

基于 3D 打印的不同侵蚀程度岩土颗粒材料抗剪强度研究

张亦弛

新加坡国立大学，新加坡，119077

摘要：本研究通过直剪试验和离散元方法（DEM）深入探讨了不同颗粒形状和垂直压力下的抗剪强度。考察了正方体、超椭球体、球体等颗粒在 50kPa、100kPa 和 200kPa 压力下的机械行为。结果揭示了颗粒形状、垂直压力和剪切位移之间的复杂相互作用。特别是，颗粒的侵蚀程度对抗剪强度展现出非线性关系。本研究为颗粒材料的力学性质提供了有价值的理论参考。

关键词：3D 打印，直剪试验，剪切力，岩土工程

一、绪论

本研究专注于岩石在自然环境及人为因素下体积和裂缝的变化，并探讨其在颗粒形状和大小方面的影响。这种变化主要来自环境温度的昼夜波动、生物作用、冻融效应以及人类的开挖和爆破活动，它们引发岩石碎裂，生成各种形状和大小的颗粒碎片。在地下水的冲刷和颗粒间的碰撞摩擦作用下，这些碎片经历了持续的磨损和圆角化过程，改变了其宏观力学性质。尤其是，这些变化对水下桥梁和地下工程的稳定性和安全性产生显著影响，这在工程设计和运行中需要被充分考虑。本研究采用 3D 打印技术创建大量特定形状的颗粒，并通过系列直剪试验，定量探讨颗粒形状对其力学和物理性质的影响，为理论模型和未来工程设计提供实验证据。在现有的颗粒侵蚀研究中，虽然发现颗粒形状变化对其强度产生显著影响，但大多数研究主要依赖于数值模拟，缺乏充分的实验支持。本项目通过实验与 3D 打印结合，旨在通过直剪试验直接探讨颗粒材料的剪切性质，并依据试验结果和数据分析得出结论。进一步的研究将揭示不同侵蚀程度颗粒的力学强度关系，并为数值模拟提供理论基础和实验验证，拓宽 3D 打印在岩土工程中的应用。

二、试验材料制备

2.1 3D 打印模型的建立

（1）超椭球公式

在本研究中，我们运用超椭球公式定量描述颗粒的侵蚀程度，探讨其对颗粒剪切性能的影响。与单纯比较不同形状不同，通过侵蚀程度分类颗粒形状更具优势和实际价值。这一方法不仅促进数值模拟与实际试验的整合，验证模拟的准确性，同时也对众多涉及颗粒侵蚀的实际工程问题，如野外施工和涉水建筑设计，提供了实际应用和评估依据。

超椭球粒子在局部笛卡尔坐标中的表面函数定义如下：

$$\left(\left|\frac{x}{a}\right|^m + \left|\frac{y}{b}\right|^m\right)^{\frac{n}{m}} + \left|\frac{z}{c}\right|^n = 1.0 \quad (1)$$

其中 x, y, z 是超椭球粒子表面上的点的坐标。形状指标 m

影响上下边界， n 控制侧面的四个边缘。变量 a, b 和 c 对应于沿整个局部坐标系的轴的半长。超椭球颗粒表 1 列出了用于生成不同的超椭球粒子的参数选择。

表 1 根据方程式生成的不同的超超椭球体的形状指标

形状	形状指标
球体	$m=n=2$
网柱状颗粒	$m=2, n>m$
核桃状颗粒	$n=2, m>n$
立方体状颗粒	$m=n>2$

式 (1) 描述了几种具有相等轴长的超椭圆形。椭圆形粒子的球度值是根据球体的表面积与当前粒子的表面积相等的球体的表面积之比来计算的，可以在式 (2) 中计算得出。

$$\theta = \frac{4\pi \left(\frac{3V_p}{4\pi}\right)^{\frac{2}{3}}}{S_p} \quad (2)$$

其中 V_p 是粒子的体积，而 S_p 是粒子的表面积。

（2）建立模型

由于 3D 打印的精度和特性限制，这些颗粒的实际试验的还原度受到影响。为更准确地研究侵蚀程度对剪切强度的影响，本研究选择了三种有代表性的颗粒进行建模，包括正六面体 ($m=n=100$)、球体 ($m=n=2$) 和超椭球体 ($m=n=5$)，如图 2.2(a) (b) (c) 所示。所选三种模型均来源于超椭球图的对角线，即从正六面体到球体的最短演化路径。实验中，为更明确地展现颗粒侵蚀程度与抗剪强度的关系，我们还引入了 $m=n=3$ 的超椭球体。

