第 23 卷 第 15 期 岩石力学与工程学报 23(15):2593～2598
2004 年 8 月 *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering* *Aug.*, 2004

典型红粘土与膨胀土的对比试验研究*

赵颖文 孔令伟 郭爱国 拓勇飞

(中国科学院武汉岩土力学研究所岩土力学重点实验室 武汉 430071)

摘要 通过室内试验对广西贵港红粘土、湖北荆门弱膨胀土与中膨胀土的物理力学性质指标、原状样脱湿过程中的强度变化、击实样泡水前后强度变化以及脱湿吸湿性能等方面进行了对比试验研究。结果表明：3 种土原状样脱湿过程中的强度指标在土体裂隙性与基质吸力双重因素的作用下表现出完全不同的变化规律；由于红粘土与膨胀土膨胀性能上的差异，不同含水量的击实样泡水后的干密度峰值与加州承载比(*CBR*)峰值所对应的原击实样含水量比最优含水量有不同程度的增大；土体因矿物成分的差异而表现出明显不同的脱湿、吸湿速率。广西贵港红粘土与荆门膨胀土虽然在一些物理力学指标上具有相似之处，但其力学特性与水敏性特征具有明显的差异，在实际工程中应给予充分重视。

关键词 土力学，红粘土，膨胀土，强度，裂隙性，胀缩性

分类号 TU 411 **文献标识码** A **文章编号** 1000-6915(2004)15-2593-06

COMPARATIVE LABORATORY STUDY ON TYPICAL RED CLAY AND EXPANSIVE SOIL

Zhao Yingwen，Kong Lingwei，Guo Aiguo，TuoYongfei

(*Key Laboratory of Rock and Soil Mechanics*，*Institute of Rock and Soil Mechanics*，*The Chinese Academy of Sciences*，*Wuhan* 430071 *China*)

Abstract A comparative laboratory study is presented on the physical and mechanical indexes，strength changes of intact samples during the process of dehydration，strength changes of compacted samples after saturating，as well as the dehydration and humidity absorption capability for the red clay in Guigang，Guangxi，and weak-expansive soil and mid-expansive soil in Jingmen，Hubei. The results show that the strength of the three kinds of soils possesses different rules during the process of dehydration due to the double effects of matrix suction and fissure. Because of the different swelling properties of red clay and expansive soil，the water contents of compacted samples corresponding to the maximum of dry density and *CBR* after saturation are higher in different extents than those corresponding to the optimum water content. The properties of dehydration and humidity absorption of tested soils are different due to the difference in mineral compositions. Even though there are some similarities between red clay and expansive soil on the physical and mechanical indexes，but the mechanical behaviors and water-sensitivity of these two special soils are obviously different. Hence，enough attention should be paid to these problems in the practical engineering projects.

Key words soil mechanics，red clay，expansive soil，strength，fissure，swelling-shrinkage property

2003 年 2 月 17 日收到初稿，2003 年 3 月 31 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(19902018)和国家重大基础研究前期研究专项(2003CCA02200)资助项目。

作者 赵颖文 简介：男，1978 年生，硕士，主要从事特殊土的工程特性等方面的研究工作。E-mail：zhaoyingwen@yahoo.com.cn。

1　引　言

红粘土在物理力学性质指标、矿物成分与工程力学特性等多方面与膨胀土有相似之处，对于这两类特殊土关系问题的研究，至今尚未形成统一的观点。目前，红粘土在一些地区被完全按照膨胀土处理，而在另一些地区则被单独研究[1]。

我国南方广泛分布的红粘土风化壳主要是由于第四纪季风环流形成以来，在热带-亚热带高温湿条件下经历了复杂的红土化过程而形成的，具有独特的游离氧化铁的胶结结构；而膨胀土则是一类具有明显吸水膨胀失水收缩的特殊土。以往对于红粘土与膨胀土的比较研究主要集中在历史成因、矿物组成与胀缩性能等方面。从矿物学角度讲，膨胀土一般含有较多的诸如蒙脱石的亲水矿物，而红粘土矿物成分以伊利石与高岭石为主，含少量或不含蒙脱石。红粘土与膨胀土均具有较高的粘粒含量、天然含水量、孔隙比与液塑限，而红粘土的这些指标较膨胀土更高，远远超出一般粘性土，但同时红粘土却具有明显优于膨胀土的力学特性。

