

文章编号:1673-9469(2024)01-0039-06

DOI:10.3969/j.issn.1673-9469.2024.01.006

侧向应变下膨胀土侧向压力变化规律试验研究

冯炜栋¹, 张文慧^{1*}, 王少鹏², 王东英³, 王斯杰¹

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210024; 2. 中国农业发展银行西藏自治区分行, 西藏 拉萨 850000; 3. 宿迁市港航事业发展中心, 江苏 宿迁 223899)

摘要: 膨胀土边坡土体含水率增加时会发生一定的侧向膨胀变形, 同时产生一定的侧向压力, 其由周围土体约束变形产生的侧向膨胀力与土体自重与上覆荷载导致的侧向土压力组成, 该侧向压力特别是侧向膨胀力的产生是膨胀土边坡浅层破坏的主要原因之一。通过自制仪器进行了控制侧向应变的侧向压力试验, 研究侧向压力在侧向应变、上覆压力与干湿循环等因素影响下的变化规律。试验结果表明: 侧向压力随上覆压力呈线性递增关系, 其趋势不随其他条件影响而改变; 干湿循环的进行会导致侧向压力有一定程度的降低, 但在一定循环次数后会逐渐趋于稳定; 侧向压力随侧向应变的增加大幅度减少, 但减少幅度逐渐降低; 在现有的变化范围内, 侧向应变对侧向压力的改变最为明显, 上覆压力次之, 干湿循环次数的影响相对较小。

关键词: 膨胀土; 侧向压力; 干湿循环; 上覆压力; 侧向应变

中图分类号: TU43

文献标识码: A

Experimental Study on the Change Law of Lateral Pressure of Expansion Soil Under Lateral Strain

FENG Weidong¹, ZHANG Wenhui^{1*}, WANG Shaopeng², WANG Dongying³, WANG Sijie¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical Mechanics and Dam Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210024, China; 2. China Agricultural Development Bank Tibet Autonomous Region Branch, Lhasa, Tibet 850000, China; 3. Suqian Port and Channel Development Center, Suqian, Jiangsu 223899, China)

Abstract: As the moisture content of the expansive soil slope increases, a certain amount of lateral expansion deformation occurs, and a certain amount of lateral pressure is generated which is composed of the lateral expansion force generated by the constraint deformation of the surrounding soil and the lateral soil pressure caused by the self-weight of the soil and the overlying load. The lateral pressure, especially the generation of lateral expansion force, is one of the main reasons for the shallow failure of the expansive soil slope. A lateral pressure test was conducted using a self-made instrument to control the lateral strain, and the variation law of the lateral pressure under the influence of factors such as the lateral strain, overlying pressure, and wet-dry cycles was studied. The experimental results show that the lateral pressure increases linearly with the overlying pressure, and the increase trend does not change with the influence of other conditions. The progress of wet-dry cycles will lead to a certain degree of reduction in the lateral pressure, but it will gradually stabilize after a certain number of cycles. The lateral pressure decreases significantly with the increase of lateral strain, but the decrease extent gradually decreases. Within the existing range of changes, the lateral strain has the most significant effect on lateral pressure, followed by the overlying pressure, and the impact of wet-dry cycles is relatively small.

Key words: expansive soil; lateral expansive force; dry-wet cycle; overlying pressure; lateral strain

收稿日期: 2023-06-14

基金项目: 江苏省自然科学基金资助项目(BK2017434)

作者简介: 冯炜栋(1999-), 男, 甘肃景泰人, 硕士研究生, 从事土体基本性质方面的研究。

* 通信作者: 张文慧(1973-), 男, 甘肃会宁人, 博士, 副教授, 从事岩土工程测试与土体基本性质方面的研究。

膨胀土含有大量亲水性黏土矿物,具有显著的干缩湿胀特性^[1],而在大部分膨胀土分布地区有着较为明显的季节性气候变化,降雨入渗与干旱蒸发使得膨胀土水分发生较大幅度变化,产生大量膨胀与收缩变形,或因各类约束产生膨胀力,导致土体与上部结构发生破坏。竖直方向膨胀会造成膨胀土地基及上部结构产生变形开裂,侧向膨胀会导致膨胀土边坡及支挡结构发生失稳破坏^[2]。

