

文章编号:1672-9331(2018)04-0032-06

# 百色饱和膨胀土静止侧压力系数试验

张锐<sup>1,2</sup>, 张博亚<sup>2</sup>, 刘正楠<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学 公路养护技术国家工程实验室, 湖南 长沙 410114;

2. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 为了得到饱和膨胀土在不同干密度下的静止侧压力系数, 针对以往静止侧压力系数研究中存在的问题, 采用改进的试验装置和试验方法, 通过调节环刀开合来消除由制样产生的初始水平应力, 采用特制护刀避免试样在压缩过程中的有效传力面积减小。对广西百色地区膨胀土分别进行了饱和状态下是否消去初始水平应力、是否改变试样有效传力面积的静止侧压力系数对比试验。研究结果表明, 制样产生的初始水平应力会使饱和膨胀土在相同干密度下的静止侧压力系数减小7.3%~19.9%; 因压缩造成的有效传力面积减小会使饱和膨胀土在相同干密度下的静止侧压力系数减小2.3%~15.1%; 饱和膨胀土静止侧压力系数随干密度的增加而减小; 建立了饱和膨胀土  $K_0-\rho_d$  曲线的拟合公式, 得到了对应于不同荷载下饱和膨胀土的  $K_0$  系数。

**关键词:** 饱和膨胀土; 静止侧压力系数; 压缩法; 初始水平应力; 有效传力面积; 干密度

**中图分类号:** U416

**文献标识码:** A

## Experimental research on coefficient lateral earth pressure at rest of Baise saturated expansive soil

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, ZHANG Bo-ya<sup>2</sup>, LIU Zheng-nan<sup>2</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** In order to observe the coefficient of lateral earth pressure at rest of saturated expansive soil at different dry density, an improved testing device and method was used to avoid the influence of initial horizontal stress due to specimen preparation by adjusting the opening and closing degree of the ring knife and the reduction of effective area due to the compression of the specimen by using special knife. The compared tests of expansive soil form Baise in Guangxi were carried out, including with and without initial horizontal stress and variation of effective area. The results show that the initial horizontal stress due to specimen preparation can occur 7.3%~19.9% decrease in the coefficient of lateral earth pressure at rest under the same dry density, and the reduction of effective area can occur 2.3%~15.1% decrease in it under the same dry density. The coefficient of lateral earth pressure at rest of saturated expansive soil decreases as the dry density increases. The  $K_0$  of saturated ex-

收稿日期:2018-05-21

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51108049,51608053);交通运输部公路工程行业标准制修订项目(JTG-201507)

通讯作者:张锐(1980-),男,湖南株洲人,长沙理工大学副教授,博士,主要从事特殊土及其路基工程方面的研究。

E-mail: zr\_csust@163.com

pansive soil under different upper load can be obtained by the fitting formula of  $K_0-\rho_d$ .

**Key words:** saturated expansive soil; coefficient of lateral earth pressure at rest; compression method; initial horizontal stress; effective area; dry density

膨胀土因富含蒙脱石及其混层矿物,在膨胀受限时产生较大的膨胀压力,会给膨胀土地区支挡结构物等造成严重危害<sup>[1]</sup>。在现有的针对有上覆荷载下的膨胀土侧向膨胀力的研究中<sup>[2-4]</sup>,所监测得到的侧向力是由膨胀土产生的侧向膨胀力与上覆荷载引起的静止侧压力所组成,因此进行膨胀土静止侧压力系数研究对膨胀土侧向膨胀力的准确量测以及膨胀土地区支挡结构物设计具有重要意义。