在实际工程中，由于外界自然条件变化而引发的有关红粘土与膨胀土类似于边坡失稳、地基不均匀变形、道路开裂的工程病害时有发生[2]。但目前对于这两类特殊土因含水量变化所引起的胀缩性与裂隙性的耦合作用以及这一耦合作用对土体工程力学特性影响的研究却并不多见。笔者认为，深入开展红粘土与膨胀土裂隙性、胀缩性以及超固结性等水稳性特征的对比研究是非常必要的。总体来说：膨胀土具有较为明显的裂隙性，而红粘土的裂隙性由于成因的不同而具有明显的地域差异，即一些地区的红粘土裂隙极为发育，而另一些地区的红粘土裂隙并不发育。膨胀土普遍地具有明显的胀缩性，而我国红粘土的胀缩性地域差异性很大，且主要表现为以缩为主的胀缩特性；另外，一些地区的膨胀土由于较大的先期固结压力而具有超固结性，而红粘土的超固结性则主要是由其独特的游离氧化铁的胶结结构所引起的[3]。

本文针对研究中的不足与实际工程的需要，通过贵港红粘土、荆门弱膨胀土与中膨胀土的室内试验研究，对红粘土与膨胀土的物理性质指标、力学性质指标、原状样与击实样强度的水敏性特征以及矿物成分影响下的土体脱湿、吸湿速率的异同点进行了初步的探讨，为进一步掌握红粘土与膨胀土的相互关系以及这 2 种特殊土各自的工程力学特性提供了帮助。

2　基本物理力学性质

本试验的红粘土样取自广西贵港三零七单位西侧场地的网纹红土层。贵港属炎热潮湿的亚热带气候，碳酸盐岩经风化残坡积与红土化作用而形成的红粘土风化壳发育良好，具有明显的垂直分带性[4]。所取土样呈红褐色，含有大量黄色斑块，土质细腻光滑，无砂感，无残余岩块，天然网状裂隙非常发育。弱膨胀土与中膨胀土取自湖北省襄荆高速公路沿线荆门段。其中，弱膨胀土为灰褐色，硬塑状态，裂隙较为发育，含较多铁锰结核，局部见灰白色填充物；中膨胀土呈褐黄色，硬塑状态，含铁锰结核，局部见灰色填充物。3 种土的基本物理性质指标、力学性质指标、颗粒与矿物组成分别见表 1～3。

本文所选红粘土与膨胀土的土样是具有代表性的。从胀缩性指标来看，贵港红粘土的自由膨胀率为 49%，收缩系数为 0.22，体缩率为 6.3%，与荆门弱膨胀土指标相接近。但显然红粘土与膨胀土在另一些指标上具有明显的差异性。例如：荆门膨胀土具有比较高的天然含水量、孔隙比、液限、塑限与塑性指数，但贵港红粘土的这些指标较膨胀土更高(表 1)。同时，贵港红粘土又表现出较高的无侧限抗压强度、直剪强度和较低的压缩系数等良好的力学特性(表 2)，这一矛盾现象是红粘土区别于膨胀土的重要特性之一。一些研究已证实红粘土这一特性是由红土化过程中形成的游离氧化铁的胶结结构所引起的[5~8]。

表 3 为贵港红粘土、荆门弱膨胀土与中膨胀土的颗粒组成以及矿物组成。表中同时列出贵阳红粘土相应指标以作对比。可见红粘土与膨胀土的颗粒组成与矿物组成具有明显差异：(1) 红粘土粘粒含量很高，并以高岭石为主，极少或不含有碎屑矿物；而膨胀土中粘土矿物含量明显低于红粘土，并且含有大量石英与一定量的长石。可以推断贵阳、贵港红粘土的风化程度要明显高于荆门膨胀土；(2) 红粘土含有一定量的针铁矿与三水铝石，这是红土化过程中脱硅富铝铁所致，是荆门膨胀土所不具有的；(3) 从矿物学角度来看，膨胀土的胀缩性主要归因于蒙脱石和蛭石等亲水矿物的作用。荆门膨胀土中蛭-蒙混层与蛭石含量较高；而贵阳、贵港红粘土含有一定量的蛭石，却未发现蒙脱石或蛭石与蒙脱石的混层。

