为软岩和粉砂岩,风化程度较高,力学强度较低,抗变形能力较差^[1],给路基施工带来一定困难。含石率对路堤压实质量的影响较大,因此为了获得较好的压实效果,有必要研究级配对软岩填料压实质量的影响^[2],为实际工程应用提供可靠数据,

郑明新等^[3]、王合春^[4]、方焘等^[5]、刘新喜等^[6]在分析风化软岩基本矿物成分、耐崩解性的基础上,结合风化岩块力学强度和击实试验结果,初步判定软岩填筑路基的可行性。但汉成等^[7]、康景文等^[8]、傅毅静等^[9]研究风化软岩路基的工程特性,发现其抗剪强度较高,回弹模量满足路基强度和刚度的要求,可通过增大粗颗粒质量分数提高风化软岩路基强度。刘振宇等^[10]研究风化程度和含水率对风化红层砂岩力学特性的影响,发现填料的母岩特性、含水率、级配组成、击实功等影响路基填料压实质量。高成雷等^[11]进行不同颗粒级配无黏性土的表面振动压实试验,阐明颗粒级配对无黏性土的压实机制为不同颗粒的互相填充效应、大颗粒的悬浮效应和小颗粒的虚填效应。Wang 等^[12]通过室内击实试验研究不同击

收稿日期:2021-09-28

基金项目:水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金资助项目(LSDP202101)

第一作者简介:张荣(1986—),男,甘肃天水人,工程师,主要研究方向为公路设计和施工,E-mail:1510507552@qq.com。

实条件下砂岩、泥岩颗粒的压实特性。余明东等^[13]分析影响昔格达混合填料压实特性的因素,并推断泥岩对其压实特性的影响主要由泥岩颗粒的粒径和含水率决定。鞠兴华等^[14]通过室内和现场试验等方法研究泥质软岩填料工程特性,结果表明水和击实功对填料级配变化影响较大。杜俊等^[15]、陶庆东等^[16]、周荣等^[17]、戴仁辉等^[18]研究土石混合体路基填料分形特性和压实破碎特征,认为破碎率对含水率与含石量变化较敏感。徐俊等^[19]、蒲阳等^[20]、马捷等^[21]、李永奎等^[22]研究不同粗颗粒质量分数的砂泥岩填料的力学性能。

不同风化程度及工程水文地质条件下全风化软岩的性能差异较大。本文对某高速公路沿线全风化软岩填料进行室内试验,研究不同级配对压实特性和破碎特性的影响,并进行承载比试验,判断是否适用于路堤填料,为路堤填筑施工提供理论和实践依据。

1 试验方案

1.1 试验材料及仪器

试验土料来自德遂高速 TJ4 标段,所取全风化软岩均为爆破后所留,呈暗红色,与土壤颜色相似,含有泥质胶结物,磨圆度较高,形状呈长扁球体。其液限约为 30%,塑限约为 16%。用振筛机筛分土样,将土料依次通过孔径不同的筛孔,筛分后的土样如图 1 所示。

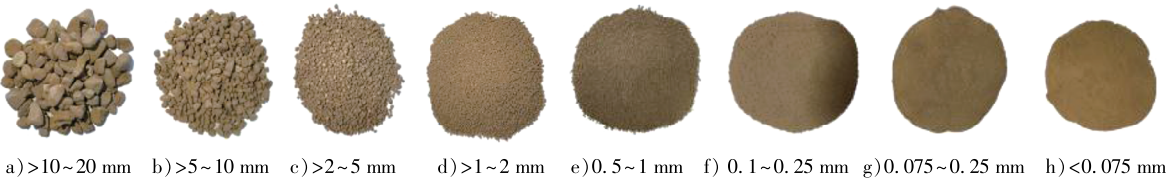


图 1 筛分后的试验土料粒径

试验所用仪器为电动击实仪和电动脱模仪。选用的小击实筒内径为 10 cm,高 12.7 cm,体积为 997 cm³。落锤直径为 5 cm,质量为 4.5 kg。

1.2 试验方案

为研究级配对压实特性的影响,从现场运土至实验室,测得全风化软岩原始级配,采用 4 组设计级配配制试样,4 种级配曲线如图 2 所示。由图 2 可知:级配 1、2 曲线平缓,表明级配良好,级配 3、4 曲线陡峭,表明级配不良。

