

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.006

# 颗粒形状对钙质砂最终级配影响的试验研究

李钊<sup>1</sup>, 陈远中<sup>1</sup>, 廖洁<sup>2,3</sup>, 夏冰<sup>4</sup>, 樊科伟<sup>3</sup>

(1. 深圳市公明供水调蓄工程管理处, 广东 深圳 518107; 2. 三江学院土木工程学院, 江苏 南京 210012;  
3. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 4. 宁波市鄞州区水库管理中心, 浙江 宁波 315100)

**摘要:** 为探究颗粒形状对大剪切应变条件下钙质砂最终级配的影响, 采用环剪仪和 Morphologi G3 对取自我国南海的钙质砂进行了一系列环剪试验和颗粒形状分析。试验结果表明: 钙质砂在剪应力作用下发生颗粒破碎导致其级配变化, 当环剪的剪应变达到 50 000% 时, 钙质砂级配趋于稳定; 级配稳定的钙质砂试样被替换成未发生过破碎的相同级配钙质砂试样后, 由于替换前后颗粒的形状不同, 导致试样在剪应力作用下继续发生颗粒破碎, 试样重新稳定时颗粒级配分形维数相较于原稳定状态时的分形维数有一定程度的增加。

**关键词:** 钙质砂; 颗粒破碎; 最终级配; 颗粒形状; 环剪试验

**中图分类号:** TU431 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)04-0041-05

## Experimental study on the effect of particle shape on ultimate particle size distribution of carbonate sands

LI Fan<sup>1</sup>, CHEN Yuanzhong<sup>1</sup>, LIAO Jie<sup>2,3</sup>, XIA Bing<sup>4</sup>, FAN Kewei<sup>3</sup>

(1. Shenzhen Gongming Water Supply and Storage Engineering Management, Shenzhen 518107, China;

2. College of Civil Engineering, Sanjiang University, Nanjing 210012, China;

3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

4. Ningbo Yinzhou District Reservoir Management Center, Ningbo 315100, China)

**Abstract:** To explore the effect of particle shape on the ultimate particle size distribution of carbonate sands under the condition of large shear strain, a series of ring shear tests and particle shape analyses were carried out on carbonate sands taken from the South China Sea using the ring shear apparatus and the Morphologi G3. The results show that an ultimate grading, as a result of the particle breakage, is reached after large shear strains in the ring shear apparatus. However, due to the more irregularity of the intact sands than the crushed sand, a significant breakage is induced when recreating a sample by mixing intact soil required for the ultimate size grading. As a result, the fractal dimension of the sample replaced with a different particle shape is bigger than that of the sample with the particle remolded.

**Key words:** carbonate sands; particle breakage; ultimate particle size distribution; particle shape; ring shear test

钙质砂通常指富含碳酸钙或其他难溶碳酸盐类物质的特殊介质, 与常规陆源砂相比, 钙质砂在较低围压下会产生颗粒破碎<sup>[1-2]</sup>。因而当风力发电和海上石油平台等结构建设在钙质砂地基上时, 打桩过程中桩周钙质砂会受到较大的剪切应变, 导致钙质砂颗粒破碎严重, 进而影响上部结构的稳定性。近年来, 国内外学者进行了大量的三轴试验研究颗粒破碎对钙质砂力学性质的影响, 并建立了考虑钙质砂颗粒破碎的本构模型<sup>[3-9]</sup>。然而三轴试验中试样的剪切应变有限, 远远达不到打桩过程中桩周钙质砂所受到的剪切应变, 因此通过三轴试验研究的钙质砂力学性质以及建立的本构模型可能并不适用于大剪切应变下的情况。

针对上述情况, Coop 等<sup>[10]</sup>采用环剪试验研究了钙质砂在不同竖向应力下的大剪应变条件的破碎情况, 发现钙质砂在剪切应变作用下会发生颗粒破碎, 当剪切应变增大到一定程度后, 钙质砂级配会趋于稳定, 且

**基金项目:** 岩土力学与工程国家重点实验室开放基金项目(SKLGME021017)

**作者简介:** 李钊(1973—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事岩土试验研究。E-mail: 183268163@qq.com

**通信作者:** 廖洁(1993—), 女, 讲师, 博士, 主要从事加筋土技术研究。E-mail: liaojiehu@gmail.com

**引用本文:** 李钊, 陈远中, 廖洁, 等. 颗粒形状对钙质砂最终级配影响的试验研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 41-45.

LI Fan, CHEN Yuanzhong, LIAO Jie, et al. Experimental study on the effect of particle shape on ultimate particle size distribution of carbonate sands[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 41-45.