表 1　红粘土与膨胀土的物理性质指标

Table 1　Physical indexes of red clay and expansive soil

土类	天然含水量 w/%	天然容重 γ/kN • m^{-3}	干容重 γ_d/kN • m^{-3}	比重 G	孔隙比 e	饱和度 S_r/%	液限* W_L/%	塑限 W_P/%	塑性指数 I_P/%
贵港红粘土	47.4	16.56	11.23	2.76	1.40	93.5	125.9	47.3	78.6
荆门弱膨胀土	24.0	19.31	15.57	2.74	0.72	91.3	43.4	23.0	20.4
荆门中膨胀土	28.4	19.01	14.80	2.75	0.82	95.1	62.8	26.2	36.6

* 液塑限的测定分别采取 76 g 锥入土 17 与 2 mm 作为标准。

表 2　红粘土与膨胀土的力学性质指标

Table 2　Mechanical indexes of red clay and expansive soil

土类	自由膨胀率 δ_{ef}/%	收缩系数	体缩率 e_s/%	缩限 W_s/%	先期固结压力 P_c/kPa	压缩系数 $a_{1\text{-}2}$/MPa^{-1}	直接快剪		固结快剪		无侧限抗压强度 q_u/kPa
							粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 φ/(°)	
贵港红粘土	49	0.22	6.3	23.1	240	0.21	85.9	20.1	52.4	20.5	233.4
荆门弱膨胀土	42	0.26	7.5	8.8	200	0.30	50.5	26.3	28.3	27.5	196.5
荆门中膨胀土	75	0.44	22.4	11.8	190	0.28	36.8	10.7	34.8	17.2	108.9

表 3　红粘土与膨胀土颗粒及矿物组成

Table 3　Particle size distribution and mineral composition of red clay and expansive soil

土类	颗粒组成/%			矿物组成/%							
	<5 μm	<2 μm	<1 μm	石英	长石	蛭石与蒙脱石混层	蛭石	伊利石	高岭石	针铁矿	三水铝石
贵阳红粘土	62.0	58.0	53.0	0	0	0	32	11	41	10	8
贵港红粘土	62.0	61.0	59.0	3	0	0	6	0	74	17	0
荆门弱膨胀土	34.8	12.0		40	6	9	9	27	9	0	0
荆门中膨胀土	40.5	22.6		25	2	32	0	29	12	0	0

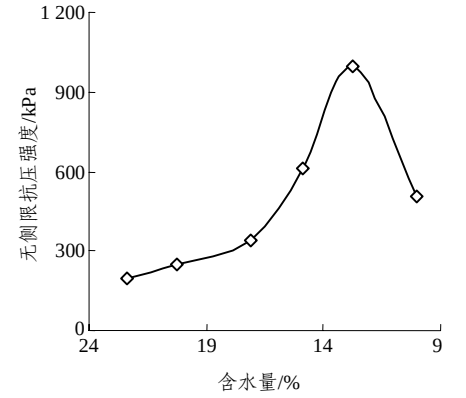
3　原状样脱湿过程的无侧限抗压强度

贵港红粘土、荆门弱膨胀土与中膨胀土的原状样在室温条件下(平均温度与相对湿度分别为 20℃和 65%)缓慢脱湿，当含水量降至 6 个不同阶段时分别进行无侧限抗压强度试验。结果表明，3 种土样在相同条件下脱湿，而无侧限抗压强度随含水量变化的规律完全不同(图 1)。

