

DOI: 10.11779/CJGE202112008

颗粒形状和压实度对炉渣颗粒土力学特性的影响

吴 杨¹, 黄锦盛¹, 崔 杰^{*1}, 吉本正宪²

(1. 广州大学土木工程学院, 广东 广州 510006; 2. 山口大学工学部, 山口 宇部 7538511)

摘要: 炉渣颗粒土是火电厂发电过程中煤炭燃烧产生的一种颗粒废弃物, 近年来经常作为边坡和路基回填材料在工程建设中使用。对6种不同产地的炉渣颗粒土进行了单颗粒破碎试验, 发现炉渣颗粒土的单颗粒强度显著低于天然砂土, 具有较大的破碎性。随后, 开展了一系列排水三轴剪切试验, 研究了颗粒形状、压实度和围压对其剪切特性的影响。三轴试验结果表明, 压实度可以显著提高炉渣颗粒土的初始刚度及峰值抗剪强度。相较于自然砂土, 炉渣颗粒土拥有较大的峰值摩擦角, 作为回填材料可提供较大的承载力。另外, 炉渣颗粒土的峰值摩擦角随着围压的增大而降低。分析结果揭示颗粒形状和单颗粒强度均是影响炉渣颗粒土抗剪强度的重要因素。在不同的围压水平, 两者对峰值抗剪强度的影响程度有所不同。另外, 通过图像分析法获取了不同种类炉渣颗粒土的多种形状参数, 发现炉渣颗粒土的圆度和球度都显著小于大部分自然砂土, 表明该类颗粒材料拥有较为复杂的颗粒形状。分析结果还表明炉渣颗粒土的临界状态摩擦角与炉渣颗粒土的各个形状参数都存在一定程度的关联性。采用了一个新的能够考虑多种颗粒形状因素影响的综合指标, 建立了其与临界状态强度和临界状态线位置参数的经验关系表达式。

关键词: 颗粒形状; 炉渣颗粒土; 临界状态; 压实度; 摩擦角

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)12-2220-10

作者简介: 吴 杨(1985—), 男, 副教授, 博士, 主要从事颗粒材料和天然气水合物沉积物力学性质等方面的研究。

E-mail: yangwu@gzhu.edu.cn。

Influences of particle shape and degree of compaction on shear response of clinker ash

WU Yang¹, HUANG Jin-sheng¹, CUI Jie¹, YOSHIMOTO Norimasa²

(1. School of Civil Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube 7538511, Japan)

Abstract: The clinker ash is a kind of granular waste produced after the combustion of coal. It has been used in slope and foundation engineering as backfill materials. The single-particle crushing tests on the clinker ash from six different origins are carried out. The results indicate that the clinker ash particles own much lower single-particle strength than the natural sands and exhibit larger crushability. A series of drained triaxial shear tests are performed on the clinker ash to examine the effects of particle shape, degree of compaction and effective confining pressure on its shear characteristics. An increase in the degree of compaction strengthens the initial stiffness and the peak shear strength of the clinker ash. Compared to the natural sands, the clinker ash possesses larger peak friction angle and provides higher bearing capacity as foundation materials. As the effective confining pressure increases, the peak friction angle of the clinker ash gradually decreases. The results suggest that both the particle shape and the single-particle strength are important factors affecting the shear strength of the clinker ash. In addition, several particle shape parameters of the clinker ash are decided using the digital image analysis method. The clinker ash has smaller roundness and sphericity indexes due to its complex particle shape. The analysis results show that the critical state friction angle is well correlated with the particle shape parameters. A general and new particle shape index is employed to correlate with the relevant parameters associated with the critical state and its position.

Key words: particle shape; clinker ash; critical state; degree of compaction; friction angle

0 引言

炉渣颗粒和粉煤灰一样都是火电厂发电过程中煤炭燃烧后产生的废弃物。其中, 废弃物中最主要部分是粉煤灰, 炉渣约占废弃物总量的 10%左右。煤

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908153); 广东省基础与应用基础研究基金项目(2021A1515012096); 广州市科技计划项目(201904010278, 202102010380); 中国工程院重点咨询项目(2019-XZ-18)

收稿日期: 2021-02-03

*通信作者(E-mail: jcui2009@hotmail.com)

炭在能源消费中占据了重要比例, 虽然当前世界各国在大力推广水电、风电、核电等新型清洁能源, 煤炭消费量所占比例也有所下降, 但是, 煤炭作为能源消耗主要来源的格局并未发生改变。因此, 从长期来看, 煤炭消耗仍然会源源不断产生大量的粉煤灰和炉渣等废弃物。由于炉渣露天堆放和简单填埋都会对环境造成严重的污染, 所以急需开发炉渣废弃物回收和再利用的相关技术, 这对环境保护都具有重要的意义。

近年来, 一些学者对炉渣颗粒土 (clinker ash) 在实际工程的应用开展了初步的研究。结果表明, 炉渣与石灰、水泥浆的混合物在地基处理、软土加固中具有明显效果^[1-3]。Consoli 等^[4]研究了炉渣颗粒土在不同剪切应变水平下的力学特性, 炉渣颗粒土与其他自然砂土相比具有更高的抗剪强度, 但是刚度较低。Wakatsuki 等^[5]开展了松散炉渣颗粒土的静、动三轴剪切试验, 发现炉渣颗粒土的抗液化能力均高于天然砂土。Winter 等^[6]考虑了应力、密度等因素对炉渣颗粒土抗剪强度的影响, 提出了一个预测炉渣颗粒土抗剪强度的经验公式。

炉渣颗粒土是煤炭燃烧过程中残留废弃物急速降温后形成的颗粒材料。炉渣颗粒表面和内部孔隙富集, 粒径尺寸不一, 颗粒形状复杂多样。颗粒形状很大程度决定颗粒堆积状态, 颗粒之间的排列和接触型式, 也是影响颗粒材料物理、力学特性的一个重要因素。国内外学者对颗粒形状进行了相关研究并取得了一定的研究成果。Cho 等^[7]对天然砂和人工破碎砂的颗粒形状进行了研究, 认为颗粒形状对颗粒介质的力学性质有显著影响。刘清秉等^[8]揭示了砂土颗粒形状与力学参数指标之间具有良好的相关性。Yang 等^[9]研究了不同质量比例的球形玻璃珠、角状玻璃珠与石英砂组成的混合物, 建立了临界状态参数与形状参数之间的定量关系。Zhou 等^[10]通过引入球面调和分析来重建砂粒的三维真实表面, 建立了一种新的砂粒三维球度、圆度和分形维数的测量框架。Zhao 等^[11]提出了一种基于多超椭球的非球面凸粒子三维 DEM 建模方法, 该方法对颗粒介质的动态和准静态建模具有良好的鲁棒性和有效性。Nie 等^[12]提出了一种基于 X 断层扫描技术的砂粒真实形状特征和模拟的概率方法, 利用球面调和函数来表示真实的粒子形态, 试验结果表明该方法能够很好地模拟 Leighton Buzzard 砂的颗粒形状。孔亮等^[13]通过颗粒流模拟发现颗粒不规则性的增加会导致颗粒材料天然孔隙率的增大。张程林等^[14]基于颗粒的二维图像, 通过离散元技术实现了三维状态下不规则颗粒形状的模拟。文献[15~17]研究了堆石体颗粒形状对宏观力学性质的影响, 揭示了两者的关系并确立了相关表达式。康馨等^[18]修正了表征

