

吉林省延边地区路基边坡膨胀土孔隙分布特性

鲍硕超^{1,2}, 王 清³, 陈剑平³, 鲍新华¹
(1. 吉林大学 环境与资源学院, 吉林 长春 130021; 2. 吉林建筑大学 土木工程学院, 吉林 长春 130118;
3. 吉林大学 建设工程学院, 吉林 长春 130026)

摘 要: 针对膨胀土边坡稳定性问题,对吉林省延边地区路基边坡膨胀土进行野外调查及室内测试.对膨胀土的粒度成分、矿物成分进行了测试鉴定,并对土样进行了膨胀性试验.此外利用压汞试验对其进行了孔隙结构特征的研究,利用分形几何理论,结合土样的膨胀特性,将膨胀土孔隙分布分成大、中小、微、超微孔隙4个区间.研究表明:经膨胀性测试,研究区5个土样为弱膨胀性土,其中膨胀力较强的土孔隙在超微至微孔隙区间分布相对较多,而膨胀力较弱的土孔隙分布在中与大孔隙区间相对较多.

关 键 词: 膨胀土;孔隙分布;分形几何;压汞试验;膨胀机理

中图分类号: TU 443 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)01-0132-06

Pore Size Distribution of Expansive Soil of the Subgrade Slope in Yanbian Region, Jilin Province

BAO Shuo-chao^{1,2}, WANG Qing³, CHEN Jian-ping³, BAO Xin-hua¹
(1. College of Environment and Resources, Jilin University, Changchun 130021, China; 2. College of Civil Engineering, Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, China; 3. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130026, China. Corresponding author: BAO Shuo-chao, E-mail: baoshuochao@126.com)

Abstract: This research aims at the stability of expansive soil which were collected from the subgrade slope of expansive soil in Yanbian region of Jilin Province. The physicochemical property, soil grain, mineral composition and the expansion property of the specimen were tested. The pore structure characteristics were studied using mercury injection experiment. Furthermore, the soil pores were divided into four size intervals, i. e., big pores, moderate pores, micro-pores and ultra-micro pores by using fractal geometry theory. The study indicated that five specimens were identified as slightly-expansive soil by expansibility testing. Pore sizes of the high expansive soil mainly fall in between micro-pores and ultra-micro pores, while pore sizes of the weak expansive soil mainly fall in between big and moderate pores.

Key words: expansive soil; pore distribution; fractal geometry; mercury injection test; expansion mechanism

膨胀土是一种具有明显的裂隙性、胀缩性、超固结性等工程地质性质的特殊土^[1].膨胀土对水的敏感性极高,与水作用后会发生明显的体积膨胀,力学性能减弱,干燥失水后体积又显著收缩,这种特性给工程建设带来的危害常常是反复的且长期潜在的.膨胀土的膨胀性与其结构有着重要联系,其结构要素主要包括土粒及孔隙的大小、形态及分布特征.而土中的孔隙特征是土的重要特征之一,孔隙的大小与分布影响着土体的众多工程地质性质.因此,对膨胀土进行实验研究,深入讨论其孔隙分布特征以及孔隙特征与膨胀性质之间的联系,对查明膨胀机理及膨胀土工程治理建

设有着重要意义。

本文对位于吉林省东部长白山地区某路基边坡工程展开研究,该边坡位于高速公路路基,在高速公路旁二级公路修建期间发现滑坡体. 由于该路基边坡由膨胀土填筑而成,膨胀土的不良工程地质性质对该边坡造成了很大危害,经历了多次治理—滑坡复活—再治理的过程,一直未能彻底根治. 本次研究对该路基边坡进行了野外取样并进行各项基本物理化学参数试验、矿物及粒度成分测试、膨胀性试验及压汞试验,查明膨胀土的基本特性及孔隙分布特征,进一步分析膨胀土中的孔隙结构对其膨胀性的影响. 为本工程治理及其他膨胀土工程的治理提供理论依据.

1 土样的基本性质

1.1 物理化学性质及物质组成

本研究土样来自吉林省长白山汪清—延吉高速公路段膨胀土路基边坡,其中两处土样取自该边坡滑带处,编号为 Y1 与 Y5;两处土样取于边坡坡脚处,编号为 Y2 与 Y4;另一处土样取于距离边坡较远处的料场,编号为 Y3,该料场曾经作为边坡填土的原料地. 各取样点位置示意图见图 1.

