

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021092623081974

文章编号: 1674-599X(2023)04-0047-07

引用格式: 陈向阳, 王岩. 建筑废弃物改良红黏土填料的力学特性研究[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(4): 47-53.

Citation: CHEN Xiangyang, WANG Yan. Investigation on mechanical properties of red clay filler modified by construction waste[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(4): 47-53.

建筑废弃物改良红黏土填料的力学特性研究

陈向阳, 王岩

(长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 针对在湿化作用下红黏土路基的稳定性及耐久性服役问题, 该研究采用在红黏土中掺入建筑废弃物进行物理改良的方法来确定建筑废弃物在不同掺入率下混合土样的基本物理性能指标。并通过回弹模量试验、破坏强度试验、永久变形试验定性与定量地分析建筑废弃物掺入率及初始含水率对混合土样力学性能的耦合影响。研究表明: 当建筑废弃物掺入率相同时, 回弹模量、破坏强度随着初始含水率的增加而减小, 永久变形值随着初始含水率的增加而增大; 当初始含水率相同时, 回弹模量、破坏强度随着建筑废弃物掺入率的增加先增加后减小, 且其在掺入率为10%时达到峰值, 永久变形值随着建筑废弃物掺入率的增加先减小后增大, 且在掺砂比例为10%时达到谷值。基于试验结果建立永久变形预估模型, 以期为改良建筑废弃物-红黏土在路基建设中的实际应用提供参考。

关键词: 道路工程; 建筑废弃物改良红黏土; 回弹模量; 破坏强度; 永久变形

中图分类号: U416.03

文献标志码: A

Investigation on mechanical properties of red clay filler modified by construction waste

CHEN Xiangyang, WANG Yan

(College of Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: In order to solve the problems of stability and durability of red clay subgrade under the action of humidification, it was proposed to add construction waste into red clay for physical improvement, and the basic physical performance properties of mixed samples under different incorporation ratios of construction waste were tested. Then, the coupling influence of construction waste incorporation rate and initial moisture content on the mechanical properties of mixed samples were qualitatively and quantitatively evaluated by means of the resilient modulus test, failure strength test and permanent deformation test. The results show that when the incorporation rate of construction waste was the same, the resilient modulus and failure strength decreased with the increase of initial moisture content, while the permanent deformation value increased with the increase of initial moisture content. When the initial moisture content was the same, the resilient modulus and failure strength firstly increased and then decreased with the increase of construction waste incorporation ratios, and the value would reached its maximum value at 10 percent incorporation rate. The permanent deformation value firstly decreased and then increased with the increase of construction waste incorporation ratios, and the value would reached its minimum value at 10 percent incorporation ratios. Based on the experimental results, the prediction model of permanent deformation was established to provide a useful reference for the practical application in red clay subgrade modified by construction waste.

Key words: road engineering; red clay modified by construction waste; resilient modulus; failure strength; permanent deformation

收稿日期: 2021-09-26

作者简介: 陈向阳(1974—), 男, 长沙理工大学副教授。

回弹模量、破坏强度、永久变形作为表征路基稳定性的重要力学指标,是研究人员关注的热点。已有研究表明,路基土的回弹模量及破坏强度特性直接影响着路面结构层疲劳开裂的预测与设计层厚的确定,而路基过大的永久变形更是路面车辙病害的重要诱因^[1-4]。同时,国内外诸多学者对路基土的力学指标展开了研究,发现土体类型、含水率、成形方法等因素对其自身力学指标有着不同程度的影响^[5-6]。因此,从设计、施工和运营维护出发,研究路基土的力学指标对公路建设有十分重要的意义。

