

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0021-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.005

钙质结核含量对黄土强度及变形特性的影响

高明明, 祝艳波, 周静静, 苗帅升

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过室内直剪试验研究不同钙质结核含量对试样的强度、变形等特性的影响。研究发现, 钙质结核对试样的抗剪强度指标影响很大, 随着钙质结核含量增多, 试样的粘聚力降低, 内摩擦角增加。在高正应力下试样中的钙质结核的骨架作用能够充分发挥, 含量越高强度越大。低正应力下, 含钙质结核试样的剪切变形曲线是应变软化型, 而不含钙质结核试样的应力-应变曲线为应变硬化型。随着钙质结核含量、正应力的增加, 在理想塑性阶段曲线明显不同。

关键词: 直剪; 强度; 粘聚力; 内摩擦角; 变形特性

中图分类号: P694

文献标识码: A

Effect of Calcium Tuberculosis Content on Strength and Deformation Characteristics of Loess

GAO Mingming, ZHU Yanbo, ZHOU Jingjing, MIAO Shuaisheng

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Shaanxi Xi'an 710054, China)

Abstract: Through the indoor direct shear test, the influence of different calcareous tuberculosis content on the strength and deformation characteristics of the sample was tested, which provides theoretical guidance for engineering construction. It was found through experiments that calcareous tuberculosis has a great influence on the shear strength index of the sample. As the calcium tuberculosis content increases, the cohesive force of the sample decreases and the internal friction angle increases. The skeleton effect of calcareous nodules in the sample under high normal stress can be fully exerted, and the higher the content is, the greater the strength will be. Under low normal stress, the calcium-containing tuberculosis samples are strain-softened, while the calcium-free tuberculosis samples are strain-hardened. With the increase of calcareous tuberculosis content and normal stress, the curves in the ideal plasticity stage are significantly different.

Key words: direct shear; strength; cohesive force; internal friction angle; deformation characteristics

黄土在我国分布广泛, 黄土地层中的钙质结核对农业、经济和工程建设等产生了较大影响, 引起了学者们的重视。研究者首先对钙质结核形成原因进行了研究, 施国军等^[1]认为钙质结核土是成土作用和成岩作用共同参与的结果; 张民等^[2]总结了几种典型的钙质结核的化学成分及其元素分布特征; 庞谦等^[3]通过对结核中 Al、Ti、Ca、K、Na 元素分析来研究钙质结核的成因; 梁斌等^[4]通过分析钙质结核的碳、氧同位素组成来研究钙质结核形成时的

环境。随着农业的发展, 学者们研究方向大致集中在从农业技术上改良利用结核土^[5-6]。为了进一步研究钙质结核的性质, 许多学者开展了模型试验^[7-8]。近几年来, 在西部大开发的战略影响下, 学者们对钙质结核土工程性质方面的研究也稍有涉猎^[9-11]。从过去学者们的工作来看, 对含钙质结核黄土的强度及变形特性方面研究成果较少, 所以本文开展了钙质结核土的强度及变形特性的研究, 期望为工程建设提供理论帮助。

收稿日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41877247); 国家自然科学基金重大项目课题(41790443)

作者简介: 高明明(1993-), 男, 安徽宿州人, 硕士研究生, 从事黄土边坡稳定性研究。

1 试样制备

本次试验土样为取自富县含结核的黄土，颗粒成分如图 1。为制备重塑环刀试样，首先需要将黄土与钙质结核分离开，这个过程十分重要，因为钙质结核的强度和软岩差不多，碾碎时很容易就会分崩离析，对实验结果影响很大。通过晒干、碾碎、筛分来分离结核，在制取环刀试样时考虑到尺寸效应，因为环刀高 20 mm，所以颗粒直径应小于 2 mm，另一方面，如果钙质结核直径过小，其性质发生很大改变，所以将分离得到的钙质结核碾碎、过筛，留下直径在 1 ~ 2 mm 之间的钙质结核，黄土碾碎之后过 0.25 mm 的筛，将钙质结核和黄土分别按照试验方案均匀加水，用保鲜膜密封 24 h 待土样中水分充分运移，制备环刀样。

