

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2019.02.003

水泥稳定红土砾石的承载特性试验研究

刘 泽¹, 黄凯峰¹, 谷 明¹, 任 涛², 梁贇贇²

(1. 湖南科技大学 土木工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 浙江交工钱潮建设有限公司, 浙江 杭州 310051)

摘 要: 结合刚果(布)2号公路的建设, 在对天然红土砾石进行土工试验的基础上, 通过不同掺量水泥稳定红土砾石的室内 CBR 试验, 研究了水泥掺量对红土砾石承载特性的影响, 获得了改良红土砾石的最佳水泥掺量, 再通过水泥稳定红土砾石基层铺筑现场试验, 研究了水泥稳定红土砾石用于路面基层的可行性与施工要求。研究表明, 击实功、压实度、水泥掺量、含水率等对红土砾石的 CBR 都有明显影响, 随着水泥掺量的增加和压实度的提高, 稳定土的 CBR 值增大; 相同水泥掺量和压实度情况下, 重型击实时 CBR 值较轻型击实时的要高; 当含水率高于最佳含水率时, 土样的 CBR 值下降; 采用掺杂质量分数为 4% 水泥稳定的红土砾石经过合理施工、碾压和养护, 可以满足刚果(布)2号公路基层的技术要求。

关键词: 红土砾石; 水泥掺量; 控制含水率范围; 压实度; 施工质量

中图分类号: U414

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2019)02-0012-05

引文格式: 刘 泽, 黄凯峰, 谷 明, 等. 水泥稳定红土砾石的承载特性试验研究 [J]. 湖南工业大学学报, 2019, 33(2): 12-16.

An Experimental Study on the Bearing Characteristics of Cement Stabilized Laterite Gravel

LIU Ze¹, HUANG Kaifeng¹, GU Ming¹, REN Tao², LIANG Yunyun²

(1. School of Civil Engineer, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China;

2. Zhejiang Jiaogong Qianchao Construction Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: Combined with the construction of Congo (Brazzaville) Highway 2, and based on the geotechnical test of natural laterite gravel, a research has been conducted on the influence of cement permeability on the bearing capacity of laterite gravel in the form of laboratory tests with different content of cement stabilized laterite gravel, thus obtaining the optimum cement proportion of cement modified clay gravel. Then a field test has been carried out of the cement stabilized laterite gravel pavement based on its feasibility and construction requirements. The research results show that compaction work, compactness, cement content and water content have obvious effects on CBR of laterite gravel. With the increase of cement proportion and compaction degree, the CBR value of stabilized soil tends to increase as well. The real-time CBR value of heavy impact is higher than that of light compaction with the same cement proportion and at the same compaction degree. When the moisture content is higher than the optimum moisture content, the CBR value of soil sample decreases. After a proper roller compaction and maintenance, the stabilized laterite gravel with 4% of cement proportion can meet the requirements for the base of highway 2 in Congo (Brazzaville).

Keywords: clay gravel; cement proportion; water content range control; compaction degree; construction quality

收稿日期: 2018-04-04

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2017JJ2087), 浙江省交通建设行业协会科技基金资助项目(2015A01)

作者简介: 刘 泽(1975-), 男, 湖南攸县人, 湖南科技大学讲师, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为路基路面与支挡结构, E-mail: csuzeliu@163.com

0 引言

近年来,我国路桥建设企业在非洲承接了大量的道路建设项目,充分利用当地建筑材料建设高质量的工程是这些企业提高竞争力的基本要求。在非洲分布着一种被称为“红土砾石”的红褐色砾石土,不仅来源丰富、开采简单,而且压实后强度较高、水敏感性较低,是一种优质的路基填料^[1-2]。在南苏丹、科特迪瓦、马里等国家的道路、机场建设中,都大量使用该砾石。但这些应用以路基填筑为主,由于路面结构直接承受交通荷载作用,对材料的要求较路基高得多,天然红土砾石还达不到这种要求,一般采用水泥进行改良。在南苏丹朱巴国际机场改造项目中,应巩邦等^[3]对红土砾石的路用性能进行了研究,并采用水泥作为黏结剂,对红土砾石进行改良,再用作机场飞行区路面底基层填料。郭奕清^[4]对水泥稳定红土砾石作为路面基层特性和施工要求进行了研究,并在科特迪瓦阿本古鲁-阿尼比列克鲁道路建设中取得较好的经济效益。曹长伟等^[5]基于对马里红土砾石开展 CBR (California bearing ratio) 和动态弹性模量试验研究的基础上,认为红土砾石可以用于低交通量的路面基层填筑。但这些研究是以室内试验为主,对要进行大体积摊铺的实际工程研究还很少^[6-8]。因此,本文结合刚果(布)2号公路的施工,为降低工程造价,将红土砾石用于路面基层填筑,通过室内试验获得水泥稳定红土砾石的最佳掺量,并在此基础上开展了稳定红土砾石底基础的施工工艺与施工质量检测,可为类似工程提供参考。

