

DOI: 10.11779/CJGE2023S10012

# 南昌重塑红土变形特性三轴试验研究

张涵超<sup>1</sup>, 崔胜霞<sup>1</sup>, 李海龙<sup>2</sup>, 林森<sup>1</sup>, 李文娜<sup>1</sup>

(1. 东华理工大学土木与建筑工程学院, 江西 南昌 330032; 2. 江西省建筑设计研究总院集团有限公司, 江西 南昌 330032)

**摘要:** 对南昌市东华理工大学附近工地取得的红土, 按天然含水率 23%, 制取了密度为 1.75, 1.80, 1.85, 1.90, 1.95 g/cm<sup>3</sup> 的三轴重塑土样, 开展了围压分别为 50, 100, 200, 300 kPa 的 5 组 20 个固结排水三轴剪切试验。绘制了不同密度时各组南昌压实红土的应力-应变、体应变-应力关系曲线, 对南昌重塑红土 CD 条件下剪切变形特性进行分析并剪切变形进行了分段, 探讨了红土中团聚体对其剪切变形的影响。绘制了  $\varepsilon_v-q$ ,  $\varepsilon_v-p$ ,  $\varepsilon_v-q/p$  曲线, 讨论了土样的体应变与平均主应力  $p$ 、偏应力  $q$  之间的关系。结果表明: 南昌重塑红土 CD 条件下的三轴剪切变形可分为三个阶段, 这主要与土样中团聚体破裂程度有关。在剪应力  $q=50$  kPa 时, 团聚体破裂, 而土体的剪切变形是平均主应力、偏应力耦合作用的结果, 在  $q/p=1.5$  时, 土样破坏。

**关键词:** 南昌红土; CD 三轴试验; 应力-应变曲线; 变形特性; 变形机理

**中图分类号:** TU411.7; TU446      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2023)S1-0119-04

**作者简介:** 张涵超(1995—), 男, 硕士研究生, 从事红土特性及工程应用等方面的科研。E-mail: 1042816137@qq.com。

## Characteristics of triaxial deformation of Nanchang laterite

ZHANG Hanchao<sup>1</sup>, HU Shengxia<sup>1</sup>, LI Hailong<sup>2</sup>, LIN Sen<sup>1</sup>, LI Wennna<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330032, China; 2. Jiangxi Provincial Architectural Design and Research Institute Group Co., Ltd., Nanchang 330032, China)

**Abstract:** The laterite, from the site near the East China University of Technology, is made into the triaxial remodeled soil samples with the natural moisture content of 23% and the densities of 1.75, 1.80, 1.85, 1.90, 1.95 g/cm<sup>3</sup>. The triaxial shear tests on 5 groups of 20 soil samples are carried out under consolidation and drainage (CD) conditions with the confining pressures of 50, 100, 200, 300 kPa. The stress-strain and volumetric strain-stress curves for each group of Nanchang compacted laterite at different densities are plotted and segmented, and the shear deformation characteristics of Nanchang remodeled laterite under CD conditions are analyzed. The effects of agglomerates in the laterite on the shear deformation are discussed. The results show that the triaxial shear deformation under CD conditions of remodeled laterite can be divided into three stages, which are mainly related to the degree of rupture of agglomerates in the soil samples. When the shear stress equal to 50 kPa, the agglomerates rupture. The shear deformation of the soil is the result of the coupling effects of the mean principal stress and the partial stress, and the soil samples break down at  $q/p=1.5$ .

