

# 炭质页岩路基填料的路用性能研究

张孟金<sup>1</sup>, 黄亚飞<sup>2</sup>, 吴谦<sup>3\*</sup>, 毛雪松<sup>3</sup>, 张建勋<sup>3</sup>, 陈欣怡<sup>3</sup>, 王悦月<sup>3</sup>

(1. 中铁建云南投资有限公司, 云南 昆明 650000; 2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065;  
3. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

**摘要:** 炭质页岩用于路基填筑不仅能缓解炭质页岩分布区路基填料的供应难题, 也符合中国基础设施建设“资源集约、节约”和“绿色化”的战略要求。然而, 此类岩石性质软弱、易风化崩解、遇水强度衰减显著, 充分利用须建立在深入认知其性质的基础上。该文研究炭质页岩原岩的基本性质; 设计填料级配; 进行填料的击实特性及击实后颗粒破碎特征研究、干湿循环条件下的 $R_{CBR}$ (加州承载比)变化特征研究、干燥及浸水状态下填料的压缩性能及压缩后颗粒破碎特征研究以及浸水过程中路基回弹模量的现场测试。研究发现: 随风化程度增加, 原岩趋于黏土化, 微观结构变得疏松。填料颗粒越粗, 击实过程中越难调整自身位置来寻求稳定密实状态, 颗粒破碎越显著。遇水后填料表现出较强的软化、崩解特性: 初始 $R_{CBR}$ 为54%, 随干湿循环呈现先快后慢的减小趋势, 最终稳定在26%左右; 压缩试验中, 填料浸水后的湿化附加变形极为显著, 颗粒破碎率大幅增加, 最佳含水率状态下未发生破碎的粒组在浸水饱和后也发生了破碎; 未浸水路基的回弹模量为140.4 MPa, 浸水6 h后衰减至82.1 MPa, 之后随浸水时间延长回弹模量衰减不再明显。实际应用时建议优化填料级配、控制最大粒径, 采用能有效防水、控湿的路基结构, 并将炭质页岩填料用于地表水、地下水发育部位。

**关键词:** 炭质页岩; 路基填料; 路用性能; 浸水; 干湿循环; 颗粒破碎

中图分类号: U416.1+2

文献标志码: A

## Research on Road Performance of Carbonaceous Shale Subgrade Filler

ZHANG Mengjin<sup>1</sup>, HUANG Yafei<sup>2</sup>, WU Qian<sup>3\*</sup>, MAO Xuesong<sup>3</sup>,

ZHANG Jianxun<sup>3</sup>, CHEN Xinyi<sup>3</sup>, WANG Yueyue<sup>3</sup>

(1. China Railway Construction Yunnan Investment Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China; 2. CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China; 3. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China)

**Abstract:** The application of carbonaceous shale for subgrade filling not only alleviates the shortage of subgrade filler in carbonaceous shale distribution areas but also meets the strategic requirements of “resource conservation and saving” and “green development” for infrastructure construction in China. However, such rocks are weak and susceptible to weathering and disintegration, and they exhibit significant strength deterioration when exposed to water. To fully apply them, their performance must be comprehensively understood. In this paper, the basic properties of the carbonaceous shale were studied, and filler gradation was designed. The tests on compaction characteristics of the filler and particle crushing characteristics after compaction,  $R_{CBR}$  (California bearing ratio) variation characteristics under dry and wet cycle conditions, compression properties of the filler and particle crushing characteristics after compression under dry and wet conditions, as well as the rebound modulus of subgrade during water immersion were conducted. The results show that with an increasing degree of weathering, the original shale tends to become clayey, and the

收稿日期: 2023-01-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2021YFB2600103); 中交第一公路勘察设计研究院有限公司科创基金项目(编号: KCJJ2020-14)

作者简介: 张孟金, 男, 高级工程师. E-mail: 15142905@qq.com

\*通信作者: 吴谦, 男, 博士, 讲师. E-mail: 282497832@qq.com

microstructure becomes loose. In the compaction process, coarser filler particles mean that they are more difficult to adjust their position to achieve a stable dense state, and particle crushing is more significant. The filler shows strong softening and disintegration properties when exposed to water. The initial  $R_{\text{CBR}}$  of the filler is 54%, which exhibits a fast-to-slow decreasing trend under dry and wet cycles and finally stabilizes at about 26%. In the compression tests, additional deformation of the filler by wetting after water immersion is extremely significant, and the crushing particles increase greatly. Particle groups that do not crush at optimum water content also crush after saturation. The rebound modulus of the subgrade without water immersion is 140.4 MPa and declines to 82.1 MPa after 6 h of water immersion, after which the decay of the rebound modulus with increasing immersion time is not significant. For practical application, it is recommended to optimize the gradation of the filler, control the maximum particle size, and adopt subgrade structures that can effectively prevent water and control moisture. In addition, it is necessary to avoid using carbonaceous shale filler in positions with developed surface and ground water.

