

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2015.02.010

干湿循环机制下风化砂改良膨胀土的收缩特性

杨俊^{1,2}, 童磊^{1,2}, 张国栋², 唐云伟³

(1. 三峡大学三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002;
2. 三峡大学土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 宜昌市交通运输局, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 为研究风化砂改良膨胀土的收缩指标在干湿循环作用下的变化规律, 采用收缩仪对经历不同干湿循环次数的掺砂改良膨胀土试样进行收缩试验, 探究试样的线缩率、体缩率、收缩系数、缩限及胀缩总率在干湿循环作用下的变化特征及机理, 建立不同干湿循环次数下掺砂改良膨胀土的缩限计算公式。试验结果表明: 线缩率及体缩率随干湿循环次数的增加而逐渐减小, 经过4次干湿循环作用后二者基本趋于稳定, 且风化砂掺量由0增至20%时, 线缩率及体缩率的降低幅度最大; 随着干湿循环次数的增加, 收缩指数呈指数函数降低, 在4~5次干湿循环后, 收缩系数基本趋于稳定, 缩限随干湿循环次数的增加呈二次函数形式增加, 且随着风化砂掺量的增加, 干湿循环作用下缩限的增加幅度逐渐减小; 胀缩总率随着干湿循环次数的增加先逐渐降低后趋于稳定, 在干湿循环作用下通过掺入风化砂, 可以有效降低土体的胀缩总率, 并使之达到路基填土的标准。

关键词: 干湿循环; 膨胀土; 风化砂; 收缩指标; 胀缩总率

中图分类号: TU443 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2015)02-0150-06

Shrinkage characteristics of expansive soil improved with weathered sand through wet-dry cycles

YANG Jun^{1,2}, TONG Lei^{1,2}, ZHANG Guodong², TANG Yunwei³,

(1. Collaborative Innovation Center of Geological Hazards and Ecological Environment in Three Gorges Area in Hubei Province, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Civil and Architectural Institute, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
3. Yichang Transport Bureau, Yichang 443000, China)

Abstract: Using the contractometer, shrinkage experiments were performed on expansive soil improved with weathered sand through wet-dry cycles to study the variation law of the shrinkage indexes of the improved expansive soil. Based on investigation of the changing characteristics and mechanism of the linear shrinkage rate, volumetric shrinkage rate, shrinkage coefficient, shrinkage limit, and expansion-shrinkage ratio of experimental specimens through wet-dry cycles, a formula for calculation of the shrinkage limit of the improved expansive soil with different numbers of wet-dry cycles was established. Some conclusions are drawn from the test results: the linear shrinkage rate and volumetric shrinkage rate gradually decreased with the increase of the number of wet-dry cycles, and tended to be stable after four wet-dry cycles, with maximal reductions occurring when the mixed amount of weathered sand increased from 0 to 20%; the shrinkage coefficient decreased exponentially with the increase of the number of wet-dry cycles, and tended to be constant after four or five wet-dry cycles; the shrinkage limit increased by a quadratic function with the numbers of wet-dry cycles, and the increment of the shrinkage limit gradually decreased with the increase of the mixed amount of weathered sand through wet-dry cycles; the expansion-shrinkage

ratio gradually decreased and tended to be stable with the increase of the number of wet-day cycles, and the value of the expansive soil decreased significantly by mixing with weathered sand, which allowed the expansive soil to meet the standard of embankment filling.

Key words: wet-dry cycle; expansive soil; weathered sand; shrinkage index; expansion-shrinkage ratio

膨胀土作为一种典型的高塑性黏土,具有浸水强度降低、失水裂隙发育以及反复胀缩变形等不良工程特性^[1]。由于膨胀土含有大量亲水性黏土矿物,因此其工程性质对环境的干湿变化尤为敏感;当其失水干燥时,体积急剧收缩,极易造成路基的不均匀沉陷及路面板断裂,同时产生的干缩裂缝会导致路基抗渗性降低;当其吸水体积膨胀时,会造成路面波浪变形、溅浆冒泥等。

