

DOI: 10.16285/j.rsm.2022.1706

加筋稻壳灰改性土动力特性研究

李丽华, 张东方, 肖衡林, 王翠英, 邓永锋

(湖北工业大学 土木建筑与环境学院 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室, 湖北 武汉 430068)

摘 要: 为实现稻壳灰资源化利用, 将稻壳灰加入土体中用于提高土体强度。对稻壳灰改性土开展了大型动三轴试验, 分析了稻壳灰掺量、动应力幅值和加筋方式对稻壳灰改性土轴向累计变形、动应力-动应变曲线和动弹性模量的影响。研究结果表明: 随稻壳灰掺量增加, 稻壳灰改性土的最大干密度下降, 最优含水率增加; 稻壳灰掺量对土体性能有较大影响, 在 5%~10% 稻壳灰掺量下, 稻壳灰改性土轴向累计变形较低, 土体强度较优; 动应力幅值和加筋方式对稻壳灰改性土轴向累计变形影响明显。随循环次数增加, 试样滞回圈面积减小, 动弹性模量逐渐增加; 加筋筋材可以提高土体性能, 对于单层加筋, 格栅加筋试样优于其他试样。

关 键 词: 稻壳灰; 加筋土; 大型动三轴试验; 轴向累计变形; 动应力-动应变曲线; 动弹性模量

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2023)12-3360-10

Dynamic characteristics of reinforced rice husk ash modified soil

LI Li-hua, ZHANG Dong-fang, XIAO Heng-lin, WANG Cui-ying, DENG Yong-feng

(Key Laboratory of Intelligent Health Perception and Ecological Restoration of Rivers and Lakes, Ministry of Education, School of Civil Engineering, Architecture and Environment, Hubei University of Technology, Wuhan, Hubei 430068, China)

Abstract: In order to realize the resource utilization of rice husk ash, rice husk ash was incorporated into the soil for improving the soil strength. Large-scale dynamic triaxial tests were carried out on rice husk ash modified soil. The effects of rice husk ash dosage, dynamic stress amplitude and reinforcement method on the cumulative axial deformation, dynamic stress-strain curve and dynamic elastic modulus of the rice husk ash modified soil were analyzed. The results showed that with the increase of rice husk ash content, the maximum dry density of rice husk ash modified soil decreases and the optimal moisture content increases. The content of rice husk ash has a significant influence on the performance of soil. Under the content of 5%–10% rice husk ash, the cumulative axial deformation of rice husk ash modified soil is low, and the soil strength is better. The dynamic stress amplitude and reinforcement method obviously influence the cumulative axial deformation of rice husk ash modified soil. As the number of cycles increases, the hysteresis loop area of the sample decreases and the dynamic elastic modulus increases gradually. Reinforcement materials can improve the performance of soil. For single-layer reinforcement scenario, grid reinforced soil samples surpass other samples in terms of performances.

Keywords: rice husk ash; reinforced soil; large dynamic triaxial tests; cumulative axial deformation; dynamic stress-strain curve; dynamic elastic modulus

1 引 言

我国是世界上最大的稻谷生产国, 稻谷年均产量居世界第一^[1]。在稻谷加工过程中, 会产生稻壳等副产品, 由于稻壳的不规则表面和高硅含量限制了其自然降解。此外, 在全球能源危机和环境污染

形势下, 针对可再生绿色能源的研究也成为热点^[2]。目前, 稻壳作为一种新型生物质能源被广泛用作发电, 在这种能量转换过程中会产生一种新物质: 稻壳灰 (rice hull ash, RHA) ^[3]。如果稻壳灰没有适当处理, 会造成环境污染、土地占用等环境问题。以往研究表明^[4], 稻壳灰具有孔隙丰富、相对密度

收稿日期: 2022-10-31

录用日期: 2022-11-28

基金项目: 国家自然科学基金 (No.52278347, No.U22A20232); 湖北省重点研发计划 (No.2022BCA059, No.2023BCB112); 湖北工业大学杰出人才基金 (No.XJ2021000501)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52278347, U22A20232), the Key Research and Development Program of Hubei Province (2022BCA059, 2023BCB112) and the Hubei University of Technology Outstanding Talent Fund Project (XJ2021000501).

第一作者简介: 李丽华, 女, 1978 年生, 博士, 教授, 主要从事路基工程、加筋土、环境岩土方面的教学与研究工作。E-mail: researchmailbox@163.com

通讯作者: 肖衡林, 男, 1977 年生, 博士, 教授, 主要从事道路工程、生态岩土等方面的研究。E-mail: xiaohenglin_0909@163.com

小、比表面积大的特点。特别是稻壳灰中存在高活性无定形二氧化硅，导致其具有类似于硅灰的高活性^[5-7]。

目前，有研究在土体中加入稻壳灰以提高土体强度。Basha 等^[8]研究了残积土混合水泥和稻壳灰的土体特性，表明 6%~8% 的水泥和 15%~20% 的 RHA 是改善土体性质的最佳用量。Nasiri 等^[9]提出含有大量二氧化硅和高比表面积的稻壳灰可以在石灰土体稳定方法中发挥主要作用。试验考虑了 5%、7%、9% 和 12% 的 RHA 掺量。结果表明，稻壳灰的掺入提高了路基基层稳定性。其中 4% 石灰和 9% RHA 为稳定基层材料的最佳掺量。Phanikumar 等^[10]研究了 RHA-粉煤灰处理的膨胀土基本物理力学指标和膨胀特性。结果表明，随着 RHA 含量的增加，膨胀土的液限、塑限和自由膨胀指数降低，强度增加，稻壳灰表现出良好的工程特性。Aditya 等^[11]通过三轴试验研究掺有粉煤灰（fly ash, FA）和稻壳灰材料的土质路基永久变形行为，表明 RHA 混合土提供的永久应变最小，其次是 FA。

随着土工合成材料的发展，许多学者对加筋土有相关研究。李丽华等^[12]对稻壳灰加筋土进行不固结不排水三轴试验，研究稻壳灰掺量、围压、加筋筋材、加筋间距等影响。试验结果表明，加入稻壳灰后，土体弹性模量增长显著，土工格栅加筋稻壳灰混合土较优比例下可增加 1.5 倍多，稻壳灰及筋材均能有效提高土体强度。Zhang 等^[13]通过大直径循环三轴试验研究土工格栅加筋土的循环特性，发现土工格栅对土体长期变形的影响取决于土体的安定性响应：对于表现出增量坍塌响应的试件，土工格栅的增强效应要比表现出塑性蠕变响应的试件显著得多。宋飞等^[14]采用大型动三轴试验研究了土工格栅室加筋土的应力-应变响应规律。发现在相同的动应力幅值工况下，与素砂相比，土工格栅室加筋土滞回圈排列紧密，累积塑性变形较小。但当动应变较小时，格室的加固效果不明显。Li 等^[15]通过拉拔试验研究了轮胎和土工格栅加筋砂土的力学性能。