**Keywords:** carbonaceous shale; subgrade filler; road performance; water immersion; wet and dry cycle; particle crushing

## 0 引言

炭质页岩具有性质软弱、易风化、易崩解、遇水强度衰减大的突出特点。在中国云南、贵州、广西等地区广泛分布。炭质页岩分布区往往缺乏合适的路基填料,材料外运成本又过高,路基填料供应比较困难。另外,由于炭质页岩富含有机质炭和黄铁矿,岩体及其中孔隙水流常呈酸性<sup>[1]</sup>,将其堆积在沟谷弃渣场中对环境也极为不利,弃渣场及周边区域经常出现“寸草不生”的现象。鉴于上述背景,若能在充分认知炭质页岩性质的基础上,将其用于路基填筑,不仅能化解上述地区路基填料的供应难题,也符合中国基础设施建设“资源集约、节约”和“绿色化”的战略要求。

出于经济和环保考虑,国外对软岩填料的工程应用稍早,挪威、美国、英国、日本、土耳其等国家的一些公路、水坝选择采用软岩填料进行填筑,此类应用可追溯至20世纪60年代<sup>[2-4]</sup>。近二三十年,随着中国基础设施建设发展战略不断调整,软岩填料在高速公路<sup>[5-10]</sup>、高速铁路<sup>[11]</sup>及水坝<sup>[12-14]</sup>修筑中的应用也明显增多。炭质页岩用作填料方面,张静波等<sup>[15]</sup>对贵州地区炭质页岩填料进行研究,发现5次干湿循环后填料的承载比和回弹模量已基本稳定,满足炭质页岩下路堤填料强度要求;付泓锐<sup>[16]</sup>研究了密实度、含水率、颗粒级配的改变对炭质泥岩填料用于路堤结构物上的静止土压力大小的影响;付宏渊等<sup>[17]</sup>、曾铃等<sup>[18]</sup>、耿凡等<sup>[19]</sup>分析了水对炭质泥岩路堤稳定性的影响。

总的来看,炭质页岩填料路用性能研究还不多见。

鉴于此,本文以墨(江)—临(沧)高速沿线炭质页岩为研究对象,在原岩基本性质研究的基础上,基于现场料源的实际情况对炭质页岩填料的级配进行设计;借助室内外试验进行以下研究:①填料的击实特性及击实后颗粒破碎特征;②干湿循环条件下填料 $R_{\text{CBR}}$ 的变化特征;③干燥及浸水状态下填料的压缩性能及压缩后颗粒破碎特征;④浸水过程中路基回弹模量的现场测试。最后,结合研究结果,给出了炭质页岩填料的应用建议。本文研究对炭质页岩弃方的再利用具有一定理论支撑作用及实际借鉴意义。

## 1 材料及试验方法

### 1.1 炭质页岩原岩的基本性质

试验材料取自云南镇沅境内墨(江)—临(沧)高速沿线某料场。此处炭质页岩呈典型(灰)黑色,在区域强辐射作用下,干燥部位的炭质页岩在温差风化的作用下容易沿页理发生劈裂,此时以机械破碎为主[图1(a)]。在富水、潮湿部位,炭质页岩的劣化过程中还加入了水分的化学作用,岩石黏土化现象显著[图1(b)]。对不饱和试样进行点荷载试验,间接测试其单轴饱和抗压强度,测试结果显示岩块的单轴饱和抗压强度为13.4~36.8 MPa。风化程度越高,强度越低。

#### 1.1.1 炭质页岩原岩的物质组成

炭质页岩风化程度由岩石结构、破碎程度等野

外特征综合确定,未风化岩石岩质新鲜,无疏松物质,构造层理清晰;随着风化的进行,岩石岩体结构被破坏[图1(c)],构造层理不清晰。本文采用X射线衍射法(XRD)对不同风化程度炭质页岩原岩的矿物成分进行测试,结果如图2所示。其中,C-1~C-4为图1(a)部位试样,C-5~C-8为图1(b)部位试样。可以看出:炭质页岩中原生矿物以石英、方解石、白云石、白云母、芒硝为主(图1中表层泛白的物质即为芒硝);黏土矿物以绿泥石、高岭石为主,随风化程度的升高,其含量有增加趋势。另外,由于炭质页岩取样的随机性和检测方法的局限性,有些成分在XRD测试中并未检出,可借助微观结构测试和能谱测试识别。

