

# 干湿循环对建筑废弃物改良膨胀土的力学性能试验研究

田富新<sup>1</sup> 何 韬<sup>2,3</sup>

1.广州市第二市政工程有限公司；2.长沙理工大学交通运输工程学院；

3.长沙理工大学公路养护技术国家工程研究中心

**摘要：**针对干湿循环作用下膨胀土路基稳定及耐久性服役问题，提出在膨胀土中掺入建筑废弃物进行物理改良，并通过系列室内性能试验确定建筑废弃物对膨胀土工程性能与膨胀性能的影响规律。然后，通过回弹模量试验、破坏强度试验、永久变形试验定性、定量分析干湿循环次数和建筑废弃物掺入率对混合土样力学性能的耦合影响。结果表明：建筑废弃物对膨胀土工程性能和膨胀性能存在可行改良性和有效抑制性；回弹模量、破坏强度同干湿循环次数成负相关关系，永久变形终值同干湿循环次数成正相关关系；随着建筑废弃物掺入率的提高，回弹模量、破坏强度呈先增大后减小趋势，永久变形终值呈先减小后增大趋势。基于试验结果建立永久变形预估模型，以期改良建筑废弃物-膨胀土在路基建设中的实际应用提供有益参考。

**关键词：**路基；改良建筑废弃物-膨胀土；干湿循环；力学性能；预估模型

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，一直是道路研究人员持续关注的热点问题<sup>[1-3]</sup>。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<sup>[4-5]</sup>。此外，据气候数据显示，我国南方湘赣等地气候闷热，常年多雨，复杂多变的气候环境对路基稳定性具有重要威胁。学者们针对路基土力学性能开展研究，发现土体类型、环境影响等因素对力学性能的影响不可忽视<sup>[6-8]</sup>。因此，从设计、施工和运营维护的多重目的出发，研究干湿循环作用下路基土力学性能的演化对公路建设具有重要的工程意义。

膨胀土在我国南方湿热地区分布广泛，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膨胀土作为路基填料难以避免<sup>[9-10]</sup>。然而，膨胀土是一种具有裂隙性、胀缩性的典型特殊黏性土，其多裂隙、吸水膨胀、失水收缩等工程特性使得膨胀土路基常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<sup>[11-12]</sup>。为保障膨胀土路基运营期内的稳定性与耐久性，目前工程中常见处置方法多为添加外掺剂（如水泥、生石灰）对膨胀土进行改良，但该种改良方法类属于化学改良的范围，其往往具有一定的时效性，且对环境存在一定不利影响。

随着我国基础设施建设以及城镇化的大力推进，相应产生的建筑废弃物数量正在急剧增长。难以处置的巨量建筑废弃物已严重制约城市的可持续发展，其回收、处置、再利用的问题亟待解决<sup>[13-14]</sup>。基于此，本研究选用湖北省荆州市某一级公路改扩建工程路段膨胀土作为试验土样，并在保护环境、提高经济效率的前提下选用沿线房屋拆迁所得建筑废弃物对膨胀土进行改良，从而达到提高膨胀土稳定性的目的；然后，通过系列室内性能试验确定建筑废弃物对膨胀土工程性能与膨胀性能的改良结果；然后，通过回弹模量试验、破坏强度试验、永久变形试验定性、定量分析干湿循环次数和建筑废弃物掺入率对混合土样回弹模量、破坏强度和永久变形终值的耦合影响；最后，基于上述试验结果建立永久变形预估模型，以期改良建筑废弃物-膨胀土在路基建设中的实际应用提供有益参考。

## 1 试验方案

### 1.1 试验材料

本研究所用膨胀土取自湖北省荆州市某一级公路改扩建工程路段，所用建筑废弃物主要成分为混凝土块。来自工程沿线房屋拆迁。依据《公路土工试验规程》(JTG 3430-2020)对两种材料进行系列室内基本性能试验，结果如表 1、表 2 所示。由表 1 可知所用土

样为弱膨胀土，需经过处理后才可填筑路基。

表 1 膨胀土基本物理性能指标

土粒比重	液限/%	塑限/%	最大干密度/ $\rho_d$ / /cm <sup>3</sup>	最佳含水率/%	自由膨胀率/%	粒径分布 mm/%		
						< 0.005	0.005-0.075	0.075-2
2.69	40.2	17.3	1.87	13.15	45	18.41	59.17	22.42