膨胀土的收缩指标包括:线缩率、体缩率、收缩系数、缩限及胀缩总率,是进行膨胀土路基设计的重要参数。目前,国内外很多专家学者对膨胀土在干湿循环作用下的收缩指标变化规律进行了大量研究。例如赵艳林等^[2]对干湿循环后的南宁膨胀土进行的一系列胀缩试验表明,随着干湿循环次数的增加,膨胀土的线缩率、体缩率及收缩系数均呈指数函数形式逐渐减小,且在前 3 次干湿循环过程中,三者的降低幅度最大。陈亮等^[1]通过对河南新乡膨胀土在干湿循环过程中的体积变形特性研究得出:试样径向收缩随着干湿循环次数的增加而逐渐增大,且在干湿循环过程中,试样的径向变化幅度大于轴向变化幅度。吴华等^[3]采用常规收缩仪,对南水北调过程中的重塑膨胀土进行了收缩试验,发现在干湿循环作用下,重塑土的线缩率及体缩率逐渐减小、缩限逐渐增大,且都具有不可逆性,当干湿循环进行至 5 次后,各项指标均趋于稳定。上述研究多数都是研究原状土或重塑土,对干湿循环作用下的改良膨胀土收缩指标变化规律研究得较少,而 JTG D30—2004《公路路基设计规范》^[4]中明确规定:不允许将未经改良的膨胀土直接用作路基填料,因此大多数研究对实际工程的指导意义不强,同时多数研究只是局限在一个或几个收缩指标的研究上,并未对所有收缩指标进行全面的^[5]。

笔者结合湖北省宜昌市小溪塔至鸦鹊岭一级公路改建工程中用到的风化砂改良膨胀土这一新的改良方法,通过干湿循环作用后一系列的收缩指标试验,研究干湿循环作用下风化砂改良膨胀土的收缩指标变化规律,以为该工程的后续监测提供理论依据,同时也为这种新改良方法的推广奠定基础。

1 试验材料

试验用土为湖北省宜昌市小溪塔至鸦鹊岭一级公路某施工段工地的灰白膨胀土,粒度组成(质量分数)如下:黏粒组(<0.005 mm)含量为 17.14%;粉粒组(0.005 ~ 0.075 mm)含量为 56.28%;砂粒组(0.075 ~ 2.000 mm)含量为 26.58%^[6];液限为 70.53%,塑限为 24.09%,塑性指数为 46.44,缩限为 7.21%,自由膨胀率为 43%,相对密度为 2.66。

试验所用风化砂为土黄色细砂,取样深度为 0.5 ~ 2.0 m,天然含水率为 13.64%,天然密度为 1.65 g/cm³,相对密度为 2.46,活性指数为 0.31,不均匀系数为 2.84,曲率系数为 0.86,级配曲线如图 1 所示。

2 试验方案

风化砂掺量 α 按 0、10%、20%、30%、40%、50% 设计^[6],不同风化砂掺量下的试样均是在各自的最佳含水率及最大干密度下采用静压法压制成型,收缩试验采用 SS-15 型土壤收缩仪进行。

2.1 干湿循环过程

试样在烘箱中干燥,直至完全烘干,烘干时的温度控制为 45℃;试样的增湿过程在室温下进行,将成型后的试样固定在定制的多孔板中,采用直接浸水法使试样吸水饱和,此为 1 次干湿循环。

2.2 收缩试验

将干湿循环后的试样在收缩仪上安装好并记录下百分表的初始读数,试验初期,间隔 1 h 测记百分表读

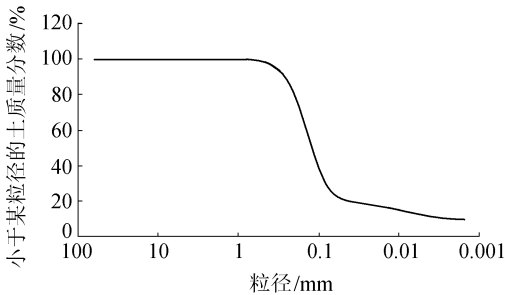


图 1 风化砂级配曲线

Fig. 1 Particle-grading curve of weathered sand

数,同时称量收缩仪及试样的整体质量。48 h 后,间隔 6 h 记录一次百分表读数和整体的质量,待 2 次百分表读数不变时即完成试样的收缩,取出试样,在烘箱中烘干并称量干土质量。

