文章编号：1674－9057(2016)02－0260－04 doi:10.3969/j.issn.1674－9057.2016.02.010

水泥外加剂对红黏土强度的影响

肖桂元，龙建云，钟倩丽，蒋延建，陈薪任，李林峰

（桂林理工大学 a. 广西岩土力学与工程重点实验室；b. 土木与建筑工程学院，广西 桂林 541004）

摘 要：对桂林市雁山区某工地红黏土进行烘干，分别在不同水泥掺入比以及不同含水率下进行快剪试验。为找出水泥改良红黏土的最佳条件，研究了相同含水率条件下，红黏土的抗剪强度与水泥掺量的关系；相同水泥掺量条件下，红黏土抗剪强度与含水率之间的关系。试验表明，相同含水率下，水泥土的抗剪强度随水泥掺入比的增加而增大；而在相同水泥掺入比情况下，水泥土的抗剪强度随含水率的增加而减小。将试验数据进行直线拟合绘制图表分析，以此来找出较为合适的水泥掺量及含水率。结果表明，水泥掺入比在9%～13%，含水率为40%时，土的抗剪强度增加最为明显。

关键词：红黏土；快剪试验；水泥掺入比；含水率；桂林

中图分类号：TU432；TU446 **文献标志码**：A

0 引 言

红黏土是由碳酸盐类岩石在特殊的湿热气候条件下经过强烈的物理、化学风化和红土化作用而构成的一种呈褐红、棕红等颜色的高塑性粘土[1]。在我国基本分布于华南及西南地区广阔土地上[2]。红黏土的工程性质十分复杂，国内外都对红黏土进行了比较深入的研究[3]。

红黏土的比表面积大、颗粒之间互相咬合能力较强，而且由于游离氧化铁和氧化铝的胶结作用，在天然状态下会形成牢固的团粒，但同时在天然状态下会经历无数次干湿循环致使红黏土极易干缩开裂，形成较庞大的裂隙网，降雨时会加速雨水的入渗，在非饱和红黏土里含水率和基质吸力是呈反相关的，会引起红黏土里的吸力降低，造成很多工程方面的病害，如边坡滑坡以及路基变形等，因此很多学者针对此问题对红黏土进行改良。施灿海等[4]研究了纤维、纤维水泥对云南地区红黏土强度的影响，结果表明往红黏土中掺入纤维水泥后，其强度有了显著的改善；唐朝生等[5]研究了聚丙烯纤维和水泥对黏性土强度的影响，发现综合加固效果远远高于物理加固或化学加固；但对于桂林红黏土的改良，还做得不够充分。本文以桂林地区的红黏土为对象，通过控制水泥外加剂的掺入比以及含水量来研究其强度变化情况，以此来找出较为合适的水泥掺量比以及含水率来解决红黏土分布范围内工程项目所遇到的工程病害。

1 试样制备及试验方案

1.1 试验原材料

红黏土：试验所需红黏土取自桂林市雁山区某工地，土样呈棕红色。其基本物理性质为：液限64，塑限45，塑性指数19，土粒比重2.73[6]，具体物性指标见表1。

表1 桂林地区红黏土基本物性指标[7]

Table 1 Physical indices of Guilin red clay

含水量/%	土粒比重	孔隙比	压缩模量/MPa	液限/%	塑限/%	塑性指数
34.91	2.73	1.070	8.50	64	45	19

收稿日期：2016－03－10

基金项目：国家自然科学基金项目（51369010；41262011）；广西科技攻关项目（桂科攻1598009－7）；广西自然科学基金创新团队项目（2012GXNSFGA060001）；广西高等学校优秀中青年骨干教师培养工程项目；桂林理工大学大学生创新创业计划训练项目（201510596019）

作者简介：肖桂元（1976—），男，硕士，高级实验师，研究方向：特殊土成灾机理及防治，xiaoguiyuangit@163.com。

引文格式：肖桂元，龙建云，钟倩丽，等. 水泥外加剂对红黏土强度的影响［J］. 桂林理工大学学报，2016，36（2）：260－263.

水泥：试验所需水泥是采用桂林南方水泥有限公司生产的普通硅酸盐水泥，水泥标号为 P. O. 42. 5。试验用水为蒸馏水。

1. 2　试验仪器及方法

本次试验中所采用的仪器为 ZJ 型应变控制式直剪仪。直剪试验方法为快剪。对红黏土的处理，根据土工试验规程要求将工地取回来的土样置于 105 ℃恒温的烘箱中，烘干时间由土的类别决定，黏性土需烘干 12 h，随后取出土样进行碾碎并过 2 mm 筛，将过筛的土样放入保鲜袋内密封备用，制备成快剪试验土样。将准备好的水泥按照不同的掺入比与备用的红黏土混合至均匀，然后往混合均匀的水泥土样中分别按不同的含水率加入蒸馏水再次拌合至均匀(此次拌合时间控制在 5 ~ 10 min，以防水泥硬化不利于后续试验的进行)，随后将拌好的水泥土用击实仪击打成圆柱体，用环刀快速切取试样，切好后两面均盖上玻璃片置于塑料薄膜中密封，防止水分蒸发，放入室内阴暗不通风处静置养护，温度一般为(25 ±1)℃。水泥土经过 28 d 养护期强度可到达标准值的 65% [9]，在 28 d 龄期后取出进行快剪试验。分别施加 100、200、300、400 kPa 的垂直压力，固结时间为 24 h，并保持 0. 8 mm/min 的匀速剪切速率直至剪坏。