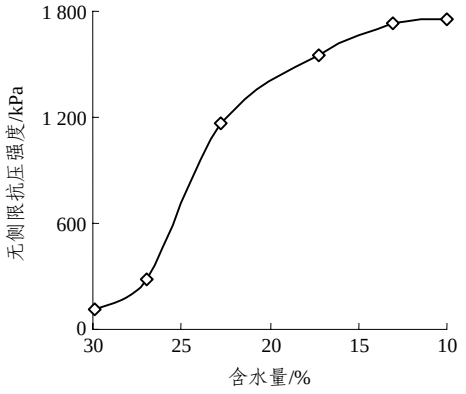
土体在脱湿过程中含水量降低，土团粒产生收缩，基质吸力的提高使得土体强度呈增强趋势[9]。但与此同时，不均匀分布的应力会促成土体天然裂隙进一步发育，形成土体强度下降的趋势。本文中的荆门弱膨胀土的裂隙比较发育，在高含水量范围内无侧限抗压强度主要由基质吸力控制，随含水量降低而增大，当含水量降低到一定程度时，裂隙对于土体强度的降低作用超过了基质吸力对强度的影响，于是土体的强度则随之减小(图 1(a))；荆门中膨胀土天然裂隙相对较少，在含水量下降的过程中，无侧限抗压强度由于基质吸力的增大而不断提高(图 1(b))；而贵港红粘土网状裂隙十分发育，无侧限抗压强度试验围压为零，因而强裂隙性对土体的影响明显地体现在红粘土的无侧限抗压强度指标上，当含水量降至较低的程度，土样沿原有裂隙面裂成碎块，以至强度为零，但仍可以看出在高含水量与低含水量范围内无侧限抗压强度的降低幅度不同(图 1(c))。因而可以肯定，在脱湿过程中，土体的强度指标在不同含水量范围内的变化规律不尽相同，根据试验结果可初步认为：脱湿过程中土体的强度在高含水量范围内主要受控于土体的基质吸力，而在低含水量范围内主要受控于裂隙性。

4　击实样泡水前后指标的比较

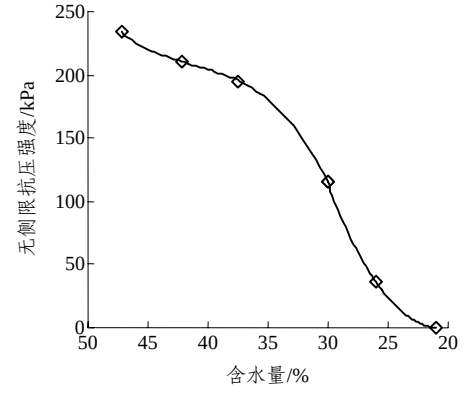
本研究对贵港红粘土、荆门弱膨胀土与中膨胀土进行重型击实与泡水 *CBR* 试验，其结果见表 4。图 2 为重型击实样泡水前后的干密度-含水量曲线图。可以看出，泡水后 3 种土重型击实样的干密度均有所降低，干密度峰值对应的含水量提高，泡水 *CBR* 最大值所对应的含水量同样高于泡水前的最优含水量，具体指标见表 5。以红粘土为例，其重型击实样最优含水量为 34.5%，泡水后干密度的峰值对应含水量增至 39.8%，泡水后 *CBR* 峰值对应含水量



(a) 荆门弱膨胀土



(b) 荆门中膨胀土



(c) 贵港红粘土

图 1　原状样不同脱湿阶段无侧限抗压强度试验

Fig.1　Strength tests of unconfined compression for intact soil samples at different stages of dehydration

也为 39.8%，明显高于最优含水量。

出现上述现象的原因在于土体泡水过程中所产生的吸水膨胀。根据土工试验规范，以击实样泡水后的高度变化占原击实试样高度的百分比作为膨胀量来度量土体膨胀性，由表 4 可知，重型击实样含水量愈高，则膨胀量愈低。贵港红粘土、荆门弱膨胀土与中膨胀土最优含水量处的重型击实样仍具有较大的膨胀量，分别为 3.72%，2.83%与 9.15%。而含水量稍大于最优含水量的击实样饱和过程中膨胀

表 4　重型击实样饱和度与膨胀量

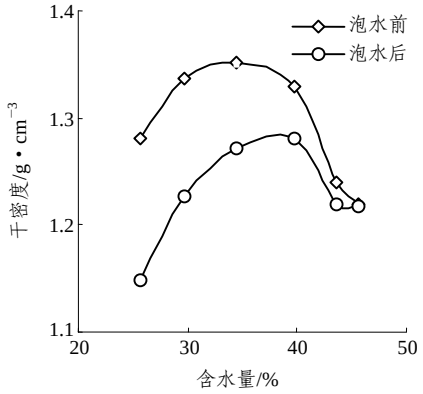
Table 4　Saturation degrees and swelling capacities of heavy-duty compacted samples