膨胀土边坡稳定分析不同于一般黏土边坡^[3-4],不能仅从滑体强度不足来考虑,还需要考虑膨胀力作用。包承纲^[5]、程展林等^[6]通过室内试验和模型试验发现膨胀土吸水膨胀造成坡体内水平应力增加从而使得坡体有更大的下滑趋势,导致发生边坡失稳。张震等^[7]通过两种条分法推导出了考虑膨胀力与上覆荷载的膨胀土边坡稳定分析方法,发现考虑膨胀力时边坡安全系数大幅下降。秦禄生等^[8]将膨胀力引入邓肯-张模型,并用有限元分析了雨季膨胀土边坡的稳定性,通过应力应变分布差异对照发现,边坡表层土体产生膨胀力为边坡浅层滑坡主要原因。因为影响因素众多,机制复杂、测量困难等原因,侧向膨胀规律相关研究不多。张锐等^[9]改进了常规侧向膨胀试验装置与方法,能更好地测量上覆荷载下侧向膨胀力,用于膨胀模型的建立与支挡结构设计的参考。池泽成等^[10]运用改良的三向胀缩仪研究了不同含水率、干密度、单向应变下三向膨胀力的变化,发现干密度增大使得各向异性减弱,微小的应变会使膨胀力大幅减小,三向膨胀力逐渐趋同。杨果林等^[11]进行了侧向膨胀力的现场原位测试,发现膨胀力变化与含水率增量有关;其大小随深度增加呈梯形分布;侧向膨胀力与竖向膨胀力差异明显,不能轻易进行各向同性简化。

以上研究大多将膨胀力作为一个面力或体力均匀施加,对于具有临空面的坡体,变形分析难以准确反映侧向膨胀力变化规律。在膨胀土边坡中,侧向压力包括含水率增加引起的侧向膨胀变形,因不同深度处含水率变化幅度与土体约束条件不同,产生的不同侧向膨胀力以及由土体自重与上覆荷载产生的侧向土压力。膨胀土吸水膨胀的过程中边坡土体的侧向压力增加导致发生边坡失稳。而边坡各处土体的含水率分布、土体性质、深度等条件的不同导致土体侧向变形的的位置与程度不同,侧向压力也随之变化,本文使用自制仪器进行了侧向应变条件下侧向压力试验,研究了侧

向应变、干湿循环次数、上覆压力等对侧向压力的影响。

1 试验装置

常规的固结仪等仪器用于测量竖向压力的单向膨胀试验,不能测量侧向压力,膨胀土边坡的浅层土体容易发生不同程度的侧向变形,导致侧向压力差别巨大。自制仪器可在侧向应变控制条件下同时测量侧向的两个不同方向上的压力。

自制仪器试样盒见图1,整体为长方形,以铁块与特制钢螺丝拼接,可通过位移螺杆和后方位移计调整侧向变形。在侧壁的预留孔洞内嵌入四个土压力传感器以测定侧向压力,并通过百分表与静态应变测试仪测量侧向应变。在试样失水收缩过程中由试样盒底部的加热铜片对试样加热以加速失水,减少试验时间,由温度控制器和温度测量探头控制试样温度在35℃~40℃。荷载使用所需质量的砂筒施加,在每次试验开始和结束时要进行多次标定。供水时定量的水流从储水瓶中流出,通过输水管上的阀门控制水流的速率,经连接器到达加压盖板上的散水孔流入试样,多余的水通过侧面铁板高于顶部的出水孔流出进入收集瓶,使试样可以充分利用毛细管力吸收水。

