

# 建筑垃圾膨胀土回填地基工程特性及应用研究

翟聚云<sup>1</sup>, 樊姝芳<sup>2</sup>, 言志信<sup>1</sup>, 袁延召<sup>1</sup>, 朱晗宇<sup>1</sup>, 张清鑫<sup>1</sup>

(1. 河南城建学院 土木与交通工程学院, 河南 平顶山 467000; 2. 东莞市水务技术中心, 广东 东莞, 523413)

**摘要:**基于膨胀土工程病害处治及建筑垃圾资源化利用的社会需求,对建筑垃圾膨胀土作为地基回填材料进行研究.选取一特定级配的建筑垃圾,试验得到不同建筑垃圾膨胀土质量配比试样的颗粒级配、胀缩、固结及抗剪强度特性,讨论不同建筑垃圾膨胀土配比的工程特征.试验结果表明:膨胀土中掺入建筑垃圾后,力学特性显著提高.随着掺入量的增加,胀缩变形、固结及抗剪强度特性都得到有效改善.建筑垃圾掺量为 40%~50% 时达到优选配比.对建筑垃圾质量含量 45% 夯实混合土体的变形及强度等特征进行了试验研究,并对该混合土体的填土地基变形量及填土路堤边坡稳定系数进行计算.对煤矸石多孔砖建筑垃圾再利用提供了重要的参考,将建筑垃圾变废为宝,改良膨胀土不良特性具有重要的意义.

**关键词:**建筑垃圾;膨胀土;工程特性

中图分类号:TU411

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2020)03-0321-07

## Study on the engineering characteristics and application of construction waste expansive soil backfill foundation

ZHAI Juyun<sup>1</sup>, FAN Shufang<sup>2</sup>, YAN Zhixin<sup>1</sup>, YUAN Yanzhao<sup>1</sup>, ZHU Hanyu<sup>1</sup>, ZHANG Qingxin<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Henan University of Urban Construction,

Henan Pingdingshan 467000, China;

2. Dongguan Water Technology Center, Guangdong Dongguan 523413, China)

**Abstract:** The study of construction waste expansive soil as foundation backfill material is carried out, because of the treatment of engineering diseases of expansive soil and the social demand of resource utilization of construction waste. A specific gradation of construction waste was selected to test the particle gradation, expansion and contraction, consolidation and shear strength of samples with different proportions of expansive soil mass of construction waste. The improvement effect of different construction waste contents on expansive soil was discussed. Test results show that the mechanical properties of expansive soil are significantly improved by adding construction waste. With the increase of incorporation, the characteristics of expansion and contraction deformation, consolidation and shear strength are effectively improved. When the mixing amount of construction waste is 40%~50%, the mixed soil reaches the optimal ratio. The deformation and strength characteristics of compacted soil with 45% mass content of construction waste were studied. The deformation of the foundation and the stability coefficient of the embankment slope are calculated. This paper provides an important reference for the reuse of construction waste of coal gangue porous brick. It is of great significance to turn construction waste into treasure and improve the poor properties of expansive soil.

**Key words:** construction waste; expansive soil; engineering properties.

膨胀土具有水敏感性,常常导致滑坡、滑塌、泥石流等灾害,膨胀土不良特性在工程中造成的破坏极为常见<sup>[1-4]</sup>.建筑垃圾的主要成分破碎后形成的骨料,有较高强度、硬度、水稳定性和耐久性等特点,建筑垃圾资源化利用迫在眉睫.

研究者对膨胀土和建筑垃圾做了大量的工作,对膨胀土不良特性改良有较完善的理论和较丰富

的实践.张雁等(2015)<sup>[5]</sup>对石灰煤矸石改良膨胀土进行研究,认为石灰煤矸石优于石灰改良膨胀土的工程性质;王建立等(2019)<sup>[6]</sup>对利用环氧树脂—水泥复合改良加固膨胀土进行试验研究,得到土体力学性能得到显著改善,增强了土样的微观复合效应. Mohanty, Soumendra K. 等(2017)<sup>[7]</sup>, Soltani, Amin 等(2017)<sup>[8]</sup>对工业废料对膨胀土改

收稿日期:2019-11-20 修改稿日期:2020-05-02

基金项目:平顶山科技创新人才基金资助项目(2017010);河南省高等学校重点科研基金资助项目(18B560001);河南城建学院 2017 科研能力提升工程资助项目

第一作者:翟聚云(1968—),女,硕士,教授,主要从事特殊土地基研究. E-mail: zhajuyun@hncj.edu.cn

良进行研究; Kolay P K 等(2016)<sup>[9]</sup>对利用砂和粉煤灰改良膨胀土进行研究; Alazigha, Dennis Pere. 等(2016)<sup>[10]</sup>对木质素磺酸盐处理膨胀土进行研究; 陈永青等(2019)<sup>[11]</sup>对生物酶改良膨胀土进行研究。