红黏土在中国南方地区分布广泛,随着该地区交通基础设施建设的迅猛发展,在筑路材料贫乏地区采用红黏土作为路基填料是难以避免的^[7]。然而,红黏土是一种典型高塑性、高分散性的非饱和黏土,具有多裂隙、吸水膨胀、失水收缩等工程特性,这使得红黏土路基在车辆荷载作用下出现不同程度的稳定性衰退,从而给公路建设带来极大危害^[8-9]。为保障红黏土路基在运营过程中的稳定性,常用处置方法是添加外掺剂(如水泥、生石灰等)对红黏土进行改良。但该种改良方法属于化学改良,具有一定的时效性,对环境也存在不利影响。

综上所述,本研究拟选用贵州省贵阳市某一级公路改扩建工程路段红黏土作为试验土样,在保护环境和提高经济效率的前提下,选用沿线拆迁建筑废弃物对红黏土进行改良,从而达到抑制红黏土的不良特性、提高其稳定性的目的;再研究建筑废弃物不同掺入率下混合土样的基本物理性能指标;然后,通过回弹模量试验、破坏强度试验、永久变形试验,定性、定量地分析建筑废弃物掺入率及初始含水率对混合土样回弹模量、破坏强度及永久变形终值的耦合影响;最后,基于该试验结果,建立永久变形预估模型,以期为建筑废弃物改良红黏土在路基建设中的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本研究所用红黏土取自贵州省贵阳市某一级公路改扩建工程路段,所用建筑废弃物取自工程沿线房屋拆迁,其主要成分为混凝土、砖石和砂浆。

依据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对红黏土及处理(破碎、筛分、除杂)后的建筑废弃物进行基本物理性能试验,结果分别见表1~2。同时,为有效分析建筑废弃物掺入率对红黏土基本物理性能指标的影响,本研究设置6种掺入率(0%、10%、20%、30%、40%、50%)的混合土样,进行基本物理性能试验,结果如图1所示。从图1(a)~(b)可以看出,混合土样的最佳含水率随掺入率的提高而逐渐下降,而最大干密度随掺入率的提高呈先增大后减小趋势,当掺入率为10%时达到峰值。从图1(c)~(e)可以看出,混合土样的塑限与建筑废弃物掺入率成正相关,液限和塑性指数与其掺入率成负相关,且当掺入率超过10%时,塑限增长速率陡然增大。这表明建筑废弃物对红黏土的改良是可行的。

表1 红黏土基本物理性能指标

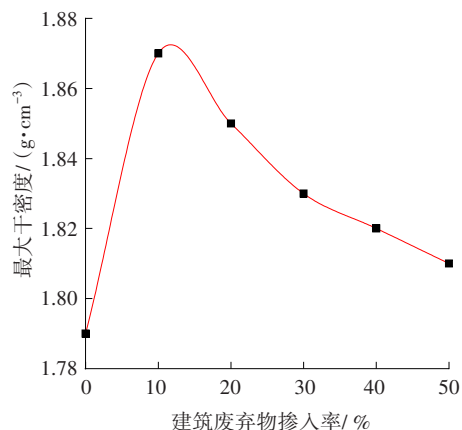
Table 1 Basic physical properties of red clay

天然含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性指数	相对密度	粒径分布/ %		
					<0.075	[0.075, 0.500]	>0.500
33.5	60.2	31.6	28.6	2.6	96.3	3.7	0

表2 建筑废弃物基本物理性能指标

Table 1 Basic physical properties of construction garbage

天然含水率/ %	相对密度	级配指标		粒径分布/ %		
		不均匀系数	曲率系数	<0.075	[0.075, 0.500]	>0.500
13.58	2.32	2.83	0.88	0.59	71.80	27.61



