

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201903049



钙质砂与石英砂渗透性差异对比试验

廖仁国¹, 周先齐^{1,2}, 蔡燕燕¹, 张小燕³

- (1. 华侨大学 岩土工程研究所, 福建 厦门 361021;
2. 厦门理工学院 土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361024;
3. 中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对相同粒径和级配的钙质砂与石英砂,通过单粒径三轴渗透试验和混合粒径三轴剪切渗透试验,对比分析单粒径砂渗透性受围压的影响规律,以及三轴剪切过程中混合粒径砂渗透性演化行为的差异.三轴渗透试验结果表明:钙质砂渗透性随围压的升高而降低,随粒径的增加而增加,与石英砂规律相似,钙质砂渗透系数与围压表现出较好的指数关系;在同级配条件下,钙质砂的渗透性小于普通石英砂;在给定围压和渗透压的条件下,钙质砂渗流量和时间呈现线性关系,依然服从达西定律.三轴剪切渗透试验结果表明:在较低围压下,钙质砂变形由剪缩到剪胀,渗透系数随应变的增加先下降,后升高,石英砂变形规律及渗透规律与钙质砂相似;在较高围压下,二者差异明显,钙质砂变形表现为剪缩特性,且伴有一定量的颗粒破碎,渗透系数降幅由快变慢直至稳定,而石英砂无论是变形规律还是渗透规律,均与较低围压下一致.

关键词: 渗透系数; 围压; 钙质砂; 石英砂

中图分类号: TU 411.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-5013(2019)05-0600-06

Comparative Experiment on Permeability Difference Between Calcareous Sand and Quartz Sand

LIAO Renguo¹, ZHOU Xianqi^{1,2}, CAI Yanyan¹, ZHANG Xiaoyan³

- (1. Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
3. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: For the calcareous sand and quartz sand with the same particle size and gradation, the influence of confining pressure on the permeability of single particle size sand was analyzed by single particle size triaxial permeability test and mixed particle size triaxial shear permeability test, the difference of permeability evolution behavior of mixed particle size sand was discussed during triaxial shear. The results of triaxial permeability test show that the permeability of calcareous sand decreases with the increase of confining pressure, and increases with the increase of particle size, which is similar to that of quartz sand, the permeability coefficient of calcareous sand shows a good exponential relationship with confining pressure. The permeability of calcareous sand is lower than that of ordinary quartz sand, the seepage flow rate and time of calcareous sand show a linear relationship under given confining pressure and osmotic pressure, and still obey Darcy's law. The results of triaxial shear permeability test show that under low confining pressure, the deformation of calcareous sand is

from shear shrinkage to dilatancy, and the permeability coefficient decreases at first and then increases with the increase of strain. The deformation and permeability of quartz sand are similar to those of calcareous sand, but the difference is obvious at high confining pressure. The deformation of calcareous sand is characterized by shear shrinkage and a certain amount of particle breakage, and the decrease of permeability coefficient changes from fast to slow, to stable. The deformation and permeability of quartz sand are consistent with those under confining pressure.

Keywords: permeability coefficient; confining pressure; calcareous sand; quartz sand