建筑垃圾资源化是研究的一个热点问题, 为了推进建筑垃圾资源化的利用, 国内外对建筑垃圾回收再利用的研究取得了许多成果<sup>[12-13]</sup>。陈雅芝(2019)<sup>[14]</sup>对国内外建筑垃圾资源化利用政策进行研究; 郑龙海等(2019)<sup>[15]</sup>, 胡魁等(2016)<sup>[16]</sup>对建筑垃圾分类系统进行了研究, 针对建筑垃圾再生利用对建筑垃圾分类提出了较高要求, 以达到降低成本的目的; 李述俊等(2019)<sup>[17]</sup>对建筑垃圾再生微粉基本性能进行研究; 朱斌泉等(2018)<sup>[18]</sup>对建筑废弃物路用性能及施工工艺研究; Poon C. S. 等(2002)<sup>[19]</sup>对利用建筑垃圾生产砖块进行研究; I. F. Sáez del Bosque, et al. (2019)<sup>[20]</sup>, 对建筑垃圾作为水泥掺量进行研究, 张剑挥等(2016)<sup>[21]</sup>对建筑垃圾在沙漠防风中的利用进行研究。

在已有的研究中, 对建筑垃圾膨胀土混合土体特征的研究鲜有报道。本文以平顶山膨胀土为研究对象, 对其混合土体进行研究, 既有效改良了膨胀土的不良特性, 又回收和利用了建筑垃圾, 将建筑垃圾变废为宝, 长久稳定地作为地基的一部分, 具有良好的经济效益、社会效益和环境效益。

## 1 试验材料的选取

试验建筑垃圾选用拆除的煤矸石多孔砖砌墙进行破碎, 主要成分为砖块及砌筑砂浆。建筑垃圾破碎使用 PE 型鄂式破碎机, 然后人工分选和级配, 试验选用颗粒组成见表 1。

表 1 建筑垃圾试验颗粒组成  
Tab. 1 Construction waste test particle composition

颗粒直径 /mm	质量百分比 /%	颗粒直径 /mm	质量百分比 /%
>20	10	0.5~1	18
10~20	15	0.25~0.5	15
5~10	20	<0.25	2
1~5	20		

选用膨胀土为棕红色粘土, 取自平顶山市建设路与东风路交叉口处, 化学成分及含量为  $\text{SiO}_2$ : 53.26%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 20.37%;  $\text{CaO}$ : 11.02%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 3.46%;  $\text{CuO}$ : 1.275%;  $\text{K}_2\text{O}$ : 0.840; 其他: 9.775%。

膨胀土的塑限 22.85%, 17 mm 液限 45.72%,

10 mm 液限 38.2%, 自由膨胀率 55%。颗粒直径 2~0.05 mm 占 45%, 0.05~0.005 mm 占 36%, 小于 0.005 mm 占 19%。

对风干的膨胀土和风干的建筑垃圾按质量比进行混合, 试样按建筑垃圾占总混合土体质量含量 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% 7 组试样, 分别进行变形、固结及强度试验。7 组混合试样的颗粒级配曲线见图 1。不均匀系数, 为

$$C_u = d_{60}/d_{10} \quad (1)$$

曲率系数, 为

$$C_c = d_{30}^2/(d_{60} \times d_{10}) \quad (2)$$

式中:  $d_{10}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$  分别为颗粒级配曲线上相应于 10%、30%、60% 含量的粒径, mm。

同时满足  $C_u > 5$ ,  $1 > C_c > 3$ , 级配良好<sup>[16]</sup>, 由图 1 和图 2 可知, 级配良好的建筑垃圾掺量范围为 40%~52%。

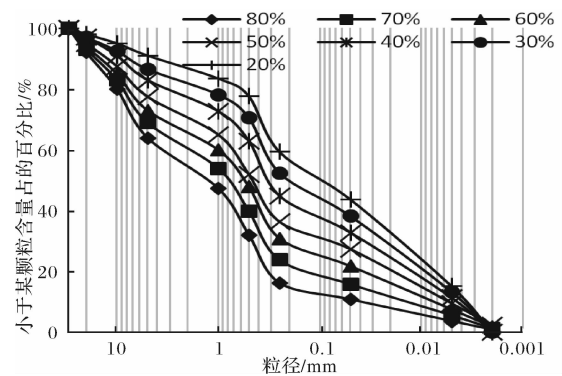


图 1 不同配比下颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle gradation curve at different proportions