在较高的竖向应力下钙质砂稳定时级配的分形维数接近于 2.57。稳定级配的存在是建立考虑颗粒破碎的钙质砂本构模型的前提。Yin 等<sup>[11]</sup>发现颗粒破碎材料的塑性功与颗粒级配的演变有关,并将颗粒破碎程度指标作为破碎材料本构模型建立的重要参数。然而,实际工程以及实验室等按照环剪试验结果得到最终级配配比进行下一步试验时,由于未发生破碎的颗粒与破碎过的颗粒的形状存在差异,因此,在对采用未破碎的钙质砂配比成最终级配的样品进行剪切时,仍有可能发生破碎,进而影响其最终级配。

为探究大剪应变作用下颗粒形状对钙质砂最终级配的影响,本文开展了一系列的钙质砂环剪试验,探究钙质砂在大剪应变作用下的最终级配;通过量测剪切过程中钙质砂颗粒形状,研究钙质砂颗粒破碎过程中的形状演变情况。

## 1 试验材料、仪器与方案

### 1.1 试验材料

试验所用钙质砂(图 1)取自中国南海,其级配情况如图 2 所示。本文将未经历过破碎的钙质砂定义为自然砂,经历过破碎的钙质砂定义为破碎砂。环剪试验之前,首先通过振动筛将自然砂筛分为以下 7 个粒径组: $0\text{ mm}<d\leq0.063\text{ mm}$ 、 $0.063\text{ mm}<d\leq0.15\text{ mm}$ 、 $0.15\text{ mm}<d\leq0.212\text{ mm}$ 、 $0.212\text{ mm}<d\leq0.33\text{ mm}$ 、 $0.33\text{ mm}<d\leq0.425\text{ mm}$ 、 $0.425\text{ mm}<d\leq0.60\text{ mm}$  和  $0.60\text{ mm}<d\leq1.18\text{ mm}$ 。由于大粒径砂颗粒更易破碎,为了更加清晰地观察剪切过程中颗粒级配的变化,将单一粒径( $0.60\sim1.18\text{ mm}$ )的钙质砂作为初始试样进行剪切,得到其最终级配。

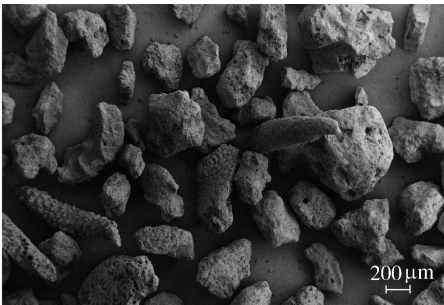


图 1 钙质砂的 SEM 图像

Fig.1 SEM image of the carbonate sand

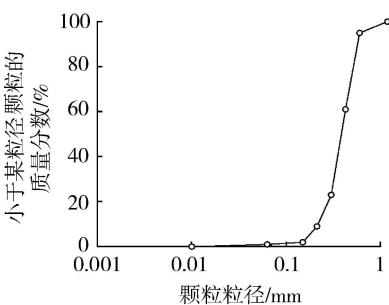


图 2 钙质砂颗粒级配曲线

Fig.2 Gradation curve of the carbonate sand

### 1.2 试验仪器

环剪仪由于能够对试样施加很大的剪切应变,常用于测试重塑环状土样的残余剪切强度以及大剪切应变条件下的颗粒破碎。本文所用环剪仪为英国 GDS 公司研制,如图 3 所示。环剪仪中试样为一外径为 100 mm、内径为 70 mm、高为 5 mm 的环形体。试样放置于一个可以不限角度转动的底座上,试样上方设置一顶帽,顶帽位置固定不动,顶帽上方可施加竖向应力;环剪仪通过转动底座带动试样,从而使得试样上表面与顶帽间产生剪切作用。