1 水泥稳定红土砾石的承载特性

1.1 天然红土砾石的基本性质

非洲地区的红土砾石主要由铁质硅铝结核性砾石和黏性土(以石英为主)组成,外观呈红色,其矿物组成见表1。

表1 红土砾石的矿物组成

Table 1 Mineral composition of red clay gravel

成分	铬铁矿	赤铁矿	硅钙石	高岭石	石英
质量分数/%	0.80	33.80	9.15	24.75	31.50

已有研究^[1]认为,红土砾石是在非洲特有的旱雨季交替气候条件下形成的:在雨季,受微酸性的雨水淋溶作用,原岩中的可溶性 SiO_2 和碱类物质被水解带走;到了旱季,在高温蒸发和毛细上升作用下,不溶性铁、铝、硅等氧化物缓慢上升并形成不规则结核体,并不断胶结、复合、脱水、增大,形成强度很高的砾石体,而原岩不断释放出铁、铝、硅等物质后

转变成一般的黏性土。

为获得红土砾石的工程特性,课题组结合刚果(布)2号公路二期工程的建设,在 PK88+250 处的料场采取了天然红土砾石土样(图1)。

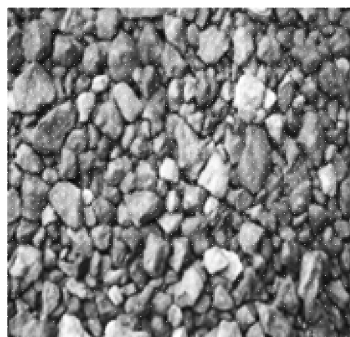


图1 红土砾石土样

Fig. 1 Sample of red clay gravel

土样中砾石的构成(粒径大于 4.75 mm)以赤铁矿石和高岭石为主,其中赤铁矿石的结晶程度较高,强度硬度较大,因而土样中部分颗粒质地坚硬,长时间浸水也不会软化。高岭石属黏土矿物,质地较脆。土样中的粉黏粒组以石英为主,物理化学性质均非常稳定,因而土样的膨胀性(膨胀率小于 1%)较小。由于赤铁矿石的存在,土样呈红褐色。

在实验室将土样风干后,先后完成了筛分、击实、液塑限、CBR 承载比等试验。图2为取自同一料场3组土样的颗粒级配曲线。

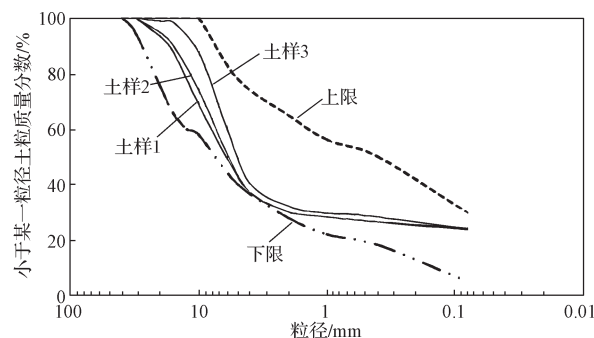


图2 红土砾石级配曲线

Fig. 2 Gradation curves of red clay gravel

由图2可见,3组土样的级配曲线基本一致,平均土样粗颗粒(粒径大于 2 mm)的质量分数为 69.30%,细颗粒(粒径不大于 0.08 mm)的质量分数为 23.86%;筛分曲线中间部分颗粒的坡度较大,表明中间颗粒缺失,属于不良级配的砾石土质。