(a) 最大干密度

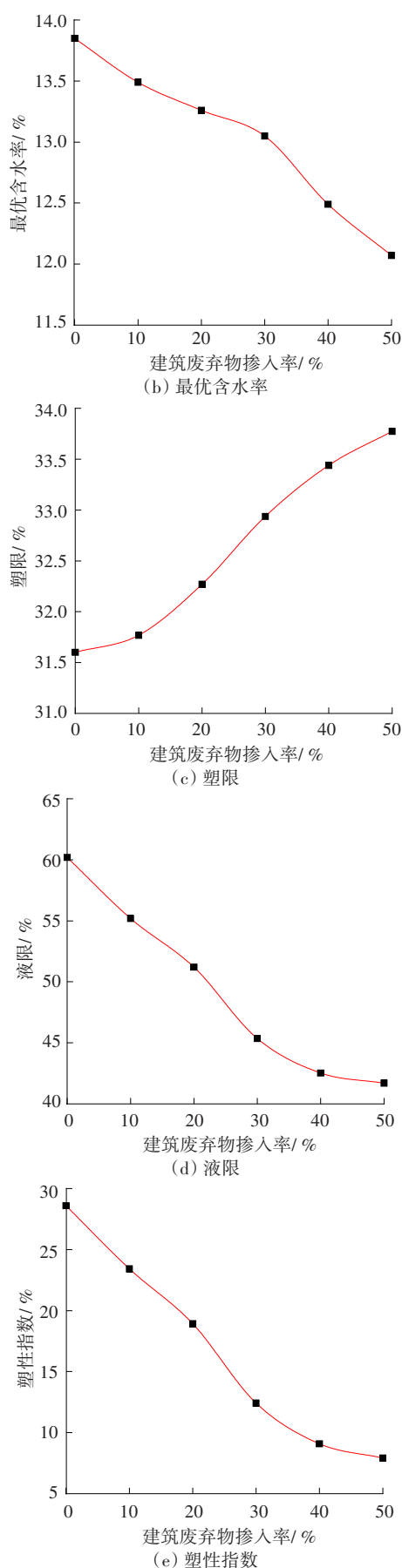


图1 基本物理性能试验结果

Fig. 1 Test results of basic physical performance properties

1.2 试验方法

选用室内承载板法,测定建筑废弃物改良红黏土的回弹模量。先烘干筛余红黏土及建筑废弃物,烘干温度为 $105 \sim 110^{\circ}\text{C}$,烘干时间为 24 h ;再基于图1的试验结果,击实制备掺入率分别为 0% 、 10% 、 20% 、 30% 、 40% 、 50% ,初始含水率分别为最优含水率 w_{op} 、 $1.1w_{\text{op}}$ 、 $1.2w_{\text{op}}$ 的建筑废弃物改良红黏土;然后,对土件采用逐级加载卸载法,测定其在每级荷载下的回弹变形量;最后,基于3个平行试验的平均值,确定土件回弹模量。

选用意大利 Controls 公司生产的 Dynatrx100/14 全自动三轴试验系统,如图2所示。测定建筑废弃物改良红黏土的破坏强度与永久变形终值。其中,土件掺入率分别为 0% 、 10% 、 20% 、 30% 、 40% 、 50% ,初始含水率分别为 $1.0w_{\text{op}}$ 、 $1.1w_{\text{op}}$ 、 $1.2w_{\text{op}}$ 。在破坏强度试验中,围压选取为 28 kPa ,加载应变速率为 0.02 mm/s 。若土件在轴向应变达到 15% 前发生破坏,则取其轴向应力峰值点作为破坏强度。若土件在轴向应变达到 15% 时仍未破坏,则以 15% 轴向应变所对应的轴向应力作为破坏强度。在永久变形试验中,围压取为 28 kPa ,偏应力取为 28 kPa ,加载波形为半正弦波,频率为 1 Hz ,加载时间为 0.2 s ,间歇时间为 0.8 s ,加载次数为 $10\ 000$ 次。