1. 3　试验方案

本试验主要考虑影响因素为：水泥掺入比(水泥与红黏土质量之比)、含水率(水与红黏土质量之比)。由于水泥掺入比在小于 20% 时，水泥红黏土的无侧限抗压强度会随着水泥掺入量增大而增大[8]，因此设定水泥掺入比为 0、5%、9%、13%，含水率为 30%、35%、40%、45%、50%。按含水率的不同将试验分为 5 个大组，其中每组再按水泥掺入比的不同分为 4 个小组，每个小组中有 4 个试件，共 80 个试件。每个小组的 4 个试件分别在 100、200、300、400 kPa 的法向压力下进行快剪并记录数据。

2　试验结果及分析

按照土工试验规程进行直接剪切试验，仪器为应变控制式直剪仪，不同含水率和不同水泥掺入比共 20 小组试验，以大致确定最佳掺入比以及最佳含水率。红黏土内摩擦角、水泥掺入比、含水率和黏聚力关系的试验结果如图 1 ~ 图 4 所示。

2. 1　水泥土抗剪强度影响因素分析

通过试验结果分析可以得出以下结论：水泥土的抗剪强度确实受到水泥掺入比、含水率的影响，在相同含水率条件下，水泥土的黏聚力、内摩擦角随水泥掺入比的增加而增大；在相同水泥掺入比（一定范围内）条件下，水泥土的抗剪强度随含水率的增加而减小。

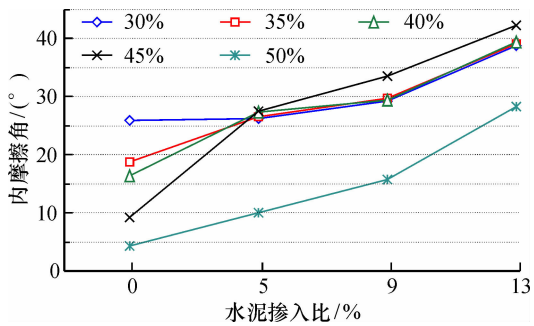

图 1　不同含水率下红黏土内摩擦角与水泥渗入比的关系

Fig. 1　Relationship between the internal friction angle and cement ratio of red clay with different water content

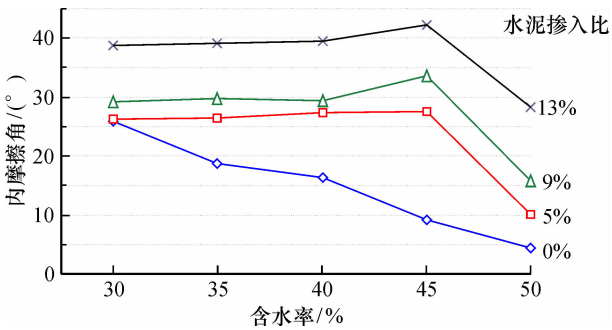

图 2　不同水泥渗入比下红黏土内摩擦角与含水率的关系

Fig. 2　Relationship between the internal friction angle and water content of red clay with different cement ratio

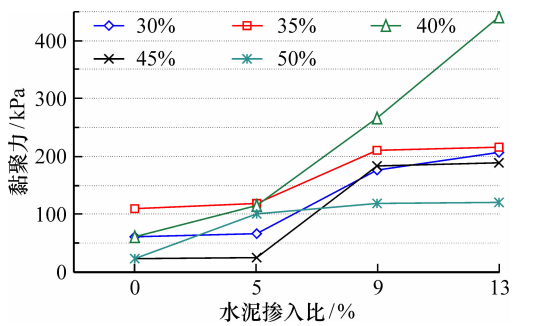

图 3　不同含水率下红黏土黏聚力与水泥掺入比的关系

Fig. 3　Relationship between the cohesion and cement ratio of red clay with different water content

