

重塑红黏土和粉状煤系土的水敏感性比较研究*

李辉¹, 刘顺青²

1. 安徽理工大学土木建筑学院, 安徽淮南 232001;
2. 江苏科技大学土木工程与建筑学院, 江苏镇江 212005)

摘要: 以西南山岭重丘区红黏土和粉状煤系土两种特殊土为研究对象, 进行常规直接剪切试验, 探讨不同含水率对二者粘聚力、内摩擦角、抗剪强度等特征参数的影响。通过试验获得, 两种土质都具有水敏感性, 其中红黏土水敏感性较大, 起始含水率越大两者抗剪强度越小。红黏土的粘聚力在某一含水率范围内下降较明显, 当接近饱和含水率时, 粘聚力趋于稳定; 粉状煤系土的粘聚力则表现出随含水率增大成指数函数形式减小的趋势, 而内摩擦角则成线性减小趋势。研究成果为该地区土体力学计算参数取值提供参考。

关键词: 红黏土; 粉状煤系土; 水敏感性; 直剪

中图分类号: TU411.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2015)06-0089-05

Comparative Study on the Water Sensitivity of Remoulded Red Clay and Powered Soil of Coal Measure Strata

LI Hui¹, LIU Shunqing²

- (1. College of Civil Engineering and Architecture, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
2. School of Architecture and Civil Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Use two special soil of southwest mountainous areas of red clay soil and powdered coal as research object, by conventional direct shear test, to study the influence of moisture content on these two soil of cohesion and internal friction angle, shear strength and other characteristics parameters. The results indicate that the red clay and powered soil of coal measure strata have water sensitivity, and the red clay water have larger sensitivity. With increase of water content, the cohesion of red clay decreases in segments. When water content approaches saturation moisture content, the cohesion of red clay is stable. The internal friction angle of red clay keeps stable at the beginning and then sharply declines with water content increasing. With increase of water content, the cohesion of powered soil of coal measure strata and its water content decreases in the form of exponential function, while its internal friction angle decreases in the form of linear function. The research results provide a reference for the region of soil mechanics calculation parameter selection.

Key words: red clay; powered soil of coal measure strata; water sensitivity; direct shear test

随着我国各种基础设施建设的纵向延伸, 在西南山岭重丘区进行大量公路及隧道工程施工, 但该地区地质条件复杂, 沿线广泛分布红黏土和粉状煤系土等特殊土。

* 收稿日期: 2015-05-30

基金项目: 安徽省自然科学基金资助项目(1408085ME79)

作者简介: 李辉(1970年生), 男; 研究方向: 岩土工程设计及施工; E-mail: 447175683@qq.com

红黏土含水率高、裂隙发育, 遇水后膨胀量小, 失水后剧烈收缩, 为黏土^[1]; 粉状煤系土含水率低、黏结能力差、遇水膨胀软化、结构易破坏而丧失强度等特点, 其作为路基土或路堑边坡土是一种不良土质^[2]。目前为止, 很多学者对不同含水条件下土体的强度及变形特性进行了研究, 如党进谦等^[3]研究了不同含水率条件下黄土的强度特性; 李保雄等^[4]重点研究了不同沉积年代黄土抗剪强度的水敏感性机制; 胡昕等^[5]研究了含水率对砾状煤系土抗剪强度的影响; 赵颖文等^[6]系统研究了原状红黏土胀缩特性随脱湿过程的演化规律; 王军等^[7]对不同含水率下膨胀砂岩的强度特性进行了试验研究; 刘顺青等^[8]采用室内试验系统研究了高液限土和红黏土抗剪强度的水敏感性。迄今为止, 红黏土的研究主要集中在红黏土的工程力学特性及其作为路基土方面^[9-14], 有关粉状煤系土的研究主要集中在其物理力学特性方面^[2]。

为进一步了解西南山岭重丘区沿线各特殊土之间的力学性能差异, 促进土力学理论的发展以及满足工程实践的需要, 应加强红黏土和粉状煤系土的水敏性特征的试验研究与理论探讨。本文对取自广梧高速公路沿线的红黏土和粉状煤系土进行了一系列的室内试验, 探讨并对比分析了两者的水敏感性, 得到了一些有益结论。研究结果为广梧高速公路沿线红黏土和煤系土路堑边坡以及路堤的养护提供了建议。