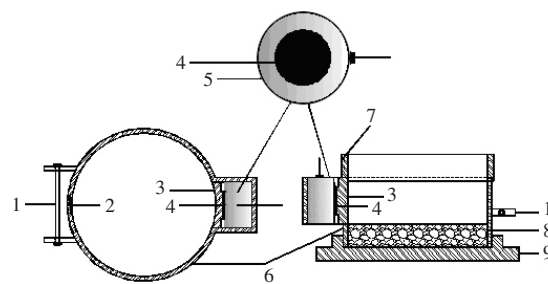
静止侧压力系数是指在完全侧限条件下水平向有效应力与竖向有效应力之比,常用  $K_0$  表示。目前常用的确定方法分为直接法和间接法。直接法是通过试验的方式直接测得侧限条件下土样的水平有效应力,从而得到  $K_0$ ,如:陈存礼<sup>[5]</sup>在改进的固结设备中采用压缩法研究竖向压力、含水率和加卸载等因素对原状黄土静止侧压力系数  $K_0$  的影响,即在固结仪中对试样施加不同的竖向压力,通过压力传感器测得相应的水平有效应力,所得水平有效应力与竖向压力的比值即为  $K_0$ ;金松丽<sup>[6]</sup>也进行了类似研究;朱俊高<sup>[7]</sup>利用大型单向压缩仪与土压力盒研究了粗粒土的静止侧压力系数。三轴仪法也常常被用于静止侧压力系数的测试,如:姚晓亮<sup>[8]</sup>采用三轴仪研究温度、粒度成分、干密度和应力历史对冻土静止侧压力系数的影响;杨和平<sup>[9]</sup>采用三轴仪对宁明地区非饱和膨胀土静止侧压力系数进行了试验研究;黄博<sup>[10]</sup>在三轴仪中对饱和黏土进行了固结试验,得到了静止侧压力系数  $K_0$ 。除此之外,还有部分学者进行了原位试验得到了静止侧压力系数<sup>[11-13]</sup>。间接法是通过经验公式计算得到  $K_0$ ,如 Jaky<sup>[14]</sup>提出了静止侧压力系数与有效内摩擦角之间的简化关系式。

在上述研究中,压缩法不能消除由制样产生的初始水平应力,且无法保证试样压缩后试样与压力测试设备之间的有效传力面积保持不变,因此会对试验结果造成一定的影响。三轴仪法操作复杂,不便于应用。原位试验所用仪器影响因素较多,故结果离散性较大。由于土体的  $K_0$  受多方面因素的影响,利用经验公式所得  $K_0$  准确性较

低。针对以往静止侧压力系数研究的不足,作者采用自行改进的固结试验装置和试验方法,对广西百色膨胀土进行静止侧压力系数试验研究。作者已利用该仪器进行了膨胀土静止侧压力系数的量测<sup>[15]</sup>,但所用方法仍需要改进。该装置可以消除由制样产生的初始水平应力,并得到压缩变形稳定后试样的水平向有效应力,保证在压缩过程中试样的有效传力面积不变,从而得到较为精确的静止侧压力系数,为膨胀土地区支挡结构物设计提供参考。

## 1 试验装置及方法

试验所用装置如图 1 所示。该装置在常规固结设备的基础上进行了改进,使用可开合的环刀和可以嵌套在环刀上的护刀,增加了侧向力量测与采集系统。该装置可以得到试样压缩稳定后的侧向应力,消除由制样产生的初始水平应力,并能保证在压缩工程中试样的有效传力面积不变。



1.开合调节杆; 2.开合缝; 3.滑块; 4.硅胶垫片; 5.压力传感器;  
6.可开合环刀; 7.护刀; 8.透水石; 9.底座

图 1 装置示意图

Fig. 1 Sketch of test device

该环刀为一内径为 61.8 mm、高为 30 mm、厚为 2 mm、材质与常规环刀相同的钢圈;左侧设一带开合调节杆的“Z”型开合缝,目的是消除初始水平应力;右侧设一可用于放置传感器的凹槽。所用传感器是直径为 20 mm、厚度为 12 mm、量程为 0~600 kPa 的电阻应变压力传感器,有效区域为中心直径为 12 mm 的圆形区域,精度为 0.3%  $F_s$ 。试样侧向力通过一刚性滑块传至压力传感器,该

滑块左侧为与环刀凹槽缺口相吻合的圆弧面,正立面为边长为 20 mm 的正方形。滑块右侧是直径为 12 mm、高为 2 mm 的圆形凸起,与传感器有效区域相吻合。在传感器有效区域处,粘贴了一块 1 mm 厚的硅胶片,以避免滑块与传感器刚性接触所带来的影响。

对滑块进行受力分析,传感器所监测的侧向力是试样作用在滑块圆弧面上的力在水平方向上的合力。建立如图 2 所示的平面直角坐标系,设传感器监测得到的应力为  $\sigma'$  (kPa),滑块右侧圆形凸起的半径  $r=6$  mm,滑块曲面上任意微元上的应力为  $\sigma$  (kPa),与  $x$  轴方向的夹角为  $\theta$ ,左侧圆弧半径  $R=30.9$  mm,滑块高度  $h=20$  mm,则滑块条微元上的力在水平方向上的投影为  $F_0=\sigma \cdot h \cdot R \cdot \cos \theta \cdot d\theta$ ,半圆弧所对应的圆心角为  $\alpha=\arcsin \frac{10}{30.9}=18.88^\circ$ ,则  $\theta$  的变化范围为  $(-18.88^\circ, 18.88^\circ)$ 。

