第 23 卷 第 4 期
2001 年 7 月

岩 土 工 程 学 报
Chinese Journal of Geotechnical Engineering

Vol.23 No.4
July, 2001

某类红粘土的基本特性与微观结构模型

Fundamental property and microstructure model of red clay

谭罗荣,孔令伟
(中科院武汉岩土力学研究所 LRSM 开放实验室,湖北 武汉 430071)

摘 要 研究了某类典型红粘土的土质学特征、物理力学特性等,分析讨论了红粘土的高含水率、高孔隙比、高塑性等软粘土物理性指标与其具有较高承载力、低压缩性等较好工程力学性质的矛盾现象,提出了一种土体凝胶胶结结构模型,初步阐述了红粘土的这种矛盾现象的合理性。

关键词 红粘土;基本特性;凝胶胶结;土体结构模型
中图分类号:TU 446 **文献标识码**:A **文章编号**:1000 – 4548(2001)04 – 0458 – 05

作者简介:谭罗荣,男,1938 年生。研究员,主要从事岩土基本性质方面的科研和杂志编辑工作。

TAN Luo-rong, KONG Ling-wei
(LRSM Laboratory, Institute of Rock and Soil Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: The fundamental behavior and physico-mechanical property of a typical red clay are studied in this paper, and the contradictory phenomenon that the red clay(laterite) has the unfavorable physical parameters (high water content, high void ratio and high plasticity) as well as relatively good engineering properties such as comparatively high bearing capacity and low compressibility is analyzed and disscussed. Based on the previous test result, a kind of gel cementing structure model for soil mass is presented, and the rationality of the conflicting phenomenon mentioned above for red clay is preliminarily clarified.

Key words: red clay(laterite); fundamental property; gel cementation; soil mass structure model

1 前 言*

红粘土是一类特殊土,其具有高含水率、高孔隙比和高塑性,但却有较高的承载力和低压缩性等较好的工程力学性质,是较好的建筑物地基[1,2]。在贵州、云南等地区,即使在某些孔隙比大于 1.6、含水率高达 60%左右的红粘土地基上修建高达 6 ~ 7 层民用建筑楼房也不会有安全问题。红粘土的这种特殊性质引起了广大科研和工程技术人员的关注,对其成因、工程力学性质及利用等进行了广泛的研究,但对其特殊性质产生的本质,特别是从微观角度来研究的却较少。

杨荫华、柏树田[3],王继庄[4],以及笔者[5]等曾先后对鲁布革、天生桥等红粘土进行过研究,分别探讨了土中矿物成份,游离氧化铁、硅、铝等对红粘土的脱水不可逆性,颗粒间胶结作用的影响等。其后,孔令伟、罗鸿禧等对红粘土的胶结性状作了进一步的探讨,不仅直接证实了游离铁对红粘土物理力学性质的明显影响,而且探讨了有效胶结铁的确定方法[6]。

程昌炳等研究了用商品高岭土人工制备成的红土中针铁矿与高岭土的胶结作用,并利用穆斯堡尔谱和电子能谱证明了针铁矿与高岭土颗粒之间存在着化学胶结键[7]。

上述研究对认识红粘土的特殊工程性质起到了积极作用。

本文以典型红粘土的土质学特征与工程力学性质的特殊性为基础,比较全面地研究了红粘土在不同失水条件下,其工程力学性质等的不可逆特性,并对此作了讨论。

2 红粘土的土质学特性

2.1 红粘土的物性指标和粒度组成

本研究所用红粘土采自贵阳市某工地大楼基坑底部(#1,地表下 2 m 左右)及另一场地地表下 0.5 m 左右(#2),为典型灰岩风化产物,属残坡积成因。其物性指标等如表 1 所示。为了与其类比,表中还列有膨胀土等的相应指标。表中数据表明:①红粘土的自由膨胀率近 80%,属中等膨胀势土。②其含水率、孔隙比、液限明显大于其他土类,相当于淤泥或软土。

2.2 红粘土的矿物成份及物化性质

表 2 为红粘土、膨胀土等的矿物组成和物化性质,不难看出:①红粘土中游离铁、水铝石明显高于膨胀土等其它粘土。②物化性质与膨胀土相近,但不含非水稳性矿物蒙脱石,却含有亚水稳性矿物蛭石。