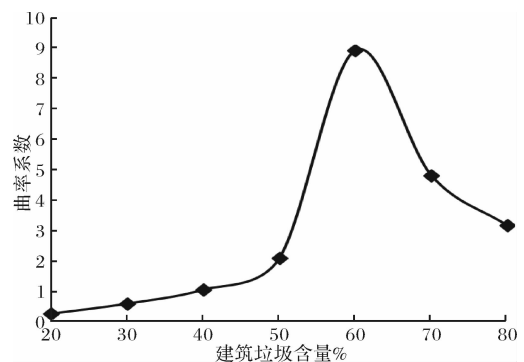


图 2 级配曲率系数随建筑垃圾质量含量变化

Fig. 2 Changes of gradated curvature coefficient with the content of mass percentage of expansive soil

## 2 试验结果

### 2.1 收缩变形特征

将确定配比的混合土样, 制成预定的含水量, 取试样干密度为  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , 制作试样采用体积为  $30 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}^3$  的环刀, 计算将某含水量混合土样需

要的质量,将其均匀压入环刀中,收缩试验精确测得建筑垃圾含量20%初始含水量29.00%,建筑垃圾含量30%初始含水量27.90%,建筑垃圾含量40%初始含水量26.16%,建筑垃圾含量50%试样初始含水量27.59%。

将土样从环刀中推出,室内温度为20°,室内收缩试验在收缩仪上进行,随着收缩试验的进行,测得不同时间竖向变形量和试块质量,从而计算得到相应的含水量,不同建筑垃圾含量的混合土体,收缩率随含水量减小的变化见图3。

线缩率为试样收缩过程中,竖向收缩变形量和原始高度的比值:

$$\delta_s = \frac{\Delta h}{h_0} \quad (3)$$

式中: $\delta_s$ 为线缩率; $\Delta h$ 为收缩变形量; $h_0$ 为试样原始高度。

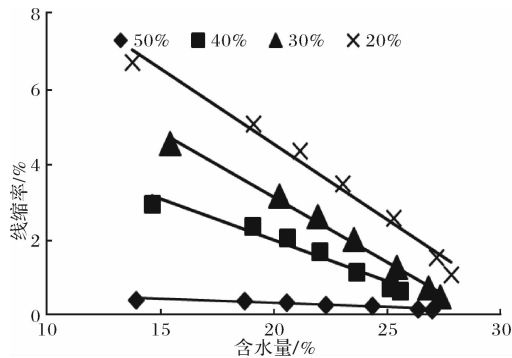


图3 线缩率随含水量的变化曲线

Fig. 3 Curve of linear shrinkage with water content

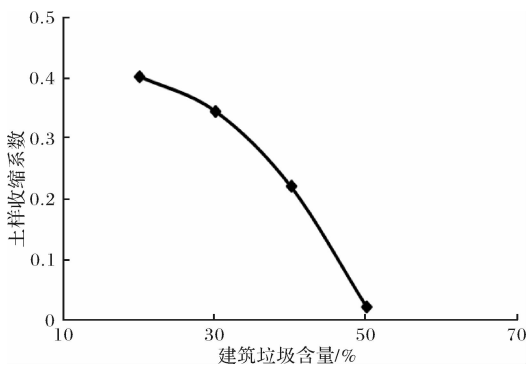


图4 收缩系数随建筑垃圾掺量的变化曲线

Fig. 4 Shrinkage coefficient varies with the content of construction waste

为了准确表达土体的收缩特性,引入收缩系数 $\lambda_s$ ,含水量每减小1%的线缩率的变化叫收缩系数, $\lambda_s = \frac{\Delta \delta_s}{\Delta w}$ 数值等于上图直线的斜率<sup>[22]</sup>。收缩系数随建筑垃圾掺量的变化见图4,可以看出,随着建筑垃圾含量的升高试样收缩性能急剧降低,建筑垃圾含量40%的收缩系数为0.2209。

## 2.2 膨胀变形特征

将混合土样均匀压至 $30 \times 2 \text{ cm}^3$ 的环刀中,采用侧限变形试验,膨胀试验在无荷膨胀仪进行,试验得出建筑垃圾含量20%,30%,40%的试样在不同含水量的膨胀率见图5。膨胀率为试样膨胀过程中膨胀变形量与原始高度之比。

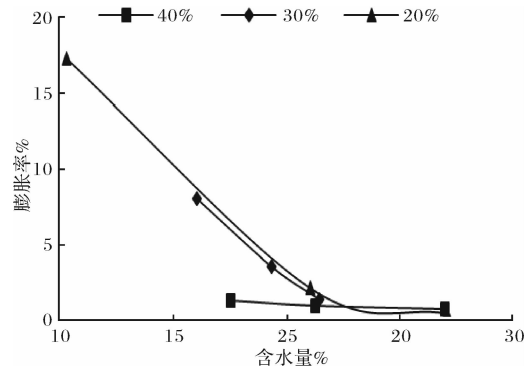


图5 膨胀率随含水量变化图

Fig. 5 Variation of expansion rate with water content

为了更准确表达土体的膨胀特性,引入膨胀系数 $\alpha$ ,含水量每增加1%的膨胀率增加量叫膨胀系数。膨胀率与试样的初始含水量有密切关系,而膨胀系数只与试样本身的土质成分与结构有关,膨胀率随含水量变化见图5,图中曲线的斜率为膨胀系数,可得建筑垃圾含量40%的土样膨胀系数为 $\alpha=0.064$ 。

