

DOI: 10.11779/CJGE2020S1001

北疆白砂岩特殊物理力学性质试验研究

邓铭江¹, 蔡正银^{2, 3}, 郭万里^{*3}, 黄英豪^{2, 3}, 张晨³

(1. 新疆维吾尔自治区水利厅, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 南京水利科学研究院土石坝破坏机理与防控技术水利部重点实验室, 江苏 南京 210024;
3. 南京水利科学研究院岩土工程研究所, 江苏 南京 210024)

摘要: 白砂岩是戈壁沙漠地区输水渠道常见土料, 其物理力学性质决定了渠道的安全稳定。开展了一系列室内试验发现白砂岩特殊的物理力学性质, 主要如下结论: ①白砂岩的土体分类为粉土质砂, 主要矿物成分为石英, 质量占比为 66%, 黏土矿物为蒙脱石和高岭石, 质量占比之和为 17%, 特殊的矿物成分和颗粒级配使得该土料性质较为特殊, 其中, 液塑限特性方面接近于低液限黏土; 渗透系数数量级为 10^{-6} cm/s, 接近于淤泥土和黏土。②白砂岩无论是疏松还是密实状态, 应力都表现为应变硬化型, 体变无剪胀发生。黏聚力随着压实度的增加显著增加, 压实度为 96%时, $c=41$ kPa, 接近于黏土; 内摩擦角则几乎与压实度无关, 不同压实度下基本都为 31.8° 。③白砂岩的 $e - \ln p$ 平面内的临界状态线呈现出的规律与易碎散粒材料如珊瑚砂甚至堆石料相同; 且临界状态应力比并非定值, 而是受到围压和初始密度的影响。这都与普通砂土的临界状态特性存在显著差异。

关键词: 白砂岩; 粉土质砂; 三轴试验; 临界状态; 强度变形

中图分类号: TU43 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2020)S1-0001-05

作者简介: 邓铭江(1960—), 男, 博士, 湖南永阳人, 中国工程院院士, 教授级高级工程师, 主要从事干旱区水资源研究与水利工程建设管理工作。E-mail: xjdmj@163.com。

Experimental study on special physical and mechanical properties of white sandstone in North Xinjiang

DENG Ming-jiang¹, CAI Zheng-yin^{2, 3}, GUO Wan-li³, HUANG Ying-hao^{2, 3}, ZHANG Chen³

(1. Department of Water Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumchi 830000, China; 2. Key Laboratory of Failure

Mechanism and Safety Control Techniques of Earth-rock Dam of the Ministry of Water Resources, Nanjing 210024, China;

3. Geotechnical Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: The white sandstone is a commonly used soil material in the Gobi canal. In order to study its physical and mechanical properties, a series of indoor tests are carried out. The following conclusions are drawn: (1) The white sandstone can be classified as the silty sand, its main mineral composition is quartz sand with the mass percent of 66%, and the clay mineral is montmorillonite and kaolinite, accounting for 17%. The special mineral composition and grain size distribution of the silty sand makes it have special behavior, which is similar to that of sand and clay. Among them, the liquid plastic limit closes to that of the low liquid limit clay. The permeability coefficient is on the order of 10^{-6} cm/s, closing to that of silt and clay. (2) Whether it is in loose or dense state, the stress of the white sandstone sand is shown as strain hardening, and no volume dilatation occurs. The cohesion increases significantly with the increasing compaction degree, when the compaction degree is 96%, $c=41$ kPa, which is close to that of the clay. The internal friction angle has little relation with the compaction degree, which is basically 31.8° under different compaction degrees. (3) The critical state line in the $e-\ln p$ space of the white sandstone is the same as that of brittle granular materials such as coral sand and even rockfills. Moreover, the critical state stress ratio is not a constant, but affected by the confining pressure and the initial density. All of those are significantly different from the critical state characteristics of the ordinary sandy soils.