环剪试验的剪切速度为  $2.2\text{ mm/min}$ ,定义环剪仪中剪切应变  $\gamma=S/H$ ,其中  $S$  为剪切位移, $H$  为试样初始高度。采用剪切应变表示而非剪切位移是由于应变表示数据更便于与其他仪器的数据进行定性比较,另外一个原因是强调达到稳定级配需要非常大的应变,而这最好通过绘制应变而不是位移来实现。

采用颗粒粒度与粒形图像分析仪 Morphologi G3 测量钙质砂颗粒形状的参数。Morphologi G3 测量的形状参数为砂颗粒的表面投影形状参数,包括投影面长宽比、圆度、凸度。长宽比是指穿过颗粒投影面最短直径与最长直径的比值,取值范围为  $0\sim1$ ,长宽比值越接近 1,表明颗粒形状越规则;圆度是指与颗粒投影面具有相同面积的圆周长与投影面周长的比值,取值范围为  $0\sim1$ ,圆度越接近 1,表明颗粒越接近于圆;凸度是指颗粒投影面外包线周长除以颗粒投影面实际周长,用于表征土体表面的粗糙度,取值范围为  $0\sim1$ ,凸度越接近 1,说明颗粒表面越平滑。表 1 为 4 种不同形状颗粒的形状参数。

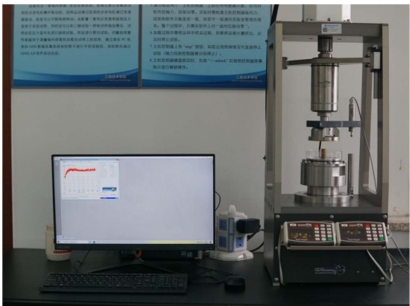


图 3 环剪仪

Fig.3 Ring shear test apparatus

采用 Morphologi G3 测量不同粒径组颗粒形状时,并非对所有颗粒进行测量,而是从不同粒径组中各随机挑出 100 个颗粒作为代表进行测量(Altuhafi 等<sup>[12]</sup>曾选用 36 个颗粒作为代表),通过统计 100 个值中小于 50% 所对应的值作为每种粒径的代表值。

1.3 试验方案

为研究颗粒形状对钙质砂最终级配的影响,进行了如表 2 中的环剪试验。其中环剪试验 RS1 ~ RS8 用于得到粒径为 0.60 ~ 1.18 mm 的钙质砂在竖向应力为 615 kPa 下颗粒级配随剪切应变的变化,并确定其最终级配。制备的试样初始孔隙比为 2.150,试样处于最松散状态。环剪试验 RSC1 ~ RSC3 是将达到最终级配的试样从环剪仪器中取出,然后再放入环剪仪中,放入状态同样为最松散状态,继续对试样进行剪切,直到重新达到最终级配。试验 RSN0 ~ RSN5 是将未破碎过的自然砂按照 RS 系列试验得到的最终级配进行制样,试样初始状态仍然为最松散状态,对试样进行剪切,直到重新达到最终级配。通过对比 RSC 和 RSN 系列试验结果,研究颗粒形状对钙质砂最终级配的影响;同时测量 3 组试验部分试样(表 2)在剪切前、中、后的形状参数(长宽比、圆度和凸度)。

表 1 不同形状颗粒的形状参数

| Table 1 Shape parameters of different particle                                    |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|
| 颗粒                                                                                | 长宽比  | 圆度   | 凸度   |
|  | 1.00 | 1.00 | 1.00 |
|  | 0.18 | 0.47 | 1.00 |
|  | 1.00 | 0.89 | 0.47 |
|  | 0.76 | 0.47 | 0.70 |

