【土木工程 / Architecture and Civil Engineering】

深圳粗粒花岗岩残积土原生各向异性特性研究

姬凤玲^{1,2}, 苏 栋^{1,2}, 许泽标¹, 庞小朝³

1) 深圳大学土木与交通工程学院, 广东深圳 518060; 2) 深圳大学滨海城市韧性基础设施教育部重点实验室, 广东深圳 518060; 3) 铁科院(深圳)研究设计院有限公司, 广东深圳 518050

摘 要: 为研究深圳地区粗粒花岗岩残积土的原生各向异性特性, 利用全自动三轴仪和渗透仪, 对不同取样方向的原状样进行室内土工试验. 研究发现, 原状样的渗透系数具有明显的各向异性特性, 0° 和 90° 方向取样的试样渗透系数接近, 但比 30° 和 60° 方向取样的试样渗透系数明显要大. 原状样的抗剪强度参数各向异性特性明显, 随着取样方向角度由 0° 、 30° 、 60° 和 90° 变化, 试样的有效内摩擦角逐渐增大, 但是 30° 和 60° 方向的有效内摩擦角差异较小; 随着取样方向角度的增加, 试样的有效黏聚力逐渐减小, 60° 和 90° 方向的有效黏聚力差异较小.

关键词: 岩土工程; 花岗岩残积土; 原状样; 三轴试验; 原生各向异性; 抗剪强度; 渗透系数

中图分类号: U495 **文献标志码:** A **doi:** 10.3724/SP.J.1249.2020.06583

The inherent anisotropy of coarse-grained granite residual soil in Shenzhen

Ji Fengling^{1, 2}, Su Dong^{1, 2}, Xu Zebiao¹, and Pang Xiaochao³

1) College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

2) Key Laboratory of Coastal Urban Resilient Infrastructures (MOE), Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

3) China Academy of Railway Sciences (Shenzhen) Research and Design Institute Co. Ltd., Shenzhen 518050, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: A series of experiments have been conducted to investigate the inherent anisotropy of Shenzhen coarse-grained granite residual soil by the automatic triaxial apparatus and permeameter. The results show that the permeability coefficient of undisturbed samples exhibits anisotropic features. The permeability coefficients are close for the sampling directions of 0° and 90° , but they are much greater than those for the sampling directions of 30° and 60° . Significant anisotropy has been observed in the shear strength parameters of undisturbed samples. With the sampling direction angles evolving from 0° , 30° , 60° to 90° , the effective internal friction angle of the sample increases gradually, but the difference between the samples of angles of 30° and 60° is small. In addition, with the increase of sampling direction angle, the effective cohesion of the sample decreases gradually, the difference between the effective cohesions of the samples of 60° and 90° can be negligible.

Key words: geotechnical engineering; granite residual soil; undisturbed specimen; triaxial test; inherent anisotropy; shear strength; coefficient of permeability

Received: 2019-11-09; **Accepted:** 2020-05-07

Foundation: National Key R & D Program of China (2018YFB2100901); National Natural Science Foundation of China (51938008, 51878416)

Corresponding author: Professor SU Dong. E-mail: sudong@szu.edu.cn

Citation: Ji Fengling, SU Dong, XU Zebiao, et al. The inherent anisotropy of coarse-grained granite residual soil in Shenzhen [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(6): 583-588. (in Chinese)

花岗岩残积土是花岗岩经过风化作用后残留在原地的碎屑物,广泛分布于中国的东南沿海地区,其成因及组成结构不同于沉积作用形成的土体,因此具有不同于一般土体的特殊工程性质,如高液限及高孔隙比时仍具有较高强度^[1]、遇水易崩解软化^[2-3]和垂直分层明显^[4-5]等.岩土工程界已将花岗岩残积土确认为是一种区域性特殊土^[4,6-7].虽然目前对花岗岩残积土的成因、物质组成和遇水软化与崩解等特性的研究较多,但对其各向异性特性的研究较少.