2 试验描述

本次试验目的是通过人工制取钙质结核含量不同的试样来进行直剪试验，通过试验来分析有无钙质结核以及钙质结核含量对试样的强度及变形特性的影响，以期为工程建设提供理论指导。试验详细方案如表 1。

表 1 试验方案
Tab.1 Test plan

干密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	含水率 /%	钙质结核质量百分数 /%	正应力 /kPa
1.7	18	0、10、20、30	100、200、300、400

试验过程中采用的仪器是南京土壤仪器厂有限公司生产的 ZJ 型应变控制式直剪仪(四联剪)。

3 试验结果与分析

3.1 钙质结核含量对抗剪强度指标影响

通过钙质结核试样进行直接剪切试验，得到在不同正应力下试样的抗剪强度，通过线性拟合得到其抗剪强度指标 c 、 φ ，拟合过程中 R^2 均大于 0.98，拟合效果准确，拟合结果如图 2。

为了更加直观地看出钙质结核的存在对试样抗剪强度指标的影响，现将拟合得到的结果列于表 2 中。

从图 2、表 2 中可以看出，试样抗剪强度随正应力的增大而表现出线性增加趋势，正应力在 100 ~ 400 kPa 时，钙质结核试样强度基本符合摩尔-库伦破坏准则；钙质结核含量的增加将使得摩尔-库伦强度包线发生偏转，随钙质结核质量百分数从 0 增加到 30% 时，摩尔-库伦强度包络线斜率逐渐增加，在 Y 轴上的截距减小；上述图中反映出的摩尔-库伦强度包络线的规律性变化在宏观上的表现为随着钙质结核含量的增加，试样的内摩擦角 φ 变大，而粘聚力 c 是减小的。这与曹志翔^[12]对粗粒土的研究结果一致。

造成上述规律性变化的原因是钙质结核颗粒大、表面粗糙、多棱角，在剪切过程中，随着钙质结核含量的增加，在剪切面上的钙质结核就越多，剪切过程中由于钙质结核颗粒形状十分复杂，使得钙质结核之间相对滑移、换位较为困难，在宏观上表现