取样后,对各土样进行了粒度及矿物成分的测试,测试结果列于表 1 及表 2. 从表中可以看出,土中的黏粒含量较高,质量分数在 74. 82% ~

84. 56% ;黏土矿物质量分数达 66% ~ 79% ,尤其是土中的蒙伊混层的质量分数达到总矿物量的 53% ~ 66% . 蒙脱石类矿物亲水性很强,是膨胀土产生膨胀的一个重要原因.

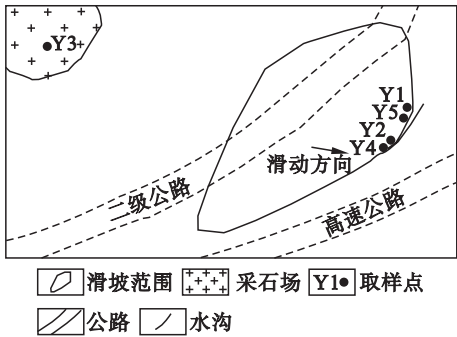


图 1 取样位置示意图
Fig. 1 Sketch map of sampling locations

同时,对土样进行了一系列室内物理化学性质测试,测试结果列于表 3. 从表 3 中可以看出,土样天然含水率在 21. 19% ~ 46. 98% ,天然密度在 1. 78 ~ 1. 92 g/cm³,液限含水率在 53% ~ 68% ,塑限含水率在 27% ~ 35% ,塑性指数在 26 ~ 33. 根据土的工程分类标准 (GBT50145—2007),除 Y5 外,均属于高液限黏土,而 Y5 的液限也较高. 土样的 pH 值在 7. 04 ~ 8. 09,土中的易溶盐质量分数在 0. 062% ~ 0. 096% . 由于取土时期为四月初,该地部分土层尚未融化完全,部分土层中带有冰,冰的存在使得利用烘干法求取的天

表 1 土样的粒度尺寸分布(质量分数)							%
Table 1 Particle size distribution of soil samples (mass fraction)							
土样编号	粒径/mm						
	砂砾组			粉粒组	黏粒组		
	2 ~ 0. 5	0. 5 ~ 0. 25	0. 25 ~ 0. 075	0. 075 ~ 0. 005	0. 005 ~ 0. 002	< 0. 002	
Y1	0. 57	0. 67	0. 84	23. 10	14. 10	60. 72	
Y2	0. 77	0. 67	0. 97	13. 10	17. 90	66. 59	
Y3	0. 35	1. 10	1. 71	15. 34	17. 34	64. 16	
Y4	0. 18	1. 14	1. 16	12. 96	18. 72	65. 84	
Y5	0. 67	0. 56	0. 85	18. 48	19. 48	59. 96	

表 2 土样的矿物成分(质量分数)											%
Table 2 Mineral composition of soil samples (mass fraction)											
土样编号	黏土矿物				原生矿物						
	高岭石	伊利石	蒙伊混层	总量	石英	碱性长石	斜长石	沸石	角闪石	总量	
Y1	9	8	53	70	16	10	4	0	0	30	
Y2	9	4	66	79	11	5	4	0	1	21	
Y3	8	0	59	67	23	3	4	2	1	33	
Y4	8	5	60	73	16	6	5	0	0	27	
Y5	9	6	51	66	21	8	4	0	1	34	

表 3 土样的物理化学性质
Table 3 Physical and chemical properties of soil samples

土样 编号	天然含 水率 %	天然密度 $\rho/(g\cdot cm^{-3})$	干密度 $\rho_d/(g\cdot cm^{-3})$	液限 $w_l/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	液性指数 I_l	pH	易溶盐质量 分数/%
Y1	46.98	1.78	1.50	68	35	33	0.363	8.09	0.080
Y2	40.47	1.80	1.47	64	35	29	0.189	7.87	0.062
Y3	21.19	1.92	1.63	54	27	27	-0.215	7.64	0.078
Y4	37.01	1.90	1.39	53	34	19	0.159	6.96	0.079
Y5	29.59	1.87	1.44	48	27	21	0.123	6.44	0.136

1.2 土样的膨胀性质

为进一步分析该区土样的膨胀性,对所取 5 个土样分别进行了胀缩性试验,包括自由膨胀率、膨胀力、膨胀率及收缩试验.自由膨胀率采用烘干土样;膨胀力试验调整土样在初始含水率均为 25% 的状态下再进行试验,以排除水对其膨胀性的影响;膨胀率试验采用原状土样,在不加荷状态下进行的;收缩试验采用液限下缩限.试验结果列于表 4.