根据图 2 数据计算得到试验参数如表 1 所示,其中级配 3 为原始级配。试样在击实过程中存在颗粒破碎,对路堤填筑造成一定影响,需研究全风化软岩的加州承载比 (california bearing ratio, CBR) E_{CBR} ,测定是否满足高速公路路堤填筑要求。若满足不均匀系数 $C_u > 5$,同时曲率系数 C_c 需满足 $1 < C_c < 3$,则为级配良好,否则为级配不良。

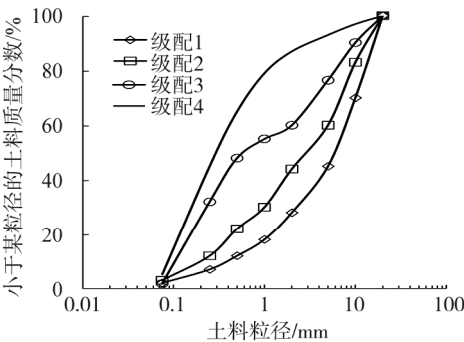


图 2 4 种级配对应试验曲线

表 1 试验级配曲线参数

级配	$w_5/\%$	C_u	C_c	d_{60}/mm	d_{50}/mm	d_{30}/mm	d_{10}/mm	级配评价
1	55	20.00	1.38	8.0	6.00	2.10	0.40	良好
2	40	25.00	1.00	5.0	3.00	1.00	0.20	良好
3	24	20.00	0.22	2.0	0.56	0.21	0.10	不良
4	7	4.44	0.71	0.4	0.30	0.16	0.09	不良

注: w_5 为粒径大于 5 mm 的土体颗粒质量分数;有效粒径为粒径分布曲线上小于该粒径的土质量占总土质量 10% 的粒径, d_{10} 、 d_{30} 、 d_{50} 为有效粒径, d_{60} 为限制粒径。

1.3 试验过程

根据文献[23]要求进行击实试验。按照每种级配不同的粒组质量分数和预估含水率制备试样,分别有4组不同级配与5种不同含水率。采用电动脱模仪得到完整试样,在试样中心取具代表性的土样,烘干后测定其含水率,得到干密度

$$\rho_d = \rho / (1 + w),$$

式中: ρ 为湿密度; w 为含水率, $w = (m - m_d) / m_d \times 100\%$,其中 m 为湿土质量, m_d 为干土质量。

将击实土样打散、烘干后,采用振筛机进行筛析,震摇时间为15 min。将土料依次通过直径为20、10、5、2、1、0.5、0.25、0.075 mm 的筛孔,称量各筛网上的土样质量,并按照级配曲线制备土样。

根据击实试验测得最大干密度,进行压实度为93%土样的CBR试验,测定不同粗颗粒质量分数土样的承载比是否满足文献[24]要求。将试样浸水4 d,采用万能试验仪进行贯入试验,并按照文献[24]计算CBR,测定填料是否满足要求。

2 压实特性

不同级配对应不同的特征粒径、粗颗粒质量分数、 C_u 、 C_c 等特征参数,压实质量表现为试样的最佳含水率和最大干密度。因此全风化软岩级配对压实特性的影响表现为级配各种特征参数对试样的最佳含水率和最大干密度的影响。

2.1 不同级配的击实曲线

通过击实试验获得4种不同级配下击实后的干密度和含水率关系曲线,如图3所示。由图3可知:试样的干密度随含水率的增大而先增大后减小。取曲线峰值干密度为最大干密度,对应的含水率为最佳含水率,得到4种级配的全风化软岩最大干密度为1.86~2.05 g/cm³,最佳含水率为9.50%~11.23%。