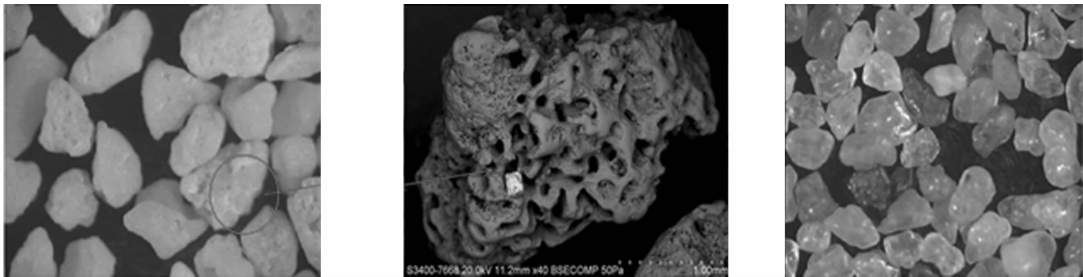
钙质砂主要是由海洋生物的残骸经过一系列复杂的物理、生物化学反应作用形成的沉积物,富含碳酸盐,其 CaCO_3 的质量分数高达 95%^[1],是一种特殊的岩土工程材料. 钙质砂颗粒强度低、易破碎,单个颗粒多棱角、形状不规则、含较多内孔隙. 与一般陆源砂相比,其物理力学性质具有显著的差异^[2-3]. 前人对钙质砂的基本物理力学特性进行了许多研究. 例如,桩在钙质砂地基中的承载特性^[4]、液化特性^[5]、压缩特性^[6-9]、蠕变特性^[10-11]、动力响应特性^[12]等. 渗透性是土体的一个重要性质,渗透性的好坏一般通过渗透系数的大小进行辨别. 钙质砂的渗透性受到其颗粒形状^[13-14]、压实度^[15-16]、细颗粒质量分数^[17]等的影响. 钱琨等^[18]通过钙质砂的级配和孔隙比,建立钙质砂的渗透计算模型. 胡明鉴等^[17]考虑干密度和压实度,建立渗透系数关系式. 砂土渗透性在时间上也表现出一定的规律^[19]. 开采地下水引起的地面沉降问题与砂土层压缩变形有着密切的关系^[20],渗透特性对其影响较大. 钙质砂作为岛礁填筑和海上构筑物的基础材料,经常会处于荷载、自重等产生的应力及地下水渗流等相互作用产生的复杂应力状态中,但前人的研究并未考虑钙质砂实际应力状态对其渗透性的影响. 本文通过三轴应力-应变渗透测试系统对钙质砂和石英砂的三轴渗透特性和三轴剪切渗透特性进行对比研究.

1 试验部分

1.1 试验材料

钙质砂取自南海某岛礁附近海域,自然风干后进行筛分试验. 天然钙质砂大多为级配不良的状态,为贴近实际情况,选取级配不良砂作为试样,其不均匀系数 C_u 为 3.93,曲率系数 C_c 为 1.02,最大孔隙比为 1.505,最小孔隙比为 0.860,比重为 2.74. 控制试样的密实度为 80%,孔隙比为 0.989,干密度为 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. 单一粒径组砂样均取自筛分试验中筛子上的余量,石英砂与钙质砂的颗粒级配相同.

钙质砂与石英砂的形貌特征对比^[21],如图 1 所示. 由图 1 可知:钙质砂颗粒表面含有丰富的棱角和内孔隙,石英砂颗粒较圆润,没有内孔隙,故钙质砂与石英砂在力学和水理性质上存在较大的差异.



(a) 钙质砂颗粒 (b) 微观钙质砂颗粒 (c) 石英砂颗粒

图 1 钙质砂与石英砂的形貌特征对比

Fig. 1 Comparison of morphology between calcareous sand and quartz sand

1.2 试验仪器

试样尺寸直径为 61.8 mm,高为 125.0 mm,截面面积为 $3\,000.0 \text{ mm}^2$. 采用 FLSY30-1 型全自动三轴渗透测试仪测量砂土的渗透系数,试验可施加的最大轴向荷载为 30 kN.

与传统的方法相比,FLSY30-1 型全自动三轴渗透仪具有以下 2 个优点:1) 试样由乳胶膜包裹,且施加一定的围压,可较好地控制试样侧壁止水;2) 试样的底部和顶部皆设置透水石,透水石与圆柱试样的直径一致,可提高渗透系数的测量精度.

1.3 试验方法

参照 GB/T 50123—1999《土工试验方法标准》^[22],进行试验准备、试样安装、固结及渗流试验. 饱和方式一般有水头饱和、通无气水、真空饱和及反压饱和. 由于钙质砂饱和较困难,故按照预先控制的干密度称取一定质量的试样,将试样五等分,逐层放入已贴有橡皮膜的承膜筒中,轻轻敲击承膜筒壁,每次以相同的高度轻压试样,直至达到预定高度,以保证相同的密实度,防止颗粒破碎. 取出承膜筒,将试样依次通 CO₂、水头饱和、反压饱和. 经检测,试样孔隙水压力增量与围压增量的比值(*B*)可达 0.95 以上.