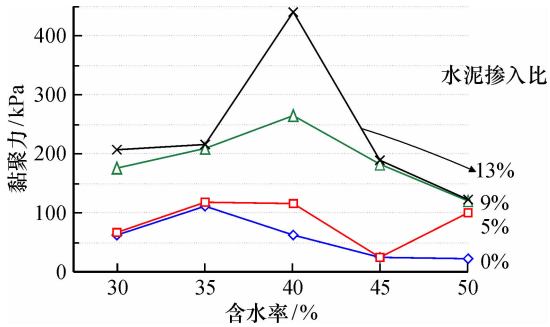

图 4 不同水泥掺入比下红黏土黏聚力与含水率的关系

Fig. 4 Relationship between the cohesion and water content of red clay with different cement ratio

2.2 水泥掺入比对强度的影响

在相同含水率条件下，水泥土的抗剪强度随水泥掺入比的增加而增大(图 1、图 3)。由图 1 分析可知，同在含水率为 45% 的条件下，在红黏土中掺入不同量的水泥（0%、5%、9%、13%），随着水泥含量的提高其内摩擦角也随之增大。同理，含水率为 30%、35%、40% 和 50% 时强度也是呈增加的趋势，但总体强度都低于含水率为 45% 时强度值。在实际工程应用中，提高水泥掺量是获得较大强度措施之一[10]。根据工程经验，当水泥掺量小于 5% 时，由于水泥与土的拌合难以均匀，同时反应过弱，水泥土强度偏低，难以达到有效的地基处理效果。故水泥掺量一般都宜大于 5%，并根据地基处理设计要求，对水泥掺量加以调整。由试验数据分析发现，9% ~13% 的水泥掺入量在接近 40% ~45% 含水率的情况下红黏土的抗剪强度最佳，因此本文认为水泥掺量应在 9% ~13% 最为合理。

2.3 含水率对水泥土强度的影响

针对不同含水率对水泥土强度的影响进行了分析。由图 1 和图 3 不难发现，在相同含水率的条件下，水泥土的黏聚力、内摩擦角随水泥掺入比的增加而增加。由图 4 可知，在水泥掺入比为 5% 时，红黏土的黏聚力相对于未掺加水泥的红黏土增加并不明显，其原因是工程中水泥掺量太少，实际上很难与红黏土拌合至均匀，导致黏聚力的增加并不明显。再由图 2 和图 4 分析可知，在相同水泥掺入比为 5%、9%、13% 时，红黏土的内摩擦角随着含水率的增加先增大后减小，且在含水率为 45% 时达到峰值，红黏土的黏聚力随着含水率的增加而先增大后减小，且在含水率为 40% 时达到峰值。因此，当水泥掺入比为 9% ~13%，含水率为 40% ~45% 时水泥改良红黏土的强度最高。

2.4 含水率对红黏土黏聚力和内摩擦角的影响

在相同水泥掺入比条件下，红黏土的黏聚力、内摩擦角随水泥掺入比增加先增大后减小。以下对此问题进行探讨。

2.4.1 *含水率对红黏土黏聚力的影响* 由图 4 可知，黏聚力随着含水率的增大先增大后减小，水对红黏土黏聚力的影响很大。原因分析如下：

(1) 因为土体的吸力表现为基质吸力和渗透吸力，而基质吸力与含水量有着密切的关系，当含水率（在一定范围内）增大时，基质吸力就会下降，即基质吸力与含水率呈反比的关系。由于基质吸力是衡量土体力学性质的重要指标，其下降必然会导致红黏土黏聚力的下降。因此从单一因素来看并不是过高或过低的含水率就能达到红黏土的最优力学性质，还需找出不同含水率的土体与水泥混合后的最佳比例。

(2) 在氧化铝、二氧化硅等红黏土主要胶结物质中游离的氧化铁是最为重要的胶结物[11]，经过风干后，红黏土中的游离氧化铁的存在状态是以结晶态和胶结态共存的，由于游离氧化铁在红黏土中具有不可逆的干燥性，风干后具有结晶态水稳性的游离氧化铁，不能转化为胶结铁，因此在土颗粒有限空间内由胶结作用形成的黏聚力就不是很大了[12]，所以在低含水率范围内，红黏土的黏聚力变化很快。试验中表现为 35% ~45% 含水率下，土体的强度变化很迅速。

2.4.2 *含水率对红黏土内摩擦角的影响* 根据图 2 试验结果可以得出，随着含水率的增大，红黏土的内摩擦角先增大后减小。分析其原因：土的内摩擦角与其本身的颗粒大小、密实度关系密切；红黏土由于游离氧化铁的胶结，其颗粒间以一种咬合的状态存在，这也与内摩擦角有一定的关系[12]。

由于土中存在游离氧化铁，在干燥环境下以结晶和胶结两种状态共同存在，胶结的那部分游离氧化铁再通过相互咬合而形成的土体颗粒已经与单一的土体颗粒有着很大的不同，又由于晶态的那部分游离氧化铁在团粒的表面形成“包膜”[13]而增加了红黏土团粒表面的粗糙度，从而提高了其内摩擦角。但同时由于掺入了一定比例的水泥，其中的氢氧化钙能够通过土体的团粒化作用、化合作用使得土体强度迅速提高，内摩擦角的变化就没有未

