

红土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响*

杨荫华 柏树田

(水利水电科学研究院, 北京)

提 要

本文采用鲁布革和天生桥坝料红土,研究了红土干燥脱水对物理力学性质的影响。试验表明,红土干燥脱水后性质指标有变化,且具有不可逆性。文中对其原因进行了分析,并指出,忽略了红土的这一特性,试验结果将不仅是一般误差问题,而且可能导致工程上的一些错误判断。

一、前 言

红土是热带、亚热带湿热地区广为分布的一种土。由于其生成条件不同,与温带地区的土相比,有许多特殊性质,因此,不能仅仅根据红土的物理性质,用温带土的经验关系判断其力学性质和工程性质。

红土的主要特性之一,是对干燥脱水很敏感,干燥脱水后性质指标有所变化,而且具有不可逆性,这种特性表现为:具天然含水量的土与风干土及不同温度的烘干土的试验结果不同。或者,用天然含水量的土风干到试验要求的含水量(以下简称“由湿到干”)与事先将天然含水量的土风干到较低含水量(低于试验要求的含水量),再重新加水至试验要求的含水量(以下简称“由干到湿”)的试验结果不同。纽威尔(D. Newill)^[4]、太沙基(K. Terzaghi)^[5]、吉迪盖苏(M. D. Gidigasu)^[6]、威利斯(E. A. Willis)^[7]等人的试验指出红土干燥脱水不可逆性对比重、颗粒分析、液限、塑限、压实性有影响。毛家村土石坝心墙红土击实试验^[2]也表明干燥脱水不可逆性对压实性有影响,但影响不大,工程上可以忽略不计。近年来,用鲁布革和天生桥土石坝的心墙红土进行的击实试验,均发现其影响很大,“由湿到干”和“由干到湿”最大干容重差 $0.05\sim 0.17\text{g/cm}^3$,最优含水量差 $3.2\sim 8.4\%$,在工程上已不容忽视^[3]。红土这种特性对其他力学性质的影响,还没有系统研究过。因此,对鲁布革和天生桥红土,不但研究了干燥脱水对物理性质的影响,而且重点研究了对力学性质的影响。

二、红土的分布、生成及一般特性

红土分布于我国长江以南的广大地区^[1]。其生成与水热条件密切相关。高温潮湿多雨及

*参加本试验工作的有张世英、姜孟辛、黄凤贞、苏宝石、侯献华、边京红等同志。

排水溶滤是红土生成的主要条件。在红土形成过程中,硅酸盐类矿物强烈分解,硅和盐基遭到溶滤,粘粒与次生矿物不断形成,铁铝氧化物明显聚积。红土粘土矿物主要为高岭石、多水高岭石、三水铝石,并含有赤铁矿及多水氧化铁等。

红土多为酸性土,一般pH值4.5~7.0,降雨和溶滤程度愈高,pH值愈低。

红土粘粒含量较高,有的高达50~80%。液限、塑限也高,在塑性图上的位置在A线下或A线附近,按塑性图分类多属MH。

红土的压实性一般较差,最大干容重低,最优含水量高,有些红土最大干容重仅1.15g/cm³。由于倍半氧化物,特别是游离的氧化铁吸附在粘土矿物表面,将粘土颗粒胶结成大小不等的团粒,使土呈现粗粒土的某些性质,虽然干容重低,含水量高,但却具有中等压缩性、较高的抗剪强度和相对较高的渗透性。

另外,如前所述,红土常具有干燥脱水不可逆性,对干燥脱水比较敏感。

以上是一般典型红土常具有的特性,应当指出,目前尚无统一的红土定义和鉴别指标。同属红土,因生成条件和母岩不同,彼此性质差别也可能很大。

三、红土干燥脱水不可逆性对物理力学性质的影响

试验用土样为鲁布革及天生桥土石坝防渗体土料,均为较典型的红土。

(一)鲁布革、天生桥红土的生成条件和矿物化学性质

两种红土产地在贵州省兴义地区,地理位置相近,均为温暖潮湿多雨地区,其生成条件类似(见表1)。

表1 鲁布革、天生桥红土的生成条件

红土名称	土样编号	取土地点	高程(m)	母岩	年平均降雨量(mm)	年平均气温(℃)	年平均湿度(%)
鲁布革红土	16-1	坝址左岸	1500	白云岩风化的残积坡积土	1470	17.9	84
	16-3	鸡山土料场	~ 1520				
天生桥红土	B ₂₁	坝址左岸 长山脚、十二份土料场	1153	灰岩、白云岩风化的残积坡积土	1288	15.1	79
	B ₂₃ C ₂₂		~ 1230			~ 20.5	~ 81