首先,在围压为 100~500 kPa,渗透压为 20 kPa 的条件下,进行单粒径组的渗透试验. 然后,在围压为 100~500 kPa,渗透压为 20 kPa 的条件下,进行预设级配的钙质砂与同级配石英砂的渗透试验,并在围压为 300 kPa,渗透压为 20 kPa,偏应力为 100~1 100 kPa 的条件下,进行渗透试验. 最后,在围压为 100~300 kPa,渗透压为 20 kPa 的条件下,进行三轴剪切渗透试验.

2 三轴渗透试验结果与分析

2.1 围压、单粒径对钙质砂与石英砂渗透性的影响

钙质砂和石英砂的渗透系数(*k*)与粒径(*d*)的关系,如图 2 所示. 图 2 中:σ₃ 为围压. 由图 2(a)可知:随着围压的增加,各粒径组钙质砂的渗透系数均逐渐减小;在同一围压下,随着颗粒粒径的增加,渗透系数的增幅逐渐减小. 围压的增加使试样进一步固结、土体积缩小、原生孔隙被压缩,渗透系数降低;粒径越小,颗粒压缩的越密实,固结程度越高. 试验结束后拆样发现,不同于较大颗粒粒径组出现的散状现象,0.15~0.30 mm 粒径组颗粒固结成一个圆柱体,造成渗透系数相对较小. 这是因为粒径越大,颗粒外轮廓的棱角更加复杂,颗粒内部的孔隙更多,渗流路径更长,水流通过时的阻力更大,造成渗透系数增长缓慢. 由图 2(b)可知:石英砂与钙质砂的渗透性相似,但在同一围压下,随着粒径的增加,石英砂渗透系数的增幅比钙质砂大. 这是因为相较于具有丰富棱角的钙质砂颗粒,石英砂颗粒的表面比较圆润,且没有内孔隙,在同等条件下形成的孔隙结构较为规则,过水通道得到改善,水流通过时的阻力较小,渗流时间较短,渗流速度较快,渗透系数较大;粒径越大,颗粒表面越圆润,渗透系数的增幅也相对越大.

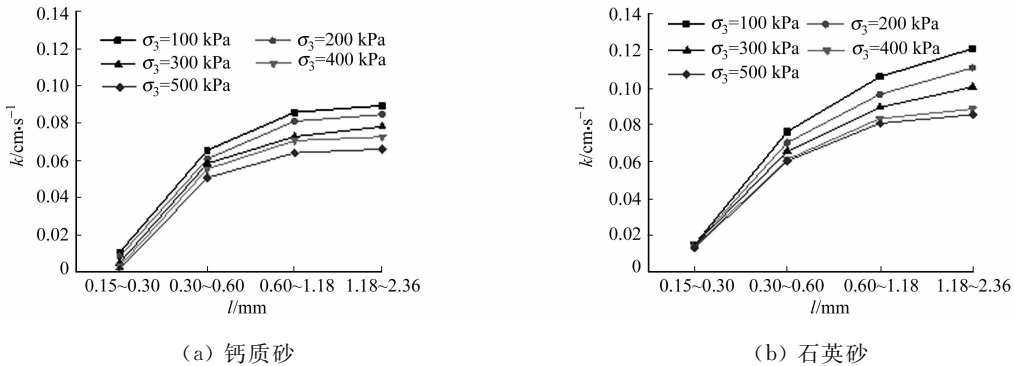


图 2 钙质砂和石英砂的渗透系数与粒径的关系

Fig. 2 Relationship between permeability coefficient and particle size of calcareous sand and quartz sand

