

南方湿热地区煤矸石-红黏土路基的 强度与变形特性

韦秉旭¹, 曾 警¹, 陈楚方²

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 长沙 410114; 2. 广西路建工程集团有限公司, 南宁 530029)

摘 要: 针对南方湿热地区煤矸石-红黏土路基稳定及耐久性服役问题, 本文通过击实试验、UCS 试验、CBR 试验及三轴试验等系列室内试验对煤矸石-红黏土混合料的强度与变形特性进行研究。结果表明: 混合料的最大干密度随黏土掺入量的增加呈先增大后减小的趋势, 最佳含水率随黏土掺入量的增加而逐渐增大; UCS 值和 CBR 值随黏土掺入量的增加呈先增大后减小的趋势, 且在黏土掺入量为 40% 时达到峰值; 永久变形值随黏土掺入量的增加先减小后增大, 随偏应力、加载次数、干湿循环次数的增加而增大, 随围压的增加而减小; 在此基础上, 建立综合考虑物理状态、应力状态、加载状态及环境状态影响的永久变形预估模型, 并进行验证。本文研究成果可为煤矸石-红黏土路基填筑施工提供有效参考。

关键词: 道路工程; 煤矸石-红黏土; 干湿循环; 耐久性服役; 预估模型

中图分类号: U414 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5497(2025)11-3632-09

DOI: 10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20240195

Strength and deformation characteristics of gangue-red clay subgrade in hot and humid areas in south China

WEI Bing-xu¹, ZENG Jing¹, CHEN Chu-fang²

(1. School of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Guangxi Road Construction Engineering Group Co., Ltd, Nanning 530029, China)

Abstract: In order to address the stability and durability issues of coal gangue-red clay subgrade in hot and humid areas of southern China, this study investigates the strength and deformation characteristics of a coal gangue-red clay mixture through a series of laboratory tests, including compaction, UCS, CBR, and triaxial tests. The results demonstrate that the maximum dry density initially increases and then decreases with increase of clay content, while the optimum moisture content gradually increases with higher clay content. The UCS value and CBR value exhibit an initial increase followed by a decrease as the clay content rises until reaching their peak at 40%. Permanent deformation initially decreases but then increases with increasing clay content. It also increases with higher deviator stress, loading cycles, and wet-dry cycles but decreases with increased confining pressure. Based on these findings, a comprehensive prediction model for permanent deformation is established considering physical state, stress state, loading state as well as environmental conditions. These research findings can provide valuable references for construction

收稿日期: 2024-02-28.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178413); 湖南省自然科学基金项目(2018JJ2431).

作者简介: 韦秉旭(1970-), 男, 教授, 博士. 研究方向: 特殊土路基. E-mail: 1548594769@qq.com

practices in filling coal gangue-red clay subgrade.

Key words: road engineering; coal gangue-red clay; dry and wet cycle; durable service; prediction model

0 引言

近年来,我国快速的工业化和城市化进程导致固体废弃物的大量产生^[1,2]。难以处置的巨量固废已严重影响我国经济的可持续发展,其回收、处置、再利用的问题亟待解决。基于此,一些学者提出可将固废进行一定处理(破碎、筛分、除杂)后替代天然填料应用于路基填筑^[3,4]。煤矸石是一种常见的矿区废弃物,其大量产生和堆积对环境造成严重的污染^[5]。然而,应用煤矸石作为路基填料虽有诸多优势(如提高资源循环利用率、保护环境等),但其自身组分复杂、孔隙率较高的工程特性对其成为一种优质路基填料有很大的阻碍。一些研究人员提出可在煤矸石中掺入黏土来改善填料性能,且研究结果表明在配比合适的情况下其路用性能优良^[6,7]。然而,南方地区广泛分布的红黏土改良煤矸石的路用性能少有研究,这对该地区煤矸石的大规模利用造成一定限制。

对半刚性基层路面而言,路基的永久变形对路面结构稳定性有重要影响^[8,9]。当路基发生过的永久变形时,极易诱发裂缝、车辙等路面病害^[10]。因此,为了探究煤矸石-红黏土路基在建设使用中的稳定性,有必要对其在循环荷载下的永久变形特性进行研究。通常而言,室内三轴试验是一种普遍认可的测定永久变形的方^[11]法,但其需耗费大量的人力物力和时间成本。为此,国内外学者针对永久变形预估模型开展了大量研究工作。Seed等^[12]对黏土在循环荷载作用下的变形特征进行分析,提出了一种黏土变形随循环加载次数变化的关系式;Hargis^[13]通过研究颗粒材料在循环荷载效应下的变形规律,构建了一种新型的预估模型;Wolff等^[14]利用动态三轴试验成果,推导出一种双相预估模型;Monismith等^[15]基于粉质黏土的三轴试验结果,创新性地提出一种指数形式的预估模型,该模型不仅被广泛采用,还经历多次修正,表达式为:

$\epsilon_p = \alpha_1 N^{\alpha_2}$, 其中: ϵ_p 为永久变形值; N 为循环加载次数; α_1 、 α_2 为模型参数。