2.3 红粘土的物性指标与含水特性的关系

图 1 为红粘土、膨胀土及商品高岭土的液限和塑

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(19772068,19902018)
收稿日期:2000 – 12 – 04

表 1　红粘土与其它的粘土物性指标与粒度组成比较

Tabel 1　The comparison of physical parameters and particle size distribution between red clay and other clays

土样	含水率 w/%	天然容重 γ/(kN·m^{-3})	比重 G_s	孔隙比 e	液限 w_L/%	塑性指数 I_p/%	粒度组成 /%			自由膨胀率 δ_{ef}/%
							< 5μm	< 2μm	< 1μm	
红粘土#1	59.3	16.5	2.77	1.67	90.1	48.3	56.5	51.0	47.0	78
红粘土#2	59.6	16.8	2.79	1.73	88.1	47.3	62.0	58.0	53.0	79
膨胀土#1	24.8	20.3	2.75	0.67	55.5	27.4	28	18	13	78
膨胀土#2	30.8	19.3	2.75	0.84	66.6	34.6	28	18	13	101
膨胀土#3	33.1	18.7	2.71	0.93	79.6	48.5	61	46	37	145
汉川土	18.8	21.4	2.80	0.51	47.4	24.2	66	44	28	76

表 2　红粘土与其它粘土的矿物组成及物化指标比较

Table 2　The comparison of mineral composition and physico-chemical parameters between red clay and other clays

土　样	矿物组成 /%								游离氧化物/%			阳离子交换量 毫克当量/100g	比表面积 /(m^2·g^{-1})
	蒙脱石	蒙—伊	伊利石	蛭石	高岭石	水铝石	石英	其它	Fe	Si	Al		
红粘土#1	0	0	6	35	42	7	0	0	10	0	0	28.7	222.5
红粘土#2	0	0	11	32	39	8	0	0	10	0	0	20.0	219.3
膨胀土#1	0	29	31	0	7	0	30	3	0	0	0	32.1	253.6
膨胀土#2	0	31	34	0	10	0	24	1	3.4	5.1	3.8	39.0	310.0
膨胀土#3	54	0	18	0	8	0	20	0	2.9	5.2	2.1	50.6	463.6
汉川土	0	0	45	0	7	0	48	0	0	0	0	29.9	96.4

性指数对不同脱水条件的反应。原状样做完液、塑限后使其风干、研磨过筛后，按规范要求重做液、塑限测试，如此反复三次。然后将土样置于 105℃下烘干 24 h、研磨……反复做两次液、塑限测试。可以看出，无论是风干还是烘干，脱水状态对膨胀土和高岭土的液塑限基本没有影响，即液、塑限对脱水来说是相对可逆的。但对红粘土而言，风干脱水对液、塑限没有明显影响，但烘干脱水对液限、塑性指数的影响都是明显的，表明烘干脱水过程对液塑限是不可逆的。

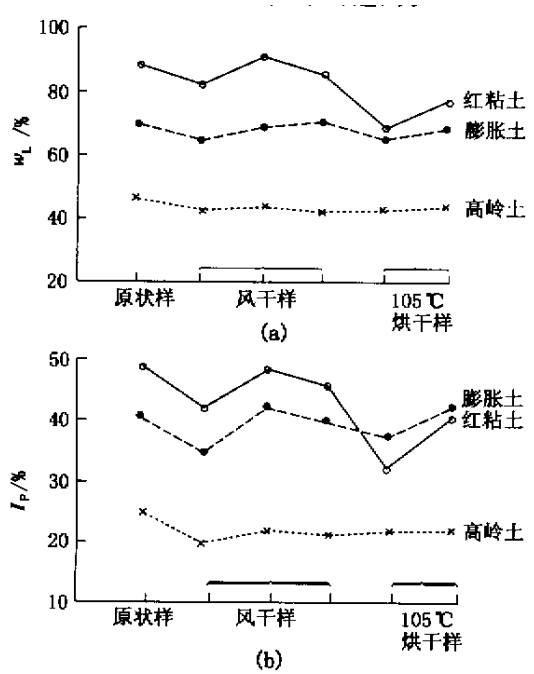


图 1　液限、塑性指数随脱水状态的变化

Fig. 1　The change of liquid limit and plastic index with dehydrated state

3　红粘土的工程力学性质

3.1　结构强度

红粘土原状样、重塑样及部分扰动击实样的结构强度测试结果如表 3 所示。

表 3　不同失水扰动击实红粘土样的结构强度等参数测试结果

Table 3　The measured results of structure strength and other parameters under various dehydrated state for disturbed and compacted sample of red clay