颗粒三维形状的形状参数, 有效的解决了表征二维形状参数贡献度的问题。此外, 颗粒形状对土体材料临界状态强度和临界状态线位置参数的影响也是显著的, 以往的研究表明^[7, 9, 19-20], 颗粒材料临界状态线位置的斜率和截距会随着圆形度、球度等颗粒形状复杂性的增加而逐渐减小。

目前, 颗粒形状对岩土材料的力学性质的影响虽然已经取得了一些较好的认识。但是对于炉渣颗粒土形状特性的研究还未见报道。当前, 针对炉渣颗粒土形状对其工程力学特性的影响还没有进行过全面的研究, 这一不足严重限制了炉渣颗粒土在工程领域中的推广应用。

本文系统研究了 6 种不同类型的炉渣颗粒土的颗粒和力学特性。针对炉渣颗粒土开展了单颗粒破碎试验, 获得单颗粒破碎强度特性。同时, 开展了大量三轴排水剪切试验, 详细研究颗粒形状、压实度和固结压力对抗剪强度的影响。此外, 识别了多种炉渣的初期形状参数, 研究颗粒初期形状对炉渣颗粒土和其他砂土材料临界状态强度和临界状态线位置参数的影响。

1 炉渣颗粒土的物理、颗粒和压实特性

1.1 物理特性

炉渣颗粒样品取自日本西部地区 6 个不同地点的火力发电厂, 本研究选用的 6 种炉渣颗粒土分别被命名为 CA.A/CA.a, CA.B/ CA.b, CA.C/ CA.c, CA.D/ CA.d, CA.E/ CA.e 和 CA.F/ CA.f。试样 CA.a-CA.f 的取样时间比试样 CA.A-CA.F 的早, 试样名称中同样的英文代表字母 (不区分大小写) 表明获取地点是相同的。根据 X 射线衍射分析结果, 炉渣颗粒的主要矿物成分是石英、莫来石、硅线石、块磷铝矿、赤铁矿和磁铁矿等。表 1 给出了 6 种炉渣颗粒土的物理参数, 包括土粒相对质量密度 G_s 、最大孔隙比 e_{max} 、最小孔隙比 e_{min} 、不均匀系数 C_u 和平均粒径 d_{50} 。其中, 最大、最小孔隙比是按照日本岩土工程会的标准确定的^[21]。可以看出炉渣颗粒土的土粒相对质量密度 G_s 在 2.07~2.18 变化, 较天然砂的颗粒相对质量密度 (2.60~2.80) 低, 这是由炉渣颗粒土的颗粒内部和表面含有较多不规则的孔隙所致, 因此炉渣颗粒土可被视为轻质颗粒材料。同时, 炉渣颗粒土的最大孔隙比和最小孔隙比也显著大于天然砂土, 这是因为炉渣颗粒形状较为复杂, 这改变了颗粒之间的接触形式从而使得颗粒之间有较大的孔隙空间。

图 1 给出了 6 种炉渣颗粒土的粒度分布曲线。图 1 中两条断线之间的区域代表从 15 家不同地点火力发电厂收集的约 60 种炉渣颗粒土的颗粒级配分布范围^[5]。可以发现, 炉渣颗粒土的粒度分布较为宽广。本文所

表 1 炉渣颗粒土物理性质

Table 1 Physical properties of clinker ash

| 试样 | 颗粒相对质量密度 G_s | 最大孔隙比 e_{\max} | 最小孔隙比 e_{\min} | 不均匀系数 C_u | 平均粒径 d_{50}/mm | 平均单颗粒强度 $\sigma_{\text{fm}}/\text{MPa}$ |
|------|-------------------|---------------------|---------------------|----------------|----------------------------|--|
| CA.A | 2.072 | 1.748 | 0.949 | 20.3 | 0.570 | 4.27 |
| CA.B | 2.151 | 1.646 | 1.010 | 12.5 | 0.210 | 1.99 |
| CA.C | 2.173 | 1.618 | 0.883 | 13.8 | 1.300 | 2.56 |
| CA.D | 2.132 | 1.488 | 0.887 | 21.2 | 0.220 | 1.04 |
| CA.E | 2.151 | 1.422 | 0.752 | 26.7 | 0.710 | 4.75 |
| CA.F | 2.110 | 1.425 | 0.769 | 21.0 | 1.750 | 3.12 |

采用样品的颗粒级配曲线大部分都分布在两条断线之中, 所选取的样品能够很好地代表炉渣颗粒土的粒度分布情况。

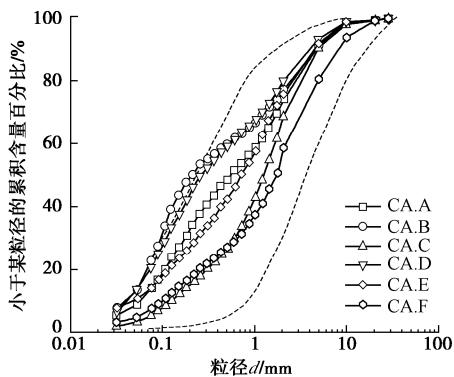


图 1 炉渣颗粒土粒度分布曲线

Fig. 1 Grain-size distribution curves of clinker ash

1.2 颗粒特性

(1) 颗粒形状

图 2 为 6 种炉渣颗粒土的代表颗粒在光学显微下的图像。从图中可以清楚地看到炉渣颗粒表面分布有大量孔隙。这些复杂孔隙是炉渣在熔融状态下从高温的锅炉 (约 1400℃) 落到水箱中, 迅速冷却和硬化后所形成的。由于炉渣是冷却、硬化后再经过研磨粉碎后形成的, 所以与天然砂土相比, 不同种类炉渣颗粒土在形状上均呈现出较明显的不规则性, 同时颗粒的轮廓上分布着较多的棱角。此外, 不同炉渣颗粒土的形状也存在差异, 而炉渣颗粒土的初始颗粒样貌会对其物理和力学特性产生较大的影响, 因此, 非常有必要对不同炉渣颗粒土之间的形状差异进行量化分析。



图 2 电子显微镜下炉渣颗粒土典型颗粒图像

Fig. 2 Electron scanning images of typical clinker ash grains

以往的研究表明, 从试验样品中随机选取 20 个

颗粒, 计算选取颗粒的形状参数的平均值, 就可以合理表征样品的颗粒形状特点^[22]。为了增强所选样品的代表性, 本研究从每种炉渣颗粒样品中都选取 100 个颗粒, 使用高清数码照相机, 对颗粒进行拍摄, 获取炉渣颗粒二维投影平面的数字图像。在使用计算几何程序对颗粒形状参数量化分析之前, 需要对颗粒图像进行黑白二值化处理, 采用 Zheng 和 Hryciw 开发的计算几何程序识别出所需的炉渣颗粒的形状参数^[23]。