**Key words:** Nanchang laterite; CD triaxial test; stress-strain curve; deformation characteristic; deformation mechanism

## 0 引言

红土被认为是一种特殊土<sup>[1-4]</sup>, 其物理性质较差但其工程性质较好。在我国, 红土主要分布在南方地区, 北方部分地区也有分布。而三轴试验作为一种经典土工试验被广泛地应用于红土工程性质的研究<sup>[5-6]</sup>中, 通过三轴试验可得到土体的应力应变曲线, 并在此基础上分析其变形机理得到工程参数等。土体三轴剪切时的体积应变变化规律是研究的重点之一。李广信等<sup>[7]</sup>、姚仰平等<sup>[8]</sup>对土样体积变化与受力的关系进行了总结。沈珠江<sup>[9]</sup>对体应变与应变关系进行了数学模型的描述。沈珠江<sup>[10]</sup>、王立忠等<sup>[11]</sup>、谷建晓等<sup>[12]</sup>通过结构

性土应力-应变曲线的分析, 对结构性土的变形进行了阶段划分并解释了其机理。

由于红土工程特性的地域差异极大, 且现有研究对江西地区红土剪切变形机理关注较少, 本文对南昌重塑红土开展了固结排水条件下的三轴试验, 试样密度分别为 1.75, 1.80, 1.85, 1.90, 1.95 g/cm<sup>3</sup>, 围压分别为 50, 100, 200, 300 kPa。在对比各土样的应力-应变曲线和应力-体应变曲线后, 将南昌重塑红土的

三轴剪切变形划分为三个阶段，并结合文献[13, 14]，分析了红土中团聚体对剪切变形的影响。基于试验数据，进一步对土样体积应变和平均正应力、剪应力的关系进行了讨论。

## 1 试样制备

土样取自江西省南昌市东华理工大学西门外的建筑工地。土体呈棕红色、棕黄色，质地较均匀，杂质较少。天然含水率约为23%，土体天然密度为1.85 g/cm<sup>3</sup>。经比重瓶法测得 $G_s=2.69$ ；经液塑限联合测定法测得液限含水率 $w_L=37\%$ ，塑限含水率 $w_p=20\%$ ，塑性指数 $I_p=17$ ；天然孔隙比 $e_0$ 大约为0.76。参照相关规范<sup>[15-16]</sup>，对土料进行研磨过筛，按天然含水率 $w=23\%$ 进行配制，调配好的土料包上保鲜膜闷料一昼夜。试样采用静压制样法，分五次压实，中间打毛，以保证重塑试样的均匀性。

## 2 试验方案

试验为CD条件下的三轴试验，研究土体密度对南昌重塑红土工程性质的影响。控制重塑三轴试样初始密度 $\rho_0$ 分别为1.75, 1.80, 1.85, 1.90, 1.95 g/cm<sup>3</sup>，围压分别为50, 100, 200, 300 kPa。共进行了5组20个样的固结排水三轴剪切试验。固结时间参照相关标准<sup>[16]</sup>，设定为2 h，且当固结时间到达2 h时，试样体积几乎停止变化；剪切速率设置为0.08%/min；当轴向应变达20%时，试验结束。

## 3 $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 及 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 曲线对比分析

图1为剪切过程中，同围压 $\sigma_3$ 的情况下，不同密度试样偏应力 $\sigma_1 - \sigma_3$ 及体积应变 $\varepsilon_v$ 随轴向应变 $\varepsilon_1$ 变化的散点图。除 $\rho_0=1.95$  g/cm<sup>3</sup>， $\sigma_3=50$  kPa试样外，其他土样的总体积剪切压缩。同时，围压越大， $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 曲线随密度而产生的差异越小。在围压较低时，各密度曲线更加发散，差异更大；围压较高时，各密度的 $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 曲线更加聚拢。而 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 曲线则不同：围压越高，各密度的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 曲线越发散；低围压时，各密度的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 曲线越聚拢。可以看出高密度试样更易于在剪切后期发生相较于体积应变峰值时的相对膨胀，但高围压会抑制试样剪胀现象的发生。

对比 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 曲线，可分别将曲线分成三个阶段，且两种曲线的各阶段相互对应，如图2所示。试验所得重塑红土试样的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 曲线，与天然结构性土相似<sup>[10-12]</sup>，可分成三部分。这说明重塑土样同样具有一定抵抗剪切变形的强度。

