

基于离散元的废旧二灰碎石与土混合料 承载比细观力学特性研究

张小飞¹, 陈芋如², 张松¹, 高雷¹, 田盎然², 唐强^{2*}

(1. 昆山交通发展控股集团有限公司, 江苏 苏州 215335; 2. 苏州大学, 江苏 苏州 215131)

摘要: 建筑垃圾应用于路基过程中, 其材料承载力对道路服役性能具有重要影响。为评价建筑垃圾用于路基填料时的细观力学特性, 该文利用离散元软件对不同含石率的废旧二灰碎石与土混合料进行承载比试验, 并利用离散元法揭示强度形成机理。结果表明: 混合料的承载比随含石率增大不断增加, 含石率为80%时达到最大值。在离散元模拟承载比试验中, 空隙率随着二灰碎石土的含石量的增大先降低后增大, 当含石率为80%时混合料的空隙率最小, 此时能达到最佳的承载效果。随着含石率的逐渐增大, 废旧二灰碎石之间的颗粒相互嵌挤, 形成骨架结构, 因此能够有效承担来自贯入杆的荷载。

关键词: 路基工程; 二灰碎石; 加州承载比; 空隙率; 颗粒流离散元

中图分类号: U414

文献标志码: A

Meso-Mechanical Properties of Bearing Ratio of Waste Lime-Fly Ash Macadam and Soil Mixture Based on Discrete Element

ZHANG Xiaofei¹, CHEN Yuru², ZHANG Song¹, GAO Lei¹, TIAN Angran², TANG Qiang^{2*}

(1. Kunshan Transportation Development Holding Group Co., Ltd., Suzhou, Jiangsu 215335, China;

2. Soochow University, Suzhou, Jiangsu 215131, China)

Abstract: In the process of applying construction waste to subgrade, the bearing capacity of the material has an important impact on the service performance of roads. In order to evaluate the meso-mechanical properties of construction waste used as subgrade filler, the bearing ratio test of waste lime-fly ash macadam and soil mixture with different stone contents was carried out by using discrete element software. The strength formation mechanism was revealed by using the discrete element method. The results show that the bearing ratio of the mixture increases with the increase in the stone content and reaches the maximum value when the stone content is 80%. In the bearing ratio test by discrete element simulation, the porosity first decreases and then increases with the increase in the stone content of lime-fly ash macadam soil. When the stone content is 80%, the porosity of the mixture is the smallest, and the best bearing effect can be achieved. As the stone content rises, the particles between the waste lime-fly ash macadam are embedded with each other to form a skeleton structure so that it can effectively bear the load from the penetration rod.

Keywords: subgrade engineering; lime-fly ash macadam; California bearing ratio; porosity; discrete element of particle flow

收稿日期: 2023-05-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 52078317); 江苏省自然科学基金优秀青年基金资助项目(编号: BK20210720); 江苏省地质矿产勘查局科技项目(编号: 2021KY06); 苏州市建设系统科研项目(编号: 2021-25, 2021ZD30); 昆山交通发展控股集团有限公司科技项目; 中交隧道工程局有限公司科技项目(编号: 8gs-2021-04); 中交一公局有限公司科技项目(编号: KJYF-2021-B-19); 中铁四局科研开发计划项目(编号: 2021-19)

作者简介: 张小飞, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: 982181619@qq.com

*通信作者: 唐强, 男, 博士, 教授, 博士生导师. E-mail: tangqiang@suda.edu.cn

0 引言

随着城市化进程的加快,许多20世纪修建的大量基础设施逐渐老旧已不能满足城市发展需求,中国面临大量的基础设施建设和改扩建需求^[1-2]。房屋、道路、桥梁、隧道和其他基础设施的新建、改扩建和拆除过程产生了超20亿t建筑垃圾,建筑垃圾已成为世界上产量最大的固体废弃物。这些建筑垃圾存量大、增速快,由于缺乏合理的再利用和管理方法,只有20%~30%被重新利用,大量建筑垃圾被直接填埋或露天堆放^[3]。建筑垃圾的堆积不仅占用了宝贵的土地资源,而且还引发了土地退化、水体污染、空气粉尘污染等一系列环境问题。随着政府监管力度的增大,企业需要将建筑垃圾外运或卫生填埋,进一步增加了施工成本、能源消耗和碳排放量^[4-5]。

