

标准吸湿含水率对膨胀土进行分类的 理论与实践*

姚海林** 程平 杨洋 吴万平

(①中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; ②中交第二公路勘察设计研究院, 武汉 430052)

摘要 通过一系列膨胀土的物理、力学和化学性质试验, 发现膨胀土的标准吸湿含水率与膨胀土的蒙脱石含量、比表面积、阳离子交换量有良好的线性关系, 也与塑性指数和自由膨胀率有线性相关的趋势, 表明膨胀土的标准吸湿含水率具有明确的物理意义. 塑性指数能很好地反映粒度组成、分散特性和阳离子与黏土矿物的相互作用程度. 因此, 标准吸湿含水率能反映膨胀土的最基本的本质属性. 在一些文献分类成果的基础上, 考虑到对自由膨胀率分类成果的继承性, 提出了以标准吸湿含水率、塑性指数和自由膨胀率 3 个指标对膨胀土进行分类的方法, 其分类指标试验操作简单、设备简单、试验耗时短.

关键词 膨胀土 标准吸湿含水率 塑性指数 自由膨胀率 膨胀土分类

膨胀土的裂隙、膨胀与收缩是与环境变化息息相关的. 环境的变化可以包括由于开挖造成的压力释放、由于温度升高造成的干燥以及由于水分进入或逸出造成的体积增大或缩小. 最重要的因素, 而且对实践工程来说又是关系最大的因素, 就是水对膨胀土的作用. 膨胀土中具有膨胀晶格结构的黏土矿物的存在是膨胀土具有胀缩特性的物质基础, 膨胀土最重要的黏土矿物是蒙脱石、伊利石和高岭石, 它们都是晶质含水硅酸铝. 蒙脱石是决定膨胀土性质的主要黏土矿物, 蒙脱石在含量增加时黏性土出现膨胀, 而黏土其他矿物不发生膨胀或仅发生有限膨胀. 蒙脱石是指除蛭石以外所具有膨胀晶架的黏土矿物群, 也是一种特定的矿物. 从矿物学观点来看, 膨胀的大小取决于黏土矿物的种类和含量、它们的可交换阳离子、水态的电解质含量以及内部结构^[1]. 黏土矿物专家称, 任何黏土的膨胀潜势都可

2004-06-07 收稿, 2004-09-27 收修改稿

* 交通部西部交通建设科技资助项目(批准号: 2002 318 00014)

** E-mail: hlyao@whrsm.ac.cn

以通过鉴定该黏土的组成矿物加以评价^[2]. 国内外膨胀土分类方法很多, 所选用的指标和标准也不相同. 各行业各自选用了一些与膨胀土的膨胀和收缩直接或间接有关的一些指标对膨胀土进行了分类, 如自由膨胀率、液限、塑性指数、小于 2 μm 的黏粒含量、蒙脱石含量、比表面积、阳离子交换量、胀缩特性指标等等, 导致分类结果也有较大的区别. 单自由膨胀率指标分类法^[3]方法简单, 但存在很多弊端. 一是自由膨胀率实验方法不一致, 二是自由膨胀率对膨胀土进行分类经常产生误判^[4]. 作图法也为很多人采用, 比如南非威廉姆斯分类法^[5]、塑性图分类法^[6]和风干含水量分类法^[7]. 《土的分类标准》(GBJ145-90)只利用塑性图给出了判别标准. 李生林虽然给出了分类标准, 但采用的是 10 mm 液限, 实际中很难加以应用. 南非威廉姆斯分类法简单明了, 但采用分类指标为 $< 2 \mu\text{m}$ 黏粒含量百分比与塑性指数, 利用南非威廉姆斯分类对膨胀土进行分类, 结果明显偏高, 且理论依据不是很明确. 风干含水量分类法有一定的理论基础, 但风干含水量试验条件过于宽松, 结果的离散性太大. 美国垦务局 USBR 法^[8,9]、柯尊敬的最大胀缩指标分类法^[10]和印度黑棉土分类法^[10]都是采用多指标分类法, 这些分类方法有些采用了一些不是独立的因子, 如天然含水量、天然孔隙比、胀缩特性指标等是随客观环境变化的变量, 会造成同一种膨胀土在不同的环境状态下, 出现不同的胀缩等级情况, 一些是多参数的简单罗列, 没有分析参数的相关关系和组合规律.