表 2 试验方案

| Table 2 Test scheme |         |            |      |         |            |
|---------------------|---------|------------|------|---------|------------|
| 编号                  | 剪应变/%   | 形状参数<br>测试 | 编号   | 剪应变/%   | 形状参数<br>测试 |
| RS0                 | 0       | 是          | RSC1 | 10 000  | 是          |
| RS1                 | 1 000   |            | RSC2 | 30 000  |            |
| RS2                 | 2 500   |            | RSC3 | 50 000  |            |
| RS3                 | 5 000   | 是          | RSN0 | 0       | 是          |
| RS4                 | 10 000  |            | RSN1 | 10 000  |            |
| RS5                 | 20 000  | 是          | RSN2 | 30 000  |            |
| RS6                 | 35 000  |            | RSN3 | 50 000  |            |
| RS7                 | 50 000  | 是          | RSN4 | 70 000  |            |
| RS8                 | 110 000 |            | RSN5 | 120 000 |            |

注:所有试验的竖向应力均为 615 kPa。

2 试验结果与分析

2.1 单一粒径钙质砂颗粒级配与形状演化

由图 4(a)可知,随着剪切应变的增大,试样颗粒不断发生破碎,应变从 50 000% (RS7) 到 110 000% (RS8) 的级配基本不再发生变化,表明钙质砂试样达到最终级配。由图 4(b)可知,试样最终级配趋近于一条直线,计算得到其级配分形维数  $D=2.52$ ,略小于 Coop 对英国 Dog’s Bay 钙质砂相同竖向压力下的分形维数(2.57)<sup>[10]</sup>。造成该差别的原因包括:①所用钙质砂砂型不同,Dog’s Bay 钙质砂取自英国海滩,而本文钙质砂取自中国南海;②所用仪器不一样。

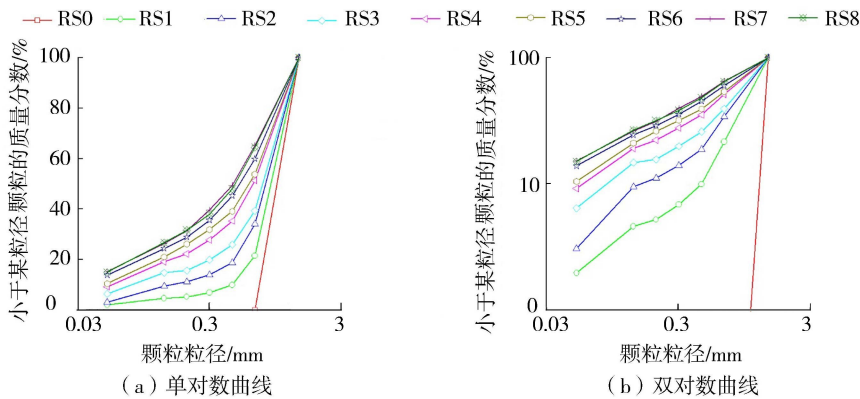


图 4 不同剪切应变下单一粒径钙质砂级配变化曲线

Fig.4 Evolution of particle size distribution of single graded carbonate sands after ring shear tests with different shear strains

为了得到不同剪应变下颗粒形状参数的变化情况,对 RS0、RS3、RS5、RS7、RS8 试样进行了颗粒形状测量,结果如图 5 所示,图中黑色阴影为不同颗粒形状参数的典型钙质砂颗粒图像。由图 5 可知,剪切过程中颗粒长宽比明显变大,而圆度和凸度并无明显变化。颗粒破碎形式主要包括断裂、磨损和破碎<sup>[13-15]</sup>,剪切过程中颗粒只有长宽比发生了明显变化,说明钙质砂颗粒在剪切变形下主要发生了断裂行为。对比 RS7 和 RS8 的级配和形状参数还可以看出,当级配达到最终状态时,形状参数也不再改变。