土类	含水量/%	干密度ρ_d/g • cm^{-3}	膨胀量/%	*CBR*/%
贵港红粘土	25.6	1.28	8.98	3.9
	29.7	1.34	7.77	4.4
	34.5	1.35	3.72	8.6
	39.8	1.33	0.47	16.4
	43.6	1.24	0.06	9.5
	45.7	1.22	0.03	6.6
荆门弱膨胀土	11.5	1.71	8.48	1.0
	14.8	1.72	6.09	2.5
	18.5	1.75	2.83	3.1
	21.5	1.72	0.73	7.8
	24.0	1.62	0.28	5.2
	26.1	1.57	0.11	2.5
荆门中膨胀土	14.7	1.61	17.20	0.9
	18.4	1.63	16.20	1.0
	21.2	1.67	9.15	1.7
	24.1	1.63	4.36	1.8
	26.4	1.57	3.09	1.9
	29.1	1.51	2.06	2.6
	32.1	1.43	0.42	3.4
	40.1	1.27	0.12	1.4

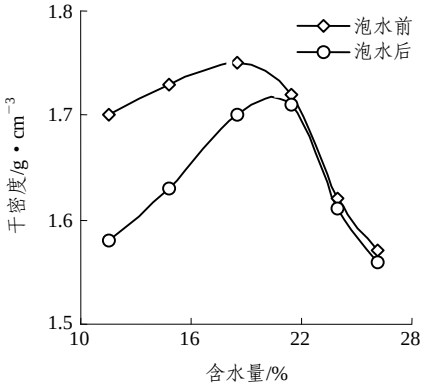
量相对较小，饱和后的最大干密度与 *CBR* 对应的初始含水量反而大于最优含水量。因而红粘土与膨胀土击实样饱和后的强度指标由击实后的干密度与膨胀量双重因素决定。由此可见，在实际工程中将膨胀性强的土在最优含水量下压实，虽然可以获得很高的压实度，但却存在着膨胀量大的缺点，即饱和后的 *CBR* 值并非最大。另外，土体的膨胀性愈强，其击实样泡水前后的干密度与 *CBR* 峰值所对应的泡水前含水量的变化幅度愈大。荆门中膨胀土的膨胀性明显强于红粘土与弱膨胀土，因而其泡和前后指标变化幅度明显大于贵港红粘土与荆门弱膨胀土。

5　脱湿和吸湿性能

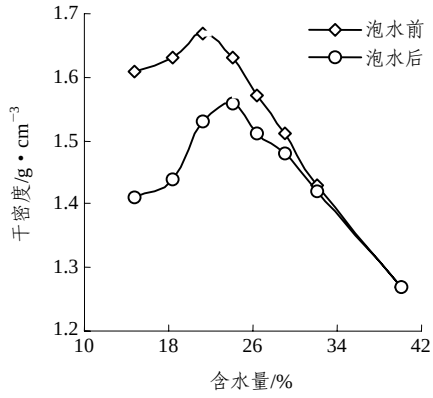
对贵阳红粘土、贵港红粘土、荆门弱膨胀土和中膨胀土 4 种土样依次在 35℃，45℃，50℃，60℃，75℃，90℃，105℃等 7 个温度下脱湿相同时间后测定含水量(图 3(a))来模拟红粘土和膨胀土的脱湿过



(a) 贵港红粘土



(b) 荆门弱膨胀土



(c) 荆门中膨胀土

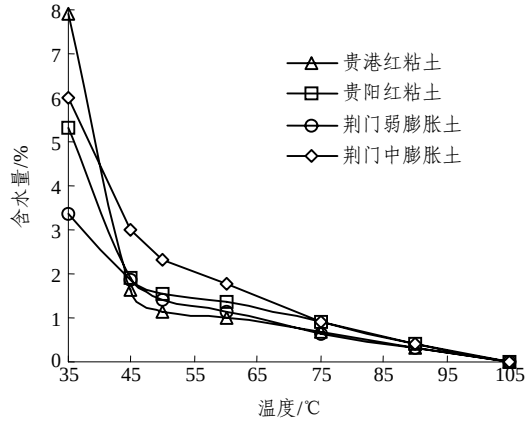
图 2　重型击实样泡水前后干密度-含水量曲线

Fig.2　Dry density-moisture content curves of heavy-duty compacted samples before and after immersion