铁路系统 2001 年经过修编《铁路工程岩土分类标准》^[11]对膨胀土的分类标准进行了较大的修改, 利用了土质学的理论, 选择了反映膨胀土本质的参数. 对膨胀土判别分类较为合理, 但一般公路部门的土工试验室对蒙脱石含量和阳离子交换量没有条件进行测试, 因而难于在公路部门加以推广. 以上这些分类方法反映了膨胀土的一些特性, 并且有的已经在工程中得到成功的应用. 然而要准确地进行膨胀土的判别, 在全国公路部门统一分类方法标准, 直接利用现有的这些方法还有一些局限性, 必须另辟蹊径, 对膨胀土判别分类还需进一步研究. 膨胀土的标准吸湿含水率的概念被提出^[12], 本文利用标准吸湿含水率对膨胀土分类进行了有益尝试, 研究表明界限含水量能反映膨胀土的本质, 指标的测定简单便捷, 指标数据可靠, 重现性好, 所提出的分类标准是合适的.

1 标准吸湿含水率的物理意义

1.1 膨胀土标准吸湿含水率的定义

膨胀土标准吸湿含水率为在标准条件下(温度为 $(25 \pm 2)^\circ\text{C}$, 相对湿度为 $(60 \pm 3)\%$), 膨胀土试样从天然含水量脱湿至平衡后的含水量.

1.2 膨胀土标准吸湿含水率的物理意义

水蒸气分压(相对湿度)可以利用在一定的温度下密封容器里的各种饱和盐溶

液精确地确定. 本试验所采用的饱和盐溶液和其对应的相对湿度如表 1 所示^[13].

表 1 25℃温度下各种饱和盐溶液的相对湿度

饱和盐溶液	CuSO ₄	ZnSO ₄	NH ₄ Cl/ KNO ₃	NaBr	Mg(NO ₃) ₂	Zn(NO ₃) ₂	CaCl ₂	CH ₃ COOK	LiCl	ZnCl ₂
25℃时的 相对湿度	98	90	72.6	57	55	42	32.3	20	15	10

试验用土采用经过提纯后的美国怀俄明州商用蒙脱土. 将经过不同阳离子处理的试样放置于一系列装有饱和盐溶液的干燥器中, 然后将干燥器置于 25℃ 的恒温实验室内, 直至试样恒重. 称量恒重后试样的重量, 并用 X 衍射试验确定平衡时土样的 d_{001} 晶层间距, 蒙脱土晶层间距 d_{001} 与 25℃ 时的相对湿度之间的关系的结果如图 1 所示.