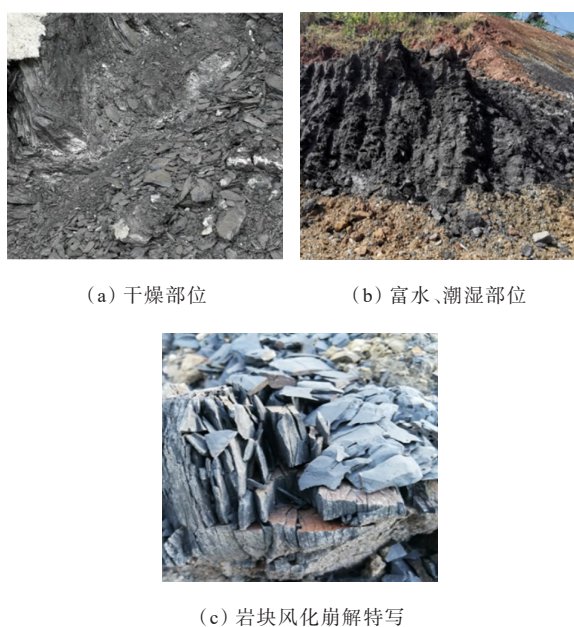


图1 炭质页岩原岩的崩解退化现象

Figure 1 Disintegration and degradation of carbonaceous shale

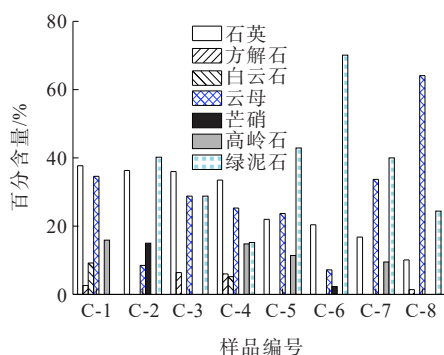


图2 炭质页岩原岩的矿物成分

Figure 2 Mineral composition of carbonaceous shale

### 1.1.2 炭质页岩原岩的微观结构

将炭质页岩原岩磨成粉末,采用扫描电子显微镜(SEM)对炭质页岩的微观结构进行测试,测试过程中借助能谱分析(EDS)测试了特征点位的元素组成,结果见图3。从微观结构可以看出:风化程度较低的原岩微观结构较密实,黏土矿物颗粒附着在骨架颗粒表面[图3(a)]。随着风化程度的增加,微观结构变得疏松,片状黏土矿物明显增加[图3(b)]。图中卷曲状片状矿物即为蒙脱石[图3(b)-1和图3(c)-1, Mnt],以较平直形态叠加在一起的矿物即为伊利石[图3(b)-1, Ill]。从矿物成分角度来看,微观结构与矿物成分测试结果能够较好吻合,同时,图3(a)-1和图3(b)-1中草莓状矿物即为炭质页岩中典型的黄铁矿(Py)。能谱分析中炭质页岩的化学成分主要为硅、铝、铁、钾、钙等,大都以氧化物的形式存在,与矿物成分吻合。

黏土矿物遇水膨胀、失水收缩,具有明显的胀缩性及强度减弱性。从原岩基本性质来看,风化程度较低的原岩中膨胀性黏土矿物并不多,所以在做好防水、控湿措施的前提下,炭质页岩作为填料具备一定物质成分上的可行性。

### 1.2 填料的级配设计

引入最大密实度理论中的N法<sup>[20]</sup>进行填料级配设计。计算公式如式(1)所示:

$$p_i = \left( d_i / d_{\max} \right)^n \quad (1)$$

式中: $p_i$ 为粒径小于 $d_i$ 的颗粒累积百分含量(%); $d_i$ 为颗粒粒径(mm); $d_{\max}$ 为材料最大粒径(mm); $n$ 为幂指数。

文献<sup>[21-22]</sup>显示: $n=0.3\sim0.7$ 时,填料具有较大的密实度、空隙率和路用性能。因此,本文进行级配设计时,考虑 $n=0.3$ 和 $n=0.7$ 两种情况。根据现场料源的情况,选择控制粒径0.075 mm、2 mm、5 mm、10 mm、20 mm、40 mm、60 mm。根据现场料源粒度组成的实际情况,同时考虑施工过程中填料掺配的便利性,最终确定如图4所示的设计级配曲线。该级配方案 $n=0.5$ ,不均匀系数 $C_u=68.6$ ,曲率系数 $C_c=2.98$ ,基本指标满足规范要求,级配良好,因此该级配方案是可行的。

