

DOI:10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.03.012

李进前,王起才,张戎令,等. 膨胀土增湿过程中膨胀规律的试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2018(3): 86-94. (LI Jingqian, WANG Qicai, ZHANG Rongling, et al. Experimental study on swelling law of expansive soil during humidification[J]. Hydro-Science and Engineering, 2018(3): 86-94. (in Chinese))

## 膨胀土增湿过程中膨胀规律的试验研究

李进前<sup>1</sup>, 王起才<sup>1,2</sup>, 张戎令<sup>1,2,3</sup>, 张唐瑜<sup>1</sup>, 王天双<sup>1</sup>, 梁柯鑫<sup>1</sup>

(1. 兰州交通大学 土木工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室, 甘肃 兰州 730070; 3. 兰州交通大学 甘肃省道路桥梁与地下工程重点实验室, 甘肃 兰州 730070)

**摘要:** 为了研究膨胀土增湿过程中膨胀规律,取某高速铁路地基膨胀泥岩土样,研究其无荷膨胀率随含水率增大过程中的变化规律。试验结果表明:膨胀土无荷膨胀率随含水率变化过程分为3个阶段,分别为快速膨胀阶段、缓慢膨胀阶段和趋于稳定阶段,得到3个变化节点含水率。然后使用蒙脱石含量、阳离子交换量、自由膨胀率、液限这4个指标作为模型因子,利用主成分分析法得到能够表征膨胀土膨胀能力强弱的膨胀特性Z值。分析3个变化节点含水率与膨胀特性Z值的关系,得到3个含水率与Z值的函数关系式。在实际工程中,可以测定土样的当前含水率和4个指标值,由4个指标值得到膨胀特性Z值,由变化节点含水率与Z值的函数关系计算得到3个变化节点含水率,然后判断土体当前含水率与3个变化节点含水率的关系,就能判断土体在当前含水率下膨胀能力的强弱,这可对实际工程提供一定参考。

**关键词:** 膨胀土; 无荷膨胀率; 含水率; 增湿; 膨胀特性

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-640X(2018)03-0086-09

膨胀土是具有显著吸水膨胀和失水收缩特性的高塑性黏土。膨胀土由于其显著的湿胀干缩性,常常给膨胀土地区的工程建设造成严重破坏<sup>[1]</sup>,所以国内外对膨胀土的膨胀特性方面有较多研究<sup>[2-6]</sup>。黏土矿物是导致膨胀土膨胀的根本原因,且黏土矿物含量越多,其膨胀性越强,对工程的破坏和影响作用也就越大,但是膨胀土发生膨胀的前提就是膨胀土要遇水,膨胀土只有遇水才会发生膨胀,所以研究膨胀土的增湿过程对实际工程具有重要意义,对于膨胀土增湿过程中膨胀土各特性变化规律已进行过许多研究,如丁振洲等<sup>[7]</sup>进行了膨胀土增湿过程中膨胀力变化规律的研究;鲁洁等<sup>[8]</sup>进行了膨胀土增湿变形特性研究;鄢卫平等<sup>[9]</sup>进行了有荷条件下膨胀土分级增湿变形特性的研究。以上学者主要研究了膨胀土的膨胀力和膨胀率与初始含水率、初始干密度等参数之间的规律,而对于土体膨胀率与土体含水率之间的变化规律研究较少。笔者认为膨胀土含水率从零增长至饱和含水率的过程中,其膨胀率会随着土体含水率的变化而变化,但是膨胀率的变化过程不会是线性的,而是会分为几个阶段,并且膨胀率随含水率变化过程中的变化节点含水率与膨胀土自身膨胀特性指标有一定关系。在现有的铁路工程特殊岩土勘察规范<sup>[10]</sup>中,判定膨胀土膨胀潜势时,使用阳离子交换量、自由膨胀率、蒙脱石含量作为判别指标。另外通过前期各指标试验发现,液限对膨胀土判定的敏感程度很高,陈善雄<sup>[11-13]</sup>也认为液限这一指标可以有效帮助判定膨胀土膨胀潜势。所以可以综合阳离子交换量、自由膨胀率、蒙脱石含量、液限这4个指标,利用数据统计分析方法主成分分析法将这4个指标综

**收稿日期:** 2017-09-06

**基金项目:** 教育部长江学者和创新团队滚动支持发展计划资助项目(IRT\_15R29);中国铁路总公司科技研究计划资助项目(Z2015-G001);青年人才托举工程资助项目(2015QNRC001)

**作者简介:** 李进前(1994—),男,甘肃天水人,硕士研究生,主要从事岩石力学试验研究方面的工作。

E-mail: 1697450471@qq.com 通信作者: 王起才(E-mail: 2536507233@qq.com)