一般将土体各向异性分为原生各向异性(即固有各向异性)和次生各向异性(即应力诱发各向异性)^[8-9].原生各向异性与土体在漫长地质历史时期的形成过程有关,而次生各向异性与土体在工程实践中的复杂加载条件有关^[8-9].原生各向异性是次生各向异性产生的物质基础,是土体各向异性研究的重点.沉积作用形成的土体,其原生各向异性主要是由于土颗粒在沉积过程中,颗粒定向排列引起^[10-11].与一般沉积作用形成的土体不同,花岗岩残积土的原生各向异性取决于两个方面,一方面是土颗粒在上覆地层重力作用下的定向排列,另一方面是花岗岩残积土中的原生裂隙和次生裂隙.花岗岩中岩脉矿物抗风化能力的不同形成了残积土中的原生裂隙^[12],次生裂隙主要是湿热、多雨条件下,花岗岩风化产物中易溶盐形成的胶结物随地下水溶解、流失形成的淋溶微孔隙^[13].

深圳作为大湾区起引领作用的城市,涉及花岗岩残积土的工程问题日益增多.对于受力状态复杂的隧道及地下结构工程、高边坡和深基坑等工程项目^[14-15],花岗岩残积土各向异性的影响需要引起足够的重视.本研究基于室内试验,对深圳地区花岗岩残积土的原生各向异性进行分析,以为工程建设提供参考.

1 试验材料

本研究所用花岗岩残积土原状样取自深圳市南山区白石洲深圳湾超级总部基地中南部的某建筑场地.根据勘察资料,场地内分布的地层自上而下分别为:人工填土、第4系全新统海陆交互相沉积层、第4系上更新统冲洪积沉积层、第4系上更新统沼泽相沉积层和白垩系燕山4期粗粒花岗岩风化壳.作为风化壳的土体部分,花岗岩残积土层顶埋深9.60~18.50 m.本研究所取原状样为深度12 m

处的褐黄和褐红杂灰白色的花岗岩残积土.为了减少对土样的扰动,采用壁厚1 mm、外径100 mm、长度197 mm的薄壁取土器,并采用三重管取样.在实验室将原状土样和取土器一起保存于阴凉处,控制恒定温度和恒定湿度.为了研究花岗岩残积土的各向异性特性,对不同取样方向(与沉积方向分别呈0°、30°、60°和90°),对花岗岩残积土原状样进行取样并切削制备试样.其中,0°表示土样自然沉积方向(即重力方向),30°、60°和90°表示取样方向与土样自然沉积方向的夹角.

2 粒径级配分析

土样中固体颗粒的大小、形状和矿物成分等是决定土的工程性质的主要因素.按照《土工试验方法标准》^[16],采用筛析法和密度计法两种试验综合测定花岗岩残积土的粒径级配.组成试样的不同粒组含量如表1.经计算,不均匀系数 $C_u = 200$,曲率系数 $C_c = 0.025$,颗粒级配不连续.从表1可见,粗砂组($0.500 \text{ mm} < d \leq 2.000 \text{ mm}$)和黏粒组($d \leq 0.005 \text{ mm}$)的颗粒含量较高,中、细砂组的含量较低.其中, d 为粒径.本试验中的花岗岩残积土粒度分布具有“中间粒组少,两头粒组多”的特征.

表1 不同粒组颗粒质量分数

Table 1 Percentage content of different granule groups

粒组/mm	$w(\text{颗粒})/\%$
5.000 ~ 2.000	14
2.000 ~ 0.500	19
0.500 ~ 0.250	6
0.250 ~ 0.075	7
0.075 ~ 0.005	21
< 0.005	33

花岗岩残积土出现这种粒度分布特征的原因和原岩矿物成分及风化作用密切相关.粗粒花岗岩的主要矿物成分为石英、钾长石和斜长石.在物理风化作用下,石英、钾长石和斜长石崩解为碎散的砂粒,其中石英为粒径大于0.500 mm的粗砂,钾长石和斜长石形成粒径0.500~0.250 mm和0.250~0.075 mm的中砂和细砂.在湿热条件下,化学风化作用强烈,粗粒花岗岩残积土中抗化学风化能力比较弱的钾长石和斜长石继续部分风化成黏土矿物和游离氧化物,黏土矿物构成了粉粒和黏粒,游离氧

化物起胶结作用. 由于残积土是原岩风化后的产物经过淋溶作用后残留在原地的而成, 没有经过远距离搬运作用, 因此残积土中粗砂颗粒磨圆度较差, 土中分布有淋溶作用形成的微孔隙.