然后, Zhang等^[16]在分析大量路基土动态三轴试验数据的基础上建立一种新型的永

久变形模型: $\epsilon_p = \frac{\alpha_1 N^{\alpha_2}}{1 + \alpha_3 N^{\alpha_2}}$, 其中: α_1 、 α_2 、 α_3 为模型参数。与此同时, Puppala等^[17]鉴于应力状态对路基永久变形影响显著,构建一种新型的预估模型: $\epsilon_p = \alpha_1 N^{\alpha_2} \times (\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_{atm}})^{\alpha_3} (\frac{\tau_{oct}}{\sigma_{atm}})^{\alpha_4}$, 其中: σ_{oct} 为体应力 $\sigma_{oct} = 3\sigma_3 + \sigma_d$; σ_{atm} 为大气压强, 取 100 kPa; τ_{oct} 为八面体剪应力 $(\tau_{oct} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2} / 3 = (\sqrt{2} / 3) \sigma_d)$; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 为模型参数。

Gabr等^[18]开展了 3 种不同路基填料的动态三轴试验,基于此构建一种预估永久变形的模型,该模型综合考虑了加载次数、填料含水率、干密度、应力状态等因素,表达式为:

$$\epsilon_p = \alpha N^b (\frac{\sigma_{oct}}{\sigma_{atm}})^c (\frac{\tau}{\tau_f})^d \exp^{[(w_{opt} - w) \times (g \times wPI + h) + i \times (\rho_{opt} - \rho)]},$$

其中: τ 为剪应力; τ_f 为正常状态下的最大剪应力; w_{opt} 为最佳含水率; ρ_{opt} 为最大干密度; w 为初始含水率; ρ 为初始干密度; a 、 b 、 c 、 d 、 g 、 h 、 i 为模型参数。

Azam等^[19]针对非粘结颗粒材料的永久变形问题,建立了一种新的预估模型: $\epsilon_p = \alpha N^b (\frac{u_m + 1}{P_a})^c (\frac{DDR}{1 + wPI + RCM})^d$

,其中: u_m 为基质吸力; P_a 为大气压强; DDR 为干密度比; wPI 为塑性指数权; RCM 为混合料粗集料占比; a 、 b 、 c 、 d 为模型参数。

Xu等^[20]通过动三轴试验对非粘结颗粒材料永久变形进行了研究,在此基础上提出了非粘结颗粒材料永久变形预估模型: $\epsilon_p = s_1 \eta^{s_2} + w(t_1 \eta + t_2) \log N$, 其中: η 为循环应力比; s_1 、 s_2 、 t_1 、 t_2 为模型参数。

然而,这些模型大多针对常规土建立,且未充分考虑物理状态、应力状态、加载状态及环境状态的综合影响。为解决上述问题,本文以南方地区常见特殊土-红黏土对南方常见固废-煤矸石进行改良,并以煤矸石-红黏土混合料为研究填料开展试验研究。通过击实试验、UCS 试验、CBR 试验对不同黏土掺入量混合料试样的击实特性与强度特性进行研究;随后,通过三轴试验对不同黏土掺

入量、围压、偏应力、加载次数、干湿循环次数条件下混合料试样的变形特性进行定性、定量分析,并建立基于物理状态、应力状态、加载状态及环境状态综合作用下的永久变形预估模型,为煤矸石-红黏土路基填筑施工提供有效参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用煤矸石取自湘潭市某煤矿,表面

粗糙且无尖锐棱角,最大粒径 19 mm,砾粒占 98%,砂粒占 2%,其矿物成分如表 1 所示。所用红黏土取自湘潭市某公路周边取土场,按照规范开展土样基本室内试验,获得的土样主要性质指标如表 2 所示。

表 1 煤矸石的矿物成分

Table 1 Mineral composition of coal gangue

成分	石英	方解石	橄榄石	钙镁石	硅酸镁	氧化铝	其他
占比/%	41.2	27.8	14.6	6.5	2.1	0.7	7.1

表 2 土样的主要性质指标

Table 2 Main property indexes of soil

土样名称	最大干密度/(g·cm ³)	最佳含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	比重	粒径分布/%		
							<0.002	0.002~0.075	0.075~2
红黏土	1.86	18.2	53.8	26.1	27.7	2.71	79.4	13.2	7.4

1.2 试样制备及测试方法

为有效分析黏土掺入量(定义为红黏土质量与试样总质量的比值)对煤矸石-红黏土混合料击实特性的影响,本文严格按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)开展击实试验,测定以黏土掺入量为 0%、20%、40%、60%、80% 条件下的混合料的最大干密度和最佳含水率。试验步骤如下:首先,将煤矸石及红黏土进行烘干处理 24 h;然后,依次配置黏土掺入量为 0%、20%、40%、60%、80% 的煤矸石-红黏土混合料,并依据 2% 梯度差完成含水率的配置;配置完成后闷料处理 24 h,选用重型击实法对混合料进行击实;击实完成后,选取试样中心部分确定其最大干密度及最佳含水率。