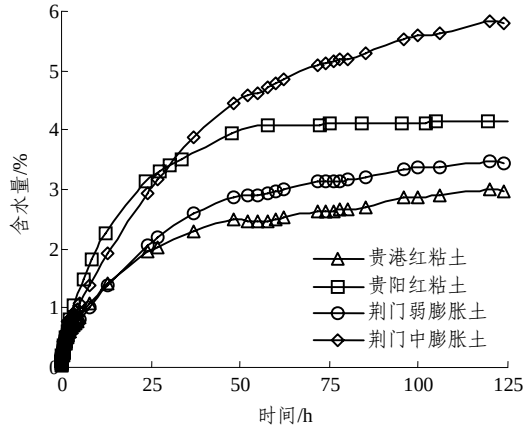
表 5　重型击实样指标峰值对应的含水量

Table 5　Moisture contents corresponding to peak values of indexes of heavy-duty compacted samples　%

土类	最优含水量(泡水前)	泡水后最大干密度对应含水量	*CBR* 峰值所对应的含水量(泡水后)
贵港红粘土	34.5	39.8	39.8
荆门弱膨胀土	18.5	21.5	21.5
荆门中膨胀土	21.2	24.0	32.1



(a) 不同温度条件下脱湿曲线



(b) 相同自然条件下吸湿过程曲线

图 3　红粘土与膨胀土脱湿吸湿试验曲线

Fig.3　Dehydration and water absorption curves for red clay and expansive soil

程。将脱湿后的土样置于相同的室温条件下，通过跟踪测定含水量的变化得到红粘土和膨胀土吸水过程中含水量随时间的变化规律(3(b))。从图中可以看出，在脱湿、吸湿的特性方面，荆门中膨胀土与贵阳红粘土较为接近，即脱湿相对较慢，吸湿相对较快；而荆门弱膨胀土与贵港红粘土更为接近，即脱湿相对较快，吸湿相对较慢。

表 3 中已经表明：红粘土矿物成分以粘土矿物为主，其中，贵港红粘土以高岭石为主，仅含有 6%的蛭石，贵阳红粘土的蛭石含量较高，达到 32%；而荆门膨胀土粘粒含量比红粘土低，主要有伊利石、蛭-蒙混层、蛭石和少量高岭石，其中，中膨胀土含 32%的蛭-蒙混层，弱膨胀土的伊利石含量较高，仅含少量蛭石与蛭-蒙混层。在蒙脱石、蛭石、高岭石与伊利石 4 种粘土矿物当中，蒙脱石与蛭石属于亲水矿物，而高岭石与伊利石的亲水性则相对较弱。从图 4 可以看出：蒙脱石与蛭石在晶体结构上有相似之处，这 2 种矿物晶层之间均为水和阳离子，层