此外，球体直径为 4.4mm，体积为 44.6mm³。正六面体和超椭球体的尺寸选取与球体体积相等，以消除体积差异对实验结果的干扰。

2.2 切片处理

在模型建立后，将模型文件导出为 STL 格式，并利用 Simplify3D 软件进行切片处理。由于本实验对颗粒表面效果的要求不高，且需要大量颗粒，为提高打印效率，在保证足够精度的前提下，设定层高为 0.25mm，打印速度为 1600mm/min。由于填充率对颗粒强度有直接影响，我们选择了 100% 的填充率，避免

内部空隙对试验结果的影响，同时避免使用收缩率大的材料，来减少冷缩性的影响。

针对不同颗粒形状，我们对打印参数进行了相应调整。例如，为保证球体颗粒形状规则，我们为其添加了底座，而对于立方体和超椭球体，则添加了裙边，确保打印开始时出料顺畅。经过详细设定其它参数后，生成了 3D 打印机可识别的 Gcode 文件，并用 Simplify3D 软件进行了预览和进一步检查。经确认打印路径无误后，将文件拷贝至 3D 打印机开始打印。

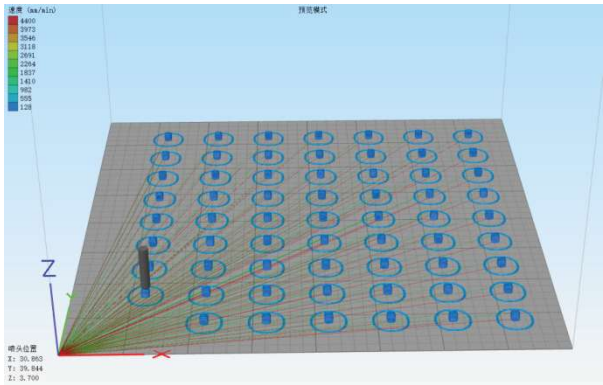


图 2.1 使用 simplify3D 对 Gcode 文件进行预览检查

2.3 3D 打印及后处理

(1) 3D 打印

近年来，3D 打印技术快速发展，能够利用多种材料进行各领域产品的生产。此技术通过计算机控制 3D 打印机以层层堆叠的方式根据预设的三维 CAD 模型快速精确制造零件。与传统制造技术相比，3D 打印可实现精确复制、节约原材料，并适合个性化定制，大幅提高了生产效率。

在本研究中，3D 打印的成层特性在颗粒侧面产生了细微纹理，可能会在剪切时略微增加颗粒间的咬合。然而，相较于高垂直压力下由于颗粒形状变化引起的咬合能力差异，这种由纹理导致的咬合影响较为轻微，可视为对实验结果的影响可以忽略。

(2) 仪器选择

本研究选择了创想三维旗下的 3D 打印机，型号为 Creality-ender3-V2。机器主体由打印平台、喷头套件、送料口构成。具体细节如图 2.2 所示。

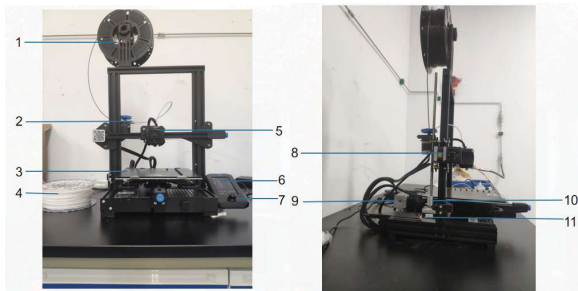


图 2.2 创想三维 Creality-ender3-V2 3D 打印机

1. 料架 2. 送料口 3. 打印平台 4. PLA 材料 5. 喷头套件 6. 显示屏
7. 旋钮开关 8.x 轴电机 9.y 轴电机 10. 联轴器 11. z 轴电机