1 测试土料及方法

1.1 测试土料的基本特性

测试红黏土取自广梧高速公路沿线。红黏土以细颗粒为主, 小于 0.075 mm 的颗粒达到 86.17%, 具体见表 1 所示。原状红黏土的基本物理性能指标为: 干密度 1.53 g/cm³; 含水率 25.5%; 压缩系数为 0.45 MPa⁻¹; 渗透系数为 3.2 × 10⁻⁷ cm/s; 该红黏土属于次生红黏土^[15]。

测试粉状煤系土取自广梧高速公路沿线。粉状煤系土以砂粒为主, 其中 0.075 ~ 2.000 mm 的含量达到 62.7%, 具体粒组成分见表 2 所示。按照国家标准分类^[16], 此土属于粉土质砂, 其不均匀系数为 27.8, 曲率系数为 2.5, 表明该粉状煤系土的级配良好。粉状煤系土的基本物理性能指标为: 干密度 1.55 g/cm³; 含水率为 11.1%; 压缩系数为 0.089 MPa⁻¹; 渗透系数为 2.1 × 10⁻⁶ cm/s。

由于粉状煤系土十分松散, 现场取样较困难, 为方便比较红黏土与粉状煤系土的力学性能指标,

本文试验统一采用重塑样品, 样品配置时严格按照《土工试验方法标准》(GBT50123 - 1999) 进行, 试样物理性能指标参照原状土试验结果。

表 1 红黏土的颗粒组成

Table 1 Grain size composition of red clay

粒径/mm	含量/%	粒径/mm	含量/%
> 2	2.0	0.50 ~ 0.25	1.67
2 ~ 1	0.9	0.250 ~ 0.075	7.06
1.0 ~ 0.5	2.2	< 0.075	86.17

表 2 粉状煤系土的颗粒组成

Table 2 Grain size composition of powdered soil of coal measure strata

粒径/mm	含量/%	粒径/mm	含量/%
> 5	8.6	0.50 ~ 0.25	23.3
5 ~ 2	3.4	0.250 ~ 0.075	11.5
2 ~ 1	16.6	< 0.075	25.3
1.0 ~ 0.5	11.3		

1.2 测试方法

为比较红黏土与粉状煤系土两种土质的抗剪强度指标, 选用 ZJ 型应变控制式直剪仪进行常规直接剪切试验。试验红黏土制样干密度为 1.53 g/cm³, 按含水率分别为 10.3%、14.8%、20.6%、24.0%、26.5% 制备 5 组试样, 每组试样 4 个, 为防止低含水率下上覆压力偏小以及高含水率下上覆压力偏大而造成土体溢出, 所以施加压力时, 低含水率采用 200、300、400 和 500 kPa, 高含水率则采用 100、200、300 和 400 kPa。粉状煤系土制样干密度为 1.55 g/cm³, 按含水率 4.5%、8.2%、12.2%、16.3%、18.1% 制备试样 5 组, 每组试样 4 个, 压力采用 100、200、300 和 400 kPa。试验结果如表 3、表 4 所示。

2 结果分析

2.1 含水率对黏聚力的影响

不同含水率下红黏土和粉状煤系土黏聚力的关系曲线如图 1 所示。由图 1 中可看出, 红黏土和粉状煤系土的黏聚力随着含水率的增加总体上均呈减小趋势, 但变化趋势有较大不同。研究结论与文献^[6]中广西原状红黏土的黏聚力随着含水率的变化有所区别, 区域的不同是两者变化趋势不同的主要原因。红黏土黏聚力与含水率的关系近似用指数函数表示为

表 3 不同含水率时红黏土的强度指标

Table 3 Strength index of red soil under different water contents

起始含水率 /%	垂直压力 /kPa	剪切应力 /kPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
10.3	200	1 018.1	761	52
	300	1 148.3		
	400	1 281.2		
	500	1 448.9		
14.8	200	589.2	349	50
	300	709.6		
	400	829.8		
	500	950.4		
20.6	100	271.2	154	49
	200	386.3		
	300	501.3		
	400	620.8		
24.0	100	85.7	42	23
	200	127.9		
	300	170.5		
	400	218.8		
26.5	100	70.4	38	15
	200	102.8		
	300	130.3		
	400	161.3		

表 4 不同含水率时粉状煤系土的强度指标

Table 4 Strength index of powered soil of coal measure strata under different water contents