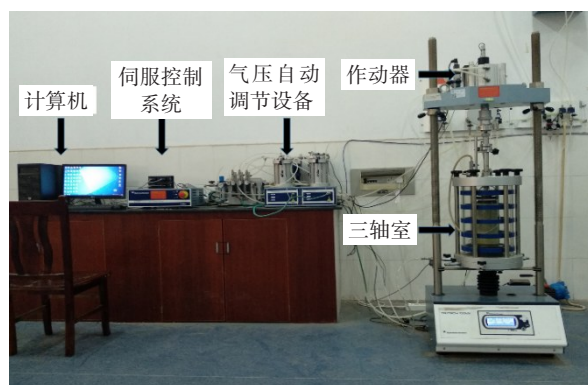


图2 全自动三轴试验系统

Fig. 2 Automatic triaxial test system

2 结果及分析

2.1 建筑废弃物改良红黏土的回弹模量

红黏土具有吸水后软化、刚度降低等特性,故在同一建筑废弃物掺入率下,改良土件回弹模量受初始含水率的影响不可忽视。回弹模量与初始含水率的关系曲线如图3所示。从图3可以看出,回

弹模量随初始含水率的增加而减小。以掺入率为20%工况为例,初始含水率分别为 $1.0w_{op}$ 、 $1.1w_{op}$ 、 $1.2w_{op}$ 的回弹模量依次为106、87、64 MPa,后两者较与前者分别减小了17.9%和39.6%。这是由于土体干密度随着初始含水率的增大而下降,当颗粒间距增大,整体结构稳定性下降。此外,在颗粒间结合水膜中,水分子数量的增长也促进了颗粒滑移,导致改良土件回弹模量的减小。

建筑废弃物的掺入率由改良土件的干密度及颗粒组成,因此,掺入率是同一初始含水率下改良土件回弹模量的重要影响因素。回弹模量与掺入率的关系曲线如图3所示。从图3可以看出,回弹模量随掺入率的增大呈先增加后减小趋势,且在掺入率为10%时达到峰值。以 $1.1w_{op}$ 工况为例,当掺入率从0%增大至10%时,回弹模量增长21.2%;当掺入率从10%增大至50%时,回弹模量相较于前者,分别减小15.1%、32.1%、54.8%、60.9%。这是由于适量建筑废弃物的掺入可以提高土件颗粒间的嵌挤力,从而增强整体结构的稳定性。但随着建筑废弃物掺入率的进一步提高,土件内部颗粒间距逐步增大,相应土件孔隙率逐步提高,导致改良土件回弹模量的减小。

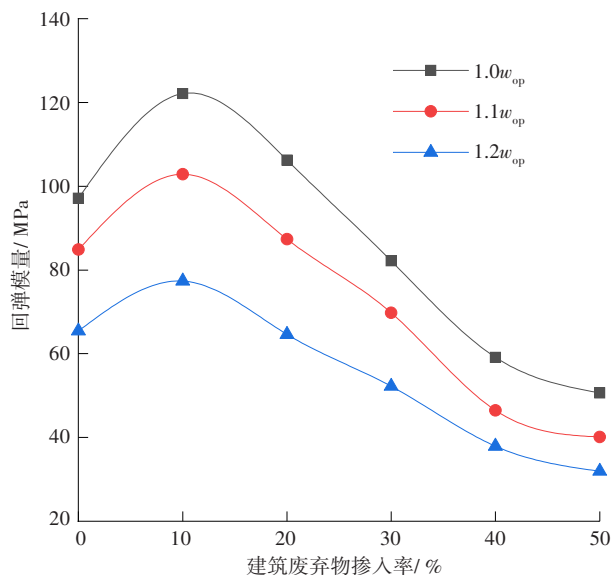


图3 回弹模量随建筑废弃物掺入率变化

Fig. 3 The resilient modulus vary with incorporation ratios of construction waste