由文献23,根据膨胀系数和收缩系数的特征参数判断,膨胀系数与自由膨胀率有下列关系:

$$\alpha = 0.318 + 0.0037F_s \quad (4)$$

式中: $\alpha$ 为膨胀系数,%; $F_s$ 为自由膨胀率,%

收缩系数与自由膨胀率有下列关系:

$$\lambda_s = 0.428 + 0.0049F_s \quad (5)$$

式中, $\lambda_s$ 为收缩系数,%;

由此可知,自由膨胀率为40%时, $\alpha=0.466$ ; $\lambda_s=0.624$ 。

建筑垃圾含量为40%试样膨胀系数为0.064,收缩系数为0.2209,因此可以判定为非膨胀土。

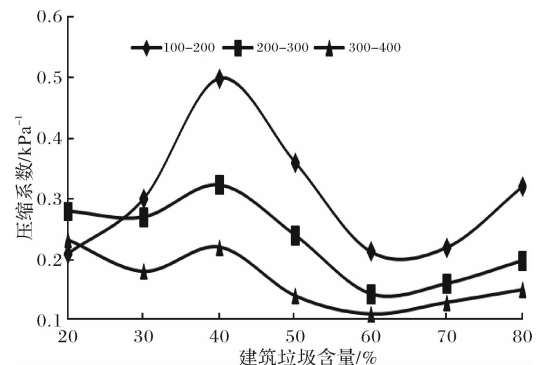


图6 压缩系数随压力的变化

Fig. 6 Changes of compression coefficient with pressure

2.3 固结特征

对不同建筑垃圾掺量的试样进行固结试验, 试验的制备干密度为  $1.5\text{ g/cm}^3$ , 含水量  $25.0\%$ , 荷载级数选用  $50\text{ kPa}$ 、 $100\text{ kPa}$ 、 $200\text{ kPa}$ 、 $300$

$\text{kPa}$ 、 $400\text{ kPa}$ , 每加一级荷载后稳定后读最终读数, 再加下一级荷载. 不同级数压力的压缩系数如图 6 所示, 不同建筑垃圾质量含量变形特征及原因分析见表 2.

表 2 不同建筑垃圾质量含量变形特征及原因分析

建筑垃圾质量 含量含量/%	变形特征	原因分析
20~30	试样变形量主要为孔隙中水排出引起, 相同加载级数的变形量随建筑垃圾含量变化不明显.	建筑垃圾悬浮在土体中
40~50	压缩系数一直处于较大的数值, 且荷载较小时压缩系数最大, 随着荷载的加大, 压缩系数随建筑垃圾含量的变化较平缓.	建筑垃圾表面粗糙, 多裂隙, 竖向压力较小时膨胀土与建筑垃圾混合土体接触不密实, 随着荷载增大, 由于颗粒级配良好, 孔隙的减小主要为膨胀土与建筑垃圾之间的颗粒挤密作用.
60~70	在每级荷载作用下压缩系数曲线较平缓, 且接近 $70\%\sim 80\%$ 试样.	此时明显显示了建筑垃圾颗粒骨架作用, 试样体积主要由建筑垃圾颗粒骨架所控制.
70~80	较小压力时, 压缩系数较大, 随着压力增加建筑垃圾颗粒破碎, 压实度较好.	建筑垃圾含量较大, 建筑垃圾棱角和裂缝较多, 加载过程接触面应力集中产生破碎.