### 1.3 试验方法

为了解设计级配下填料的路用性能,进行了图4



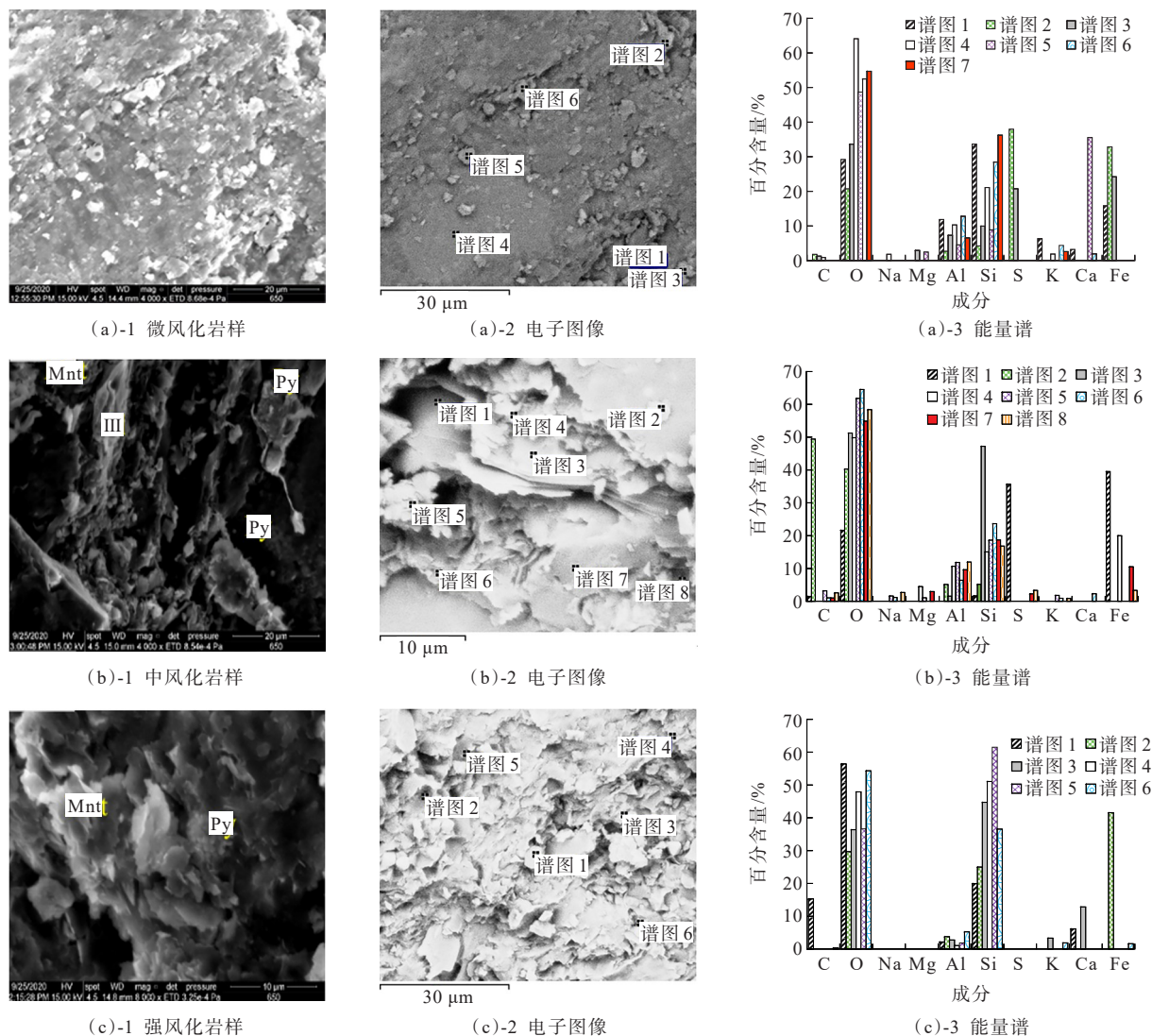


图3 不同风化程度炭质页岩微观结构及能谱测试结果

Figure 3 Microstructure and energy spectroscopy results of carbonaceous shale with different weathering degrees

设计级配下填料的击实特性及颗粒破碎特征研究；在此基础上,考虑浸水及干湿循环不利工况,进行了CBR、压缩性能及现场回弹模量测试3个方面的力学性能试验研究。

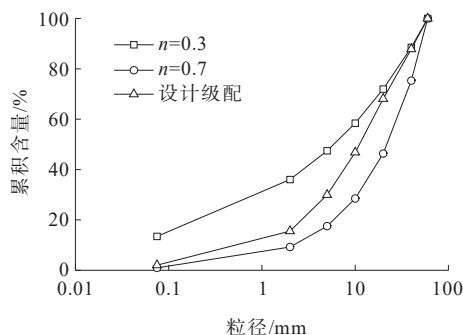


图4 填料的设计级配曲线

Figure 4 Design gradation curve for filler

### 1.3.1 击实及击实后颗粒破碎特征

采用振动击实法对填料进行击实试验。击实试验后,对最接近最优含水率的试样进行烘干、筛分,研究击实后颗粒的破碎情况。

### 1.3.2 干湿循环条件下填料的CBR变化特征

为研究炭质页岩路基填料的强度特性,本文进行干湿循环条件下填料的CBR试验,共进行了9组试验,分别对应0~8次干湿循环。每次干湿循环浸水1d,晾干4d(图5)。到达规定干湿循环次数后,按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行相应的CBR测试。

### 1.3.3 压缩及压缩后颗粒破碎特征

压缩性能研究借助ZJ30-2型直剪试验机的竖向压缩功能实现,试验装置如图6所示。试样的高度、

直径均为 300 mm。试验中制备最佳含水率和浸水饱和(4 d)两种状态下的试样,用于对比浸水前、后填料压缩性能的变化。试验过程中采用分级加载,荷载序列为 141.5 kPa、283.1 kPa、424.6 kPa、566.2 kPa。压缩试验后,对两种含水率的填料进行烘干和筛分,以研究压缩后填料颗粒的破碎情况。

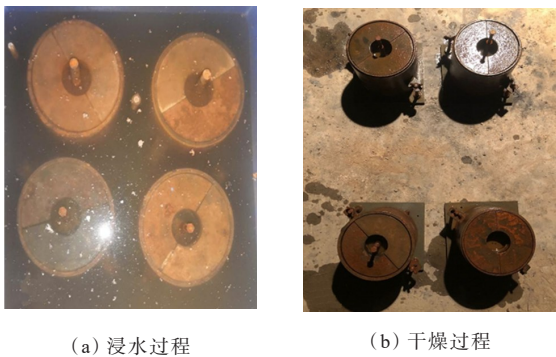


图 5 干湿循环过程  
Figure 5 Wet and dry cycle process



图 6 压缩试验装置  
Figure 6 Compression test device

1.3.4 浸水工况下填料的回弹模量测试

在对填料的性能有一定了解后,回弹模量测试借助现场 K30 平板载荷试验完成。现场待路基碾压完成后,在同一典型段落选择 12 个代表性点位进行浸水和不浸水工况下填料的回弹模量测试。测试前利用灌砂法对测试场地路堤填筑压实度进行检测,实测压实度为 96%。回弹模量测试方案如表 1 所示,现场测试工作如图 7 所示。