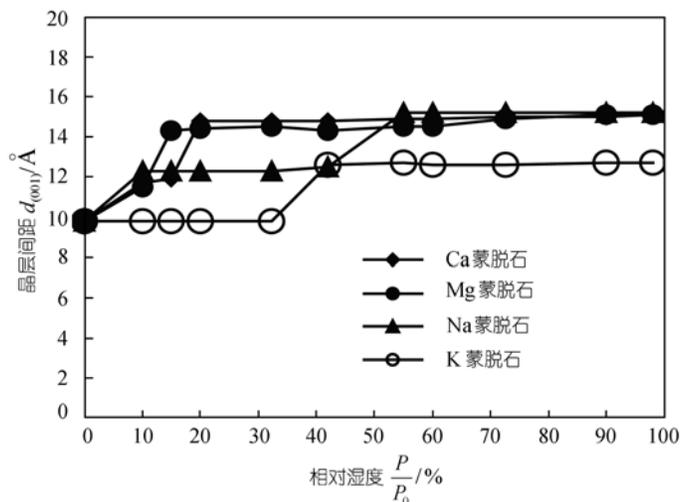


图 1 不同的阳离子饱和的蒙脱石晶层间距的变化与相对湿度的关系

由于膨胀土的比表面积主要由膨胀土中的蒙脱土含量控制, 且蒙脱土的特殊晶层结构和同晶置换作用后使晶层表面带负电荷, 在 25℃ 的温度和大于 55% 的相对湿度下, 吸湿平衡后的 Ca 蒙脱石、Mg 蒙脱石、Na 蒙脱石的晶层间距 d_{001} 稳定在 15.1~15.2Å 之间, 不仅使蒙脱石外表面牢固地吸附单层水分子层, 而且晶层间的内表面吸附双层水分子层, 而 K 蒙脱石晶层间距在 12.6~12.7Å 之间, 晶层间只吸附了一层水分子. 其他含有晶层结构蒙脱石家族的黏土矿物具有相同或相似的性质. 我国膨胀土绝大多数阳离子为 Ca^{2+} , Mg^{2+} 和 Na^{+} , 而 K^{+} 只占阳离子总量的 2~3% 左右.

对不含晶层结构的黏土矿物, 固体颗粒表面也吸附水分子, 这种吸附属于物理吸附, 但其比表面积小, 对标准吸湿含水率的贡献有限.

按照以上分析, 从理论上, 可用下式计算标准吸湿含水率:

$$\omega_a = d \times A \times C \times \rho_a \times \beta, \quad (1)$$

式中, ω_a 为标准吸湿含水率(%), d 为吸附单分子水层厚度(\AA), A 为具有晶层结构的蒙脱石矿物的理论比表面积(m^2/g), C 为具有晶层结构的黏土矿物的含量(%), ρ_a 为吸附水的密度(g/cm^3), β 为修正系数, 在 0.70~0.98 之间选取. 如果已知试样的总比表面积, 可以用总比表面积来代替 $A \times C$, 此时 β 取较小的值; 如果是由蒙脱石含量换算的比表面积, 此时 β 取较大值.

对于上述试验中的 100% Ca 蒙脱石试样, $d = 2.8 \times 10^{-10} \text{ m}$, $A = 800 \text{ m}^2/\text{g}$, $\rho_a = 1.4 \text{ g}/\text{cm}^3$, $C = 100\%$, $\beta = 0.98$, 代入(1)式中, 计算得标准吸湿含水率 $\omega_a = 30.7\%$, 与实测结果 $\omega_a = 29.8\%$ 误差 3%, 基本一致, 说明标准吸湿含水率的理论基础是正确的.

2 膨胀土标准吸湿含水率的试验研究

2.1 试验土样来源

为了对膨胀土的标准吸湿含水率有比较全面的认识, 同时也为了使膨胀土的分类标准具有代表性, 选择了广西南(宁)-友(谊关)高速公路、广西南宁市快速环道和广西百(色)-乐(业)公路为重点依托工程, 选取了 7 个膨胀土分布点, 它们分别代表广西壮族自治区宁明盆地、百色盆地和南宁盆地膨胀土. 同时也选取了全国典型的膨胀土取样地点包括湖北雅雀岭火车站、湖北孝襄荆高速公路襄樊-枣阳膨胀土地段、湖北宜当荆高速公路当阳段、河南南阳南水北调干渠、云南昆石蒙高速公路鸡街膨胀土地段、云南昆石蒙高速公路蒙自膨胀土地段、四川成都东风干渠、河北京珠高速公路邯郸段、安徽合肥环城高速公路、陕西安康 316 国道及贵州贵阳工学院院内等 11 个膨胀土分布点的土样, 这些土样大多属于强、中-强膨胀土, 同时为了使膨胀土的分类标准验证更具说服力, 也有意选取了贵州贵阳红黏土和湖北当阳非膨胀土作为试验对象.

2.2 膨胀土标准吸湿含水率试验装置

试验装置为一玻璃干燥器, 容器内多孔隔板下放置了饱和溴化钠饱和盐溶液, 多孔个隔板之上放置称量铝盒. 将整个干燥器放置在 25°C 的试验室中, 在干燥器密封体内便形成相对湿度接近 60% 的恒湿条件.

