



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2406900

引用格式:周璐,陶志鹏,黄良,等.考虑堆石料纵横比影响的 K_0 压缩离散元模拟[J].科学技术与工程,2025,25(15):6439-6445.

Zhou Lu, Tao Zhipeng, Huang Liang, et al. DEM simulation of K_0 compression considering the effect of aspect ratio of rockfill[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(15): 6439-6445.

建筑科学

考虑堆石料纵横比影响的 K_0 压缩离散元模拟

周璐¹, 陶志鹏², 黄良³, 邓清禄^{3*}

(1. 江西省港航建设投资集团有限公司, 南昌 330025; 2. 江西省交通科学研究院有限公司, 南昌 330025;
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 武汉 430074)

摘要 水电、港口、交通等基础工程建设材料通常就地取材采用堆石料,然而不同地区的堆石料形状存在较大差异。为研究堆石料纵横比对其 K_0 压缩特性的影响,首先采用离散元法生成10种不同纵横比的颗粒簇,之后取相同的等效颗粒粒径,以同样的方法分别生成相同初始状态的试样,最后进行静止土压力系数 K_0 压缩试验,就颗粒纵横比对堆石料 K_0 压缩特性的影响及其微观机理做了详细的探讨。研究表明:①在宏观层面,不同纵横比堆石料试样以 $AR=0.5$ 为分界,当 AR 在 $0.5\sim 1$ 时,试样的 K_0 随着纵横比的增大而增大,当 AR 在 $0.2\sim 0.5$ 区间时,试样的 K_0 值随着纵横比的增大无明显规律。这表明在工程设计时,需要重点考虑纵横比 $0.5\sim 1$ 这段区间的颗粒。②在微观层面,颗粒纵横比越小(颗粒越长)的试样配位数越大、颗粒间的平均力和颗粒累计旋转角度越小,这表明颗粒纵横比越小的试样颗粒间的接触更紧密,接触力链更分散,颗粒的抗旋转能力越强。这可能是造成不同纵横比堆石料 K_0 压缩特性差异的原因。研究成果可为存在颗粒形状差异地区的 K_0 评估提供理论参考,并为选择合适的堆石料材料提供依据,确保工程安全。

关键词 堆石料; 颗粒形状; 静止土压力系数(K_0); 离散元方法

中图分类号 TU398; 文献标志码 A

DEM Simulation of K_0 Compression Considering the Effect of Aspect Ratio of Rockfill

ZHOU Lu¹, TAO Zhi-peng², HUANG Liang³, DENG Qing-lu^{3*}

(1. Jiangxi Port & Waterway Construction Investment Group Co., Ltd., Nanchang 330025, China;
2. Jiangxi Transportation Institute Co., Ltd., Nanchang 330025, China;
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

[Abstract] In infrastructure projects such as hydropower, harbours and transport are usually constructed by rockfill of aggregates from local materials, however, the shapes of rockfill of aggregates in different regions are quite different. In order to study the effect of aspect ratio on the K_0 consolidation characteristics of rockfill, firstly, 10 kinds of particle clusters with different aspect ratios were generated by the discrete element method, and then the same equivalent particle size was taken to generate the specimens with the same initial state in the same way, and then the K_0 consolidation test was carried out at last, and the effect of the aspect ratio of the particles on the K_0 consolidation characteristics of the heap stone materials and its micro-mechanisms were explored in detail. The results of the study show these as follows At the macro level, the specimens with different aspect ratios of rockfill are divided by $AR=0.5$, when the AR is $0.5\sim 1$, the K_0 value of the specimens increases with the increase of aspect ratio, and when the AR is $0.2\sim 0.5$, the trend of the change of the K_0 value of the specimens with the increase of the aspect ratio is unknown. This suggests that the particles in the interval of aspect ratio $0.5\sim 1$ need to be focused on during engineering design. At the microscopic level, the smaller the particle aspect ratio (the longer the particles), the larger the coordination number, the smaller the average force between the particles, and the smaller the cumulative angle of rotation of the particles, which suggests that the contact between the particles of the specimens with smaller particle aspect ratios is closer, the contact force chain is more dispersed, and the particles are more resistant to rotation. This may be the rea-

收稿日期: 2024-09-14 修订日期: 2025-05-14

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2019C0012); 国家自然科学基金(42077269)

第一作者: 周璐(1986—), 男, 汉族, 江西南昌人, 工程师。研究方向: 自动化技术在土木工程结构监测中的应用。E-mail: 382949387@qq.com。

* 通信作者: 邓清禄(1962—), 男, 汉族, 福建上杭人, 博士, 教授。研究方向: 岩土体稳定性、地质工程安全监测技术。E-mail: dengqinglu@qq.com。

son for the differences in K_0 consolidation properties of rockfill with different aspect ratios. The research results can provide theoretical references for the evaluation of K_0 values in areas where there are particle shape differences, and provide a basis for selecting appropriate rockfill materials, ensuring the safety of the project.