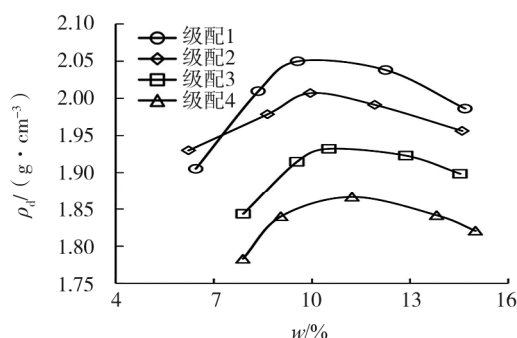


图3 不同级配下的击实曲线

2.2 级配特征粒径

4种级配特征粒径对全风化软岩压实特性的影响如图4、5所示。由图4、5可知:随 d_{50} 、 d_{60} 特征粒径的增大,全风化软岩的最大干密度随之增大,最佳含水率随之减小。对于软岩填料其特征粒径越大,则其最大干密度越大,最佳含水率越小。

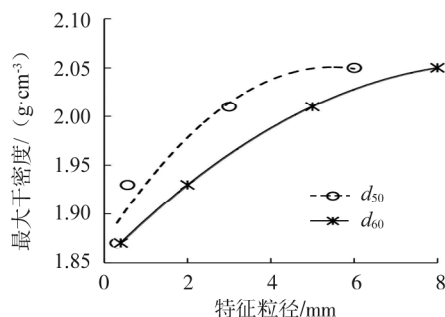


图4 特征粒径与最大干密度的关系

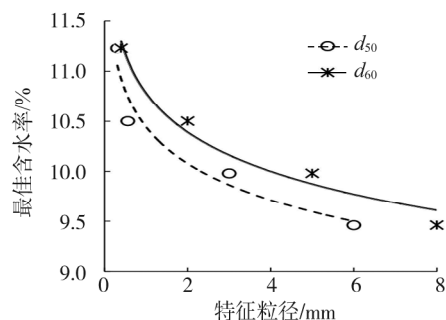


图5 特征粒径与最佳含水率的关系

2.3 质量分数

w_s 对全风化软岩压实特性的影响如图6所示。

由图6可知:最大干密度随 w_s 的增大而增大,最佳含水率随 w_s 的增大而减小。土体中土颗粒起骨架作用,其中粗颗粒发挥控制作用。在全风化软岩中,粗颗粒搭建土体的框架,细颗粒填充粗颗粒间的间隙,水分子除填充间隙外,还充当土体颗粒间的黏合剂。

土体中粗颗粒质量分数较高时,细颗粒填充粗颗粒间的间隙,粗颗粒增多使土体中应力集中现象较明显。土料主要由粗颗粒结构承受击实压力,全风化软岩在填料击实过程中存在颗粒破碎现象,部分粗颗粒变为细颗粒,填充颗粒间隙,土体更密实,单位体积容纳更多土颗粒,土体最大干密度增大。随细颗粒质量分数的增大,单位体积内土体颗粒的比表面积增大,水与土体颗粒间的接触更充分,土颗粒对水的吸附能力提升,最佳含水率增大。

2.4 不均匀系数、曲率系数的影响

C_u 、 C_c 对全风化软岩压实特性的影响如图 7、8 所示。

由图 7、8 可知:最大干密度随 C_u 的增大而增大,随 C_c 的增大而先减小后增大。最佳含水率随 C_u 的增大而减小,随 C_c 的增大先增大后减小。总体来说,级配良好的全风化软岩试样压实效果优于级配不良的试样。不均匀程度越高,颗粒粒径越连续,则土体颗粒粒径互相填充程度越高,压实效果越好。