3 基本物理性质参数的各向异性

按照《土工试验方法标准》^[16], 对花岗岩残积土原状样的含水率、天然密度、干密度和渗透系数等物理性质参数进行测定, 其中, 渗透系数采用变水头渗透试验测定. 结果表明, 0° 取样方向的含水率、天然密度、干密度和渗透系数分别为 26.80%、 1.77 g/cm^3 、 1.40 g/cm^3 和 $1.77 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. 以 0° 取样方向的参数为基准, 计算出其他取样方向土样基本物理性质参数的变化率如表 2. 从表 2 可见, 取样方向不同, 花岗岩残积土原状样的含水率、天然密度和干密度略有不同, 由于这些物理性质参数只与土体的三相体积和质量相关, 而与细观结构无关, 理论上是各向同性的. 因此, 这 3 个物理量随取样方向的略微变化是由土样的空间非均质性所导致的.

表 2 不同取样方向原状样物理性质参数的变化率

Table 2 Change rate of physical parameters of undisturbed specimens sampled along different directions

取样方向/ $^\circ$	含水率/%	天然密度/%	干密度/%	渗透系数/%
30	-2.61	2.42	3.00	-50.17
60	1.87	4.22	3.78	-31.64
90	0.37	-1.97	-2.00	5.65

图 1 为渗透系数随取样方向变化的极坐标图. 从图 1 可见, 渗透系数在 0° 和 90° 取样方向较为接近, 而 30° 和 60° 取样方向比这两个方向的渗透系数明显更小. ADAMS 等^[17] 研究波士顿蓝黏土渗透各向异性时, 发现渗透各向异性主要受土体孔隙和颗粒定向排列影响. 由于花岗岩残积土的级配不良, 土样中存在较多的淋溶微孔隙, 而且土体由于地表水的竖向下渗以及地下水的水平渗流导致了 0° 和 90° 朝向的淋溶微孔隙较多, 因而这两个方向的渗透系数较大. 沿 30° 和 60° 方向取样并进行渗透试验, 由于渗透方向与微孔隙的主要方向斜交, 因此沿这两个方向渗径曲折程度较高, 相应的渗透系数较小. 综上所述, 影响花岗岩残积土渗透系数各向异性的主要因素是淋溶微孔隙的发育.

图 1 渗透系数随取样方向的变化

Fig. 1 Permeability coefficient changing with sampling direction

4 抗剪强度参数的各向异性

花岗岩残积土原状样抗剪强度参数采用常规三轴固结不排水剪切试验测定. 采用 0° 、 30° 、 60° 和 90° 分别取土切削制备试样, 试样均为直径 39.1 mm、高度 80.0 mm. 试验采用 GDS 全自动三轴仪, 控制试样不排水条件下孔隙水压力增量与围压增量的比值 $B \geq 0.97$, 应变加载速率为 0.025 mm/min . 每个方向的试样分别进行 100、200 和 400 kPa 下的固结不排水剪切试验. 试验过程中若不发生应变变化, 则试验进行到轴向应变为 20% 时终止. 试验结果表明, 不同取样方向和围压下的试样破坏时, 均具有明显的剪切破坏面, 剪切破坏形态如图 2.

(a) 试验前的原状样

(b) 剪切破坏后的试样

图 2 试样剪切破坏形态

Fig. 2 (Color online) Shear failure mode of the sample

采用如图 3 和图 4 所示的极坐标来反映土样抗剪强度参数随取样方向的变化规律, 同时以 0° 取样方向的参数为基准, 计算出其他取样方向土样抗剪强度参数的变化率(表 3). 由表 3 可见, 取样方向

不同, 花岗岩残积土原状样抗剪强度参数有很明显的差异, 表明土样的抗剪强度参数各向异性特性明显. 随着取样方向角度的增加, 试样的有效内摩擦角逐渐增大, 但是 30° 和 60° 方向的有效内摩擦角差异较小. 由图 4 可见, 随着取样方向角度的增加, 试样的有效黏聚力逐渐减小, 但 60° 和 90° 方向的有效黏聚力差异较小.