起始含水率 /%	垂直压力 /kPa	剪切应力 /kPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^{\circ}$)
4.5	100	79.3	17.2	30.3
	200	132.8		
	300	204.2		
	400	260.1		
8.2	100	75.4	13.1	29.8
	200	128.5		
	300	190.3		
	400	250.8		
12.2	100	71.2	9.2	29.0
	200	123.8		
	300	183.4		
	400	241.1		
16.3	100	64.1	6.5	28.5
	200	120.3		
	300	173.8		
	400	230.2		
18.1	100	62.1	4.8	28.0
	200	119.8		
	300	168.9		
	400	222.3		

$$c = 5818.5e^{-0.1924w}, \quad 10.3 \leq w \leq 26.5 \quad (1)$$

粉状煤系土黏聚力与含水率之间的回归关系近似用指数函数表示为

$$c = 26.98e^{-0.091w}, \quad 4.5 \leq w \leq 18.1 \quad (2)$$

式中, c 为黏聚力, kPa; w 为含水率, %。

通常情况下, 土粒间的相互吸引、水膜联结及胶结作用等是黏聚力的主要来源^[17], 其中水膜联结和胶结作用是最重要的两个部分, 而两者都与含水率有关。含水率的增加时, 土粒表面弱结合水膜增厚, 联结力减弱, 直到土体饱和时水膜联结完全消失^[18]。胶结作用是在矿物溶解和重析出过程中产生的^[19], 胶结物只有当土中自由水增加到某一值后才开始被溶蚀, 并逐渐丧失。可以看出, 只要含水率变化水膜联结就会响应, 而胶结作用只有含水率超过某一值后才逐渐减小并不可恢复。因此, 土体黏聚力随着含水率的增大减小趋势具有分段性。从图 1 可以看出, 红黏土黏聚力减小趋势具有分段性, 含水率在 10.3% ~ 20.6% 之间时下降最为明显, 当黏聚力在接近饱和含水率 24.0% 时已相对稳定。发生这一现象的主要原因是红黏土中游离氧化铁与黏土矿物相互吸附, 对团粒的胶结起到重要作用, 但胶结联结会随含水率增大到某一临界值时出现骤然破坏, 黏聚力明显下降。相对于红黏土而言, 粉状煤系土黏聚力减小的分段性不明显, 主要因为该土为粉土质砂, 颗粒之间的胶结力较小, 水膜联结作用占主要因素。

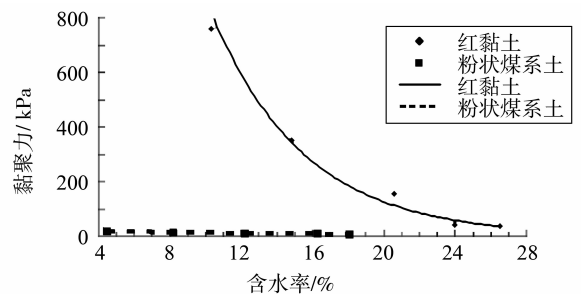


图 1 不同含水率下红黏土和粉状煤系土黏聚力的关系曲线

Fig. 1 Curve of cohesion and water content of red clay and powered soil of coal measure strata

2.2 含水率对内摩擦角的影响

不同含水率下红黏土和粉状煤系土内摩擦角的关系曲线如图 2 所示。由图 2 可看出, 含水率变化对红黏土内摩擦角的影响显著, 对粉状煤系土内摩擦角的影响不显著。红黏土内摩擦角与含水率的关系近似用分段函数表示为

$$\varphi = \begin{cases} 50.5, & 10.3 \leq w < 20.6 \\ 152.3e^{-0.1622w}, & 20.6 \leq w \leq 26.5 \end{cases} \quad (3)$$