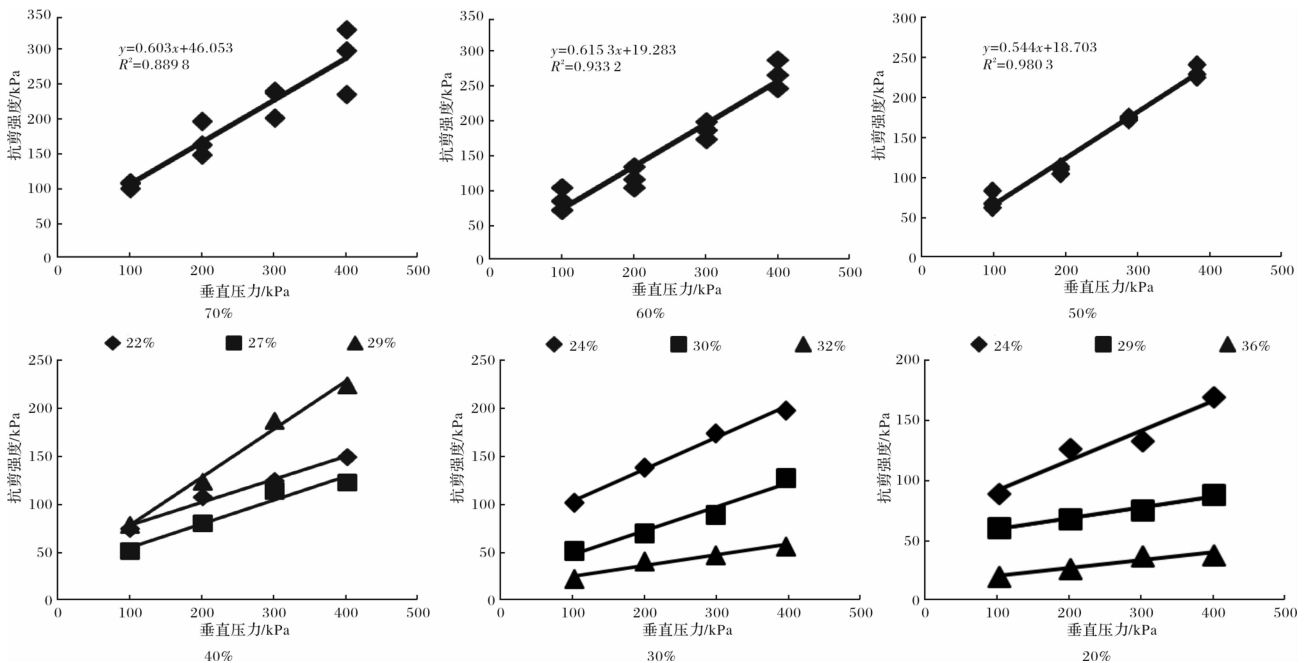


图 7 不同建筑垃圾含量的试样抗剪强度曲线

Fig. 7 Shear strength curves of samples with different contents of construction waste

由此可见, 采用建筑垃圾含量  $40\%\sim 50\%$  能够使膨胀土与建筑垃圾之间的颗粒挤密效果较好, 填筑时应分层充分压实.

2.4 强度特征

为了揭示填实后混合试样的强度特征, 对不同配比的试样进行了直剪试验, 试验的制备采用干密度为  $1.5\text{ g/cm}^3$ , 其抗剪强度曲线如图 7 所示, 不同建筑垃圾含量的强度特征见表 3.

从抗剪强度曲线可以看出, 建筑垃圾含量应大于  $30\%$ . 从混合试样胀缩变形特征分析, 建筑垃圾含量不易小于  $40\%$ ; 从强度特征分析, 建筑垃圾含量大于  $30\%$ . 从颗粒级配特征分析, 建筑垃圾含量  $40\%\sim 52\%$  颗粒级配良好. 从压缩特征来分析, 建筑垃圾含量不小于  $40\%$ ; 综合分析得到建筑垃圾含量  $40\%\sim 50\%$  配比为优选配比.

表 3 不同建筑垃圾含量的强度特征

Tab. 3 Intensity characteristics of different construction waste contents

建筑垃圾质量含量/%	变形特征	原因分析
20 和 30	与膨胀土抗剪强度基本相同, 含水量接近液限情况下抗剪强度降到趋近于 0.	建筑垃圾悬浮在土体中, 对强度变化影响不明显.
40	含水量较小时, 接近含量 50% 的强度特征. 含水量 29% 时抗剪强度升高.	含水量增加促使了颗粒之间的滑移, 使土体进一步挤密, 表现出了良好的颗粒级配特征.
50、60 和 70	抗剪强度受含水量的影响不明显.	强度曲线受建筑垃圾特性控制为主.

2.5 优选配比混合土体工程特征

取建筑垃圾质量含量 45% 的混合土体进行击实试验, 击实锤重 2.7 kg, 落距 45 cm, 锤底直径 50 mm, 击数 27 次, 得出最优含水量 16.5%, 最大干密度 1.72 g/cm<sup>3</sup>.

(1) 干湿循环后强度特性

地表浅层土层稳定计算应采用干湿循环稳定后的强度参数, 经对压实土体在含水量区间 20%~10% 的抗剪强度试验, 得干湿循环稳定后的抗剪强度方程为:

$$\tau_f = \sigma \times \tan 19^\circ + 50.133 \quad (6)$$

(2) 胀缩变形特性

取击实后土样, 其含水量 16.5%、干密度 1.72 g/cm<sup>3</sup>, 进行膨胀试验, 测得其膨胀率为 1.5%.