[**Keywords**] rockfill; particle shape; the coefficient of lateral earth pressure at rest (K_0); discrete element method (DEM)

堆石料是岩土工程中常用的建筑材料,其具有高强度和透水性良好的特点,这些特性使得堆石料在需要高承载能力和良好排水性能的路堤、大坝及其他大型土石结构等工程中得到了广泛应用^[1-2]。堆石料往往就近取材,通常包括粗砂、砾石、漂石等不同材料的复杂组合,不同工程不同场地采用的堆石料在碎石强度、形状以及级配等方面差异很大^[3-6]。在诸多形状要素中,纵横比($AR = a/b$,其中 a 和 b 分别代表颗粒的长轴和短轴)是一个衡量颗粒形状规则与否的重要指标,也是影响堆石料物理力学性能的重要因素之一。

静止土压力系数($K_0 = \sigma'_h/\sigma'_v$,其中 σ'_h 和 σ'_v 分别代表土体在无侧向应变条件下有效水平应力和有效竖向应力)是一个关键参数。在大型水电、港口、交通等基础设施的建设中,计算地基承载力、土坡稳定性和挡土墙土压力时均需要使用到 K_0 。因此准确评估 K_0 值的大小及其随压力变化的特征,对于评价与预测大坝等构筑物施工期间及整个生命周期内的变形及稳定性问题至关重要^[7-9],准确计算 K_0 值有助于提高港口、交通等工程的承载能力和稳定性。因此,国内外众多学者围绕 K_0 系数的测定及其影响因素开展了一系列研究,Gu 等^[10]基于离散元方法(discrete element method, DEM)研究了试样初始应力状态、初始孔隙比对 K_0 压缩过程的影响,并从微观角度进行了机理分析;Wang 等^[11]探究了级配、初始干密度对砂质泥岩 K_0 的影响规律;蒋明杰等^[12-13]通过自行研制的大型 K_0 测试仪对粗粒土进行了 K_0 试验,结果表明粗粒土的相对密实度和最大粒径与 K_0 呈负相关关系。上述研究成果为准确评估 K_0 提供了重要理论依据。然而前人的研究尚未见有将堆石料颗粒纵横比与 K_0 压缩特性相联系,且缺乏相关机理的解释^[14-16]。而通过建立相关 K_0 压缩数值模型,对颗粒形状进行调整来探究 K_0 演化规律,既可规避试验中设备和人为造成的误差,又可以探究造成不同形状堆石料压缩性质差异的微观机理。帮助工程师更准确地评估堆石料的 K_0 值,并选择合适的堆石料材料,从而优化工程设计,确保工程安全。

基于颗粒流程序,通过 Clump 命令构建 10 种不同纵横比的颗粒簇单元,对其进行 K_0 压缩试验,探究颗粒纵横比的变化对堆石料 K_0 压缩特性的影响及其微观机理。研究成果可丰富 K_0 评估的理论认识。

1 离散元模型构建

1.1 微观参数设置

采用二维颗粒流程序进行数值模拟,使用简单高效的线性弹簧接触模型,以模拟颗粒之间及颗粒与墙体之间的相互作用,主要微观参数有颗粒间弹性模量、刚度比及密度等,参考以往研究^[17-19]进行了适当修改,具体取值如表 1 所示。