从鲁布革和天生桥五个红土试样X射线分析、差热分析及化学全量分析结果可以看出,鲁布革红土的主要粘土矿物成分为高岭石,其次为伊利石和多水高岭石,并含有少量的三水铝石、针铁矿和石英。天生桥红土的粘土矿物成分为高岭石、伊利石和蛭石,有少量三水铝石和石英。从化学全量分析中可看出,碱金属和碱土金属以及SiO₂被溶滤,而Fe₂O₃和Al₂O₃被富集,分子比(SiO₂/R₂O₃)仅为1.19~2.00。

(二)红土干燥脱水不可逆性对物理性质的影响

天然含水量土样、风干土样及烘干土样的物理性质的比较见表2,3。

由表可见,红土干燥脱水后,比重、粘粒含量和塑限略有降低,对液限、塑性指数影响

表2 红土比重、液限、塑限和塑性指数

土样编号	比 重			液 限 (%)					塑 限 (%)					塑性指数 (%)				
	天然含水量土	风干土	烘干土	天然含水量土	风干土	风干抽气土	烘干土	烘干后浸泡30天土	天然含水量土	风干土	风干抽气土	烘干土	烘干后浸泡30天土	天然含水量土	风干土	风干抽气土	烘干土	烘干后浸泡30天土
16-1	2.86	2.88	2.85	72.7	56.9		50.5	51.4	41.5	38.2		35.9	35.9	31.2	18.7		14.6	15.5
B ₂₃				84.9	76.1	76.9	75.9		42.9	43.3	44.4	42.5		42.0	32.8	32.5	33.4	
C ₂₂				62.0	59.5	58.5	53.1		34.4	35.6	35.9	33.1		27.6	23.9	22.6	20.0	
备 注	1. 16-1 天然含水量47.1%，风干含水量6.4% 2. B ₂₃ 天然含水量43.8%，风干含水量8% 3. C ₂₂ 天然含水量36.1%，风干含水量8%																	

表3 红 土 颗 粒 组 成

土 样 编 号	试样制备	颗 粒 组 成 (%)				备 注
		>0.05	0.05~0.005	<0.005	<0.002	
16-1	天然含水量土	2	19	79	59	加 氨 煮 沸
	风 干 土	5	22	73	55	
B ₂₃	天然含水量土	1	17	82	71	加六偏磷酸钠
	风 干 土	2	17	81	70	
C ₂₂	天然含水量土	8	25	67	58	
	风 干 土	8	27	65	56	

很大。以16-1土样为例，天然含水量的土烘干后，液限由72.7%降为50.5%，塑性指数由31.2%降为14.6%，而且将烘干土浸泡30天后，仍不能回复到原有性质。

(三)红土干燥脱水不可逆性对力学性质的影响

1. 压实性

土样制备方法对压实性影响很大，从表4及图1、2看出：①“由湿到干”比“由干到湿”最优含水量提高，最大干容重降低。以16-1号土为例，最优含水量相差达8.4%，最大干容重相差达0.17g/cm³；②土样制备均采用“由干到湿”法，但是，由于土样风干程度不同（即风干含水量不同），对压实性也有影响。

表4 红土的压实性

土样编号	击实功能 (t·m/m ³)	制备方法	起始含水量 (%)	最优含水量 (%)	最优含水量差 值(1)-(2) (%)	最大干容重 (g/cm ³)	最大干容重差 值(1)-(2) (g/cm ³)
16-1	86.4	“由湿到干”(1)	47.1	37.5	+8.4	1.32	-0.17
		“由干到湿”(2)	2.0	29.1		1.49	
16-3	62.5	“由湿到干”(1)	45.0	38.3	+2.1	1.28	-0.08
		“由干到湿”(2)	18.8	36.2	~	1.36	~
		“由干到湿”(2)	3.8	35.0	+3.3	1.38	-0.10
B ₂₁	86.4	“由湿到干”(1)	47.4	39.2	+5.2	1.27	-0.09
		“由干到湿”(2)	9.0	34.0		1.36	
B ₂₃	86.4	“由湿到干”(1)	43.8	38.5	+3.7	1.33	-0.04
		“由干到湿”(2)	21.5	34.8	~	1.37	~
		“由干到湿”(2)	13.5	33.5	+5.0	1.38	-0.05
C ₂₂	86.4	“由湿到干”(1)	36.1	31.7	+3.2	1.41	-0.07
		“由干到湿”(2)	5.5	28.5		1.48	