表 4 土样的膨胀收缩性质 Table 4 Expansion characteristic of soil samples				
土样编号	自由膨胀 率/%	膨胀力 kPa	膨胀率 %	体缩率 %
Y1	42	24.11	17.1	33.56
Y2	58	64.07	32.8	48.10
Y3	49	34.59	22.5	38.30
Y4	49	45.39	27.6	47.58
Y5	42	27.29	19.3	34.09

根据表 4 可以看出,试验土样的自由膨胀率在 42%~58%,根据《膨胀土地区建筑技术规程》(GBJ112—87)的规定,应属于弱膨胀性土.但自由膨胀率试验受其试验方法的影响较大,且无法反映土的结构特征及水参与下的膨胀能力,仅可代表土本身的膨胀潜势.而对比土样的矿物含量、黏粒含量等数据,试验土样的膨胀性质应当较强.由于目前对于膨胀土的分类方法仍存在较大争议^[2],因此本工程中土样的自由膨胀率试验结果不能代表土样的绝对膨胀性质,应当针对其他试验综合判定土样的膨胀性质.但无论哪种试验结果,所反映的土样相对膨胀能力都是相似的.综合以上试验结果,5 个土样的膨胀性基本表现为 Y2>Y4>Y3>Y5>Y1,也就是说 Y2 的膨胀性最强,Y4 与 Y3 土样膨胀性居中,膨胀性最弱的为已经滑移之后的 Y5 和 Y1 土样.可见研究区土的膨胀特性是造成该路边坡失稳的一个重要

原因.

2 膨胀土的压汞试验

2.1 试验原理

土的孔隙分布特征是土的重要结构特征之一,很大程度上影响了土体的工程地质性质.本次研究采用压汞试验对所取 3 个原状土样进行了孔隙测定分析.利用 Auto Pore 9500 型全自动压汞仪,对冻干法制好的土样进行试验.由于汞对土颗粒无浸润性,在无压力时不会流入土孔隙中,故利用外加压力使汞进入到大小不同的孔隙中,孔径越小,所需压力越大^[3].外加压力与孔径的关系由式(1)进行计算:

$$p = \frac{2\sigma\cos\theta}{r}.$$
 (1)

式中: p 为外加压力; σ 为导入液体的表面张力,取为 0.485 N/m; θ 为所注液体与固体材料的接触角,取 130°; r 为孔隙半径.

2.2 试验过程

考虑到试验土样含水率大、强度低,结构易破坏,如果进行烘干或风干,土样孔隙结构将发生变化,因此,在试验前先将土样经自制的冷冻真空升华干燥仪进行冻干处理.压汞试验时,称土样质量后,将样品装入膨胀计中,然后将膨胀计放入压汞仪中抽真空,随着膨胀计中真空度的增加,汞进入并充满膨胀计,之后开始加压.试验时装有土样的膨胀计放入压汞仪中进行低压分析,分析结束后取出膨胀计,称取试样质量(膨胀计与低压压入汞的总质量),然后将膨胀剂再次放入高压仓进行高压分析.随着压力由小到大增加,汞先进入土中的大孔隙,然后逐渐进入越来越小的孔隙中.系统自动记录每一级压力下的进汞量,这样就能得到压力-进汞量曲线,利用式(1)将压力换算成孔隙半径,便可以得到孔隙体积随孔径变化的曲

线,从而求得不同孔径所占百分比,即孔径累计分布曲线.

2.3 试验结果

对 5 个原状土样进行了压汞试验,试验结果列于表 5,并绘制了相应孔径下孔隙体积分数的曲线,列于图 2. 由表 5 可以看出,5 个原状土样的孔隙体积、孔隙率及平均孔径的规律均呈现出 $Y2 < Y4 < Y3 < Y5 < Y1$ 的趋势,而比表面积的规律与其相反. 也就是说 $Y2$ 土样中孔隙最多而小, $Y1$ 土样中的孔隙相对少且大.