综上所述，稻壳灰和加筋筋材可以提高土体强度特性，但国内外学者对循环荷载作用下稻壳灰改性土力学性能鲜有报道。鉴于此，本文通过大型动三轴试验，分析未加筋和加筋稻壳灰改性土轴向累计变形、动应力-动应变关系和动弹性模量。本试验不仅可以克服传统小三轴试验的尺寸效应，同时为加筋稻壳灰改性土在岩土工程中的资源化利用提供参考借鉴。

2 试验仪器和材料

2.1 试验仪器

本次试验所用仪器为大型动三轴仪器，如图 1 所示。该设备由三轴压力室、油源设备、加载设备和操作装置等组成。试验仪器施加的轴向荷载最大为 300 kN，围压最大为 3 MPa，动荷载频率为 0.01~5 Hz。



图 1 动三轴试验仪器

Fig.1 Dynamic triaxial test apparatus

2.2 试验材料

2.2.1 土样

该试验所用土样取自武汉市江夏区某废弃工地。将土样风干破碎后进行筛分处理，取过 20 mm 标准筛的土样进行试验。通过击实试验，得到土样最大干密度为 1.86 g/cm³，最优含水率为 11%。试样物理性质见表 1。

表 1 试验用土物理指标

Table 1 Physical indices of the test soil

最大干密度/(g · cm ⁻³)	最优含水率/%	不均匀系数	曲率系数
1.86	11%	10.2	2.54

2.2.2 稻壳灰

稻壳灰取自武汉某锅炉燃烧厂，呈灰黑色粉末状。稻壳灰化学成分含量见表 2。

表 2 稻壳灰氧化物组分及相对百分含量（单位：%）

Table 2 Rice husk ash oxide fraction and relative percentage content(unit: %)

样品	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃
稻壳灰	0.76	90.57	0.97	0.15	0.2	0.83

2.2.3 加筋筋材

试验所用加筋筋材分别为双向土工格栅、三向土工格栅、微型轮胎和土工格室，如图 2 所示。加筋筋材的物理力学指标见课题组先前研究成果^[16]。

3 试验过程

3.1 试样制备

通过击实试验求出不同掺量稻壳灰改性土最

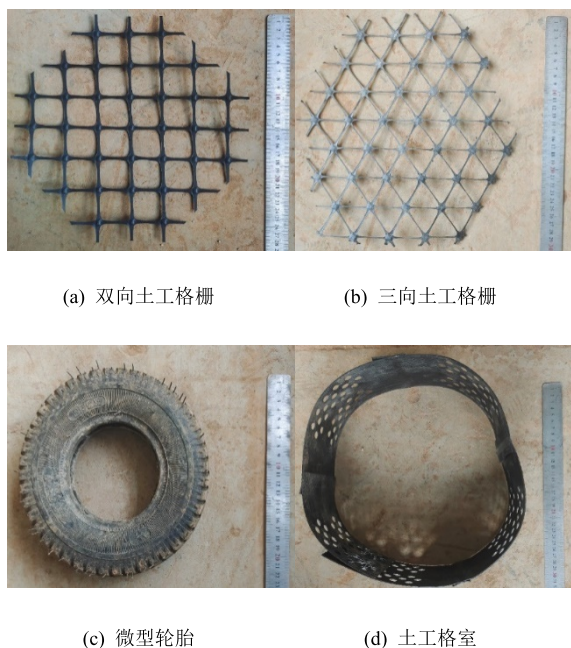


图2 加筋筋材实物图

Fig.2 Reinforcement material physical picture

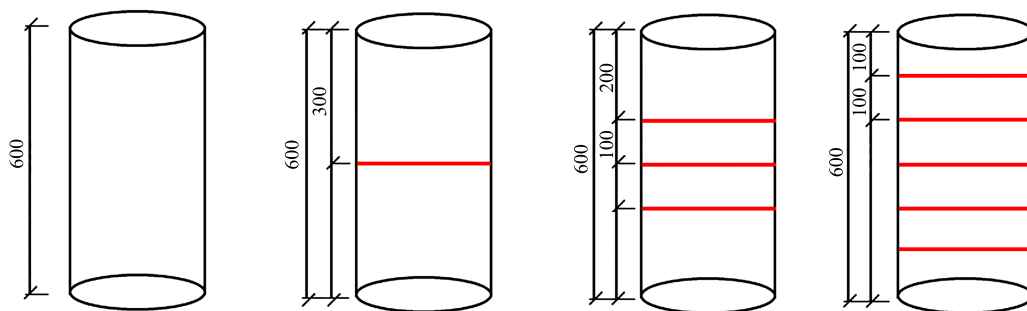


图3 加筋筋材铺设方式(单位: mm)

Fig.3 Reinforcement material laying way (unit: mm)

为避免加筋筋材与试样产生边界效应,本次试验中加筋筋材直径约为 280 mm,略小于试样直径。

3.2 试样饱和与固结

真空管安装完成后,抽真空使孔隙水压力达到 -70 kPa 以下,待孔隙水压力稳定后关闭抽真空阀门。将压力室和试样紧密贴合后推进加载设置下方。试验采用真空饱和,通过增加适量围压,计算围压的增加量与孔隙水压力增加量之比控制试样的饱和度在 95%以上。饱和完成后进行固结试验,固结采用等压固结,当固结排水增加量近似于为 0 视为固结完成。

3.3 施加动荷载

为模拟实际工况交通荷载,试验选用正弦波加载方式。在固结试验结束后,开始剪切试验。待电脑操作系统显示试样已接触后,开始施加动荷载直至试验结束。设定循环次数 N 为 5 000 次,试验频

优含水率和最大干密度。在最优含水率条件下进行大型动三轴试验。稻壳灰掺量为 0%、5%、10%、15%和 20% (稻壳灰质量占干土质量比例)。

三轴试验的试样高为 600 mm,直径为 300 mm。在试验前,填料需风干处理约 24 h。为满足试样最佳击实效果,加入最优含水率水量混合并闷料。为避免闷料过程中水分流失,将试样放置于塑料箱中密闭约 24 h。

制样时将填料平均分为 6 层击实制样。根据《公路路基设计规范》(JTG D30—2015)^[17]要求,试样压实度需达到 95%。在试样制备完成后,将压力帽水平放置在试样上方。将真空管与压力帽和仪器底座通过螺丝连接,然后进行抽真空操作避免试样塌落。加筋筋材铺设方式见图 3。

在制样过程中,为避免乳胶膜受到损坏,在乳胶膜内部放置一层聚氯乙烯(PVC)膜,PVC 膜厚度应小于试样直径的 1%。为达到两层膜紧密贴合的效果,采用透明胶布进行贴合。