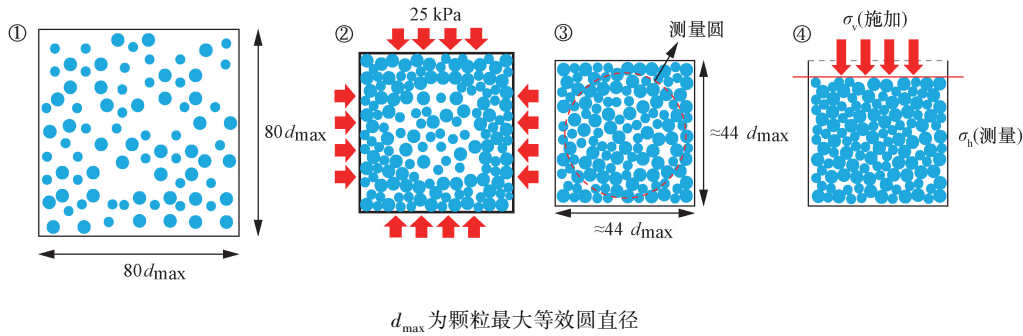
表 1 模型参数

Table 1 Model parameters

离散元模拟参数	参量值
颗粒密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	2 650
弹性模量 E_c/Pa	5×10^8
颗粒刚度比值 k_n/k_s	4/3
颗粒摩擦因数 f_c	0.5
墙体摩擦系数 f_w	0
墙体刚度 $k_w/(\text{N}\cdot\text{m}^{-3})$	1×10^9

1.2 试样制备及模拟方案

通过 Clump 命令构建了纵横比 AR 分别为 0.2、0.22、0.25、0.29、0.33、0.4、0.5、0.67、0.8、1 的颗粒簇,然后使用边界等向压缩法制备试样,具体步骤图 1 所示。①在由 4 个刚性墙模拟的大矩形区域内生成 3 000 个等效粒径在 0.16~0.24 m,级配服从均匀分布、方向随机、没有接触的特定颗粒簇^[20]。②为获得各向同性的不同密实度试样,暂时将粒子间和粒子壁的摩擦系数设置为定值(本文中取 0.3),利用软件自带的伺服控制机制使墙体等向压缩颗粒,当试样压缩到 25 kPa 的各向同性应力,且平均不平衡力与平均接触力的比值小于 10^{-5} 时,认为试样达到准静态。③重新将粒子-粒子接触之间的摩擦系数设置为 0.5,使试样再次运行至准静态。在试样中设置测量圆^[21],用来检测配位数等微观参数。所有样品的尺寸约为 10 m × 10 m。Jamiolkowski 等^[22]建议样品尺寸与最大粒径的比值应大于 5,以避免尺寸效应,本次模拟中所有试样的比值均大于 40。④制备完成后,固定左、右及底部墙体,通过顶部墙体向下移动施加轴向压力。本次分别进行了加载和卸载轴向压力两类模拟,加载阶段的轴向压力梯度为 25、50、100、150、200、250、300、400、600、800、1 000 kPa,卸载阶段则为 1 000、800、600、400、300、200、100、25 kPa。制备完成后的不同纵横比试样局部放大图如图 2 所示。



d_{max} 为颗粒最大等效圆直径

图1 试验步骤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test steps

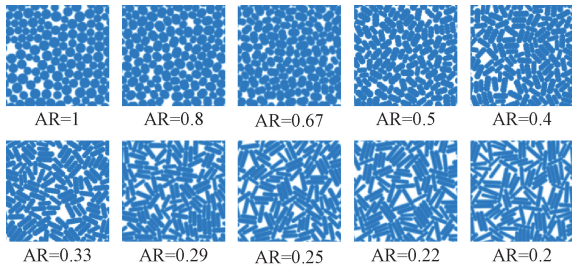


图2 不同纵横比堆石料试样示意图

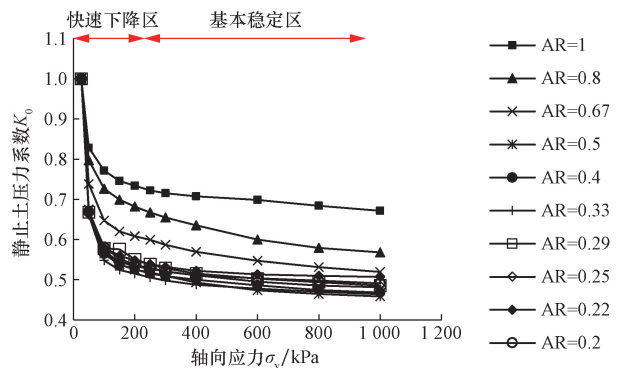
Fig. 2 Schematic diagram of specimens with different aspect ratios of rockfill particle