本文采用长宽比 A_r 、球度 S 、圆形度 R 和凹凸度 C 4 个参数来描述炉渣颗粒的形状特征,

$$A_r = a/b \quad , \quad (1)$$

$$S = \frac{P_c}{P} \quad , \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N r_i / N}{r_{\text{ins}}} \quad , \quad (3)$$

$$C = \frac{S_A}{(S_A + S_B)} \quad . \quad (4)$$

式中 a, b 为颗粒的宽度和长度; 长宽比 A_r 这个指标主要用来描述颗粒的细长程度, 在 0~1 变化, 颗粒越细长, 其数值越小。 P 为颗粒的周长; P_c 为颗粒的等效面积的圆周长; 球度 S 越接近 1, 表明颗粒形状越接近球体。 r_i 为颗粒棱角处的曲率半径, r_{ins} 为颗粒的最大内接圆半径, N 为颗粒个数。圆形度 R 的取值范围在 0~1, R 的数值越小, 表明颗粒的棱角越多; S_A 为颗粒的面积, S_B 为颗粒轮廓上凹陷处的总面积。全部种类炉渣颗粒土的每个形状参数的具体数值是选取的 100 个颗粒的平均值, 如表 2 所示。

表 2 炉渣颗粒土的颗粒形状参数

Table 2 Particle shape parameters of clinker ash

| 试样 | 圆形度 R | 长宽比 A_r | 球度 S | 凹凸度 C | 平均规则性 ρ |
|------|------------|--------------|-----------|------------|-----------------|
| CA.a | 0.402 | 0.715 | 0.781 | 0.947 | 0.711 |
| CA.b | 0.375 | 0.708 | 0.707 | 0.930 | 0.680 |
| CA.c | 0.389 | 0.663 | 0.810 | 0.935 | 0.701 |
| CA.d | 0.414 | 0.645 | 0.801 | 0.949 | 0.702 |
| CA.e | 0.388 | 0.676 | 0.747 | 0.935 | 0.686 |
| CA.f | 0.387 | 0.652 | 0.751 | 0.941 | 0.682 |
| CA.A | 0.379 | 0.645 | 0.814 | 0.929 | 0.691 |
| CA.B | 0.366 | 0.684 | 0.822 | 0.916 | 0.697 |
| CA.C | 0.408 | 0.704 | 0.820 | 0.956 | 0.723 |
| CA.D | 0.362 | 0.625 | 0.823 | 0.928 | 0.684 |
| CA.E | 0.396 | 0.689 | 0.821 | 0.942 | 0.712 |
| CA.F | 0.384 | 0.714 | 0.817 | 0.945 | 0.715 |

(2) 单颗粒破碎强度

由于炉渣颗粒的成分组成与天然砂土显著不同, 掌握炉渣颗粒的单颗粒强度特性是十分必要的。本文对 6 种炉渣颗粒土进行了单颗粒破碎试验, 得到炉渣颗粒土的单颗粒强度, 相关的单颗粒加载试验设备在以往的研究中已经给出了详细的描述^[24]。试验中, 分别选取了粒径不同的颗粒进行测试。单颗粒破碎试验加载过程中, 采用的位移速率均为 0.1 mm/min。为便于与先前获得的自然类砂土的单颗粒破碎强度进行对比, 本文也采用下式计算单颗粒破碎强度 σ_f :

$$\sigma_f = \frac{F_f}{d_0^2}, \quad (5)$$

式中, F_f 为单个颗粒破碎时的荷载大小, d_0 为单个颗粒的等效粒径。

图 3 显示了炉渣颗粒土和天然砂土的平均单颗粒破碎强度 σ_{fm} 与粒径 d_0 之间的关系。平均单颗粒破碎强度 σ_{fm} 是来源于 20 个任意选取的、粒径不同颗粒的单颗粒破碎试验结果的平均值, 其数值可参见表 1。

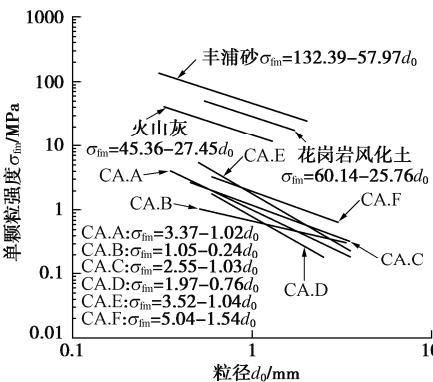


图 3 炉渣颗粒土和天然砂土的平均单颗粒破碎强度

Fig. 3 Mean crushing strengths of clinker ash and natural sands

由图 3 可知, 单颗粒平均破碎强度从大到小依次为丰浦砂、花岗岩风化土、火山灰和炉渣颗粒土。与天然砂土类似, 平均颗粒破碎强度随粒径的增加而降低。粒径较小的颗粒主要由单一矿物组成, 内部结构更牢固, 因此单颗粒破碎强度也更高。另外, 炉渣颗粒土的平均单颗粒破碎强度显著低于天然砂土, 这说明炉渣颗粒土是一种易发生破碎的颗粒材料。相对于天然砂土, 炉渣单颗粒破碎强度随颗粒尺寸增加而下降的趋势更为明显, 这最主要是由于炉渣颗粒内部随机分布的大量孔隙以及颗粒成分构成非均质性所导致。

1.3 压实特性

图 4 展示了炉渣颗粒土和花岗岩风化土的干密度可以确定不同种类炉渣颗粒土的最大干密度 ρ_{dmax} 和最优含水率 w_{opt} 。压实体验结果表明, 炉渣颗粒土的干密度 ρ_d 随着含水率的增长较为平缓增加, 达到峰值后缓缓下降, 不同于花岗岩风化土的压实曲线具有明显的峰值。这表明炉渣颗粒土干密度 ρ_d 受含水率

w 的影响并不明显, 其主要原因是由于炉渣颗粒自身形状复杂且呈角状, 因此难以重新排列。由于炉渣颗粒土干密度对于水的不敏感性, 在压实过程中也就不必对炉渣材料的含水率进行特别的调整。

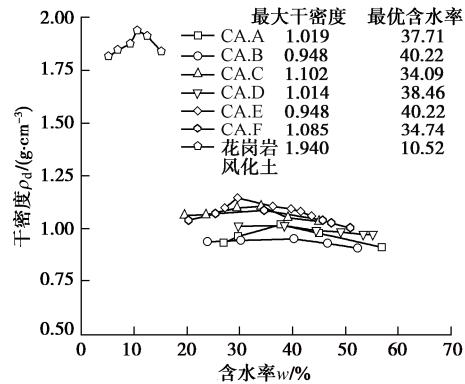


图 4 炉渣颗粒土干密度随含水率的变化规律

Fig. 4 Variation in dry density of clinker ash with water content

此外, 炉渣颗粒土的干密度在 $0.97\sim1.16\text{ g/cm}^3$ 变化, 远低于花岗岩风化土。炉渣颗粒土的最优含水率大都集中在 36%~48%, 这也高于花岗岩风化土的最优含水率。这可能是由于炉渣颗粒内部具有较多孔隙, 部分水留存在颗粒内部的孔隙中所引起的。本文选取压实度 $D_c = \rho_d / \rho_{dmax}$ 作为量化炉渣颗粒土密实状态的物理指标。这是由于在施工现场使用压实度 D_c 来控制回填材料的密实程度是十分便捷的。