2.2 建筑废弃物改良红黏土的破坏强度

不同建筑废弃物掺入率的改良土件在湿化作

用下的破坏强度演变如图4所示。从图4可以看出,随着含水率的逐步增大,土件破坏强度随之减小。以掺入率为30%的工况为例,分析可知土件分别为 $1.0w_{op}$ 、 $1.1w_{op}$ 、 $1.2w_{op}$ 初始含水率下的破坏强度依次为359、315、261 kPa,后两者较前者分别减小了12.3%、27.3%。从图4可以看出,土件破坏强度随掺入率的增加呈先增加后减小趋势,且在掺入率为10%时达到峰值。以 $1.2w_{op}$ 工况为例,当掺入率从0%增大至10%时,破坏强度增长12.3%;当掺入率从10%增大至50%时,破坏强度相较于10%的分别减小25.4%、35.6%、49.9%、54.5%。可见,初始含水率、建筑废弃物掺入率对改良土件的破坏强度有较大影响,现场施工中可通过调整初始含水率和建筑废弃物的掺入率,有效提高改良土件的破坏强度。

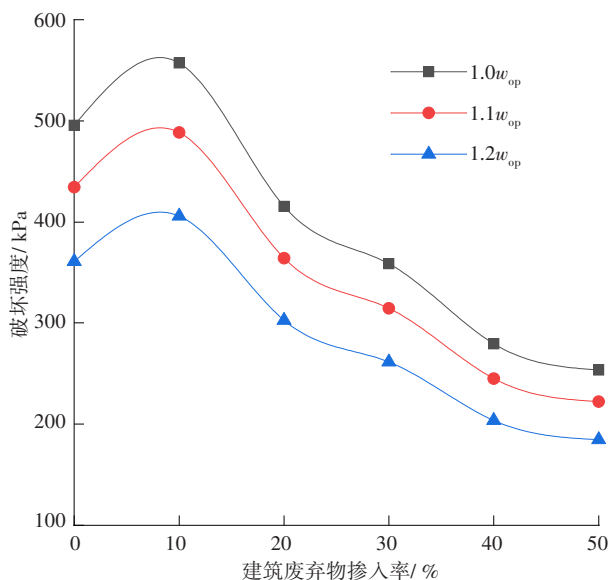


图4 破坏强度随建筑废弃物掺入率变化

Fig. 4 The failure strength vary with incorporation ratios of construction waste

2.3 建筑废弃物改良红黏土的永久变形

不同建筑废弃物掺入率改良土件在湿化作用下的永久变形终值演变如图5~6所示。从图5可以看出,在相同掺入率下,建筑废弃物改良红黏土的永久变形终值随初始含水率的增加而减小。以掺入率为10%的工况为例,当初始含水率从 $1.0w_{op}$ 增长至 $1.1w_{op}$ 时,永久变形终值增大幅度为8.10%;当初始含水率从 $1.1w_{op}$ 增长至 $1.2w_{op}$ 时,永久变形终值增大幅度迅速增长,增幅可达12.96%。这是由于初始含水率的增加,土件中产生了过多自由水,减弱了颗粒间的接触力,并在剪切过程中,水起着润

滑作用,而初始含水率持续增加使得土体本身干密度下降,颗粒间摩阻力下降,导致永久变形终值增大。

从图5还可以看出,建筑废弃物改良红黏土在相同含水率下,永久变形终值随掺入率的增加先减小后增大。当掺入率达到10%时,永久变形终值达到最小值。以最优含水率 w_{op} 工况为例,分析可知,0%、10%掺入率下的永久变形终值分别为1.34%和1.17%,后者较前者相比减小了12.69%。当掺入率从10%分别增长至20%、30%、40%、50%时,其永久变形值分别为1.26%、1.37%、1.48%、1.51%,相较于掺入率为10%下的永久变形终值分别增大7.69%、17.09%、26.50%、29.06%。其中,当掺入率大于30%后,建筑废弃物改良红黏土的永久变形终值大于纯红黏土的。这是由于掺入红黏土中的不规则建筑废弃物构成了受力骨架结构,当掺入率为10%时,混合土件内部结构最为稳定。这是因为永久变形终值在掺入率为10%时达到谷值,随着建筑废弃物掺入率的持续增高,其红黏土颗粒含量逐渐降低,导致其内部黏聚力下降,摩阻力上升。当建筑废弃物含量增长所带来的摩阻力小于红黏土含量减小所失去的黏聚力时,其宏观表现为永久变形终值逐渐增长。