2. 压缩性

土样制备方法对压缩性也有影响, 尤其非饱和试样比较明显, 见表5及图3。

表5 红土单位沉降量

土样编号	含水量 (%)	干容重 (g/cm ³)	制备方法	单位沉降量 S_i (mm/m)						
				0.5 (kg/cm ²)	1 (kg/cm ²)	2 (kg/cm ²)	4 (kg/cm ²)	8 (kg/cm ²)	16 (kg/cm ²)	
16-3	33.7	1.40	非饱和	“由湿到干”	7.00	8.95	12.05	16.40	24.15	50.75
				“由干到湿”	6.20	8.75	12.90	17.50	26.55	63.95
			饱和	“由湿到干”	7.55	10.45	15.85	22.35	30.80	66.05
				“由干到湿”	4.90	8.00	13.00	19.20	29.40	71.90

3. 无侧限抗压强度

“由湿到干”的无侧限抗压强度为“由干到湿”时的无侧限抗压强度的1.49~1.82倍, 影响是比较大的, 见表6。

4. 抗拉强度

从表7和图4中可见, 压实土的抗拉强度也随土样制备方法的不同而异, 而且不是单一的关系, 而是与含水量大小有关。含水量、干容重相同的试样, 当含水量较大时, “由湿到干”比“由干到湿”的抗拉强度高; 而当含水量较小时, “由湿到干”比“由干到湿”的抗拉强度低。