试样号	失水状态	测试时含水率 w/%	干容重 γ_d /(kN·m^{-3})	饱和度 S_r /%	孔隙比 e	结构强度 p_u /kPa	膨胀力 p_e/kPa
原状样(1)		60.4	10.2	97.0	1.73	210	
重塑样(1)						24	
原状样(2)		63.0	9.9	97.0	1.81	228	
1	稍失水	54.4	10.4	90.4	1.67	155	0
	风干	36.9	13.0	90.1	1.14	155	15
2	稍失水	53.7	10.7	92.6	1.62	165	0
	风干	42.8	12.2	92.9	1.28	180	0
3	稍失水	54.9	10.6	92.4	1.64	155	0
	风干	33.9	13.7	91.1	1.03	90	250
4	稍失水	52.6	10.6	90.3	1.62	170	0
	风干	45.3	12.0	96.3	1.31	170	0
5	稍失水	50.6	10.9	91.0	1.55	200	26
	风干	33.2	13.8	90.6	1.02	78	200
6	稍失水	49.9	11.0	91.1	1.52	210	13
	105℃ 烘干	33.4	13.4	86.6	1.07	170	120
7	稍失水	46.3	11.2	87.1	1.48	190	13
	105℃ 烘干	33.1	13.5	87.1	1.06	150	25
8	稍失水	49.5	10.6	85.3	1.61	200	3
	105℃ 烘干	39.9	11.9	82.2	1.35	185	0
9	稍失水	49.4	11.2	91.9	1.49	215	2
	105℃ 烘干	45.9	11.9	95.8	1.34	180	0
10	105℃ 烘干	32.2	13.5	84.1	1.07	115	107

天然土的结构强度约为 220 kPa,重塑样可以认为基本丧失,仅约 20 kPa 左右;而部分失水扰动样膨胀变形后则因扰动程度而异为 80 ~ 215 kPa 不等。扰动样是这样制备的,击实样中,一半缓缓风干,另一半缓缓风干后再 105 ℃烘 48 h,然后将它们置于保湿器,使它们缓缓吸湿至平衡或所需含水率。然后进行结构强度测试等有关试验。表 3 的数据充分说明,尽管试样的扰动程度相差很大,从原样的稍失水击实到风干、烘干再膨胀等,结构强度仍未全部丧失,结构强度低的有 80 ~ 90 kPa,高的仍可达 210 kPa 以上,与重塑样完全不同。

3.2 结构强度与膨胀力的关系

从表 3 还可以看出,结构强度与膨胀力具有反相关关系,即随着膨胀力的增大(相应的胀缩总变形也大,土体结构受到的扰动破坏也大),土的结构强度的总变化趋势是降低。

3.3 压缩性

为了比较脱水对红粘土的压缩特性的影响,作了原状土样与扰动失水及扰动风干、烘干,再吸水样的压缩试验,得到的压缩系数如表 4 所示。虽然表中数据表明压缩系数是随着含水率的降低而减小。但经过 105℃烘干又吸水,使土体结构强度受到明显损失的情况下,仍有较小的压缩系数,说明红粘土具有特殊抗压缩性能。

表 4 红粘土 #1 在不同脱水状态下的压缩系数

Table 4 Coefficient of compressibility under various dehydrated state for red clay kPa^{-1}

压缩系数	原状样 w = 60%	击实样 w = 50% ~ 55%	风干样	烘干样
			w = 40% ~ 45%	
α_{v1-2}	0.032 ~ 0.042	0.023 ~ 0.047	0.02 ~ 0.044	0.02 ~ 0.033
$\overline{\alpha}_{v1-2}$	0.038	0.036	0.031	0.024

3.4 直剪强度试验

将做完压缩试验后的试样进行直剪试验,结果如表 5 所示。可以看出,稍失水样与风干吸水样有十分相近的峰值强度和残余强度指标。105℃烘干再吸水土样则与它们有差异,特别是峰值强度指标 φ_p 与残余强度指标 φ_r 的差异更为明显。前者约为 4.5°,而后者仅 0.5°。这可能与试样的结构强度的损失程度有关。