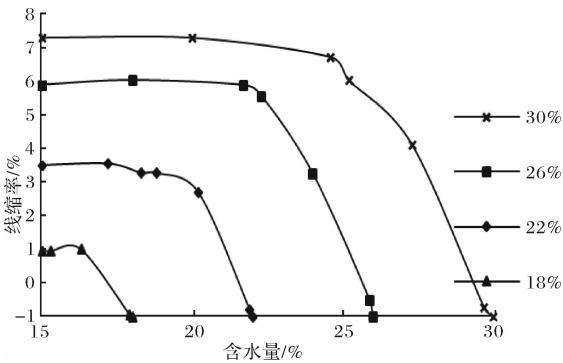


图 8 不同初始含水量混合土样收缩率曲线

Fig. 8 The Shrinkage curves of mixed soil

对击实后取得的混合土样, 用滴管缓慢加水至需要含水量, 密封静置 24 h 至水分均匀, 进行不同初始含水量的收缩试验, 线缩率随含水量的变化见图 8, 由图 8 可知, 收缩初始阶段为直线, 且相互平行, 直线的斜率为收缩系数. 当收缩进行到一定程度, 收缩变形基本稳定, 但是此时膨胀土没有达到稳定状态, 原因是当含水量较大时, 含水量对试样体积起控制作用, 随着膨胀试验进行, 含水量逐渐降低, 建筑垃圾的大颗粒对体积起控制作用, 土体体积变化极小. 因此虽然含水

量还没有达到膨胀土收缩稳定的含水量, 而混合土体体积已经达到稳定, 而且不同初始含水量的土体, 收缩稳定时含水量也不同.

3 工程应用算例

3.1 填土边坡稳定性

取建筑垃圾含量 45% 压实混合土体, 利用理正软件对边坡稳定系数进行计算. 计算模型见图 9.

地震烈度取 6 度, 地震作用综合影响系数为 0.25, 地震作用重要性修正系数 1.0, 水平地震系数 0.050, 地震力作用土条质心处, 超载取 30 kPa, 水平加速度系数矩形分布, 容重取 1.8 kN/m<sup>3</sup>. 边坡坡高与边坡稳定性系数的关系见图 10.

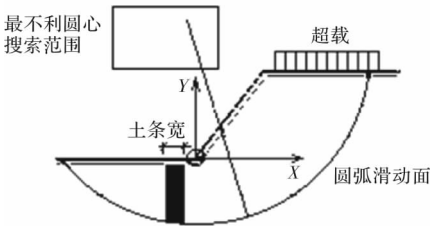


图 9 边坡稳定性计算简图

Fig. 9 The calculation diagram of slope stability

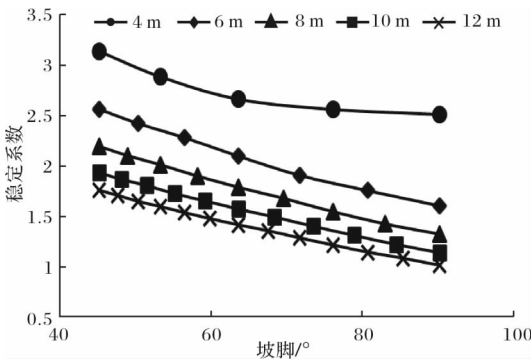


图 10 不同坡高稳定系数随坡角变化曲线

Fig. 10 Curve of slope angle with different slope height stability coefficient

3.2 填土地基胀缩变形量

计算填土地基沉降, 以平顶山为例, 平顶山大气深度为 3.5 m, 膨胀土地基变胀缩变形量应取基

础某点的最大膨胀上升量与最大收缩下沉量之和。

膨胀变形量计算: 因为膨胀土的多裂隙性, 当土体浸水后, 水分沿裂缝渗入土中, 充分吸水膨胀, 大气影响范围内, 膨胀变形量按最大膨胀量计算:  $1.5\% \times 3\,500\text{ mm} = 52.5\text{ mm}$ . 地基土的胀缩变形量应按式(7)计算:

$$s_{es} = \psi_{es} \sum_{i=1}^n (\delta_p + \lambda_{si} \cdot \Delta w_i) h_i \quad (7)$$

式中:  $s_{es}$  为地基土的胀缩变形量, mm;  $\psi_{es}$  为计算胀缩变形量的经验系数, 可取 0.7;  $n$  为自基础底面至计算深度内所划分的土层数, 计算深度可取大气影响深度;  $\delta_p$  为膨胀率;  $\lambda_{si}$  为第  $i$  层土的收缩系数, 应由室内试验确定;  $h_i$  为第  $i$  层土变形计算深度;  $\Delta w_i$  为地基土收缩过程中, 第  $i$  层土可能发生的含水量变化的平均值。

取初始含水量为 30%, 最小含水量为 10%, 1 米处含水量变化值为 0.2, 地基土含水量变化经计算如图 11 所示<sup>[16]</sup>. 由图 8 可知, 初始含水量为 30% 的收缩稳定含水量为 26%, 含水量变化为 0.04, 其相应的深度为 3.15 m.