2 模拟结果分析

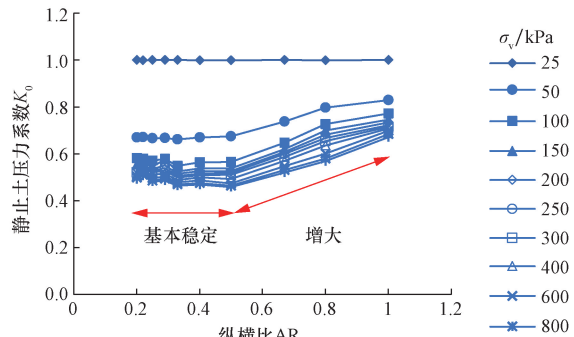
2.1 宏观 K_0 压缩特性

2.1.1 轴向应力加载阶段

图3(a)为试验过程中不同纵横比试样 K_0 随轴向应力的演化路径。可以看到,加载过程中不同试样的 K_0 均随轴向压力增大呈现减小趋势,当轴向压力大于 200 kPa 时, K_0 变化较小,这与 Gu 等^[10]、蒋明杰等^[12-13] 试验时的 K_0 变化规律类似。此外,图3(a)也表明,在相同轴向应力的情况下(如 400 kPa),不同纵横比试样的 K_0 值存在差异。因此,为了进一步量化纵横比的影响,将不同压力下试样 K_0 与纵横比的关系绘制于图3(b)。从图3(b)中可以看出, K_0 与纵横比间存在一定的相关性,具体表现为试样以纵横比 $AR = 0.5$ 为分界,表现为两个区域:当 AR 在 $0.5 \sim 1$ 时,试样的 K_0 随着纵横比的增大而增大,例如,当轴向应力为 1 000 kPa 时, $AR = 0.5、0.67、0.8、1$ 对应的 K_0 值分别为 0.45、0.52、0.57、0.67;当 AR 在 $0.2 \sim 0.5$ 时,试样的 K_0 随着纵横比的增大变化趋势不明显,例如,当轴向应力为 1 000 kPa 时, $AR = 0.2、0.22、0.25、0.29、0.33、0.4、0.5$ 对应的 K_0 分别 0.59、0.50、0.48、0.48、0.46、0.46、0.45。这表明在工程设计时,需要重点考虑纵横比 $0.5 \sim 1$ 这段区间的颗粒。



(a) K_0 跟轴向压力的关系



(b) K_0 跟纵横比的关系

图3 不同纵横比试样在加载过程中的 K_0 演化

Fig. 3 K_0 evolution of specimens with different aspect ratios during loading

2.1.2 轴向应力卸载阶段

在轴向应力卸载阶段(图4),不同纵横比试样的 K_0 均随轴向压力减小呈现增大趋势,无明显的阶段性;此外,可以看到在同一轴向压力下,试样在卸载阶段的 K_0 大于在加载阶段的 K_0 。以 $AR = 1$ 试样为例,当轴向应力为 400 kPa 时,试样在加载阶段的 $K_0 = 0.71$,卸载阶段的 $K_0 = 0.97$;而当轴向应力为 25 kPa 时,试样在加载阶段的 $K_0 = 1$,卸载阶段的 $K_0 = 1.19$ 。

此外,从图4(b)中可以看出,与加载阶段类似,卸载阶段 K_0 与纵横比间存在一定的相关性,同样以纵横比 $AR = 0.5$ 为分界,表现为两个区域:当 AR 在 $0.5 \sim 1$ 时,试样的 K_0 随着纵横比的增大而增大;