试样作用在圆弧面上的力在  $x$  轴方向的投影为  $F=\int_{-18.88^\circ}^{18.88^\circ} F_0=\sigma \cdot h \cdot \int_{-18.88^\circ}^{18.88^\circ} R \cdot \cos \theta d\theta$ ,传感器所监测到的力为  $F'=\sigma' \cdot \pi \cdot r^2$ 。

$$\text{由 } F=F', \text{ 可得 } \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{\pi \cdot r^2}{h \cdot \int_{-18.88^\circ}^{18.88^\circ} R \cdot \cos \theta d\theta} =$$

0.283,即将传感器监测到的应力  $\sigma'$  乘以 0.283,即可得到试样作用在滑块圆弧面上的应力  $\sigma$ 。

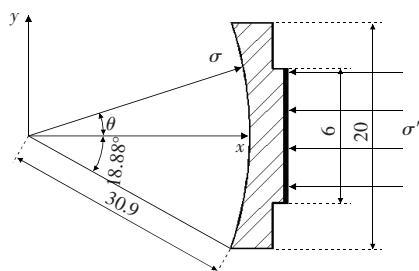


图 2 滑块受力分析图(单位:mm)

Fig. 2 Force analysis of slider(Unit:mm)

在试验过程中,为了避免试样被压缩至环刀高度以下而造成的传感器有效区域面积与滑块—试样接触面有效传力面积之比的变化,故使用了改进的护刀。该护刀高 20 mm、厚 2 mm,底部为一可以与可开合环刀完美嵌套且不会影响压力传感器的刀口。制样时将护刀嵌套在可开合环刀中以制备高于环刀高度的试样。试样高出环刀的高

度应由设定的初始干密度和目标干密度确定,即当试样高度被压缩至环刀高度时试样应达到的干密度。

在试验前,对试验所用传感器分别进行加、卸载循环标定。具体方法是,将滑块凸起处与传感器受力面连同硅胶垫片叠置,使用压力加载机由滑块圆弧面进行加、卸载,得到压力理论值—实际值关系曲线。标定结果表明,2 个传感器加、卸载的理论值—实际值关系曲线线性相关系数均大于 0.999,加、卸载的滞回效应不显著。

## 2 试验方法与步骤

基于《公路土工试验规程(JTG E40—2007)》的单轴固结仪法,本试验方法与步骤增加了侧向力的量测和初始水平应力的消除等内容。具体步骤如下。

1) 在试验前,对固结仪施加不同的荷载  $P$ ,记录对应的仪器变形量  $R_p$ 。

2) 根据目标干密度  $\rho_{ds}$  与初始干密度  $\rho_{d0}$ ,采用静压制样的方法,在可开合环刀中制备设定含水率为  $w_0$ 、初始干密度为  $\rho_{d0}$  的试样。在制样过程中,传感器应置于凹槽中且产生的侧向力不能超过传感器的量程,以免对传感器造成损坏。

3) 静压成型后,将护刀取下,调节开合调节杆使传感器的读数降至 0,再次调节开合调节杆使传感器的读数保持在 1 kPa 左右,并将护刀套入。

4) 按照从下到上底座、透水石、可开合环刀、护刀、透水石、加载板的顺序,将装置安装到固结盒中,并安装电子千分表,施加 1 kPa 的压力,使仪器各部分接触。

5) 去掉预压荷载,施加第一级荷载并将固结盒中注满水,待固结变形每 1 h 变化量不超过 0.01 mm 且侧向力变化量不超过 1 kPa 时,读取侧向应力与竖向压缩量,计算出该级荷载下的静止侧压力系数与干密度,并施加第二级荷载进行固结。重复相同操作直至目标干密度  $\rho_{ds}$ ,得到加载过程中的  $K_0-\rho_d$  曲线。

## 3 试验土样与试验方案

试验土样取自广西壮族自治区百色市平果县四塘镇,位于我国典型膨胀土分布区百色盆地内,

其基本物理和工程性质指标测试结果如表 1 所示。

表 1 膨胀土样的物理和工程性质指标

Table 1 Physical and engineering properties of expansive soil sample

取样深度/m	土粒比重	液限/%	塑限/%	塑性指数/%	自由膨胀率/%	蒙脱石含量/%	最大干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	最佳含水率/%	粘聚力/kPa	内摩擦角/(°)
6	2.75	56.3	21.4	34.9	82	16.6	1.72	17.9	10	25