率为 1 Hz。具体试验方案见表 3。当循环次数达到 5 000 次或试样轴向应变达到 5%,试验结束。

表3 大型动三轴试验参数

Table 3 Large-scale dynamic triaxial test parameters			
稻壳灰掺量/%	围压 σ_3 /kPa	频率/Hz	动应力幅值 σ_d /kPa
0, 5, 10, 15, 20	100, 200	1	200
10	100	1	100, 150, 200, 250
10 (加筋)	100	1	250

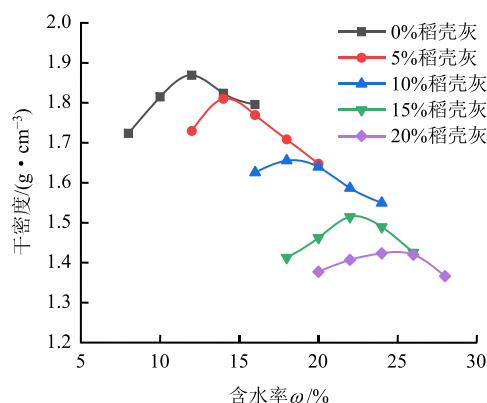
4 试验结果与分析

4.1 击实试验

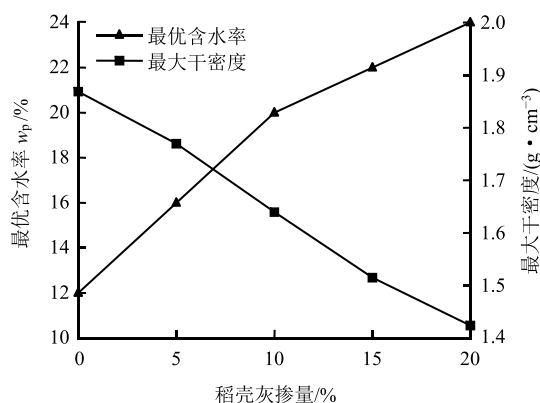
图 4 为不同掺量稻壳灰改性土击实试验结果。从图中可以发现,随稻壳灰掺量增加,稻壳灰改性土最大干密度减小,最优含水率增大。当稻壳灰掺量从 0%到 10%时,土样最大干密度快速下降,最

优含水率快速增加, 两者变化趋势明显; 当稻壳灰掺量为 10%~20% 时, 这种变化趋势相对减弱。

稻壳灰改性土最大干密度下降可归因于稻壳灰对土体的替代。与土体相比, 稻壳灰自重轻, 其密度较低; 稻壳灰和土体混合形成孔隙较大颗粒, 导致稻壳灰改性土密度下降^[18]; 而最优含水率增加, 是因为加入了稻壳灰, 减少了游离粉砂和黏土的部分数量, 并形成了表面积更大的材料^[19]。



(a) 不同掺量稻壳灰改性土击实曲线



(b) 不同稻壳灰掺量下最优含水率和最大干密度的变化趋势

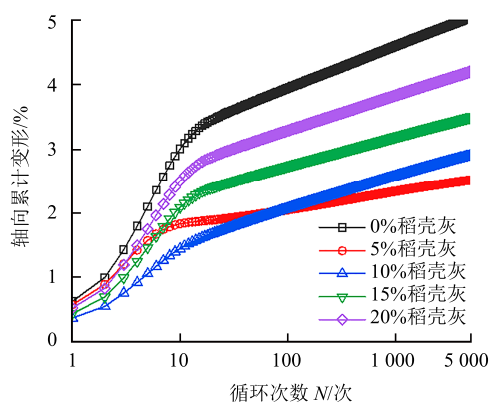
图 4 不同掺量稻壳灰改性土击实试验结果
Fig.4 Compaction test results of modified soil with different contents of rice husk ash

4.2 不同掺量稻壳灰改性土动力特性

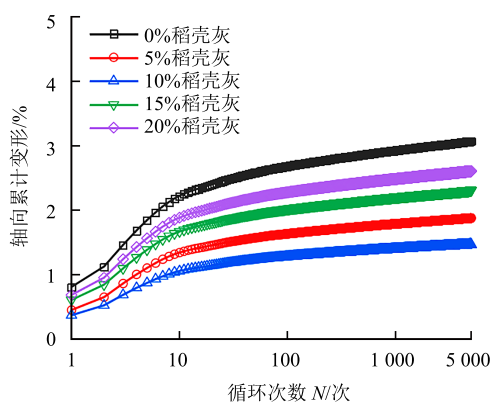
4.2.1 不同掺量稻壳灰改性土轴向累计变形

图 5 为不同掺量 (0%、5%、10%、15%、20%) 稻壳灰改性土轴向累计变形-循环次数曲线。从图中可得, 素土 (即掺量为 0% 的稻壳灰改性土) 轴向累计变形最大, 超过其他掺量稻壳灰改性土。加入稻壳灰后, 提高了土体强度, 降低了土体轴向累计变形; 但稻壳灰掺量并非越多越好, 在 5%~10% 掺量下, 稻壳灰改性土轴向累计变形处于较低水平。当稻壳灰掺量大于 10%, 土体轴向累计变形也随之

增大。试样最终累计变形量均未达到破坏标准。



(a) $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$, $\sigma_d = 200 \text{ kPa}$



(b) $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$, $\sigma_d = 200 \text{ kPa}$

图 5 不同掺量稻壳灰改性土轴向累计变形-循环次数曲线
Fig.5 Cumulative axial deformation-number of cycles of modified soil with different contents of rice husk ash

在 $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$ 时, 10% 掺量稻壳灰改性土在 100 次循环次数内轴向累计变形最低, 试验结束后, 5% 掺量稻壳灰改性土轴向累计变形最低。在 $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$, 10% 掺量稻壳灰改性土轴向累计变形在整个试验过程中一直处于最低水平。

综上所述可得, 稻壳灰的加入可以提高土体强度, 降低试样的轴向累计变形。其原因一是稻壳灰作为一种细颗粒, 尺寸均匀, 可以很好地填充在土体孔隙中, 使土体更加密实。二是稻壳灰中存在高活性无定形二氧化硅, 使其具有类似硅灰的高活性。表明在一定条件下, 稻壳灰具有潜在的胶凝活性, 可以促进水泥水化产物的生成。稻壳灰与土加水混合后, 与土中的阳离子发生反应, 生成胶凝物质使土体颗粒黏合在一起, 从而提高土体强度^[20]。