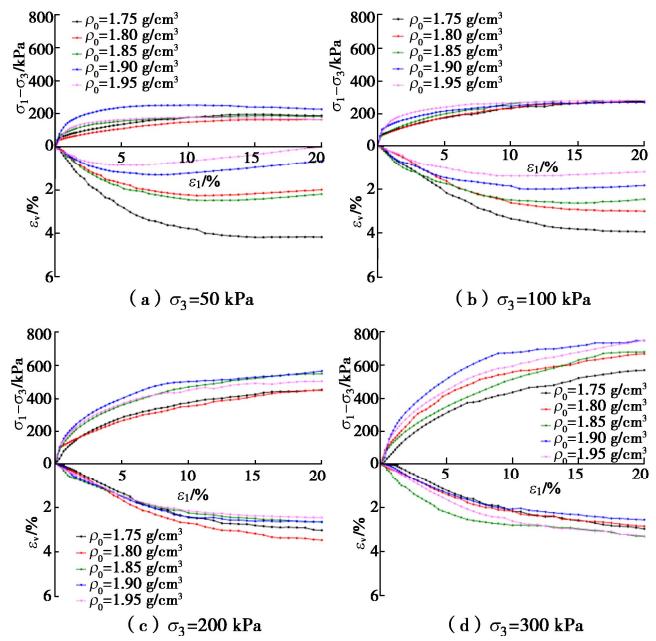


图1 南昌重塑红土 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 曲线对比图

Fig. 1 Comparison of  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$  curves of Nanchang remodeled laterite

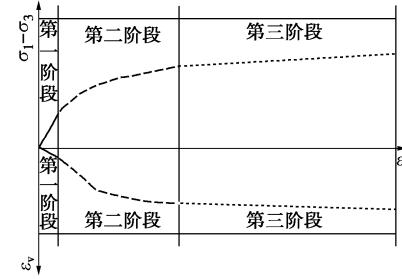


图2 南昌重塑红土 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 和 $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 曲线图

Fig. 2  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$  and  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$  curves of Nanchang remodeled laterite

分析其原因：重塑红土会形成相对封闭的团聚体结构<sup>[13-14]</sup>，小的团聚体还会聚集成大的团聚体，这种结构具有一定抵抗剪切变形的能力，在一定外力作用下才会破裂。故重塑红土的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 曲线在第一阶段时，呈弹性变形，但此阶段比天然结构土的第一阶段要短很多，这是重塑红土中土体结构被破坏，相比于天然结构土，其抵抗剪切变形的能力被大大削弱；在第二阶段中，土样中的大小团聚体受剪切破裂，抵抗剪切变形能力减弱，土体塑性变形比例大幅上升，曲线斜率逐渐减小；第三阶段时，土样中大小团聚体基本被破坏，此时塑性变形为变形主体，土样出现硬化或塑性破坏。

$\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ 曲线可对应 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ 曲线分成3个阶段：第一阶段， $\varepsilon_v$ 随 $\varepsilon_1$ 变化不大，曲线近似于斜率较小的直线。此阶段土体中团聚体未破裂且其锁定了大量的空间，有一定抵抗剪切变形的能力。变形以弹性形变为主。第二阶段，初期曲线快速上升，斜率较大。随着 $\varepsilon_1$ 增大，曲线斜率变小，高围压下斜率变化小于低