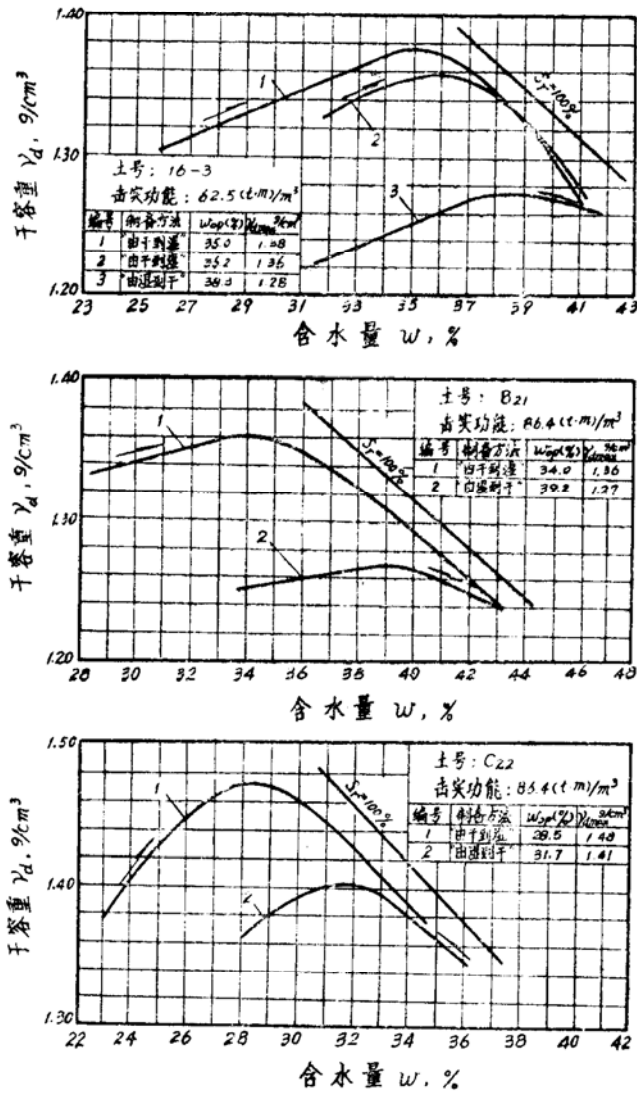


图1 16-3, B₂₁, C₂₂号土击实曲线

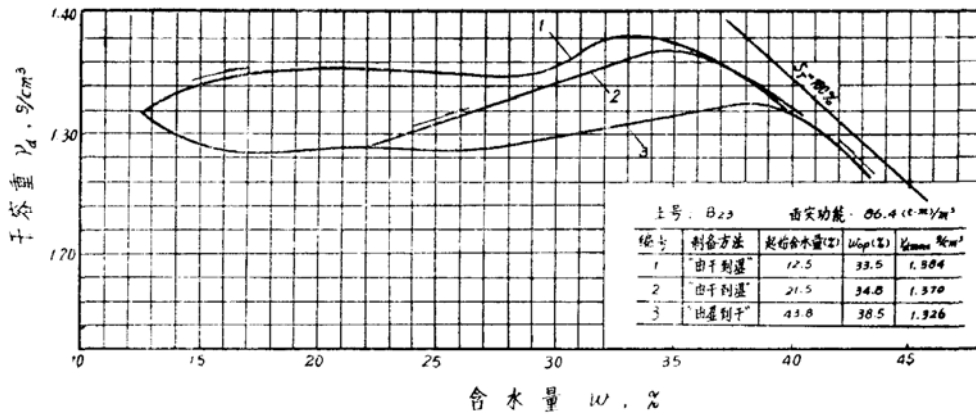


图2 B₂₃号土击实曲线

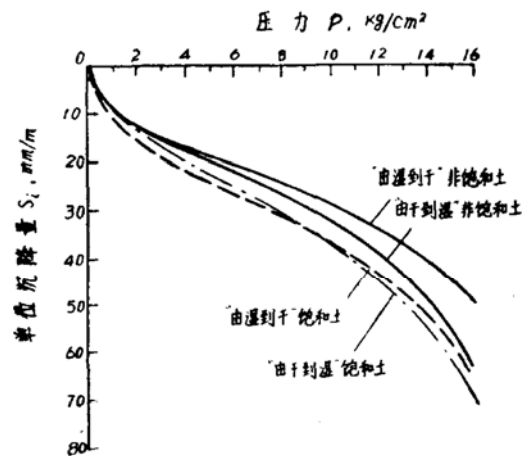


图3 16-3号土压力 p 与单位沉降量 S_i 关系曲线

表6 红土无侧限抗压强度指标

土样编号	含水量 (%)	干容重 (g/cm ³)	制备方法	无侧限抗压强度 q (kg/cm ²)	比值 $\frac{q_{(湿-干)}}{q_{(干-湿)}}$
16-3	31.7	1.37	“由湿到干”	5.46	1.74
			“由干到湿”	3.14	
	33.7	1.40	“由湿到干”	5.23	1.49
			“由干到湿”	3.51	
	35.9	1.37	“由湿到干”	4.20	1.82
			“由干到湿”	2.31	

注: $q_{(湿-干)}$ 表示“由湿到干”的无侧限抗压强度
 $q_{(干-湿)}$ 表示“由干到湿”的无侧限抗压强度

表7 红土抗拉强度指标

土样编号	含水量 (%)	干容重 g/cm ³	制备方法	抗拉强度 σ_t (kg/cm ²)	备注
16-3	33.8	1.40	“由湿到干”	0.49 (2)	直接拉伸仪测定
			“由干到湿”	0.41 (2)	
	34.7	1.39	“由湿到干”	0.34 (5)	劈裂拉伸仪测定
			“由干到湿”	0.29 (3)	
	29.7	1.31	“由湿到干”	0.25 (3)	
			“由干到湿”	0.31 (4)	

注: 括号内数字代表试验次数

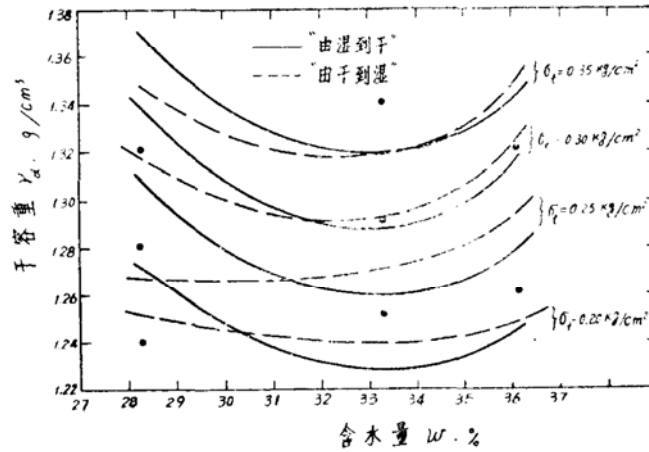


图4 B₂₃号土抗拉强度等值线图

5. 抗剪强度

由三轴压缩试验成果(表8)可知,土样制备方法对总强度有影响,而对有效强度影响不明显。

表8 红土强度指标

土样 编号	土样制备条件			试验方法	总强度			有效强度	
	制备方法	含水量 (%)	干容重 (g/cm ³)		法向应力 (kg/cm ²)	凝聚力 (kg/cm ²)	内摩擦角 (°)	凝聚力 (kg/cm ²)	内摩擦角 (°)
16-3	“由湿到干”	33.5	1.40	不排水剪	≥10	4.20	5.5	2.00	21.5
					≤10	2.30	15.5		
	“由干到湿”	33.6	1.40		≥12	4.80	0	1.70	21.5
					≤12	1.90	13.0		
“由湿到干”	33.5	1.40	饱和固结		1.60	14.5	0.30	32	
“由干到湿”	33.6	1.40	不排水剪		1.45	12.0	0.28	33	