结合大量已有的试验研究成果及试验中干湿循环后试样收缩指标的实际变化规律,本文将干湿循环次数拟定为 5 次。

3 试验结果分析

3.1 干湿循环作用对线缩率及体缩率的影响

试样失水收缩到达缩限时,高度方向的收缩量与试样原高度之比为线缩率,体积收缩量与试样原体积之比为体缩率。线缩率及体缩率均是衡量试样收缩变形程度的重要指标。

定义第 i 次干湿循环后试样的线缩率 e_{sLi} 、体缩率 e_{si} 分别为

$$e_{sLi} = \frac{H_0 - H_i}{H_0} \times 100\% \qquad e_{si} = \frac{V_0 - V_i}{V_0} \times 100\%$$

(1)

式中: H_i ——第 i 次干湿循环后,试样到达缩限时的高度,mm; H_0 ——试样的初始高度,mm; V_i ——第 i 次干湿循环下收缩试验结束后,试样烘干时的体积, cm^3 ; V_0 ——试样的初始体积, cm^3 。

不同干湿循环次数后,试样的线缩率、体缩率和收缩系数见表 1。

表 1 干湿循环作用后改良膨胀土的线缩率、体缩率和收缩系数

Table 1 Linear shrinkage rate, volumetric shrinkage rate, and shrinkage coefficient of improved expansive soil after wet-dry cycles

干湿循环 次数	线缩率/%					
	$\alpha=0$	$\alpha=10\%$	$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=50\%$
0	1.56	1.02	0.68	0.55	0.48	0.41
1	1.34	0.82	0.59	0.48	0.41	0.30
2	0.98	0.58	0.45	0.34	0.32	0.18
3	0.73	0.50	0.32	0.28	0.22	0.15
4	0.60	0.43	0.28	0.24	0.18	0.11
5	0.53	0.38	0.25	0.22	0.17	0.11

干湿循环 次数	体缩率/%					
	$\alpha=0$	$\alpha=10\%$	$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=50\%$
0	3.13	2.83	2.53	2.38	2.21	1.91
1	2.04	1.98	1.85	1.82	1.70	1.52
2	1.76	1.63	1.33	1.20	1.18	1.12
3	1.54	1.36	1.10	0.95	0.83	0.82
4	1.22	1.10	0.95	0.85	0.75	0.64
5	1.12	1.02	0.87	0.81	0.72	0.63

干湿循环 次数	收缩系数					
	$\alpha=0$	$\alpha=10\%$	$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=50\%$
0	0.51	0.49	0.47	0.39	0.30	0.27
1	0.40	0.36	0.32	0.28	0.21	0.20
2	0.33	0.28	0.27	0.21	0.16	0.16
3	0.27	0.21	0.22	0.19	0.14	0.13
4	0.23	0.18	0.16	0.16	0.12	0.11
5	0.21	0.16	0.15	0.14	0.12	0.10

由表 1 可知:(a) 试样的线缩率和体缩率随干湿循环次数的变化规律基本相同,都随干湿循环次数的增加而逐渐减小,最后趋于稳定。(b) 在相同的风化砂掺量下,干湿循环 0~2 次过程中试样的线缩率及体缩率降低速度最快。主要是因为干湿循环作用下,试样中的黏土矿物逐渐“失活”^[7],水胶黏接力减弱,试样在收缩过程中,颗粒间由于缺少有效黏结而导致裂隙逐渐发育,土颗粒间的间距逐渐增大,当试样的含水率到达缩限时,由于土体中孔隙的增多,试样在轴向及径向上的收缩量逐渐减小,而在试验操作过程中亦发现在前 2 次干湿循环过程中,试样的裂隙发育速度比后几次干湿循环时快。在干湿循环 0~2 次过程中,原状土的线缩率及体缩率降低量最大,线缩率降低量达 0.58%,占到了线缩率总降低幅度的 56%,体缩率降低量达 1.37%,占到了体缩率总降低幅度的 68%。(c) 当干湿循环次数继续增加时,试样的线缩率及体缩率降低