2.3 膨胀土样试验结果

对所取膨胀土样进行全面的物理力学性质和化学性质试验. 试验包括液限、塑限、自由膨胀率、矿物组成、粒度组成、阳离子交换量、比表面积和标准吸湿含水率. 试验结果列于表 2. 根据表 2 的数据, 绘制标准吸湿含水率与塑性指数、自由膨胀率、阳离子交换量、比表面积和蒙脱石含量之间的关系如图 2~6 所示.

表 2 膨胀土样试验结果汇总表^{a)}

取样地点	液限 W _L /%	塑限 W _P /%	塑性 指数 I _P	自由 膨胀 率/%	矿物组成/%			粒度组成/%			阳离子 交换量 mmol/kg	比表 面积 /m ² · g ⁻¹	标准 吸湿 含水 率/%	
					M	I	G	<5 μm	<2 μm	<1 μm				
雅雀岭	58.7	22	36.7	75	24	4	25	48	30	19	262	256	7.4	
孝襄荆高速	63.5	25.3	38.2	84	21	27	5	45	37	25	246	247	6.4	
全国 典型 膨胀 土	南阳南水北调干渠	70.3	21.1	49.2	122	43	6	8	57	41	35	478	458	12.8
	鸡街昆石蒙高速	81.2	32.4	48.8	129	48	24	9	63	47	36	511	475	13.2
	蒙自昆石蒙高速	83.5	34.3	49.2	138	37	25	23	48	36	29	356	372	10.3
	成都东风干渠	50.6	21.4	29.2	72	16	33	12	45	31	22	155	168	4.7
	邯郸京珠高速	61.2	22.6	38.6	88	36	32	2	44	33	27	376	357	9.2
	合肥环城高速	46.8	24.7	22.1	64	21	42		52	30	24	273	259	6.7
	安康 316 国道	69.3	23.4	45.9	109	39	9	4	40	34	29	384	405	11.4
	贵州贵阳	94.5	42.3	52.2	71	36	10	44	45	30	29	199	217	5.6
	当阳宜当荆高速	33.3	19.7	13.6	29	5	30	16	18	17	8	112	68	1.9
广 西 膨 胀 土	K56+480(南宁)	57	25.5	31.5	45	12	29	12	53	32	18	137	141	3.4
	K12+900(白色)	44.3	22	22.3	32	9	10	13	48	36	27	125	107	2.8
	K12+350(白色)	52.4	20.9	31.5	50	17	18	17	87	70	58	152	181	5.1
	K58+100(南宁)	41.5	16.9	24.6	50	11	21	16	38	28	24	126	114	3.2
	Ak1+440(宁明)	89.2	35.9	53.3	42	25	25	17	72	65	58	261	264	7.2
	K131+580(宁明)	68.9	26.9	42	49	23	21	29	50	40	36	227	226	6.8
	K114+300(宁明)	68	31.6	36.4	57	17	16	24	58	48	37	221	188	5.2

a) M 为蒙脱石, I 为伊利石, G 为高岭石

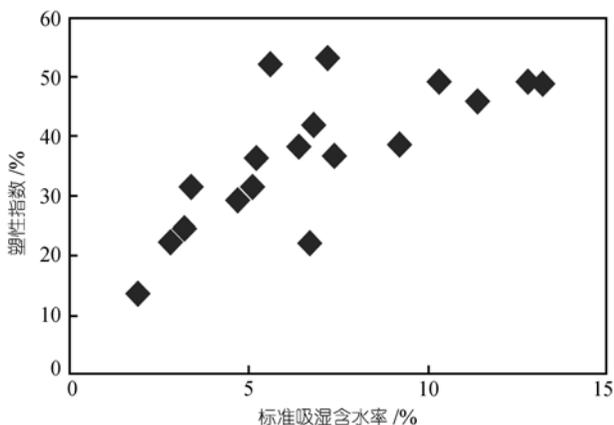


图 2 标准吸湿含水率与塑性指数之间的关系

通过图 2~6 可以看出: 标准吸湿含水率与蒙脱石线性关系良好, 这个结果比较好理解, 因为标准吸湿含水率是由于蒙脱石晶层的内外表面吸附水形成的, 这种吸附力高达 $1.01325 \times 10^9 \sim 2.0265 \times 10^9$ Pa. 在标准环境条件下(温度为 25℃、相对湿度为 60%), 这种吸附水能长期保持稳定^[14]. 而伊利石比表面积较小, 对标准吸湿含水率影响较小, 其他黏土矿物吸附水的能力更小. 其次, 标准吸湿含水率