2 三轴试验条件

为调查炉渣颗粒土作为路基和回填材料的力学性质, 本研究开展了一系列不同工况的三轴排水剪切试验研究颗粒形状、压实度和固结压力对其剪切特性的影响。在试样制备过程中, 选取 85%, 90% 和 100% 3 个压实度 D_c 等级调整试样的密实程度。试样制备采用捣锤 (2.5 kg) 击实的方法, 试样在模具中分 5 层进行振捣, 每次击实捣锤都从 30 cm 的高度落下, 击实 24 次, 从而使试样获得所需的压实能量。由于炉渣被用作路基浅层回填材料, 所以本研究中试样的围压水平设定为 50, 100, 200 kPa。此外炉渣颗粒表面以及颗粒内部中存在较多孔隙, 试样较难达到完全饱和状态。为了确保试样尽可能接近饱和状态, 首先将其放置在真空室的脱气水中 2~3 d, 尽可能多的除去空气。在进行等向固结前, 对试样进行通水饱和并施加 1 d 的反压, 以减少试样内部残留的空气。每个试样在剪切加载前先查验 B 值, 若 B 值大于 0.95, 则可认为试样已达到饱和要求。试样高 20 cm, 直径 10 cm。三轴试验的剪切速率设定为 0.2%/min, 当轴向应变达到 20% 时, 终止试验。将剪切完成后的试样放入烘箱中烘干, 并测量试样烘干后的干重, 计算试样

表 3 三轴排水剪切试验条件

Table 3 Experimental conditions for drained triaxial shear tests

| 试样 | σ'_c /kPa | 实际压实度 D_c /% | | 试样 | σ'_c /kPa | 实际压实度 D_c /% | | |
|------|------------------|----------------|-------|-------|------------------|----------------|------|-------|
| CA.A | 50 | 83.5 | 88.1 | 96.9 | CA.D | 50 | 83.6 | 87.3 |
| | 100 | | 88 | 97.9 | | 100 | 90.8 | 100.7 |
| | 200 | 83.4 | 87.4 | 99.1 | | 200 | 85.0 | 101.4 |
| CA.B | 50 | 88.1 | 90.1 | 103.4 | CA.E | 50 | 84.6 | 87.7 |
| | 100 | | 92.7 | 104.2 | | 100 | 85.0 | 86.2 |
| | 200 | 86.0 | 93.7 | 104.9 | | 200 | 90.0 | 98.0 |
| CA.C | 50 | 83.8 | 88.2 | 96.8 | CA.F | 50 | 85.0 | 88.9 |
| | 100 | | 98.6 | | | 100 | 85.0 | 92.0 |
| | 200 | 83.0 | 101.0 | | | 200 | | 99.3 |
| | | | | | | | | 99.9 |

注：目标压实度 D_c 为 85%，90%，100%。

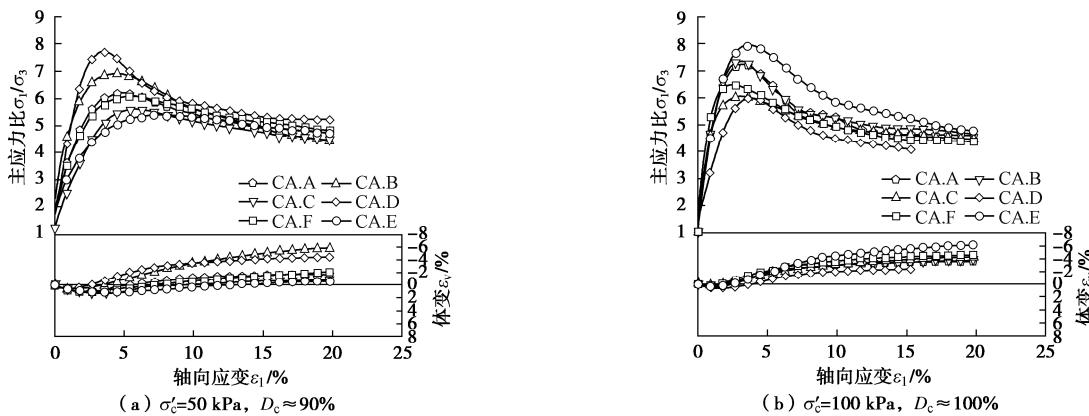


图 5 炉渣颗粒土在不同试验条件下的应力 - 应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain curves for clinker ash under different test conditions

的实际压实度。测量结果显示试样的实际压实度和目标值会略有差异。炉渣颗粒排水三轴剪切试验详细的试验条件如表 3 所示。

3 试验结果

3.1 颗粒特性对炉渣颗粒土剪切特性的影响

图 5 表示相同试验条件下 6 种炉渣颗粒土的主应力比 σ_1/σ_3 、体积应变 ε_v 和轴向应变 ε_1 的关系曲线图。从图中可以看出，6 种炉渣颗粒的应力 - 应变关系曲线变化规律相似，炉渣颗粒的抗剪强度很大程度上受到颗粒特性的影响。从图 5 (a) 可以看到，炉渣颗粒土 CA.B 和 CA.D 在围压 σ'_c 为 50 kPa 时拥有较高的抗剪强度。表 2 的结果显示炉渣 CA.B 和 CA.D 颗粒的圆形度 R 数值均较小，也意味着颗粒形状更为复杂。在较低的围压，复杂的形状会加剧颗粒间的咬合效应，从而提升试样抗剪强度。McDowell 等^[25]的研究也证明了颗粒形状会影响应力在土体颗粒接触点处的传递模式。图 5 (b) 表明，相同试验条件下，不同种类炉渣的强度大小顺序也发生变化。当围压的大小为 100 kPa，压实度约为 100% 时，试样 CA.A 和 CA.E 的抗剪强度较大。这可能是由于随着围压和压实度 D_c 的增加，剪切过程中颗粒已经发生破碎，部分颗粒的棱角脱落，颗粒之间咬合减弱，平均单颗粒破碎强度 σ_{fm} 逐渐成为影响炉渣颗粒土抗剪强度的主要因素。

导因素。从表 1 可得，试样 CA.A 和 CA.E 的平均单颗粒破碎强度也都显著高于其他 4 种炉渣颗粒土。通过以上分析可以发现，相同试验条件下，颗粒形状和单颗粒破碎强度都是影响炉渣抗剪强度的关键因素，它们在不同条件下的贡献作用有所不同。

3.2 压实度和围压对炉渣颗粒土剪切特性的影响

为了更好的说明压实度和围压对炉渣颗粒土剪切特性的影响，本文选取了两种炉渣颗粒土的三轴试验结果进行展示。图 6 给出炉渣颗粒土在围压 50, 200 kPa 时及不同压实度条件下的应力 - 应变关系曲线。