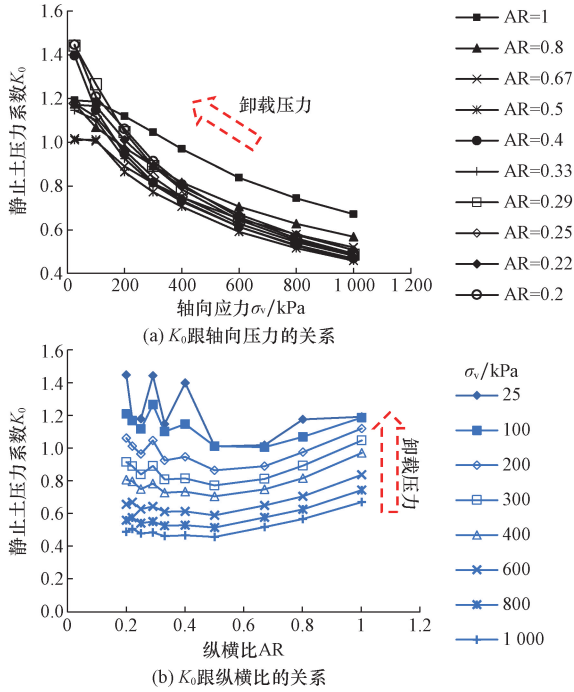


图4 卸载过程中的 K_0 演化

Fig. 4 K_0 evolution of specimens with different aspect ratios during unloading

当 AR 在 0.2 ~ 5 时, 试样的 K_0 随着纵横比的增大无明显规律。

2.2 微观机理分析及讨论

2.2.1 配位数角度

配位数 (coordination number, CN) 是土体颗粒微观结构最重要的指标之一, 定义为

$$CN = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N} \quad (1)$$

式(1)中: N 为颗粒总数; C_i 为第 i 个颗粒的接触数。

将不同纵横比试样在不同轴向压力下 CN 值关系绘制于图 5。可以看到, CN 值随着轴向应力的增长而增长, 这也对应着 K_0 随着 CN 的增大而减小, 这与 Gu 等^[9]的研究结果一致; 同时注意到, 随着颗粒纵横比的增加, 试样有更小的 CN。由于 CN 反映了颗粒与颗粒间的紧密程度, 即 CN 越大样本中的颗粒接触更紧密, 因此纵横比大的试样在相同轴向应力下表现出更大的 K_0 (图 3)。

2.2.2 力链角度

力链网络的结构与演变在颗粒系统的复杂力学行为中起到支配性作用^[19]。AR 等于 0.2 和 1 样本在轴向压力等于 1 000 kPa 时的接触力 F 链分布如图 6 所示, 其中力链的粗细和颜色差异代表了其不同的接触力大小。可以看到 AR = 0.2 的样本接触数大于 AR = 1 的样本, 且相比纵横比较小的样本

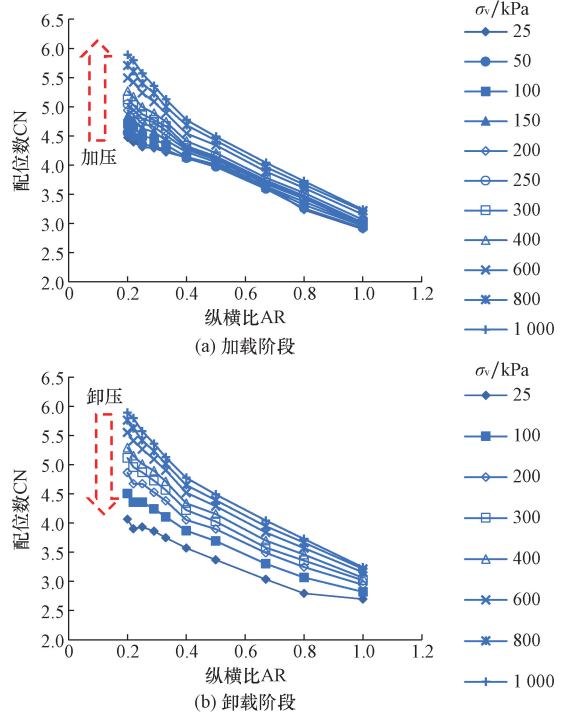


图5 加卸载过程中配位数 CN 的演化

Fig. 5 Evolution of CN in loading and unloading of specimens with different aspect ratios

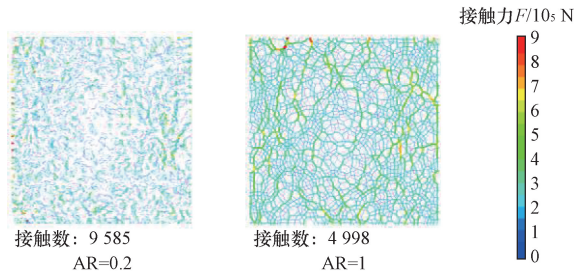


图6 不同 AR 样本的力链图 ($\sigma_v = 1000$ kPa)

Fig. 6 Force chain diagrams for different AR samples ($\sigma_v = 1000$ kPa)

(AR = 0.2), AR = 1 的样本接触力链要更粗。即纵横比大的颗粒其颗粒与颗粒间的接触力传递的路径少而集中, 这与上文中图 5 的配位数 CN 相对应。此外, 为从进一步力链角度对不同试样间 K_0 的差异进行解释, 引入了颗粒间的平均接触力。图 7 为不同纵横比颗粒试样平均接触力与轴向应力增长的变化曲线。从图 7 (a) 可以看到, 在轴向应力加载阶段, 轴向应力越大, 平均接触力越大, 且纵横比最大的试样 (AR = 1) 有最大的平均力。轴向应力卸载阶段的图 7 (b) 表现有类似的趋势。