另一方面,截至2022年末中国公路总里程已达535.48万km,比2021年末增加7.41万km,道路建设需要的砂石骨料数量巨大^[6]。破碎后的建筑垃圾用作路基材料,不仅可以解决建筑垃圾乱堆乱填、影响市容等问题,还能降低工程造价并提高工程环境效益和社会效益,最终实现废弃物的循环利用和社会的循环发展^[7]。

路基作为路面的支承结构,其承载能力对路面结构性能具有决定性作用。老路拆除产生的二灰碎

石具有良好的强度特性和应力分散能力,将废旧二灰碎石用于路基材料中能够提高路基承载力^[8-9]。本文以昆山市青阳路改扩建工程中产生的旧二灰碎石为例,以承载比为评价指标,基于离散元法,探讨将二灰碎石土石混合料作为路基材料的细观力学特性,揭示混合料强度提升机理。

1 二灰碎石土石混合料承载比试验

1.1 试验材料

本文所用的废旧二灰碎石由昆山市青阳路项目老旧桥梁、涵洞等设施拆除产生的建筑垃圾破碎而成,主要成分为废混凝土、废砖块、废水泥稳定碎石等,颗粒级配如图1所示。所用土为青阳路项目的工程弃土,土体的主要参数均参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行测试,结果如表1所示。

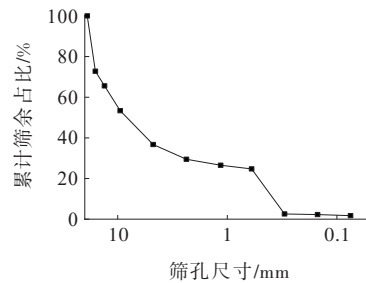


图1 废旧二灰碎石级配曲线

Figure 1 Grading curve of waste lime-fly ash macadam

表1 试验所用土体主要参数

Table 1 Main parameters of soil used in tests

天然密度/ (g·cm ⁻³)	干密度/ (g·cm ⁻³)	含水率/ %	液限/ %	塑限/ %	塑性 指数	最优含 水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)
1.67	1.31	21.56	28.5	18.6	9.9	17.00	1.96

1.2 试验方法

承载比是评价材料抵抗局部荷载贯入过程中的变形能力指标,承载比试验是一种公路工程中常用的评价材料强度的方法^[10-11]。因此,本文采用承载比(R_{CBR})作为评价废旧二灰碎石土石混合料强度的主要指标,参照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)进行测试。所用试验设备主要包括电动击实仪、路面材料强度试验仪,如图2所示。

具体试验方法:按照既定比例配制废旧二灰碎石与土复合材料,调整其含水率为12.5%,按照《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)中T0131—2019



(a) 电动击实仪 (b) 路面材料强度试验仪 (c) 测试后脱模试件

图2 承载比试验仪器及试件照片

Figure 2 Photos of bearing ratio test instrument and test piece

采用重型击实试验对试样进行击实,而后按照《公路

土工试验规程》(JTG 3430—2020)中 T0134—2019 进行试验,采用式(1)、(2)计算贯入量为 2.5 mm 和 5.0 mm 时的承载比^[12]。

$$R_{\text{CBR}}(2.5 \text{ mm}) = \frac{P}{7000} \times 100\% \quad (1)$$

$$R_{\text{CBR}}(5.0 \text{ mm}) = \frac{P}{10500} \times 100\% \quad (2)$$

式中: R_{CBR} 为贯入量为 2.5 mm 或 5.0 mm 时的承载比(%); P 为贯入量为 2.5 mm 或 5.0 mm 时的荷载(kPa)。

为保证路基填料强度,将废旧二灰碎石和土按照一定比例进行混合形成骨架密实结构,提升路基的承载能力。土不仅能够起到胶结作用,而且能够填充再生骨料颗粒之间的空隙,并共同承担外部荷载。因此,本文设计了 6 种不同的含石率(0%、20%、40%、60%、80% 和 100%),考察不同含石率对土石混合料试件力学特性的影响规律。