Key words: white sandstone; silty sand; triaxial test; critical state; strength-deformation characteristic

0 引言

白砂岩是西北戈壁沙漠区常见的一种土料, 随着国家“一带一路”战略的推进, 以乌鲁木齐为中心的

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2017YFC0405102); 国家自然科学基金项目(51909170); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(Y319010); 中国博士后科学基金项目(2018M640500, 2019T120443)

收稿日期: 2020-06-04

*通信作者(E-mail: guowljs@163.com)

西北地区成为重要的支点，相关工程建设陆续开展。比如，我国是一个水资源严重短缺的国家，且水资源时空分布不均，呈现出南丰北缺、东多西少的显著特点。为了调节水资源的地域分布，国家相继修建了一大批长距离调水工程^[1-2]。其中，部分渠道穿过戈壁沙漠地区，交通运输极为不便，渠道填方段往往就近取材，因此白砂岩成为常见的填料。

目前，关于白砂岩的研究较少，建设人员对其物理力学性质了解不够深刻，大多数是依靠对普通砂土的工程经验。事实上，在实际施工过程中，人们已经发现白砂岩所表现出来的部分特征并不像是典型的砂土。比如，白砂岩受到渠水浸入之后，具备较强的黏性，甚至能黏附于车轮之上。若简单地将其当作普通砂土，可能会导致安全隐患，因此，亟需开展相关研究。

基于此，本文对白砂岩开展了系列室内试验研究，测试了主要的物理力学指标，对比分析了其与典型砂土和黏土之间的异同，指出了白砂岩的特殊性，为戈壁渠道的设计与建设提供理论参考。

1 白砂岩基本性质

试验选用的材料为某输水渠道白砂岩，天然状态下土料形态如图 1 所示，并非是砂颗粒，而是大部分土颗粒都结成大大小小的土块。



图 1 天然状态下的白砂岩

Fig. 1 White sandstone at natural state

通过 X 衍射仪确定了白砂岩的矿物成分，试验结果如表 1 所示。其中，该白砂岩的主要矿物成分为石英，百分含量为 66%；黏土矿物为蒙脱石和高岭石，占比之和为 17%。

表 1 白砂岩矿物成分

Table 1 Mineral composition of white sandstone

矿物组成	蒙脱石	水云母	长石	高岭石	石英
含量/%	2	5	12	15	66

剔除碎石等杂质后，颗粒相对密度 $G_s=2.62$ ，土料最大粒径为 5 mm，级配曲线如图 2 所示。白砂岩

界限粒径及界限系数如表 2 所示，其中平均粒径 $d_{50}=0.208$ mm，不均匀系数 $C_u=106.7$ ，曲率系数 $C_c=5.7$ 。

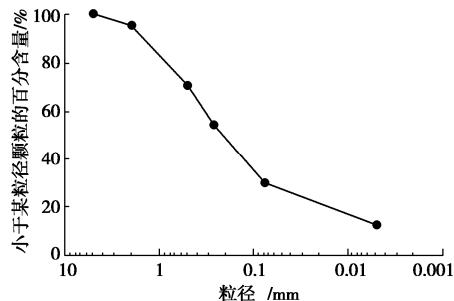


图 2 白砂岩的级配曲线

Fig. 2 Grain-size distribution curve of white sandstone

表 2 白砂岩界限粒径及界限系数

Table 2 Boundary particle sizes and coefficients of white sandstone

有效粒径 d_{10}/mm	中间粒径 d_{30}/mm	平均粒径 d_{50}/mm	限制粒径 d_{60}/mm	不均匀系数 C_u	曲率系数 C_c
0.003	0.074	0.208	0.32	106.7	5.7

根据水利部《土工试验方法标准（GBT 50123—2019）》^[3]，试样中粒径大于 0.075 mm 的粗粒组质量多于总质量的 50% 的土称为粗粒类土，粗粒类土中砾粒组质量大于总质量 50% 的称为砾类土，粒径大于 2 mm 的砾粒组质量少于或等于总质量 50% 的土称为砂类土。

白砂岩土样的粒组含量列于表 3。从表 3 可见，白砂岩细粒 (<0.075 mm) 含量为 30.1%，粗粒组 (>0.075 mm) 含量为 69.7%，因此该土样为粗粒土。进一步地，试样中粒径大于 2 mm 的细砾质量仅占总质量的 5.6%，而砂粒占 65.2%，因此该白砂岩可细分为砂类土。