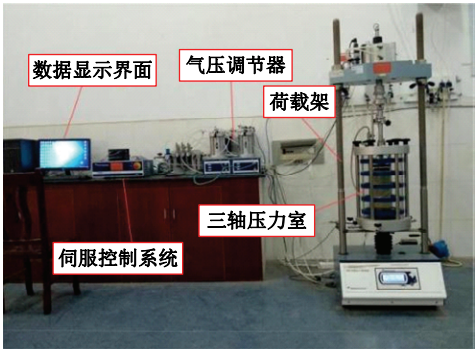
同时,依据上述击实试验步骤,制备不同黏土掺入量(0、20%、40%、60%、80%)下的加州承载比(CBR)试样和无侧限抗压强度(UCS)试样,试样压实度为 96%,含水率取最佳含水率。

基于击实试验结果制备黏土掺入量为 0%、20%、40%、60%、80%,压实度为 96%,含水率为最佳含水率,直径及高度分别为 100、200 mm 的圆柱形煤矸石-红黏土混合料试样。成型过程中,试样的实际含水率、压实度与目标值误差控制在 1% 以内。试样成型后,通过可程式温湿交变试验机(如图 1(a)所示)对试样进行 0%、1、2、3、4、5 次的干湿循环处理,一个完整的干湿循环周期设置如下:将试样放置试验机中进行增湿处理,直至试样吸水饱和(增湿饱和过程耗时约为 24

h),饱和完成后在 25 ℃下进行风干处理,直至试



(a)可程式温湿交变试验机



(b)三轴试验系统

图 1 试验设备
Fig. 1 Test equipment

样质量降低至增湿前的初始质量。干湿循环试验完成后,使用密封袋装封试样静置一昼夜,使其内部水分迁移均匀。

试样经过干湿循环处理后,通过大型三轴试验系统(如图 1(b)所示)对混合料试样在不同物理状态、应力状态、加载状态及环境状态影响下的

永久变形特性进行定性、定量分析。其中,试验加载波形为半正弦波形,频率为 1 Hz,具体试验工况如表 3 所示。

表 3 三轴试验工况

Table 3 Triaxial test condition

参考变量	试验数值
黏土掺入量/%	0、20、40、60、80
围压/kPa	20、40、60
偏应力/kPa	20、40、60
加载次数	10 000
干湿循环次数	0、1、2、3、4、5
加载时间/s	0.2
间歇时间/s	0.8

2 试验结果与分析

2.1 混合料的击实特性

击实试验结果如图 2 所示,可知,混合料的最大干密度随着黏土掺入量的增加呈现先增大后减小的趋势,其最大干密度变化范围为 2.04 ~ 2.26 g/cm³,且在 40% 黏土掺入量时达到峰值 2.26 g/cm³。同时,混合料的最佳含水率随着黏土掺入量

的增加而逐渐增大。这是由于煤矸石-红黏土混合料中煤矸石颗粒粒径较大,黏土颗粒粒径较小,因此煤矸石颗粒之间会形成骨架结构作用,当黏土掺入量较低时(图 3(a)),混合料形成骨架-空隙结构,其骨架作用影响较大,进而导致强度及刚度是土颗粒数倍的煤矸石骨架消耗掉了大量的击实功,骨架之间的土颗粒没有被充分击实,反映在宏观层面上即 0、20% 黏土掺入量对应的最大干密度小于 40% 黏土掺入量;当黏土掺入量过高时(图 3(c)),混合料形成悬浮-密实结构,煤矸石无法形成骨架作用,从而使 60%、80% 黏土掺入量对应的最大干密度小于 40% 黏土掺入量;当黏土掺入量在特定区间时(图 3(b)),混合料内部煤矸石颗粒形成骨架结构,且黏土颗粒恰好填充骨架间的孔隙,土、石颗粒都得到充分的压实,混合料形成骨架-密实结构,反映在宏观层面上即 40% 黏土掺入量对应的最大干密度达到峰值。