1.3 试验结果

废旧二灰碎石与土混合料的贯入曲线如图 3 所示。

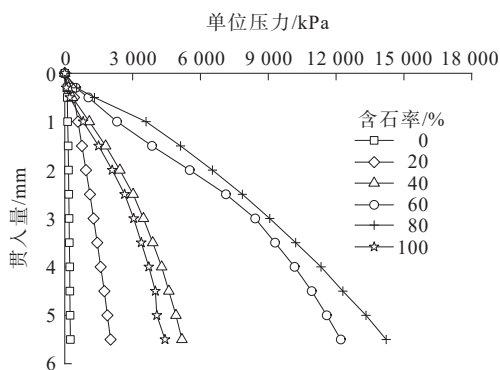


图 3 不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料贯入曲线

Figure 3 Penetration curves of waste lime-fly ash macadam and soil mixture under different stone contents

由图 3 可知:

(1) 随着贯入杆深度的增加,单位压力不断增大。当含石率超过 20% 时,在贯入深度达到 3.0 mm 后曲线存在明显的拐点。在贯入过程中,贯入杆提供的能量主要转化为表面颗粒的形变和材料的内能。在达到拐点前,曲线斜率不断增大,代表贯入相同深度需要的贯入力不断降低。对于试样而言,由于重型击实试验的作用,表面较为密实,因此难以压入。随着贯入深度的增加,颗粒不断发生变形,此时贯入阻力主要为竖向压力的反作用力和贯入杆周围土体造成的摩擦力,曲线斜率保持稳定,呈线性变化。

(2) 在相同贯入量下,单位压力最低意味着材料的承载比较小。随着含石率的增加,相同贯入量下的单位压力不断增加,但 100% 含石率时贯入曲线结果与 40% 含石率时的结果较为接近。这是因为 100% 含石率情况下,废旧二灰碎石颗粒之间没有土颗粒填充,存在大量空隙,导致在贯入过程中颗粒更易发生错动变形,从而大幅降低了试样的承载力。此外,在进行承载比测试前,试样还需要通过重型击实试验进行击实。在较大的击实功作用下,不含土的废旧二灰碎石颗粒被大量破碎,颗粒结构遭到破坏,内部软弱结构面增大,最终导致强度降低。相比之下,土颗粒能够填充二灰碎石之间的空隙,使颗粒排布更加紧密,在击实过程中可以将击实功转化为自身变形,从而保护骨料结构,避免骨料颗粒被击碎。

表 2 为不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料承载比 R_{CBR} 试验结果。

表 2 不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料承载比

Table 2 Bearing ratio of waste lime-fly ash macadam and soil mixture under different stone contents

含石率/ %	不同贯入量(mm)时的 $R_{\text{CBR}}/\%$	
	2.5	5.0
0	2.55	2.23
20	15.93	17.95
40	43.22	46.86
60	101.90	110.40
80	112.30	126.90
100	37.83	38.80

由表 2 可知:承载比在贯入深度为 2.5 mm 和 5.0 mm 时的变化趋势相同,均在含石率为 80% 时达到最大值,且最大值均超过 100%。这表明此时废旧二灰碎石与土混合料的承载力已经超过了级配碎石的强度,力学性能优越,远远高于路基的要求。

2 基于离散元的承载比试验模拟

2.1 离散元模型建立

承载比试验能够评估材料抵抗局部荷载压入变形状况,废旧二灰碎石与土混合料作为非连续均匀介质,在贯入荷载作用下会发生相互错动的剪切位移^[13]。离散元法是一种可以有效解决非连续、多相介质力学问题的数值模拟方法。因此,本文利用颗

粒流离散元软件构建废旧二灰碎石与土混合料的承载比试验模型^[14-15]。

“土颗粒”与“碎石”是相对而言的,根据学者在文献[16]中提出,并考虑模型尺寸,本文选用5 mm作为土石混合物中“土颗粒”与“碎石”的尺寸阈值。模型试样尺寸为150 mm×120 mm(长×高),依据文献[17]对废旧二灰碎石与土混合料的颗粒细观参数进行确定。参数的标定以室内试验的研究成果为衡量标准,通过对颗粒细观力学参数进行不断调整,当

二灰碎石宏观力学特征与室内试验研究结果基本一致时完成标定,即此时认为所选的颗粒细观力学参数是合理可行的,具体数值如表3所示。在承载比试验前,需要对生成试样进行压实,在删除顶面墙体后,建立正方形模拟压头,压头两侧设置宽度均为50 mm的载板,并施加45 N荷载。贯入杆以1.25 mm/min速度竖直向下贯入,直至贯入量达到5.5 mm。不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料的离散元模型如图4所示。