图 3 内摩擦角随取样方向的变化
Fig. 3 The internal friction angle changing with sampling direction

图 4 黏聚力随取样方向的变化
Fig. 4 The cohesion changing with sampling direction

表 3 不同取样方向的原状样抗剪强度参数值及变化率
Table 3 Value and change rate of shear strength parameters of undisturbed specimens sampled along different directions

取样方向/ $(^\circ)$	内摩擦角/ $(^\circ)$	变化率/%	黏聚力/kPa	变化率/%
0	13.90	0	22.76	0
30	17.30	24.46	12.00	-47.28
60	18.20	30.94	5.95	-73.86
90	22.73	63.53	5.25	-76.93

产生抗剪强度参数各向异性的原因与花岗岩残积土原状样的微观结构密切相关. 李广信^[18]研究表明, 除了云母等矿物之外, 大多数非黏土矿物颗粒呈粒状, 但是颗粒的长轴与短轴之比大于 1. 花岗

岩残积土中的石英颗粒磨圆度差, 其长轴与短轴之比应更大, 颗粒呈不规则长条状. 轴长比为 1.6 的均匀细砂, 在重力场中颗粒长轴与水平方向夹角 θ 的分布频率如图 5^[18]. 由图 5 可见, 在重力场中土体中粗颗粒在排列时, 颗粒长轴与水平方向夹角主要以 0° 和 30° 为主. 结合表 1, 可初步判断粗粒花岗岩残积土中的细砂组 ($2.000 \text{ mm} < d \leq 5.000 \text{ mm}$) 和粗砂组 ($0.500 \text{ mm} < d \leq 2.000 \text{ mm}$) 颗粒构成了骨架结构, 骨架中的颗粒长轴与水平方向夹角较小, 骨架中的孔隙由粒径比较小的中砂、细砂及团粒状结构或片状结构的黏土矿物填充, 骨架颗粒之间的接触点由游离氧化物和部分黏土矿物胶结在一起.

图 5 粗粒土颗粒长轴在空间方向角的分布频率^[18]
Fig. 5 Distribution frequency of the orientation angle for the long axis of coarse-grained particles^[18]

本研究试样取自 12 m 深度处, 其竖向有效自重应力平均值可达到 158 kPa 左右, 数值较大. 在该有效自重应力作用下, 花岗岩残积土的骨架颗粒长轴与水平方向呈小角度 ($0^\circ \sim 30^\circ$), 近于水平方向排列. 不同取样方向, 土骨架颗粒与试样剪切破坏面之间的位置关系如图 6. 其中, α_f 为剪切破坏面与最大主应力作用面的夹角, $\beta_1 \sim \beta_4$ 分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 土骨架颗粒长轴与剪切破坏面之间的夹角, 数值如表 4. 花岗岩残积土原状样中的原生裂隙及淋溶微孔隙也会对试样剪切破坏面的形成及扩展产生影响, 但是其影响程度及机理尚需后续微观方面的研究, 由于条件所限, 表 4 中 α_f 和 β_i 值的计算暂未考虑上述影响.

土体的抗剪强度包括摩擦强度与黏聚强度两部分. 其中, 摩擦强度由滑动摩擦和咬合摩擦组成. 在竖向偏应力作用下, 土骨架颗粒在剪切过程中有向平行于剪切破坏面方向重新排列的趋势, 从表 3 可见, 随着取样方向由 0° 、 30° 、 60° 和 90° 方向变

图6 土骨架颗粒与试样剪切破坏面之间的位置关系示意图

Fig. 6 The position relationship between soil skeleton particles and the shear failure plane

化, 土骨架颗粒重新排列时的转动角度 β 逐渐增大, 消耗的能量也逐渐增多, 这导致土样的咬合摩擦增大. 当土颗粒重新排列到相对稳定位置后, 颗粒沿着剪切破坏面产生滑动摩擦, 由于不同取样方向对固体颗粒组成影响不大, 因此, 取样方向对滑动摩擦影响差别不大. 综合以上分析, 可以认为对于本次试验所采用的花岗岩残积土原状样, 土样内摩擦角与取样方向之间的变化规律主要取决于在竖向偏应力作用下土颗粒重新排列程度的影响.