2.2 混合料的强度特性

图 4(a)为静力作用下不同黏土掺入量的混合料应力-应变曲线关系,从曲线的总体形态分析,试

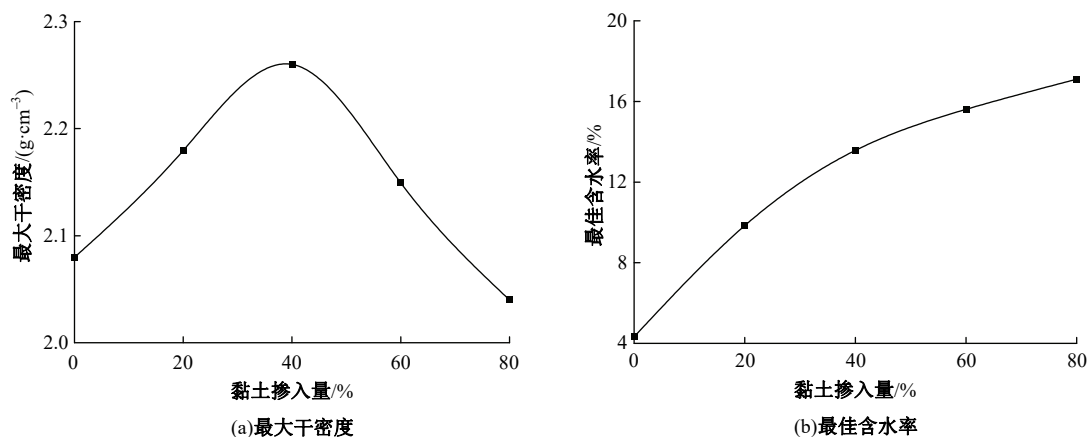


图 2 击实试验结果

Fig. 2 Results of the compaction test

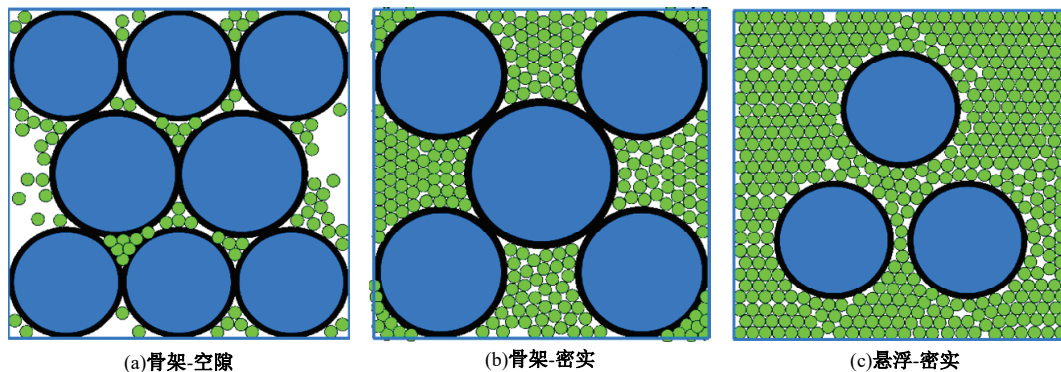


图 3 不同黏土掺入量下的煤矸石-红黏土内部结构示意图

Fig. 3 Internal structure diagram of coal gangue and red clay at different clay dosage

样的应力-应变关系与单轴压缩全曲线特征相符,这一特征涵盖线性上升的弹性压缩阶段、非线性增长的裂缝形成与演变阶段,以及非线性下降的材料破坏阶段。特别地,当黏土掺入量为 80% 时,试样的应力-应变曲线呈现平缓变化趋势,初期的线性弹性压缩阶段极为短暂,随即过渡到较长时期的非线性增长阶段,试样内部颗粒在静压力作用下发生滑移,诱发微裂缝的产生与扩展,最终形成明显的斜向或垂直裂缝,此过程属于塑性变形过程,并伴随着应力峰值的出现,随后试样进入应变软化阶段,应力随应变的增大而递减,直至达到代表残余抗压强度的最小应力值。随着黏土掺入量从 80% 降至 40%,混合料试样应力随应变的增速逐渐增大,峰值应力亦呈现上升趋势,且达到峰值应力所需的应变呈减小趋势。黏土掺入量为 0% 和 20% 的试样初期应力增速高于黏土掺入量为 40% 的试样,其峰值应力却有所下降。这是因为煤矸石-红黏土混合料试样内部结构影响其强度特性,黏土掺入量的减少促使混合料结构类型由悬浮-密实逐步转向骨架-密实及骨架-空隙,不同黏土掺入

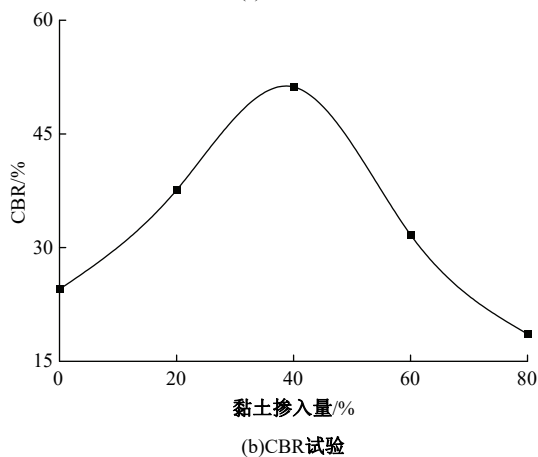
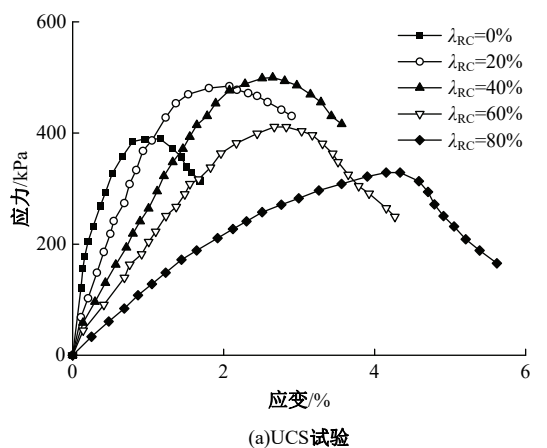