表3 离散元模型颗粒细观参数

Table 3 Meso-structure parameters of particles in discrete element model

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	法向刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	摩擦 系数	法向黏结强 度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	切向黏结强 度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	墙体刚度/ ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)
2 000	1×10^7	3.0×10^6	0.5	1×10^3	1×10^3	1×10^{12}

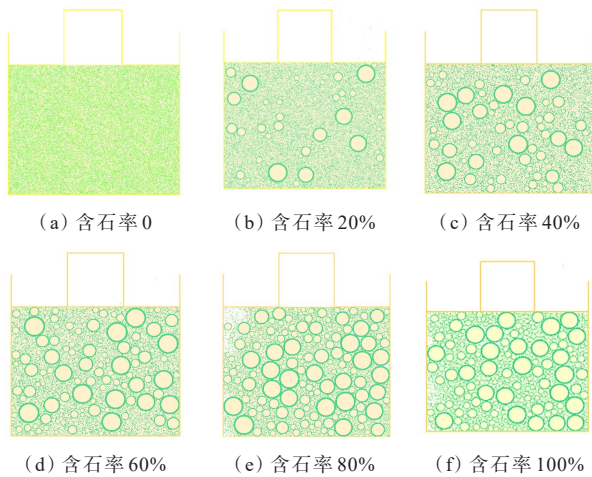


图4 不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料离散元模型
Figure 4 Discrete element models of waste lime-fly ash macadam and soil mixture under different stone contents

2.2 计算结果

(1) 空隙率

空隙率可以反映土体的骨架结构和密实程度。根据离散元模型生成结果,可以获得不同含石率试样的空隙率如图5所示^[18]。从图5可以看出:二灰碎石与土混合料的空隙率随含石率的增加先减小后增大。含石率为0时空隙率最大,此时碎石填料中的颗粒之间没有形成明显的骨架;含石率为60%~80%时,二灰碎石土中的石块颗粒占比适当,足够形成良好的内部骨架;含石率达到60%时,土颗粒能够完全填充石块颗粒形成的空隙,二灰碎石土石混合料的整体性强,受力性能好,具有较大的承载

力,可以作为优良的路基填筑材料。当含石率小于60%时,空隙率随含石率的增加而减小,此时虽然填料中的石块颗粒能够形成内部骨架,但因土颗粒占比较少,骨架间空隙无法被细颗粒完全填充。

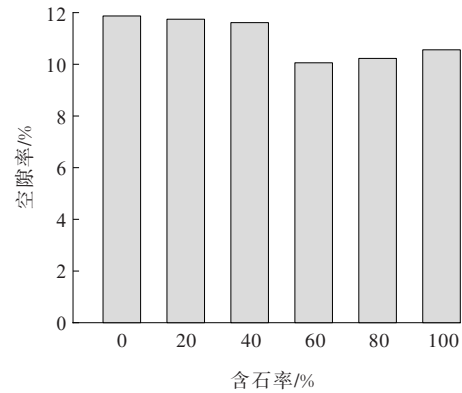


图5 不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料空隙率^[8]
Figure 5 Porosity of waste lime-fly ash macadam and soil mixture under different stone contents^[8]

(2) 贯入曲线及承载比

通过对不同步长下的贯入杆荷载进行监测,可以得到不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料的贯入曲线如图6所示。模拟计算得出的贯入曲线与图3中的室内试验结果规律相近,单位压力均随着贯入量的增加而增大,且曲线存在拐点。相较于试验结果,离散元计算得到的曲线波动性更大,这是由于在模拟中将土颗粒视为粒径小于0.3 mm的小球造成的。当含石率为80%时,曲线的波动性最为明显,表明此时在贯入杆的压力作用下颗粒之间发生

了重新排列,颗粒的不平衡力大于颗粒间的约束力,颗粒出现了瞬时移动,从而出现曲线波动的情况。

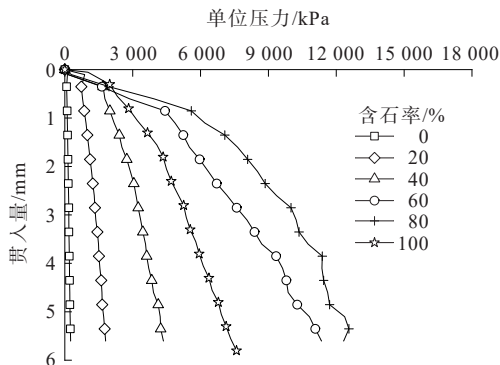


图6 不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料模拟贯入曲线
Figure 6 Simulated penetration curves of waste lime-fly ash macadam and soil mixture under different stone contents