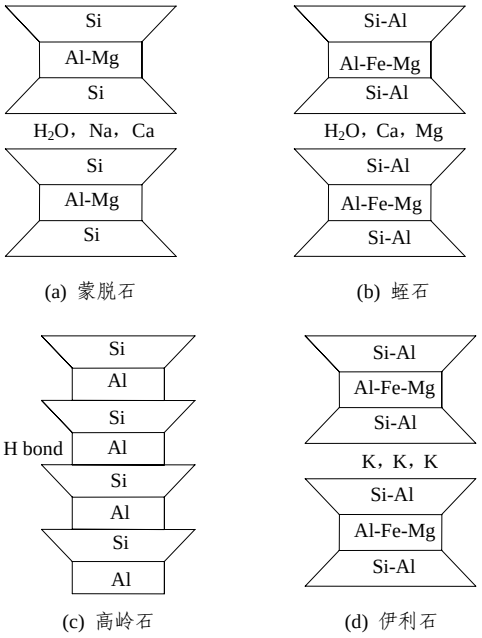


图 4　粘土矿物结构示意图

Fig.4　Structure diagrams of clay minerals

间距相对较大，晶层之间容易随着含水量的变化而胀缩；高岭石和伊利石则与之相反，高岭石晶层之间以氢键连接，间距小，强度高，伊利石晶层之间以钾离子键为主，晶层间距同样较小，强度高[10]；与高岭石和伊利石相比，蒙脱石和蛭石具有相对更强的吸纳或保持水分能力，因而含蒙脱石和蛭石较多的荆门中膨胀土与贵阳红粘土脱水过程较慢，吸水相对较快，而高岭石和伊利石含量较高的荆门弱膨胀土与贵港红粘土则脱水相对较快，而吸水相对较慢。可见红粘土与膨胀土脱湿吸湿性能上的差异与具体土体所含粘土矿物成份的种类及含量有直接的关系。

6　结　论

本文对贵港红粘土、荆门弱膨胀土与中膨胀土的物理力学性质指标、原状样与击实样的水理性特征以及脱湿吸湿速率的异同点进行了比较研究。初步得到如下结论：

(1) 贵港红粘土虽具有与荆门弱膨胀土相近的胀缩性指标，但红粘土与膨胀土在其他一些物理力学指标上具有明显的差异，例如：贵港红粘土的天然含水量、孔隙比、液限、塑限与塑性指数等指标虽然明显高于荆门膨胀土，但却表现出较高的无侧限抗压强度、直剪强度和较低的压缩系数等更为良好的力学特性。

(2) 在脱湿过程中原状样的力学特性受基质吸力与裂隙性双重因素控制，3 种土因其天然裂隙发育程度的差异而呈现出完全不同的变化规律。

(3) 由于 3 种土较强的吸水膨胀特性，击实样泡水后的干密度与 *CBR* 峰值所对应含水量均增大，且高于最优含水量，击实样饱和后的力学特性由干密度与膨胀量双重因素决定。广西贵港红粘土与荆门膨胀土饱和前后指标变化幅度因膨胀性强弱而不同。

(4) 在脱湿、吸湿特性方面，荆门中膨胀土与贵阳红粘土脱湿相对较慢，吸湿相对较快；而荆门弱膨胀土与贵港红粘土脱湿相对较快，吸湿相对较慢。红粘土与膨胀土脱湿、吸湿性能上的差异与具体土体所含粘土矿物成份的种类及含量有直接关系。

总之，贵港红粘土与荆门膨胀土虽然在一些物理力学指标上具有相似之处，但其原状样与击实样的力学特性与水敏性特征均具有明显的差异，在实际工程中，对于红粘土与膨胀土工程力学性能的差异应该给予充分的认识，应将这 2 种特殊土区别处理。

参 考 文 献

1　唐大雄. 第二界全国红土工程地质研讨会论文综述[A]. 见：第二界全国红土工程地质研讨会论文集[C]. 贵州：贵州科技出版社，1991，1～5

2　徐榴胜. 红粘土在环境地质中的隐患[J]. 水文地质工程地质，1995，(5)：40～43

3　姜其岩，余培厚，郭　沛等. 红粘土力学强度特征的形成及分析[J]. 贵州工学院学报，1991，20(2)：22～28

4　周　芳，陈世益. 广西贵港红粘土风化壳的地球化学特性[J]. 中南矿冶学院学报，1994，25(2)：151～155

5　孔令伟，郭爱国，吕海波等. 典型红粘土的基本特性与微观结构特征[J]. 岩石力学与工程学报，2001，20(增)：973～977

6　Madu R M. An investigation into the geotechnical and engineering properties of some laterites of eastern Nigeria[J]. Engineering Geology，1977，11：101～125

7　谭罗荣. 红土特性的微观基础[A]. 见：全国第三次工程地质大会论文集[C]. 成都：成都科技大学出版社，1988，52～58

8　谭罗荣，孔令伟. 某类红粘土的基本特性与微观结构模型[J]. 岩土工程学报，2001，23(4)：458～462

9　Fredlund D G，Rahardjo H. Soil Mechanics for Unsaturated Soils[M]. New York：John Wiley and Sons. Inc.，1993

10　高国瑞. 近代土质学[M]. 南京：东南大学出版社，1990