围压下斜率变化。土样密度越大, 曲线的斜率变化越大, 甚至小于 0, 密度越小, 曲线斜率变化越小。在此阶段, 由于剪切应力的上升, 团聚体被大量破坏而释放出了较大的压缩空间, 故初期  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$  曲线快速上升。随着团聚体逐渐被破坏, 土颗粒间的孔隙被压缩, 压缩空间随之减小, 故曲线斜率也逐渐减小。此阶段变形由以弹性变形为主过渡到塑性变形为主。在第三阶段时, 变形以塑性形变为主, 土体中的团聚体基本破裂, 且经过前两个阶段的压缩, 土体内部的孔隙已经很小。当土样密度较高时, 土体中颗粒排列更加紧密, 随着剪应力增加, 土体颗粒在径向上发生“滚动”和位移, 土体的紧密状态被破坏, 由此发生剪胀。而高围压会抑制位移和“滚动”, 从而抑制剪胀或使土体进一步压缩。而低围压条件下, 抑制径向上发生“滚动”和位移能力较差, 易于发生剪胀<sup>[17]</sup>。

#### 4 $\varepsilon_v$ 随 $q$ , $p$ 变化的关系

绘制  $\varepsilon_v$ - $q$  点线图, 如图 3。可看出  $\varepsilon_v$ - $q$  在曲线初期为斜率接近于 0 的直线。剪应力  $q$  到达一定值时, 斜率增大,  $\varepsilon_v$  快速上升, 曲线近似于直线。在曲线末端, 若剪切发生应力软化, 则  $q$  会减小, 曲线向右发展, 若发生剪切膨胀, 体应变随剪应力增大而减小。

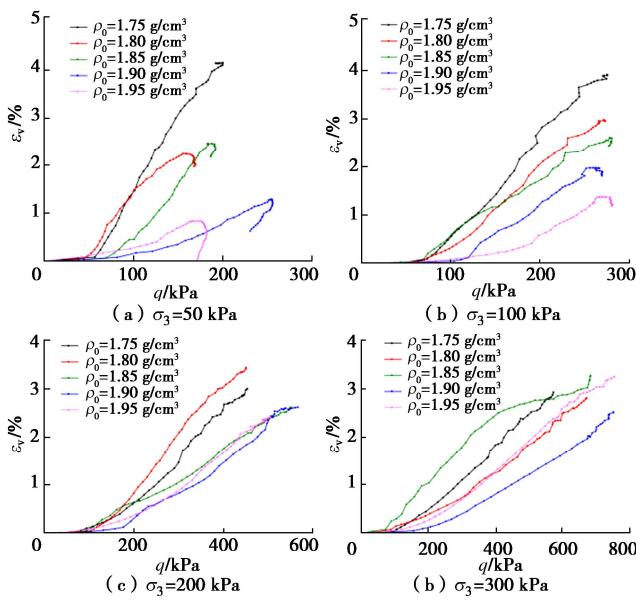


图 3 南昌重塑红土  $\varepsilon_v$ - $q$  曲线图

Fig. 3  $\varepsilon_v$ - $q$  curves of Nanchang remoulded laterite

不同围压下, 各密度试样的曲线斜率增大, 曲线快速上升时所对应的剪应力  $q$  大致相等, 此时剪应力约为 50 kPa。此时土体中的团聚体被破坏, 释放出了压缩空间。在围压为 50 到 100 kPa 时, 由于高密度试样的压缩空间较小, 在三轴剪切过程中, 团聚体开始破裂 ( $q \geq 50$  kPa) 后, 曲线峰值更小。又因为在制样过程中, 高密度试样中的团聚体更易被挤压破坏, 从

而使剪切阶段释放的压缩空间更少,  $\varepsilon_v$ - $q$  上升曲线斜率更小。在围压为 200 kPa 到 300 kPa 时, 因高围压固结缩小了试样之间的密度差距, 从而使各曲线之间的差异减小。文献[7]指出在剪切过程中土的体积改变主要与土体所受的剪应力  $q$  有关。结合前文, 试样中团聚体大量破坏和剪应力  $q$  的增大有关系。