2.2 同级配钙质砂和石英砂渗透性的比较

同级配钙质砂与石英砂的渗透系数与围压的关系,如图 3 所示. 由图 3 可知:随着围压增加,石英砂、钙质砂的渗透系数逐渐减小;当围压从 100 kPa 增至 500 kPa 时,其渗透系数的降幅分别为 36.0%, 39.3%, 两者降幅相差不大,但在同一围压下,钙质砂的渗透系数比石英砂小. 这是因为钙质砂颗粒表面粗糙、多棱角,颗粒内部含有复杂的孔隙结构,使渗流通道变得曲折,水流阻力较大,导致钙质砂的渗透系数较小,透水性较差. 相较于钙质砂,石英砂的颗粒表面形状较规则,孔隙结构也较规整,因此,普通石英砂的渗透系数较大,透水性较好. 单粒径钙质砂的渗透系数基本比混合粒径大一个数量级,说明钙质砂的渗透性受到粒径的影响较大,可通过调整钙质砂的级配改善其渗透性.

2.3 偏应力与渗流量、时间的关系

钙质砂在围压为 300 kPa,渗透压为 20 kPa 的条件下,进行三轴渗透试验,不同偏应力(*q*)下的渗流量(*V*)与时间(*t*)的关系,如图 4 所示. 由图 4 可知:钙质砂的渗流量与时间具有良好的线性关系,其渗透

性仍符合达西定律;随着偏应力的增加,渗流速度变缓,偏应力对钙质砂的渗透性产生阻碍作用。

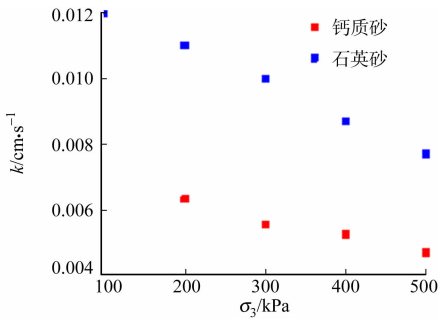


图 3 钙质砂和石英砂渗透系数与围压的关系

Fig. 3 Relationship between permeability coefficient and confining pressure of calcareous sand and quartz sand

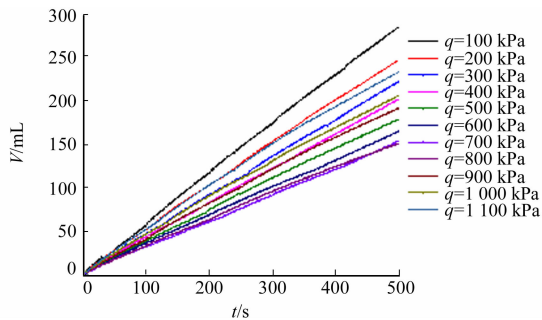


图 4 不同偏应力下钙质砂的渗流量与时间的关系

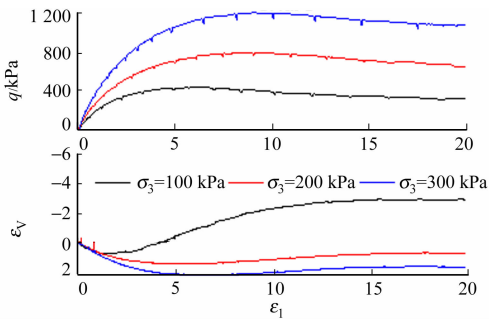
Fig. 4 Relation curve between seepage rate and time of calcareous sand under different deviatoric stresses

3 三轴剪切渗透试验结果与分析

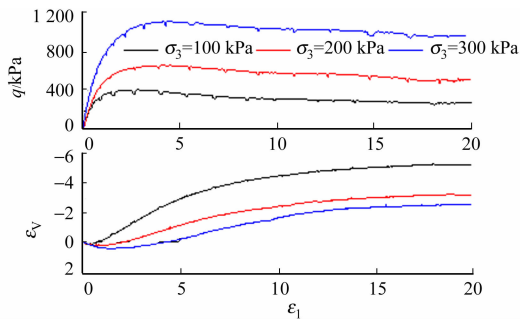
3.1 应力-应变与渗透系数的关系

不同围压下,两种砂的应力-应变曲线,如图 5 所示.图 5 中: ϵ_1 为轴向应变; ϵ_v 为体应变.由图 5 可知:随着围压的增加,峰值强度逐渐增大,但石英砂的峰值强度比钙质砂略低,说明钙质砂的内摩擦角比石英砂大.这是因为在同级配条件下,钙质砂颗粒表面的孔洞较多,孔径较大,表面的咬合程度较高,相应的粗糙度也越大。