粉状煤系土内摩擦角与含水率的关系近似用线性函数表示为

$$\varphi = -0.166w + 31.09 \quad (4)$$

$4.5 \leq w \leq 18.1$

式中, φ 为内摩擦角, ($^{\circ}$); w 为含水率, %。

当红黏土的含水率从 10.3% 增加到 26.5%, 其内摩擦角在 $52^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 之间变化; 而当粉状煤系土的含水率从 4.5% 增加到 18.1%, 其内摩擦角在 $30.3^{\circ} \sim 28.0^{\circ}$ 之间变化。随着含水率的增加, 红黏土的内摩擦角具有显著的分段性特征, 而粉状煤系土的内摩擦角的分段性不明显。这主要是受红黏土黏粒比例较高, 土体比表面积大, 水膜联结作用显著的影响^[8]。因此颗粒结构、大小、形状及密实度是影响土体内摩擦角的重要因素^[17]。因红黏土会吸水膨胀失水收缩, 所以含水率变化时会引起其结构、大小和密实度变化。同时随着含水率的增大, 红黏土中团粒结构中孔隙结构逐渐增大, 导致咬合度逐渐降低, 宏观方面表现为内摩擦角的减小^[20]。从非饱和土力学中基质吸力方面可解释为随着红黏土饱和度的逐渐增大, 负孔隙水压力逐渐减小, 引起表面张力的逐渐消失, 同时颗粒间的挤压作用也随之消失, 相应的摩擦作用减小^[21]。粉状煤系土相对于黏性土而言粗颗粒含量较高, 含水率变化时不会引起其颗粒结构、大小及密实度的明显变化, 所以, 含水率对粉状煤系土内摩擦角的影响相对较小。

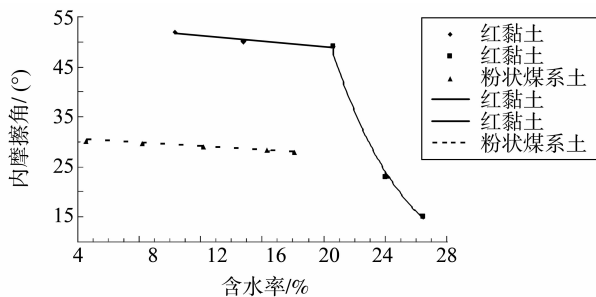


图2 不同含水率下红黏土和粉状煤系土内摩擦角的关系曲线

Fig. 2 Curve of internal friction angle and water content of red clay and powered soil of coal measure strata

2.3 含水率对抗剪强度包线的影响

不同含水率下红黏土与粉状煤系土的抗剪强度包线如图3、图4所示。由图3和图4可看出, 红

黏土和粉状煤系土的抗剪强度均具有显著的水敏感性。红黏土的抗剪强度随着含水率的增加变化趋势具有明显的阶段性: 先小幅降低, 后急剧降低。但粉状煤系土的抗剪强度变化趋势的阶段性不明显。两者抗剪强度水敏感性变化趋势的不同主要原因是两者粒组成分和颗粒间胶结物质的不同。

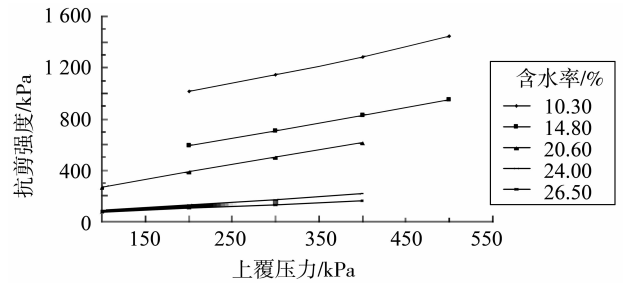


图3 不同含水率下红黏土的抗剪强度包线

Fig. 3 Shear strength envelope of red clay under different water contents

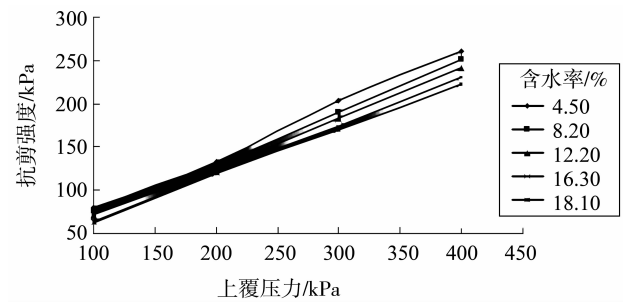


图4 不同含水率下粉状煤系土的抗剪强度包线

Fig. 4 Shear strength envelope of powered soil of coal measure strata under different water contents

3 讨论

红黏土比粉状煤系土更具有的水敏感性, 同时由于两者粒组成分以及颗粒间胶结物质的不同, 表现出不同的规律性。现阶段广梧高速公路已处于营运养护阶段, 为保证养护期相应路堑、路堤边坡的稳定性, 应当采取措施减少含水率的变化。根据本文的研究结论, 给出了以下几点处理建议:

1) 红黏土以细颗粒为主, 小于 0.075 mm 的颗粒达到 86.17%, 在干湿循环条件下表层容易形成裂缝, 这不仅增大了土体的渗透性, 而且也增加了雨水通道, 所以裂缝的存在会影响红黏土边坡的稳定性。广梧高速公路沿线的红黏土边坡应定期进行现场踏勘, 完善排水系统, 发现裂缝及时封堵。

2) 粉状煤系土颗粒间联结较弱、强度低、具

有水敏感性, 含水率增大后抗剪强度下降明显。对于广梧高速沿线的粉状煤系土路堑和路堤边坡, 应做好表层防水并完善排水系统。

3) 边坡稳定性时, 红黏土黏聚力可按指数函数形式取值, 而其内摩擦角则按分段形式取值: 小于某含水率时, 视为常数; 大于该含水率时, 按与含水率成指数关系取值。

4) 边坡稳定性时, 粉状煤系土黏聚力可按指数函数形式取值, 而其内摩擦角则按线性函数取值。

4 结 论

1) 红黏土和粉状煤系土均具有水敏感性, 其中红黏土水敏感性更显著, 起始含水率越大两者的抗剪强度越小。

2) 红黏土的黏聚力在某一含水率范围内下降最为明显, 当接近饱和含水率时, 则趋于稳定; 其内摩擦角则随着含水率的增加先保持稳定, 而后急剧减小。

3) 粉状煤系土的黏聚力随着含水率的增加呈指数函数形式减小, 其内摩擦角则成线性函数形式减小。

4) 颗粒间胶结物质以及粒组成分的不同是红黏土和粉状煤系土水敏感性不同的主要原因。

参考文献:

- [1] 殷宗泽. 土工原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.
- [2] 祝磊,洪宝宁. 粉状煤系土的物理力学特性[J]. 岩土力学,2009,30(5):1317-1322.
- [3] 党进谦,李靖. 非饱和黄土的强度特性[J]. 岩土工程学报,1997,19(2):56-61.
- [4] 李保雄,苗天得. 黄土抗剪强度的水敏感性特征研究[J]. 岩石力学与工程学报,25(5):1003-1008.
- [5] 胡昕,洪宝宁,杜强,等. 含水率对煤系土抗剪强度的影响[J]. 岩土力学,2009,30(8):2291-2294.
- [6] 赵颖文,孔令伟,郭爱国,等. 广西原状红黏土力学性状与水敏性特征[J]. 岩土力学,2003,24(4):568-

572.

- [7] 王军,何森,汪中卫. 膨胀砂岩的抗剪强度与含水量的关系[J]. 土木工程学报,2006,39(1):99-102.
- [8] 刘顺青,洪宝宁,方庆军,等. 高液限土和红黏土的水敏感性研究[J]. 深圳大学学报:理工版,2013,30(1):78-83.
- [9] 刘敏,刘宏,高奋飞. 毕节机场红粘土地基的工程特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(6):84-86.
- [10] 刘敏,刘宏,高奋飞. 毕节机场红粘土地基的工程特性研究[J]. 水利与建筑工程学报,2011,9(6):84-86.
- [11] 刘小平,袁腾方,杨迎东. 湖南非饱和红黏土工程性质的试验研究[J]. 公路工程,2011,36(2):48-52.
- [12] 康长平,廖义玲,易庆波,等. 贵州红黏土液塑限的变异及其对工程性质的影响[J]. 工程地质学报,2011,19(S1):261-267.
- [13] 张金利,蒋正国,杨钢. 聚丙烯纤维红黏土力学特性试验研究[J]. 岩土工程学报,2011,33(S1):420-425.
- [14] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学,2011,31(3):851-855.
- [15] 中华人民共和国建设部. GB50021-2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2002.
- [16] 南京水利科院研究院. GBJ145-1990 土的分类标准[S]. 北京:中国计划出版社,1991.
- [17] 杨庆,贺洁,栾茂田. 非饱和红黏土和膨胀土抗剪强度的比较研究[J]. 岩土力学,2003,24(1):13-16.
- [18] 毕庆涛,姜国萍,丁树云. 含水量对红黏土抗剪强度的影响[J]. 地球与环境,2005,33(3):144-147.
- [19] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [20] 王中文,洪宝宁,刘鑫,等. 红黏土抗剪强度的水敏性研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2011,43(1):17-22.
- [21] GAN J K M, FREDIUND D G, RAHARDJO H. Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test [J]. Canadian Geotechnical Journal,1988,25(3):500-510.