绘制  $\varepsilon_v$ - $q/p$  关系曲线如图 4。从图 4 可见, 试样出现塑性破坏时,  $q/p$  约为 1.5; 当  $q/p < 1.5$  时, 试样未发生塑性破坏, 而是产生了硬化。同时可看出各围压下  $\varepsilon_v$ - $q/p$  曲线图的  $q/p$  区间基本都在 0 到 1.5 之间。文献[8]指出土体在剪切中的体积应变主要是加载过程中平均主应力  $p$  和剪应力  $q$  耦合所产生的。故而在  $\varepsilon_v$ - $q/p$  曲线图中, 各围压下的曲线横坐标的区间基本一致。

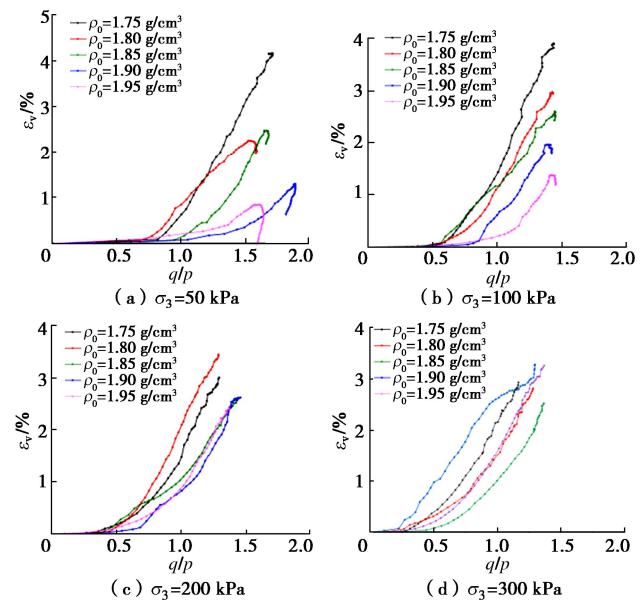


图 4 南昌重塑红土  $\varepsilon_v$ - $q/p$  曲线图

Fig. 4  $\varepsilon_v$ - $q/p$  curves of Nanchang remoulded laterite

#### 5 结 论

本文对取自工地现场的南昌重塑红土制取了 1.75, 1.80, 1.85, 1.90, 1.95 g/cm<sup>3</sup> 5 个不同密度的三轴重塑样, 控制围压分别为 50, 100, 200, 300 kPa, 做了 5 组 20 个样的 CD 三轴试验。绘制了  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ - $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_v$ - $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_v$ - $q$  和  $\varepsilon_v$ - $q/p$  关系曲线图, 分析了变形特性和变形机理, 得到如下结论:

(1) 南昌重塑红土的剪切变形可分为 3 个阶段: 第一阶段以弹性变形为主; 第二阶段以塑性形变为主; 第三阶段时, 土样易出现塑性破坏。

(2) 高密度试样更易发生剪胀, 而高围压会抑制剪胀的发生。低围压下, 由于抑制土颗粒径向位移和“滚动”的能力低, 易于发生剪胀现象。

(3) 南昌红土土样中团聚体破坏, 压缩空间释放主要与偏应力  $q$  有关, 此时  $q \approx 50$  kPa。而土样在不同阶段的体应变主要与平均主应力  $p$  和剪应力  $q$  耦合作用有关, 土样发生剪胀时,  $q/p \approx 1.5$ 。