表 5 红粘土不同失水状态样的直剪强度

Table 5 The direct shear strength under various dehydrated state for red clay

强度指标	试样状态		
	稍失水	风 干	烘干
c_p/kPa	15	25	34
φ_p/(°)	22	21.8	21.3
c_r/kPa	14	14	8
φ_r/(°)	17.5	17.5	20.8

注:下标 p 表示峰值强度,r 为残余强度

3.5 渗透试验

试验采用变水头法,分别用红粘土的原状和稍失水扰动击实样。击实样先使其缓慢失水至不同含水率状态,然后再缓慢吸水至稳定后进行渗透试验,结果如表 6 所示。渗透系数与孔隙比之间的关系如图 2 所示。对不同失水处理样,随着孔隙比的增加,或随着失水程度的减小,渗透系数不是增大而是减小。表 6 中 6 号、9 号(即图 2 中左下角的两个风干、烘干样)在缓缓吸水时,出现有胀裂现象,故在切样时,在环刀内对其进行击实,其渗透系数虽然明显小于未击实样,但仍与失水最少的两个样品的渗透系数相差不多,而孔隙比却要小 0.2 ~ 0.3,这种现象是反常的。

表 6 红粘土在不同失水状态下的渗透试验结果

Table 6 The results of permeability test under various dehydrated state for red clay

试样号	w_t/%	孔隙比 e	饱和度 S_r/%	渗透系数 k/(cm · s^{-1})
0	58.9	1.730	98.7	9.20×10^{-6}
1	40.9	1.104	103.0	1.60×10^{-6}
2	42.8	1.178	101.0	5.40×10^{-7}
3	42.1	1.145	102.0	1.16×10^{-6}
4	41.9	1.156	101.0	3.35×10^{-7}
5	48.4	1.338	101.0	1.42×10^{-7}
6*	41.1	1.107	103.0	1.00×10^{-7}
7	47.6	1.326	100.0	1.33×10^{-7}
8	45.1	1.224	102.0	4.80×10^{-7}
9*	39.6	1.058	104.0	1.12×10^{-7}
10	45.2	1.233	102.0	6.50×10^{-7}

注:表中 w_t 表示渗透试验样的含水率,标 * 的曾在环刀内击实

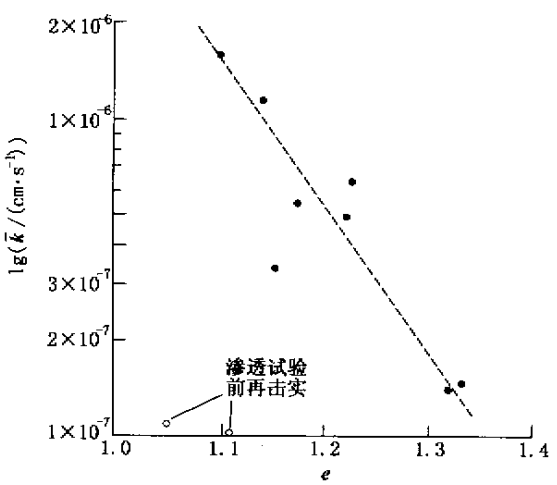


图 2 红粘土不同失水状态样的渗透系数

Fig.2 Coefficient of permeability under various dehydrated state for red clay

4 红粘土特殊工程力学性质的微结构模型

4.1 几点启示

(1) 文献[6]的研究表明,当红粘土中的游离氧化

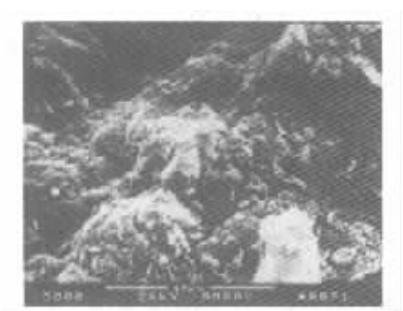
铁被溶失约 25%时，无侧限抗压强度从约 45 kPa 几乎降至 0，小于 1 μm 的粘粒从约 35%猛增至 90%以上，自由膨胀率从 105 增至 250，充分说明游离氧化铁的胶结作用及所研究红粘土的土结构单元的胶体特性（绝大部分小于 1 μm）。