6. 渗透性

用16-3土样,制备试样含水量33.7%,干容重1.40g/cm³,先抽气饱和,然后作渗透试验,“由湿到干”的渗透系数K₁₀=2.4~3.4×10⁻⁶cm/s,平均2.9×10⁻⁶cm/s,“由干到湿”渗透系数K₁₀=1.9~2.3×10⁻⁶cm/s,平均1.9×10⁻⁶cm/s,两者较为接近。

四、原因分析

一般认为红土在干燥过程中,有两个因素可以促使其改变性质:一是有形成团粒的趋势(K.S.Hirashima,1948)^[8],胶粒、粘粒胶结成粉粒和砂粒大小的团粒;二是有些水化矿

物脱水(D. Newill, 1961)^[4], 如水化多水高岭石、针铁矿、三水铝石、水铝英石等次生矿物脱水后都会改变性质。

鲁布革红土, 粘土矿物含有多水高岭石及少量的三水铝石、针铁矿。干燥后可能产生部分脱水现象。风干土颗分结果与天然含水量土的颗分比较, 粘粒含量减少6%, 粉粒、砂粒含量增加6%, 说明干燥后增加了一些团粒。这些都会促使其性质发生变化。但通过观察和分析, 看来这两种红土干燥脱水不可逆性对力学性质的影响, 主要是由于“由湿到干”和“由干到湿”时, 水分在团粒内外的分布不同。用两种方法制备的具有相同含水量、干容重的两个试样, 外观显然不同, “由干到湿”的试样, 看起来偏湿, 大部分水分浮在团粒表面, 近似毛由水, 稍振动甚至有析水现象, 相反, “由湿到干”的试样, 看起来偏干。作击实试验时, 当“由湿到干”的土样处于最优状态时, 而含水量相同的“由干到湿”土样, 却发现粘锤和“弹簧”现象。红土团粒的胶结物是氧化铁、铝等无机胶体, 胶结得比较紧密, 透水性低, 水分不易渗入团粒的内部。两种方法制备相同含水量的试样(指平均含水量相同), 其水分分布并不相同。“由湿到干”者, 团粒内部湿, 团粒表面偏干; 相反, “由干到湿”者, 团粒内部干, 而团粒表面偏湿(见图5)。

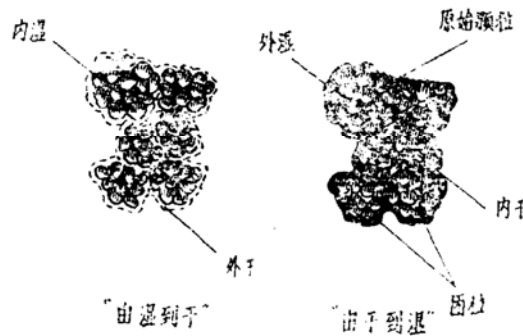


图5 团粒内外水分分布示意

这种具有稳定团粒结构的红土, 在常用的击实功能和垂直荷载下, 主要由于团粒间的大孔隙的压缩而趋于密实, 团粒的破坏和团粒内部微孔隙的压缩是很微小的。因此, 其击实和压缩性也受到团粒表面水膜的控制, 而与总含水量关系较小。因而“由湿到干”者, 内湿外干, 平均含水量大于团粒外部的含水量, 故最优含水量大, 最大干容重小; 而“由干到湿”者则刚好相反。压缩试验的机理也可以这样解释。

红土发生剪切破坏或劈裂破坏时, 也主要沿着团粒与团粒交界面破坏, 因此“由湿到干”者团粒外部含水量偏低, 一般抗剪和抗拉强度均较大, 正由于这一原因, “由湿到干”的试样必须在较高的含水量时才具有“由干到湿”的、同样密度的试样的抗拉强度。