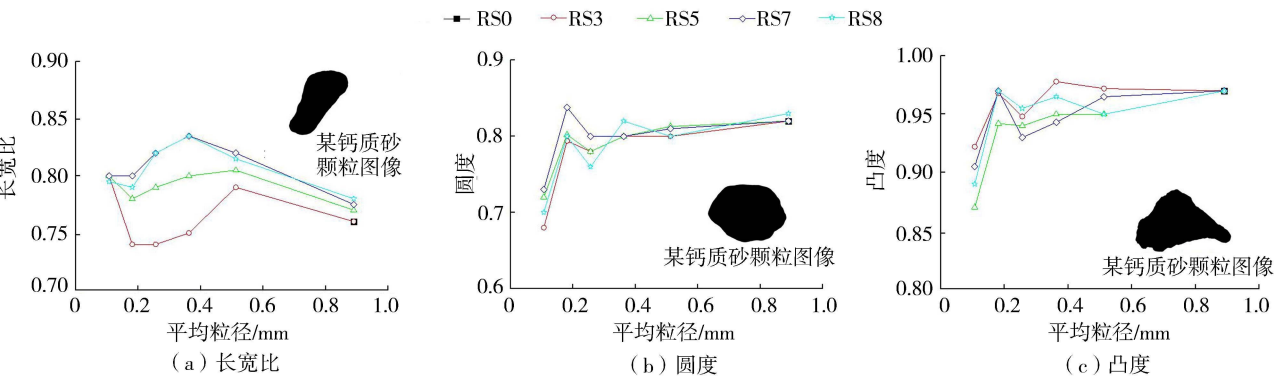


图 5 剪切过程中钙质砂颗粒形状参数演化

Fig.5 Evolution of particle shape parameters of carbonate sands during shear process

2.2 颗粒形状的影响

由图 6(a)可知,将达到最终级配的试样取出再重新放入环剪仪中进行环剪试验,颗粒仍会继续破碎,且应变从 30 000% 变化到 50 000%,颗粒级配基本不再发生变化,说明钙质砂重新达到了稳定。重新达到稳定时的分形维数为 2.56,略大于原稳定时的分形维数 2.52,但是增大的幅度较小。颗粒继续发生破碎是因为重新制样使得颗粒间的接触发生改变,导致更多的颗粒发生破碎,但破碎后的形状参数变化不大(图 6(b))。

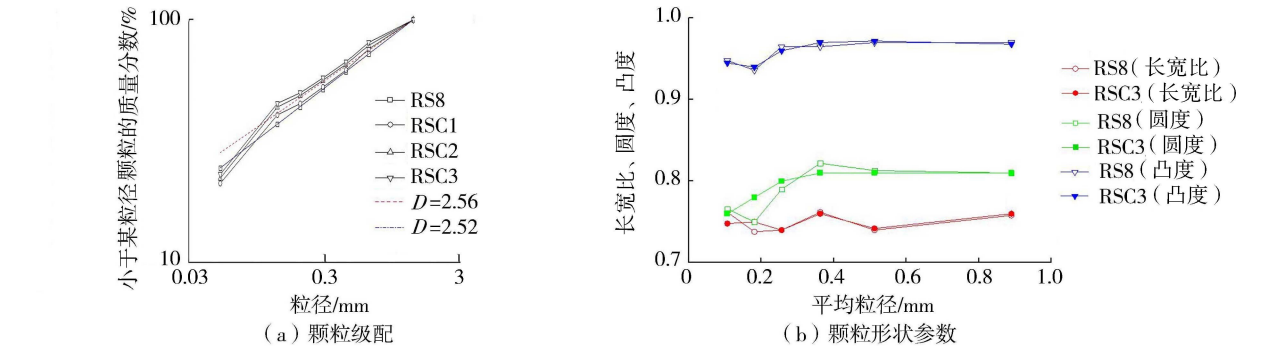


图 6 RSC 系列试样环剪过程中颗粒级配与形状参数变化

Fig.6 Evolution of particle size distribution and shape parameters of specimens grouped as RSC in ring shear process

由图 7(a)可知,将未经过破碎的自然钙质砂配制成与 RS8 同级配的试样进行剪切,同样会造成更多破碎的发生,当应变从 70 000% 变化到 120 000% 时,颗粒级配不再发生变化,说明自然钙质砂颗粒级配也重新达到了稳定。自然钙质砂达到稳定时的分形维数为 2.65,与破碎钙质砂最终级配分形维数相比(2.56),自然钙质砂的分形维数变化更大。与单一粒径钙质砂颗粒破碎形式不同的是,级配良好的钙质砂颗粒破碎后不仅长宽比发生了明显变化,圆度也有所增大(图 7(b)),这说明级配良好的钙质砂剪切过程中同时发生了断裂和磨损破碎。