2.2.3 颗粒旋转角度

在试样压缩过程中, 颗粒通过旋转和接触滑动来调节试样的整体变形, 其中颗粒旋转是颗粒围绕其自身特定点的旋转运动。特别需要注意的是, 圆

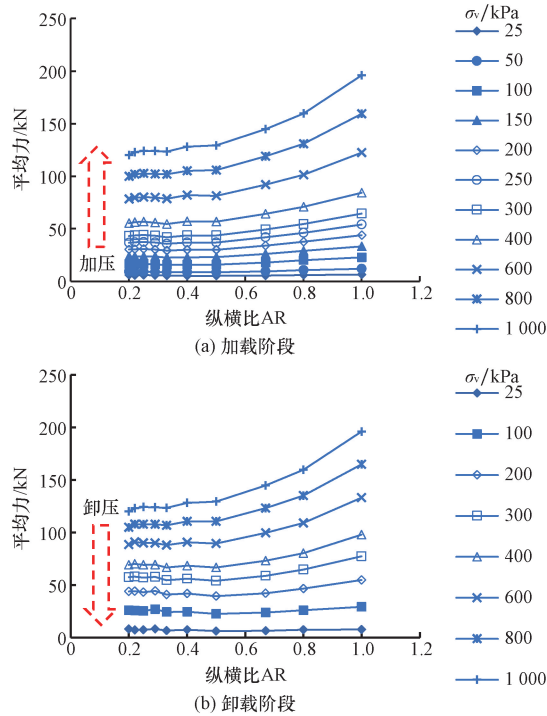


图7 加卸载过程中平均力的演化

Fig. 7 Evolution of mean force in loading and unloading of specimens with different aspect ratios

形颗粒绕圆心旋转不会改变它们与周围颗粒的接触特性,而非圆形颗粒的旋转会改变它们与周围颗粒的接触特性^[19]。图8为AR=0.2和1样本在轴向压力等于1000 kPa时的颗粒旋转角度图。可以看到相比纵横比较小的样本(AR=0.2),AR=1样本颗粒的旋转角度范围更大,发生旋转的颗粒数目更多。图9为加卸载过程中不同纵横比颗粒的累计旋转角度变化图。首先,对比图9(a)和图9(b)可以发现,相比轴向应力卸载阶段,加载过程中颗粒旋转角度的变化更大,例如,AR=1的试样在轴向应力从25 kPa增大至1000 kPa时,角度增大了3772°,而从1000 kPa减小至25 kPa时,仅增大了1136°。此外,对比不同纵横比试样可知,纵横比越小则颗粒旋转角度越小。例如,在轴向应力加载阶段,当轴向压力为100 kPa时,AR从0-1试样的 K_0 值分别为94、104、106、104、97、94、151、234、322、398 kPa,整体表现为上升趋势。而从卸载阶段可以看到,AR≥0.67的样本累计旋转角度在上升,但AR<0.67样本累计旋转角度在下降。上述现象表明纵横比会影响颗粒的抗旋转能力,使较大纵横比的试样有更少的颗粒累计旋转角度。这也表明纵横比大的颗粒更耐旋转,更有可能是通过接触滑动来调节试样的整体变形^[19]。此外还发现,AR在0.2~0.5范围内样本的旋转角度变化不大,这与图3(b)的 K_0 -AR和图6中的 F -AR演化趋势类似,这也说

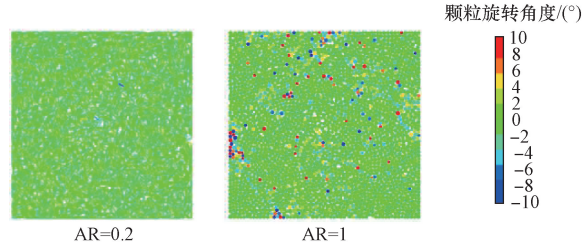


图8 不同AR样本颗粒的旋转角度($\sigma_v=1000$ kPa)

Fig. 8 Rotation angle of particles for different AR samples ($\sigma_v=1000$ kPa)