由式(1)、(2)计算得到贯入量为2.5 mm和5.0 mm时对应的承载比,结果如图7所示。

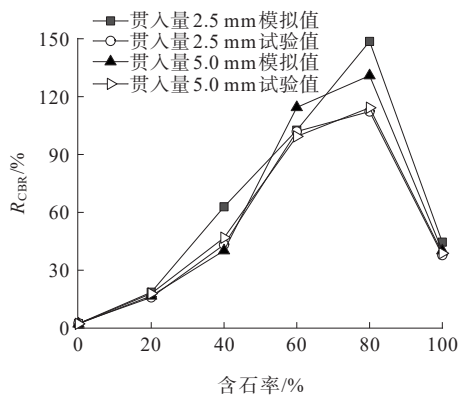


图7 不同含石率下废旧二灰碎石与土混合料承载比模拟值与试验值对比

Figure 7 Comparison between simulated and experimental values of bearing ratio of waste lime-fly ash macadam and soil mixture under different stone contents

由图7可知:随着含石率的增大,承载比不断增加,直至含石率为80%时达到峰值。当含石率大于60%时,填料的加州承载比 R_{CBR} 值较大,此时土的内部骨架作用突出,接触力主要为石块之间的点与点接触,而土中细颗粒只是填充了石块之间空隙,对整体的承载力贡献不大。当含石率为100%时,颗粒骨架之间的空隙无法得到填充,在相同荷载作用下承受应力更大,更易发生应力集中等不利现象,因此实际工程中应将废旧二灰碎石与土混合使用以提升路基的承载力。

对比离散元计算结果与试验结果,二者规律相同,但是当含石率高于40%时出现较为明显误差。当含石率低于20%时,CBR试验模拟结果与室内试验结果基本一致,随后二者开始发生偏差,但当含石率为100%时二者的结果较吻合。为了简化离散元模拟计算的工作量,对模型进行了简化,将承载比试验变为了二维,并将二灰碎石颗粒和土颗粒均简化成圆形,这导致结果可能存在误差。但是,贯入曲线和承载比计算结果表明:上述简化不会影响试验得出的规律,离散元计算结果具有很好的准确度。

(3) 接触力链

由不同土石比二灰碎石空隙率变化特征得知,在含石量为60%~80%时,二灰碎石与土混合料整体性强,受力性能好,具有较大的承载力。模拟计算结果表明:各含石率下试样的接触力链形式较接近,因此仅选择80%含石率的废旧二灰碎石与土混合料作为典型试样,并观察其力链分布状况,从细观角度解释其力学机理。

贯入深度为0、2.5 mm和5.0 mm时废旧二灰碎石与土混合料内部接触力链的变化情况如图8所示。由图8可知:随着贯入深度的增加,试样内部颗粒接触力开始逐渐增大,其力链由初始的随机、离散状态逐渐发展到绕压杆,最终发生力链集中。试样两端桶壁的接触力主要在中部集中。垂直方向上,接触力链自发展路径基本保持不变,表明在承载比试验过程中,骨架结构决定了碎石填料的力链传递路径^[19-20]。

2.3 机理分析

上述研究表明,废旧二灰碎石与土混合料在贯入过程中施加的荷载主要由颗粒之间的骨架承担。随着含石率的逐渐增大,废旧二灰碎石之间的颗粒相互嵌挤形成骨架结构,因此能够有效承担来自贯入杆的荷载。但是,当含石率接近100%时,颗粒与颗粒之间存在的巨大空隙无法被填充,导致颗粒更容易在荷载作用下发生位移、变形和破坏,因此最终强度下降。

与室内试验贯入曲线相比,离散元模拟得到的曲线波动性更大。对于离散元模拟而言,废旧二灰碎石与土混合料属于非连续均匀介质,土石之间主要为点面接触。当压头开始贯入,颗粒将会在单位压力下发生位移,并开始瞬时错动位移,因此曲线发

生波动不平滑。而对于实际情况而言,土是一种弹塑性材料,除了可以与二灰碎石相互作用形成密实骨架结构以外,还能够在外荷载作用下发生弹塑性变形,分散应力,减小颗粒位移,导致实际测得的贯入曲线更加光滑。但是,离散元模拟得到的规律与试验结果相同,考虑到颗粒骨架结构是承担荷载的最主要部分,可以忽略土体的弹塑性变形造成的影响。