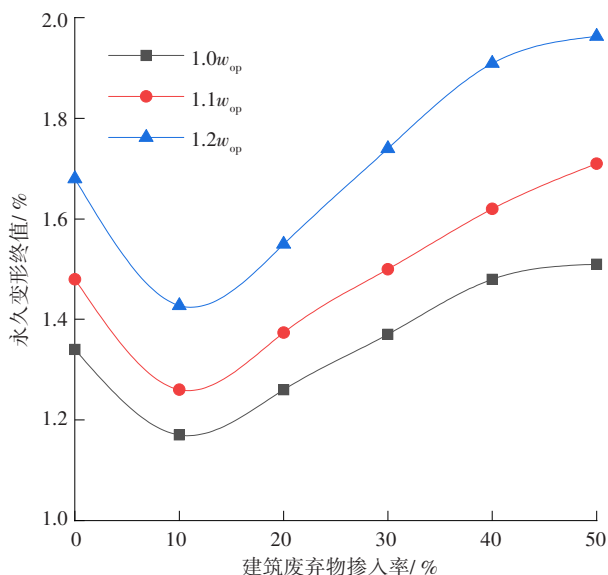


图5 永久变形随建筑废弃物掺入率变化

Fig. 5 Permanent deformation values vary with the confining pressure

建筑废弃物改良红黏土在掺入率为10%、初始含水率为最优含水率条件下的永久变形与循环加载次数关系曲线如图6所示。从图6可以看出,永

久变形在加载前期迅速增加,在前2 000次加载过程中,永久变形值从0.00%增大至0.85%,增长幅度达最终变形值的73.00%。随着加载永久变形累积增大速率逐渐降低,其在9 000次至10 000次的加载过程中永久变形值仅从1.14%增大至1.17%,变形逐渐趋于定值。这是由于试件内部孔隙随着加载次数的增加而不断紧密,从而增强了试件内部对加载应力的承载能力。WANG等^[10]在研究中也发现了类似的永久变形与循环荷载次数之间的规律。

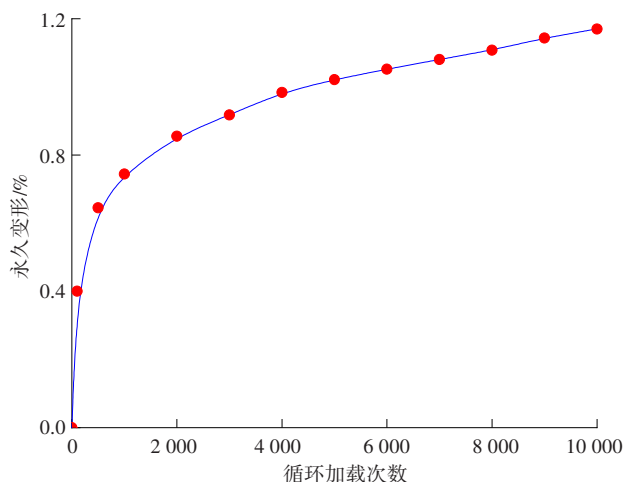


图6 永久变形与循环加载次数之间的关系

Fig. 6 Relationship between permanent deformation and the number of loading cycles

3 永久变形预估模型的建立及验证

在道路运营期间,相较于回弹模量、破坏强度等力学特性而言,路基的永久变形难以定值。因此,有必要建立一种简单、有效的路基永久变形的有效定值方法。室内三轴试验是一种普遍认可的测定永久变形的有效方法。考虑到三轴试验的成本较高,耗时较长,需专业人员操作,本研究通过建立一个精确、快速的预估方法,获得建筑废弃物改良红黏土在循环荷载作用下的永久变形值。