合成一个判别指标,这个综合判别指标可以表征膨胀土膨胀能力的强弱,即膨胀土自身膨胀特性指标。

本文选取某高速铁路地基泥岩为研究对象,进行室内无荷膨胀率试验,研究其无荷膨胀率随含水率增加过程中的变化规律,分析得到泥岩膨胀过程变化节点含水率;并在该高速铁路不同里程处选取50处泥岩试样,在室内进行阳离子交换量、自由膨胀率、蒙脱石含量、液限这4个指标的测定,然后利用主成分分析法分析得到能表征该膨胀泥岩膨胀能力强弱的综合判定指标,即膨胀土自身膨胀特性指标。最后分析膨胀土增湿过程中无荷膨胀率的变化节点含水率与膨胀土自身膨胀特性指标之间的关系。

## 1 试验方案

### 1.1 试验思路

要研究膨胀土增湿过程中无荷膨胀率随含水率变化的规律,就要在进行无荷膨胀率试验过程中能准确地测量某一时刻试验土体的含水率,但是按照土工试验方法标准(GB/T 50123—1999)中无荷膨胀率的试验方法,试样是完全浸入水中吸水膨胀,无法测定某一时刻试样的含水率,所以试样应该取“等同”的岩土样。“等同”的岩土样对于原状土是指土源相同、有相同的初始含水率和初始干密度;对于重塑土是指土源相同,以相同的击实方法制备,初始含水率和初始干密度也相同<sup>[7]</sup>。由于原状土试验结果离散性较大,所以本试验采用重塑土样进行。本文利用“等同”试样进行无荷膨胀率试验,以不同初始含水率的试样进行无荷膨胀率试验,测得一系列不同初始含水率下的无荷膨胀率值,这一系列无荷膨胀率值,初始含水率为零时的无荷膨胀率值为该土样最大的无荷膨胀率值,初始含水率为零的无荷膨胀率值减去初始含水率为某一含水率的无荷膨胀率值为膨胀土在此含水率时的无荷膨胀率值,依次类推,可以得到膨胀土在其他含水率时的无荷膨胀率值。

### 1.2 试验过程

(1)制备土样。本试验选取某高速铁路6个不同里程处的地基膨胀泥岩,将其碾碎后过2 mm的筛子,然后将各里程处土样在恒温干燥箱中干燥8 h以上。

(2)配制不同初始含水率的试样。将已干燥的各里程土样分别配制成不同初始含水率的试样,各土试样初始含水率选用0,3%,6%,9%,12%,15%和18%,试样干密度均选用 $1.6 \text{ g/cm}^3$ 。然后将试样击实进环刀之中,保证试样除初始含水率不同之外,其他条件相同;对于含水率为0的试样,由于干密度选用比较低,所以应小心击实进环刀之中。

(3)焖土。各土样制备完成之后焖土48 h以上,将所制的土样用塑料袋包裹,防止水分蒸发,同时使土体充分吸水,含水均匀。

(4)试验。将制备好的试样按照土工试验方法标准要求放入固结仪中进行试验。

(5)加水至土样吸水饱和。记录数据。

(6)待各试样膨胀完成之后,取出试样称重,然后放入恒温干燥箱中烘干,烘干之后再次称量,计算各试样的胀限含水率,对于同一处土样的胀限含水率取各试样平均值。

(7)测得各土样胀限含水率之后,将胀限含水率与18%相差较大的土样,补充中间含水率试样试验。

## 2 试验结果与分析

按照试验方法进行所有试样的无荷膨胀率试验,得到6组土样的无荷膨胀率随含水率变化曲线如图1所示。从图1可以看出:

(1)6组土样的无荷膨胀率均随含水率的增加而增大,当含水率增加至胀限含水率时,无荷膨胀率不再增加。

(2)6组土样的无荷膨胀率随含水率变化关系曲线可以分为3个阶段:第1阶段为快速增长阶段,此阶段无荷膨胀率随着含水率增加快速增长,这是因为此时土样中不含水。当水开始进入土中时,水分子迅速进入黏土矿物晶层,形成水膜并增厚,引起晶格扩张导致土体迅速发生膨胀;第2阶段为缓慢膨胀阶段,这一阶

段无荷膨胀率的增长速度相比前一阶段较为缓慢,因为前一阶段土体已经进水了,土体发生了部分膨胀,水分子进入晶层的速度没有前一阶段快,所以此阶段无荷膨胀率增长速度较前一阶段慢;第3阶段为趋于稳定阶段,此阶段无荷膨胀率增长速度相比上一阶段更为缓慢,此阶段无荷膨胀率已经基本趋于稳定,没有发生较大增长,这是因为此阶段土体进水已经趋于饱和,水分子进入晶层的速度十分缓慢,因此无荷膨胀率增长速度十分缓慢,并且前两个阶段已经完成了大部分膨胀,所以此阶段无荷膨胀率增长程度不大。