4.2.2 不同掺量稻壳灰改性土动应力-动应变发展规律

为直观观察不同掺量稻壳灰改性土动应力-动

应变的变化趋势,取相同循环次数下(100、1 000、5 000 次)不同掺量稻壳灰改性土滞回圈对比分析见图 6。由图可以发现,随循环次数增加,试样滞回圈逐渐右移,说明动应变在逐渐增加。但稻壳灰掺量不同,稻壳灰改性土变化趋势也不相同。当稻壳灰掺量在 5%~10%时,试样滞回圈更加紧密,相邻循环次数的滞回圈移动距离也比较小,最终动应变低于其他掺量稻壳灰改性土。而在其他掺量下,试样滞回圈随循环次数增加而间距增大,倾斜程度加大。同时滞回圈的峰值动应力也在降低,说明土体无法承受较大动应力^[21]。

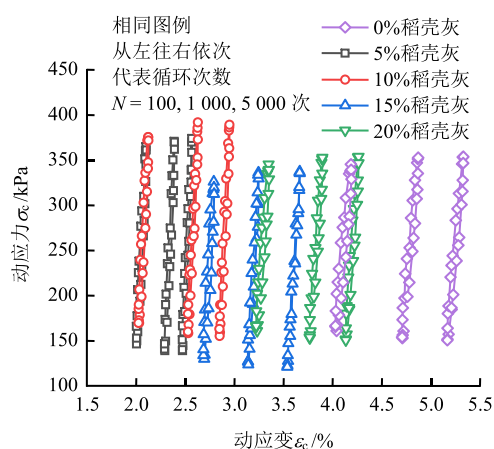


图 6 不同掺量稻壳灰改性土动应力-动应变曲线
Fig.6 Dynamic stress-dynamic strain curves of modified soil with different contents of rice husk ash

4.2.3 不同掺量稻壳灰改性土动弹性模量

动弹性模量作为土体动力特性的一个指标^[22],计算方式如下。

$$E_d = \frac{\sigma_{c,max} - \sigma_{c,min}}{\varepsilon_{c,max} - \varepsilon_{c,min}} \quad (1)$$

式中: $\sigma_{c,max}$ 为滞回曲线最大动应力; $\sigma_{c,min}$ 为滞回曲线最小动应力; $\varepsilon_{c,max}$ 为滞回曲线最大动应变; $\varepsilon_{c,min}$ 为滞回曲线最小动应变。

图 7 为不同掺量稻壳灰改性土动弹性模量变化趋势。由图可得,试样动弹性模量整体呈逐渐增长趋势,在前 100 次循环中动弹性模量快速增长,这与试样前期产生了较多轴向累计变形有关;在 100 次循环后,动弹性模量缓慢增加,呈逐渐稳定趋势。在稻壳灰掺量为 5%~10%时,稻壳灰改性土的动弹性模量始终处于较高水平。

比较不同掺量稻壳灰改性土的动力特性可知:稻壳灰的加入可以提高土体强度,但稻壳灰掺量并非越多越好。在稻壳灰掺量为 5%~10%下,稻壳灰

改性土性能达到最优。

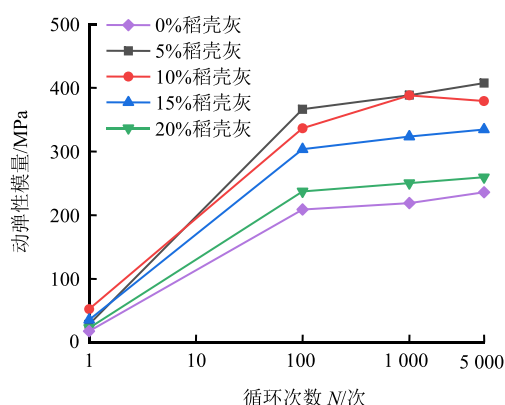


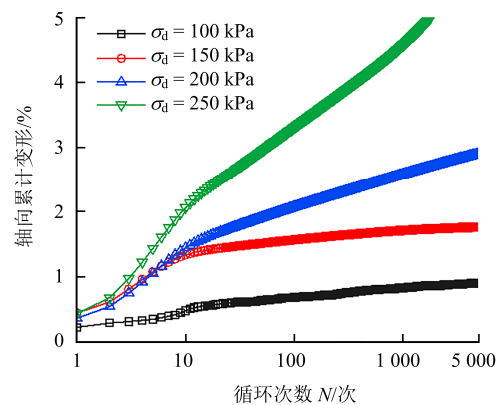
图 7 不同掺量稻壳灰改性土动弹性模量
Fig.7 Dynamic elastic modulus of modified soil with different contents of rice husk ash

4.3 不同动应力幅值和加筋方式下稻壳灰改性土轴向累计变形

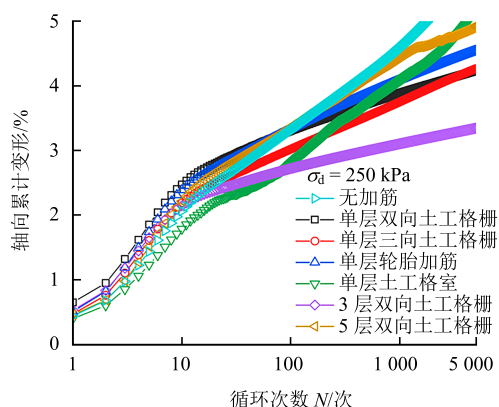
在循环荷载作用下粒状材料的轴向累计变形可以用安定理论^[23-25]进行分析。图 8(a)和图 8(b)分别为 10%掺量稻壳灰改性土在 $\sigma_3 = 100$ kPa, 不同动应力幅值作用下,不同加筋方式下的轴向累计变形-循环次数曲线。

从图中可得,10%掺量稻壳灰改性土轴向累计变形可以分为两个阶段:后压实压缩和二次循环压缩阶段。两个阶段分界点在循环次数为 10 次左右。在前 10 次循环内,动荷载开始施加,土体受到动荷载作用被快速压实压缩。土体近 50%的轴向累计变形在此阶段产生。而动应力幅值越大,土体最终轴向累计应变也越来越多;施加的动应力幅值不同,土体轴向累计变形变化趋势也有所不同。动应力幅值较小时,土体轴向累计变形缓慢增加,变形速率迅速减少。动应力幅值较大时,土体轴向累计变形迅速增加,变形速率也迅速增加。但加入加筋筋材,试样轴向累计变形得到不同程度的改善。

从图 8(a)中发现,动应力幅值为 100 kPa 和 150 kPa 时,土体轴向累计变形缓慢增加,直至 0.9% 和 1.7% 左右停止。动应力幅值小于 150 kPa 时,土体轴向累计变形在加载初期缓慢增加,其变形增长率逐渐下降,几乎处于稳定状态。动应力幅值为 200 kPa 时,土体轴向累计变形开始迅速增加,其变形增长率缓慢增加,但基本处于较低范围。动应力幅值为 250 kPa 时,土体轴向累计变形快速增加,直至试样破坏。试样在 1 600 循环次数时已达到破坏标准。