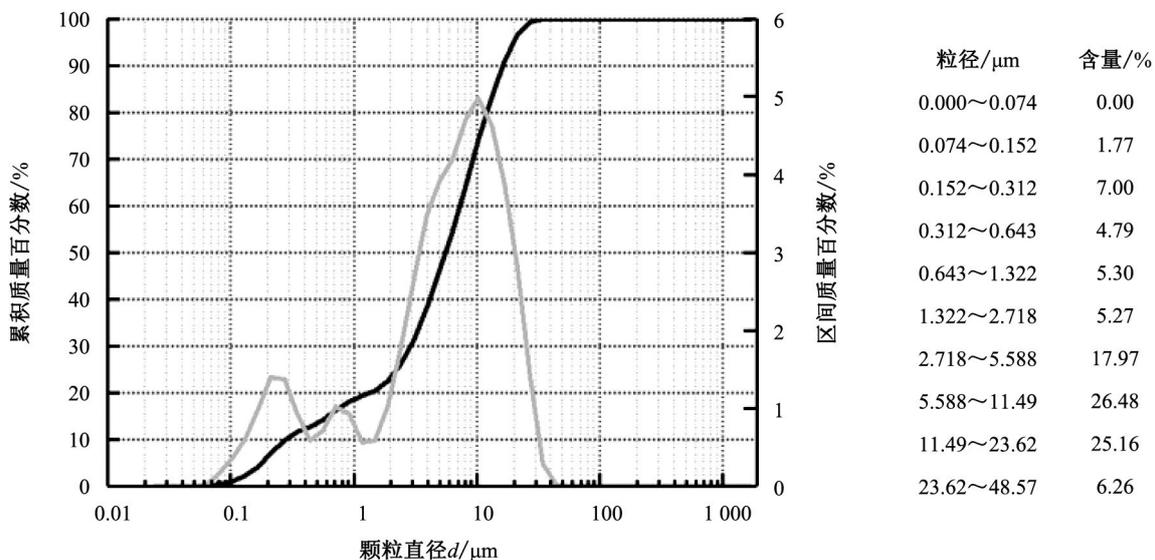


图 1 颗粒分试验结果

Fig.1 Test results of the particle distribution

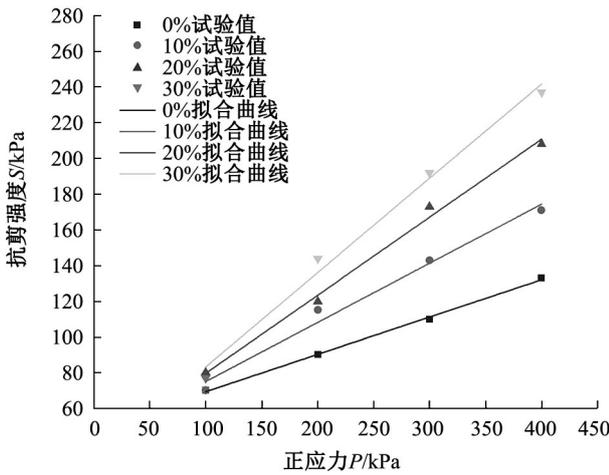


图2 不同含量的钙质结核土摩尔强度包络线
Fig.2 Molar strength envelope of different content of calcareous concretion

表2 不同试样的抗剪强度指标
Tab.2 Shear strength indicators of different samples

钙质结核含量 /%	C/kPa	$\varphi/^\circ$	R^2
0	50	12	0.99
10	42	18.3	0.98
20	36	23.6	0.99
30	30	28	0.98

为较高的内摩擦角。同时，由于钙质结核的存在，破坏了土颗粒之间的连接，同时钙质结核处容易应力集中，使土颗粒之间的粘聚力降低。

在试验的基础上，为了给工程建设提供理论支持，给出抗剪强度指标与钙质结核含量之间的经验公式，结果如图3所示，粘聚力与钙质结核含量成反比，内摩擦角与钙质结核含量近似线性关系。

3.2 钙质结核含量对强度特征的影响

为了研究钙质结核含量对黄土抗剪强度的影响规律，将钙质结核含量不同的试样的抗剪强度作图，结果如图4。在低正应力下(100 kPa)，不含钙质结核的试样与含钙质结核的试样强度较为接近，差异不大，随着正应力的逐渐增加，含有钙质结核的试样抗剪强度增加要快于不含钙质结核的试样，且钙质结核含量越多增加速度越快，即在大的正应力条件下，钙质结核含量越多，试样的抗剪强度越大。

判断荷载作用下试样剪切破坏时的强度准则有摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)、格里菲斯(Griffith)强度准则等^[13]。本次试验对数据的分析采用摩尔-库仑(Mohr-Coulomb)强度准则，该准则能够很好地适

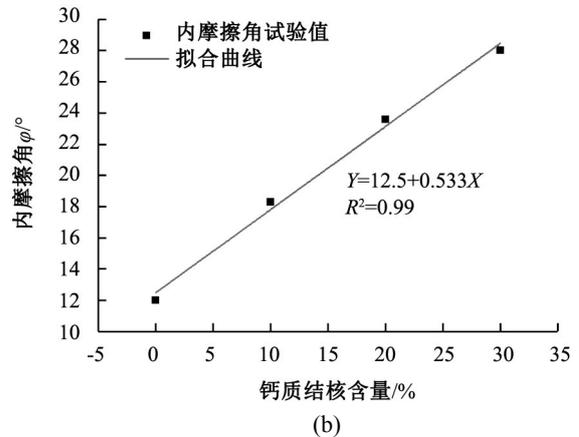
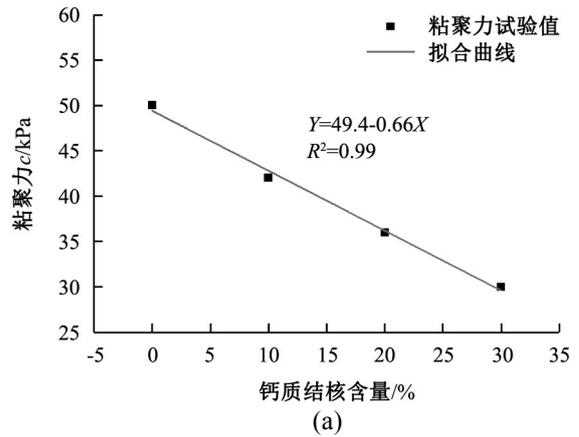