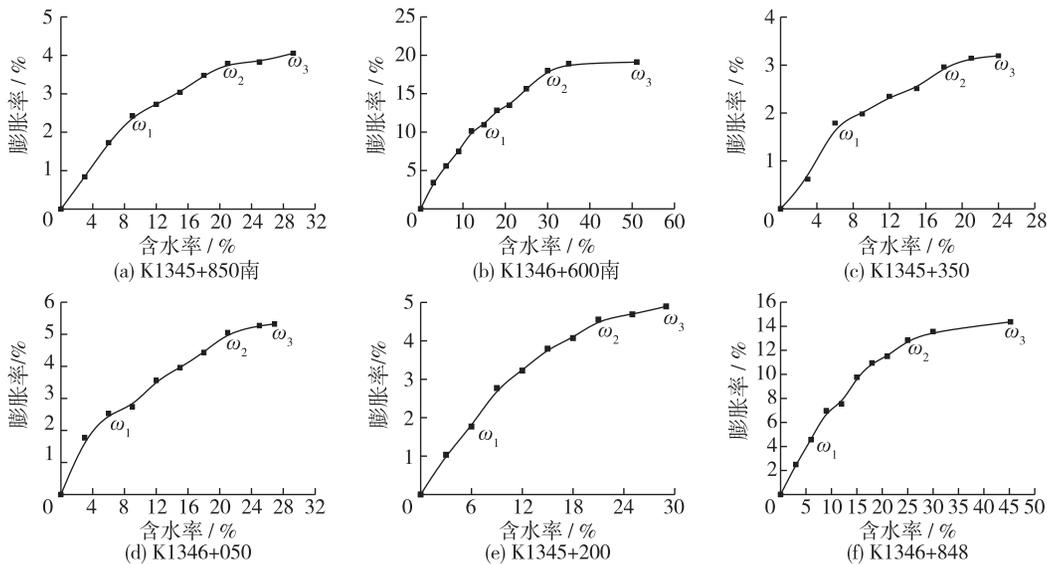


图1 无荷膨胀率随含水率变化曲线

Fig. 1 Changing curve of non-loading expansion rate with moisture content

(3) 由图1(a)可以看出,里程 K1345+850 南处土样在含水率为9%之前无荷膨胀率增长速度较快,且当含水率为9%时,膨胀率占总膨胀率的59.67%;含水率为9%~22%时,土体吸水膨胀速度较前一阶段缓慢,当含水率为22%时,膨胀率占总膨胀率的94.63%;含水率为22%~29%时,土体吸水膨胀是3个阶段中最缓慢的一个阶段,土体膨胀已经趋于稳定,当含水率为胀限含水率(29.25%)时,土样完成了整个膨胀过程。由图1(b)可以看出,里程 K1346+600 南处土样在含水率为12%之前无荷膨胀率增长速度较快,当含水率为12%时,膨胀率占总膨胀率的50.8%;含水率为12%~30%时,土体吸水膨胀速度较前一阶段缓慢,当含水率为30%时,膨胀率占总膨胀率的88.55%;含水率为30%~51%时,土体吸水膨胀速度是3个阶段中最缓慢的一个阶段,土体膨胀已经基本趋于稳定,当含水率为胀限含水率(51.12%)时,土样完成了整个膨胀过程。由图1(c)可以看出,里程 K1345+350 处土样在含水率为6%之前无荷膨胀率增长速度较快,当含水率为6%时,膨胀率占总膨胀率的55.5%;含水率为6%~18%时,土体吸水膨胀速度较前一阶段缓慢,当含水率为18%时,膨胀率占总膨胀率的91.88%;含水率为18%~24%时,土体吸水膨胀速度是3个阶段中最缓慢的一个阶段,土体膨胀已经趋于稳定,当含水率为胀限含水率(24%)时,完成了整个膨胀过程。由图1(d)可以看出,里程 K1346+050 处土样在含水率为6%之前无荷膨胀率增长速度较快,当含水率为6%时,膨胀率占总膨胀率的47.5%;含水率在6%~21%时,土体吸水膨胀速度较前一阶段缓慢,当含水率为21%时,膨胀率占总膨胀率的94.92%;含水率在21%~26%时,土体吸水膨胀速度是3个阶段中最缓慢的,土体膨胀已经基本趋于稳定,当含水率为胀限含水率(26.9%)时,完成了整个膨胀过程。由图1(e)可以看出,里程 K1345+200 处土样在含水率为9%之前无荷膨胀率增长速度较快,当含水率为9%时,膨胀率占总膨胀率的56.44%;含水率为9%~21%时,土体吸水膨胀速度较前一阶段缓慢,在含水率为21%时,膨胀率占总膨胀率的94.63%;在含水率为21%~29%时,土体吸水膨胀是3个阶段中最缓慢的一个阶段,土体膨胀已经趋于稳定,且在胀限含水率(29%)时,完成了整个膨胀过程。由图1(f)可以看出,里程 K1346+848 处土样在含水率为9%之前无荷膨