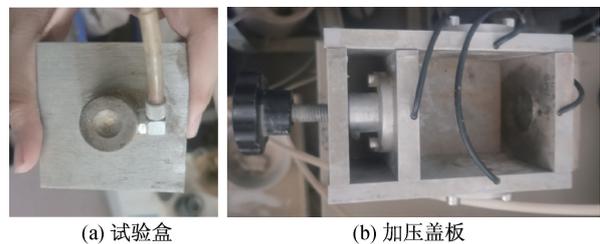


图1 试验装置

Fig. 1 Test device

2 试验土样与方案

试验用土取自江苏省南京市某膨胀土滑坡治理工程,取样深度为地面以下1.5~3.5m处。土体整体呈现黄褐色,部分土中含有灰白色夹层,呈硬塑状态。在现场采用标准环刀取样,计算天然含水率和天然干密度。之后进行了液塑限、颗分、轻型击实、矿物成分等基本物理指标的试验,以及无荷线膨胀率与竖向极限膨胀力等膨胀特性试验,根据《膨胀土地区建筑技术规范》(GBJ 112—87)判定土样属于高液限黏土、弱膨胀土。具体参数见表1。

表 1 膨胀土的基本性质

Tab. 1 Basic properties of expansive soil

指标	数值	指标	数值	指标	数值
液限 $\omega_L/\%$	50	最优含水率 $\omega_{op}/\%$	21.1	自由膨胀率/ $\%$	49.0
塑限 $\omega_p/\%$	22.1	最大干密度 $\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	1.58	无荷线膨胀率/ $\%$	14.5
塑性指数 I_p	28	蒙脱石含量/ $\%$	24	无荷竖向极限膨胀力/kPa	41.0
平均粒径/ μm	7.59	比重 G_s	2.71		

取土风干过筛加水搅拌组成重塑土,其含水率取土体最优含水率 21.1%,之后按最大干密度 $1.58 g/cm^3$ 进行制样。在检查装置正常后开始安装试样,进行侧向压力试验与测量记录。参考以往诸多学者研究可知,膨胀土胀缩特性和强度特性在干湿循环 6~7 次之后开始逐渐趋于稳定^[12],同时通过施加不同竖向压力模拟土体不同深度受力情况,一般大气影响深度在 4 m 之内^[13-14],通过查阅相关的研究和预试验可知^[15-16],弱膨胀土侧向应变控制量的最大值可定为 1.2%。试样按照五种干湿循环次数 0、2、4、6、8 次;五种上覆压力 0、20、40、60、80 kPa;六种侧向应变 0、0.15%、0.3%、0.6%、0.9%、1.2% 分别进行侧向压力试验,各状态的试样共有 150 个。

3 试验结果与分析

3.1 侧限条件下侧向压力变化规律

3.1.1 上覆土层压力对侧向压力的影响

天然状态下膨胀土会受到上覆土体的竖直应力,不同深度的膨胀土的力学与膨胀特性会有所不同,图 2 为侧限情况下侧向压力与上覆土层压力的关系,可以看出,随着上覆压力的加大,侧向压力近似呈线性增加。其中上覆压力的增加作为约束抑制了一定的膨胀变形,抵消了一定的竖向膨胀力,使更多的膨胀潜势作用于其他方向,从而使得侧向膨胀力增加。同时上覆压力也产生了一定的静止土压力,共同使侧向压力增加。

3.1.2 干湿循环对侧向压力的影响

图 3 为不同上覆压力下干湿循环时侧向压力变化情况。从图中可以看出,干湿循环的发生使得侧向压力大幅降低,之后随着干湿循环次数的增加侧向压力不断降低,但变化幅度也在逐步减小,而随着上覆压力的施加,侧向压力总体明显提升,初始侧向压力增加的同时使得干湿循环产生的降幅变大,达到稳定的时间也有所变化。干湿循环使得膨胀土不断胀缩破坏土体颗粒排列与土体结构,强度降低,对膨胀力与土压力都有所影响,一般在经历 6 次干湿循环后试样内部的结构也