图3 抗剪强度指标与钙质结核含量关系

Fig.3 Relationship between shear strength index and calcareous tuberculosis

用于土体的剪切破坏判断，其表达式如下：

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

式中 τ 代表抗剪强度 (kPa)； c 代表粘聚力 (kPa)； σ 代表正应力； φ 代表内摩擦角 (单位 $^\circ$ 或弧度)。

由上式摩尔-库仑强度准则可以知道，土体的抗剪强度主要由两个方面控制，一部分是土体之间的粘聚力；另一部分是土体在剪切过程中剪切面两侧土体相对滑移产生的摩擦力。由第一部分可知，钙质结核的存在会使试样的粘聚力 c 值降低，内摩擦角 φ 增大，且随着钙质结核含量的增加这种趋势更明显。随着正应力的增加，由内摩擦角提供的摩擦力 $\sigma \tan \varphi$ 是在变大的，当正应力 σ 较小时，这部分增量与粘聚力降低值是大致相等的，这就导致在低的正应力下，不含钙质结核的试样的强度与含钙质结核的试样的强度接近；但是随着正应力的增加， $\sigma \tan \varphi$ 这部分提供的强度被放大，表现为随着正应力的增加，钙质结核含量越高，试样的强度越大，钙质结核的骨架作用更明显等情况。

3.3 钙质结核含量对试样变形特性的影响

根据试验数据, 绘制钙质结核质量百分数为 0%、10%、20%、30% 的试样在 100、200、300、400 kPa 正应力作用下的剪切位移与剪应力之间关系曲线, 如图 5 所示。

直剪试验剪切位移 - 剪应力曲线, 在一定程度上反映了试样剪切变形特性。从不同钙质结核含量

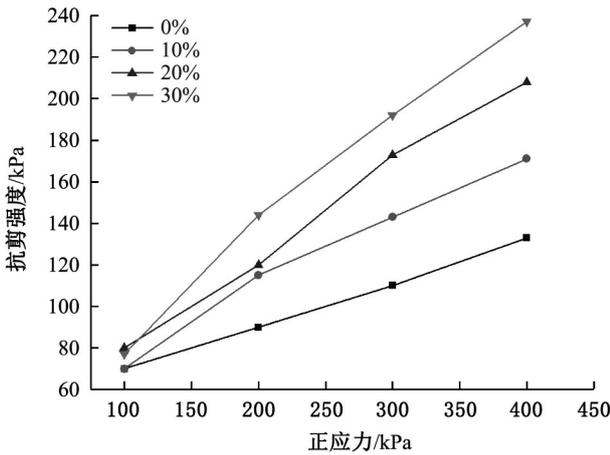
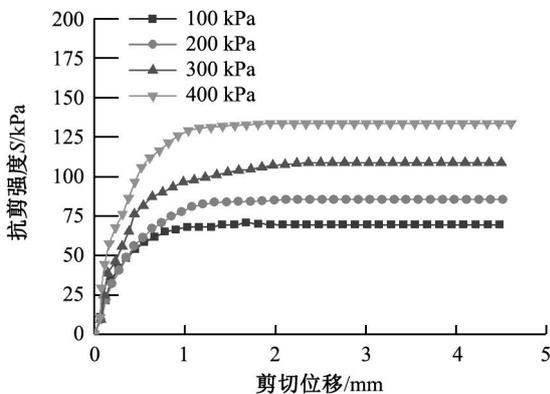


图 4 钙质结核含量不同的试样抗剪强度

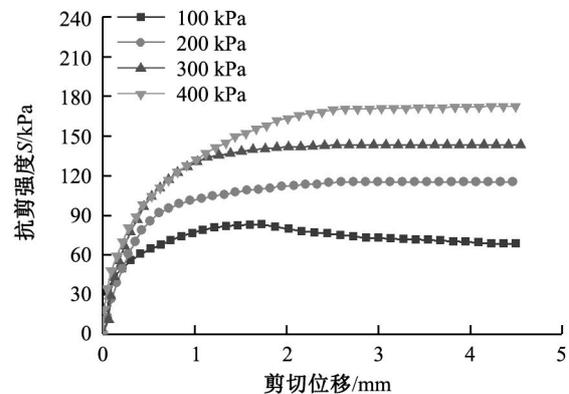
Fig.4 Shear strength of samples with different calcareous tuberculosis contents