图 4 强度特性试验结果

Fig. 4 The results of strength characteristic test

量的混合料试样在最佳含水率条件下进行击实后,其最大干密度呈现上升趋势,土石间的粘结力和骨架间的相互咬合作用得到了充分发挥,反映在宏观层面上即为混合料的 UCS 值随之增加。而当黏土掺入量为 0 及 20% 时,土石间的粘结力相应减小,试样中的主要受力对象为煤矸石骨架,从而导致在静力作用下试样的应力增长速度显著提升,并且在应变较小的情况下出现峰值应力,峰值应力的大小相比 40% 黏土掺入量时有所降低。

CBR 试验结果如图 4(b) 所示。可以看出,随着黏土掺入量的增加, CBR 值先增大后减小,且在掺入量为 40% 时, CBR 达到最大值。黏土掺入量在 0%~80% 内, 所对应的 CBR 值分别为 24.5%、37.6%、51.2%、31.7% 和 18.6%, 当黏土掺入量从 0 增加至 20%、40% 时, 其 CBR 值分别增大 1.53 倍和 2.08 倍, 当黏土掺入量从 40% 增加至 60%、80% 时, 其 CBR 值分别减小 0.61 倍和 0.36 倍。因此, 确定黏土的最佳掺量对提高混合料的强度特性至关重要。

2.3 混合料的变形特性

2.3.1 物理状态的影响

不同黏土掺入量对煤矸石-红黏土混合料的永久变形的影响关系曲线如图 5 所示。随黏土掺入量的增加, 煤矸石-红黏土混合料的永久变形终值先减小后增大, 且在黏土掺入量为 40% 时, 永久变形终值最小。以偏应力为 40 kPa 为例, 在黏土掺入量为 0、20%、40% 条件下, 煤矸石-红黏土

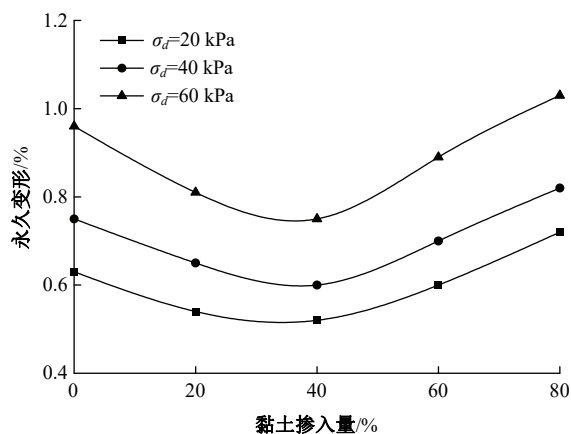


图 5 在 40 kPa 围压、0 次干湿循环条件下永久变形终值随黏土掺入量的变化曲线

Fig. 5 Change curve of the final value of permanent deformation with the amount of clay added under the condition of 40 kPa confining pressure and 0 dry-wet cycles

混合料的永久变形终值分别为 0.75%、0.65% 及 0.60%，后两者较前者分别减小了 0.86 倍和 0.8 倍，而 60%、80% 黏土掺入量的永久变形终值为 0.70% 和 0.82%，相较于 40% 黏土掺入量时分别增大 1.16 倍和 1.36 倍。这是由于煤矸石属于多孔隙材料，黏土的掺入使填料内部空间结构发生改变(即随着黏土掺入量的增加，填料内部由骨架-空隙逐步转变为骨架-密实、悬浮-密实)，从而导致其在加载应力下抵抗变形能力发生变化。反映在宏观则表现为红黏土对煤矸石的改良存在一个掺入量阈值，在阈值范围内其永久变形终值随黏土掺入量的增加而减小，超出阈值范围后其永久变形终值随黏土掺入量的增加而增大。

2.3.2 应力状态的影响

图 6 为煤矸石-红黏土混合料的永久变形与围压、偏应力的关系曲线图，看出，永久变形终值随偏应力的增加而增大。以围压为 40 kPa 为例，当偏应力从 20 kPa 增加至 40、60 kPa 时，其永久变形终值分别为 0.52%、0.60% 及 0.76%，同前者相比后两者分别增大了 1.15 倍和 1.46 倍。

这是由于偏应力增加导致试样逐渐产生剪切软化效应，从而降低其对永久变形的内部阻力。同时，已有研究表明围压是影响路基填料永久变形的重要因素之一^[21]。因此，本研究以偏应力为 40 kPa 为例进行分析，发现当围压从 20 kPa 增加至 40、60 kPa 时，其永久变形终值分别为 0.69%、0.60%、0.55%，后两者相比前者分别减小了