胀率增长速度较快,当含水率为9%时,膨胀率占总膨胀率的48.52%;含水率为9%~25%时,土体吸水膨胀较前一阶段缓慢,当含水率为25%时,膨胀率占总膨胀率的89.34%;含水率为25%~45%时,土体吸水膨胀速度是3个阶段中最缓慢的一个阶段,土体膨胀已经基本趋于稳定,当含水率为胀限含水率(45.24%)时,土样完成了整个膨胀过程。

快速膨胀阶段泥岩发挥了大部分的膨胀能力,这一阶段泥岩的膨胀率为总膨胀率的0~60%。

缓慢膨胀阶段泥岩的膨胀能力相比快速膨胀阶段较弱,尽管吸收了相同量的水,但泥岩的膨胀能力比快速膨胀阶段表现出来的膨胀能力要弱,这一阶段泥岩的膨胀率为总膨胀率的40%~90%。

趋于稳定阶段膨胀土的膨胀能力最弱,尽管水进入了土体的内部,但是前期土体已经发挥了大部分膨胀能力,所以该阶段泥岩膨胀能力很弱,这一阶段泥岩的膨胀率为总膨胀率的80%~100%。

为统一,规定 $\omega_1$ 为膨胀率是总膨胀率的50%时对应的含水率; $\omega_2$ 为膨胀率是总膨胀率的85%时对应的含水率; $\omega_3$ 为胀限含水率。

### 3 膨胀土膨胀特性指标

在现有的铁路规范<sup>[10]</sup>中对于膨胀土膨胀潜势的判别指标为阳离子交换量、自由膨胀率、蒙脱石含量。还有根据前期的指标试验发现,液限对泥岩膨胀性判定的敏感程度很高,能够准确地判定膨胀土膨胀潜势,所以选取阳离子交换量、自由膨胀率、蒙脱石含量、液限这4个指标在SPSS软件中利用主成分分析法研究分析得到能表征膨胀土膨胀能力强弱的膨胀特性指标。

#### 3.1 主成分分析法及SPSS软件简介

主成分分析法<sup>[14]</sup>是考虑各个指标之间的关系,利用降维的方法将多个指标转换成少数几个不相干的指标,使研究变得简单的一种统计学分析方法。主成分分析法利用降维的思想在损失很少信息的前提下将多个指标转化为几个综合指标,称为主成分。每个主成分均是原始变量的线性组合,且各主成分之间互不相关,这就使得主成分比原始变量具有某些更优越的性能。

SPSS软件是世界上最早的统计分析软件<sup>[15]</sup>,目前已经广泛应用于众多领域和行业,SPSS软件可以进行数据管理、统计分析、图表分析、输出管理等。SPSS统计分析过程包括描述性统计、相关分析、回归分析、对数线性模型、聚类分析、判别分析、生存分析、时间序列分析等几大类,每类中又分好几个统计过程,比如回归分析中又分线性回归分析、曲线估计、Logistic回归、加权估计、非线性回归等多个统计过程。

#### 3.2 利用膨胀土试样指标建立模型

选取该高速铁路地基的不同里程处,不同膨胀程度的泥岩50处,在室内进行4个指标的试验,由于篇幅限制,本文只列出部分泥岩试样的指标试验数据(见表1)。由铁路工程特殊岩土勘察规范<sup>[10]</sup>评判标准可以判定表1中的大部分泥岩为无膨胀土,少部分为弱膨胀土和中膨胀土,但这是基于普通铁路的判别标准,已经不适用于无砟轨道高速铁路<sup>[16]</sup>,所以利用该高速铁路地基泥岩试样可以建立适用于表征该高速铁路地基泥岩膨胀潜势的膨胀特性指标Z值间的关系式。

表1 泥岩指标试验结果

Tab. 1 Experimental results of mud rock indexes

里程	蒙脱石含量/%	自由膨胀率/%	阳离子交换量/(mmol·kg <sup>-1</sup> )	液限/%	铁路工程特殊岩土勘察规范判定结果
K845+567	0.50	47.0	178.35	39.50	弱
K870+045	1.20	35.0	178.64	41.70	无
K1236+059	0.60	17.5	108.16	33.82	无
K1236+215	2.80	57.0	221.47	40.87	弱
K1345+200	2.00	21.5	178.71	34.38	无
K1345+350	0.28	22.5	170.18	31.46	无
K1345+850南	0.24	37.0	136.27	35.62	无

(续表)

里程	蒙脱石含量/%	自由膨胀率/%	阳离子交换量/(mmol·kg <sup>-1</sup> )	液限/%	铁路工程特殊岩土勘察规范判定结果
K1346+050	2.20	19.5	127.66	35.31	无
K1346+600 南	2.31	74.5	280.98	45.67	中
K1346+848	2.51	89.5	230.00	47.44	弱