情况下钙质结核土直接剪切试验数据分析可知, 钙质结核土的应力 - 应变曲线呈现出明显的非线性, 其形态又可分为两类, 应变硬化型和应变软化型。通常情况下, 在高的正应力下钙质结核土应力 - 应变关系曲线为应变硬化型, 没有峰值, 强度随着剪切位移的增大而增大。在低正应力下, 钙质结核土的剪切位移 - 剪应力曲线会出现应变软化现象, 有明显的峰值强度, 在峰值之后, 强度随着应变的增大而减小, 且随着钙质结核含量的增加, 这种现象越明显, 如图 5 所示。造成这种现象的原因是钙质结核的存在。虽然钙质结核的存在可以起到骨架作用, 但是此时正应力偏小, 且钙质结核的存在会引起应力集中, 容易剪切破坏, 出现峰值。

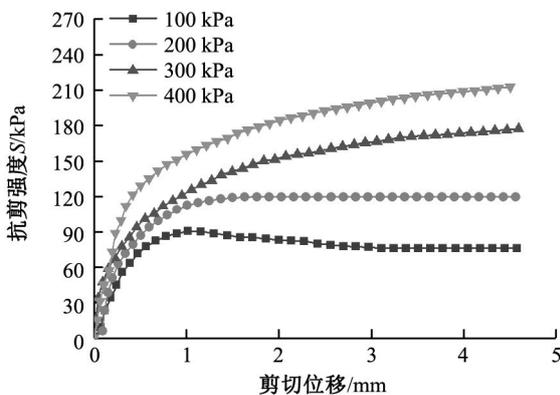
根据应力 - 应变曲线, 可以将试样的变形划分为 3 个阶段, 弹性变形阶段、弹塑性变形阶段以及理想塑性阶段^[14]。由图 5 可以看出在弹性变形阶段, 随着钙质结核含量的增加, 曲线的斜率变大, 即随着钙质结核含量的增加, 试样的弹性模量是增大的; 随着钙质结核含量和正应力的增加, 弹塑性变形阶段与理想塑性变形阶段的划分变得有些模糊, 如图 5(a)、(b) 在理想塑性阶段都趋于一定值, 近似



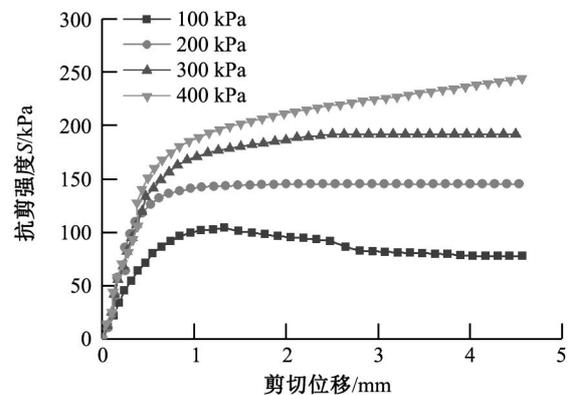
(a) 钙质结核质量百分数为 0%



(b) 钙质结核质量百分数为 10%



(c) 钙质结核质量百分数为 20%



(d) 钙质结核质量百分数为 30%

图 5 剪切位移 - 剪应力曲线

Fig.5 Shear displacement-shear stress curve

呈水平状,但是图 5(c)、(d) 在 400 kPa 的正应力下,理想塑性阶段并不是趋于一定值,而是随着剪切位移的增加而增加,这与钙质砂的剪切特性有所差异^[15],这是因为钙质结核的含量越大,其骨架作用越明显,但是在低正应力下不能充分发挥作用,在大的正应力下可以充分发挥钙质结核的骨架作用。

为了对工程建设提供理论帮助,在上述试验数据的基础上,考虑钙质结核含量与正应力耦合作用下对试样强度的影响,对三者进行三维拟合, $Z=8.39+2.06X+0.376Y$, $R^2=0.92$,结果如图 6,从拟合的结果图可以看出,随着钙质结核含量的增加试样的强度在同一平面上。