不同围压下,两种砂的渗透系数-应变曲线,由图 6 所示.对比图 5,6 可知:当围压为 100 kPa 时,在峰值强度前,钙质砂渗透系数随着偏应力的增加而下降,下降速率开始较快,而后较缓,在峰值强度后,偏应力有所降低,但渗透系数却出现升高;当围压为 200,300 kPa 时,钙质砂、石英砂表现出相同的规律,渗透系数均逐渐减小,下降速率先快后慢,最后趋于稳定。



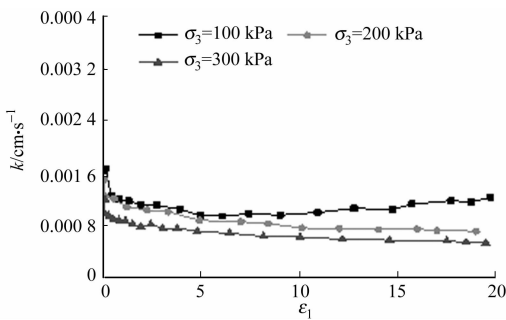
(a) 钙质砂



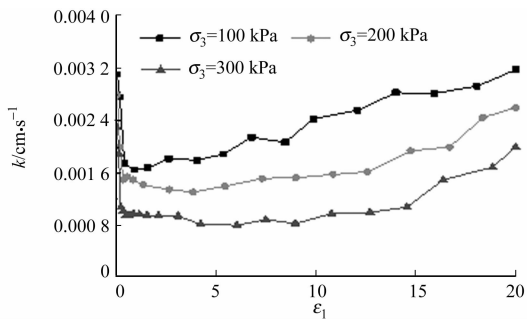
(b) 石英砂

图 5 钙质砂、石英砂的应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain relationship curves of calcareous sand and quartz sand



(a) 钙质砂



(b) 石英砂

图 6 钙质砂、石英砂的渗透系数-应变关系曲线

Fig. 6 Permeability coefficient-strain relationship curves of calcareous sand and quartz sand

3.2 应变与渗透系数的关系

由图 5 可知:在围压较低时,钙质砂、石英砂的变形规律都为先剪缩,后剪胀;在围压较高时,钙质砂的变形规律只表现为剪缩,石英砂则从剪缩到剪胀;随着围压的增加,钙质砂颗粒重排列,进而被压碎,变形特性发生变化,压缩性增大,塑性破坏增加,软化特征将逐渐减弱,剪胀逐渐过渡到剪缩.

由图 6 可知:当围压较低时,试样的剪胀作用占据优势,出现明显的剪切带(图 7),使过水通道变宽,渗透系数变大;当围压较高时,开始时试样被压缩,体积变小,渗透系数下降的幅度较快,随着应力的增加,试样逐渐变密,孔隙率逐渐减小,剪胀作用消失,颗粒破碎程度增大,此时,渗透系数变化速率较慢,但依然为减小的趋势;石英砂无论是在较高或较低围压下,均是由剪缩到剪胀的过程,且主要以剪胀作用为主,渗透系数先下降,后升高.

4 颗粒的破碎

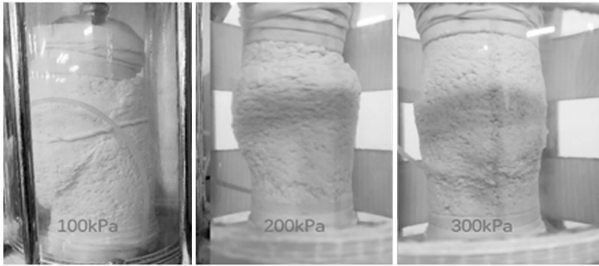
三轴剪切渗透试验结束后,分别对钙质砂、石英砂试样进行烘干、筛分试验,并进行颗粒粒度的分析,忽略筛分试验过程中可能产生的少量砂子的损失及称质量时产生的误差.