**3.2.1 泥岩土样主成分分析法适用性检验** 由于泥岩试样4个指标的量纲不一致,需要对4个指标数据进行标准化,然后在SPSS软件中对50处泥岩试样的指标数据进行主成分分析。在进行分析之前,需要进行KMO抽样参数检验和Bartlett球形检验<sup>[17]</sup>,以确定该数据是否适合做主成分分析。KMO抽样参数检验用于比较变量之间偏相关与简单相关系数,当所有变量间的偏相关系数平方和远远小于简单相关系数平方和时,意味着指标间的相关性越强,则越适合做主成分分析。Bartlett球形检验是根据相关系数矩阵的行列式得到的,如果该值较大,那么应该拒绝零假设,认为相关系数矩阵不可能是单位阵,即原始变量之间存在相关性,适合于做主成分分析。检验结果可知,KMO值为0.792(>0.7),Bartlett球形度检验Sig值是0(<0.05),均满足要求,因此适合对泥岩进行主成分分析。

**3.2.2 主成分分析** 利用50处膨胀泥岩试样的4个指标数据在SPSS软件中进行主成分分析,得到成分、特征值与贡献率如表2所示。

表2 方差解释

Tab. 2 Variance explanation

成分	特征值	贡献率/%	累计贡献率/%
1	3.042	76.056	76.056
2	0.559	13.981	90.037
3	0.277	6.930	96.967
4	0.121	3.033	100.000

由表2可以看出,前2个成分的累计贡献率是90.037%,由图2所示碎石图中可以看出各因子的重要程度,图2把因子按照特征值的大小排列,从中可以确定最重要的因子。陡坡对应较大的特征值,作用明显。前两个因子的散点处于陡坡上,后面的因子较为平缓。因此可以从4个指标中提取出2个重要的主成分。

图3为两个主成分因子的因子空间载荷图,由图可知,主成分1中包括阳离子交换量、自由膨胀率和液限这3个指标,主成分2包含蒙脱石含量。蒙脱石是亲水黏土矿物,水分子容易进入晶层之间使晶格扩充,蒙脱石含量越多,膨胀土就表现出更大的膨胀能力。所以主成分2体现的是泥岩膨胀的本质原因。阳离子交换量与黏土矿物含量有着密切关系,土的膨胀性越强,其阳离子交换量越大;自由膨胀率是反映膨胀性直接的指标之一,膨胀土中亲水物质含量越多,其表现出的自由膨胀率也就越大;一般土的膨胀能力越强,其液限也越大;综合分析可以看出成分1的这些指标均与亲水物质有关,也就是说主成分1是膨胀土膨胀强弱的外在表征指标。

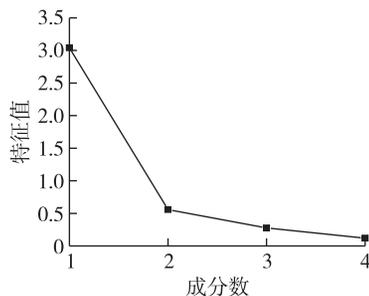


图2 碎石图

Fig. 2 Macadam chart

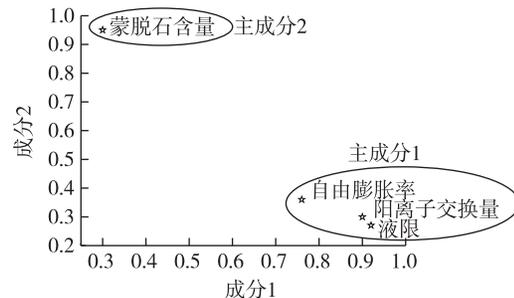


图3 因子空间载荷

Fig. 3 Factor space loading chart

**3.2.3 建立泥岩膨胀特性的表达式** 在SPSS软件中采用回归分析的方法得到如表3所示的成分得分系

数,可以将因子系数作为各指标在成分中的权重,将2个主成分表达为指标的线性形式。可以得到2个主成分的函数表达式:

$$Z_1 = -0.383M + 0.411F_s + 0.395S_{CEC} + 0.456W_1 \quad (1)$$

$$Z_2 = 1.173M - 0.136F_s - 0.086S_{CEC} - 0.185W_1 \quad (2)$$

式中: $Z_1$ 为膨胀土膨胀的外在表征成分; $Z_2$ 为膨胀土膨胀的内在本质指标; $M$ 为蒙脱石含量(%); $F_s$ 为自由膨胀率(%); $S_{CEC}$ 为阳离子交换量(mmol/kg); $W_1$ 为液限(%)。