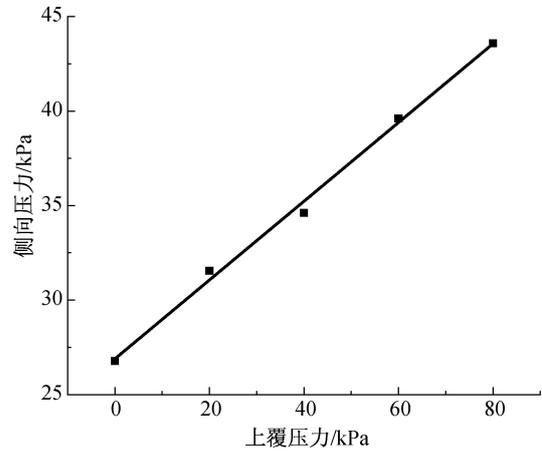


图 2 侧向压力随上覆土层压力变化规律

Fig. 2 Variation law of lateral pressure with vertical pressure

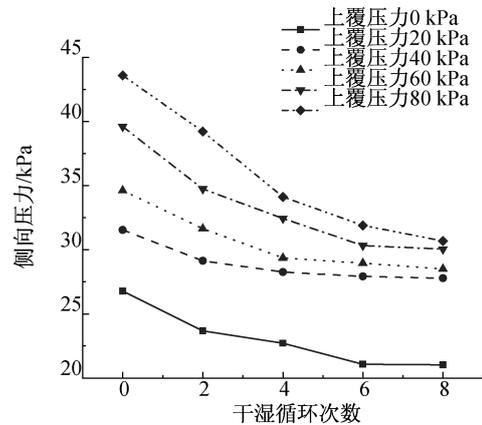


图 3 不同上覆压力下侧向压力随干湿循环变化规律

Fig. 3 Variation law of lateral pressure with dry-wet cycle under different vertical pressures

趋于稳固,侧向压力基本达到稳定状态。

3.2 侧向应变控制下侧向压力变化规律

3.2.1 侧向应变对侧向压力的影响

上覆压力为零时侧向应变与侧向压力的关系见图 4,可以发现,侧向应变在开始的小范围内会使侧向压力产生骤降。相比侧限情况,微小的侧向应变都可以使得侧向压力大幅降低,因为侧向应变的出现使得试样产生了更多的吸水膨胀变形,消耗了部分膨胀潜势,使侧向膨胀力减弱,同时侧向变形使得土压力介于静止土压力与主动土

压力之间而有所减弱。但这种影响随着侧向应变的增加在逐渐降低。在一些裂缝或临空面处,侧向应变的产生会使得局部侧向压力减少,引发内力平衡变化,可能会是影响膨胀土边坡失稳的主要原因。

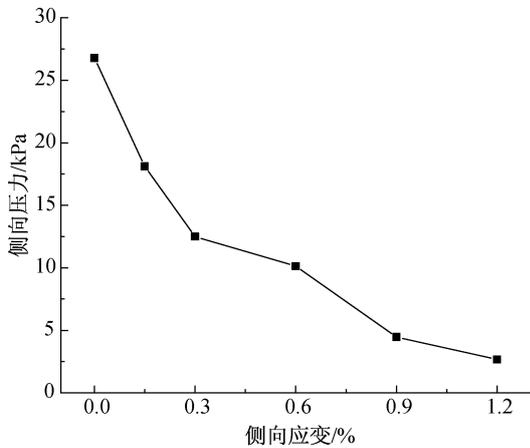


图4 侧向压力随侧向应变变化规律

Fig. 4 Variation law of lateral pressure with lateral strain

3.2.2 上覆土层压力对侧向压力的影响

图5为不同侧向应变下侧向压力与上覆压力的关系,发现上覆压力与侧向压力依旧呈线性关系,侧向应变的增加虽然使得侧向压力减少,但随上覆压力的变化规律没有明显改变。因为上覆压力的增加是通过约束竖向膨胀的方法以保留更多膨胀潜势,侧向应变的增加是通过侧向膨胀消耗膨胀潜势,相互之间基本没有较大的关联与影响。