### 参考文献:

- [1] GUAN D S, ZHOU G Q, YANG G H. Analysis of the bearing capacity of red clay foundation considering stress level[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(4): 3477-3485.
- [2] 黄英, 符必昌. 红土化作用及红土的工程地质特性研究[J]. 岩土工程学报, 1998, 20(3): 40-44. (HUANG Ying, FU Bichang. Research on lateritization and specific property of laterite in engineering geology[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1998, 20(3): 40-44. (in Chinese))
- [3] 冯金良, 赵泽三, 高国瑞. 试论红土化作用及红土的工程地质分类[J]. 水文地质工程地质, 1993, 20(3): 32-35. (FENG Jinliang, ZHAO Zesan, GAO Guorui. Discussion on lateritization and the engineering geological classification of laterite[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1993, 20(3): 32-35. (in Chinese))
- [4] PRASAD T K, GRPARTHASARTHY G R. Laterite and lateritization-geomorphic review[J]. Journal of Petroleum and Mining Engineering, 2020, 3(10): 16-21.
- [5] 龙万学, 陈开圣, 肖涛, 等. 非饱和红黏土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(增刊2): 28-33. (LONG Wanxue, CHEN Kaisheng, XIAO Tao, et al. Research of general triaxial test for unsaturated red clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(S2): 28-33. (in Chinese))
- [6] 赵蕊, 左双英, 王嵩, 等. 不同含水率贵阳重塑红黏土三轴抗剪强度试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2015, 42(5): 90-95. (ZHAO Rui, ZUO Shuangying, WANG Song, et al. Experiment and mechanism analysis of water contents on triaxial shear strength of the remodeled red clay of Guiyang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2015, 42(5): 90-95. (in Chinese))
- [7] 李广信. 高等土力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 52-53. (LI Guangxin. Advanced Soil Mechanics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 52-53. (in Chinese))
- [8] 姚仰平, 张丙印, 朱俊高. 土的基本特性、本构关系及数值模拟研究综述[J]. 土木工程学报, 2012, 45(3): 127-150. (YAO Yangping, ZHANG Bingyin, ZHU Jungao. Behaviors, constitutive models and numerical simulation of soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(3): 127-150. (in Chinese))
- [9] 沈珠江. 考虑剪胀性的土和石料的非线性应力应变模式[J]. 水利水运科学研究, 1986(4): 1-14. (SHEN Zhujiang. A nonlinear dilatant stress-strain model for soils and rock materials[J]. Hydro-Science and Engineering, 1986(4): 1-14. (in Chinese))
- [10] 沈珠江. 结构性粘土的弹塑性损伤模型[J]. 岩土工程学报, 1993, 15(3): 21-28. (SHEN Zhujiang. An elasto-plastic damage model for cemented clays[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1993, 15(3): 21-28. (in Chinese))
- [11] 王立忠, 赵志远, 李玲玲. 考虑土体结构性的修正邓肯-张模型[J]. 水利学报, 2004, 35(1): 83-89. (WANG Lizhong, ZHAO Zhiyuan, LI Lingling. Non-linear elastic model considering soil structural damage[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(1): 83-89. (in Chinese))
- [12] 谷建晓, 范理云, 吕海波, 等. 基于修正邓肯-张模型模拟红黏土应力-应变关系[J]. 桂林理工大学学报, 2020, 40(2): 351-357. (GU Jianxiao, FAN Liyun, LÜ Haibo, et al. Simulation of the stress-strain curves of red clay based on modified Duncan-Chang model[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2020, 40(2): 351-357. (in Chinese))
- [13] 薛守义, 卞富宗. 红土的结构与工程特性[J]. 岩土工程学报, 1987, 9(3): 92-104. (XUE Shouyi, BIAN Fuzong. Structural and engineering properties of laterite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1987, 9(3): 92-104. (in Chinese))
- [14] 高国瑞. 中国红土的微结构和工程性质[J]. 岩土工程学报, 1985, 7(5): 10-21. (GAO Guorui. Microstructural and engineering properties of Chinese laterite[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1985, 7(5): 10-21. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123—2019[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019. (Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123—2019[S]. Beijing: China Planning Press, 2019. (in Chinese))
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 2019. (Ministry of Transportation and Communications of the People's Republic of China. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020[S]. 2019. (in Chinese))
- [17] 鹿英奎. 土的剪胀机理[D]. 北京: 北方工业大学, 2012: 17-18. (LU Yingkui. Shear Swelling Mechanism of Soils[D]. Beijing: North China University of Technology, 2012: 17-18. (in Chinese))