表4 原状样土骨架颗粒与试样剪切破坏面之间的夹角

Table 4 The angle between soil skeleton particles and the shear failure plane of undisturbed samples ($^{\circ}$)

θ	α_f	β_i
0	51.95	51.95
30	53.65	83.65
60	54.10	114.10
90	56.14	146.14

土体的黏聚力主要来源于颗粒间内部吸引力及颗粒间胶结物的胶结作用. 测试分析结果表明, 颗粒间吸引力引起的黏聚力较小, 化学胶结力是黏聚力的主要部分^[18]. 花岗岩残积土的化学胶结力主要来自游离氧化物与部分黏土矿物产生的胶结作用. 由于土样孔隙比较大, 因此土样的胶结类型以接触式胶结为主, 即主要在固体骨架颗粒的相互接触处有胶结联结. 由于胶结物容易在垂直于最大主压应力方向上生长, 因此在竖向自重应力作用下, 残积土原状样中的胶结物主要沿着近于水平方向形成. 因

此, 取样方向为 0° 时, 单位面积原状样中胶结物面积最大, 黏聚力值最大; 取样方向为 90° 时, 单位面积原状样中胶结物面积最小, 黏聚力值最小. 取样方向为 30° 和 60° 时, 单位面积原状样中胶结物面积和黏聚力值均介于 0° 和 90° 取样方向之间.

5 结 论

通过对深圳某工地 12 m 深度处的花岗岩残积土不同取样方向的原状样进行室内土工试验, 研究了其物理和力学参数随取样方向的变化规律, 可知:

1) 试验所采用原状样为粗粒花岗岩残积土, 粒度组成中粗砂组 ($0.500 \text{ mm} < d \leq 2.000 \text{ mm}$) 和黏粒组 ($d \leq 0.005 \text{ mm}$) 的颗粒含量较高, 中、细砂组的含量较低, 粒度分布具有“中间粒组少, 两头粒组多”的特征.

2) 沿不同方向取样的原状样, 其含水率、天然密度和干密度基本相近, 而渗透系数具有明显的各向异性特性, 0° 和 90° 方向取样的试样渗透系数接近, 但比 30° 和 60° 方向取样的试样渗透系数大.

3) 粗粒花岗岩残积土原状样的抗剪强度参数各向异性特性明显. 随着取样方向角度由 0° 、 30° 、 60° 和 90° 变化, 试样的有效内摩擦角逐渐增大, 但是 30° 和 60° 方向的有效内摩擦角差异较小. 随着取样方向角度的增加, 试样的有效黏聚力逐渐减小, 60° 和 90° 方向的有效黏聚力差异较小.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2018YFB2100901); 国家自然科学基金资助项目 (51938008, 51878416)

作者简介: 姬凤玲 (1971—), 深圳大学副教授. 研究方向: 环境岩土工程. E-mail: 384412510@qq.com

引 文: 姬凤玲, 苏 栋, 许泽标, 等. 深圳粗粒花岗岩残积土原生各向异性特性研究[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(6): 583-588.

参考文献 / References:

- [1] 尹 松, 孔令伟, 张先伟, 等. 基于自钻式旁压仪的残积土原位力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 688-695.
YIN Song, KONG Lingwei, ZHANG Xianwei, et al. Experimental study on the in-situ properties of residual soil by self-boring pressuremeter [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 688-695. (in Chinese)
- [2] 黎澄生, 安 然, 舒荣军, 等. 花岗岩残积土初期崩解规律与数学形态学方法近似模拟[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(4): 845-854.