钙质砂试验前、后颗粒的级配曲线,如图 8 所示. 图 8 中: η 为小于某粒径钙质砂的质量分数. 由图 8 可知:当围压较低时,颗粒的破碎表现得极不明显,大粒径并没有发生破碎,只有粒径小于 0.15 mm 的颗粒发生极少量破碎,故钙质砂在较低围压下的颗粒破碎不是引起渗透系数变化的主要原因;当围压较高时,粒径小于 0.30 mm 及粒径为 0.60~1.18 mm 的颗粒均出现不同程度的破碎,小颗粒数量增多,渗透路径曲折,从而引起渗透系数的变化. 石英砂在试验前、后并没有发生颗粒破碎. 因此,钙质砂渗透系数的变化是由变形特性和颗粒破碎共同决定的,而石英砂渗透系数变化只由变形特性决定.

5 结论

通过三轴渗透试验和三轴剪切渗透试验,对钙质砂、石英砂的渗透性差异进行对比研究,就其单粒径和混合粒径对渗透性的影响进行详细分析,得出以下 4 个结论.

- 1) 在三轴渗透试验中,钙质砂的粒径大小及施加的围压大小对其渗透性有一定影响. 在粒径组不变的情况下,钙质砂的渗透性随着围压的增加而不断地降低;在围压不变的情况下,钙质砂的渗透性随着粒径的增加而增加. 石英砂的渗透性与钙质砂具有相似的规律.
- 2) 在三轴渗透试验中,通过与同级配的石英砂渗透性进行比较,发现石英砂的渗透系数与围压表现为明显的线性关系,钙质砂的渗透系数与围压表现为明显的指数关系;同围压下石英砂的渗透系数比钙质砂大,钙质砂表面不规整,颗粒内部含有复杂的孔隙,渗流通道曲折复杂,水流阻力较大,使渗透系数较小,渗透性比普通石英砂更差. 在不同的偏应力作用下,钙质砂的渗透性依然服从达西定律,并随应力的变化而变化.
- 3) 在三轴剪切渗透试验中,随着围压的增加,钙质砂、石英砂的峰值强度逐渐增大,且钙质砂的内摩擦角比石英砂大;在围压较低时,钙质砂的变形特性由剪缩到剪胀,石英砂的变形规律与之相同;在围压较高时,钙质砂的变形特性表现为剪缩,而石英砂依然维持围压较低时的变形规律.



(a) 100 kPa (b) 200 kPa (c) 300 kPa

图 7 不同围压下钙质砂试样的破坏

Fig. 7 Failure of calcareous sand samples under different confining pressures

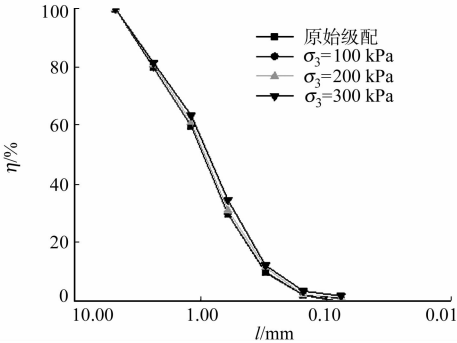


图 8 钙质砂试验前、后颗粒级配曲线

Fig. 8 Gradation curves of particles size of calcareous sand before and after tests

4) 在三轴剪切渗透试验中,钙质砂在围压为 100 kPa 时的渗透性与围压为 200,300 kPa 时有明显的不同;而无论是较高或较低围压下,石英砂的渗透性均表现为相同的规律.

参考文献:

[1] 王新志.南沙群岛珊瑚礁工程地质特性及大型工程建设可行性研究[D].武汉:中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所),2008.

[2] 朱长歧,陈海洋,孟庆山,等.钙质砂颗粒内孔隙的结构特征分析[J].岩土力学,2014,35(7):1831-1836. DOI:10.16285/j. rsm. 2014. 07. 005.

[3] 朱长歧,周斌,刘海峰.南海海滩岩的细观结构及其基本物理力学性质研究[J].岩石力学与工程学报,2015,34(4):683-693. DOI:10.13722/j. cnki. jrme. 2015. 04. 004.