表 2 建筑废弃物基本物理性能指标

天然含水率/%	相对密度	级配指标		粒径分布 mm/%		
		不均匀系数	曲率系数	<0.075	0.075-4.75	>4.75
14.12	2.35	2.78	0.82	7.1	35.6	57.3

### 1.2 建筑废弃物掺入对膨胀土工程性能指标的影响

为有效分析建筑废弃物掺入率对膨胀土工程性能指标的影响，本研究设置六种掺入率（0、10%、20%、30%、40%、50%）的混合土样进行界限含水率试验、击实试验及 CBR 试验，结果如图 1 所示。由图 1 (a) - (c) 可知，随着掺入率的提高，液限和塑性指数逐渐减小而塑限逐渐增大，且当掺入率超过 10% 时，塑限增长速率陡然增大。由图 1 (d) - (e) 可见，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，并于 10% 掺入率时达到峰值。由图 1 (f) 可知，CBR 值同掺入率成正相关关系，且当掺入率小于 10% 时其增长速率较大，当掺入率大于 10% 后其增长速率逐渐降低。试验结果表明建筑废弃物对膨胀土工程性能存在可行改良性。

### 1.3 建筑废弃物掺入对膨胀土膨胀性能指标的影响

依据规范 JTG 3430-2020，对六种掺入率（0、10%、20%、30%、40%、50%）的混合土样进行膨胀性试验，结果如图 2 所示。由图 2 不难看出：自由膨胀率随掺入率的提高而显著减小。当掺入率从 0 提高至 10%、20%、30%、40%、50% 时，其自由膨胀率分别减小 71.4%、59.6%、47.1%、43.2% 和 38.6%。无荷膨胀率随掺入率的提高而逐步减小，当掺入率从 0 提高至 50% 时，无荷膨胀率从 10.75% 减小至 7.79%。尽管混合土样的无荷膨胀率小于纯膨胀土，但两者差值并不明显，即建筑废弃物对膨胀土的无荷膨胀率影响较小。有荷膨胀率与膨胀力随掺入率的提高而逐步减小，且当掺入率小于 10% 时其减小速率较大，当掺入率大于 10% 后其减小速率逐渐降低。试验结果表明建筑废弃物对膨胀土膨胀性能存在有效抑制作用。