(a) 不同动应力幅值



(b) 不同加筋方式

图 8 轴向累计变形-循环次数曲线

Fig.8 Curves of cumulative axial deformation and number of cycles

从图 8(b)中发现, 加入加筋筋材, 土体最终轴向累计应变都有所下降, 均低于未加筋试样。而加筋筋材不同, 对最终轴向累计变形的改善情况也不相同。单层加筋筋材的改善情况: 双向土工格栅>三向土工格栅>微型轮胎>土工格室。多层加筋筋材的改善情况: 3 层双向土工格栅>单层双向土工格栅>5 层双向土工格栅。采用 5 层加筋筋材表现不佳, 可能是因为铺设的土工格栅间距过小, 破坏了土体的整体结构, 影响了土体内部材料的相互摩擦力, 从而导致试样产生了较大的轴向累计变形。

根据轴向累计变形随循环次数的变化趋势, 周文权^[26]、宫全美^[27]、雷华阳^[28]等将其分为破坏型、临界型和稳定型。从图 8(a)可得, 动应力幅值不同, 土体的变形增长率和最终轴向累计应变也在变化。因此, 稻壳灰改性土存在一个临界动应力幅值。当动应力幅值大于该值时, 土体的轴向累计变形迅速增加, 直至达到破坏标准。当动应力幅值小于该值时, 土体的轴向累计变形增加缓慢, 最终轴向累计应变处于较低水平。

在理想条件下, 临界动应力幅值应为固定值。但因为试样制作条件、试验设备和操作中人为因素导致其难以精准计算。结合图 8(a), 可得临界动应力推算值, 如表 4 所示。

表 4 临界动应力

Table 4 Critical dynamic stress

围压 σ_3 /kPa	临界动应力值 σ_{dcr} /kPa	临界动应力推算值/kPa
100	150~200	175

在工程实际中, 较大动应力幅值会使路基轴向累计变形迅速增加, 使道路使用年限大大缩减。为满足道路长期使用要求, 避免产生过大轴向累计变形, 对于道路采用的动应力大小应严格选取。根据安定理论和临界动应力划分范围, 在实际工程中, 稻壳灰改性土路基的动应力选择需小于其临界动应力值。

4.4 不同动应力幅值下 10%掺量稻壳灰改性土动应力-动应变发展规律

图 9 为 10%掺量稻壳灰改性土在不同动应力幅值作用下的动应力-动应变曲线。由于土体作为非理想弹性体, 当受到荷载作用时动应力与动应变并非同时产生, 而是存在一定间隔。因此试样动应力与动应变的曲线也称为滞回曲线。由图可以看出, 在动应变较小时, 滞回圈呈宽胖型。随着动应变的继续累积, 滞回圈的面积在不断缩小, 形状逐渐变为陡峻型。而随着动应力幅值增加, 加载初期的滞回圈面积也在逐渐减小。说明动应变随着动应力的增加而产生了急剧变化。动应力幅值为 250 kPa, 试样在循环次数 1 600 次就已达到破坏标准。

图 10 为围压 $\sigma_3 = 100$ kPa, 动应力幅值 $\sigma_d = 250$ kPa 时 10%掺量稻壳灰改性土相邻循环次数下的动应力-动应变曲线。从图 10(a)和 10(b)可以发现, 此时试样的动应变正处在急速增长阶段, 滞回圈的面积较大且呈宽胖状。相邻循环次数下滞回圈重合趋势不明显, 说明试样动应变还在快速产生。这是因为加载初期土体处于后压实压缩阶段, 土体被继续压实, 轴向累计变形增长迅速。比较图 10(c)~10(e), 发现在循环次数 100 次后, 相邻循环次数下滞回圈趋近于完全重合, 试样的变形增长率逐渐减小。在 1 000 次循环后, 相邻循环次数下的土体动应变增长率近似为 0。但 1 000 次和 1 500 次的循环下, 试样的动应变差值约为 0.3%, 说明动应变仍在继续增加。

4.5 动弹性模量

为分析不同加筋方式下试样的滞回圈变化规

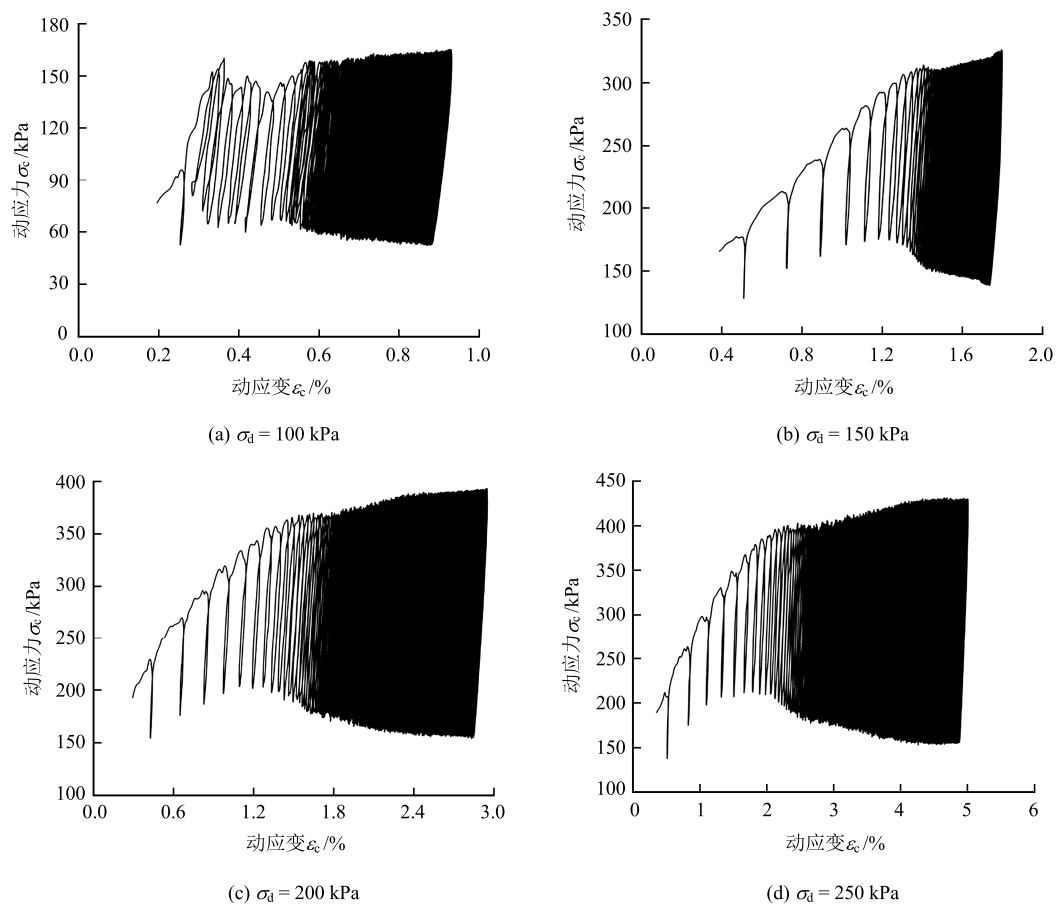


图9 10%掺量稻壳灰改性土在不同动应力幅值下动应力-动应变曲线

Fig.9 Dynamic stress-dynamic strain curves of 10% rice husk ash modified soil at different dynamic stress amplitudes