表 1 现场回弹模量测试方案

Table 1 Field rebound modulus test scheme	
测试工况	测试点数/个
不浸水	6
浸水 6 h	3
浸水 24 h	3



图 7 现场回弹模量测试图  
Figure 7 Field rebound modulus test

2 结果及分析

2.1 击实特性及击实后颗粒破碎特征

填料的击实曲线如图 8 所示。设计级配下,炭质页岩填料的最佳含水率为 4.21%,最大干密度为 2.14 g/cm<sup>3</sup>。图 9 为击实前后填料粒度组成的演化情况。可以看出:击实过程中填料的粒度成分呈现出“大颗粒减少,小颗粒增加”的典型变化特征。40~60 mm 颗粒含量减小幅度最大,减少了 4.75%;其次为 20~40 mm、10~20 mm 粒组,颗粒含量减小幅度分别为 1.49% 和 0.59%。小于 10 mm 各粒组的颗粒含量均有不同幅度的增加,越细的粒组在击实后的颗粒含量增加量越小。说明击实作用下大颗粒破碎明显,预崩解能减小填料最大粒径,所以充分预崩解对炭质页岩用作路基填料有益。

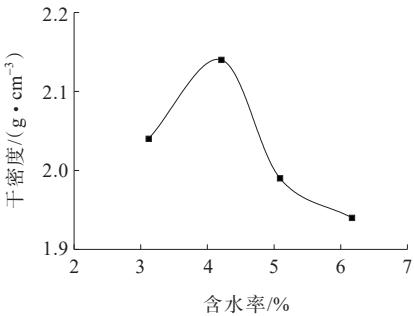


图 8 击实曲线  
Figure 8 Compaction curve

上述破碎结果的内在机制在于:击实过程中颗粒不断通过平动和转动的运动方式来寻求密实稳定

状态<sup>[23]</sup>。而颗粒粒径越大,越难以调整其位置,颗粒破碎就越显著。这也说明用炭质页岩一类软岩填料填筑路基时,为防止填料颗粒无法调整位置而出现破碎严重的现象,充分预崩解和对最大粒径的控制十分必要。

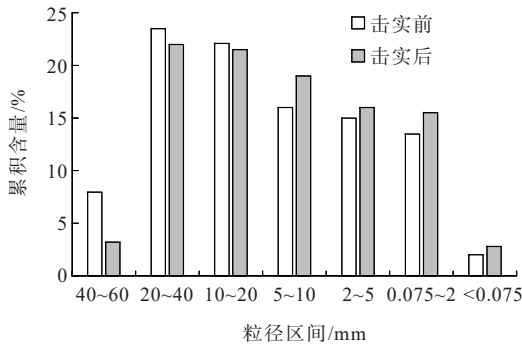


图9 击实前后填料的粒度成分演化结果

Figure 9 Variation of particle composition of filler before and after compaction

## 2.2 干湿循环条件下填料的 $R_{\text{CBR}}$ 变化特征

干湿循环条件下炭质页岩填料 $R_{\text{CBR}}$ (贯入量5 mm)的变化过程如图10所示。未经历干湿循环时,填料的 $R_{\text{CBR}}$ 为54%,承载力属于较高水平。不过可以发现,炭质页岩填料的 $R_{\text{CBR}}$ 受干湿循环影响较大。随着干湿循环次数的增加, $R_{\text{CBR}}$ 逐渐减小,当干湿循环次数达到4次时, $R_{\text{CBR}}$ 衰减到30%。之后,随着干湿循环次数的增加, $R_{\text{CBR}}$ 值降低速度开始减缓,数值稳定在26%左右。上述 $R_{\text{CBR}}$ 的衰减过程与文献[15]中炭质页岩填料 $R_{\text{CBR}}$ 的衰减过程类似。 $R_{\text{CBR}}$ 值逐渐趋于平稳,是由于填料颗粒崩解破碎随着干湿循环的增加逐渐趋于稳定;CBR试验后拆样发现,试样内部湿润,含水量大,具有明显的浸水软化特性,其强度明显减小。因此,炭质页岩作为路基填料时,须采取一定的防水措施。

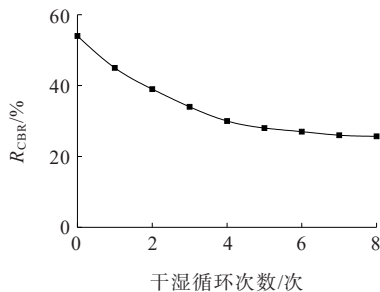


图10 干湿循环过程中填料 $R_{\text{CBR}}$ 的演化过程

Figure 10 Variation of  $R_{\text{CBR}}$  of filler during wet and dry cycle

## 2.3 压缩性能及压缩后颗粒破碎特征

填料的压缩变形量随时间的变化曲线如图11所示。相同荷载等级下,浸水饱和后填料的压缩量明显高于最佳含水率状态下填料的压缩量,湿化引起的附加变形极为显著。这是一部分填料颗粒遇水崩解后的结果。