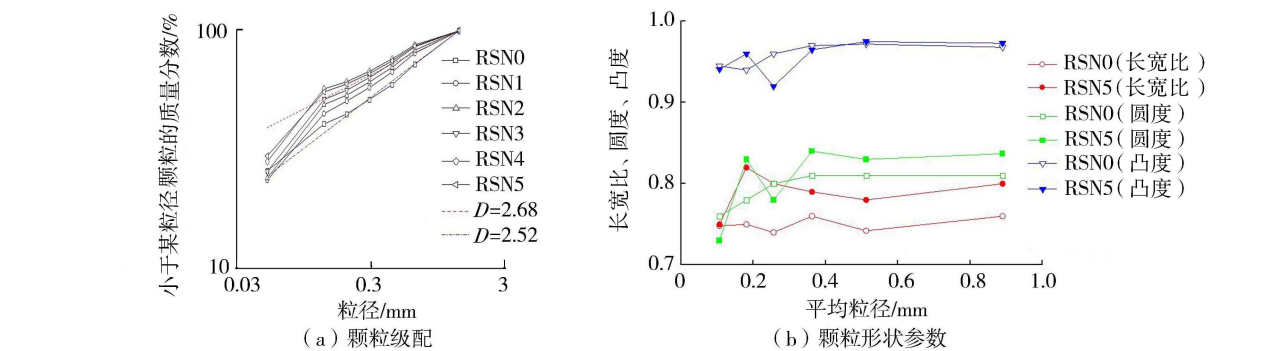


图 7 RSN 系列试样环剪过程中颗粒级配与形状参数变化

Fig.7 Evolution of particle size distribution and shape parameters of specimens grouped as RSN in ring shear process

为分析自然钙质砂破碎更为严重的原因,对 RS8(RS8 可以看作是 RSC 的初始状态,即 RSC0)和 RSN0

试样颗粒形状参数进行了测量,结果如图 8 所示。RSC0 与 RSN0 颗粒圆度、凸度相近,但是 RSN0 颗粒的长宽比明显大于 RSC0,也就是说 RSN0 试颗粒形状更不规则,因此 RSN0 达到最终级配时破碎更为严重,导致其分形维数也更大。总而言之,颗粒形状会影响钙质砂的最终级配,其中颗粒形状越不规则,破碎也越严重。这也说明,实验室进行钙质砂试验或计算机进行钙质砂数值模拟时,直接认为自然钙质砂配比成最终级配的试样不再发生破碎的理念是错误的。正确的做法是,不仅需要关注钙质砂达到最终状态的级配情况,还需要保证钙质砂颗粒形状的一致性。

3 结 论

- a. 单一粒径钙质砂在大剪应变作用下主要发生颗粒断裂破碎,均匀级配钙质砂则会同时发生颗粒断裂和磨损破碎,当剪应变达到 50 000% 时,单一粒径和均匀级配的钙质砂级配均会趋于稳定。
- b. 初始颗粒形状会影响钙质砂在大剪应力作用下的最终级配,颗粒形状越不规则,颗粒破碎越严重,钙质砂最终级配的分形维数也越大。因此,开展钙质砂物理试验或进行钙质砂数值模拟时,需要同时保持钙质砂级配和颗粒形状的一致性。

参考文献:

[ 1 ] 张家铭,汪稔,石祥锋,等. 侧限条件下钙质砂压缩和破碎特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(18):3327-3331. (ZHANG Jiaming,WANG Ren,SHI Xiangfeng,et al. Compression and crushing behavior of calcareous sand under confined compression [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2005,24(18):3327-3331. (in Chinese))