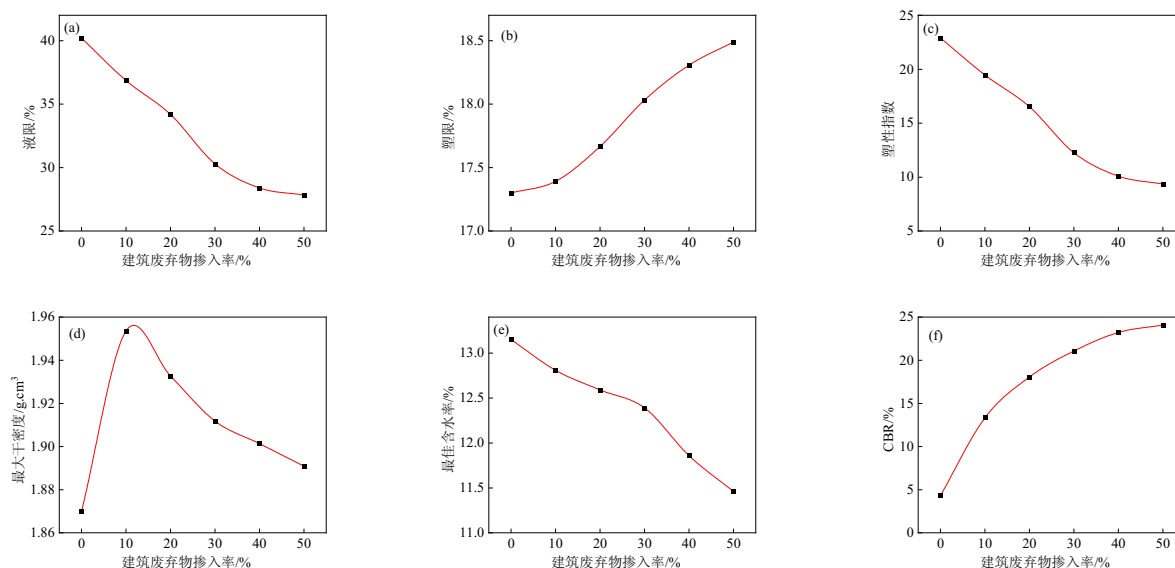


图1 工程性能试验结果

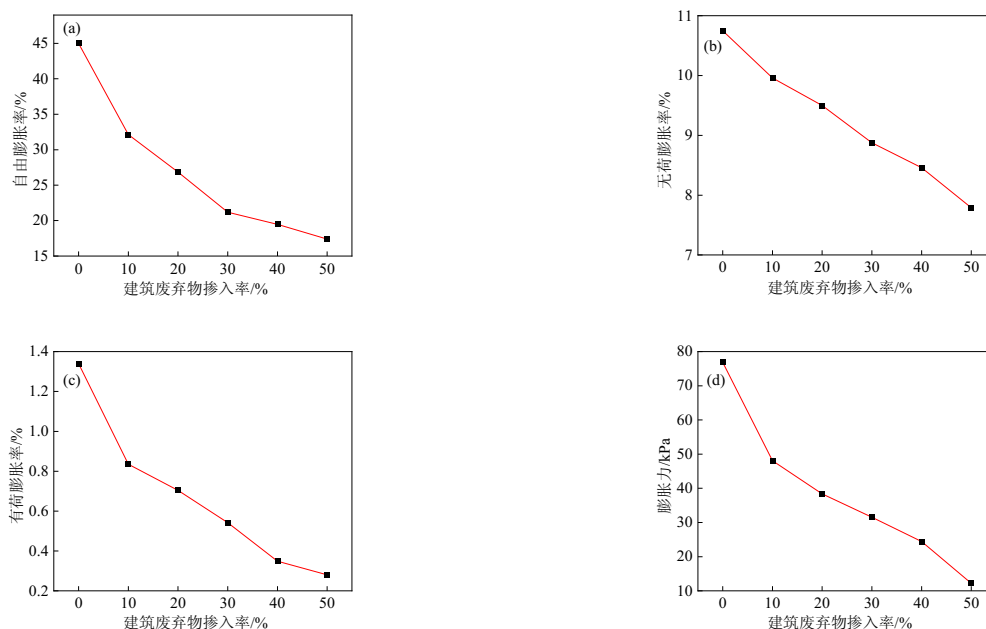


图2 膨胀性试验结果

#### 1.4 试验过程

基于上述试验结果,通过静压法制备建筑废弃物掺入率为0、10%、20%、30%、40%、50%,压实度为96%,含水率为最佳含水率,直径及高度分别为15cm、30cm的圆柱形建筑废弃物-膨胀土试件。成型过程中,试件的实际含水率、压实度与目标误差控制在1%以内。然后,通过干湿交替试验机对成型试件进行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:将试件放置密封箱中进行增湿处理,直至试样吸水饱和(增湿饱和过程耗时约为48h),饱和完成后在25℃的温度下进行风干处理,直至试件质量降低至增湿前的初始质量。最后,密封包裹试件静置一昼夜后,分别通过室内承载板法和Dynatriax100/14全自动三轴试验系统进行回弹模量试验、破坏强度试验及永久变形试验。其中,破坏强度试验中围压选取为28kPa,加载应变速率为0.02mm/s,当试件在轴向应变达到15%前发生破坏,则取其轴向应力峰值点作为破坏强度,若试件在轴向应变达到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。永久变形试验中围压选取28

kPa,偏应力选取28kPa,加载波形为半正弦波,频率为1Hz,加载时间为0.2s,间歇时间为0.8s,加载次数为10000次。

## 2 结果与分析

### 2.1 改良建筑废弃物-膨胀土的回弹模量

不同建筑废弃物掺入率的混合土样在干湿循环作用下的回弹模量演变如图3所示。由图3不难看出,随着干湿循环次数的逐步增大,土样回弹模量随之减小。以10%掺入率工况为例分析可知土样在0、1、2、3、4、5次干湿循环下的回弹模量分别为124MPa、89MPa、74MPa、63MPa、52MPa、48MPa,后者衰减幅度较0次干湿循环而言分别衰减了28.2%、40.3%、49.1%、58.1%和61.2%。同样,由图3可知,土样回弹模量随掺入率提高呈先增加后减小趋势,且在掺入率为10%时达到峰值。以0次干湿循环工况为例分析,当掺入率从0增大至10%时回弹模量增长25.8%,当掺入率从10%增大至50%时回弹模量相较于前者分别减小18.4%、16.5%、29.9%、15.7%。可见,干湿循环次数与建筑废弃物掺入率对混合土样的回弹模量有着较大影响。