速度逐渐减小,干湿循环 4 次后,线缩率及体缩率基本保持不变。这是因为干湿循环 2 次后,试样裂隙的发育速度逐渐放缓,孔隙率的增加速度逐渐放慢,当干湿循环 4 次后裂隙数目基本趋于稳定,因此试样的线缩率及体缩率降低幅度逐渐减小并趋于稳定。(d)在同一干湿循环次数下,试样的线缩率及体缩率随着风化砂掺量的增加而逐渐减小,当风化砂掺量由 0 增至 20% 时,二者的降低幅度最大,此时各干湿循环次数下的线缩率降低幅度达 65% 以上,体缩率降低幅度达 35% 以上。这主要是因为风化砂掺入后降低了试样黏土矿物的含量,使试样的收缩性能减弱^[8]。

3.2 干湿循环作用对收缩系数的影响

收缩系数是指试样在收缩前期,含水率每减少 1% 时的垂直收缩率,是表征土体收缩变形能力的重要指标之一。不同干湿循环次数后,风化砂改良膨胀土的收缩系数见表 1。

在相同的风化砂掺量下,试样的收缩系数随着干湿循环次数的增加而逐渐减小,干湿循环 4 次后收缩系数趋于稳定。

第 1 次干湿循环后,试样的收缩系数降低量最大,例如 $\alpha=20\%$ 时,收缩系数降低了 0.15,占总降低幅度的 47%。这是因为在干湿循环 1 次后土体中黏土矿物大量“失活”,因而土颗粒间的联结减弱,并在分子力作用下形成较大的土团粒,导致颗粒排列的定向性降低,同时在干湿循环作用下由于裂隙的开展,孔隙率增加,造成土颗粒间的胶结联结比例降低,因此试样的收缩变形能力急剧下降,收缩系数大幅度减小^[9]。当干湿循环次数继续增加时,试样收缩系数的降低速度逐渐减小,且在 4~5 次干湿循环后收缩系数基本趋于稳定。这说明干湿循环的继续进行,对土颗粒的定向排列及胶结联结的影响程度逐渐降低,当干湿循环进行到一定次数后,土颗粒的定向性及胶结联结所占的比例重新达到一种新的“低水平”平衡状态,因此试样的收缩系数逐渐趋于稳定。

在相同的干湿循环次数下,随着风化砂掺量的提高,收缩系数逐渐降低。这是因为风化砂掺入后,降低了试样的黏土颗粒含量,导致膨胀物质减少,另一方面由于风化砂颗粒的阻隔,使土颗粒间的胶结联结比例减少,黏结作用减弱,因此收缩系数逐渐降低。当干湿循环次数较大时(4~5 次),可以发现风化砂掺入后试样的收缩系数降低幅度并不明显,例如当风化砂掺量由 0 增至 50% 时,在干湿循环 4 次时收缩系数降低了 0.12,在干湿循环 5 次时收缩系数仅降低了 0.11。干湿循环次数较大时,试样收缩系数的降低主要是由于土颗粒的定向排列变差引起的,掺风化砂所造成的黏土含量降低及胶结比例减小对收缩系数降低的贡献率较小^[10]。

对表 1 中的数据进行回归分析,发现在各风化砂掺量下,试样的收缩系数 C_{sL} 与干湿循环次数 i 可以用指数函数进行较好的拟合:

$$C_{sL} = Ae^{-Bi}$$

(2)