目前,国内外学者对路基土永久变形预估通常采用两种方法:①建立本构模型。模拟每一个循环过程,从而精确获得每一次加载后的永久变形值,但该方法在计算过程中需要记忆每一循环过程所产生的屈服面,其计算量较大,不利于在工程中普遍推广。②经验拟合法。通过室内试验数据,建立永久变形与不同因素的拟合关系方程式,从而得到不同条件下的永久变形值。与方法一相比,该方法

的精确度略低,但计算简便、方便应用。因此,本研究应用方法二预估建筑废弃物改良红黏土在循环荷载作用下的永久变形值。

建筑废弃物改良红黏土的永久变形与建筑废弃物的掺入率、初始含水率、循环荷载次数均显著相关。因此,本研究基于永久变形试验结果,建立了一个考虑建筑废弃物掺入率、初始含水率、循环荷载次数对永久变形耦合影响的永久变形预估模型,见式(1),模型参数及拟合优度 R^2 见表 3。为验证本研究所建模型的合理性与适用性,选用建筑废弃物改良红黏土的永久变形试验数据(表 4)代入新模型进行拟合。其中,以永久变形实测值为横坐标,预估值为纵坐标,绘制鲁棒性验证散点图,如图 7 所示。

$$\varepsilon_p = (\alpha_1 \lambda_s^2 + \alpha_2 \lambda_s + 1)(\alpha_3 + \alpha_4 \omega_{ini}) \alpha_5 e^{-(\alpha_6 N)} \quad (1)$$

式中: ε_p 为永久变形; λ_s 为建筑废弃物掺入率; ω_{ini} 为初始含水率; N 为循环加载次数; α_1 、 α_2 、 α_3 、 α_4 、 α_5 、 α_6 为模型参数。

表 3 新建模型拟合结果

Table 3 New model fitting results

α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	R^2
0.60	0.44	-1.25	2.83	1.76	0.07	0.92

表 4 模型验证的相应工况

Table 4 Corresponding conditions of model verification

参考变量	选取数值
掺入率	5、15、25、35、45
含水率	1.0 w_{op} 、1.1 w_{op} 、1.2 w_{op}
加载次数	100、300、500、700、1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000

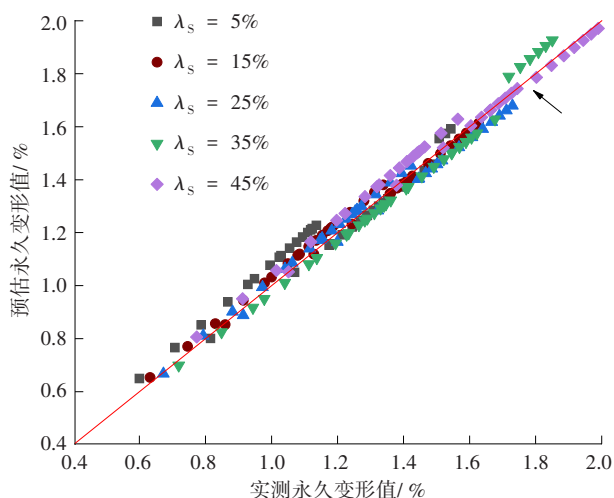


图 7 新模型验证结果

Fig. 7 New model validation results

从图 7 可以看出,大部分散点集中分布在直线 $y=x$ 周围。因此,新建模型所得永久变形预估值具

有较强的代表性,可满足一般工程需要。

4 结论

1) 回弹模量随初始含水率的增加而减小,随掺入率的增大呈先增加后减小趋势,且在掺入率为 10% 时达到峰值。此外,回弹模量在低掺入率时对初始含水率的变化较为敏感。