试验结果表明，压实度 D_c 的增大能够显著提高炉渣颗粒土 $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$ 曲线在初始阶段的曲线斜率以及峰值主应力比，同时提升炉渣颗粒土的剪胀行为。压实度的增加也使炉渣颗粒土 $\sigma_1/\sigma_3 - \varepsilon_1$ 曲线的应变软化行为变得更为显著。一些学者过去在研究压实度对颗粒类废弃材料力学行为的影响时，也得到了类似的结果^[26]。此外，随着压实度 D_c 的增加，抗剪强度达到峰值时所对应的轴向应变水平也相应的减小。这是由于在剪切的前期阶段，炉渣颗粒土颗粒在松散状态下的移动和重新排列延迟了抗剪强度峰值的出现，而密实状态下炉渣颗粒土颗粒间的接触更加紧密，使密实试样的峰值抗剪强度比在松散状态下出现得更早。类似的影响在以往对石英砂的研究中也有过报道^[27]。在相同

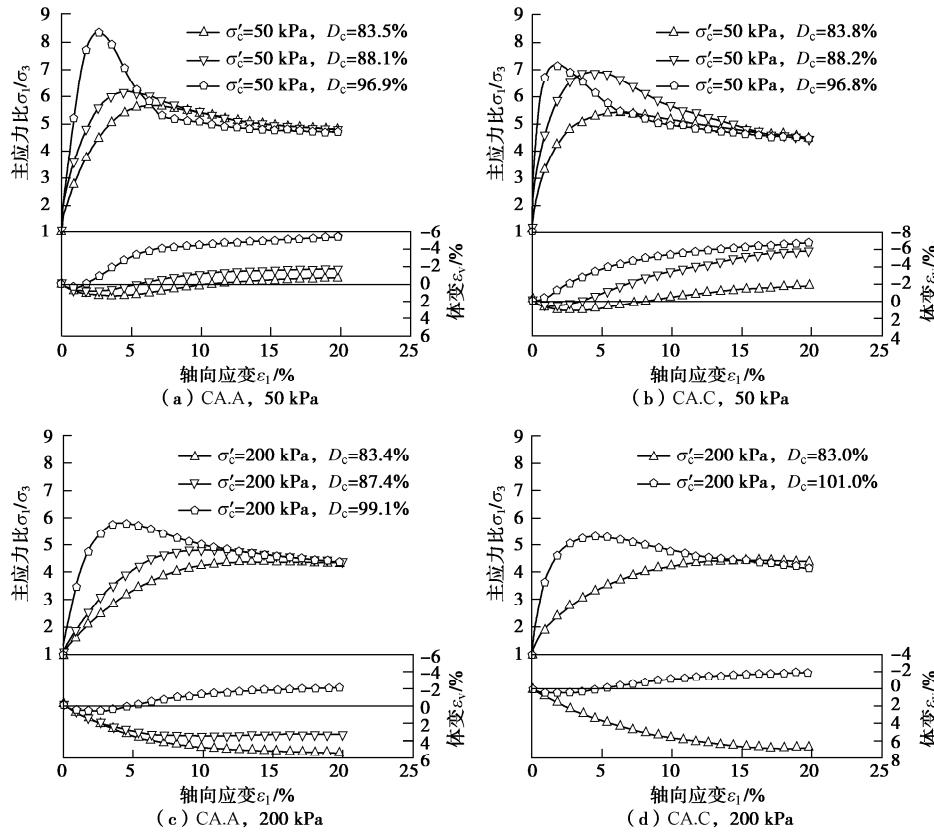


图 6 不同压实度条件下炉渣颗粒土的应力-应变关系

Fig. 6 Stress-strain curves for clinker ash under different degrees of compaction

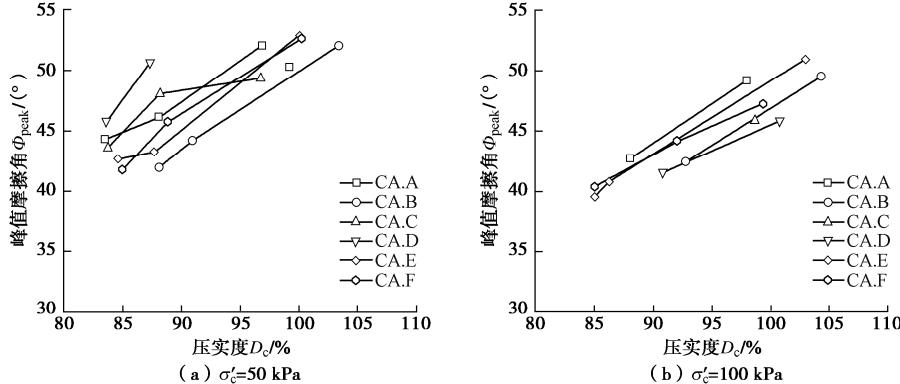


图 7 不同压实度条件下炉渣颗粒土的峰值摩擦角

Fig. 7 Variation in peak friction angle of clinker ash with varying degrees of compaction

的围压 σ'_c 条件下, 无论压实度 D_c 的大小如何, 可以观察到炉渣颗粒土的主应力比 σ_1/σ_3 随着轴向应变的增大会交汇并近似稳定在一个恒定的数值, 同时试样体变的变化也趋于平稳。这时近似认为炉渣颗粒土试样已经到了临界状态^[28-31]。

试验结果还表明, 在相同的压实度 D_c 下, 炉渣颗粒土的峰值主应力比随着固结压力的增大而减小, 并且弱化了应变软化行为。对 $D_c \approx 90\%$ 的炉渣颗粒土, 围压 σ'_c 的增加也会导致颗粒破碎的发生, 从而使炉渣颗粒土的体积变化行为从剪胀(图 6(a))转变为剪缩(图 6(c))。过去的研究表明, 颗粒破碎会对砂土剪切强度和变形产生显著的影响。本试

验的结果也充分说明炉渣颗粒土抗剪强度显著依赖于压实度和固结压力的大小。图 7 给出了 6 种炉渣颗粒土峰值摩擦角 ϕ_{peak} 伴随压实度增长的变化规律。试验结果表明, 峰值摩擦角 ϕ_{peak} 随着压实度的提高表现出显著增加趋势。相对于天然砂土, 炉渣颗粒土的峰值摩擦角 ϕ_{peak} 数值较大。当炉渣颗粒土的压实度 $D_c \approx 90\%$ 时, 峰值摩擦角超过 40° ; 当压实度 $D_c \approx 100\%$ 时, 部分试样的峰值摩擦角可能会超过 50° 。这说明压实作用可以显著提升炉渣颗粒土的抗剪强度指标。