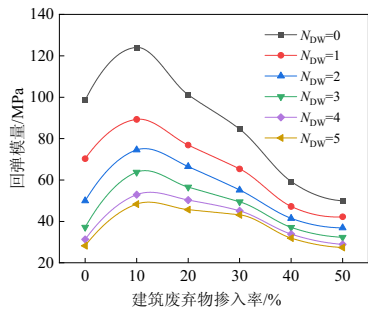


图3 回弹模量试验结果

### 2.2 改良建筑废弃物-膨胀土的破坏强度

不同建筑废弃物掺入率的混合土样在干湿循环作用下的破坏强度演变如图4所示。由图4不难看出：

(1) 混合土样破坏强度值随干湿循环次数的提高而逐渐减小，且在4次干湿循环后趋于稳定。

(2) 在同一建筑废弃物掺入率下，1次干湿循环后破坏强度的衰减幅度最大，可达总衰减幅度的30%以上。这是由于土样内部在1次干湿循环后产生大量微裂缝，使得土团粒分散为若干土颗粒，从而导致土样内部孔隙率增加且颗粒间黏结作用衰减，反映在宏观层面则表现为土样承载力快速衰减。

(3) 随着干湿循环次数的提高，混合土样在4-5次干湿循环后破坏强度逐渐趋于稳定。这是由于土样内部微裂缝大都产生在1次干湿循环时，随着干湿循环次数的进一步提高，微裂缝数量增长放缓且孔隙率及颗粒间距也趋于稳定，即干湿循环作用对土样承载力的影响随着干湿循环次数的提高而逐渐减小。

(4) 在0-5次干湿循环作用下，混合土样破坏强度值随建筑废弃物掺入率的提高呈先增大后减小趋势。这是由于在掺入适量建筑废弃物后，混合土样在干湿循环作用下产生的微裂缝数量显著减小，从而抑制由于水分反复进出所导致的破坏强度衰减。但当建筑废弃物掺入率过高时，会导致混合土样内部空间结构改变从而降低土样承载力，即破坏强度的急剧衰减。

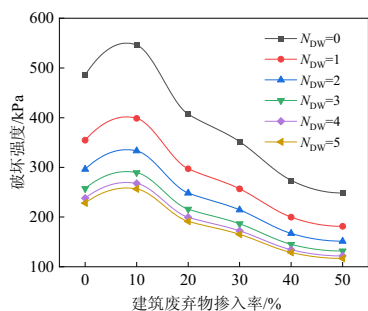


图4 破坏强度试验结果

### 2.3 改良建筑废弃物-膨胀土的永久变形

不同建筑废弃物掺入率的混合土样在干湿循环作用下的永久变形终值演变如图5所示。由图5可知，在同一建筑废弃物掺入率下，混合土样永久变形终值随干湿循环次数的提高呈增长趋势。增长过程大致可分为快速增长阶段、慢速增长阶段、增长稳定阶段。以10%建筑废弃物掺入率工况为例分析可知，永久变形终值在第1、2次干湿循环过程中处于快速增长阶段，在第3、4次干湿循环过程中处于慢速增长阶段，在第5次干湿循环过程中处于增长稳定阶段。这是由于混合土样内部细颗粒在干湿循环作用下进行位置迁移，从而使得土样局部级配变化，永久变形终值增长。此外，当土样湿化时，水分的润滑作用导致颗粒接触部位的摩擦因数降低，细集料随着水分而流失，打破了摩擦平衡状态，使得颗粒之间发生进一步的错动位移。在两次干湿循环过程后，永久变形终值变化趋于平缓，