（2）文献[5]的研究表明，红粘土除去游离氧化铁后，比表面积，液、塑限皆明显降低，离子交换量明显增高，表明游离氧化物具有独立的颗粒特性，即有自己的独立表面积，并不完全以膜的形式覆盖在粘土颗粒表面上，但可以呈岛状吸附在颗粒表面并掩盖住颗粒表面上的部分可交换位置。且有较强的水化能力，具有较高的液、塑限值。

（3）从 2.3 节的物理指标与含水特性的关系可以看出，红粘土中的游离氧化铁胶结物具有脱水不可逆的特性，不是一种简单的固体颗粒。

4.2　红粘土的胶结作用模型

所研究的红粘土土样的游离氧化铁主要以针铁矿的形式存在，其颗粒非常细小，以致在扫描电镜照片（图 3(a)）和放大 40000 倍的透射电镜照片中也看不到针铁矿的典型针状形态（图 3(b)）。但照片上可以清楚看到，土体是由大小不等的颗状单元聚集而成，大的单元之间充填有小单元，单元间虽没有清晰的边界线，但仍是可以明确划分的，见图 3。



(a)



(b)

图 3　红粘土电镜照片

Fig.3　Photo of SEM and TEM for red clay

因此，根据前面的启示及电镜照片，我们认为红粘土的土体胶结结构模型可作如下设想：

（1）红粘土是由灰岩风化形成的，在风化过程中，先是灰岩的溶蚀交代作用。富集足够的硅、铝后，生成或淀积高岭石等次生粘土矿物[8,9]。大小不等的片状高岭石等粘土矿物颗粒通过边面接触形成絮凝结构。

（2）灰岩风化过程中，除了硅、铝富集外，还有铁的富集并生成氧化铁，因为游离氧化铁颗粒极细，极易与水作用形成一种溶胶胶体，充填在粘土矿物颗粒形成的絮凝结构孔隙中，在一定条件下，溶胶中的水化胶粒由于化学力的作用，相互吸引聚合在一起，使聚合体缩水形成一种凝胶而吸附在片状粘土颗粒上，就好象水蒸气围绕某一中心凝结成水滴附在叶片上一样，而其中一部分则被吸附在粘土颗粒的边—面接触处形成胶结物。这样的絮凝结构在红土的地质成土过程中，可能受某种化学力的作用而凝集成一定大小的颗粒状单元，或称聚集体，并逐渐强化。这种基本粒状颗粒单元有较高的结构联结强度。如图 4 中 a 所示，图中黑色部分为凝胶状胶结物，长条形为粘土矿物片状颗粒。

（3）基本颗粒单元再通过胶结物质粘聚成较大粒团如图 4 中 b 所示。这种粒团中的颗粒单元之间的胶结强度要低于颗粒单元内的粘土颗粒间的联结强度。而大小不等的粒团通过胶结物聚集构成更大的聚集体，如图 4 中 c 等所示。在聚集体内，不仅有大小不等的粒团，也可有较大的片状粘土颗粒，粒团越大，其粒团间的联结强度越低。粒团间可形成如图 4 中 c 所示的架空结构。土体即由形态、大小各异的粒团颗粒单元、聚集体，胶结物质堆积而成。

（4）红粘土结构孔隙中，特别是聚集体颗粒单元内孔隙，充填有较高渗透压力的溶胶性水。

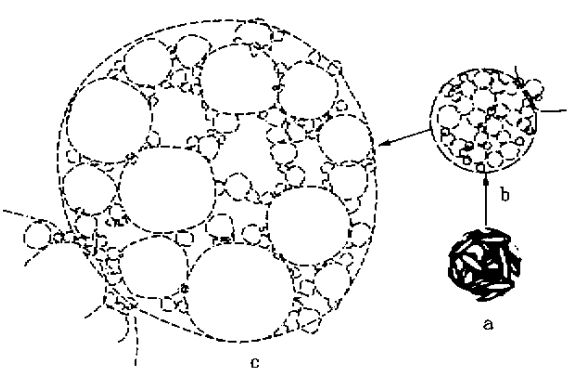


图 4　红粘土微结构构成示意图

Fig.4　Microstructure model of red clay

4.3　结构模型的特性

（1）由于单元粒团的絮凝结构、粒团间的架空结构，因此土体可有较大的孔隙比和高含水率。

（2）由于联结粒团的胶结物质是在成土过程中形成，具有相当的稳定性和联结强度，因而使土体有较强

的抗压缩性和结构强度。但重塑或扰动,都会导致粒团之间,特别是聚集体之间的联结削弱而使结构强度丧失或部分损失。

(3)由于胶结物质是由极细的胶粒为骨架的凝胶组成,具有较大的表面积和吸附水的能力(但不具明显离子交换性能)。因而它对土体的液、塑限皆有明显贡献,一旦被除去,将使土样的液、塑限和表面积降低,而离子交换能力却因胶结物覆盖的交换位置的复活及粘土矿物的相对含量增加而提高。同时,颗分试验测得的细颗粒明显增加。