[ 2 ] 孙越,肖杨,周伟,等. 钙质砂和石英砂压缩下的颗粒破碎与形状演化[J]. 岩土工程学报,2022,44(6):1061-1068. (SUN Yue,XIAO Yang,ZHOU Wei,et al. Experimental study on multi-point contact crushing of spherical sandstone particles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2022,44(6):1061-1068. (in Chinese))

[ 3 ] 张家铭,张凌,蒋国盛,等. 剪切作用下钙质砂颗粒破碎试验研究[J]. 岩土力学,2008,29(10):2789-2793. (ZHANG Jiaming,ZHANG Ling,JIANG Guosheng,et al. Research on particle crushing of calcareous sands under triaxial shear [J]. Rock and Soil Mechanics,2008,29(10):2789-2793. (in Chinese))

[ 4 ] 张家铭,张凌,刘慧,等. 钙质砂剪切特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(增刊1):3010-3015. (ZHANG Jiaming,ZHANG Ling,LIU Hui,et al. Experimental research on shear behavior of calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2008,27(Sup1):3010-3015. (in Chinese))

[ 5 ] 孙吉主,汪稔. 钙质砂的颗粒破碎和剪胀特性的围压效应[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(4):641-644. (SUN Jizhu,WANG Ren. Influence of confining pressure on particle breakage and shear expansion of calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2004,23(4):641-644. (in Chinese))

[ 6 ] 孙吉主,罗新文. 考虑剪胀性与状态相关的钙质砂双屈服面模型研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(10):205-209. (SUN Jizhu,LUO Xinwen. Study on a two-yield surface model with consideration of state-dependent dilatancy for calcareous sand [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2006,25(10):205-209. (in Chinese))

[ 7 ] 汪轶群,洪义,国振,等. 南海钙质砂宏观观破碎力学特性[J]. 岩土力学,2018,39(1):199-206. (WANG Yiqun,HONG Yi, GUO Zhen,et al. Micro-and macro-mechanical behavior of crushable calcareous sand in South China Sea [J]. Rock and Soil Mechanics,2018,39(1):199-206. (in Chinese))

[ 8 ] 刘杰,姚志华,翁兴中,等. 三轴剪切下珊瑚砂颗粒破碎规律及强度特征[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(5):1463-1471. (LIU Jie,YAO Zhihua,WENG Xingzhong,et al. Particles breaking regularity and strength characteristics of coral sand under triaxial shear conditions [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2021,17(5):1463-1471. (in Chinese))

[ 9 ] 王刚,杨俊杰,王兆南. 钙质砂临界状态随颗粒破碎演化规律分析[J]. 岩土工程学报,2021,43(8):1511-1517. (WANG Gang,YANG Junjie,WANG Zhaonan. Evolution of critical state of calcareous sand during particle breakage [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(8):1511-1517. (in Chinese))

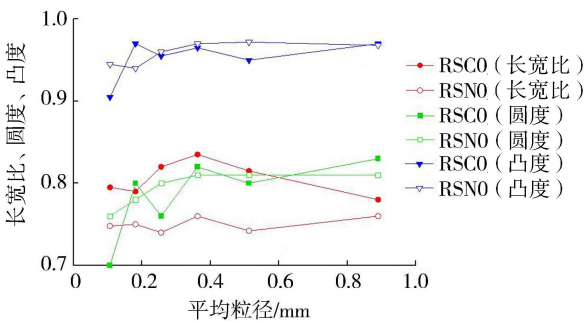


图 8 试样 RSC0 和 RSN0 的颗粒形状参数  
Fig. 8 Particle shape parameters of specimens named as RSC0 and RSN0

[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[14] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 普通混凝土拌合物性能试验方法标准:GB/T 50080—2002[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.

[15] 中国建筑科学研究院有限公司,南京易发新材料科技有限公司. 盾构法隧道同步注浆材料应用技术规:T/CECS 563—2018[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.