(3) 材料选择

本研究经过比对，选择使用 PLA（聚乳酸）作为打印材料。PLA 对环境的污染较小，在生物降解性与可再生性方面表现良好。PLA 具备良好的物理性能、力学性能，有良好的抗拉强度及延展度，可以通过热塑、吹塑等方法进行加工。部分物理和力学性能如表 2 所示。

表 2 PLA（聚乳酸）部分物理性能与力学性能			
密度	1.25-1.28g/cm ³	断裂伸长率	4%-10%
熔点	176 ° C	弹性模量	3000-4000 MPa
玻璃化转变温度	60-65° C,	弯曲模量	100-150 MPa
拉伸强度	40-60 MPa	Rockwell 硬度	88

(4) 3D 打印及后处理

在 3D 打印前，我们设定喷头温度为 190 摄氏度，以适应长时期和多变环境的打印需求，并将平台温度设为 60 摄氏度以确保模型稳固性。打印机预热后，我们开始打印和收集颗粒，对每个颗粒进行后处理以确保其形状规则。通过多次打印，我们获得了足够数量的颗粒（图 2.3），并在随后的试验中对其进行了直剪。由于颗粒在剪切过程中保持完整，它们可被反复使用，有效节省了研究时间并保障了试验进度。

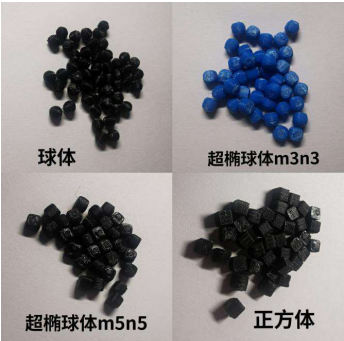


图 2.3 通过 3D 打印收集到的待剪切颗粒

2.4 小结

通过 3D 打印制备供剪切的颗粒材料是本文创新处之一。本章从建模，切片，3D 打印及后处理三个方面进行了详细介绍，针对实际情况下 3D 打印精度有限的问题选择了合适的模型。阐述了本研究材料选择，平台温度设定以及打印速度等方面的合理性，排除了 3D 打印中常见的如表面内凹、模型稳定性下降等问题。对此类问题的分析具有普适性，可供结合 3D 打印探究岩土工程领域问题的其它研究参考。

三、室内试验

3.1 直剪试验

直剪试验的原理是库伦定律：材料的内摩擦力与其剪切面上法向压力成正比。将试样分别在不同的垂直压力下，沿着固定的剪切面施加水平剪切力，测量收集到试样破坏时的剪应力，即为抗剪强度。根据试验得到的数据求取粘聚力与内摩擦角。具有操作便捷，结构简单，耗时较少的优点。

3.2 应变控制式直剪仪

应变控制式直剪仪常被用来测定土的抗剪强度。分别在不同垂直压力下（本试验选择 50kPa、100kPa 和 200kPa），对待剪材料施加水平力进行剪切直到材料破坏或量力环百分表示数不再增大，然后根据库仑定律确定土的峰值抗剪强度，内摩擦角以及凝聚力。图 3.1 展示了该仪器的主要结构。

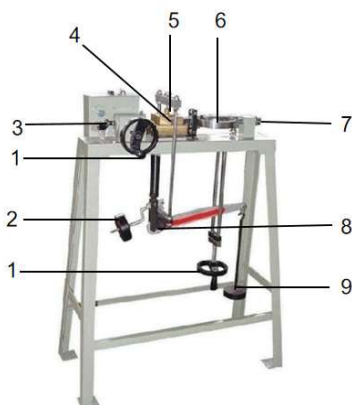


图 3.1 应变控制式直剪仪

1. 手轮 2. 平稳锤 3. 推动座 4. 剪切盒 5. 传压螺钉 6. 量力环 7. 锁紧螺母 8. 杠杆 9. 吊盘

3.3 试验步骤

应变控制式直剪仪通常用于测量土样的抗剪强度，本试验中需要对测量散体进行测量，结合规范对试验步骤做出了部分调整，具体如下：

（1）调节平稳锤使杠杆水平，转动下方手轮固定杠杆，限制杠杆向下移动。

（2）对准上下盒，插入固定销，限制上下盒间的相对移动，在下盒内圈孔中放透水石（本试验不需要放置滤纸），放入制备好的固体颗粒，调整至颗粒均匀平整，再放置上透水石，加上传力盖板。安装滑动钢珠，剪切盒以及量力环。