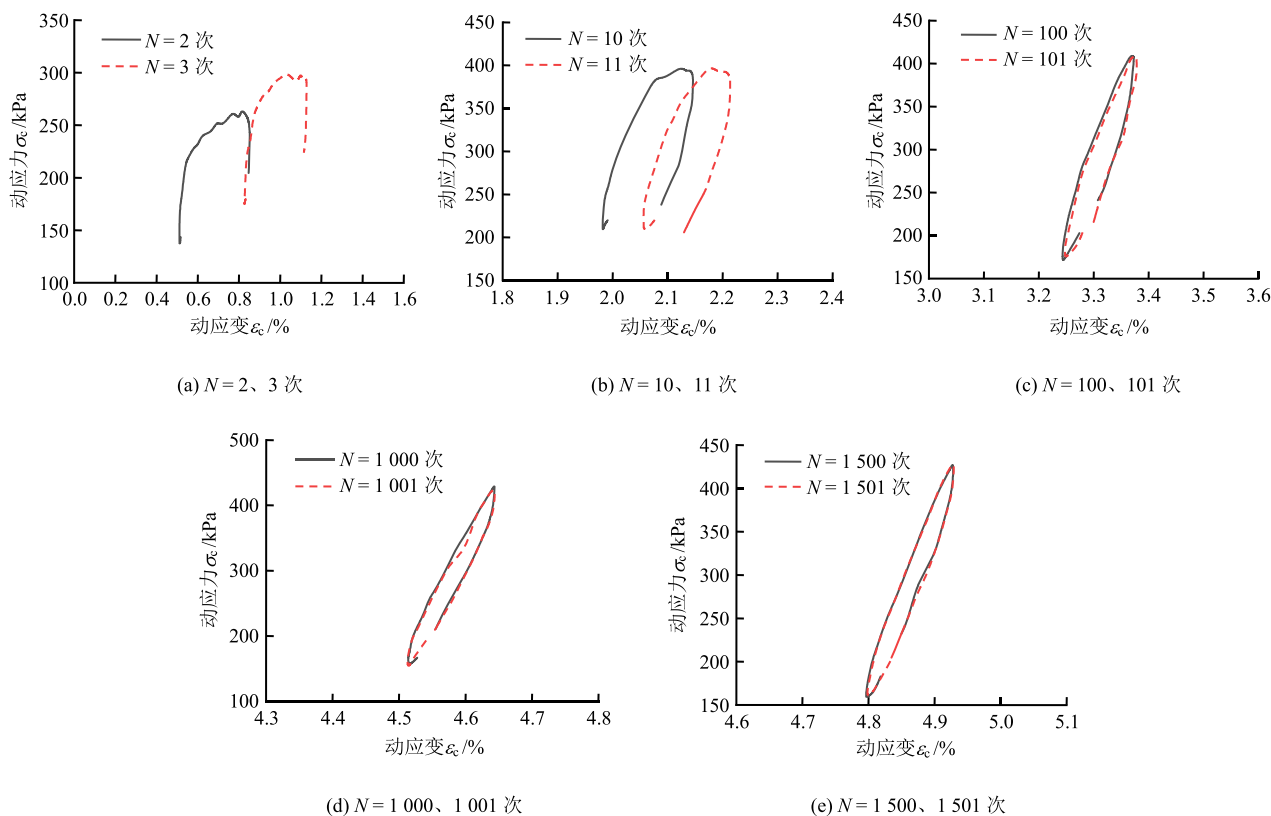


图10 相邻循环次数的动应力-动应变曲线

Fig.10 Dynamic stress-dynamic strain curves for the number of adjacent cycles

律,取不同加筋方式、不同循环次数下稻壳灰改性土滞回圈进行对比分析,如图 11 所示^[29]。从图可以看出,滞回圈面积和斜率随循环次数和加筋方式的变化而变化。具体表现为:滞回圈的面积随循环次数增加而减小,滞回圈的斜率逐渐提高并向 Y 轴靠近;特别是在前 1 000 次循环中,滞回圈的面积在显著减小,滞回圈斜率提升程度明显。这是因为随着循环次数增加,试样受到荷载作用后颗粒之间

被挤压,细颗粒迁移填充在试样的孔隙中,试样的密实状态提高。而加筋方式不同,试样滞回圈发展规律也不同。由图可得,未加筋和单层土工格室加筋试样分别在循环次数 1 600 次和 4 000 次左右已达到破坏标准。而单层双向土工格栅和轮胎加筋试样能在较大循环次数中产生较小变形,直至试验结束。说明加筋筋材不同,试样最终轴向累计应变也不同。相比较土工格室,土工格栅和轮胎表现出更好的加