土样的液塑限、最大干密度、最佳含水率等参数见表2。

表2 红土砾石的物理力学性质

Table 2 Physical and mechanical properties of red clay gravel

天然含水率/%	液限/%	塑限/%	最佳含水率/%	最大干密度/($\text{t}\cdot\text{m}^{-3}$)
9.82	29.4	14.2	8.60	2.06

不同压实度土样的 CBR 承载比见图 3。

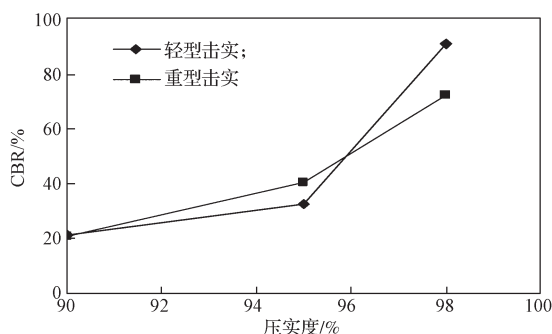


图 3 红土砾石 CBR 随压实度的变化曲线

Fig. 3 Change curves of CBR with red clay gravel compaction degree

刚果(布)政府对路基路面填料提出的基本要求如表 3 所示。对基层材料,除了要满足表 3 的要求,还对填料级配有一定要求(图 2 中的上下限)。对比可知,天然红土砾石可以满足路基、垫层以及底基层的要求,同时也满足路面基层对素土的要求,但如果确要用作路面基层,还需进一步研究采用水泥稳定后的强度特性并确定最佳水泥掺量。

表 3 填料要求

Table 3 Filling requirements

项目	填方工程	垫层	底基层	基层
2 mm 筛孔通过率			<50	
粒径 <80 μm 的质量分数	<50	<25	<40	≤ 30
压实度	≥ 92	≥ 95	≥ 98	≥ 98
4 d 浸泡后 CBR 承载比	≥ 15	≥ 20	≥ 30	≥ 30 (素土); ≥ 160 , 水泥稳定后
液限指数	<50	<50	<40	<35
塑限指数	<25	<25	<25	<20

1.2 水泥稳定红土砾石的承载特性试验

1.2.1 试验方案

为进一步了解稳定红土砾石承载特性随水泥掺量的变化,获得最佳水泥掺量质量分数,拟开展不同条件下水泥稳定红土砾石的承载特性试验。稳定土的承载力采用 CBR 试验测定^[9-10]。

为使试验结果能更好地指导工程施工,试样制作时考虑 2 种击实方法(轻型击实,每层 55 击;重型击实,每层 98 击)、2 种含水率(8.60%,为最佳含水率;9.82%,为天然含水率)、3 种压实度(90%,95%,98%)、5 种水泥掺量质量分数(1%,2%,3%,4%,5%),水泥采用 425# 普通硅酸盐水泥。每组制作 3 个平行试样,在养护室内进行标准养护(时间为 90 d,温度为 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$,相对湿度为 95% 以上)后进行 CBR 试验。