表 5 土样的孔隙特征				
Table 5 Porous characteristics of soil samples				
土样 编号	孔隙体积分率 ($\text{mL} \cdot \text{g}^{-1}$)	孔隙率 %	平均孔径 μm	比表面积 ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)
Y1	0.213 3	33.066 8	0.111	7.660
Y2	0.117 1	21.096 7	0.043	10.922
Y3	0.141 0	24.788 6	0.062	9.050
Y4	0.126 8	22.389 2	0.054	9.966
Y5	0.167 7	26.395 7	0.078	8.674

由图 2 可以发现,5 个土样的压汞曲线形态相差很大,使 5 个土样所表现出来的性质不同,最明显的即为膨胀力的不同. 结合表 1 的试验结果可发现,膨胀性最强的 $Y2$ 土样其压汞曲线位于最上方,而膨胀性最弱的 $Y1$ 土样其压汞曲线位于最下方.

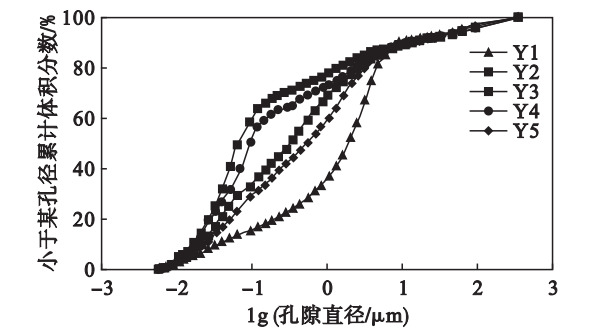


图 2 孔径累计分布曲线

Fig. 2 Cumulative pore size distribution curves

3 孔隙分布分形计算模型

膨胀土的结构特征参数具有复杂性和混沌性,但由前文对土样的孔隙特征测试以及图 2 所示的孔径累计曲线可知,土孔隙特征在一定的区间内不随测量单位的变化发生变化,这个区间即为无标度区间,也就是说土的孔隙在无标度区间内具有自相似性,因此可以用分形理论来描述. 分形几何(fractal geometry)最初是由 Mandelbrot 创

立用来描述无标度复杂自然现象的理论^[4]. 作为一种处理复杂集合问题的非线性方法,近年来被许多国内外学者用以研究土的结构^[5-7]. 由于土的孔隙具有自相似性,可以用分形维数来描述. 根据 Housdroff 维数的定义,设孔隙直径为 d ,则孔隙直径大于 d 的孔隙数目 N 可以表示为

$$N = \int_r^\infty P(d) dd \propto r^{-D}. \tag{2}$$

式中: $P(d)$ 为孔径 d 的分布密度函数; D 为孔隙分形维数.

式(2)是以孔隙数目来计算分形维数的,但实际研究中孔隙数目难以直接测得,因此可转化为以孔隙体积来表示分形维数. 设 $V(d)$ 为直径小于 d 的孔隙体积,将孔隙形态考虑为球体,则有

$$V(d) = \int_0^r \frac{1}{6} \pi r^3 dN \propto d^{3-D}. \tag{3}$$

设 V 为孔隙总体积,则

$$\frac{V(d)}{V} \propto d^{3-D}. \tag{4}$$

因此,孔隙分布的分形维数 D 可以在 $V(d)/V$ 的双对数曲线中求得,若在一定区间内其斜率为 k ,则 $D = 3 - k$.

4 膨胀土的孔隙分布特性

4.1 膨胀土孔隙分布区间划分

土的孔隙分布区间的划分是国内外学者对于土的孔隙结构特征研究中一个重要的方向. 目前国外定义孔径 $d > 0.05 \mu\text{m}$ 为大孔隙, $0.002 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 为中孔隙, $< 0.002 \mu\text{m}$ 为微孔隙. 而中国大部分学者通常以 4, 0.4, $0.04 \mu\text{m}$ 3 个界限粒径将土的孔隙分布划分为大、中、小及微孔隙 4 个区间. 但这个划分方法并未得到所有研究者的承认,对于孔隙分布界限的划分仍没有定论. 刘松玉等^[8]认为孔径 $0.1 \mu\text{m}$ 左右是土中孔隙结构的标度界限. 杨洋等^[6]对广西膨胀土孔径分布曲线研究,从形态上提出以 $10 \mu\text{m}$ 和 $0.1 \mu\text{m}$ 两个粒径将膨胀土孔隙分成大、小、微 3 个分布区间. 王清^[7]根据黄土孔隙分布曲线及分形理论,确定微、小、大孔隙界限依据 0.02, $0.8 \mu\text{m}$ 2 个孔径节点来划分. 本文将针对膨胀土孔隙分布区间做详细研究,并提出针对膨胀土孔隙分布区间的划分.