以含水率与干密度分别为 17.9% 和 1.6 g/cm<sup>3</sup> 的试样,在无荷条件下膨胀稳定后的含水率 32.04% 和干密度 1.47 g/cm<sup>3</sup> 为设定的初始含水率  $w_0$  与干密度  $\rho_{d0}$ ,以 1.6 g/cm<sup>3</sup> 为目标干密度  $\rho_{ds}$ 。由此计算得到试样初始高度应为 21.769 mm,取为 21.8 mm。选取荷载次序为 12.5,25,50,75,100,125 kPa,直至试样压缩至目标干密度,进行压缩试验。

为了检验初始水平应力以及试样有效传力面积的变化是否会对试验结果造成影响,进行了未消除初始水平应力的试验(在可开合环刀制备初始含水率为 32.04%、初始干密度为 1.47 g/cm<sup>3</sup>、初始高度为 21.8 mm 的试样,但保持由于制样产生的初始水平应力)和改变试样有效传力面积的试验(在可开合环刀中制备初始含水率为 32.04%、初始干密度为 1.47 g/cm<sup>3</sup>、初始高度为 20 mm 的试样,并消除由于制样产生的初始水平应力)。并对试样在制样到置于固结仪过程中的侧向应力变化路径进行监测。

## 4 试验结果及分析

### 4.1 试样侧向应力路径

试样在制样到置于固结仪过程中的侧向应力变化路径如图 3 所示。

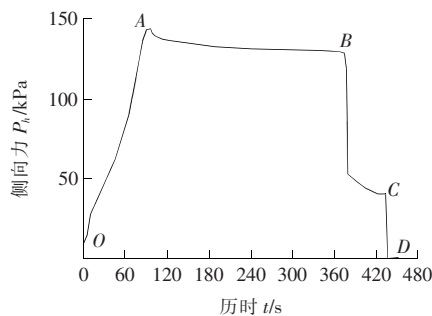


图 3 静压制样过程中侧向应力变化路径

Fig. 3 Stress path of lateral stress in the process of sample preparation

图 3 中,OA 段为竖向加压过程中的试样侧向力,A 点为试样侧向力的最大值 143.9 kPa;AB 段为静压过程,在此过程中试样侧向力逐渐减小至稳定值 129.2 kPa;BC 段为卸除竖向压力的过程,在此过程中试样侧向力突变至 52.2 kPa,并逐渐减小至 40.5 kPa,该侧向力即为由静压制样产生的初始水平应力;CD 段为调节环刀开合调节杆的过程,在此过程中先使环刀处于张开状态,此时试样侧向力为 0,再缓慢将环刀闭合,并使试样侧向力保持在 1 kPa 左右,以确保试样与环刀接触。未消去初始水平应力试样侧向力路径为 OABC,消去初始水平应力试样的侧向力路径为 OABCD。

### 4.2 初始水平应力与有效传力面积的影响

将未消去初始水平应力(1<sup>#</sup>)、改变有效传力面积(2<sup>#</sup>)、两组平行改进压缩试验(3<sup>#</sup>和 4<sup>#</sup>)所得试验结果列于表 2。由表 2 可知,在相同上覆荷载下,各组试样的干密度方差不超过 0.001,3<sup>#</sup>与 4<sup>#</sup>中相同干密度下  $K_0$  系数方差不超过 0.001,故将 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup> 结果的平均值绘于图 4。

在未消除初始水平应力时,相同干密度下试样的  $K_0$  系数减小了 7.3%~19.9%,且随着干密度的增大  $K_0$  系数相差越小。这是因为初始水平应力具有一定的“预应力”作用,会抵消一部分试样所产生的侧向力;但随着上覆荷载的增大,试样所产生的侧向力增大,初始水平应力也会随着浸水时间的增加而逐渐消散,从而初始水平应力的“预应力”作用减小,因此随着干密度的增大  $K_0$  系数相差越小。改进试验可以保证消除由制样产生的初始水平应力。