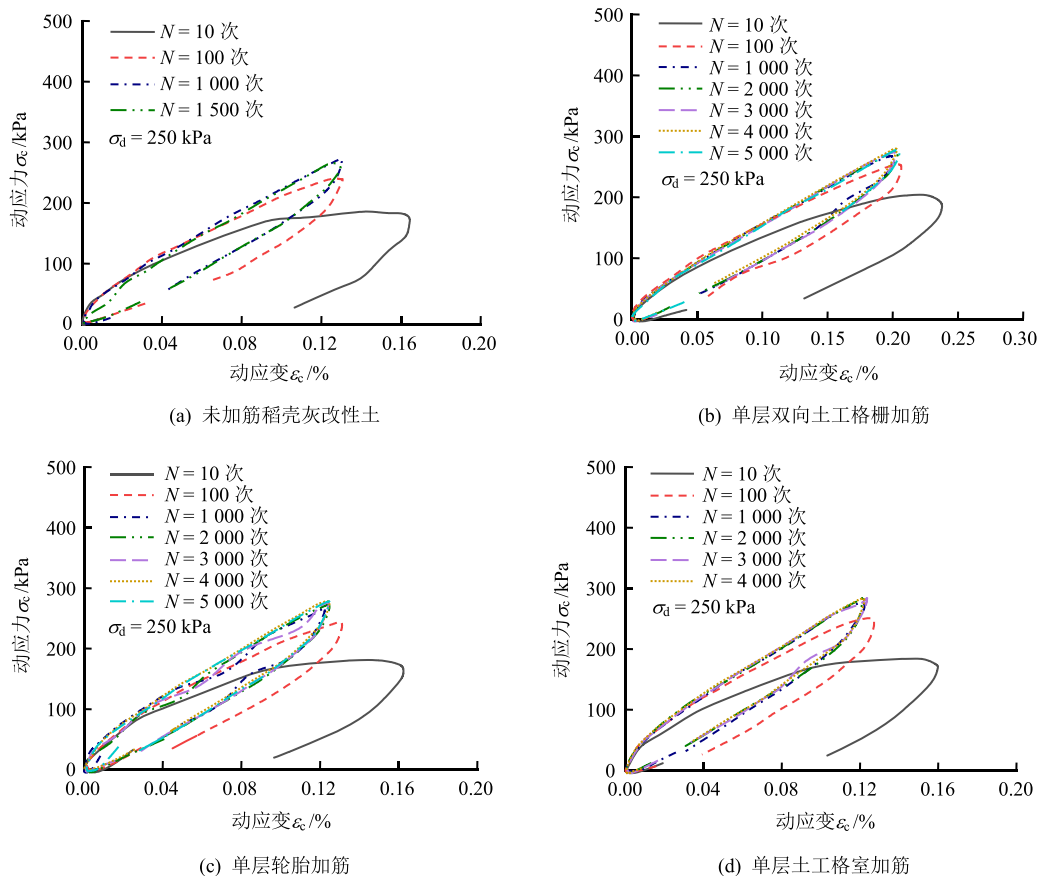


图 11 加筋稻壳灰改性土动应力-动应变曲线

Fig.11 Dynamic stress-dynamic strain curves of reinforced rice husk ash modified soil

筋效果。

从图 12 可得,动弹性模量总体上呈逐渐增长的趋势。在前 1 000 次循环次数内,随循环次数增大,动弹性模量显著增大,在前 10 次循环内尤其明显。在 1 000 次循环次数外,动弹性模量已经趋于稳定状态。这是因为随着加载的进行,荷载作用在土体上使得土颗粒被挤压破碎。在加载初期,土体产生了较多轴向累计变形。而随着循环次数增加,土体中颗粒破碎并迁移填充在试样孔隙中,使得试样逐渐密实,从而使土体动弹性模量提高^[25]。在 10 次循环次数左右,试样 D 单层轮胎加筋动弹性模量最低,但增长趋势较大。

从图 12 还可以得到,在循环次数为 10 次时,

不同加筋筋材土体动弹性模量,轮胎<土工格室<三向土工格栅<双向土工格栅;在循环次数为 5 000 次时,不同加筋筋材土体动弹性模量,轮胎<双向土工格栅<三向土工格栅<土工格室。这是因为动弹性模量跟滞回曲线的动应力和动应变有关。轮胎作为一种柔性材料,在受到荷载作用时,一定程度上抵消荷载作用的能量,使土体的动应力差值和动应变差值较小。因此动弹性模量相比其他加筋材料较低。

在加载后期,五层双向土工格栅和单层土工格室加筋试样的动弹性模量较高,均高于其他试样。但是两者最终轴向累计应变都接近 5% 的破坏标准。这可能因为试样中骨架结构是由土体颗粒之间咬合形成,加入过多层数的土工格栅和三维加筋的土工

格室虽然可能提高试样的抗变形能力,但也影响了试样整体骨架的完整性,导致土体密实状态有所下降,所以产生的轴向累计变形高于其他试样。

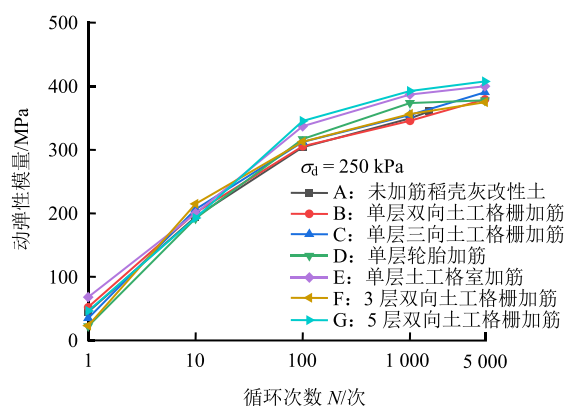


图 12 不同加筋方式下稻壳灰改性土动弹性模量

Fig.12 Dynamic elastic modulus of rice husk ash modified soil under different reinforcement ways

加筋筋材的作用可以抑制土体较大变形,提高加筋土体强度。作为二维筋材土工格栅,铺设在稻壳灰改性土之间,土工格栅和土体接触面相互摩擦产生一定摩阻力。土工格栅孔眼将土体嵌在其中,提高了土颗粒间的咬合作用。轮胎作为一种三维加筋筋材,其表面粗糙且具有凹槽,可以对土体颗粒产生嵌固作用,增强了土体颗粒和轮胎之间的摩阻力。当加筋层土体产生侧向变形时,轮胎侧壁和土体相互作用产生围箍效应,从而抑制土体侧向变形。

5 结 论

通过大型固结不排水动三轴试验,本文对循环荷载作用下加筋稻壳灰改性土动力性能进行研究,得到以下结论:

(1) 随稻壳灰掺量增加,稻壳灰改性土最优含水率增加,最大干密度下降。在 5%~10%稻壳灰掺量下,稻壳灰改性土强度性能较优,轴向累计变形和动应变较小,动弹性模量较大。

(2) 稻壳灰改性土轴向累计变形随动应力幅值和循环次数的增加而增加。不同动应力幅值作用下,试样轴向累计变形都符合安定理论。加入加筋筋材,试样轴向累计变形得到不同程度的改善。

(3) 稻壳灰改性土在动应变较小时,滞回圈呈宽胖型。随着动应变的继续累积,滞回圈的面积在不断缩小,形状逐渐变为陡峻型。而随着动应力幅值增加,加载初期的滞回圈面积也在逐渐减小。