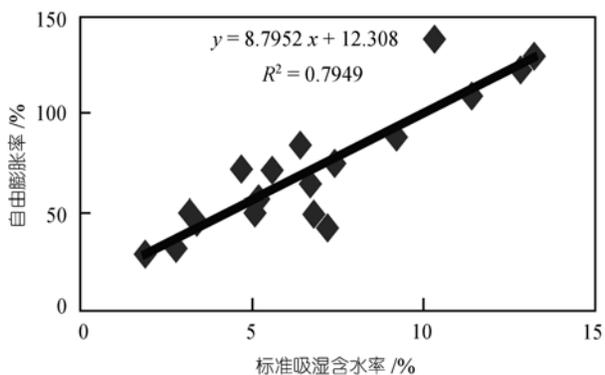


图 3 标准吸湿含水率与自由膨胀率之间的关系

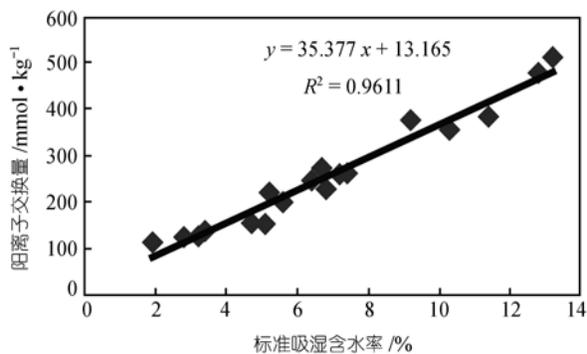


图 4 标准吸湿含水率与阳离子交换量的关系

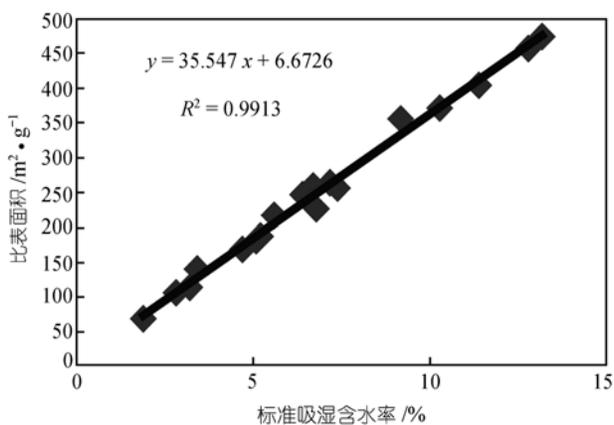


图 5 标准吸湿含水率与比表面积的关系

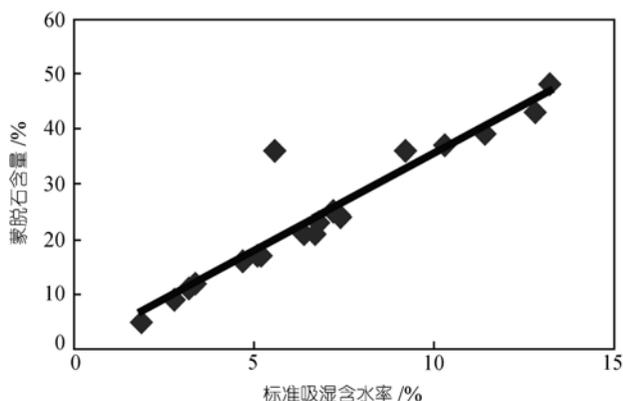


图 6 标准吸湿含水率与蒙脱石之间的关系

与比表面积之间的线性关系也比较好, 其相关系数接近于 1. 标准吸湿含水率与阳离子交换量之间的关系也呈现线性关系, 相关系数 $R^2 = 0.961$, 它们是一种间接的关系. 正是因为蒙脱石吸附不同的阳离子数量和阳离子的种类改变了膨胀土的性质. 总之, 标准吸湿含水率、蒙脱石含量、阳离子交换量及比表面积之间是线性相关的, 它们反映膨胀土的本质属性. 蒙脱石含量是膨胀土膨胀与收缩的物质基础, 阳离子交换量反映膨胀土晶格的吸附能力, 阳离子数量和种类是膨胀土膨胀与收缩外在的影响因素, 它的参与改变了同样蒙脱石含量的膨胀土的亲水性能和胀缩特性. 从图 2 可以看出, 标准吸湿含水率与塑性指数之间有线性相关的趋势, 这是因为塑性指数反映膨胀土由交换阳离子参与的膨胀土中黏土矿物高度分散性, 而且也能在一定程度上反映控制形成胀缩性能的浓差渗透吸附结合水的发育程度. 这也说明塑性指数也是反映膨胀土本质特性的一种特征参数. 在图 6 中存在一个点脱离群体独立存在, 这一点实际上也就是贵州红黏土, 其塑性指数虽然很高, 但标准吸湿含水率并不大, 从这个特性出发也可以将红黏土与膨胀土区别开来. 从标准吸湿含水率与这些参数之间的关系中, 明确地可以看出标准吸湿含水率能够反映膨胀土的本质特性, 完全有能力充当膨胀土分类指标的重任.

3 塑性指数的物理意义