压缩过程中填料颗粒的破碎行为与填料宏观压缩变形特性相对应(图12)。饱和状态下填料被软化产生较大压缩量的同时,在细观层面上颗粒也发生了较大幅度的破碎。两种含水率状态下,填料颗粒的破碎均遵循“大颗粒减小,小颗粒增加”“粒度成分趋于均匀化”的规律。不过在破碎行为上稍有不同:首先,最佳含水率状态下,压缩后破碎颗粒集中在20~60 mm粒径区间,而饱和状态下压缩过程中更细的10~20 mm粒组的颗粒也因强度不足发生了破碎;其次,从破碎量来看,饱水状态下填料颗粒的破碎量为最佳含水率状态的2倍以上。

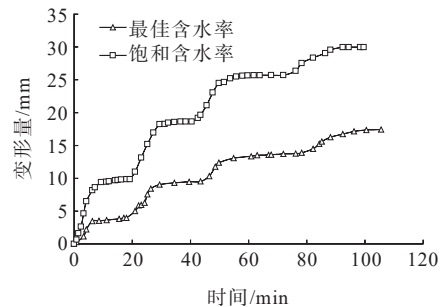


图11 压缩变形量-时间曲线

Figure 11 Compression deformation-time curves

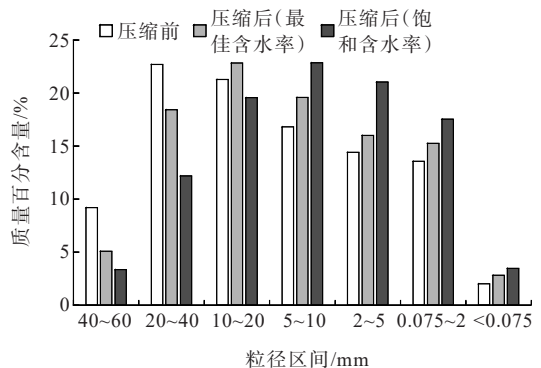


图12 压缩试验前后填料颗粒分布情况

Figure 12 Particle distribution of filler before and after compression test

## 2.4 浸水工况下现场回弹模量测试结果

不同浸水状态下填料的回弹模量测试结果如图



13所示。

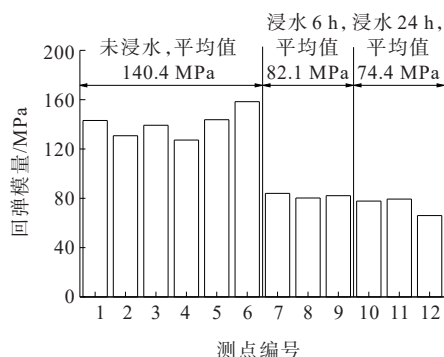


图13 不同浸水条件下路基的回弹模量

Figure 13 Rebound modulus of subgrade under different water immersion conditions

试验结果表明:炭质页岩填料路基在96%压实度条件下,路基浸水前回弹模量的平均值为140.4 MPa,这一数值略大于《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)附录B给出的砾类土标准状态下的回弹模量参考值(110~135 MPa),小于级配砾石的回弹模量参考值(150~300 MPa)。不过完全满足《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中各交通荷载等级对路基顶面回弹模量的要求。

在浸水6 h后,路基顶面的回弹模量降低至82.1 MPa。随着浸水持续,浸泡24 h后,路基回弹模量的平均值降为74.4 MPa。说明顶部浸水的条件下,炭质页岩路堤的回弹模量随浸水时间呈先快后慢减小的特征。这是因为回弹模量测试时浅表层土体中的附加应力最大,导致回弹变形主要来自模型的浅表层,浅表层土层的状态对路基回弹模量的影响自然就更大<sup>[24]</sup>。这就造成浸泡0~6 h后,回弹模量损失远大于浸泡6~24 h后的回弹模量损失。

此外,与干燥状态相比,浸水24 h后路基的回弹模量虽然有大幅度地下降,但此数值仍满足《公路沥青路面设计规范》(JTG D50—2017)中各交通荷载等级对路基顶面回弹模量的要求。

### 3 对炭质页岩填料性能的认知及应用建议

(1) 与已有文献中其他地区的炭质页岩、红砂岩、千枚岩、绢云母片岩、泥质页岩、风化板岩等软岩填料相比<sup>[25-29]</sup>,本文炭质页岩填料的力学性能要优于很多软岩填料,性能属于中等或中等偏上水平。

不过,其长期性能还需经过实际工程应用的检验。

(2) 荷载作用下炭质页岩填料容易发生破碎,水敏感性较强,在应用中需格外注意。不考虑改良时,建议通过选用合理的填料级配、控制最大粒径以降低荷载作用下颗粒的破碎。当然,合理的路基结构、完善的防排水措施也至关重要,比如将包边土、碎石夹层、土工布、土工格栅等进行优化组合,比选出具有防水、控湿及控沉的路基结构。