究其原因干湿循环作用大大削弱了细粒料的填充作用和黏结强度，混合土样在经过多次干湿循环后永久变形终值的大小主要受粗粒料骨架效应影响。

由图5可知，改良建筑废弃物-膨胀土在同一干湿循环次数下的永久变形终值随建筑废弃物掺入率提高呈先减小后增长趋势，且当掺入率达到10%时，永久变形终值达到最小值。以1次干湿循环工况为例分析可知，0、10%掺入率下的永久变形终值分别为1.57%和1.38%，后者较前者相比减小了12.1%；当掺入率从10%分别增长至20%、30%、40%、50%时，其永久变形终值分别为1.48%、1.61%、1.74%、1.77%，相较于10%掺入率下永久变形终值分别增大7.6%、17.2%、26.4%及29.1%；其中，当掺入率大于30%后，改良建筑废弃物-膨胀土永久变形终值大于膨胀土。这是由于掺入膨胀土中的不规则建筑废弃物构成了受力骨架结构，当掺入率达到10%时，混合土样内部结构最为稳定，反映在宏观上则表现为永久变形终值在10%掺入率时达到谷值；随着建筑废弃物掺入率的持续增高，其膨胀土颗粒含量逐渐降低，从而导致其内部黏聚力下降而摩擦力上升，当建筑废弃物含量增长所带来的摩擦力小于膨胀土含量减小所失去的粘聚力时，其宏观表现为永久变形终值逐渐增长。

图6反映了改良建筑废弃物-膨胀土的永久变形与加载次数的关系曲线。可以看出，试样的永久变形在加载前期迅速增加，最高可达永久变形终值的70%以上。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，其变形趋于定值。以0次干湿循环、10%建筑废弃物掺入率工况为例进行分析，发现试件永久变形值在前2000次加载过程中从0增大至0.77%，而在9000次至10000次加载过程中仅增大0.02%。这是由于试件内部孔隙随着加载次数的增加而不断致密，从而增强了试件内部对加载应力的承载能力。

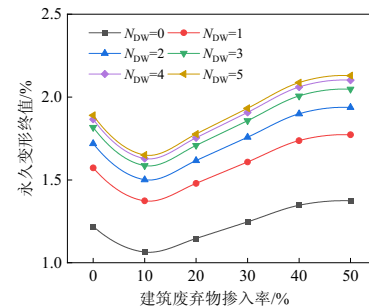


图5 永久变形终值试验结果

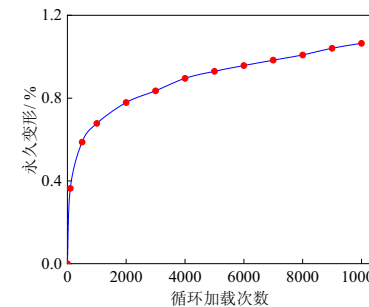


图6 永久变形与加载次数之间的关系曲线

### 3 永久变形预估模型的建立及验证

道路运营期间路基的永久变形相较于回弹模量、破坏强度等力学特性而言难以定值，因此，建立一种简单但有效的路基永久变形有效定值方法显得尤为必要。通常而言，室内三轴试验是一种普遍认可测定永久变形的的方法。然而，考虑到三轴试验的成本较高、耗时较长且需专业人员进行操作，本研究尝试通过建立一个精确、快速的预估方法来获得改良建筑废弃物-膨胀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：方法一，建立较为复杂的本构模型来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，计算量较大，不利于在工程中普遍推广；方法二为经验拟合法，其定义是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，该方法虽然较方法一精确度略低，但胜在计算简便、方便应用。因此，本研究应用方法二对改良建筑废弃物-红黏土在循环荷载作用下的永久变形进行预估。

如前文所述，改良建筑废弃物-膨胀土永久变形与加载次数、干湿循环次数、建筑废弃物掺入率有着显著相关性。因此，本研究基于永久变形试验结果建立了一个考虑加载次数、干湿循环次数、建筑废弃物掺入率耦合影响的永久变形预估模型，如式(1)所示，模型参数及拟合优度如表3所示。为验证本研究所建模型的合理性与适用性，选用表4所示工况下改良建筑废弃物-膨胀土的永久变形试验数据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)。不难看出，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，符合一般工程需要。

$$\varepsilon_p = \alpha_1 N_L^{\alpha_2} \ln(N_{DW} + e)^{\alpha_3} (\alpha_4 \lambda_s^2 + \alpha_5 \lambda_s + 1) \quad (1)$$

式中： $\varepsilon_p$ 为永久变形， $N_L$ 为加载次数， $N_{DW}$ 为干湿循环次数， $\lambda_s$ 为建筑废弃物掺入率， $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ 、 $\alpha_4$ 、 $\alpha_5$ 为模型参数。

表3 新建模型拟合结果

$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$\alpha_5$	$R^2$
0.11	0.27	0.63	1.74	-0.42	0.97

表4 模型验证的相应工况

参考变量	选取数值
建筑废弃物掺入率	5、15、25、35、45
干湿循环次数	0、1、2、3、4、5
加载次数	100、500、900、1000、2000、3000、4000、5000、6000、7000、8000、9000、10000