在试样有效传力面积改变时,相同干密度下试样的  $K_0$  系数减小了 2.3%~15.1%,且随着干密度的增大  $K_0$  系数相差越大。在较小上覆荷载条件下,由于试样的压缩量较小,试样的有效传力面积较初始值变化较小,故此时的  $K_0$  系数较未改变传力面积时相差较小。但随着荷载的增加,试

样的压缩程度不断增加,试样的有效传力面积不断减小,使滑块曲面上应力 $\sigma$ 与传感器监测到的应力 $\sigma'$ 之间的比例系数不断增大,但所采用的仍是初始

的比例系数,因此 $K_0$ 系数的减小比例逐渐增大。改进试验由于试样在试验过程中其高度一直大于滑块的高度,故不会改变试样的有效传力面积。

表2 不同荷载下各组试验结果

Table 2 Test results of each group under different upper load

上覆荷载/kPa	1 <sup>#</sup>		2 <sup>#</sup>		3 <sup>#</sup>		4 <sup>#</sup>	
	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	$K_0$ 系数	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	$K_0$ 系数	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	$K_0$ 系数	干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	$K_0$ 系数
12.5	1.463	0.656	1.465	0.800	1.464	0.816	1.462	0.822
25.0	1.471	0.604	1.474	0.660	1.470	0.688	1.468	0.696
50.0	1.492	0.532	1.495	0.582	1.490	0.612	1.488	0.622
75.0	1.512	0.477	1.517	0.513	1.511	0.535	1.509	0.544
100.0	1.540	0.393	1.544	0.421	1.536	0.455	1.534	0.464
125.0	1.559	0.348	1.562	0.356	1.558	0.389	1.557	0.397
150.0	1.578	0.312	1.579	0.307	1.576	0.341	1.578	0.350
175.0	1.590	0.296	1.592	0.277	1.591	0.315	1.590	0.324
200.0	1.604	0.280	1.606	0.256	1.603	0.297	1.602	0.307

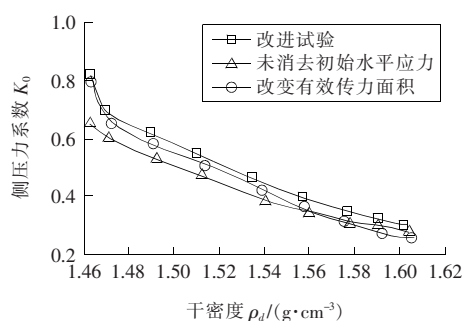


图4  $K_0$ - $\rho_d$  曲线图

Fig. 4 Curve of  $K_0$ - $\rho_d$

#### 4.3 静止侧压力系数 $K_0$ 的函数表达式

由图4可知,饱和膨胀土的侧压力系数 $K_0$ 随干密度的增大而减小,直至趋于稳定。将表2中两组平行改进压缩试验结果(3<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>)采用幂函数进行拟合,得到图5。

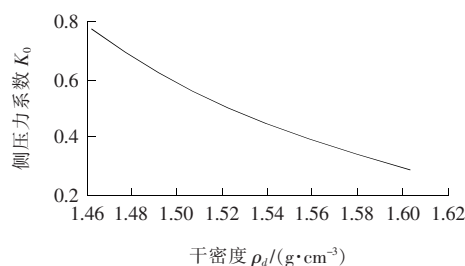


图5 改进压缩试验 $K_0$ - $\rho_d$  曲线拟合图

Fig. 5 Relationship curve of  $K_0$ - $\rho_d$  in improved tests

$K_0$ 系数可表示为:

$$K_0 = a\rho^n.$$

式中: $K_0$ 为静止侧压力系数; $\rho$ 为干密度; $a$ 和 $n$ 为与土性有关的拟合参数。

拟合结果为: $a = 44.117$ ,  $n = -10.654$ ;相关系数为0.978。

## 5 结论

1) 初始水平应力具有“预应力”的作用,会使试样在相同干密度下的静止侧压力系数 $K_0$ 误差达到7.3%~19.9%;而试样压缩造成的有效传力面积减小,会使试样在相同干密度下的静止侧压力系数 $K_0$ 误差达到2.3%~15.1%。采用改进的试验装置与方法可以消除这些影响,从而得到较为精确的静止侧压力系数。