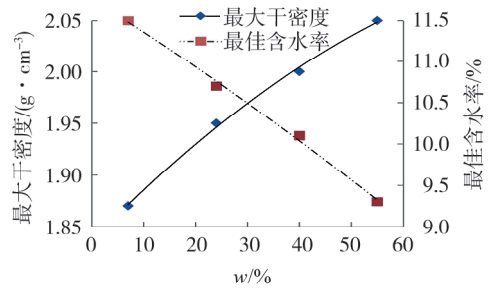


图 6 w_s 与最大干密度、最佳含水率的关系

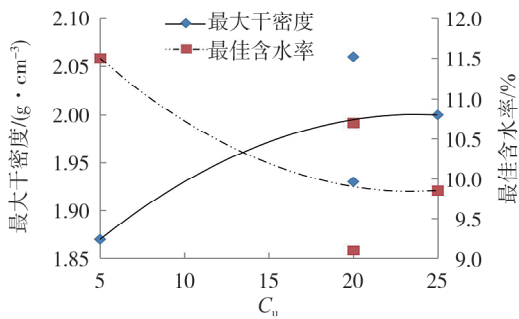


图 7 C_u 与最大干密度、最佳含水率的关系

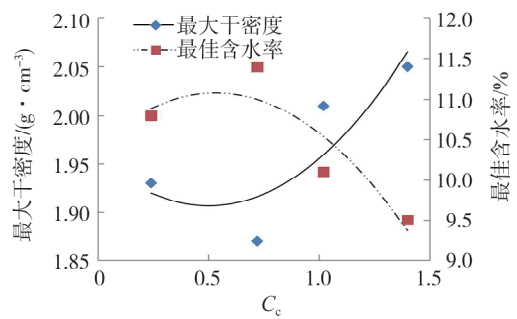


图 8 C_c 与最大干密度、最佳含水率的关系

3 破碎特性

通过筛分试验,测得不同级配的全风化软岩在不同含水率下击实后的级配变化,如图 9 所示。

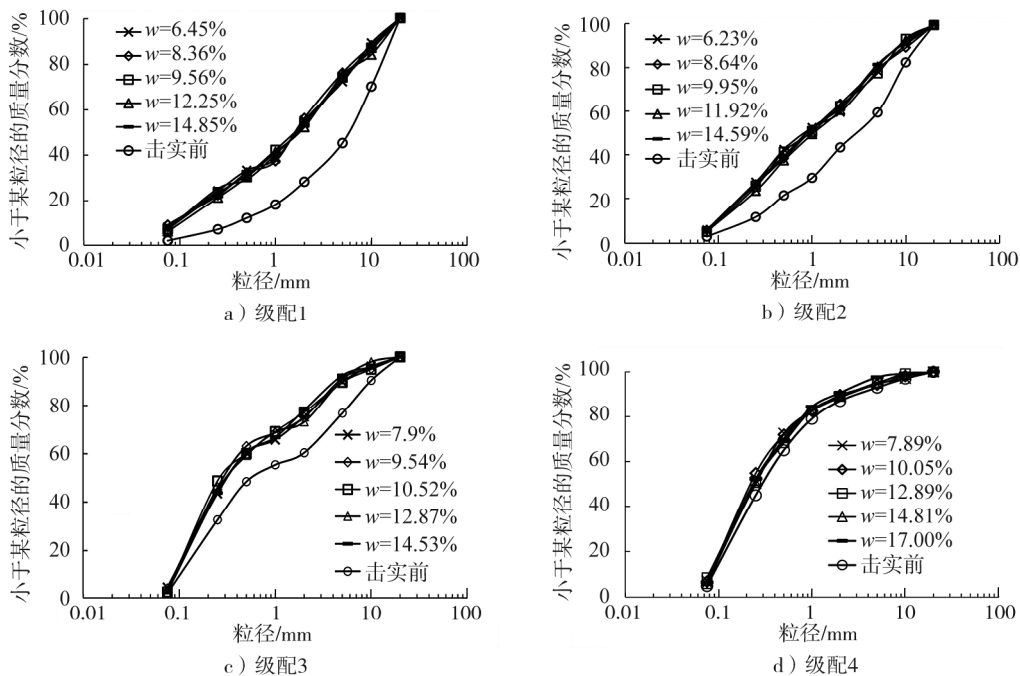


图 9 击实前、后不同级配的全风化软岩的级配变化

由图 9 可知:击实后的级配曲线明显向上限偏移,说明全风化软岩在击实过程中存在颗粒破碎现象,不同含水率的土样压实后的级配曲线分布大致相同,说明含水率对颗粒破碎的影响程度较小。粗颗粒的质量分数越大,向上偏移的幅度越大,说明粗颗粒质量分数越大,就有越多的粗颗粒破碎为细颗粒填充粗颗粒间的间隙。