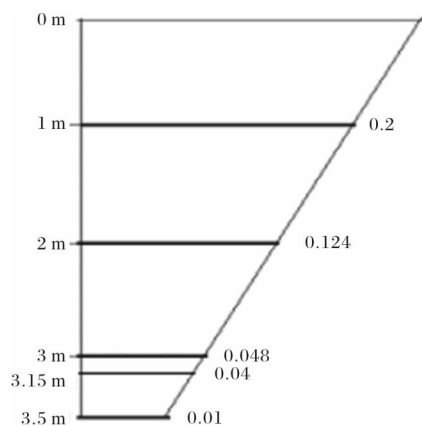


图 11 地基土含水量变化计算图

Fig. 11 Calculation diagram of moisture content change of foundation soil

因此, 0~3.15 m 深度范围内, 由图 8 应采用相同的线缩率 7.5%, 收缩变形量  $S_{S1}$  为:  $S_{S1} = 7.5\% \times 3\,150 = 236.3\text{ mm}$ . 地基深度 3.15~3.5 m 范围内, 含水量变化在 0.01~0.04 之间, 图 8 中初始含水量 30% 试样的线缩率直线段的方程为:  $\delta = -1.2\,972w + 39.071$  ( $R^2 = 0.976$ ). 该深度范围内收缩变形量  $S_{S2}$  为

$$\begin{aligned} S_{S2} &= \int_{3.15}^{3.5} \Delta \delta dh = \int_{3.15}^{3.5} (1.2917 \times \Delta w) dh \\ &= 1.2917 \times \int_{3.15}^{3.5} \Delta w dh \\ &= 1.2917 \times \frac{0.04 + 0.01}{2} \times (350 - 315) \\ &= 0.01130\text{ m} = 11.30\text{ mm} \end{aligned}$$

地基总收缩变形量为

$$\begin{aligned} S_S &= 0.7 \times (S_{S1} + S_{S2}) \\ &= 0.7 \times (236.30 + 11.30) = 173.32\text{ mm} \end{aligned}$$

地基总胀缩变形量:

$$S_{es} = 0.7 \times 52.5 + 173.32 = 210.07\text{ mm}$$

## 4 结论

(1) 选取一特定级配的建筑垃圾与膨胀土混合, 对混合土体进行试验研究, 得到不同配比试样的颗粒级配、胀缩、固结及抗剪强度特性, 膨胀土中掺入建筑垃圾后, 工程特性得到了显著提高。

(2) 建筑垃圾掺量 40%~50% 时为优选配比。

(3) 对建筑垃圾质量含量 45% 夯实混合土体, 根据干湿循环后强度参数及胀缩变形特征, 对工程中填土路堤边坡稳定系数及填土地基变形量进行了计算。

(4) 本文的研究对煤矸石多孔砖建筑垃圾回收再利用提供了重要的参考。

## 参考文献 References

- [1] 陈正汉, 郭楠. 非饱和土与特殊土力学及工程应用研究的进展[J]. 岩土力学, 2019, 40(1): 1-54.  
CHEN Zhenghang, GUO Nan. New developments of mechanics and application for unsaturated soils and special soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(1): 1-54.
- [2] KONG Lingwei, GUO Aiguo. Bearing strength and swelling behavior of Jingmen expansive soil[J]. Road Materials and Pavement Design, 2011, 12(2): 441-450.
- [3] 时伟, 张亮, 杨忠年, 等. 冻融循环条件下膨胀土力学特性试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 480-485.  
SHI Wei, ZHANG Liang, YANG Zhongnian, et al. Experimental study on mechanical properties of expansive soil of artificial preparation under freeze-thaw cycle conditions[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech., (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 480-485.
- [4] ZHAI Juyun, CAI Xiangyong. Strength characteristics and slope stability of expansive soil from Pingdingshan, China[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, doi:10.1155/2018/3293619.
- [5] 张雁, 康雪成, 郭利勇. 石灰煤矸石改良膨胀土工程特性研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2720-2724.  
ZHANG Yan, KANG Xuecheng, GUO Liyong. Engineering properties of expansive soil improved by lime and coal gangue[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2720-2724.
- [6] 王建立, 张家铭, 米敏, 等. 环氧树脂—水泥复合改良加固膨胀土试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50