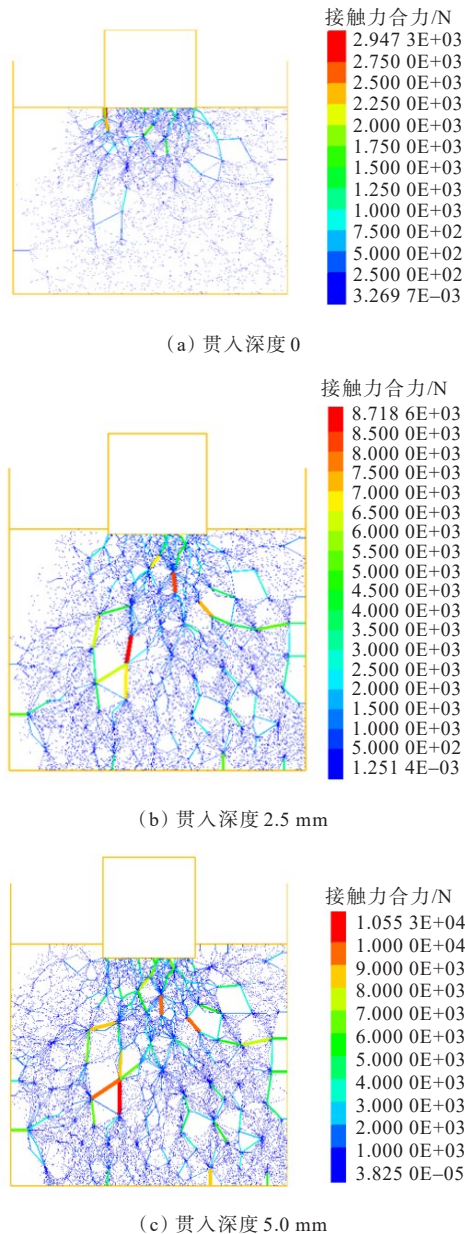


图8 废旧二灰碎石与土混合料内部接触力链随贯入深度变化情况

Figure 8 Variation of internal contact force chain of waste lime-fly ash macadam and soil mixture with penetration depth

本文所用的材料为废旧二灰碎石和土,但是所得结论和规律对于颗粒材料也适用,因此能够将本

文得到的规律和结论应用于建筑垃圾、工业废渣、碎石土等颗粒道路工程材料中,且对于指导建筑垃圾应用于路基材料的设计施工、促进建筑垃圾的循环利用以及提升企业效益、环境效益和社会效益具有重要意义。

3 结论

以昆山市青阳路改扩建工程中产生的旧二灰碎石为例,以承载比为评价指标,基于离散元法探讨以二灰碎石土石混合料作为路基材料的细观力学特性,得出以下结论:

(1) 由承载比试验结果可知,随着含石率的增加,废旧二灰碎石与土混合料的承载比不断增大,在含石率为80%时达到最大值,为112.30%。

(2) 离散元数值计算可以得到不同含石率的空隙率、贯入曲线和贯入量,计算结果与承载比试验结果较为接近。由于颗粒形状和土属性与实际情况略有不同,所得到的贯入曲线波动性更大,但是规律与试验结果相同。

(3) 随着贯入深度的增加,试样内部力链强度不断增加,力链围绕压头发生力链集中现象。在竖直方向上,接触力链发展路径基本保持不变,表明在承载比试验过程中骨架结构决定了材料的力链传递。

参考文献:

References:

- [1] TANG Q, GU F, GAO Y F, et al. Desorption characteristics of Cr(III), Mn(II), and Ni(II) in contaminated soil using citric acid and citric acid-containing wastewater[J]. *Soils and Foundations*, 2018, 58(1): 50-64.
- [2] KU Y D, YANG J H, FANG H Y, et al. Optimization of grasping efficiency of a robot used for sorting construction and demolition waste[J]. *International Journal of Automation and Computing*, 2020, 17(5): 691-700.
- [3] TANG Q, KATSUMI T, INUI T, et al. Membrane behavior of bentonite-amended compacted clay[J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54(3): 329-344.
- [4] MOUSA E, AZAM A, EL-SHABRAWY M, et al. Laboratory characterization of reclaimed asphalt pavement for road construction in Egypt[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2017, 44(6): 417-425.
- [5] XIAO Y J, TUTUMLUER E. Gradation and packing characteristics affecting stability of granular materials:

- aggregate imaging-based discrete element modeling approach[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, 17(3):0000735.
- [6] 交通运输部. 2022年交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2022-06-16) [2022-10-21]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html. Ministry of Transport. Statistical bulletin of transport industry development in 2022[EB/OL]. (2022-06-16) [2022-10-21]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202306/t20230615_3847023.html.
- [7] 王端宜,赵熙. 沥青混合料单轴压缩试验的离散元仿真[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 37(7):37-41. WANG Duanyi, ZHAO Xi. Simulation of uniaxial compression test for asphalt mixture with discrete element method[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 37(7):37-41.
- [8] KHATTAK M J, KHATTAB A, RIZVI H R, et al. Imaged-based discrete element modeling of hot mix asphalt mixtures[J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(8): 2417-2430.
- [9] 王环玲,沙聪,徐卫亚,等. 考虑孔隙率和不均匀系数的土石混合体颗粒流分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2019, 47(3):251-258. WANG Huanling, SHA Cong, XU Weiya, et al. Particle flow analysis of soil-rock mixture considering porosity and heterogeneity[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2019, 47(3):251-258.
- [10] 谢远勇,李改. 级配碎石动态CBR试验研究[J]. *公路工程*, 2014, 39(2):5-8. XIE Yuanyong, LI Gai. Experimental research on dynamic CBR of aggregate crushed stone[J]. *Highway Engineering*, 2014, 39(2):5-8.
- [11] JIANG Y J, WONG L N Y, REN J L. A numerical test method of California bearing ratio on graded crushed rocks using particle flow modeling[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2015, 2(2):107-115.
- [12] 郑军,阎长虹,夏文俊,等. 干湿循环对新型固化土承载强度影响的试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(增刊1):3051-3056. ZHENG Jun, YAN Changhong, XIA Wenjun, et al. Experimental study on the influence of dry-wet cycle on the bearing strength of new solidified soil[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(sup 1):3051-3056.
- [13] 宋浩然,巨能攀,霍羽祥,等. 基于三维离散元的弃渣边坡变形过程模拟[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(24):9796-9803. SONG Haoran, JU Nengpan, HUO Yuxiang, et al. Simulation on slope deformation process of waste slag dump based on three dimensional discrete element[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(24): 9796-9803.
- [14] 石崇,王盛年,刘琳. 地震作用下陡岩崩塌颗粒离散元数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊1): 2798-2805. SHI Chong, WANG Shengnian, LIU Lin. Study on numerical simulation of steep rock collapse by discrete element method[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(sup 1):2798-2805.
- [15] 刘海峰. 基于颗粒流方法的隧道围岩力学特性数值模拟研究[J]. *资源信息与工程*, 2021, 36(1):82-84, 88. LIU Haifeng. Numerical simulation of mechanical properties of tunnel surrounding rock based on particle flow method[J]. *Resource Information and Engineering*, 2021, 36(1):82-84, 88.
- [16] 徐文杰,胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(4):50-56, 70. XU Wenjie, HU Ruilin. Conception, classification and significations of soil-rock mixture[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4):50-56, 70.
- [17] TANG Q, SHI P X, ZHANG Y, et al. Strength and deformation properties of fiber and cement reinforced heavy metal-contaminated synthetic soils[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019, 2019:5746315.
- [18] TANG Q, LIU W, LI Z Z, et al. Removal of aqueous Cu(II) with natural Kaolin: Kinetics and equilibrium studies[J]. *Environmental Engineering and Management Journal*, 2018, 17(2):467-476.
- [19] 查睿,赵延庆,付国志,等. 水基聚合物稳定碎石路用性能研究[J]. *中外公路*, 2021, 41(3):338-342. ZHA Rui, ZHAO Yanqing, FU Guozhi, et al. Study on road performance of water-based polymer stabilized crushed stone[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2021, 41(3):338-342.
- [20] 裴友强,张留俊. 水泥稳定碎石室内振动击实曲线优化研究[J]. *中外公路*, 2023, 43(2):189-194. QIU Youqiang, ZHANG Liujun. Optimization study on indoor vibratory compaction curves of cement stabilized macadam[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2023, 43(2):189-194.