(4)因胶结物质呈凝胶状态,并相对稳定,即使土体处于风干状态,凝胶团不断失水而缩小,一旦吸水膨胀仍具凝胶特性,即具有一定的可逆性。但 105℃烘干后,胶结物失去了凝胶特性,使土体的各种与凝胶有关的各种特性具有不可逆性。

4.4 问题讨论

图 2 所示渗透系数的反常可以这样来解释,原样中的凝胶状胶结物为以游离氧化铁胶粒为核心的水化物聚合而成,它虽含有很高的含水率,但皆属惰性水,在土体中,它占有一定体积,并且是不能流动的,它在土中占有的体积比要比氧化铁的含量比大得多,因此它的存在一方面使土体的含水率和孔隙比提高,另一方面,它在一土体截面上的孔中占有一定比例,使有效渗流孔截面减小,这就是红粘土虽有较大孔隙比,但渗透性仍很差的原因。在试样失水过程中,首先是自由水的蒸发流失,同时使土体收缩,使孔隙比减小或渗流孔截面减小,若此时的凝胶物质仍保持原状态不变或变化很小,那土样的有效渗流孔截面也将减小而使渗透系数减小;但若进一步失水影响到凝胶物质并使其也跟着失水的话,则一方面是土体的进一步收缩使孔隙比(或渗流孔截面)进一步减小,另一方面是凝胶物质的失水收缩使有效孔隙(或渗流孔截面)增加,当两者的作用相当时,土体的渗透性将达到最小;若土体再进一步失水并使土体收缩(土体的收缩将越来越困难),孔隙比再进一步减小,但此时凝胶的进一步缩水使有效渗流孔截面增加超过土体收缩引起的渗流孔截面减小时(在土处于非饱和状态时完全可能),渗透系数将不仅不随孔隙比的减小而减小,反而是增加,如图 2 所示。这种作用机制可解释图 2 孔隙比小于 1.33 后的各试验结果,但因 $1.33 < e < 1.73$ 之间没有实验数据的支持(没有作此实验),因此文中模型尚待进一步的研究证实。

5 结 语

从现有的研究成果看,利用本文提出的土体微观胶结结构模型,基本上可以解释红粘土的一些特殊工程性能的产生机理,但仍需进一步完善和充实。

参考文献:

[1] 高 岱,袁 阮,余培厚. 贵州红粘土的建筑性能[A]. 第一届土力学及基础工程学术会议论文选集[C]. 北京:中国工业出版社,1964.

[2] 谭罗荣. 红土有关问题的讨论[A]. 第二届全国红土工程地质研讨会论文集[C]. 贵州:贵州科技出版社,1991.1~10.

[3] 杨荫华,柏树田. 红土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响[J]. 岩土工程学报,1982,**4**(4):104~113.

[4] 王继庄. 游离氧化铁对红粘土工程特性的影响[J]. 岩土工程学报,1983,**5**(1):147~156.

[5] 谭罗荣. 红土特性的微观基础[A]. 全国第三次工程地质大会论文选集[C]. 成都:成都科技大学出版社,1988.52~58.

[6] 孔令伟,罗鸿禧,袁建新. 红粘土有效胶结特征的初步研究[J]. 岩土工程学报,1995,**15**(5):42~47.

[7] 程昌炳,康哲良,徐昌伟. 针铁矿与高岭土胶结本质的微观研究初探[J]. 岩土力学,1992,**13**(2,3):122~127.

[8] 李景阳,王朝富,樊 章. 残积红粘土成因探讨[A]. 第二届全国红粘土工程地质研讨会论文集[C]. 贵州:贵州科技出版社,1991.21~28.

[9] 张庆云,唐大雄,王朝富. 贵阳地区红粘土的成因机理及其特性[A]. 第二届全国红粘土工程地质研讨会论文集[C]. 贵州:贵州科技出版社,1991.29~36.