塑性是黏性土的共性, 它反映土粒与水的相互作用的程度. 土中细颗粒部分, 由于颗粒粒径极细, 次生矿物表面具有很高的表面能, 它把水分子和水化离子吸附在颗粒表面成为双电层水膜, 被认为是使土具有黏性和塑性的主要原因.

在土的某些特性之间, 如界限含水量、黏土的矿物种类和被吸附离子的性质之间, 存在着一定的相互关系. 黏土的阳离子交换容量越大, 变换被吸附的阳离

子的作用越强. 表 3 为各组黏土矿物的液限和塑性指数之间的关系^[8].

表 3 具有不同被吸附阳离子的黏土矿物的界限含水量值

	Na ⁺		K ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺	
	液限/%	I _p /%	液限/%	I _p /%	液限/%	I _p /%	液限/%	I _p /%
高岭石	29	1	35	7	34	8	39	11
伊利石	61	27	81	38	90	50	83	44
蒙脱石	344	251	161	104	166	101	158	99

从表中可以看出, 黏土矿物的不同含量、黏土矿物吸附不同的阳离子的类型和价位都对土的塑性指标带来影响. 同为蒙脱石黏土矿物, 在Na⁺离子作用下的塑性指数接近Mg²⁺离子作用下的塑性指数的 3 倍. 液限和塑限能很好地反映膨胀土由交换阳离子参与的膨胀土中黏土矿物高度分散性. 影响膨胀土的膨胀与收缩性能的主要因素是浓差渗透吸附结合水, 而浓差渗透吸附结合水的数量又大致可用塑性指数来表示, 其变化的幅度高低主要取决于液限的高低. 因此液限和塑限不仅能充分反映直接影响胀缩性能的物质组成成分, 而且也能在一定程度上反映控制形成胀缩性能的浓差渗透吸附结合水的发育程度^[15].

从表 3 可以看出, 阳离子对黏土矿物的塑性指数的影响比对黏土矿物液限和塑限的影响大, 因此, 对膨胀土进行分类时, 当没有进行标准吸湿含水率试验时, 可选用塑性指数作为另一个分类指标.