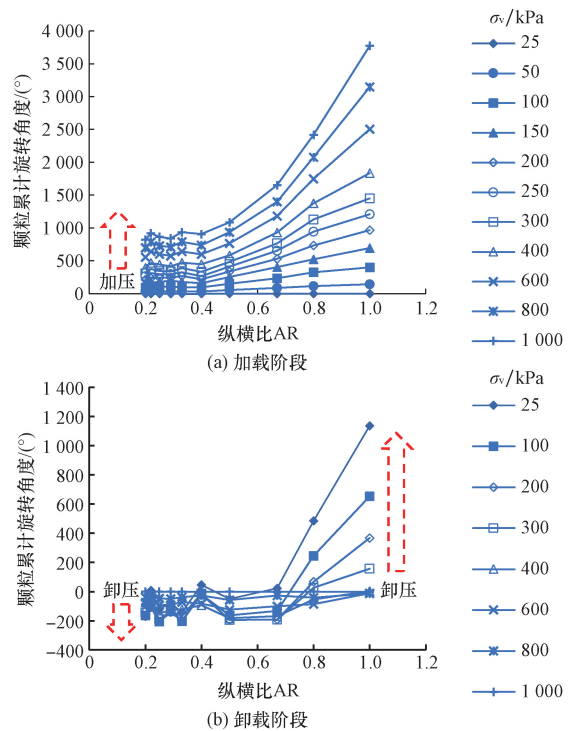


图9 加卸载过程中颗粒旋转角度的演化

Fig. 9 Evolution of particle rotation angle in loading and unloading of specimens with different aspect ratios

明不同颗粒纵横比试样更多的是颗粒的抗旋转能力来影响 K_0 。

综合分析图5~图9,颗粒纵横比对 K_0 压缩的影响可以解释为:颗粒纵横比对 K_0 值的影响是一个复杂的机理,涉及到配位数、平均力和颗粒旋转等多个因素。纵横比大的颗粒具有更弱的抗旋转能力,更容易通过旋转而不是接触滑动来调节变形,从而保持较大的接触力和较小的CN值,最终导致 K_0 值较高。相反,纵横比小的颗粒更不容易发生旋转,通过接触滑动来调节变形,且接触面积和接触力减小,因此 K_0 值较小。

3 结论

构建了10种不同纵横比的堆石料颗粒簇单元,

进行了 K_0 压缩离散元模拟,就颗粒纵横比对堆石料 K_0 压缩特性的影响及其微观机理做了详细的探讨,获得以下结论。

(1) 不同纵横比颗粒样本在 K_0 压缩加卸载阶段均表现为随压力增大 K_0 减小的趋势,整体来说纵横比 AR 越大(接近 1) K_0 越大,但 AR 在 0.2 ~ 0.5 的样本 K_0 变化不明显。

(2) 堆石料颗粒的纵横比越大则颗粒之间的配位数越大,但平均接触力和颗粒旋转角度越小,即表明纵横比越小的颗粒抗旋转能力越强,更多通过接触滑动来调节试样的整体变形。因此不同颗粒纵横比试样可能更多的是颗粒的抗旋转能力来影响 K_0 。