2) 破坏强度随初始含水率的增加而减小,随掺入率的增大呈先增加后减小趋势,且初始含水率对建筑废弃物改良红黏土破坏强度的影响程度随掺入率的增大而逐渐递减。因此,在施工过程中,通过调整初始含水率和建筑废弃物的掺入率,可有效提高其破坏强度。

3) 永久变形终值随初始含水率的增加而增大,随掺入率的增大呈先减小后增大趋势。其中,在 10% 的掺入率时永久变形终值达到谷值点,且当掺入率大于 30% 后,建筑废弃物改良红黏土的永久变形终值大于纯红黏土的。此外,永久变形在加载前期迅速增加,随着加载过程的持续推进,试件永久变形累积速率逐渐降低,其变形逐渐趋于定值。其中,建筑废弃物改良红黏土在加载前期的变形量可达总变形量的 70% 以上。

4) 基于永久变形试验结果,建立考虑建筑废弃物的掺入率、初始含水率、循环荷载次数对永久变形耦合影响的永久变形预估模型,并对其进行验证。该模型形式简单,为建筑废弃物改良红黏土的实际工程应用提供了参考。

参考文献 (References):

- [1] LI Y F, NIE R S, YUE Z R, et al. Dynamic behaviors of fine-grained subgrade soil under single-stage and multi-stage intermittent cyclic loading: permanent deformation and its prediction model [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2021, 142: 106548. DOI: 10.1016/j.soildyn.2020.106548.
- [2] ALNEDAWI A, NEPAL K P, AL-AMERI R. New shakedown criterion and permanent deformation properties of unbound granular materials [J]. Journal of Modern Transportation, 2019, 27 (2): 108-119. DOI: 10.1007/s40534-019-0185-2.
- [3] SABERIAN M, LI J, THACH NGUYEN B, et al. Estimating the resilient modulus of crushed recycled

- pavement materials containing crumb rubber using the clegg impact value [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 141: 301-307. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.10.042.
- [4] 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. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.003.
- SHEN Zhuoheng, RUAN Shiqiang. 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. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.003.
- [5] DA SILVA M F, RIBEIRO M M P, FURLAN A P, et al. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil [J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 26: 100443. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100443.
- [6] 张锐, 吴梦丽, 刘闯, 等. 结合水对高液限土固结压缩特性的试验研究[J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 16(4): 48-56.
- ZHANG Rui, WU Mengli, LIU Chuang, et al. Experimental study on consolidation and compression characteristics of high liquid limit soil with combined water [J]. *Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science)*, 2019, 16(4): 48-56.
- [7] 丁才, 甘先永, 王亚晓. 路基红黏土动态回弹模量的影响因素研究[J]. *交通科学与工程*, 2017, 33(1): 27-31. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.01.006.
- DING Cai, GAN Xianyong, WANG Yaxiao. Study on influencing factors of dynamic resilient modulus of roadbed red clay [J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2017, 33(1): 27-31. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2017.01.006.
- [8] ABDEL-GAWWAD H A, RASHAD A M, MOHAMMED M S, et al. The potential application of cement kiln dust-red clay brick waste-silica fume composites as unfired building bricks with outstanding properties and high ability to CO₂-capture [J]. *Journal of Building Engineering*, 2021, 42: 102479. DOI: 10.1016/j.jobe.2021.102479.
- [9] MAHMOOD A, HASSAN R, FOUAD A. Influence of mellowing periods on short and long-term performance of lime-treated clay subgrade soils [J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2022, 15(4): 765-778. DOI: 10.1007/s42947-021-00051-z.
- [10] WANG J H, LING X Z, LI Q L, et al. Accumulated permanent strain and critical dynamic stress of frozen silty clay under cyclic loading [J]. *Cold Regions Science and Technology*, 2018, 153: 130-143. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.05.007.
- (责任编辑:罗容;校对:李脉;英文编辑:郭一鹏)