[4] 秦月,孟庆山,汪稔,等.钙质砂地基单桩承载特性模型试验研究[J].岩土力学,2015,36(6):1714-1720. DOI:10.16285/j. rsm. 2015. 06. 025.

[5] 孟庆山,秦月,汪稔.珊瑚礁钙质沉积物液化特性及其机理研究[J].土工基础,2012,26(1):21-24. DOI:10.3969/j. issn. 1004-3152. 2012. 01. 007.

[6] 王新志,汪稔,孟庆山,等.钙质砂室内载荷试验研究[J].岩土力学,2009,30(1):147-156. DOI:10.16285/j. rsm. 2009. 01. 039.

[7] 张家铭,蒋国盛,汪稔.颗粒破碎及剪胀对钙质砂抗剪强度影响研究[J].岩土力学,2009,30(7):2043-2048. DOI:10.16285/j. rsm. 2009. 07. 056.

[8] ZHANG B,HERBOLD E B,HOMEL M A,*et al.* DEM particle fracture model[R]. Livermore:Lawrence Livermore National Laboratory,2015.

[9] 王铁群.钙质砂宏细观力学特性试验及离散元模拟[D].杭州:浙江大学,2016.

[10] 叶剑红,曹梦,李刚.中国南海吹填岛礁原状钙质砂蠕变特征初探[J].岩土力学与工程学报,2019,38(6):1242-1251. DOI:10.13722/j. cnki. jrme. 2018. 0695.

[11] 曹梦,叶剑红.中国南海钙质砂蠕变-应力-时间四参数数学模型[J].岩土力学,2019,40(5):1771-1777. DOI:10.16285/j. rsm. 2018. 1267.

[12] 徐学勇,汪稔,王新,等.饱和钙质砂爆炸响应动力特性试验研究[J].岩土力学,2012,33(10):2953-2959. DOI:10.16285/j. rsm. 2012. 10. 005.

[13] 任玉宾,王胤,杨庆.颗粒级配与形状对钙质砂渗透性的影响[J].岩土力学,2018,39(2):1-7. DOI:10.16285/j. rsm. 2016. 0277.

[14] DONOHUEA T J,WENSRICHB C M. Improving permeability prediction for fibrous materials through a numerical investigation into pore size and pore connectivity[J]. Powder Technology,2009,195(1):57-62. DOI:10.1016/j. powtec. 2009. 05. 012.

[15] 邵健伟,鲁程鹏,马克迪,等.压缩过程中粗粒土渗透性变化的试验分析[J].水资源与水工程学报,2016,27(6):217-221. DOI:10.11705 /j. issn. 1672-643X. 2016. 06. 39.

[16] 胡明鉴,蒋航海,朱长歧,等.钙质砂的渗透特性及其影响因素探讨[J].岩土力学,2017,38(10):2895-2900. DOI:10.16285/j. rsm. 2017. 10. 016.

[17] 胡明鉴,崔翔,王新志,等.细颗粒对钙质砂渗透性的影响试验研究[J].岩土力学,2019,40(8):1-6. DOI:10.16285/j. rsm. 2018. 0849.

[18] 钱琨,王新志,陈剑文,等.南海岛礁吹填钙质砂渗透特性试验研究[J].岩土力学,2017,38(6):1557-1564. DOI:10.16285/j. rsm. 2017. 06. 003.

[19] 王志兵,汪稔,胡明鉴,等.颗粒运移对蒋家沟土体渗透性影响的试验研究[J].岩土力学,2011,32(7):2017-2024. DOI:10.16285/j. rsm. 2011. 07. 012.

[20] 王艳芳,蔡燕燕,蔡正银.饱和砂土蠕变特性实验[J].华侨大学学报(自然科学版),2017,38(1):31-37. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201701006.

[21] 张小燕,蔡燕燕,王振波,等.珊瑚砂高压下一维蠕变变形破碎及颗粒形状分析[J].岩土力学,2018,39(5):1573-1580. DOI:10.16285/j. rsm. 2017. 0763.

[22] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S].北京:中国计划出版社,1999.