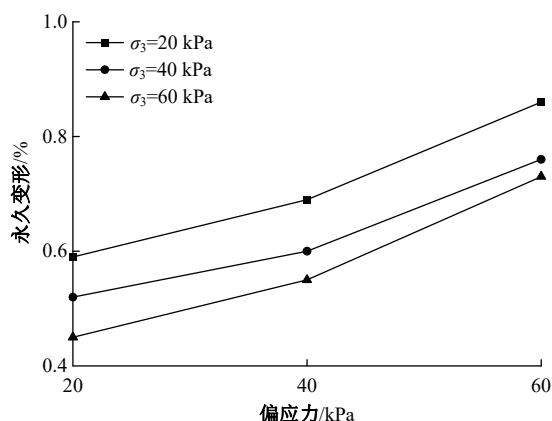


图 6 在 40% 黏土掺入量、0 次干湿循环条件下永久变形终值随围压、偏应力的变化曲线

Fig. 6 Change curve of the final value of permanent deformation with confining pressure and deviating stress under the condition of 40% clay inclusion and 0 dry and wet cycles

0.86 倍和 0.79 倍。这是由于围压的增加提高了试样所受侧限力，从而限制其永久变形的增大。这一现象与 Zhang^[22]的研究结果一致。

2.3.3 加载状态的影响

图 7 为煤矸石-红黏土混合料在围压 20、40、60 kPa 条件下，永久变形随加载次数的变化曲线。可以看出，加载初期试样的永久变形显著增加，最高可达到最终永久变形的 70% 以上，随着加载次数的增加，试样永久变形累积速率逐渐降低，并逐渐趋于稳定。其中，以偏应力为 40 kPa 为例进行分析，发现试样在加载次数 2 000 次之前，试样的永久变形值从 0 增大至 0.44%，而在后期加载次数为 9 000 次至 10 000 次过程中，试样永久变形仅增大了 0.02%。主要原因是由于加载次数的增加，试样内部更加致密，孔隙率不断减小，土颗粒间相互咬合力也逐渐增大，从而增强了试样内部对外部加载应力的承载能力。

2.3.4 环境状态的影响

图 8 为干湿循环次数对煤矸石-红黏土混合料的永久变形影响关系曲线图，可知，当黏土掺入量相同时，永久变形终值随干湿循环次数的增加而增大，其中在第 1 次干湿循环后永久变形终值的增大幅度最高，各黏土掺入量下的永久变形终值增长幅度达到各自总增长幅度的 50% 以上；且在 4~5 次干湿循环后，永久变形终值的增长逐渐趋于定值。以黏土掺入量为 40% 为例，当干湿循环次数从 0 次增大至 1、2、3、4、5 次时，其永久变

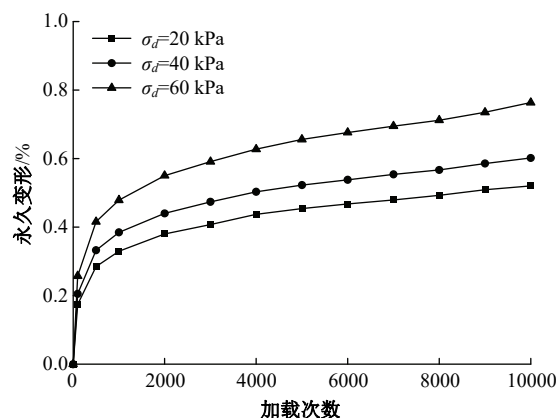


图 7 在 40% 黏土掺入量、40 kPa 围压、0 次干湿循环条件下永久变形随加载次数的变化曲线

Fig. 7 Change curve of permanent deformation with loading times under the conditions of 40% clay inclusion, 40 kPa confining pressure and 0 dry-wet cycles

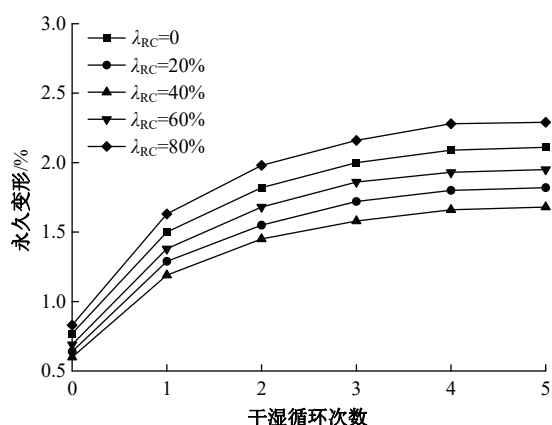


图 8 在 40% 黏土掺入量、40 kPa 围压、40 kPa 偏应力下永久变形随干湿循环次数的变化曲线

Fig. 8 Change curve of permanent deformation with the number of dry and wet cycles under 40% clay inclusion, 40 kPa confining pressure and 40 kPa deviating stress

形终值分别为 0.60%、1.19%、1.45%、1.58%、1.66% 及 1.68%，同前者相比后五者分别增大了 1.98 倍、2.42 倍、2.63 倍、2.77 倍及 2.8 倍。这是由于试样内部在初次干湿循环作用下产生大量微小裂缝，黏土团粒分散为若干颗粒且颗粒间距增大，从而使试样内部的变形阻力迅速降低。当试样经历多次干湿循环作用后，试样内部颗粒的块面积小于某个临界值，微裂缝数量、孔隙率大小及颗粒间距已基本稳定，即试样内部的变形阻力趋于稳定。