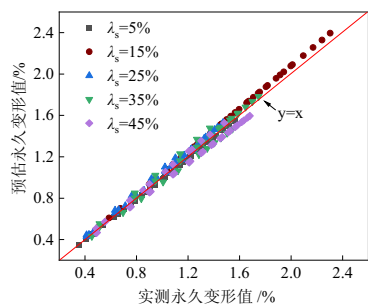


图7 新模型验证结果

#### 4 结论

(1) 掺入建筑废弃物可提高膨胀土的塑限、最大干密度与CBR值，且降低液限、塑性指数和最佳含水率。试验结果表明建筑废弃物对膨胀土工程性能存在可行改良性。

(2) 建筑废弃物-膨胀土混合土样的自由膨胀率比纯膨胀土有显著减小，且无荷膨胀率、有荷膨胀率与膨胀力随掺入率的提高而逐步减小。试验结果表明建筑废弃物对膨胀土膨胀性能存在有效抑制作用。

(3) 当建筑废弃物掺入率相同时，回弹模量、破坏强度同干湿循环次数成负相关关系，永久变形终值同干湿循环次数成正相关关系；当干湿循环次数相同时，回弹模量、破坏强度随建筑废弃物掺入率的提高先增加后减小，且在掺入率为10%时达到峰值，永久

变形终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。

(4) 基于永久变形试验结果建立考虑加载次数、干湿循环次数、建筑废弃物掺入率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，便于为改良建筑废弃物-膨胀土的实际工程应用提供有效参考。

#### 参考文献：

[1]Chu X, Dawson A, Thom N. Prediction of resilient modulus with consistency index for fine-grained soils[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 129: 36-44.

[2]Alnedawi A, Nepal K P, Ameri R. New shakedown criterion and permanent deformation properties of unbound granular materials[J]. *Journal of Modern Transportation*, 2019, 27(2): 108-119.

[3]Lima C, Motta L, Arago F. A permanent deformation predictive model for fine tropical soils considering the effects of the compaction moisture content on material selection[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 28(1):100534.

[4]Maghool F, Senanayake M, Arulrajah A, et al. Permanent Deformation and Rutting Resistance of Demolition Waste Triple Blends in Unbound Pavement Applications[J]. *Materials*, 2021, 14(4): 347-363.

[5]Corradini A, Cerni G, Porceddu P R. Comparative study on resilient modulus of natural and post-quake recycled aggregates in bound and unbound pavement subbase applications[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 297(6):123717.

[6]Miura M, Hill P W, Jones D L. Impact of a single freeze-thaw and dry-wet event on soil solutes and microbial metabolites[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 145: 218-225.

[7]Silva M, Ribeiro M, Pereira F, Fabbri G T. Effect of compaction water content and stress ratio on permanent deformation of a subgrade lateritic soil[J]. *Transportation Geotechnics*, 2021, 26: 58-67.

[8]LI Zhe, LIU Lu-lu, YAN Shi-hao, ZHANG Meng-ke, XIA Jing-jing, XIE Yong-li. Effect of freeze-thaw cycles on mechanical and porosity properties of recycled construction waste mixtures [J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 210: 347-363.

[9]汪时机,王晓琪,李达,李贤,梁广川,等人.膨胀土干湿循环裂隙演化及其土-水特征曲线研究[J].*岩土工程学报*,2021,43(S1):58-63.

[10]叶云雪,邹维列,韩仲,谢鹏,张俊峰,徐永福.考虑初始状态影响的膨胀土一维膨胀特性研究 [J]. *岩土工程学报*,2021,43(08):1518-1525.

[11]Kishor R, Singh V P, Srivastava R K. Mitigation of Expansive Soil by Liquid Alkaline Activator Using Rice Husk Ash, Sugarcane Bagasse Ash for Highway Subgrade[J]. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2021:1-16.

[12]Tiwari N, Satyam N, Singh K. Effect of Curing on Micro-Physical Performance of Polypropylene Fiber Reinforced and Silica Fume stabilized Expansive Soil Under Freezing Thawing Cycles[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1):7624.

[13]Delongui L, Matuella M, Núñez W, et al. Construction and demolition waste parameters for rational pavement design [J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 168: 105-112.

[14]Arulrajah A, Mohammadinia A, D'Amico A, et al. Cement kiln dust and fly ash blends as an alternative binder for the stabilization of demolition aggregates [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 145: 218-225.