4 结论

1) 随着钙质结核含量的增加,试样的粘聚力逐渐降低,而内摩擦角是逐渐增加的,且与钙质结核含量近似呈线性关系。

2) 在低正应力下,随着钙质结核含量的增加,试样的强度没有明显的变化;但是在高正应力下,随着钙质结核含量的增加,试样的强度明显增大。

3) 在低正应力下,不含钙质结核试样为应变-硬化形,含钙质结核试样为应变软化性,且随着钙质结核含量的增加这种现象愈加明显。

4) 在高正应力下,随着钙质结核含量的增加,理想塑性阶段发生变化,不再趋于一定值。

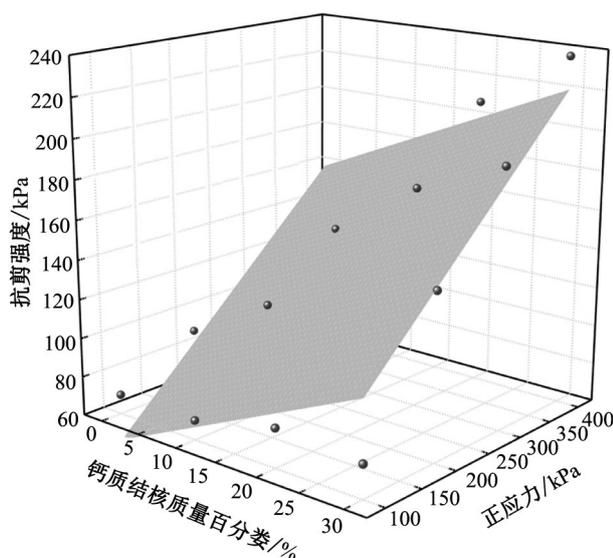


图 6 三维拟合

Fig.6 Three-dimensional fitting

参考文献:

- [1] 施国军, 吴道祥, 徐冬生, 等. 淮北平原钙质结核土的结构类型和成因分析 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2010, 33(11): 1681-1685.
- [2] 张民, 马丽, 骆洪义. 钙质结核的微形态及矿物学特征 [J]. 山东农业大学学报, 1995(3): 327-334.
- [3] 庞谦, 李凌, 胡广, 等. 川北地区下寒武统筇竹寺组钙质结核特征及成因机制 [J]. 沉积学报, 2017, 35(4): 681-690.
- [4] 梁斌, 王全伟, 阚泽忠. 四川盆地中侏罗统沙溪庙组钙质结核的碳、氧同位素特征 [J]. 矿物岩石, 2007(2): 54-58.
- [5] 巩铁雄, 朱元骏. 黄土高原水蚀风蚀交错带六道沟小流域坡面表土钙质结核分布 [J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(4): 42-49.
- [6] CHEN Hongsong, LIU Jianwei, WANG Kelin, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China [J]. Catena, 2010, 84(1): 21-28.
- [7] 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤降雨入渗过程模拟 [J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 779-787.
- [8] 朱元骏, 邵明安. 钙结石含量对土壤水分蒸发影响的模拟试验 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 77-81.
- [9] 吴道祥, 曹亚娟, 钟轩民, 等. 安徽淮北平原钙质结核土分布及成因年代研究 [J]. 岩土力学, 2009, 30(S2): 434-439.
- [10] 钟轩明. 安徽省淮北地区钙质结核土的工程性质研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2007.
- [11] 杨远杰. 钙质结核土中钙质硬磐的物质组成、微观结构及强度特性 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
- [12] 曹志翔, 宋新伟, 赵素华, 等. 颗粒粒径对粗粒土抗剪强度影响的试验研究 [J]. 高原农业, 2019, 3(3): 315-322.
- [13] 蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [14] 胡雪婷. 钙质结核土细观结构要素与抗剪强度关系的研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [15] 罗会武, 陈培帅, 陈卫忠, 等. 不同颗粒级配钙质砂剪切特性研究 [J]. 河北工程大学学报: 自然科学版, 2018, 35(4): 40-43.

(责任编辑 王利君)