4 分类标准的确定

标准吸湿含水率能很好地反映膨胀土的矿物组成特性, 塑性指数能很好地反映粒度组成、分散特性和阳离子与黏土矿物的相互作用. 考虑到对以前分类成果的继承性, 这里选用标准吸湿含水率、塑性指数和自由膨胀率 3 个参数对膨胀土进行分类. 考虑文献中膨胀土分类界限值, 提出如表 4 的分类标准.

表 4 膨胀潜势的分级^{a)}

	非膨胀土	弱膨胀土	中等膨胀土	强膨胀土
自由膨胀率 $\delta_{ef}/\%$	$\delta_{ef} < 40$	$40 \leq \delta_{ef} < 60$	$60 \leq \delta_{ef} < 90$	$\delta_{ef} \geq 90$
标准吸湿含水率 $\omega_j/\%$	$\omega_j < 2.5$	$2.5 \leq \omega_j < 4.8$	$4.8 \leq \omega_j < 6.8$	$\omega_j \geq 6.8$
塑性指数 $I_p/\%$	$I_p < 15$	$15 \leq I_p < 28$	$28 \leq I_p < 40$	$I_p \geq 40$

a) 表中“非膨胀土”并不是说该土没有膨胀性, 只是其胀缩特性尚达不到定义为“膨胀土”的程度

表 4 为膨胀土的分类标准, 分类以标准吸湿含水率为控制指标, 只有当未进行标准吸湿含水率指标试验时, 可参考用自由膨胀率和塑性指数指标对膨胀土进行分类.

1) Holt J H. A study of physico-chemical, mineralogical, and engineering index properties of fine-grained soils in relation to their expansive characteristics. Ph D Dissertation, Texas A&M University, College Station, Tx, 1969

5 膨胀土的分类方法的验证和应用

根据新分类标准和其他有代表性的分类标准将广西依托工程和全国典型膨胀土分类结果列于表 5 所示。

表 5 膨胀土分类成果表

试样	取样地点	TB10077-2001	南非 Wileiams	GBJ112-87	本文
全国典型膨胀土	雅雀岭	中	很高	中	高
	孝襄荆高速	中	很高	中	中
	南阳南水北调	强	很高	强	强
	鸡街昆石蒙高速	强	很高	强	强
	蒙自昆石蒙高速	强	很高	强	强
	成都东风干渠	弱	高	中	弱
	邯郸京珠高速	强	很高	中	高
	合肥环城高速	中	很高	弱	中
	安康 316 国道	强	很高	强	强
	贵州贵阳	中	很高	中	中
广西膨胀土	当阳宜当荆高速	非	中等	非	非
	K56+480(南宁)	弱	高	弱	弱
	K12+900(白色)	非	中等	非	弱
	K12+350(白色)	弱	低	弱	中
	K58+100(南宁)	弱	高	弱	弱
	Ak1+440(宁明)	中	很高	弱	强
	K131+580(宁明)	弱	很高	弱	中
	K114+300(宁明)	弱	很高	弱	中

从表 5 可以看出, 广西依托工程膨胀土的分类结果与自由膨胀率分类结果有较大差别, 自由膨胀率的分类在理论上和操作上的弊端是显而易见的. 但利用自由膨胀率对全国典型的膨胀土进行分类, 其结果与铁道部《铁路工程岩土分类标准》(TB10077-2001)和本文推荐的方法标准的分类结果相比较, 只有少数几个试样的分类结果有差异, 大部分试样的分类结果基本一致. 但这并不能说明用自由膨胀率对膨胀土的分类具有较强的适用性. 这是因为全国典型膨胀土都是按照自由膨胀率判别和分类的, 而且之所以典型, 是因为这些膨胀土大多自由膨胀率较高, 属于中、强和超强的膨胀土. 可以这么说, 自由膨胀率高的土一定是强膨胀土, 但反过来说强膨胀土自由膨胀率高就不一定正确了. 例如应用自由膨胀率对广西依托工程膨胀土进行分类, 会将大多数强、中膨胀土误判为中、弱膨胀土, 而且也会将膨胀土误判为非膨胀土, 从而给工程带来灾难后果的概率大大增加. 南非 Wileiams 分类法对膨胀土的分类结果明显偏高, 会造成将非膨胀土误判为膨胀土, 将弱、中膨胀土误判为中、强膨胀土的现象, 给工程带来浪费. 此外, 南非 Wileiams 分类法分类标准有些还不是很严密, 例如将小于 $2 \mu\text{m}$ 的黏粒含量作为分类指标并不能反映膨胀土的本质, 其物理意义不太明确.