主成分1和2对应的方差贡献率分别为0.61104和0.28932,将各主成分对应的方差贡献率比例做为权重,通过计算得到膨胀特性表达式如下:

$$Z = 4.789M + 0.236F_s + 0.02S_{CEC} + 0.072W_1 \quad (3)$$

式中: $Z$ 为膨胀土自身膨胀特性指标。

### 3.3 Z值计算式验证

由于 $Z$ 值是表征膨胀土膨胀潜势的指标,而膨胀力是反映膨胀土膨胀能力与膨胀潜力的重要指标<sup>[18]</sup>,所以取50处泥岩试样其中的30处,采用初始含水率为10%,干密度为1.6 g/cm<sup>3</sup>的重塑土试样,测定其膨胀力来验证膨胀特性指标 $Z$ 值计算式对于膨胀土膨胀性强弱判断的准确性。试验数据如图4所示。

由图4可以看出,尽管试验结果有一定的离散性,但仍可以看出膨胀特性指标 $Z$ 值与膨胀力具有正相关关系,相关系数为0.81,拟合程度较好,据此可以说明膨胀特性指标 $Z$ 值可以表征膨胀土的膨胀潜势,验证了计算式的合理性。

表4 膨胀土膨胀特性值和变化节点含水率

里程	膨胀特性 $Z$ 值	$\omega_1/\%$	$\omega_2/\%$	$\omega_3/\%$	里程	膨胀特性 $Z$ 值	$\omega_1/\%$	$\omega_2/\%$	$\omega_3/\%$
K1345+850 南	27.22	7.37	17.93	29.25	K1346+050	20.23	7.86	18.52	26.90
K1346+600 南	48.61	13.29	29.95	51.12	K1345+200	20.70	8.17	18.49	29.25
K1345+350	12.32	6.05	16.80	24.44	K1346+848	41.14	10.38	23.38	45.24

表3 成分得分系数

Tab. 3 Ingredient scoring coefficient chart

指标	成分	
	1	2
蒙脱石含量 $M$	-0.383	1.173
自由膨胀率 $F_s$	0.411	-0.136
阳离子交换量 $S_{CEC}$	0.395	-0.086
液限 $W_1$	0.456	-0.185

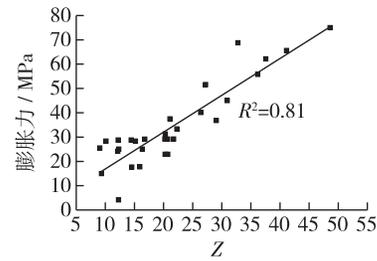


图4 重塑泥岩膨胀力与Z值关系

Fig. 4 Relation chart of expansive force and Z value of remodeled mud rock

## 4 膨胀土节点含水率与膨胀特性关系分析

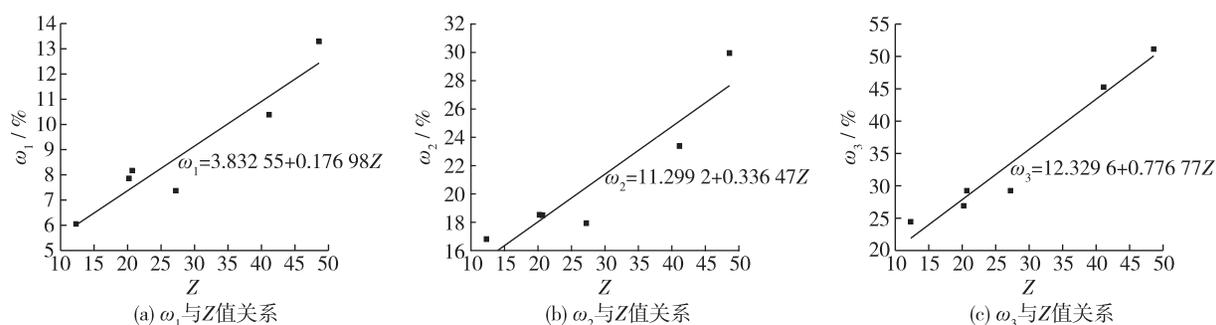
根据分析所得的式(3),可以计算得到能够表征膨胀土膨胀能力的膨胀特性值,将表1中6个土样的4个指标值代入式(3)中,可得到6个土样的膨胀特性值和变化节点含水率如表4所示。由表4数据进行6个土样的含水率与 $Z$ 值的相关分析,得到的关系见图5。

对于不同里程的土样的 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ,在增湿膨胀曲线中的位置不尽相同,而造成这种的差异的原因归根结底是土体本身膨胀性的差异,作为衡量土体自身膨胀能力强弱的膨胀土自身膨胀特性指标 $Z$ 值与 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 有一定内在联系。通过 $Z$ 值与 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 做相关性分析可以得到:

$$\omega_1 = 3.83255 + 0.17698Z \quad (4)$$

$$\omega_2 = 11.2992 + 0.33647Z \quad (5)$$

$$\omega_3 = 13.3296 + 0.77677Z \quad (6)$$

图5  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  与 Z 值关系Fig. 5 Relationship between  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  and Z value