2) 试验结果表明,饱和膨胀土的静止侧压力系数随干密度的增大而减小,直至趋于稳定。

3) 建立了饱和膨胀土的 $K_0$ - $\rho_d$ 曲线函数表达式,以此得到了不同干密度下饱和膨胀土的静止侧压力系数。

## 〔参考文献〕

[1] 郑健龙. 公路膨胀土工程理论与技术[M]. 北京:人

- 民交通出版社,2013.
- ZHENG Jian-long. The theory and technology for highway expansive soil engineering[M]. Beijing: People's Communication Press, 2013.
- [2] 杨果林,滕珂,秦朝辉. 膨胀土侧向膨胀力原位试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版, 2014, 45(7): 2326-2332.
- YANG Guo-lin, TENG Ke, QIN Zhao-hui. An in-situ experimental research of lateral swelling pressure on expansive soils[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(7): 2326-2332.
- [3] Ikizler S B, Vekli M, Dogan E, et al. Prediction of swelling pressures of expansive soils using soft computing methods[J]. Neural Computing and Applications, 2014, 24(2): 473-485.
- [4] Abbas M F, Elkady T Y, Al-Shamrani M A. Evaluation of strain and stress states of a compacted highly expansive soil using a thin-walled oedometer[J]. Engineering Geology, 2015(193): 132-145.
- [5] 陈存礼,贾亚军,金娟,等. 含水率及应力对原状黄土静止侧压力系数的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3535-3542.
- CHEN Cun-li, JIA Ya-jun, JIN Juan, et al. Influences of water content and stress on coefficient of lateral pressure at rest of undisturbed loess[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3535-3542.
- [6] 金松丽,赵卫全,张爱军,等. 原状黄土增湿过程中的静止土压力系数变化规律试验研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(5): 63-70.
- JIN Song-li, ZHAO Wei-quan, ZHANG Ai-jun, et al. Experimental study of variation rules of the coefficient of earth pressure at rest during wetting for original loess[J]. Advanced Engineering Sciences, 2017, 49(5): 63-70.
- [7] 朱俊高,蒋明杰,沈靠山,等. 粗粒土静止侧压力系数试验[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2016, 44(6): 491-497.
- ZHU Jun-gao, JIANG Ming-jie, SHEN Kao-shan, et al. Experimental study of at-rest lateral pressure coefficient of coarse-grained soil[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2016, 44(6): 491-497.
- [8] 姚晓亮,齐吉琳,余帆. 冻土静止侧压力系数的试验研究[J]. 地下空间与工程学报, 2011, 7(6): 1108-1113.
- YAO Xiao-liang, QI Ji-lin, YU Fan. The experimental study on coefficient of lateral earth pressure at rest for frozen soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2011, 7(6): 1108-1113.
- [9] 杨和平,章高峰,张锐,等. 宁明非饱和膨胀土静止侧压力系数[J]. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2009, 6(1): 1-5, 35.
- YANG He-ping, ZHANG Gao-feng, ZHANG Rui, et al. Lateral pressure coefficient of Ningming unsaturated expansive soil[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology: Natural Science, 2009, 6(1): 1-5, 35.
- [10] 黄博,胡俊清,廖先斌,等. 原状饱和黏土静止土压力系数试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013(S2): 4056-4064.
- HUANG Bo, HU Jun-qing, LIAO Xian-bin, et al. Experimental studies of static earth pressure coefficient of undisturbed saturated clay[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013(S2): 4056-4064.
- [11] Hayashi H, Yamazoe N, Mitachi T, et al. Coefficient of earth pressure at rest for normally and overconsolidated peat ground in Hokkaido area[J]. Soils and Foundations, 2012, 52(2): 299-311.
- [12] 储团结. 扁铲侧胀试验测定静止侧压力系数的探讨[J]. 铁道工程学报, 2015, 32(11): 1-4.
- CHU Tuan-jie. Discussion on the determination of static lateral pressure coefficient from flat dilatometer tests[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(11): 1-4.
- [13] 赵富军. 天津地铁静止侧压力系数确定方法研究[J]. 铁道工程学报, 2016, 33(12): 99-104.
- ZHAO Fu-jun. Research on the method of the determination of static lateral pressure coefficient in Tianjin metro[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016, 33(12): 99-104.
- [14] Jaky I. The coefficient of earth pressure at rest[J]. Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers, 1944, 78(22): 355-358.
- [15] 张锐,刘正楠,郑健龙,等. 膨胀土侧向膨胀力及其对重力式挡墙的作用[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 171-180.
- ZHANG Rui, LIU Zheng-nan, ZHENG Jian-long, et al. Lateral swelling pressure of expansive soil and its effect on gravity retaining wall[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 171-180.