利用本文推荐的方法对膨胀土进行分类与与铁道部《铁路工程岩土分类标

准》(TB10077-2001)中膨胀土的判定和分类结果几乎完全一致. 这是因为 2001 年经过修编《铁路工程岩土分类标准》(TB10077-2001/J123-2001)对膨胀土的判别、分类标准选择了反映膨胀土本质的参数, 例如蒙脱石含量、阳离子交换量等, 但这些参数测试困难, 一般常规土工实验室没有条件进行这些参数的测定.

对膨胀土的分类结果的验证, 还有待进行膨胀土的膨胀潜势等级与膨胀土的胀缩特性指标相对应的验证工作.

6 结论

通过本文推出的界限含水量对膨胀土进行判别分类的实践, 可以得到如下几点结论:

(i) 标准吸湿含水率能很好地反映膨胀土的矿物组成特性, 因此标准吸湿含水率能够反映膨胀土本质特征, 具有坚实的理论基础.

(ii) 塑性指数与一般黏性土的分类指标相同, 试验操作大众化、规范化, 标准吸湿含水率的测定, 在设定了环境的条件下, 设备简单, 操作简单易行, 试验耗时短, 为新方法的应用带来了更加有利的条件.

(iii) 新方法对膨胀土的判别分类较之与自由膨胀率对膨胀土的判别与分类的准确性大大提高, 对红黏土来说没有必要进行特别地加以区分, 只要满足标准所提出的条件, 就可以确定为膨胀土. 反之, 如果不满足标准所提出的条件, 就可以将红黏土排除在膨胀土之外. 实际上红黏土所包含的蛭石黏土矿物也具有晶层结构, 在水的作用下, 红黏土也具有胀缩特性, 按照膨胀土的定义, 也确应将红黏土定义为膨胀土.

参 考 文 献

- 1 Mitchell J K. Fundamentals of Soil Behavior. New York: John Wiley & Sons Inc, 1976. 39~46
- 2 高国瑞. 近代土质学. 南京: 东南大学出版社, 1990. 19~81
- 3 膨胀土地区建筑技术规范(GBJ112-87). 北京: 中国计划出版社, 1987. 11~12
- 4 李生林, 秦素娟, 薄遵昭, 等. 中国膨胀土工程地质研究. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992
- 5 Williams A A B. Discussion of the prediction of total heave from double oedometer test. Transactions, South African Institution of Civil Engineers, 1958, 5(6): 49~51
- 6 土的分类标准(GBJ145-90). 北京: 中国建筑工业出版社, 1991. 8~13
- 7 谭罗荣, 张梅英. 风干含水量 W_{65} 用作膨胀土判别分类指标的可行性研究. 工程地质学报, 1994, 2(1): 15~22
- 8 陈孚华. 膨胀土上的基础. 石油化学工业部化工设计院等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1974. 15~27
- 9 Peck R, Hanson W, Thornburn T. Foundation Engineering. New York: John Wiley & Sons Inc, 1974
- 10 刘特洪. 工程建设中的膨胀土问题. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997. 17~49
- 11 《铁路工程岩土分类标准》(TB10077-2001). 北京: 中国铁道出版社, 2002. 19~20
- 12 姚海林, 杨 洋, 程 平. 膨胀土的标准吸湿含水率及其试验方法标准. 岩土力学, 2004, 25(6): 856~859
- 13 Greenland D J, Hayes M H B. The Chemistry of Soil Constituents. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1978
- 14 程传焯. 表面物理化学. 北京: 科学技术文献出版社, 1995. 30~58
- 15 Bolt G H. Physical-Chemical analysis of the compressibility of pure clays. Geotechnical, 1956, 6(2): 86~93