观察图 2 可以看出,尽管 5 个土样的压汞曲线形态各异,但其均出现了 3 处明显拐点,将曲线分为 4 个区间,在每个区间内土的孔径累计分布

曲线近似于直线. 通过精确计算找出了分形曲线的拐点,其位置表示于图 3. 对于 5 个土样孔隙分布的分形曲线来说,第 1 个拐点出现在 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 左右,因此将小于 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙区间称为区间 1. 分形曲线在区间 1 内为斜率较大的直线,而在第 1 拐点处发生明显变化,孔隙变化进入区间 2. 5 条土样分形曲线第 2 拐点有一定差别, Y1, Y3, Y4 土样的第 2 拐点出现在孔径 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ 左右, Y2 与 Y5 土样的第 2 拐点为孔径 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ 左右,孔隙变化在第 2 拐点处进入区间 3. 对于 Y1, Y3, Y5 曲线,均在孔径 $4\text{ }\mu\text{m}$ 处出现了明显的第 3 拐点, Y2 与 Y4 曲线也在该处其斜率发生轻微变化,因此可以认为土的孔隙变化在 $4\text{ }\mu\text{m}$ 处进入区间 4. 以分形几何理论总结计算的各个土样孔隙分布的分形维数列于表 6.

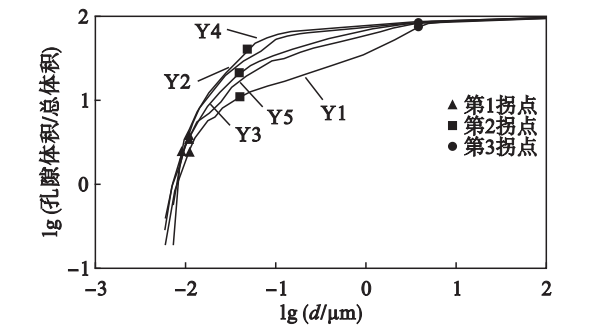


图 3 孔隙直径与孔隙体积累计分形曲线
Fig. 3 Cumulative fractal curves of pore diameter and pore volume

由于不同的折线段为孔隙分布不同的无标度区间,可以认为是土性质发生变化的界限点,线段的拐点相当于各个孔径区间的界限孔径. 因此通过分形几何计算,认为本文膨胀土的孔隙分布区间更接近于前文提到的 $0.04, 0.4, 4\text{ }\mu\text{m}$ 这个界限划分的方法. 但由于 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 左右分形曲线拐点明显,对孔隙分布影响不可忽视,故增加 $0.01\text{ }\mu\text{m}$ 以下这一“超微”孔径界限. 而对于 5 个土样,第 2 拐点位于约 $0.04\sim 0.05\text{ }\mu\text{m}$ 之间,因此针对膨胀土的自身性质并参考以往经验,仍将 $0.04\text{ }\mu\text{m}$ 作为划分微、小孔隙的界限. 而由于 5 个膨胀土样的分形曲线在 $0.04\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 之间均较平直,直线段明显,孔隙分布情况基本无变化,因此原方法中 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 这一区分中、小孔隙的界限粒径将不作为膨胀土孔隙区间划分界限. 因此,综合上述计算及分析,并结合前人对土孔隙界限的划分经验,本次研究将膨胀土孔隙划分为 4 个区间:区间 1,超微孔隙($d\leq 0.01\text{ }\mu\text{m}$);区间 2,微孔隙($0.01\text{ }\mu\text{m} < d \leq 0.04\text{ }\mu\text{m}$);区间 3,中小孔隙($0.04\text{ }\mu\text{m} < d \leq$

$4\text{ }\mu\text{m}$);区间 4,大孔隙($d > 4\text{ }\mu\text{m}$).