五、工程意义

一般土工试验, 制备土样都用风干土, 个别试验项目用烘干土。我国新出版的水利电力部“土工试验规程(SDS01—79)”, 建议除液限用天然含水量土样外, 其余都用风干土或烘干土。类似鲁布革、天生桥的红土, 干燥脱水不可逆性对物理力学性质有很大的影响。由于这类红土天然含水量均较高, 用它作为坝料, 事先需采取降低含水量措施, 工程施工的实际情况是

“由湿到干”。因此,物理力学性质试验,亦必须用天然含水量土样,“由湿到干”制备试样,才能正确地设计施工提供可靠数据。如仍用风干土样进行试验,其结果将不只是一般误差问题,而是有可能导致工程上的错误决定和判断的问题。例如可能出现下面的问题:

1. 提出过高的填筑干容重及过低的施工含水量。以16—1号土为例,天然含水量为47.1%,“由湿到干”击实试验,最优含水量37.5%,最大干容重 $1.32\text{g}/\text{cm}^3$ 。如设计要求压实度为98%,则要求填筑干容重为 $1.29\text{g}/\text{cm}^3$,土料含水量应降低9.6%。如用“由干到湿”的击实试验成果,最优含水量29.1%,最大干容重为 $1.49\text{g}/\text{cm}^3$,则要求填筑干容重为 $1.46\text{g}/\text{cm}^3$,土料含水量应降低18%。从“由湿到干”的击实曲线看出,如果将土的含水量降至29.1%,使其压实到 $1.46\text{g}/\text{cm}^3$ 的干容重,需要很大的压实功能才有可能。

2. 低估施工期的坝坡稳定性。非饱和土的抗剪强度,“由湿到干”比“由干到湿”大,说明施工期稳定有一定潜力。采用“由干到湿”试验结果,将会低估施工期的稳定性。这对高含水量红土修建的均质坝是有意义的。

3. 计算施工期沉陷偏大,完工后沉陷量偏小。非饱和土压缩性,“由湿到干”比“由干到湿”低得多,而两者饱和后的压缩性相近。因此,坝的施工期沉陷量较小,而完工后沉陷量较大,这对高坝应引起注意。若采用“由干到湿”的试验结果,将会使计算的施工期沉陷量偏大,而完工后剩余沉陷偏小。

当然,并不是所有红土的干燥脱水不可逆性对物理力学性质都有很大的影响,可先作“由湿到干”和“由干到湿”的击实试验作比较,如两者压实性差别较大,其他力学性试验应一律用“由湿到干”制备试样。否则,仍可用常规方法制备试样。其他粘性较大的土,也在不同程度上有类似现象,也可参照上述意见,初步判定干燥脱水不可逆性的影响程度,而采取相应对策。

参 考 文 献

- [1] 中国科学院南京土壤研究所主编,中国土壤,科学出版社,1980年。
- [2] 土坝试验研究组,一种石灰岩风化洪积红粘土心墙土料填筑标准的研究,水利学报,1965年,第4期。
- [3] 水利水电科学研究院岩石土工研究所,鲁布革水电站鸡山料场心墙土料矿化分析和物理性试验报告,1980年。
- [4] Newill, D., A Laboratory Investigation of Two Red Clays from Kenya, Geotechnique, Vol. 11, 1961, pp.303~318.
- [5] Terzaghi, K., Design and Performance of the Sasumua Dam, Proc. Brit. Inst. Civ. Eng., Lond., Vol.9, 1958, pp. 369~394.
- [6] Gidigas, M.D., Laterite Soil Engineering, Pedogenesis and Engineering Principles, 1976.
- [7] Willis, E.A., Discussion on A Study on Lateritic Soils by B.A. Fruhauf, Proc. Highw. Res. Board, Vol. 26, 1946, pp. 589~593.
- [8] Hirashima, K.S., Highway Experience with Thixotropic Volcanic Clay, Proc. Highw. Res. Board, Vol. 28, 1948, pp.481~496.

The Influence of Irreversibility of Desiccation of Lateritic Soils on Their Physico-Mechanical Properties

Yang Yin-hua Bai Shu-tian

(Water Conservancy and Hydroelectric Power Research Institute, Beijing)

Abstract

Present paper discusses the influence of irreversibility of desiccation of lateritic soils on their physico-mechanical properties based on the experimental results of two typical laterite. The experimental results show that many property indexes of these soil samples vary obviously after desiccation in comparison with those at natural state, and these variations are irreversible. The mechanisms of these phenomena have been analyzed. It has been noticed that some erroneous decision and judgement should be arisen in solving practical lateritic soils problems if we neglect this important character.