击实前、后 ω_s 质量分数对比如表 2 所示。由表 2 可知:击实对全风化软岩填料级配的影响较大,与击实前相比,击实后粗颗粒的质量分数明显减小,其中级配 1 粗颗粒质量分数变化最大,级配 4 粗颗粒质量分数变化最小。这是因为粗颗粒质量分数较小时,粗颗粒悬浮在细颗粒中,最不易发生破碎。粗颗粒质量分数较大时,细颗粒填充在粗颗粒孔隙间,应力集中现象较明显,最易发生破碎。

破碎率 B_g 表征相应压力下颗粒破碎的程度, B_g 的下限为 0,上限理论值为 100%。根据 Marsal 颗粒破碎率公式^[25],定义为试验前、后颗粒各级粒组质量分数之差 ΔW_k 的绝对值之和,计算公式为:

$$B_g = \sum |\Delta W_k|,$$
$$\Delta W_k = W_{ki} - W_{kf},$$

式中: W_{ki} 、 W_{kf} 分别为试验前、后级配曲线上某级粒组的质量分数。

相同击实功下含水率对颗粒破碎情况影响较小,相对破碎率差异较小。采用平均相对破碎率表示不同级配对全风化软岩破碎情况的影响。全风化软岩土样的平均相对破碎率随级配的变化如图 10 所示。

由图 10 可知:平均相对破碎率为 7%~30%,且破碎率随粗颗粒质量分数的增大呈非线性增长。全风化软岩填料风化程度较大,颗粒内部孔隙率较大,抗变形性能较差,击实后的相对平均破碎率较高。粗颗粒质量分数越大,应力集中现象越明显,有越多的粗颗粒破碎为细颗粒,破碎率越大。随土体颗粒逐渐趋于均匀,应力集中现象逐渐减弱,随击实功的增大,单位击实功引起的平均相对破碎率逐渐减小。

4 CBR 试验

通过贯入试验得到土样的荷载-位移曲线,如图 11 所示。由图 11 可知:试样的荷载-位移曲线呈上凸状,在贯入初始阶段,土体产生弹性变形,曲线斜率较小;随贯入量的增大,土体产生局部剪切破坏,相同的贯入量只需增大较小的压力,因此斜率变大;同时粗颗粒质量分数越大的土样在相同贯入量下需较大压力。

全风化软岩填料不同级配土体 E_{CBR} 如表 3 所示。贯入量分别为 2.5、5.0 mm 时, E_{CBR} 取 $E_{CBR2.5}$ 和 $E_{CBR5.0}$ 两者中较大值。

由表 3 可知:粗颗粒质量分数越大则 E_{CBR} 越大。根据文献[23]要求,压实度为 93%时, $E_{CBR} \geq 3$ 。级配 4 粗颗粒质量分数过小,不能用作路堤填料。虽然填料在