[16] 肖立,张庆贺,赵天石,等. 泥水盾构同步注浆材料试验研究[J]. 地下空间与工程学报,2011,7(1):59-64. (XIAO Li, ZHANG Qinghe, ZHAO Tianshi, et al. Experimental study on synchronous grouting material for slurry shield [J]. Journal of Underground Space and Engineering, 2011,7(1):59-64. (in Chinese))

[17] 周麟,毛文,施墨华. 盾构隧道同步注浆浆液配合比优化设计[J]. 武汉工程大学学报,2013,35(9):29-33. (ZHOU Lin, MAO Wen, SHI Mohua. Optimization design of mix proportion of synchronous grouting slurry in shield tunnel [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013,35(9):29-33. (in Chinese))

[18] 徐建平,林文书,许可,等. 盾构隧道快硬高性能同步注浆材料研究[J]. 隧道建设,2014,34(2):95-100. (XU Jianping, LIN Wenshu, XU Ke, et al. Study on fast hardening and high performance synchronous grouting material for shield tunnel[J]. Tunnel Construction, 2014,34(2):95-100. (in Chinese))

[19] BEZUIJEN A, VAN DER ZON W H, TALMON A M. Labo-ratory testing of grout properties and their influence on backfill grouting[C]//Proceedings of 1TA-AITES World Tunnel Congress. Istanbul:[s. n. ],2005:941-947.

[20] 王鹏. 盾构隧道壁后注浆体特性及其对地层变形的影响研究[D]. 北京:北京交通大学,2016.

[21] 杨钊,贺祖浩,刘毅,等. 福州地铁过江通道泥水盾构弃浆在壁后注浆材料中的再利用[J]. 现代隧道技术,2019,56(3):192-199. (YANG Zhao, HE Zuhao, LIU Yi, et al. Reuse of slurry discarded by slurry shield in back wall grouting material of river crossing channel of Fuzhou Metro[J]. Modern Tunnel Technology, 2019,56(3):192-199. (in Chinese))

[22] 王旋东. 砂性土层盾构隧道管片上浮因素分析及控制技术[J]. 上海建设科技,2020(2):36-38. (WANG Xuandong. Factors analysis and control technology for segment floating of shield tunnel in sandy soil [J]. Shanghai Construction Science and Technology, 2020(2):36-38. (in Chinese))

[23] 丁向群,李欣,郭一哲,等. 三乙醇胺与硫酸铝对水泥凝结时间的影响研究[J]. 混凝土,2021(5):56-60. (DING Xiangqun, LI Xin, GUO Yizhe, et al. Effect of triethanolamine and aluminum sulfate on setting time of cement[J]. Concrete, 2021(5):56-60. (in Chinese))

(收稿日期:2022-07-28 编辑:刘晓艳)

(上接第 45 页)

[10] COOP M R, SORENSEN K K, BODAS F T, et al. Particle breakage during shearing of a carbonate sand[J]. Géotechnique, 2004, 54(3):157-163.

[11] YIN Z, HICHER P, DANO C, et al. Modeling mechanical behavior of very coarse granular materials[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2016, 143(1):C4016006.

[12] ALTUHAFI F, O’SULLICAN C, CAVARRETTA I. Analysis of an image-based method to quantify the size and shape of sand particles[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2012, 139(8):1290-1307.

[13] 魏浩,沈超敏,刘斯宏,等. 考虑级配影响的粗粒料压缩破碎特性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):182-188. (WEI Hao, SHEN Chaomin, LIU Sihong, et al. Experimental study on compression and crushing characteristics of coarse granular materials considering influence of gradations [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020,48(2):182-188. (in Chinese))

[14] 于际都,刘斯宏,沈超敏,等. 染色石膏颗粒一维压缩破碎与形状演化[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):110-116. (YU Jidu, LIU Sihong, SHEN Chaomin, et al. Breakage and shape evolution of dyed gypsum particles under one-dimensional compression[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(1):110-116. (in Chinese))

[15] 牛奕然,周健,赵程,等. 砂岩球形颗粒多点接触破碎试验[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):92-97. (NIU Yiran, ZHOU Jian, ZHAO Cheng, et al. Experimental study on multi-point contact crushing of spherical sandstone particles[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022,50(2):92-97. (in Chinese))

(收稿日期:2022-06-27 编辑:刘晓艳)