图 5~7 的试验结果表明炉渣颗粒土的抗剪强度受到压实度 D_c 、围压 σ'_c 、颗粒形状以及单颗粒破碎

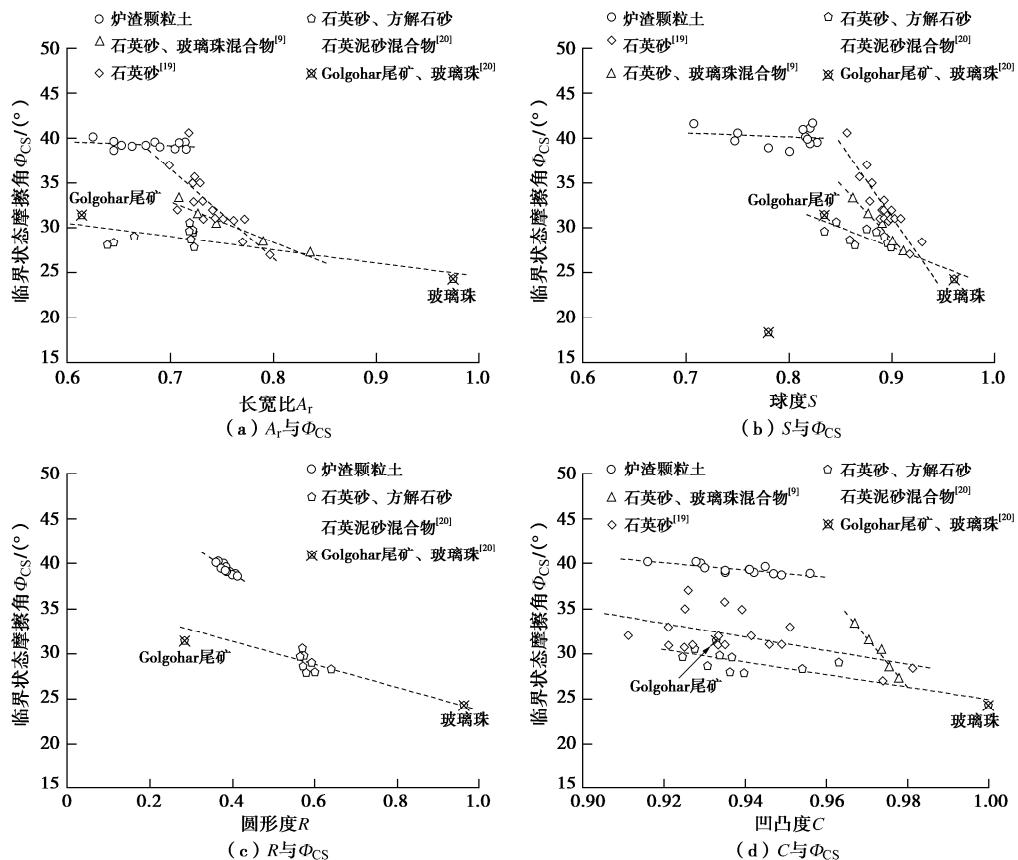


图 8 颗粒形状参数对临界状态摩擦角的影响

Fig. 8 Effects of particle shape parameters on critical state friction angle of different granular materials

强度等因素的综合影响^[6]。对于特定种类的炉渣颗粒土，压实度 D_c 和围压 σ'_c 对剪切强度影响起到主导作用。相同工况下，颗粒形状和单颗粒破碎强度对抗剪强度的影响也应该引起足够重视。

3.3 临界状态下颗粒形状对力学性能的影响

Cho 等^[7]认为岩土材料的颗粒形状会影响临界状态摩擦角，同时也会改变孔隙比和应力平面临界状态线的位置信息^[9]。炉渣颗粒土复杂的初期颗粒形状会影响颗粒之间的接触模式和孔隙分布模式。本研究基于已知的颗粒形状对力学性质影响的认识，调查炉渣颗粒初始形状指标和临界状态强度和临界状态线位置参数的关联性。

图 8 展示了不同颗粒材料的临界状态摩擦角 ϕ_{peak} 与长宽比 A_r 、球度 S 、圆度 R 和凹凸度 C 的关系图。为了更好说明影响的普遍性，取自相同地点但获取年份不同的另外 6 种炉渣颗粒土（较早时间获取，对应命名为 CA.a—CA.f）以及文献中记载的其他颗粒材料的结果也与本研究的结果一起进行比较。较早时间获得的 6 种炉渣材料的形状参数也在表 2 中给出。与其他天然砂土材料相比，炉渣颗粒土具有更大的临界状态摩擦角，其数值大体在 $38.60^\circ \sim 40.15^\circ$ 变化，详细数值见表 4。从图 8 中可以看出，炉渣颗粒土和其他砂土的临界状态摩擦角都随长宽比

A_r 、球度 S 、圆度 R 和凹凸度 C 的增大而减小。这是由于颗粒复杂的形状有助于提高颗粒之间的咬合从而抵抗较大的外部荷载。炉渣颗粒土的棱角较多，炉渣颗粒的球度 S 和圆度 R 比大多数自然砂土的数值要小。在本研究中，炉渣颗粒的球度 S 范围为 $0.707 \sim 0.822$ ，圆度 R 的变化范围为 $0.362 \sim 0.414$ ，其变化范围比砂土材料要窄得多。由图 8 (d) 可见，炉渣颗粒土临界摩擦角随凹凸度 C 的增大而减小。炉渣颗粒土凹凸度 C 的变化范围为 $0.91 \sim 0.96$ ，与砂土材料相似。

Yang 等^[9]认为对于长宽比 A_r 、凹凸度 C 和球度 S ，当 3 个参数值逐渐接近于 1 时，颗粒棱角分明的不规则形状均逐渐趋向于圆润规则的球体，因此，可以通过三者的算术平均值来表示颗粒形状的整体情况。Lashkari 等^[20]在 Yang 等^[9]的基础上引入了圆度 R ，并提出了新的表示颗粒形状整体情况的参数—颗粒平均规则性 ρ ：

$$\rho = \frac{A_r + S + R + C}{4} \quad (6)$$

本研究中将使用该参数来综合评价颗粒的形状，每种炉渣颗粒土颗粒平均规则性 ρ 的具体值见表 2。

图 9 展示了炉渣颗粒和天然砂土的颗粒平均规则性 ρ 与临界状态摩擦角的关系曲线。从图中可以看

出, 临界状态角 ϕ_{cs} 同样随着颗粒平均规则性 ρ 的增加而降低。根据试验结果可以得到经验表达式:

$$\phi_{cs} = 50.85 - 16.49\rho \quad (7)$$

使用上述公式可以通过测量炉渣颗粒材料的初期形状参数来快速、大体预测其抗剪强度指标。

颗粒材料临界状态线的位置同样会受到颗粒形状的影响。图 10 展示的是先后两次获取的 12 种炉渣颗粒土的临界状态线。本研究中, 由于试验终止时大部分试样的抗剪强度和体积变化都趋于平稳, 认为试样都近似达到了临界状态点。试验结果表明不同种类的炉渣颗粒土的临界状态线都集中分布在一定范围内, 但是其位置显著受到颗粒形状的影响。炉渣颗粒土临界状态线可以近似采用下式的直线形式表达:

$$e = e_T - \lambda \ln p' \quad (8)$$

式中, e_T 为临界状态线在 $p'=1$ kPa 时的截距, λ 为临界状态线的斜率。在临界状态理论中, 临界状态线在 $e - \ln p'$ 平面上的截距 e_T 对应土体材料在极低的平均有效应力下的孔隙比, 而斜率 λ 则对应于土体材料的可压缩性。各种炉渣颗粒土的临界状态线的几何参数见表 4。