膨胀土膨胀根本原因是土体中进入水,而膨胀土在吸水膨胀过程中的每个阶段,其膨胀强弱是不同的,详细表现为:当  $0 \leq w < w_1$  时,膨胀土膨胀性能较强,对实际工程危害较大; $w_1 \leq w < w_2$  时,膨胀土膨胀性能较前一阶段弱,这是因为膨胀土在第1阶段完成后,膨胀力已经得到了一定程度的释放,因此表现较为缓慢;当  $w_2 \leq w < w_3$  时,膨胀土的膨胀能力已经发挥出绝大部分,膨胀性能在这个阶段较为稳定,对实际工程的危害较小。由此可见,在实际工程中,可以现场取样测定土样的当前含水率和其4个指标,然后根据式(3)得到膨胀土膨胀特性值,然后再由式(4)~(6)得到该土体的节点含水率,再根据测得的土体当前含水率就可以判定土体在当前含水率下的膨胀性强弱,这可对实际工程提供一定参考。

## 5 结 语

(1) 膨胀土增湿过程中,无荷膨胀率随着含水率的增大而增大,其变化过程可以分为3个阶段:快速增长阶段,此阶段膨胀土无荷膨胀率为总膨胀率的0~60%;缓慢增长阶段,此阶段无荷膨胀率为总膨胀率的40%~90%;趋于稳定阶段,此阶段无荷膨胀率为总膨胀率的80%~100%。并规定  $\omega_1$  为膨胀率是50%时对应的含水率; $\omega_2$  为膨胀率是85%时对应的含水率; $\omega_3$  为膨胀结束对应的含水率。

(2) 选取阳离子交换量、自由膨胀率、蒙脱石含量、液限这4个指标利用主成分分析法分析得到了能表征膨胀土膨胀能力强弱的膨胀特性指标 Z 值。

(3) 对膨胀土的变化节点含水率与自身膨胀特性指标值进行相关性分析,得到3个变化节点含水率与膨胀特性 Z 值之间的函数关系。

(4) 在实际工程中,可以测定土样的当前含水率和4个指标值,由4个指标值计算得到膨胀特性 Z 值,由变化节点含水率与 Z 值的函数关系式计算3个变化节点含水率,然后判断土体当前含水率与3个变化含水率的关系,就能判断土体在当前含水率下膨胀性强弱,可对实际工程提供一定参考。

## 参 考 文 献:

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁路工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984. (LIAO Shiwen. Expansive soil and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese))
- [2] 文松松,梁维云,陈永健,等. 弱膨胀土的膨胀特性试验研究[J]. 工程地质学报,2017,25(3):706-714. (WEN Songsong, LIANG Weiyun, CHEN Yongjian, et al. Experimental study of swelling characteristics of weak expansive soil[J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 706-714. (in Chinese))
- [3] 杨果林,邱明明,杨啸,等. 高铁膨胀土新型路堑基床动力特性与参数敏感性[J]. 交通运输工程学报,2016,16(1):63-72. (YANG Guolin, QIU Mingming, YANG Xiao, et al. Dynamic characteristics and parameter sensitivities of new cutting subgrade for high-speed railway in expensive soil area[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 63-72. (in Chinese))