表 6 土样的孔隙分布的分形维数特征
Table 6 Fractal dimension characteristic of pore distribution of soil samples

土样 编号	孔径 区间	斜率 k	分形维 数 D	相关 系数 R^2	界限孔径 d/mm
Y1	区间 1	2.029 0	0.971 0	0.959 7	
	区间 2	1.126 8	1.873 2	0.965 5	0.011 1
	区间 3	0.397 6	2.602 4	0.989 8	0.040 3
	区间 4	0.039 5	2.960 5	0.850 5	3.888 2
Y2	区间 1	2.305 0	0.695 0	1.000 0	
	区间 2	1.539 5	1.460 5	0.966 2	0.011 0
	区间 3	0.104 0	2.896 0	0.894 3	0.050 4
	区间 4	0.033 5	2.966 5	0.996 2	3.904 7
Y3	区间 1	1.827 6	1.172 4	0.995 1	
	区间 2	1.378 3	1.621 7	0.985 7	0.009 1
	区间 3	0.286 9	2.713 1	0.961 9	0.040 2
	区间 4	0.040 4	2.959 6	0.985 1	3.891 0
Y4	区间 1	2.239 0	0.761 0	1.000 0	
	区间 2	1.518 3	1.481 7	0.935 2	0.010 5
	区间 3	0.136 9	2.863 1	0.990 2	0.040 1
	区间 4	0.037 5	2.962 5	0.954 2	3.906 2
Y5	区间 1	1.897 0	1.103 0	0.997 2	
	区间 2	1.269 2	1.730 8	0.978 8	0.011 0
	区间 3	0.235 4	2.764 6	0.902 6	0.050 2
	区间 4	0.039 9	2.960 1	0.936 6	3.904 8

4.2 膨胀性质与孔隙分布特征

由上文对膨胀土孔隙分布区间的划分,将各区间孔径的分布情况列于表 7. 由表 7 可知,5 个土样多数孔隙分布在 $0.04\sim 4\text{ }\mu\text{m}$ 的中小孔隙区间,所占体积分数达 $53.56\%\sim 65.78\%$,这也是由该区间孔径范围较大造成的;其次为微孔隙区间,超微孔隙区间分布最少.

膨胀土孔径分布的区间阈值是土性质发生变化的界限孔径,也就是说,在每个区间孔径大小的分布情况与膨胀土的性质密切相关. 由图 3 和表 6 对膨胀土孔隙分布分形维数的讨论,结合表 7 的统计不难看出:5 个土样中超微孔隙数量较少且分形维数较小,孔径级配较差. 而对于膨胀性最强的 Y2 土样,其超微、微孔隙数量在各自区间均大于其他 4 个土样,而这两个区间内的分形维数却均为最小. 说明 Y2 土样,在超微及微孔隙区间内的孔隙较多但孔隙大小分布不均,而在中小孔隙及大孔隙区间内, Y2 土样孔隙数量均较其他土样少,且孔隙分布分形维数最大. 说明 Y2 土样孔隙在小~大区间内分布复杂,孔径级配良好,分布趋于均匀. 与此同时,对于膨胀性最弱的 Y1 土样,在各个区间内恰好与 Y2 土样的分布情况呈

现相反的规律。

表 7 土样的孔径分布情况

Table 7 Pore size distribution of soil samples

土样 编号	不同孔径所占体积分数/%			
	超微	微	中小	大
	<0.01μm	0.01~0.04μm	0.04~4μm	>4μm
Y1	2.461 7	8.590 1	63.641 1	25.307 1
Y2	4.501 7	27.120 7	54.558 7	13.819 0
Y3	3.536 7	17.501 9	62.781 3	16.180 0
Y4	3.901 6	26.720 7	54.558 6	16.819 0
Y5	3.536 7	13.501 9	65.781 4	17.180 0