掺和水泥的变化规律那么明显，其总体强度却得到了很大的提高。

3　结　论

根据上述分析，可得到以下几点结论：

（1）在含水率相同条件下，水泥红黏土的抗剪强度随水泥掺入比的增加而增大；在红黏土中加入水泥，掺入量为 9% ~13% 时抗剪强度有明显改善；从黏聚力、内摩擦角角度看，水泥红黏土存在最优水泥掺入比，为 9% ~13%。

（2）在相同水泥掺入比的条件下，水泥红黏土的抗剪强度随含水率的增大先增大后减小。因此，在确定一定水泥掺量的时候，需要控制好红黏土的含水率，使其达到该掺入比的最佳含水率，从而使抗剪强度达到最大。本试验研究表明：当水泥掺入比为 9% ~13%，同时含水率达到 40% ~45% 时，红黏土的强度最佳。

（3）红黏土富含氧化物，通过含水率对黏聚力和内摩擦角的分析可知，控制好水泥的掺入比和含水率对该土所产生的化学作用，会对红黏土强度的增长有促进作用，红黏土的这一性质以及水泥对红黏土改良后的强度特性可以应用在实际工程中。

参考文献：

[1] Qiang X K, An Z S, Song Y G, et al. New eolian red clay sequence on the western Chinese Loess Plateau linked to onset of Asian desertification about 25 Ma ago [J] Science China: Earth Sciences, 2011, 54 (1): 136 - 144.

[2] 姜洪涛. 红粘土的成因及其对工程性质的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2000 (3): 33 - 37.

[3] 陈爱军, 张家生. 基于线弹性力学的非饱和红粘土裂缝开展分析 [J]. 自然灾害学报, 2013, 22 (3): 198 - 204.

[4] 施灿海, 李猛, 王绍强, 等. 改良云南红粘土强度特性研究 [J]. 科学技术与工程, 2011, 11 (9): 2137 - 2140.

[5] 唐朝生, 施斌, 高玮. 聚丙烯纤维和水泥对粘性土强度的影响及机理研究 [J]. 工程地质学报, 2007, 15 (1): 108 - 113.

[6] 杨健. 桂林红黏土工程地质特征 [J]. 矿产与地质, 1994, 8 (4): 292 - 296.

[7] 王经, 陈秋光, 孙晓俐. 桂林红粘土不同应力状态下的强度特性分析 [J]. 土工基础, 2012, 26 (3): 79 - 80.

[8] 郭培玺, 阮怀宁. 红粘土地区水泥土强度的试验研究 [J]. 岩土工程技术, 2006, 20 (3): 132 - 135.

[9] 陈达, 庄宁, 廖迎娣, 等. 水泥土力学特征随龄期发展规律试验研究 [J]. 水利水运工程学报, 2012 (1): 26 - 29.

[10] 邱则有, 蒋暾. 粘土固化剂综述与探讨 [J]. 硅酸盐建筑制品, 1990 (3): 25 - 30.

[11] 孔令伟, 罗鸿禧. 游离氧化铁形态转化对红粘土工程性质的影响 [J]. 岩土力学, 1993, 14 (4): 25 - 39.

[12] 王中文, 洪宝宁, 刘鑫, 等. 红粘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.

[13] 李晓全, 马石城, 屈畅姿, 等. 水泥红粘土的强度试验研究 [J]. 公路工程, 2007, 32 (6): 49 - 52.

Effects of cement additive on the strength of red clay

XIAO Gui-yuan, LONG Jian-yun, ZHONG Qian-li, JIANG Yan-jian, CHEN Xin-ren, LI Lin-feng

(a. Key Laboratory of Guangxi Geotechnical Mechanics and Engineering; b. College of Civil and Architecture, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The quick shear experiments were carried out by drying red clay in some sites of Yanshan in Guilin respectively in different cement mixing ratio and under different moisture contents. In order to find out the optimal cement-mixing ratio of red clay, the relationships of the shear strength of red clay and cement dosage under the same moisture condition are researched. Under the condition of the same cement content, the relationship between the shear strength of red clay and the moisture content, test indicates that the shear strength of cement-treated soil increases with the increase of the ratio of cement mixing under the same moisture content. However, under the condition of the same ratio of cement mixing, the shear strength of cement-treated soil decreases with the increase of moisture content. In order to find out the suitable dosage of cement content and moisture content, the linear fitting chart and test data with origin software are analyzed. The results show that the shear strength of soil increases most obviously under the condition of the cement mixing ratio within 9% - 13% and the moisture content 40%.

Key words: red clay; quick shear test; cement mixing content; moisture content; Guilin