- [4] AVSAR E, ULUSAY R, SONMEZ H. Assessments of swelling anisotropy of ankara clay[J]. *Engineering Geology*, 2009, 105: 24-31.
- [5] ITO M, AZAM S. Determination of swelling and shrinkage properties of undisturbed expansive soils[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2010, 28(4): 413-422.
- [6] ITO M, AZAM S. Engineering characteristics of a glaciolacustrine clay deposit in a semi-arid climate[J]. *Bulletion of Engineering Geology and the Environment*, 2009, 68(4): 551-557.
- [7] 丁振洲, 郑颖人, 李利晟. 膨胀力变化规律试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(7): 1328-1332. (DING Zhenzhou, ZHENG Yingren, LI Lisheng. Trial study on variation regularity of swelling force[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(7): 1328-1332. (in Chinese))
- [8] 鲁洁, 王铁行. 膨胀土增湿变形特性的试验研究[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2009, 41(6): 753-758. (LU Jie, WANG Tiexing. Study on moistening character of expansive soil[J]. *Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 41(6): 753-758. (in Chinese))
- [9] 鄢卫平, 杨和平. 有荷条件下膨胀土分级增湿变形特性试验[J]. *交通科学与工程*, 2015, 31(1): 21-26. (YAN Weiping, YANG Heping. Laboratory research of expansive soil wetting in deformation characteristics under loading conditions[J]. *Journal of Transport Science and Engineering*, 2015, 31(1): 21-26. (in Chinese))
- [10] TB 10038—2012 铁路工程特殊岩土勘察规范[S]. (TB 10038—2012 Special geotechnical investigation of railway engineering specification[S]. (in Chinese))
- [11] 陈善雄, 余颂, 孔令伟, 等. 膨胀土判别与分类方法探讨[J]. *岩土力学*, 2005, 26(12): 1895-1900. (CHEN Shanxiong, YU Song, KONG Lingwei, et al. Study on approach to identification and classification of expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(12): 1895-1900. (in Chinese))
- [12] 段海澎, 陈善雄, 余飞, 等. 新公路膨胀土判别与分类方法对皖中膨胀土的适用性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(10): 2121-2127. (DUAN Haipeng, CHEN Shanxiong, YU Fei, et al. Applicability of recommended classification in specification method for expansive soils in the middle area of Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(10): 2121-2127. (in Chinese))
- [13] 黄健敏, 段海澎, 陈善雄, 等. 江淮膨胀土自由膨胀率特征[J]. *工程地质学报*, 2006, 14(6): 776-781. (HUANG Jianmin, DUAN Haipeng, CHEN Shanxiong, et al. Characteristics of free swelling ratio for expansive soil in middle Anhui Province[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2006, 14(6): 776-781. (in Chinese))
- [14] 林徐达. 基于主成分分析法的饮用水特征性指标分类[J]. *科技创新导报*, 2012(21): 30-32. (LIN Xuda. Classification of drinking water characteristic indexes based on principal component analysis[J]. *Science and Technology Consulting Herald*, 2012(21): 30-32. (in Chinese))
- [15] 杨竞, 童祯恭, 刘玉哲. SPSS 软件对饮用水水质进行主成分分析评价的运用[J]. *环境科学与技术*, 2011, 34(7): 171-174. (YANG Jing, TONG Zhengong, LIU Yuzhe. Principal component analysis and evaluation by SPSS software in drinking water quality assessment[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(7): 171-174. (in Chinese))
- [16] 马丽娜, 严松宏, 王起才, 等. 客运专线无碴轨道泥岩地基原位浸水膨胀变形试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(8): 1684-1691. (MA Lina, YAN Songhong, WANG Qicai, et al. In-situ tests on swelling deformation of mudstone foundation upon soaking under ballastless track of passenger railway line[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(8): 1684-1691. (in Chinese))
- [17] 张文彤. SPSS 统计分析高级教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013. (ZHANG Wentong. Editor in chief of SPSS statistical analysis advanced course[M]. Beijing: Higher Education Press, 2013. (in Chinese))
- [18] 贾景超, 宋日英, 黄志全. 基于膨胀力试验数据的膨胀土膨胀应变模型[J]. *铁道建筑*, 2012(11): 110-111, 135. (JIA Jingchao, SONG Riyang, HUANG Zhiquan. Expansive soil swelling strain model based on expansive force test data[J]. *Railway Engineering*, 2012(11): 110-111, 135. (in Chinese))

## Experimental study on swelling law of expansive soil during humidification

LI Jinqian<sup>1</sup>, WANG Qicai<sup>1,2</sup>, ZHANG Rongling<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Tangyu<sup>1</sup>, WANG Tianshuang<sup>1</sup>, LIANG Kexin<sup>1</sup>  
(1. School of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. Road and Bridge Engineering Disaster Prevention Technology Local Joint National Engineering Laboratory, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Provincial Road and Bridge and Underground Engineering Laboratory, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In mudstone order to study the swelling law of the expansive soil during humidification process, taking the expansive mudstone soil sample from a high-speed railway foundation as an specimen, studies of the change law of non-loading expansion rate with the increase of moisture content are carried out in this paper. The experimental results indicate that the change process of the non-loading expansion rate of the expansive soil with the changes in moisture content can be divided into three stages: the rapid expansion stage, the slow expansion stage and the tend-to-be-stable stage. This study obtains the values of the moisture content in three change nodes, then utilizes the four indexes, that is, montmorillonite content, cation exchange content, free expansion rate and liquid limit, as the model factors, and further uses the main ingredient analytic method to get the  $Z$  value of the expansion characteristic, which can represent the expansion capacity of the expansive soil. This study also analyzes the correlation characteristic, which can represent the expansion capacity of the expansive soil. This study also analyzes the correlation between the moisture content of three change nodes and the  $Z$  value of the expansion characteristic, and gets the function relationships between them. In practical works, the current moisture content of the soil sample and its four indexes can be measured, then the  $Z$  value of the expansion characteristic can be obtained from the four indexes. Furthermore, the moisture content of three change nodes can be calculated through the function relationships between the moisture content of the change nodes and  $Z$  value, and finally we can assess the relationships between the current soil moisture content and the moisture content of three change nodes and judge the strength of the soil mass under the current moisture content, and provide some reference for the practical works.

**Key words:** expansive soil; non-loading expansion rate; moisture content; humidification; expansion characteristic