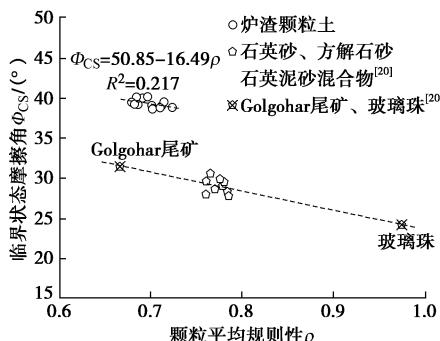


图 9 炉渣颗粒土平均规则性 ρ 与临界状态角的关系

Fig. 9 Relationship between mean regularity of particles and critical state friction angle for clinker ash

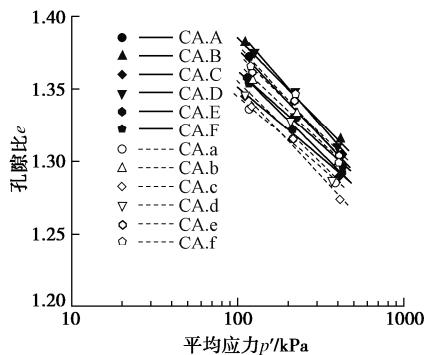


图 10 炉渣颗粒土的临界状态线

Fig. 10 Critical state lines of clinker ash

颗粒形状对临界状态线位置参数的影响同样可以通过颗粒的平均规则性 ρ 来量化。图 11 给出了炉渣

颗粒土和其他天然砂土的颗粒平均规则性 ρ 与临界状态线位置参数的关系。炉渣颗粒土临界状态线的斜率和截距均随着颗粒平均规则性 ρ 的增加而降低。根据本研究的实验结果, 建立了适用于炉渣颗粒材料的经验关系式: $\lambda = 0.408 - 0.506\rho$, $\Gamma = 2.599 - 1.437\rho$ 。这说明了随着炉渣颗粒的几何形状趋于圆润和规则, 炉渣颗粒土的空间排列也更为紧密, 导致材料的可压缩性变低。同时, 与天然砂土相比, 多棱角、形状复杂的炉渣颗粒土难以排列成致密的堆积状态, 因此临界状态线的截距较天然砂土高。

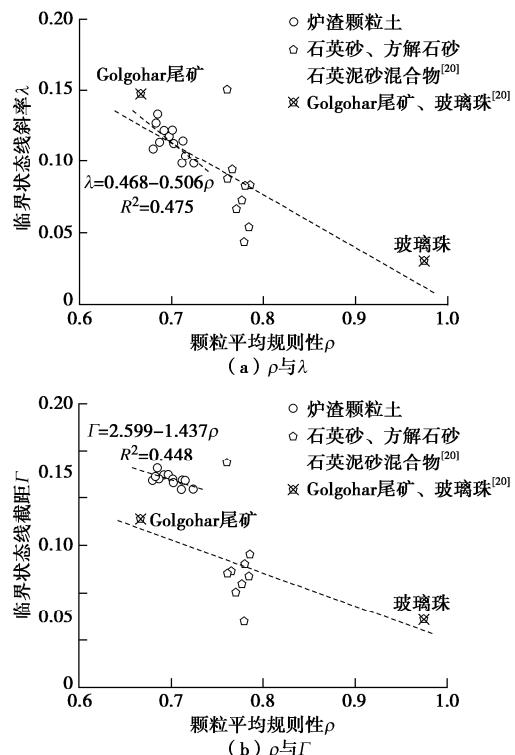


图 11 炉渣颗粒土和天然砂土的平均规则性 ρ 与临界状态线位置参数的关系

Fig. 11 Relationship between mean regularity of particles and critical state line position parameters of clinker ash and other natural sands

表 4 炉渣颗粒土临界状态摩擦角与临界状态线几何参数

Table 4 Critical state friction angles and geometrical parameters of critical state line for clinker ash

| 试样 | 临界状态摩擦角 ϕ_{cs} | 截距 Γ | 斜率 λ |
|------|---------------------|-------------|--------------|
| CA.A | 39.95 | 1.541 | 0.121 |
| CA.B | 40.15 | 1.589 | 0.117 |
| CA.C | 38.82 | 1.596 | 0.097 |
| CA.D | 40.10 | 1.576 | 0.132 |
| CA.E | 39.02 | 1.598 | 0.114 |
| CA.F | 39.54 | 1.609 | 0.102 |
| CA.a | 38.77 | 1.619 | 0.098 |
| CA.b | 39.45 | 1.621 | 0.108 |
| CA.c | 39.04 | 1.545 | 0.121 |
| CA.d | 38.60 | 1.655 | 0.114 |
| CA.e | 39.16 | 1.591 | 0.111 |
| CA.f | 39.21 | 1.589 | 0.127 |

4 结 论

通过开展大量三轴排水剪切试验来调查压实度和颗粒形状对其剪切特性的影响。通过对颗粒拍照，开展基于计算几何理论程序的图像分析，从而确定炉渣颗粒的多种形状参数，探明炉渣颗粒土形状参数和临界状态强度以及临界状态线位置参数的关联性，得到 5 点结论。

(1) 炉渣颗粒土是一种轻质颗粒材料，其粒度分布范围较为广泛。与天然砂土相比，炉渣颗粒土的压实曲线较为平缓。其干密度 ρ_d 受含水率 w 的影响并不明显，在压实过程中不需要对炉渣颗粒土的含水率进行特殊调节，这在工程建设应用中是一种优势。

(2) 炉渣颗粒土的平均单颗粒破碎强度低于天然砂土，这说明了炉渣颗粒的可破碎性较高。相比于自然砂土，由于炉渣颗粒的形状较为复杂，其最大孔隙比 e_{max} 和最小孔隙比 e_{min} 也较大。

(3) 提高炉渣试样的压实度 D_c ，能够增强炉渣颗粒土的初始刚度以及峰值抗剪强度，减小抗剪强度达到峰值时所对应的轴向应变水平，并显著增强试样的剪胀行为。在较低应力水平，这种增强效果更为明显。

(4) 颗粒形状和平均单颗粒强度是影响炉渣颗粒土抗剪强度的重要因素。在较低的围压下，颗粒形状对炉渣颗粒土的抗剪强度有重要影响。随着围压的提高，颗粒形状对剪切强度的影响逐渐减弱，此时炉渣颗粒土的抗剪强度更加依赖于平均单颗粒破碎强度。

(5) 颗粒平均规则性 ρ 作为定量评价颗粒形状的参数，能够综合考虑长宽比、圆形度、球度和凹凸度等形状参数的影响。随着颗粒平均规则性 ρ 的增大，炉渣颗粒土的临界状态摩擦角与临界状态线位置参数均呈现出下降趋势。结合建立的经验公式，只需测量形状参数就能较好的预测炉渣颗粒土的临界状态强度参数。本研究对炉渣颗粒土在边坡和路基工程中抗剪强度指标的快速预测有一定的借鉴意义。