表 2 击实前、后的 w_s 单位:%

级配	击实前 w_s	击实后 w_s
1	55	25.87
2	40	19.53
3	24	9.38
4	7	4.89

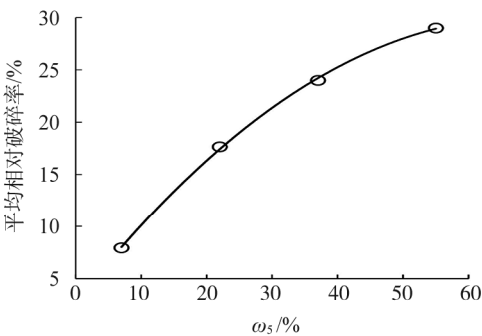


图 10 不同级配全风化软岩土样的平均相对破碎率

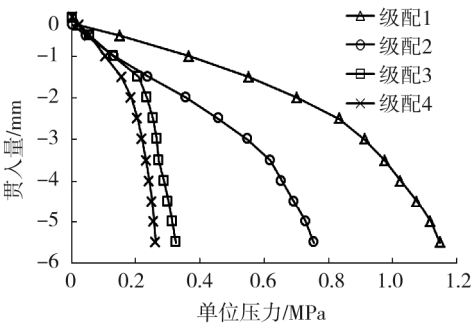


图 11 荷载-位移曲线

表 3 不同级配土体的 E_{CBR}

级配	$E_{CBR2.5}$	$E_{CBR5.0}$	E_{CBR}
1	12.36	10.66	12.36
2	6.54	6.95	6.95
3	3.63	2.99	3.63
4	2.90	2.44	2.90

压实过程中存在一定破碎,但含石率较高的土体仍满足路堤填筑要求。因此提高粗颗粒质量分数能提高路基强度,路基填筑时需控制粗颗粒质量分数不能过小。

5 结论

采用4种不同级配的全风化软岩试样进行击实试验,研究级配、特征粒径、粗颗粒质量分数、不均匀系数、曲率系数等因素对最大干密度、最佳含水率及破碎率的影响。

1) 对不同级配的全风化软岩进行压实试验,得到的最大干密度为 $1.86\sim 2.05\text{ g/cm}^3$ 。最大干密度一般随有效粒径和限制粒径的增大而增大,随粗颗粒质量分数的增大而增大,随不均匀系数的增大而增大,随曲率系数的增大而先减小后增大。

2) 不同级配的全风化软岩进行压实试验,最佳含水率为 $9.50\%\sim 11.23\%$ 。最佳含水率一般随特征粒径 d_{50} 、 d_{60} 的增大而减小,随粗颗粒质量分数的增大而减小,随不均匀系数的增大而减小,随曲率系数的增大而先增大后减小。

3) 不同级配下全风化软岩的平均相对破碎率为 $0\sim 30\%$,含水率对全风化软岩击实后破碎率的影响较小,粗颗粒质量分数越小的土体破碎率越小。击实后级配曲线向上限偏移,且粗颗粒质量分数越多,偏移幅度越大。随粗颗粒质量分数的增大,单位击实功引起的平均破碎率减小。

4) 不同级配下全风化软岩的加州承载比为 $2.90\sim 12.36$,且随粗颗粒质量分数的增大而变大,但含石率较小的土样承载比过低,不符合路堤填料要求,提高含石率可提高路堤的承载比。

参考文献:

- [1] 何满潮,陈新,周永发,等. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [2] 罗强,方东,詹学启,等. 蒙华铁路路基全风化软质岩填料碾压工艺试验[J]. 铁路工程学报, 2018(9): 9-13.
LUO Qiang, FANG Dong, ZHAN Xueqi, et al. Compaction technology test of full weathering soft rock subgrade filling for Mengxi-Central China Railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018(9): 9-13.
- [3] 郑明新,方焘,刁心宏,等. 风化软岩填筑路基可行性室内试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 53-56.
ZHENG Mingxin, FANG Tao, DIAO Xinhong, et al. Experimental study on feasibility of filled subgrade with weathered soft rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(Suppl. 1): 53-56.
- [4] 王合春. 强风化软岩路基填料水洗筛分法的试验探讨[J]. 铁道建筑技术, 2014(1): 83-85.
WANG Hechun. Test on the wet screening method for subgrade fillings of strong weathered soft rock [J]. Railway Construction Technology, 2014(1): 83-85.
- [5] 方焘,郑明新,郭建湖. 软岩填筑路基的压实特性研究[J]. 路基工程, 2006(1): 52-55.
- [6] 刘新喜,夏元友,刘祖德,等. 强风化软岩路基填筑适宜性研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 903-907.
ZHENG Xinxi, XIA Yuanyou, LIU Zude, et al. Study on suitability for embankment of highly weathered soft rock subgrade [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(6): 903-907.
- [7] 但汉成,李亮,胡萍,等. 风化软岩路基填料击实工程特性室内试验研究[J]. 铁道学报, 2009, 31(4): 75-81.
DAN Hancheng, LI Liang, HU Ping, et al. Interior experimental study on compaction engineering characteristics of weathered-soft-rock subgrade filling materials[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(4): 75-81.
- [8] 康景文,田强,颜光辉,等. 成都地区泥质软岩地基主要工程特性及利用研究[J]. 工程勘察, 2015(7): 1-10.
KANG Jinwen, TIAN Qiang, YAN Guanghui, et al. Study on engineering characteristics and utilization of soft rock ground in Chengdu Area[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2015(7): 1-10.
- [9] 傅毅静,张强. 风化软岩路堤填筑与填料改良试验研究[J]. 路基工程, 2013(1): 88-91.
FU Yijing, ZHANG Qiang. Experimental study on embankment filling and improvement of filling material with weathered soft rock[J]. Subgrade Engineering, 2013(1): 88-91.
- [10] 刘振宇,冯文凯,谢吉尊,等. 某机场红层强-全风化砂岩的力学特性大型原位试验研究[J]. 路基工程, 2017(1): 102-106.