3 预估模型的建立及验证

如前文所述，煤矸石-红黏土混合料的永久变形与黏土掺入量、围压、偏应力、加载次数及干湿循环次数显著相关。因此，本文基于三轴试验结果建立了一个综合考虑物理条件影响、应力条件影响、加载条件影响及环境条件影响的路基永久变形预估模型，如式(1)所示，模型参数及拟合优度如表 4 所示。

$$\epsilon_p = \alpha_1 N_L^{\alpha_2} \ln(N_{DW} + e)^{\alpha_3} (\lambda_{RC} + 1)^{\alpha_4} \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{atm}}\right)^{\alpha_5} \left(\frac{\sigma_d}{\sigma_{atm}}\right)^{\alpha_6} \quad (1)$$

式中： ϵ_p 为永久变形； N_L 为加载次数； N_{DW} 为干湿

表 4 模型拟合结果

Table 4 Results of model fitting							
α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	R^2	RMSE
0.16	0.21	1.55	0.11	0.13	0.37	0.91	0.11

循环次数； λ_{RC} 为黏土掺入量； σ_3 为围压； σ_d 为偏应力； σ_{atm} 为大气压强； α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 为模型参数。

为验证预估模型的适用性，本研究选取 He 等^[23]和 Alnedawi 等^[24]的部分永久变形试验数据代入预估模型，预估不同物理条件、应力条件、加载条件及环境条件下的永久变形值。以煤矸石-红黏土混合料的永久变形实测值与预估模型的预估值为横、纵坐标，绘制出煤矸石-红黏土混合料永久变形的实测值与预估值的散点图，结果如图 9 所示。可以明显观察到，大多数散点集中在直线 $y=x$ 附近，因此，根据预估模型得出的永久变形预估值具有较强的代表性，适用性较好。值得注意的是，本研究的预估模型不仅可以为再生公路施工提供理论支持，而且有助于提高我国煤矸石的回收利用率，降低施工成本。

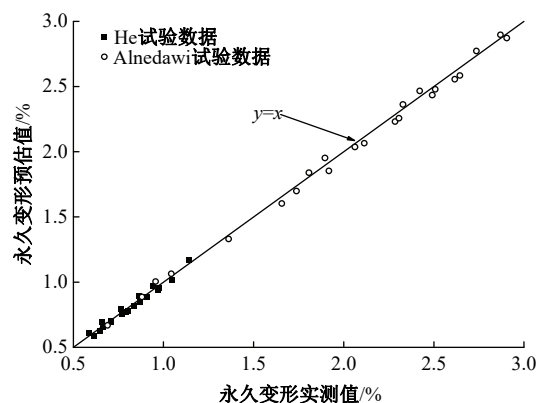


图 9 预估模型验证结果

Fig. 9 Prediction model validation results

4 结 论

(1) 混合料的最大干密度随着黏土掺入量的增加呈现先增大后减小的趋势，且在 40% 黏土掺入量时达到峰值 2.26g/cm³。同时，混合料的最佳含水率随着黏土掺入量的增加而逐渐增大。

(2) 混合料的内部结构影响其强度特性，随着黏土掺入量的减少，混合料结构类型由悬浮-密实逐步转向骨架-密实及骨架-空隙，UCS 值和 CBR 值随着黏土掺入量的增加呈先增大后减小的趋势，且在黏土掺入量为 40% 时达到峰值。因此，确定黏土的最佳掺入量对提升混合料的强度特性十分重要。

(3) 永久变形终值随黏土掺入量的增加呈先减小后增大的变化趋势，随偏应力的增加而增大，

随围压的增加而减小,随干湿循环次数的增加而增大。同时,在加载初期永久变形快速增加,随着加载次数的增大,试样永久变形累积速率逐渐降低,逐渐趋于稳定。混合料在加载前期的变形量可达总变形量的 70% 以上。因此,为保证路基的稳定性和耐久性,控制实际运营过程中道路所受荷载至关重要。

(4)通过黏土掺入量、围压、偏应力、加载次数、干湿循环次数对永久变形影响的定性、定量研究,提出综合考虑物理状态、应力状态、加载状态及环境状态的永久变形预估模型,并对其进行验证。该模型形式简单,便于为煤矸石-红黏土路基填筑施工提供有效的理论参考。

参考文献:

- [1] 石晓莉,杜根杰,杜建磊,等. 大宗工业固体废物综合利用产业存在的问题及建议[J]. 现代矿业, 2022, 38(6): 227-229.
Shi Xiao-li, Du Gen-jie, Du Jian-lei, et al. Problems and suggestions on comprehensive utilization of bulk industrial solid waste[J]. Modern Mining, 2022, 38(6):227-229.
- [2] 张军辉,丁乐,张安顺. 建筑垃圾再生料在路基工程中的应用综述[J]. 中国公路学报, 2021, 34(10): 135-154.
Zhang Jun-hui, Ding Le, Zhang An-shun. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste in subgrade engineering:a review[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(10): 135-154.
- [3] Azam A M, Cameron D A, Rahman M M. Model for prediction of resilient modulus incorporating matric suction for recycled unbound granular materials[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(11): 1143-1158.
- [4] Delongui, Lucas, Matuella, et al. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design[J]. Construction and Building Materials, 2018, 168(20): 105-112.
- [5] 邱继生,侯博雯,关虢,等. 煤矸石理化性质对混凝土抗压强度的影响[J]. 非金属矿, 2019, 42(2):29-32.
Qiu Ji-sheng, Hou Bo-wen, Guan Xiao, et al. Effect of physical and chemical properties of coal gangue under different stratas on compressive strength of concrete[J]. Non-Metallic Mines, 2019, 42(2):29-32.
- [6] 贺建清,靳明,阳军生. 掺土煤矸石的路用工程力学特性及其填筑技术研究[J]. 土木工程学报, 2008, 41(5): 87-93.
He Jian-qing, Jin Ming, Yang Jun-sheng. A study on the road engineering mechanical properties of coal gangue mixed with clay and the filling techniques[J]. China Civil Engineering Journal, 2008, 41(5): 87-93.
- [7] 朱小钢. 干湿循环作用下煤矸石路基材料应用性能研究[J]. 西部交通科技, 2023(4): 36-38, 78.
Zhu Xiao-gang. Research on the application performance of coal gangue roadbed materials under the action of dry and wet cycling[J]. Western China Communications Science & Technology, 2023(4): 36-38, 78.
- [8] 王学广,李震,康楠,等. 改良土换填法与石灰桩法加固膨胀土边坡比较[J]. 人民黄河, 2019, 41(5): 129-134.
Wang Xue-guang, Li Zhen, Kang Nan, et al. Numerical analysis of expansive soil slope reinforced by improved soil replacement method and lime pile method[J]. Yellow River, 2019, 41(5):129-134.
- [9] 曲英杰,毛伟兵,孙玉霞,等. 引黄泥沙对黏质盐土饱和导水率的影响[J]. 人民黄河, 2021, 43(5): 158-162.
Qu Ying-jie, Mao Wei-bing, Sun Yu-xia, et al. Effects of sand-mixing on saturated water permeability of clay saline soil[J]. Yellow River, 2021, 43(5): 158-162.
- [10] 沈卓恒,阮世强. 软土地层路基工后沉降预测及控制研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 17-21.
Shen Zhuo-heng, Ruan Shi-qiang. Study on prediction and control of post-construction settlement of subgrade in the soft soil layer[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4):17-21.
- [11] Lin P, Tang L, Ni P. Field evaluation of subgrade soils under dynamic loads using orthogonal earth pressure transducers[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2019, 121: 12-24.
- [12] Seed H B, McNeill R L. Soil deformations in normal compression and repeated loading tests[J]. Highway Research Board Bulletin, 1956, 141: 44-53.
- [13] Hargis L L. A study of strain characteristics in a limestone gravel subjected to repetitive loading[D]. Texas: Texas A&M University, 1963.
- [14] Wolff H, Visser A T. Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Transport, 1994,

- 105(4): 259-272.
- [15] Monismith C L, Ogawa N, Freeme C. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transportation Research Record, 1975, 537: 1-17.
- [16] Zhang Y, Kong L W, Guo A G, et al. Cumulative plastic strain of saturated soft clay under cyclic loading [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(6): 1542-1548.
- [17] Puppala A J, Saride S, Chomtid S. Experimental and modeling studies of permanent strains of subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, 135(10): 1379-1389.
- [18] Gabr A R, Cameron D A. Permanent strain modeling of recycled concrete aggregate for unbound pavement construction[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2012, 25(10): 1394-1402.
- [19] Azam A, Cameron D, Rahman M. Permanent strain of unsaturated unbound granular materials from construction and demolition waste[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(3): 04014125.
- [20] Xu F, Zhai B, Leng W M, et al. Probabilistic method for evaluating the permanent strain of unbound granular materials under cyclic traffic loading[J]. Construction and Building Materials, 2020, 251(7): 118975.
- [21] Arulrajah A, Mohammadinia A, Maghool F, et al. Tire derived aggregates as a supplementary material with recycled demolition concrete for pavement applications[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 129-136.
- [22] Zhang S, Tang C, Hu P, et al. Reversible and irreversible strain behavior of frozen aeolian soil under dynamic loading [J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(3): 245-253.
- [23] He Z M, Xiang D, Liu Y X, et al. Deformation behavior of coarse-grained soil as an embankment filler under cyclic loading[J]. Advances in Civil Engineering, 2020(3): 1-13.
- [24] Alnedawi A, Nepal K P, Alameri R. New shake-down criterion and permanent deformation properties of unbound granular materials[J]. Journal of Modern Transportation, 2019, 27(2): 108-119.