参 考 文 献

- [1] 王柳江,毛航宇,刘斯宏,等. 考虑孔隙比影响的堆石料湿化试验及湿化模型[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 29-36.
Wang Liujiang, Mao Hangyu, Liu Sihong, et al. Wetting deformation test and wetting model of rockfill materials considering effect of void ratio[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2024, 52(1): 29-36.
- [2] 邹德高,宁凡伟,刘京茂,等. 基于超大型三轴仪的堆石料动力特性缩尺效应研究[J]. 水利学报, 2024, 55(5): 528-536.
Zou Degao, Ning Fanwei, Liu Jingmao, et al. Experimental study on scale effect of dynamic characteristics on rockfill materials using super large-scale triaxial apparatus[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2024, 55(5): 528-536.
- [3] 王蕴嘉,宋二祥,张千里. 颗粒形状对堆石料力学特性影响的离散元分析[J]. 工程力学, 2022, 39(3): 137-146.
Wang Yunjia, Song Erxiang, Zhang Qianli. DEM analysis of the aggregate shape effect on mechanical properties of rockfill[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(3): 137-146.
- [4] 吴鑫磊,石北啸,刘赛朝,等. 考虑颗粒破碎的堆石料大型三轴试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(2): 749-756.
Wu Xinlei, Shi Beixiao, Liu Saizhao, et al. Large-scale triaxial test of rockfill material considering particle breakage[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(2): 749-756.
- [5] 胡沈江,郭宁,杨仲轩,等. 堆石料颗粒破碎强度的尺寸和形状效应隐式离散元研究[J]. 岩土工程学报, 2023, 45(2): 433-440.
Hu Shenjiang, Guo Ning, Yang Zhongxuan, et al. Implicit DEM analyses of size and shape effects on crushing strength of rockfill particles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2023, 45(2): 433-440.
- [6] 张世民,陈万里,刘嘉英,等. 考虑颗粒形状的离散元法在岩土工程中的应用进展[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(2): 447-454.
Zhang Shimi, Chen Wanli, Liu Jiaying, et al. Review of the operation of discrete element method considering particle shape in geotechnical numerical simulation[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(2): 447-454.
- [7] 朱俊高,史江伟,罗学浩,等. 密度对砂土应力应变强度特性影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(2): 336-341.
Zhu Jungao, Shi Jiangwei, Luo Xuehao, et al. Experimental study on stress-strain-strength behavior of sand with different densities[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(2): 336-341.
- [8] Pegah E, Liu H, Dastanboo N. Evaluation of the lateral earth pressure coefficients at-rest in granular soil deposits using the anisotropic components of S-wave velocity[J]. Engineering Geology, 2017, 230: 55-63.
- [9] 蒋明杰,栗书亚,吉恩跃,等. 粗粒土大型静止侧压力系数测定试验的颗粒流模拟[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(25): 10867-10872.
Jiang Mingjie, Li Shuya, Ji Enyue, et al. Particle flow simulation of large-size static lateral pressure coefficient tests for coarse grained soil[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(25): 10867-10872.
- [10] Gu X Q, Hu J, Huang M S. K_0 of granular soils: a particulate approach[J]. Granular Matter, 2015, 17(6): 703-715.
- [11] Wang J J, Yang Y, Bai J P, et al. Coefficient of earth pressure at rest of a saturated artificially mixed soil from oedometer tests[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2018, 22(5): 1691-1699.
- [12] 蒋明杰,朱俊高,何顺宾. 初始相对密度对粗粒土 K_0 影响试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 69-74.
Jiang Mingjie, Zhu Jungao, He Shunbin. Experimental study on influence of initial relative density on K_0 of coarse grained soil[J]. Advanced Engineering Sciences, 2019, 51(4): 69-74.
- [13] 蒋明杰,朱俊高,梅国雄. 粗粒土静止侧压力系数影响因素试验研究[J]. 工程力学, 2020, 37(3): 142-148.
Jiang Mingjie, Zhu Jungao, Mei Guoxiong. Experimental study on influence factors of lateral pressure coefficient at rest for coarse grained soil[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(3): 142-148.
- [14] 王志兵,宁泽华,王晨,等. 基于 CT 扫描研究颗粒形状对砂土力学性质的影响[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(21): 9077-9086.
Wang Zhibing, Ning Zehua, Wang Chen, et al. Influence of particle shape on the mechanical properties of sand based on CT scanning[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(21): 9077-9086.
- [15] 周光军,徐慧,何先宇,等. 考虑砾石颗粒形状及含量影响的砂-砾石混合物离散元模拟直剪试验[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(27): 12084-12093.
Zhou Guangjun, Xu Hui, He Xianyu, et al. DEM simulation of direct shear test on sand-gravel mixtures considering gravel content and gravel shape[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(27): 12084-12093.
- [16] 薛明华,陈圣任,杨世文. 颗粒形状对砂性土宏细观力学性质的影响[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(33): 14318-14326.
Xue Minghua, Chen Shengqian, Yang Shiwen. Influence of particle shape on the macroscopic and mesoscopic mechanical proper-

- ties of sandy soil[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(33): 14318-14326.
- [17] Wu Z, Huang L, Deng Q. Analysis of factors effect on the shear characteristics of granular soils under conditions of increasing axial stress in biaxial compression test via DEM[J]. *Computational Particle Mechanics*. (2025-02-04) [2025-05-14]. <https://doi.org/10.1007/s40571-025-00910-7>.
- [18] Huang L, Deng Q, Wang H. Instability behavior of loose granular material: A new perspective via DEM [J]. *Granular Matter*, 2024, 26(4): 84.
- [19] 黄良. 颗粒形状对砂土剪切特性影响研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.
- Huang Liang. Experimental and numerical simulation study on the influence of sand shape on shear characteristics [D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [20] Nie Z H, Zhu Y G, Wang X, et al. Investigating the effects of Fourier-based particle shape on the shear behaviors of rockfill material via DEM[J]. *Granular Matter*, 2019, 21(2): 22.
- [21] Yun T S, Lee J, Lee J, et al. Numerical investigation of the atrest earth pressure coefficient of granular materials[J]. *Granular Matter*, 2015, 17(4): 413-418.
- [22] Jamiolkowski M, Kongsukprasert L, Presti D. Characterization of gravelly geomaterials[C]// *Proceedings of the Fifth International Geotechnical Conference*. Bangkok: Springer, 2004: 1-8.