- (10):209-215.
- WANG Jianli, ZHANG Jiaming, MI Min, et al. Experimental study on expansive soil reinforced with cement and epoxy resin[J]. Yangtze River, 2019, 50 (10): 209-215.
- [7] MOHANTY Soumendra K, PRADHAN Pradip K, MOHANTY Chitta R. Stabilization of expansive soil using industrial wastes[J]. Geomechanics and Engineering, 2017, 12(1): 11-125.
- [8] SOLTANI A, TAHERI A, KHATIBI M, et al. Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2017, 35(4): 1717-1744.
- [9] KOLAY P K, RAMESH K C. Reduction of expansive index. swelling and compression behavior of kaolinite and bentonite clay with sand and class c fly ash[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2016, 34 (1):87-101.
- [10] ALAZIGHA Dennis P, INDRARATNA B, VINOD Jayan S, et al. The swelling behaviour of lignosulfonate-treated expansive soil[J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, 2016, 169(3):182-193.
- [11] 陈永青, 刘畅平, 方炫强, 等. 生物酶改良膨胀土的修正殷宗泽模型[J]. 岩土力学, 2019, 40(9): 3515-3523.
- CHEN Yongqing, LIU Changping, FANG Xuan-qiang, et al. Modified Yin's double-yield-surface model for bioenzyme-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(9): 3515-3523.
- [12] 魏英烁, 姬国强, 胡力群. 建筑垃圾回收再利用研究综述[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(9): 2842-2846.
- WEI Yingshuo, JI Guoqiang, HU Liqun. Research summary on recycling of construction waste [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(9): 2842-2846.
- [13] 牟桂芝, 大野木·升司. 日本建筑垃圾再资源化技术[J]. 中国环保产业, 2013(6): 65-69.
- MU Guizhi, ONOGI Shoji. Recycling resource technology of construction wastes in Japan[J]. China Environmental Protection Industry, 2013(6): 65-69.
- [14] 陈雅芝. 国内外建筑垃圾资源化利用政策的比较研究[J]. 建筑技术, 2019(3):342-345.
- CHEN Yazhi. Comparison of policy about construction waste resource utilization in China & Abroad[J]. Architecture Technology, 2019(3):342-345.
- [15] 郑龙海, 袁祖强, 殷晨波, 等. 基于机器视觉的建筑垃圾自动分类系统研究[J]. 机械工程与自动化, 2019(6):16-18.
- ZHENG Longhai, YUAN Zuqiang, YIN Chenbo, et al. Research on automatic classification system of building waste based on machine vision[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2019(6):16-18.
- [16] 胡魁, 韩森, 薛雪, 等. 建筑垃圾再生骨料砖砌分离设备的研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 172-177.
- HU Kui, HAN Sen, XUE Xue, et al. Research of separation between clay brick and concrete in construction waste recycled aggregate[J]. Highway Engineering, 2016, 41(3): 172-177.
- [17] 李述俊, 赵霄龙, 李秋义, 等. 再生微粉基本性能及活性试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(10): 3314-3325.
- LI Shujun, ZHAO Xiaolong, LI Qiuyi, et al. Experimental Study on basic properties and activity of recycled fine powder[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2019, 38(10): 3314-3325.
- [18] 朱斌泉, 余昌平, 黎峰, 等. 建筑废弃物填筑高速公路路基施工工艺研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, (12): 33-35.
- ZHU Binqun, YU Changping, LI Feng, et al. The study on construction technology of construction waste filling subgrade of expressway [J]. Highway traffic technology (applied technology edition), 2018, (12): 33-35.
- [19] POON C S, KOU S C, LAM L. Use of recycle aggregates in molded concrete bricks and blocks[J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(5):281-289.
- [20] BOSQUE I F Sáez del, HEEDE P Van den, BELIE N De, et al. Carbonation of concrete with construction and demolition waste based recycled aggregates and cement with recycled content[J]. Construction and Building Materials. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.117336.
- [21] 张剑挥, 方峨天, 杨自辉, 等. 沙石质建筑垃圾不同覆盖方式防风固沙效益[J]. 中国沙漠, 2016, 36(5): 1247-1251.
- ZHANG Jianhui, FANG Etian, YANG Zihui, et al. Sand-fixing Effect of the Sand-stone Building Waste under Different Covering Methods[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(5): 1247-1251.
- [22] 中华人民共和国水利部. 土工试验方法标准:GB/T 50123-1999 [S]. 北京:中国计划出版社出版, 1999.
- Ministry of Water Resources People's Republic of China. Geotechnical test method standard: GB/T 50123-1999[S]. Beijing:Published by China plan publishing house.
- [23] 漆宝瑞, 秦小林. 膨胀土的膨胀系数、收缩系数求解及应用[J]. 铁道标准设计, 2005(6):11-14.
- QI Baorui, QIN Xiaolin. Derivation and application on expansion coefficient and contraction coefficient of expansion soil[J]. Railway Standard Design, 2005(6): 11-14.