- LIU Zhengyu, FENG Wenkai, XIE Jizun, et al. Study on large-scale in-situ test of mechanical properties of strong and whole-weathered sandstone in red rock of an airport[J]. Subgrade Engineering, 2017(1): 102-106.
- [11] 高成雷,严战友,李建军,等. 颗粒级配对无黏性土压实性的影响分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2016, 40(2): 227-232.
- GAO Chenglei, YAN Zhanyou, LI Jiangjun, et al. Effect of grain size distribution on compaction property of cohesionless soil[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Transportation Science & Engineering), 2016, 40(2): 227-232.
- [12] WANG Junjie, ZHANG Huiping, DENG Diping. Effects of compaction effort on compaction behavior and particle crushing of a crushed sandstone-mudstone particle mixture[J]. Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2014, 51(2): 67-71.
- [13] 余明东. 泥岩质量分数对昔格达填料路用性质的影响研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(2): 317-321.
- YU Mingdong. Effect of content of mud rock on road application properties of Xigeda soil mixed filling[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(2): 317-321.
- [14] 鞠兴华,杨晓华,张莎莎. 泥质软岩弃渣路基填料工程特性研究[J]. 水利水电技术, 2020, 51(10): 188-194.
- JU Xinghua, YANG Xiaohua, ZHANG Shasha. Engineering characteristics of soft argillaceous rock waste as subgrade filler[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(10): 188-194.
- [15] 杜俊,侯克鹏,梁维,等. 粗粒土压实特性及颗粒破碎分形特征试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊1): 155-161.
- DU Jun, HOU Kepeng, LIANG Wei, et al. Experimental study of compaction characteristics and fractal feature in crushing of coarse-grained soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(Suppl. 1): 155-161.
- [16] 陶庆东,何兆益,贾颖. 土石混合体路基填料分形特性与压实破碎特性研究[J]. 中外公路, 2020, 40(2): 243-248.
- [17] 周荣,宋晓东. 粗粒填料土分形特征与可压实特性相关性研究[J]. 人民长江, 2014, 45(1): 91-93.
- ZHOU Rong, SONG Xiaodong. Study on relativity between fractal characteristics and compactibility of coarse-grained soil[J]. Yangtze River, 2014, 45(1): 91-93.
- [18] 戴仁辉,李明东,陈士军,等. 不同粒度粗粒的极限孔隙比和破碎特征[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(2): 427-431.
- DAI Renhui, LI Mingdong, CHEN Shijun, et al. Ultimate void ratios of coarse particles of different sizes and its particle breakage characteristics[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(2): 427-431.
- [19] 徐俊,韩文喜,吴亚东,等. 粗粒含量对砂泥岩类填料力学性质的影响研究[J]. 水力发电, 2020, 46(12): 117-123.
- XU Jun, HAN Wenxi, WU Yadong, et al. Effect of coarse grain content on the mechanical properties of sand and mudstone fillers[J]. Water Power, 2020, 46(12): 117-123.
- [20] 蒲阳,束冬林,王文炳,等. 公路路基软岩质粗颗粒填料级配及力学性能研究[J]. 路基工程, 2021(2): 76-81.
- PU Yang, SHU Donglin, WANG Wenbing, et al. Study on gradation and mechanical properties of soft rocky coarse grained filler for highway subgrade[J]. Subgrade Engineering, 2021(2): 76-81.
- [21] 马捷,韩文喜,刘忠璇,等. P_s 含量对粗颗粒土压缩性质影响研究[J]. 人民长江, 2019, 50(增刊2): 179-184.
- [22] 李永奎,马鹏. 粗颗粒含量对川西混合土抗剪强度的影响研究[J]. 路基工程, 2020(1): 67-70.
- LI Yongkui, MA Peng. Study on the effect of coarse particle content on shear strength of mixed soil in Western Sichuan[J]. Subgrade Engineering, 2020(1): 67-70.
- [23] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京:人民交通出版社, 2020.
- [24] 中交第二公路勘察设计研究院有限公司. 公路路基设计规范: JTG D30—2015[S]. 北京:人民交通出版社, 2015.
- [25] MARSAL R J. Mechanical properties of rockfill embankment dam engineering[M]. New York: Wiley, 1973: 109-200.