## 4 结论

本文在深入了解炭质页岩原岩基本性质的基础上,提出炭质页岩作为路基填料的设计级配,通过室内外试验对不利工况下炭质页岩填料的力学性能进行了研究,得到以下结论:

(1) 炭质页岩易崩解、易风化,从不同风化状态原岩的结构、成分来看,随风化程度的增加原岩会趋于黏土化,结构从整体密实结构向疏松絮状结构转变。

(2) N法级配下填料最大干密度为2.14 g/cm<sup>3</sup>。颗粒越粗,击实过程中其越难调整自身位置来寻求稳定的密实状态,颗粒破碎也就越显著。

(3) 浸水及干湿循环过程中炭质页岩填料表现出较强的软化特性。填料的初始 $R_{CBR}$ 值为54%,前4次干湿循环内衰减最快,之后衰减速度减缓并趋于稳定,最终稳定在26%左右;与最佳含水率状态相比,浸水条件下填料的湿化附加变形极为显著,颗粒破碎率大幅增加。压缩试验中,最佳含水率状态下未发生破碎的粒组在浸水饱和后也发生了破碎。96%压实度下,未浸水路基的回弹模量为140.4 MPa,浸水6 h后衰减至82.1 MPa,之后随浸水时间的延长回弹模量衰减并不显著。

(4) 与已有文献中的软岩填料对比,炭质页岩填料的性能属于中等或中等偏上水平。实际应用时,建议优化级配、控制最大粒径以提升填料的稳定性;在路基结构上,建议充分考虑能够防水、控湿及控沉的路基结构。另外,考虑炭质页岩遇水后存在显著的性能退化,避免将其用于地表水、地下水发育的部位。

### 参考文献:

### References:

- [1] PARVIAINEN A, LOUKOLA-RUSKEENIEMI K. Environmental impact of mineralised black shales[J].Earth

- Science Reviews,2019,192:65-90.
- [2] KANJI M A. Critical issues in soft rocks[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2014,6(3): 186-195.
- [3] BRYSON L S,GOMEZ-GUTIERREZ I C,HOPKINS T C. Development of a new durability index for compacted shale[J].Engineering Geology,2012,139/140:66-75.
- [4] BRYSON L S,KIRKENDOLL J S,MAHMOODABADI M.A new rapid method to assess the durability of shale[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(5): 4135-4150.
- [5] 张利涛,陈常明,黄亚飞,等. 炭质页岩高填路堤合理结构形式比选研究[J]. 中外公路,2021,41(S2):93-98.  
ZHANG Litao, CHEN Changming, HUANG Yafei, et al. Study on comparison and selection of reasonable structural forms of high-filled embankment with carbon shale[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41 (S2):93-98.
- [6] 谈云志,胡莫珍,周玮韬,等. 荷载-干湿循环共同作用下泥岩的压缩特性[J]. 岩土力学,2016,37(8):2165-2171.  
TAN Yunzhi, HU Mozhen, ZHOU Weitao, et al. Effects of drying-wetting cycle and loading on compressive property of mudstone[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(8): 2165-2171.
- [7] 杜秦文,刘永军,曹周阳. 变质软岩路堤填料湿化变形规律研究[J]. 岩土力学,2015,36(1):41-46.  
DU Qinwen, LIU Yongjun, CAO Zhouyang. Large-scale triaxial tests on metamorphic soft rock embankment filler for wetting deformation characteristics[J]. Rock and Soil Mechanics,2015,36(1):41-46.
- [8] 付宏渊,刘杰,曾铃,等. 考虑荷载及干湿循环作用的炭质泥岩崩解特征试验[J]. 中国公路学报,2019,32(9):22-31.  
FU Hongyuan, LIU Jie, ZENG Ling, et al. Disintegration characteristics of carbonaceous mudstone under loading and wet-dry cycles[J]. China Journal of Highway and Transport,2019,32(9):22-31.
- [9] LIU F F,MAO X S,FAN Y S,et al.Effects of initial particle gradation and rock content on crushing behaviors of weathered phyllite fills-a case of eastern Ankang section of Shiyan-Tianshui highway, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2020, 12(2): 269-278.
- [10] ZENG L, YU H C, LIU J, et al. Mechanical behaviour of disintegrated carbonaceous mudstone under stress and cyclic drying/wetting[J]. Construction and Building Materials,2021,282:122656.
- [11] ZHANG C L,JIANG G L,BUZZI O,et al.Full-scale model testing on the dynamic behaviour of weathered red mudstone subgrade under railway cyclic loading[J]. Soils and Foundations,2019,59(2):296-315.
- [12] ZHANG B Y,ZHANG J H,SUN G L. Deformation and shear strength of rockfill materials composed of soft siltstones subjected to stress, cyclical drying/wetting and temperature variations[J]. Engineering Geology, 2015, 190: 87-97.
- [13] ZHANG B Y,ZHANG J H,SUN G L. Particle breakage of argillaceous siltstone subjected to stresses and weathering [J].Engineering Geology,2012,137/138:21-28.
- [14] YIN Y, ZHANG B Y, ZHANG J H, et al. Effect of densification on shear strength behavior of argillaceous siltstone subjected to variations in weathering-related physical and mechanical conditions[J]. Engineering Geology,2016,208:63-68.
- [15] 张静波,吕岩松,王云. 贵州地区炭质页岩填料路用性能与路基结构设计研究[J]. 公路,2016,61(11):35-40.  
ZHANG Jingbo, LYU Yansong, WANG Yun. Research on performance and subgrade structure design of carbonaceous shale filler in Guizhou area[J]. Highway, 2016,61(11):35-40.
- [16] 付泓锐. 炭质泥岩填料静止侧压力系数试验研究[J]. 五邑大学学报(自然科学版),2017,31(3):67-72.  
FU Hongrui. An experimental study of static pressure coefficients of carbonaceous mudstone[J]. Journal of Wuyi University (Natural Science Edition),2017,31(3):67-72.
- [17] 付宏渊,邱祥,李光裕,等. 降雨入渗条件下炭质泥岩路堤动态稳定性[J]. 长安大学学报(自然科学版),2017,37(1): 33-42.  
FU Hongyuan, QIU Xiang, LI Guangyu, et al. Dynamic stability of carbonaceous mudstone embankment under rainfall infiltration[J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition),2017,37(1):33-42.
- [18] 曾铃,邱祥,付宏渊,等. 水位升降过程中崩解预处理炭质泥岩路堤稳定性分析[J]. 中国公路学报,2017,30(5): 10-19.  
ZENG Ling, QIU Xiang, FU Hongyuan, et al. Analysis of stability of carbonaceous mudstone embankment after disintegration pretreatment during process of water level fluctuation[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017,30(5):10-19.
- [19] 耿帆,刘杰. 荷载与干湿循环作用下预崩解炭质泥岩抗