（3）施加垂直压力（本试验中分别施加 100kPa、200kPa、300kPa），转动手轮至剪切盒与量力环紧密接触。当量力环至百分表示数发生微小变化，将量力环百分表指针与竖向百分表指针调零。

（4）拔出固定销，将开关拨向剪切档位，手轮每转一圈读取量力环百分表和竖向百分表示数各一次，不断剪切至量力环百分表读数已不再增加甚至减少，此时继续读数 3~5 次后停止试验，如果示数不减少，则转动 20 圈后停止试验。

（5）剪切结束后，按顺序对测微表、荷重、加力架、钢球、加力盖等进行卸除，去除颗粒，改变荷载与颗粒形状，重复上述步骤。

四、侵蚀颗粒的力学性质

深入研究了颗粒材料在不同环境压力和侵蚀条件下的抗剪

强度，本实验运用直剪试验与离散元方法（DEM）对四种颗粒在 50kPa、100kPa 和 200kPa 垂直压力下的机械行为进行了精细分析。实验通过计算量力环应变和应用量力环系数获取剪应力，并结合手轮旋转圈数 n 与量力环百分表读数 R 通过

$$\Delta L = 0.2n - R$$

确定剪切位移。探讨了不同形状（如：正方体、超椭球体、球体）的颗粒在不同垂直压力下的抗剪强度及其剪切行为。实验数据揭示了颗粒形状、垂直压力和剪切位移之间的复杂相互作用如图 4.2。例如，在某些测试场景下球体在剪切初期表现出较高剪应力，而在其他场景下，正六面体和超椭球体则表现出较高的初期抗剪强度。而在侵蚀程度方面，我们发现抗剪强度随侵蚀程度的增加呈现出先减小后增大的非线性关系。本研究的细致和深刻分析为理解颗粒材料的复杂力学行为提供了宝贵的理论依据，并为未来岩土工程领域的研究与实践提供了坚实的基础。