- LI Chengsheng, AN Ran, SHU Rongjun, et al. Initial-disintegration analysis of granite residual soil and approximate simulation of mathematical morphology [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(4): 845-854. (in Chinese)
- [3] 张 抒, 唐辉明. 非饱和和花岗岩残积土崩解机制试验研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1668-1674.
ZHANG Shu, TANG Huiming. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1668-1674. (in Chinese)
- [4] 张 勇, 姚 赫, 李仁华, 等. 花岗岩残积土垂直层次抗剪强度变异性研究[J]. 人民长江, 2016, 47(23): 91-96.
ZHANG Yong, YAO He, LI Renhua, et al. Study on spatial variability of shear strength in different vertical layers of granite residual soil [J]. Yangtze River, 2016, 47(23): 91-96. (in Chinese)
- [5] VIANA D F A, CARVALHO J, FERREIRA C, et al. Characterization of a profile of residual soil from granite combining geological, geophysical and mechanical testing techniques [J]. Geotechnical & Geological Engineering, 2006, 24(5): 1307-1348.
- [6] 尹 松, 孔令伟, 杨爱武, 等. 循环振动作用下残积土动力变形特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(11): 224-231.
YIN Song, KONG Lingwei, YANG Aiwu, et al. Tests for dynamic deformation characteristics of residual soil under cyclic loading [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(11): 224-231. (in Chinese)
- [7] 温 勇, 杨光华, 汤连生, 等. 广州地区花岗岩残积土力学特性试验及参数研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(增刊2): 209-215.
WEN Yong, YANG Guanghua, TANG Liansheng, et al. Tests and parameters study of mechanical properties of granite residual soil in Guangzhou area [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(Suppl. 2): 209-215. (in Chinese)
- [8] ARTHUR J R F, MENZIES B K. Inherent anisotropy in a sand [J]. Geotechnique, 1972, 22(1): 115-128.
- [9] 张坤勇, 殷宗泽, 梅国雄. 土体各向异性研究进展[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1503-1509.
ZHANG Kunyong, YIN Zongze, MEI Guoxiong. Development of soil's anisotropy study [J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(9): 1503-1509. (in Chinese)
- [10] GUO P J. Modified direct shear test for anisotropic strength of sand [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, 134(9): 1311-1318.
- [11] PIETRUSZCZAK S, MROZ Z. On failure criteria for anisotropic cohesive-frictional materials [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2001, 25(5): 509-524.
- [12] 吴能森, 赵 尘, 侯伟生. 花岗岩残积土的成因、分布及工程特性研究[J]. 平顶山工学院学报, 2004, 13(4): 1-4.
WU Nengsen, ZHAO Chen, HOU Weisheng. Research on the cause of formation, distribution and engineering characteristics of the granite residual soil [J]. Journal of Pingdingshan Institute of Technology, 2004, 13(4): 1-4. (in Chinese)
- [13] 吴能森. 结构性花岗岩残积土的特性及工程问题研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2005.
WU Nengsen. Study on the characteristics and engineering problems of structural granite residual soil [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2005. (in Chinese)
- [14] 齐红升, 肖成志, 王子寒, 等. 深基坑智能联网监测与预警系统的研究及开发[J]. 深圳大学学报理工版, 2020, 37(1): 97-132.
QI Hongsheng, XIAO Chengzhi, WANG Zihan, et al. Research and development of intelligent network monitoring and warning system for deep foundation pit [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2020, 37(1): 97-132. (in Chinese)
- [15] 李芒原, 张传浩, 杨二东, 等. 基于 BIM + 3D 激光扫描技术的复杂深基坑监测技术研究及应用 [J]. 建筑结构, 2019, 49(增刊1): 751-755.
LI Mangyuan, ZHANG Chuanhao, YANG Erdong, et al. Application of complex deep foundation pit safety supervision integrated platform based on BIM + 3D laser scanning technology [J]. Building Structure, 2019, 49(Suppl. 1): 751-755. (in Chinese)
- [16] GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S].
GB/T 50123—2019 Standard for soil test method [S]. (in Chinese)
- [17] ADAMS A L, NORDQUIST M T J, GERMAINE J T, et al. Permeability anisotropy and resistivity anisotropy of mechanically compressed mud rocks [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2016, 53(9): 1474-1482.
- [18] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
LI Guangxin. Advanced soil mechanics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004. (in Chinese)

【中文责编: 坪 梓; 英文责编: 之 聿】