表 3 白砂岩的粒组含量

Table 3 Percentages of particle group white sandstone

粒组划分	粒径 d/mm	百分比/%	合计百分比/%
细砾	$5 \geq d > 2$	4.7	4.7
粗砂	$2 \geq d > 0.5$	24.8	
中砂	$0.5 \geq d > 0.25$	16.3	65.2
细砂	$0.25 \geq d > 0.075$	24.1	
粉粒	$0.075 \geq d > 0.005$	17.3	30.1
黏粒	$d \leq 0.005$	12.8	

细粒 (<0.075 mm) 含量为 30.3%，介于 15%~50% 之间，且细粒中以粉粒 (0.075 mm ~ 0.005 mm) 为主，占比为 17.3%，因此，该白砂岩最终可归类为粉土质砂，代号为 SM^[3]。

尽管白砂岩根据粒组可以被分为粉土质砂，但是，

在试验过程中发现白砂岩呈现出一些特殊的性质, 本节将主要就相关特性开展研究。

1.1 液塑限指数

《土工试验方法标准》规定^[3]: 一般而言, 界限含水率试验针对的土料为粒径小于 0.5 mm 的土料^[3]。白砂岩粒径小于 0.5 mm 的土颗粒质量占比为 70.5%, 粒径大于 0.5 mm 的土颗粒质量占比达 29.5%, 并不符合《土工试验方法标准》的一般规定^[3]。但是, 实践中发现, 白砂岩在浸水之后具有显著的黏性, 能够成块地黏附在车轮上。因此, 对原级配白砂岩开展了界限含水率试验。

试验表明, 白砂岩 17 mm 液限为 29.9%, 塑限为 14.8%, 塑性指数为 15.1, 将其绘制在 17 mm 液限所对应的塑性图中, 如图 3 所示。可见, 白砂岩处于 CL 区域, 即白砂岩在液塑限特性方面接近于低液限黏土。

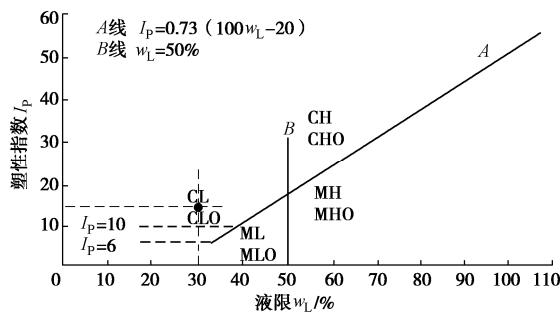


图 3 白砂岩 17 mm 液限所对应的塑性图

Fig. 3 Plastic diagram corresponding to 17 mm-liquid limit of white sandstone

1.2 最大干密度

《土工试验方法标准》^[3]对相对密度试验的一般规定为: 土样为能自由排水砂砾土, 粒径不应大于 5 mm, 且粒径为 2~5 mm 的土样质量不应大于总质量的 15%。白砂岩粒径都小于 5 mm, 且 2~5 mm 的土样占比为 4.7%, 满足相对密实度的一般规定, 因此, 笔者首先对白砂岩开展了相对密度试验。试验结果表明, 白砂岩的最大干密度为 1.63 g/cm³, 最小干密度为 1.18 g/cm³。试验结果显然与渠道现场运行情况不符, 不少渠段白砂岩干密度实测值都大于 1.75 g/cm³, 明显高于试验所得的最大干密度 1.63 g/cm³。

因此, 继续对白砂岩开展重型击实试验。《土工试验方法标准》^[3]中击实试验的对土体的一般规定为: 土样粒径小于 20 mm, 白砂岩显然满足该要求。重型击实试验得到的最大干密度为 1.98 g/cm³, 最优含水率为 10%。击实试验得到的最大干密度符合实际。

1.3 渗透性

鉴于界限含水率试验和击实试验, 初步得到白砂岩具备黏土的性质, 因此采用变水头渗透试验来测量

白砂岩的渗透系数。

试验测量了 4 个不同干密度试样的渗透系数, 其中试样最大干密度 1.90 g/cm³, 压实度 96.0%; 最小干密度 1.75 g/cm³, 压实度 88.4%, 得到的饱和渗透系数如表 4 所示。