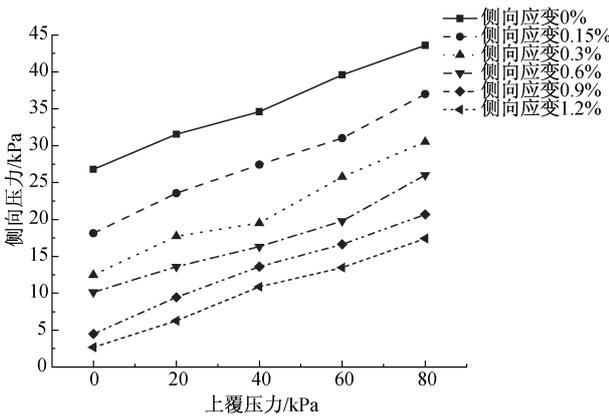


图5 不同侧向应变下侧向压力随上覆压力变化规律

Fig. 5 Variation law of lateral pressure with overlying pressure under different lateral strains

3.2.3 干湿循环对侧向压力的影响

上覆压力为零时不同侧向应变下干湿循环次数与侧向压力的关系见图6,可以看出,侧向压力均随着干湿循环次数的增加而减小,在6次循环时基本达到稳定。相同干湿循环次数下,侧向压力

随侧向应变的增加而减小。侧向应变达到0.9%时,干湿循环对侧向膨胀的影响大幅削弱,可能是因为足够的侧向膨胀增加了土体的孔隙体积,与干湿循环一样,破坏了土体结构,使得干湿循环引起的胀缩对于土体结构的破坏减少,影响变小。而在没有上覆压力的情况下,土体自重引起的土压力较小,基本不产生影响。

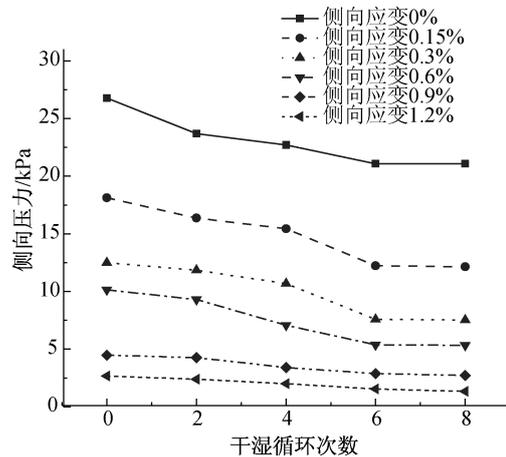


图6 不同侧向应变下侧向压力随干湿循环变化规律

Fig. 6 Variation law of lateral pressure with dry-wet cycle under different lateral strains

3.2.4 不同侧向应变与上覆压力下侧向压力随干湿循环变化规律

在施加上覆荷载后,不同侧向应变下干湿循环次数与侧向压力的关系又有了一些变化。图7与图8为上覆压力为20 kPa与80 kPa时的侧向压力变化情况,从图中可以看到,上覆压力为20 kPa时,除侧向应变为零时经过8次干湿循环后侧向压力基本稳定外,侧向应变大于零时经过8次干湿循环

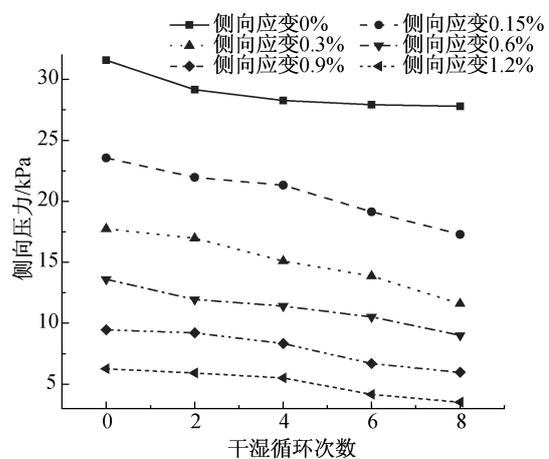


图7 上覆压力20 kPa下侧向压力随干湿循环变化规律

Fig. 7 Variation law of lateral pressure with dry-wet cycle under overburden pressure of 20 kPa