土中的孔隙分布与膨胀性的强弱有着直接的关系^[9]。由于膨胀土的胀缩性质主要是由亲水性强的蒙脱石类矿物决定,该类矿物易吸水膨胀,失水收缩,颗粒细小,矿物颗粒之间的孔隙也较微小,因此本次研究中在前人对其他类土的孔隙分布区间划分中增加“超微”区间是十分必要的。此外,膨胀土孔隙中的水也与土的膨胀性能密切相关,土中较大的孔隙不易赋存自由水,水多存在于微小孔隙中。因此对土的膨胀性产生影响的主要是土中较小的孔隙,通过上文的分析,可以认为对膨胀土性质起决定性作用的“小-超微”孔隙的影响界限为 0.04 μm 孔径。Y2 土样的微孔隙多而不均,比表面积较大,使得亲水性蒙脱石类矿物能够更大面积地与水接触使土具有膨胀潜势,造成其膨胀性较强;而 Y1 土样中多为中、大孔隙且分布均匀,比表面积较小,赋存自由水的能力及吸附能力均较差,因此其膨胀性较弱。

5 结 论

- 1) 吉林省延边地区路基土具有一定膨胀性,膨胀力在 24.11~64.07 kPa。5 个土样由于取土地点的不同膨胀性有一定差别,膨胀能力表现为 Y2>Y4>Y3>Y5>Y1。路基土的膨胀性是造成边坡失稳的一个重要原因。
- 2) 对 5 个土样进行了压汞试验以分析各自孔隙分布情况,压汞曲线形态差异较大,膨胀性较大的土样曲线呈现上凸形态,膨胀性较弱的曲线呈现下凹形态。并对其进行了分形几何计算,发现膨胀土孔隙分布具有多重分维的特征,不同区间内的分形维数 D 在 0.695 0~2.966 5。
- 3) 通过对膨胀土的孔隙分布特征的研究,参考前人研究经验,并结合膨胀土自身性质,增加

“超微”区间,并将“中、小”孔隙区间合并,将膨胀土孔隙分布区间以 0.01,0.04,4 μm 为界限孔径分别分成超微、微、中小、大孔隙 4 个区间。其中超微~微孔隙区间孔隙分布分形维数较小,孔隙分布情况简单且不均,随孔径的增大,孔隙分布分形维数增大,孔隙分布复杂而均匀。

4) 结合膨胀土的孔隙分布与膨胀性质之间的关系,认为影响膨胀土膨胀性质的界限孔径为 0.4 μm,孔隙多为微孔隙的含蒙脱石类土更容易具有膨胀潜势,而以中、大孔隙为主的土多不易具有膨胀潜势。

参考文献：

[1] 孔令伟,方晓睿,郭爱国. 膨胀土的基本性质与路基工程实践研究现状与展望[C]//第一届全国公路科技创新高层论坛论文集. 北京,2002:155-158.
(Kong Ling-wei, Fang Xiao-rui, Guo Ai-guo. Current state and prospect on fundamental behaviors and subgrade engineering practice of expansive soil[C]// Proceeding of the 1st National Highway Technological Innovation. Beijing, 2002:155-158.)

[2] Li Z Q, Tang C, Hu R L. Experimental research on expansion characteristics of Mengzi expansive soil with water, salt and acid immersion[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 72 (2):363-371.

[3] Webb P A. An introduction to the physical characterization of materials by mercury intrusion porosimetry with emphasis on reduction and presentation of experimental data [M]. Norcross: Micromeritics Instrument Corporation, 2001:1-23.

[4] Mandelbrot B B. The fractal geometry of nature [M]. San Francisco: Freeman, 1982:95-190.

[5] Anand J P, Thammanoon M, Bhaskar C S. Swell and shrinkage strain prediction models for expansive clays[J]. *Engineering Geology*, 2014, 168:1-8.

[6] 杨洋,姚海林,陈守义. 广西膨胀土的孔隙结构特征[J]. 岩土力学, 2006, 27(1):155-158.
(Yang Yang, Yao Hai-lin, Chen Shou-yi. Characteristics of microcosmic structure of Guangxi expansive soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(1):155-158.)

[7] 王清,王剑平. 土孔隙的分形几何研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(4):496-498.
(Wang Qing, Wang Jian-ping. A study on fractal of porosity in the soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(4):496-498.)

[8] 刘松玉,张继文. 土孔隙的分形几何研究[J]. 东南大学学报, 1997, 27(3):127-130.
(Liu Song-yu, Zhang Ji-wen. Fractal approach to measuring soil porosity [J]. *Journal of Southeast University*, 1997, 27 (3):127-130.)

[9] Lin B T, Cerato A B. Prediction of expansive soil swelling based on four micro-scale properties [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2012, 71 (1):71-78.