式中: A 、 B ——拟合系数,取值见表 2。

3.3 干湿循环作用对缩限的影响

缩限是指在失水收缩过程中,试样体积停止收缩时所对应的含水率。不同干湿循环次数下掺砂改良膨胀土的缩限见表 3。

表 2 不同风化砂掺量下 C_{sL} 与 i 关系式的拟合系数及相关系数

Table 2 Fitting parameters and correlation coefficients for formula of C_{sL} and i under different mixed amounts of weathered sand			
$\alpha/\%$	拟合系数		R^2
	A	B	
0	0.49	0.18	0.98
10	0.46	0.25	0.97
20	0.43	0.25	0.97
30	0.35	0.20	0.96
40	0.26	0.18	0.90
50	0.25	0.20	0.97

表 3 干湿循环作用后改良膨胀土的缩限
Table 3 Shrinkage limit of improved expansive soil after wet-dry cycles

干湿循环次数	缩限					%
	$\alpha=0$	$\alpha=10\%$	$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=50\%$
0	7.21	7.54	7.91	8.46	8.93	9.38
1	7.99	8.05	8.28	8.70	9.20	9.57
2	8.38	8.49	8.69	8.90	9.30	9.58
3	8.52	8.61	8.78	8.92	9.31	9.60
4	8.62	8.66	8.88	8.95	9.32	9.68
5	8.64	8.70	8.91	8.96	9.33	9.68

前2次干湿循环作用后,试样的缩限提高幅度相对较大,各风化砂掺量下的缩限提高幅度均超过了65%,其中原状土缩限的提高幅度最大(为1.17%),达缩限总提高幅度的82%。随着干湿循环次数的继续增加,缩限提高幅度逐渐变慢,当干湿循环到一定次数时(4~5次),试样的缩限逐渐趋于稳定,产生上述现象的原因是:在干湿循环作用下,由于裂隙的开展,导致试样的孔隙率逐渐增加,在试样的收缩过程中黏土颗粒由于失水体积逐渐减小,增加的孔隙率抵消了很大一部分体积减小量^[11],因此试样在较高含水率下即停止了体积收缩,故缩限逐渐提高。同时试验过程中发现在前2次干湿循环过程中,试样的裂隙发育速度比后几次干湿循环时快,因此前2次干湿循环作用后试样缩限的提高速度较快,当干湿循环次数较大时,试样的微观结构及物理力学性质已较为稳定,因此缩限的变化幅度较小^[12-14]。

干湿循环5次后,试样缩限的提高幅度随着风化砂掺量的增加而逐渐减小。例如原状土的缩限提高1.43%,风化砂掺量30%时缩限提高0.5%,而当风化砂掺量达50%时,缩限仅提高0.3%。这主要是因为随着风化砂掺量的增加,干湿循环后试样的裂隙数量及孔隙率明显减少,试样在干湿循环作用下性质相对稳定,因此缩限的提高幅度逐渐减小^[15]。

对表3中的数据进行数据拟合后发现在各风化砂掺量下试样的缩限 ω_s 与干湿循环次数*i*间符合较好的二次函数关系:

$$\omega_s = Ai^2 + Bi + C$$

(3)

式中:*A*、*B*、*C*——拟合系数,取值见表4。

分别将*A*、*B*、*C*与 α 进行拟合,得

$$A = 0.14\alpha^2 - 0.23\alpha + 0.09$$

$$R^2 = 0.98$$

(4)

$$B = 1.11\alpha^2 - 1.75\alpha + 0.72$$

$$R^2 = 0.98$$

(5)

$$C = 4.33\alpha + 7.17$$

$$R^2 = 0.99$$

(6)

将式(4)、式(5)、式(6)代入式(3)中得

$$\omega_s = (0.14\alpha^2 - 0.23\alpha + 0.09)i^2 + (1.11\alpha^2 - 1.75\alpha + 0.72)i + 4.33\alpha + 7.17$$

(7)

3.4 干湿循环作用对胀缩总率的影响

胀缩总率为试样的线缩率与50 kPa下的有荷膨胀率之和,是反映土体胀缩程度的重要指标。不同干湿循环次数下掺砂改良膨胀土的胀缩总率见表5。

在干湿循环作用下,试样胀缩总率的变化规律与线缩率、体缩率的变化规律大致相同,都随干湿循环次数增加而逐渐降低。第1次干湿循环后,试样的胀缩总率降低量最大,且随着风化砂掺量的增加,这一降低量先增加、后减小。风化砂掺量为10%时胀缩总率降低量最大(达到1.72%),风化砂掺量为40%时胀缩总率降低量最小(仅为0.18%)。干湿循环1次后,胀缩总率的降低速度逐渐变慢,当干湿循环到一定次数时(4~5次),胀缩总率趋于稳定。