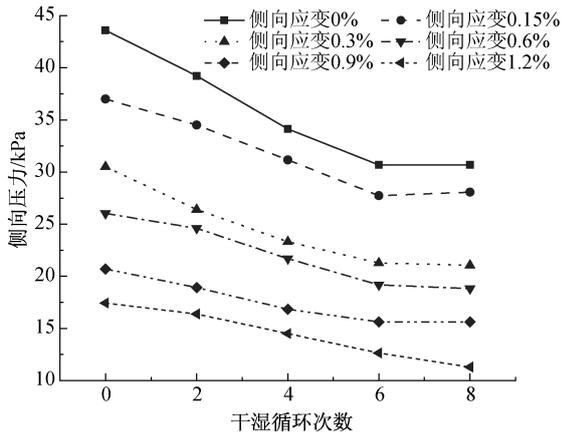


图 8 上覆压力 80 kPa 下侧向压力随干湿循环变化规律
Fig. 8 Variation law of lateral pressure with dry-wet cycle under overburden pressure of 80 kPa

环后侧向压力仍在降低。当上覆压力为 80 kPa, 只有侧向应变为 1.2% 时经过 8 次干湿循环后侧向压力仍在降低。总的趋势是随着上覆压力的增加, 侧向压力达到稳定的干湿循环次数逐渐减少。

这可能是因为上覆压力的施加抑制了试样的膨胀变形, 干湿循环过程中土体的结构变化更小, 侧向压力达到稳定的干湿循环次数逐渐减少。

为探究侧向压力在不同条件的变化规律, 以不同状态下侧向压力相对于初始没有改变时的侧向压力的变化幅度作为侧向压力绝对变化率, 具体结果见表 2, 可以发现, 在现有的变化范围内, 侧向应变对侧向压力的改变最为明显, 上覆压力次之, 干湿循环次数的影响相对较小。对于膨胀土

表 2 不同条件下侧向压力绝对变化率

Tab. 2 Absolute change rate of lateral pressure under different conditions

干湿循环次数	侧向应变/%	侧向压力绝对变化率/%				
		上覆压力 0 kPa	上覆压力 20 kPa	上覆压力 40 kPa	上覆压力 60 kPa	上覆压力 80 kPa
0	0	0.0	17.8	29.2	47.9	62.8
	0.15	-32.3	-12.1	2.4	15.8	38.2
	0.3	-53.4	-33.8	-27.2	-3.8	13.9
	0.6	-62.1	-49.2	-39.1	-26.1	-2.8
	0.9	-83.3	-64.7	-49.3	-37.9	-22.7
	1.2	-90.0	-76.6	-59.4	-49.7	-34.9
2	0	-11.6	8.8	18.1	29.7	46.4
	0.15	-38.9	-18.0	-5.1	11.3	28.8
	0.3	-55.8	-36.7	-32.3	-16.0	-1.4
	0.6	-65.2	-55.4	-43.2	-31.8	-8.1
	0.9	-84.1	-65.6	-51.6	-47.1	-29.4
	1.2	-91.1	-77.9	-62.7	-53.4	-38.8
4	0	-15.2	5.5	9.7	21.1	27.4
	0.15	-42.3	-20.4	-10.8	2.6	16.3
	0.3	-60.1	-43.6	-36.5	-23.4	-13.0
	0.6	-73.6	-57.4	-47.7	-37.8	-19.0
	0.9	-87.3	-68.9	-57.9	-47.0	-37.1
	1.2	-92.5	-79.4	-71.6	-57.9	-45.9
6	0	-21.3	4.3	8.1	13.3	14.6
	0.15	-54.4	-28.6	-21.8	-7.7	3.5
	0.3	-71.7	-48.2	-43.8	-29.5	-20.6
	0.6	-79.9	-60.7	-57.4	-44.2	-28.4
	0.9	-89.2	-75.0	-65.0	-52.3	-41.6
	1.2	-94.2	-84.5	-73.7	-63.3	-52.8
8	0	-21.3	3.7	6.5	12.2	14.6
	0.15	-54.7	-35.5	-23.4	-8.5	4.8
	0.3	-71.9	-56.7	-46.4	-32.4	-21.4
	0.6	-80.1	-66.3	-58.4	-44.7	-29.7
	0.9	-89.9	-77.7	-66.5	-53.9	-41.6
	1.2	-95.0	-86.9	-75.2	-65.9	-57.8