Effect of packing stages on compaction and crushing characteristics of fully weathered argillaceous sandstone

ZHANG Rong¹, GUO Zhiyu¹, ZHENG Bowen¹, NAN Kai¹, WANG Junjie², LI Sha²

1. China Railway 12 Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: In order to study the effect of particle size on the compaction and crushing characteristics of fully

weathered soft rock filler, compaction, screening and load-bearing ratio tests are carried out on fully weathered soft rock of different grades. The results show that the maximum dry density of fully weathered soft rock is $1.86\text{--}2.05\text{ g/cm}^3$, and the optimal water content is $9.5\%\text{--}11.23\%$. The maximum dry density increases with the increase of mass fraction of coarse particles, and increases with the increase of effective particle size limited particle size, and increases with the increase of non-uniformity coefficient, and first decreases and then increases with the increase of curvature coefficient. The optimal moisture content decreases with the increase of the mass fraction of coarse particles, decreases with the increase of the effective particle size and the limited particle size, decreases with the increase of the non-uniformity coefficient, and increases first and then decreases with the increase of the curvature coefficient. The average crushing rate of the four kinds of graded soft rock filler is $0\text{--}30\%$ after compaction, and the grading curves shift to the upper limit after compaction. The effect of water content on the crushing rate of the filler is small, and the smaller the mass fraction of coarse particles, the smaller the crushing rate. The California bearing ratio (CBR) of different grades is $2.90\text{--}12.36$. There is some crushing of the filling in the process of compaction, but the soil with large stone content can still meets the requirements of embankment filling. Improving the stone content in the process of embankment filling can achieve better compaction effect and improve the embankment bearing ratio.

Keywords: particle size distribution; compaction characteristics; crushing characteristics; CBR; fully weathered soft rock

(责任编辑:王惠)

(上接第 56 页)

reduction potential of provincial freight logistics from the year of 2019 to 2050 under baseline scenario and low-carbon scenario, then the carbon peak path scheme are put forward. The results show that the energy demand and CO_2 emission of provincial freight logistics may reach the peak around 2038 under the baseline scenario, and the peak time under the low-carbon scenario is expected in the year of 2034 and 2033 respectively. So trucking area has huge emission reduction tasks. Therefore, in highway logistics area, if possible, the alternatives of "trucking to railway" or "trucking to water" should be promoted urgently, the efficiency level of energy using by transportation vehicles should be improved constantly, the using ratios of new energy and clean energy should be raised, some supporting infrastructure of new and clean energies should be constructed, and the innovative using of low-carbon technologies in logistics should be accelerated in the coming decades.

Keywords: LEAP model; logistics; CO_2 emission peak path; low-carbon

(责任编辑:郭守真)

(上接第 80 页)

interlayer shear strength and shear fatigue tests are carried out by the shear apparatus and the influence of heated crushed stone seal on the interlayer shear fatigue performance of asphalt pavement is analyzed. The test results show that the shear strength, failure displacement and fatigue life of the heated composite specimen of the crushed stone seal increased by about 36% , 26% and 118% , respectively. The heated crushed stone seal is beneficial to improve the overall performance of the asphalt pavement interlayer and prolong the service life of the asphalt pavement. The shear fatigue life decreases sharply with the increase of the stress ratio and the overload of vehicles should be controlled during road operation.

Keywords: crushed stone seal; composite specimen; shear strength; shear life

(责任编辑:王惠)