参 考 文 献：

- [1] 闫澍旺, 李 嘉, 张京京, 等. 石灰炉渣轻质混合料处理地基试验研究及工程应用[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(增刊 1): 6 - 10. (YAN Shu-wang, LI Jia, ZHANG Jing-jing, et al. Experimental research and engineering application of lime-slag mixed materials used in foundation treatment[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(S1): 6 - 10. (in Chinese))
- [2] 刘传孝, 田鸿业, 张加旺, 等. 炉渣置换软土地基的注浆均质度影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(增刊 2): 517 - 520. (LIU Chuan-xiao, TIAN Hong-ye, ZHANG Jia-wang, et al. Test on grouting homogeneity degree of slag to replace soft soil foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 517 - 520. (in Chinese))
- [3] 章定文, 曹智国. 工业废渣加固土强度特性[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 1): 54 - 59. (ZHANG Ding-wen, CAO Zhi-guo. Strength characteristics of stabilized soils using industrial by-product binders[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(S1): 54 - 59. (in Chinese))
- [4] CONSOLI N C, HEINECK K S, COOP M R, et al. Coal bottom ash as a geomaterial: influence of particle morphology on the behavior of granular materials[J]. Soils and Foundations, 2007, 47(2): 361 - 373.
- [5] WAKATSUKI Y, HYODO M, YOSHIMOTO N, et al. Particle characteristics and strength, deformation characteristics of loose clinker ash[J]. Doboku Gakkai Ronbunshuu C, 2009, 65(4): 897 - 914.
- [6] WINTER M, SUESHIMA T, YOSHIMOTO N, et al. Effect of particle characteristics on the shear strength of clinker ash[M]//Geomechanics from Micro to Macro. Macro: CRC Press, 2014: 1099 - 1104.
- [7] CHO G C, DODDS J, SANTAMARINA J C. Particle shape effects on packing density, stiffness, and strength: natural and crushed sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(5): 591 - 602.
- [8] 刘清秉, 项 伟, BUDHU M, 等. 砂土颗粒形状量化及其对力学指标的影响分析[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 1): 190 - 197. (LIU Qing-bing, XIANG Wei, BUDHU M, et al. Study of particle shape quantification and effect on mechanical property of sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(S1): 190 - 197. (in Chinese))
- [9] YANG J, LUO X D. Exploring the relationship between critical state and particle shape for granular materials[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2015, 84: 196 - 213.
- [10] ZHOU B, WANG J, WANG H. Three-dimensional sphericity, roundness and fractal dimension of sand particles[J]. Géotechnique, 2018, 68(1): 18 - 30.
- [11] ZHAO S W, ZHAO J D. A poly-superellipsoid-based approach on particle morphology for DEM modeling of granular media[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2019, 43(13): 2147 - 2169.
- [12] NIE J Y, LI D Q, CAO Z J, et al. Probabilistic characterization

- and simulation of realistic particle shape based on sphere harmonic representation and Nataf transformation[J]. Powder Technology, 2020, **360**: 209 – 220.
- [13] 孔亮, 彭仁. 颗粒形状对类砂土力学性质影响的颗粒流模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(10): 2112 – 2119. (KONG Liang, PENG Ren. Particle flow simulation of influence of particle shape on mechanical properties of quasi-sands[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(10): 2112 – 2119. (in Chinese))
- [14] 张程林, 周小文. 砂土颗粒三维形状模拟离散元算法研究[J]. 岩土工程学报, 2015, **37**(增刊 1): 115 – 119. (ZHANG Cheng-lin, ZHOU Xiao-wen. Algorithm for modelling three-dimensional shape of sand based on discrete element method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, **37**(S1): 115 – 119. (in Chinese))
- [15] 常晓林, 马刚, 周伟, 等. 颗粒形状及粒间摩擦角对堆石体宏观力学行为的影响[J]. 岩土工程学报, 2012, **34**(4): 646 – 653. (CHANG Xiao-lin, MA Gang, ZHOU Wei, et al. Influences of particle shape and inter-particle friction angle on macroscopic response of rockfill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, **34**(4): 646 – 653. (in Chinese))
- [16] MA G, ZHOU W, REGUEIRO R A, et al. Modeling the fragmentation of rock grains using computed tomography and combined FDEM[J]. Powder Technology, 2017, **308**: 388 – 397.
- [17] HUANG Q S, ZHOU W, MA G, et al. Experimental and numerical investigation of Weibullian behavior of grain crushing strength[J]. Geoscience Frontiers, 2020, **11**(2): 401 – 411.
- [18] 康馨, 陈植欣, 雷航, 等. 基于3D打印研究颗粒形状对砂土宏观力学性质的影响[J]. 岩土工程学报, 2020, **42**(9): 1765 – 1772. (KANG Xin, CHEN Zhi-xin, LEI Hang, et al. Effects of particle shape on mechanical performance of sand with 3D printed soil analog[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, **42**(9): 1765 – 1772. (in Chinese))
- [19] ALTUHAFI F N, COOP M R, GEORGIANNOU V N. Effect of particle shape on the mechanical behavior of natural sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, **142**(12): 4016071.
- [20] LASHKARI A, FALSAFIZADEH S R, SHOURIJEH P T, et al. Instability of loose sand in constant volume direct simple shear tests in relation to particle shape[J]. Acta Geotechnica, 2020, **15**(9): 2507 – 2527.
- [21] JIS A 1224. Test Method for Minimum and Maximum Densities of Gravels[S]. 2009.
- [22] YOSHIMURA Y, OGAWA S. A simple quantification method of grain shape of granular materials such as sand[J]. Doboku Gakkai Ronbunshu, 1993, **1993**(463): 95 – 103.
- [23] ZHENG J, HRYCIW R D. Traditional soil particle sphericity, roundness and surface roughness by computational geometry[J]. Géotechnique, 2015, **65**(6): 494 – 506.
- [24] NAKATA Y, HYODO M, HYDE A F L, et al. Microscopic particle crushing of sand subjected to high pressure one-dimensional compression[J]. Soils and Foundations, 2001, **41**(1): 69 – 82.
- [25] McDOWELL G R, BOLTON M D. On the micromechanics of crushable aggregates[J]. Géotechnique, 1998, **48**(5): 667 – 679.
- [26] KIM B, PREZZI M, SALGADO R. Geotechnical properties of fly and bottom ash mixtures for use in highway embankments[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, **131**(7): 914 – 924.
- [27] BOPP P A, LADE P. Relative density effects on drained sand behavior at high pressures[J]. Soils and Foundations, 2005, **45**: 15 – 26.
- [28] YAO Y P, HOU W, ZHOU A N. UH model: three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays[J]. Géotechnique, 2009, **59**(5): 451 – 469.
- [29] YAO Y P, SUN D A, MATSUOKA H. A unified constitutive model for both clay and sand with hardening parameter independent on stress path[J]. Computers and Geotechnics, 2008, **35**(2): 210 – 222.
- [30] YAO Y P, ZHOU A N. Non-isothermal unified hardening model: a thermo-elasto-plastic model for clays[J]. Géotechnique, 2013, **63**(15): 1328 – 1345.
- [31] YAO Y P, LU D C, ZHOU A N, et al. Generalized non-linear strength theory and transformed stress space[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2004, **47**: 691 – 709.