边坡来说,干湿循环发生在大气影响深度内,随着深度增加,上覆压力增加,而侧向变形减少,干湿循环幅度也在减小,所以产生的侧向压力增加,膨胀土边坡更加容易发生失稳破坏。

4 结论

1)在侧限条件下,土体上覆压力的增加会使侧向压力随之增加,两者基本呈线性关系。而干湿循环的进行则会导致侧向压力缓慢降低,直到一定循环次数后达到稳定状态,不再产生较大变化。同时上覆压力的增加会导致干湿循环引起的侧向压力降幅增大,达到稳定的时间变长。

2)不同侧向应变下侧向压力与上覆压力基本呈线性关系,但侧向压力随侧向应变的增加而大幅下降。干湿循环造成的侧向压力降低会随着侧向应变的增加而逐渐减弱。在一些出现侧向应变处,如一些裂缝或临空面附近,局部侧向压力明显减少,影响土体受力状态变化,可能会是影响膨胀土边坡失稳的主要原因。

3)通过定义侧向压力绝对变化率,研究各条件下侧向压力的变化规律,在现有的变化范围内,侧向应变对侧向压力的改变最为明显,上覆压力次之,干湿循环次数的影响相对较小。从侧向压力的角度一定程度上解释了膨胀土边坡浅层破坏的可能原因。

参考文献:

[1] 程展林,龚壁卫. 膨胀土边坡[M]. 北京:科学出版社,2015.
 [2] 韩涛,谭明,潘政安,等. 南宁灰白膨胀土侧向膨胀力室内试验研究[J]. 公路与汽运,2022(06):60-63+67.
 [3] 张永婷,王保田,朱宝平. 击实红黏土与膨胀土的变形

特性对比研究[J]. 科学技术与工程,2013,13(06):1676-1680+1712.
 [4] 康靖宇,王保田,单熠博,等. 水玻璃改良膨胀土的室内试验研究[J]. 科学技术与工程,2019,19(5):267-271.
 [5] 包承纲. 南水北调中线工程膨胀土渠坡稳定问题及对策[J]. 人民长江,2003(5):4-6.
 [6] 程展林,丁金华,饶锡保,等. 膨胀土边坡物理模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2014,36(4):716-723.
 [7] 张震,林宇亮,何红忠,等. 膨胀土边坡的失稳特征与稳定性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(01):104-113.
 [8] 秦禄生,郑健龙. 膨胀土路基边坡雨季失稳破坏机理的应力应变分析[J]. 中国公路学报,2001(01):27-32.
 [9] 张锐,张博亚,郑健龙,等. 改进的膨胀土侧限膨胀试验研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(12):2223-2230.
 [10] 池泽成,陈善雄,戴张俊,等. 合肥重塑膨胀土三向应力-应变规律探讨[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(S1):3659-3665.
 [11] 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(07):2326-2332.
 [12] 陈永艾,刘福春,张会平. 膨胀土干湿循环试验研究[J]. 铁道工程学报,2017,34(08):34-39.
 [13] 余飞,陈善雄,许锡昌,等. 合肥地区膨胀土路基处置深度问题探讨[J]. 岩土力学,2006(11):1963-1966+1973.
 [14] 刘长青,姚宾科. 膨胀土地基的工程勘察与评价[J]. 工程勘察,2017,45(09):11-16.
 [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(02):171-180.
 [16] 谢云,陈正汉,孙树国,等. 重塑膨胀土的三向膨胀力试验研究[J]. 岩土力学,2007(08):1636-1642.

(责任编辑 王利君)