在相同的干湿循环次数下,试样的胀缩总率随着风化砂掺量的增加而逐渐减小,且随着风化砂掺量的增加,胀缩总率降低速度逐渐变慢。

4 结 论

a. 干湿循环作用下,掺砂改良膨胀土的线缩率及体缩率变化规律基本相同,均随着干湿循环次数的增加而逐渐降低,且在前0~2次干湿循环过程中二者降低速度最快,干湿循环4次后二者基本趋于稳定。在

表4 不同风化砂掺量下 ω_s 与*i*关系式的拟合系数及相关系数

Table 4 Fitting parameters and correlation coefficient for formula of ω_s and *i* under different mixed amounts of weathered sand

$\alpha/\%$	拟合系数			R^2
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	
0	0.09	0.71	7.28	0.98
10	0.07	0.57	7.56	0.99
20	0.05	0.46	7.91	0.96
30	0.03	0.24	8.47	0.97
40	0.03	0.21	8.93	0.98
50	0.01	0.13	9.38	0.96

表5 干湿循环作用后改良膨胀土的胀缩总率

Table 5 Expansion-shrinkage ratio of improved expansive soil after we-dry cycles %

干湿循环次数	胀缩总率					
	$\alpha=0$	$\alpha=10\%$	$\alpha=20\%$	$\alpha=30\%$	$\alpha=40\%$	$\alpha=50\%$
0	3.39	3.27	2.01	1.27	0.88	0.94
1	2.26	1.55	0.98	0.76	0.70	0.56
2	1.60	1.14	0.70	0.52	0.49	0.35
3	1.15	0.91	0.47	0.43	0.35	0.25
4	0.68	0.60	0.38	0.30	0.22	0.15
5	0.65	0.48	0.30	0.24	0.17	0.10

一定的干湿循环次数下,风化砂掺量由0增至20%时,线缩率及体缩率的降低幅度最大。

b. 随着干湿循环次数的增加,掺砂改良膨胀土的收缩系数呈指数函数形式降低,在第1次干湿循环后降低的幅度最大,在4~5次干湿循环后收缩系数基本趋于稳定。当干湿循环次数较大时,随着风化砂掺量的增加,试样的收缩系数降低幅度不明显。

c. 掺砂改良膨胀土的缩限随着干湿循环次数的增加而呈二次函数形式增大,且在前2次干湿循环作用后,缩限的增长幅度最大;干湿循环5次后,试样缩限的提高幅度随着风化砂掺量的增加而逐渐减小。

d. 掺砂改良膨胀土的胀缩总率随着干湿循环次数的增加先逐渐降低后趋于稳定,在干湿循环作用下,通过掺入风化砂,可以有效降低土体的胀缩总率,并使之达到路基填土的标准。

参考文献:

- [1] 陈亮,卢亮. 土体干湿循环过程中的体积变形特性研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,9(2):229-235. (CHEN Liang, LU Liang. Investigation on the characteristics of volumetric change during the wet-dry cycle of the soil[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering,2013,9(2):229-235. (in Chinese))
- [2] 赵艳林,曾召田,吕海波. 干湿循环对膨胀土变形指标的影响[J]. 桂林工学院学报,2009,29(4):470-473. (ZHAO Yanlin, ZENG Zhaotian, LYU Haibo. Wetting-drying cycle influence on expansive soil deformation[J]. Journal of Guilin University of Technology,2009,29(4):470-473. (in Chinese))
- [3] 吴华,袁俊平,杨松,等. 膨胀土湿胀干缩特性试验[J]. 水利水电科技进展,2012,32(3):28-31. (WU Hua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrink performance of expansive soil[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(3):28-31. (in Chinese))
- [4] JTG D30—2004 公路路基设计规范[S].
- [5] 陈伟志,蒋关鲁,王智猛,等. 分级连续加载条件下原状膨胀土固结变形研究[J]. 岩土力学,2014,35(3):710-716. (CHEN Weizhi, JIANG Guanlu, WANG Zhimeng, et al. Study of consolidation deformation of intact expansive soil under stage continuous loading conditions[J]. Rock and Soil Mechanics,2014,35(3):710-716. (in Chinese))
- [6] 杨俊,黎新春,张国栋,等. 风化细砂改良膨胀土胀缩特性室内试验研究[J]. 河南理工大学学报:自然科学版,2012,31(6):734-739. (YANG Jun, LI Xinchun, ZHANG Guodong, et al. Research on indoor experiment of weathered fine sand modified expansive soil swelling[J]. Journal of Henan Polytechnic University: Natural Science,2012,31(6):734-739. (in Chinese))
- [7] 肖宏彬,张春顺,何杰,等. 南宁膨胀土变形时程性研究[J]. 铁道科学与工程学报,2005,2(6):47-52. (XIAO Hongbin, ZHANG Chunshun, HE Jie, et al. Study on the relationship between deformation and time of Nanning expansive soils[J]. Journal of Railway Science and Engineering,2005,2(6):47-52. (in Chinese))
- [8] 吴珺华,袁俊平,杨松,等. 干湿循环下膨胀土胀缩性能试验[J]. 水利水电科技进展,2013,33(2):62-65. (WU Junhua, YUAN Junping, YANG Song, et al. Experimental study on swell-shrinking performance of expansive soil under wetting-drying cycles[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2013,33(2):62-65. (in Chinese))
- [9] 陆业奇,刘斯宏,傅中志. 土水特征曲线的一个滞回模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,2012,40(2):186-190. (LU Yeqi, LIU Sihong, FU Zhongzhi. A hysteresis model for soil-water characteristic curves[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2012,40(2):186-190. (in Chinese))
- [10] 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(6):1676-1680,1712. (ZHANG Yongting, WANG Baotian, ZHU Baoping. Comparative study on compacting red clay and expansive soil deformation characteristics[J]. Science Technology and Engineering,2013,13(6):1676-1680,1712. (in Chinese))
- [11] 唐朝生,崔玉军, TANG Anh-minh. 土体干燥过程中的体积收缩变形特征[J]. 岩土工程学报,2011,33(8):1271-1279. (TANG Chaosheng, CUI Yujun, TANG A. Volumetric shrinkage characteristics of soil during drying[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2011,33(8):1271-1279. (in Chinese))
- [12] 谭波,郑建龙,张锐. 宁明膨胀土三向胀缩规律室内试验研究[J]. 公路交通科技,2014,31(4):1-6. (TAN Bo, ZHENG Jianlong, ZHANG Rui. Laboratory experimental research of 3D swell-shrink regularity of Ningming expansive soil[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014,31(4):1-6. (in Chinese))
- [13] 高春华,张庆伟. 邯郸非饱和膨胀土的干燥收缩试验研究[J]. 建筑科学,2010,26(1):43-46. (GAO Chunhua, ZHANG Qingwei. Experimental study on drying shrinkage of unsaturated compacted expansive soils[J]. Building Science,2010,26(1):43-46. (in Chinese))
- [14] 唐朝生,施斌,刘春. 膨胀土收缩开裂特性研究[J]. 工程地质学报,2012,20(5):663-673. (TANG Chaosheng, SHI Bin, LIU Chun. Study on desiccation cracking behaviour of expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology,2012,20(5):663-673. (in Chinese))
- [15] 孙德安,张俊然,吕海波. 全吸力范围南阳膨胀土的土-水特征曲线[J]. 岩土力学,2013,34(7):1839-1846. (SUN Dean, ZHANG Junran, LYU Haibo. Soil-water characteristic curve of Nanyang expansive soil in full suction range[J]. Rock and Soil Mechanics,2013,34(7):1839-1846. (in Chinese))