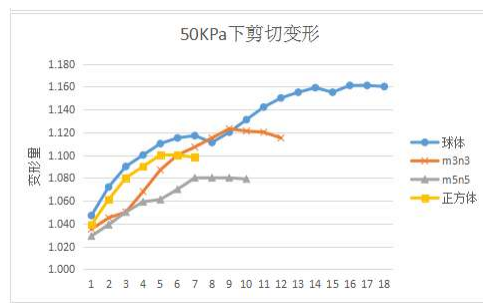


图 4.2(a) 50kPa

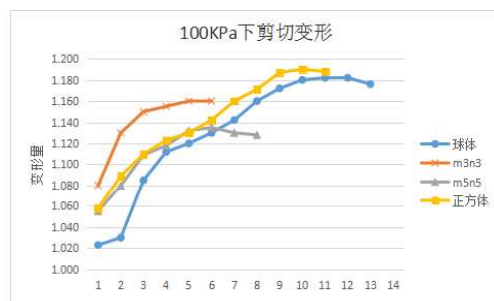


图 4.2(b) 100kPa

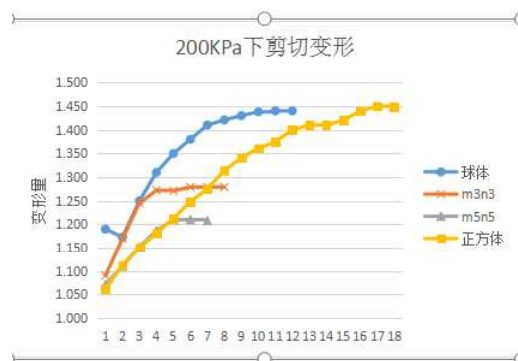


图 4.2(c) 200kPa

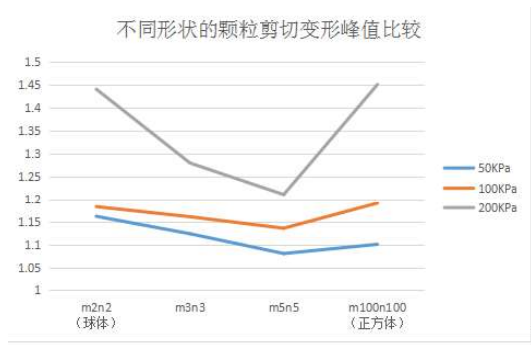


图 4.2(d) 峰值趋势

五、结论与展望

5.1 结论

本研究采用了椭球公式以表征颗粒的侵蚀程度，并通过 3D 打印制造了具有代表性的正六面体、球体和超椭球体颗粒，进而进行了直剪试验。本研究的主要结论如下：

1. 实验结果与抗剪强度：

实验结果揭示，三种考虑的颗粒中，正六面体展现了最高的抗剪强度，其次是球体，而超椭球体的抗剪强度最低。实验还表明，随着剪切的进行，三种颗粒到达峰值抗剪强度所需的剪切位移各不相同，其中，超椭球体最先达到峰值，正六面体最后。

2. 侵蚀程度与抗剪强度关系：

本研究提出了一种新颖的椭球公式来量化颗粒的侵蚀程度。发现颗粒侵蚀程度增大会导致抗剪强度先降低后增大，并在形状趋向球体后达到稳定，此时的抗剪强度较侵蚀前有所下降。

3. 模型验证与未来研究：

实验和数值模拟结果的一致性验证了该模型的准确性，为未来的数值模拟提供了坚实基础。此外，本研究使用的 3D 打印技术为岩土工程和相关领域的研究提供了新的实验手段和研究方向。

综上，本研究不仅揭示了颗粒侵蚀程度与抗剪强度之间的内在联系，还为颗粒材料的深入研究和应用提供了有力的理论支持和实验依据。

5.2 展望

本研究采用了 3D 打印技术和直剪试验方法，探讨了颗粒侵蚀程度对其抗剪强度的影响，以期在理论上为岩土工程实践提供支持。尽管如此，我们认识到，本研究在多个方面仍存在一些不足和局限性。

由于 3D 打印的精度受限，我们只选择了三种具有代表性的

颗粒形状来进行试验。这三种形状能够与现有的数值模拟进行验证，并推导出抗剪强度随侵蚀程度变化的趋势。但由于颗粒样本有限，导致我们所得的曲线具有一定的局限性，这一局限性可能会影响我们对颗粒抗剪强度变化规律的全面理解。

此外，直剪试验虽然操作相对简便且构造简单，但在精确度方面却无法与更复杂的三轴试验相媲美。本研究仅仅考虑了在垂直应力下的水平剪切位移，而对于剪胀角和竖向位移等其他可能影响抗剪强度的重要参数并没有进行研究。这无疑限制了我们对颗粒抗剪强度全面理解的深度。

为了更为全面和深入地研究颗粒侵蚀程度与抗剪强度的关系，未来研究应在以下几个方面进行深化和拓宽。首先，可以考虑引入更多不同大小和长宽比的颗粒，以更全面地揭示颗粒大小和形状对其抗剪强度的影响。对于形状较为复杂的颗粒，我们可以考虑采用模具或其他方式进行制备，以消除 3D 打印精度带来的影响。

其次，研究内容还可以进一步深化，例如加入剪胀角、竖向位移等多个指标，更为全面地探讨颗粒侵蚀程度与抗剪强度的关系。此外，在试验方法上，我们也可以考虑在条件允许的情况下采用三轴试验，以提高试验的精度和可靠性。

总之，尽管本研究存在一些局限性，但它为颗粒侵蚀程度与抗剪强度之间的关系提供了初步的理论认识和实证依据。我们期望，通过不断完善研究方法和拓宽研究范围，能够进一步加深对这一关系的理解，从而为岩土工程的实际应用提供更为坚实和全面的理论支持。

参考文献

- [1] Durian, D.J., Bideaud, H., Düringer, P., Schroder, A., Thalmann, F., Marques, C.M., What is in a pebble shape?[J]. Phys. Rev. Lett. 2006. 97 (5). 028001.
- [2] 项国圣, 徐永福, 王毅, 方圆. 碱溶液侵蚀下高庙子膨润土膨胀变形的变化规律 [J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(02): 141-146.
- [3] 姚华彦, 冯夏庭, 崔强, 申林方, 周辉, 程昌炳. 化学侵蚀下硬脆性灰岩变形和强度特性的试验研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(02): 338-344.