(4) 对于单层加筋稻壳灰改性土,格栅加筋效果最好,轮胎加筋次之,然后是土工格室加筋;对

于多层加筋稻壳灰改性土,3 层加筋效果较好,单层加筋效果次之,5 层加筋效果最差。

参 考 文 献

- [1] SANDHU RAVINDER KAUR, SIDDIQUE RAFAT. Influence of rice husk ash (RHA) on the properties of self-compacting concrete: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 153: 751-764.
- [2] THOMAS B S. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material a comprehensive review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 82: 3913-3923.
- [3] CHEN Rui-feng, CONGRESS SURYA SARAT CHANDRA, CAI Guo-jun, et al. Sustainable utilization of biomass waste-rice husk ash as a new solidified material of soil in geotechnical engineering: a review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 292: 123219.
- [4] ABU NOAMAN, REZUL KARIM, NAZRUL ISLAM. Comparative study of pozzolanic and filler effect of rice husk ash on the mechanical properties and microstructure of brick aggregate concrete[J]. *Heliyon*, 2019, 5: e01926.
- [5] 陈佩, 吴奥, 别如山. 预处理稻壳流化床燃烧制备纳米 SiO₂ 的小试验[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(3): 46-54.
- [6] CHEN Pei, WU Ao, BIE Ru-shan. Experimental study on pretreated rice husk combustion in bench-scale fluidized bed for the production of nano silica[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51(3): 46-54.
- [7] PONGDONG W, KUMMERLÖWE CLAUDIA, VENNEMANN N, et al. A comparative study of rice husk ash and siliceous earth as reinforcing fillers in epoxidized natural rubber composites[J]. *Polymer Composites*, 2018, 39: 414-426.
- [8] PODE R. Potential applications of rice husk ash waste from rice husk biomass power plant[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 53: 1468-1485.
- [9] BASHA E A, HASHIM R, MAHMUD H B, et al. Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2005, 19: 448-453.
- [10] NASIRI MEHRAN, LOTFALIAN MAJID, MODARRES AMIR, et al. Optimum utilization of rice husk ash for stabilization of sub-base materials in construction and repair projects of forest roads[J]. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 2016, 37(2): 333-343.
- [11] PHANIKUMAR B R, NAGARAJU T V. Effect of fly ash and rice husk ash on index and engineering properties of expansive clays[J]. *Geotechnical & Geological Engineering*, 2018, 36: 3425-3436.
- [12] ADITYA KUMAR ANUPAM, PRAVEEN KUMAR,

- RANSINCHUNG R N G D. Effect of fly ash and rice husk ash on permanent deformation behaviour of subgrade soil under cyclic triaxial loading[J]. **Transportation Research Procedia**, 2016, 17: 596-606.
- [12] 李丽华, 余肖婷, 肖衡林, 等. 稻壳灰加筋土力学性能研究[J]. **岩土力学**, 2020, 41(7): 2168-2178.
- LI Li-hua, YU Xiao-ting, XIAO Heng-lin, et al. Mechanical properties of reinforcement about rice husk ash mixed soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(7): 2168-2178.
- [13] ZHANG Qi, GAO Zhi-gang, CAI Yuan-qiang, et al. Experimental investigation into the cyclic behaviour of geogrid enhanced base layer aggregate through large-diameter triaxial tests[J]. **Transportation Geotechnics**, 2022, 37: 100851.
- [14] 宋飞, 陈旺盛. 土工格室加筋砂土大型动三轴试验研究[J]. **铁道科学与工程学报**, 2022, 19(3): 683-690.
- SONG Fei, CHEN Wang-sheng. Research on large-scale dynamic triaxial test of geocell-reinforced sand[J]. **Journal of Railway Science and Engineering**, 2022, 19(3): 683-690.
- [15] LI L H, CHEN Y J, FERREIRA P M V, et al. Experimental investigations on the pull-out behavior of tire strips reinforced sands[J]. **Materials**, 201, 10(7): 707.
- [16] 李丽华, 余长道, 胡智, 等. 加筋粉煤灰砂混合料大型三轴试验研究[J]. **长江科学院院报**, 2019, 36(8): 97-103, 111.
- LI Li-hua, YU Chang-dao, HU Zhi, et al. Large-scale triaxial tests on reinforced fly ash and sand mixture[J]. **Journal of Yangtze River Scientific Research Institute**, 2019, 36(8): 97-103, 111.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. JTG D30—2015 公路路基设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. JTG D30—2015 Technical specifications for construction of highway subgrades[S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [18] CHOBBASTI A J, GHODRAT H, VAHDATIRAD M J, et al. Influence of using rice husk ash in soil stabilization method with lime[J]. **Frontiers of Earth Science in China**, 2010, 4(4): 471-480.
- [19] RAMEZANIANPOUR A A, MAHDI KHANI M, AHMADIBENI G H. The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes[J]. **International Journal of Civil Engineering**, 2009, 7(2): 83-91.
- [20] HOSSAIN S S, ROY P K, BAE CHANG-JUN. Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: a review[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 310: 125218.
- [21] 马少坤, 王博, 刘莹, 等. 南宁地铁区域饱和圆砾土大型动三轴试验研究[J]. **岩土工程学报**, 2019, 41(1): 168-174.
- MA Shao-kun, WANG Bo, LIU-Ying, et al. Large-scale dynamic triaxial tests on saturated gravel soil in Nanning metro area[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(1): 168-174.
- [22] 谢定义. 土动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 172-177.
- XIE Ding-yi. Soil dynamics[M]. Beijing: High Education Press, 2011: 172-177.
- [23] WERKMEISTER S, DAWSON A R, WELLNER F. Permanent deformation behavior of granular materials and the shakedown concept[J]. **Transportation Research Record**, 2001(1): 75-81.
- [24] WANG K, ZHUANG Y. Characterizing the permanent deformation response-behavior of subgrade material under cyclic loading based on the shakedown theory[J]. **Construction and Building Materials**, 2021, 311: 125325.
- [25] QIAN J G, WANG Y G, YIN Z Y, et al. Experimental identification of plastic shakedown behavior of saturated clay subjected to traffic loading with principal stress rotation[J]. **Engineering Geology**, 2016, 214: 29-42.
- [26] 周文权, 冷伍明, 刘文劫, 等. 低围压循环荷载作用下饱和粗粒土的动力特性与骨干曲线模型研究[J]. **岩土力学**, 2016, 37(2): 415-423.
- ZHOU Wen-quan, LENG Wu-ming, LIU Wen-jie, et al. Dynamic behavior and backbone curve model of saturated coarse-grained soil under cyclic loading and low confining pressure[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(2): 415-423.
- [27] 宫全美, 廖彩凤, 周顺华, 等. 地铁行车荷载作用下地基土动孔隙水压力实验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2001, 20(增刊 1): 1154-1157.
- GONG Quan-mei, LIAO Cai-feng, ZHOU Shun-hua, et al. Testing study of dynamic pore water pressure under train loading[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2001, 20(Suppl.1): 1154-1157.
- [28] 雷华阳, 姜岩, 陆培毅, 等. 交通荷载作用下结构性软土动应力-动应变关系试验研究[J]. **岩石力学与工程学报**, 2008, 27(增刊 1): 3052-3057.
- LEI Hua-yang, JIANG Yan, LU Pei-yi, et al. Experimental study of dynamic stress-strain relation of structural soft soil under traffic load[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(Suppl.1): 3052-3057.
- [29] 李丽华, 秦浪灵, 肖衡林, 等. 加筋建筑垃圾土大型动三轴试验及加筋机制探讨[J]. **岩石力学与工程学报**, 2020, 39(8): 1682-1695.
- LI Li-hua, QIN Lang-ling, XIAO Heng-lin, et al. Large dynamic triaxial test study on reinforcement mechanisms of reinforced construction waste[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2020, 39(8): 1682-1695.