- 剪强度及渗透特性[J].中外公路,2021,41(4):357-361.
- Geng Fan, Liu Jie. Shear strength and permeability characteristics of predisintegrated carbonaceous mudstone under load and dry-wet cycles[J]. Journal of China & Foreign Highway,2021,41(4):357-361.
- [20] 王立久,刘慧.矿料级配设计理论的研究现状与发展趋势[J].公路,2008,53(1):170-175.
- WANG Lijiu,LIU Hui.Current status and future trends of aggregate grading design theory[J]. Highway, 2008, 53(1): 170-175.
- [21] ZHAO Y L,XU T,HUANG X M,et al.Gradation design of the aggregate skeleton in asphalt mixture[J]. Journal of Testing and Evaluation,2012,40(7):20120142.
- [22] ŠERNAS O,ZOFKA A,VAITKUS A,et al.The effect of exposed aggregate concrete gradation on the texture characteristics and durability[J].Construction and Building Materials,2020,261:119921.
- [23] 王萌,肖源杰,王小明,等.道砟压实质量与颗粒运动关联特征及内在机制研究[J].铁道科学与工程学报,2021,18(8):2055-2065.
- WANG Meng, XIAO Yuanjie, WANG Xiaoming, et al. Investigating correlation characteristics and intrinsic mechanism between compaction quality and particle movement of railway ballasts[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2021,18(8):2055-2065.
- [24] WU Q,MAO X S,ZHAO Y,et al.Model experiments to study the hydrothermal variation and resilient modulus of soil subgrade subjected to freeze-thaw conditions[J].Case Studies in Construction Materials,2022,16:e01145.
- [25] 曾铃,肖柳意,刘杰,等.预崩解炭质泥岩路堤填料工程性能试验研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):73-81.
- ZENG Ling,XIAO Liuyi,LIU Jie,et al.Experiment study on road mechanical properties and permeability characteristics of pre-disintegration carbonaceous mudstone[J].Journal of Railway Science and Engineering, 2020,17(1):73-81.
- [26] 甘文宁,朱大勇,刘拴奇,等.皖南山区崩解性红砂岩路用性能研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2014,37(2):209-214.
- GAN Wenning, ZHU Dayong, LIU Shuanqi, et al. Road performance of disintegrated red sandstone in mountainous areas of southern Anhui[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2014, 37(2): 209-214.
- [27] 毛雪松,周雷刚,马磊,等.强风化千枚岩填筑路基改良技术研究[J].中国公路学报,2012,25(2):20-26.
- MAO Xuesong, ZHOU Leigang, MA Biao, et al. Research on improvement technology of filling subgrade with highly-weathered phyllite[J]. China Journal of Highway and Transport,2012,25(2):20-26.
- [28] 张莎莎,杨晓华,王明皎,等.泥质软岩土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 Shasha, YANG Xiaohua, WANG Mingjiao, 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.
- [29] 张静波,何斌,杨露,等.软岩路堤填料干湿循环大型压缩变形试验研究[J].公路,2017,62(10):46-50.
- ZHANG Jingbo, HE Bin, YANG Lu, et al. Test and study of large scale compression deformation test for soft rock filling under dry wet cycles[J]. Highway, 2017, 62(10): 46-50.