表 4 白砂岩的渗透系数

Table 4 Permeability coefficients of white sandstone

制样干密度 ρ_d (g·cm ⁻³)	压实度 /%	渗透系数 k /(10 ⁻⁶ cm·s ⁻¹)
1.90	96.0	1.63
1.85	93.4	2.63
1.80	90.9	5.85
1.75	88.4	16.4

由表 4 可得, 白砂岩渗透系数最大的特点在于, 其数量级为 10⁻⁶ cm/s, 其中, 压实度为 96% 时, 渗透系数为 1.63×10^{-6} cm/s。根据《堤防工程手册》所给出的经验值, 黏质砂的渗透系数范围为 $2 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-4}$ cm/s, 淤泥土为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-7}$ cm/s, 黏土为 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/s。由此可见, 该白砂岩的渗透系数远小于普通黏质砂, 接近于淤泥土和黏土。

此外, 白砂岩的渗透系数与干密度呈现出反比关系, 即随着制样干密度(压实度)的增加, 其渗透系数逐渐降低。当压实度为 88.4% 时, 渗透系数为 16.4×10^{-6} cm/s, 当压实度增至 96.0% 时, 渗透系数降为 1.63×10^{-6} cm/s, 下降了一个数量级。这说明提高白砂岩的压实度可有效地降低其渗透性。

1.4 强度变形特性

由于 2 mm 以上颗粒占比极少, 在三轴试验时将 2 mm 以上颗粒直接剔除后进行制样。试验共进行了干密度为 1.90, 1.85, 1.80, 1.75 g/cm³ 四组试样的三轴固结排水剪切试验, 分别对应压实度为 96%, 93.4%, 90.9%, 88.4% 的土样, 对应的初始孔隙比分别为 0.379, 0.416, 0.456, 0.497。试验方案如表 5 所示, 围压为 50, 100, 200, 400 kPa。

表 5 三轴 CD 试验方案

Table 5 Test programs of CD tests

制样干密度 ρ_d (g·cm ⁻³)	压实度 /%	制样孔隙比 e_0	围压 /kPa
1.90	96.0	0.379	50, 100, 200, 400
1.85	93.4	0.416	50, 100, 200, 400
1.80	90.9	0.456	50, 100, 200, 400
1.75	88.4	0.497	50, 100, 200, 400

试样采用分层击实法制备, 并采用抽气法进行饱和, 确保每个试样试验前的孔隙水压力系数 B 值大于 0.95。剪切采用应变控制, 速率为 0.04 mm/min, 试样轴向应变累积超过 15%。当应力-应变曲线有峰值时, 取峰值点为破坏点, 峰值点所对应的主应力差为该样

的破坏强度, 反之则取轴向应变的 15%所对应的点为破坏点, 对应的主应力差为破坏强度。

以试验最大压实度 96.0%和最小压实度 88.4%的试验结果为例, 应力 - 应变 - 体变曲线分别如图 4, 5 所示。

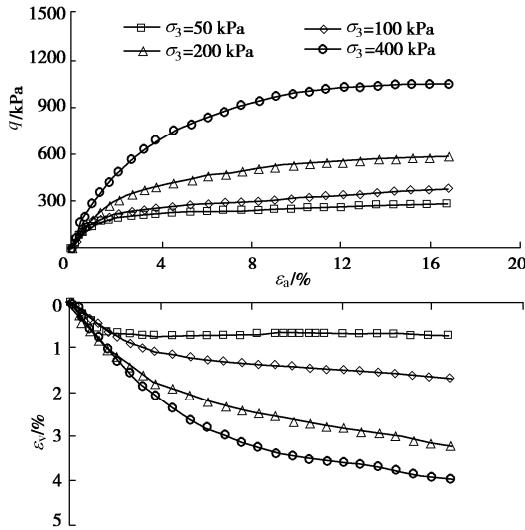


图 4 三轴应力 - 应变 - 体变曲线 (压实度 96.0%)

Fig. 4 Stress-strain-volumetric strain curves of CD tests (degree of compaction 96.0%)

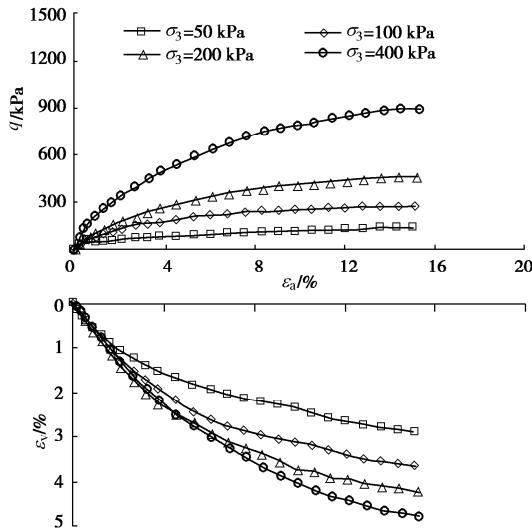


图 5 三轴应力 - 应变 - 体变曲线 (压实度 88.4%)

Fig. 5 Stress-strain-volumetric strain curves of CD tests (degree of compaction 88.4%)

一般而言, 在相同的围压下, 紧砂可能表现出应变软化和剪胀的特性^[4]; 而该白砂岩的特殊之处在于, 紧砂的应力应变特征都表现为应变硬化型, 并无软化发生; 体变特征呈现为持续剪缩型, 并无剪胀发生。

同时, 分析了不同压实度土样的抗剪强度指标, 如图 6 所示。对试样的黏聚力 c 进行分析: 随着干密度的增加, 其对应的黏聚力呈现出逐渐递增的变化趋势, 压实度为 88.4%的试样 $c=12$ kPa, 压实度为 96.0%

的试样 $c=41$ kPa。这说明, 该白砂岩存在黏聚力, 且黏聚力较为显著, 接近于普通黏土的水平。

与 c 值规律不同的是, 随着试样压实度的增加, 白砂岩的内摩擦角 φ 则基本不变, 约为 31.8° , 如图 6 所示。

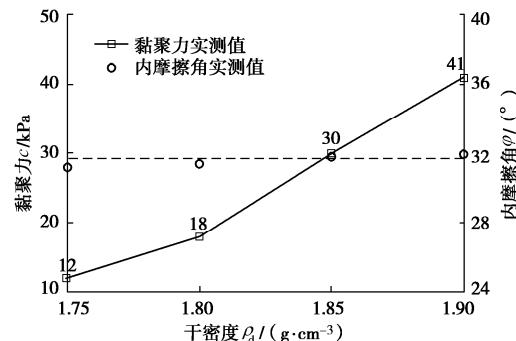


图 6 白砂岩的强度指标

Fig. 6 Strength indexes of white sandstone

1.5 临界状态

土体的临界状态被定义为一个极限状态: 在此状态下, 围压、剪切力、体积应变保持恒定而剪切应变无限发展。在三轴 CD 试验中, 轴向应变超过 15%时, 白砂岩基本开始出现偏应力和体变趋于定值的特征, 如图 4~5 所示, 即土体达到临界状态。

将临界状态时的孔隙比 e 和平均正应力 p 绘制在 $e - \ln p$ 平面, 如图 7 所示, 其临界状态线呈现出的规律与易碎散粒材料 (如珊瑚砂^[4]) 甚至是堆石料^[5]相同: 一是临界状态线在 $e - \ln p$ 平面上为直线, 且线性关系较好; 二是不同初始孔隙比的试样对应在 $e - \ln p$ 平面上的临界状态线并不是同一条, 而是一组平行线。

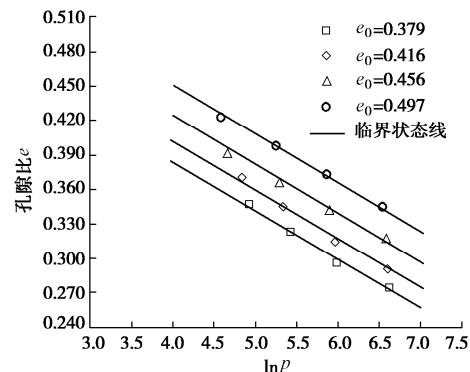


图 7 白砂岩在 $e - \ln p$ 的临界状态线

Fig. 7 Critical state line of white sandstone in $e - \ln p$ space

临界状态应力比 M_c 为临界状态时的剪应力 q 与正应力 p 之比, 一般而言对于黏土和砂土, M_c 为定值。但是, 白砂岩的 M_c 值则表现出显著的差异^[6], 如图 8 所示, 主要不同点表现在如下两方面:

(1) 初始孔隙比 e_0 相同时, M_c 随着围压的增大而减小。如初始密度 e_0 都为 0.379 时, M_c 从围压 50 kPa

时的 1.92 剧减为围压 400 kPa 时的 1.40, 如图 8 所示。

(2) 围压相同时, M_c 随着 e_0 的增大而减小。如围压都为 50 kPa 时, 初始孔隙比 $e_0=0.379$ 时, $M_c=1.92$, 初始孔隙比 $e_0=0.497$ 时, $M_c=1.47$ 。

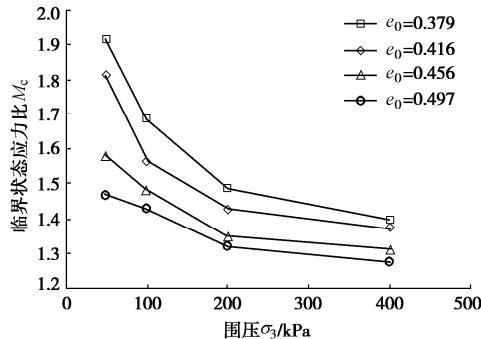


图 8 白砂岩的临界状态应力比

Fig. 8 Critical state stress ratios of white sandstone

2 结 论

本文通过系列试验研究了白砂岩的物理力学性质, 得出如下几点结论和建议:

(1) 白砂岩的主要矿物成分为石英, 质量占比为 66%, 黏土矿物为蒙脱石和高岭石, 质量占比之和为 17%。在液塑限特性方面接近于低液限黏土; 渗透系数数量级为 10^{-6} cm/s, 接近于淤泥土和黏土。

(2) 白砂岩在三轴排水剪切试验中都表现为应变硬化型, 体变无剪胀发生, 这与普通砂存在明显差异。黏聚力随着压实度的增加显著增加, 压实度为 96% 时, $c=41$ kPa, 接近于黏土。内摩擦角则几乎与压实度无关, 不同压实度下基本都为 31.8° 。

(3) 白砂岩的 $e - \ln p$ 平面内的临界状态线呈现出的规律与易碎散粒材料如珊瑚砂甚至堆石料相同; 且临界状态应力比并非为定值, 而是受到围压和初始密度的影响。这都与普通砂土的临界状态特性存在显著差异。

参考文献:

- [1] 朱 涣, 蔡正银, 黄英豪, 等. 湿干冻融耦合循环作用下膨胀土力学特性及损伤演化规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(6): 1233 – 1241. (ZHU Xun, CAI Zheng-yin,

HUANG Ying-hao, et al. Research on mechanical properties and damage evolution law of expansive soils under cyclic action of coupling wetting-drying and freeze-thaw[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(6): 1233 – 1241. (in Chinese))

- [2] 张 晨, 蔡正银, 黄英豪, 等. 输水渠道冻胀离心模拟试验[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(1): 109 – 117. (ZHANG Chen, CAI Zheng-yin, HUANG Ying-hao, et al. Centrifuge modelling of frost-heave of canals[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(1): 109 – 116. (in Chinese))
- [3] 住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GBT 50123—2019 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [4] 蔡正银, 侯贺营, 张晋勋, 等. 考虑颗粒破碎影响的珊瑚砂临界状态与本构模型研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(6): 989 – 995. (CAI Zheng-yin, HOU He-ying, ZHANG Jin-xun, et al. Critical state and constitutive model for coral sand considering particle breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(6): 989 – 995. (in Chinese))
- [5] 蔡正银, 李小梅, 韩 林, 等. 考虑级配和颗粒破碎影响的堆石料临界状态研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(8): 1357 – 1364. (CAI Zheng-yin, LI Xiao-mei, HAN Lin, et al. Critical state of rockfill materials considering particle gradation and breakage[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(8): 1357 – 1364. (in Chinese))
- [6] 陆 勇, 周国庆, 顾欢达. 常压至高压下砂土强度、变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(11): 2369 – 2376. (LU Yong, ZHOU Guo-qing, GU Huan-da. Experimental study of strength and deformation characteristics of sand under different pressures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2369 – 2376. (in Chinese))

(编校: 明经平)