1.2.2 试验结果分析

图 4 为不同掺量下水泥稳定红土砾石的 CBR 变

化曲线(含水率为 8.60%)。

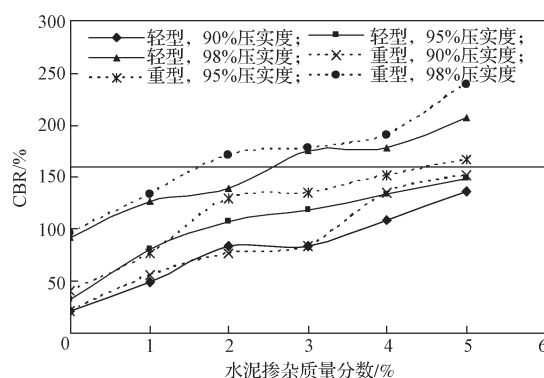


图 4 土样 CBR 值随水泥掺量质量分数的变化曲线

Fig. 4 Change curves of CBR with cement proportion

分析图 4 可知,2 种击实条件下不同水泥掺量稳定红土砾石的 CBR 值有着相同发展规律,均随水泥掺量的增加而增大,且随压实度的增加而增大;在相同压实度与水泥掺量条件下,重型击实相对于轻型击实对提高土样 CBR 值更有效。从图中还可以看到,击实功、压实度、水泥掺量三者对土样 CBR 都有明显影响。要满足技术标准要求(表 3),若采用轻型击实方式,压实度需达到 98% 且水泥掺量质量分数达到 3% 以上时,土样 CBR 才能大于 160%。若采用重型击实,压实度需达到 98% 且水泥掺量质量分数必须大于 2% 才能满足要求。由此可见,为了降低施工成本,减少水泥掺量,需采用重型击实施工设备,严格控制压实度达到 98% 以上。

在实际施工时,含水率是影响土样承载力的另一个重要因素。为此,控制试样的压实度为 98%,先后完成了 8.60% (最佳含水率)、9.82% (天然含水率) 2 种含水率下不同水泥掺量的 CBR 试验。试验结果见图 5。

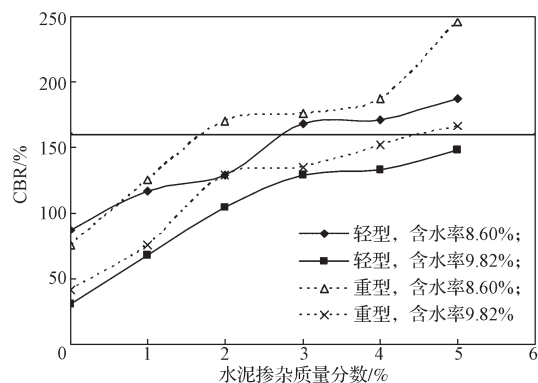


图 5 含水率对不同水泥掺量土样 CBR 值的影响

Fig. 5 Effect of water content on CBR values of soil samples with different cement proportions

分析图 5 可知,不管是采用重型击实还是轻型击实,天然含水率时的 CBR 值都要较最佳含水率的要

小。要满足技术标准要求,重型击实时最佳含水率下土样只需掺入质量分数为2%的水泥,而在天然含水率时,水泥掺杂质量分数需要达到5%;当采用轻型击实,最佳含水率时需掺入质量分数为3%的水泥,而天然含水率时,水泥掺杂质量分数达到5%时仍达不到技术标准的要求。由此可见,含水率对稳定土样CBR值有明显影响。当含水率超过最佳含水率,即使大幅增加水泥掺量也有可能达不到要求。因此,实际施工时应当严格控制土样的含水率。

结合试验结果,并且考虑实际施工时的差异,建议在现场施工采用重型击实标准配置施工设备,严格控制土样含水率和压实度,水泥掺杂质量分数控制为4%。

2 水稳红土砾石基层现场施工试验

2.1 试验方案

为确定水泥稳定红土砾石基层施工时的机械配置和碾压次数、松铺系数等施工参数,拟开展水泥稳定红土砾石基层的现场试验。试验路段定在刚果(布)2号公路蒙比利至韦索的PK84+325~PK84+425路段,长度为100 m。根据室内试验结果,采用水泥掺杂质量分数为4%的掺量对红土砾石进行稳定,水泥采用425#普通硅酸盐水泥,配合比(质量比)为 $w(\text{红土砾石}):w(\text{水泥}):w(\text{水})=1.00:0.04:0.07$ 。试验路段基层设计厚度为20 cm,宽度为11 m,松铺系数暂定为1.2,松铺厚度取24 cm。

主要设备如下:稳定土拌和设备、摊铺机、20 t单钢轮压路机、胶轮压路机、洒水车、装载机各一台(套);自卸车若干等。

试验段施工顺序如下:准备工作→混合料拌和→拌和料运输→砾石混合料摊铺→压实→控制(放坡)→自检→养护→验收,得出试验参数。

基层铺设前,对底基层的标高、宽度、压实度等按规范要求验收,再恢复中线,并在两侧路肩边缘设置钢钎指示桩,然后根据基层铺筑高度进行水平控制测量,以便摊铺机控制标高。

为了使水泥和红土砾石充分搅拌均匀,采用稳定土拌合站进行拌和,拌合前先将设备调试至配合比控制准确后再正式拌制混合料。摊铺作用采用自卸汽车运料、ABG6820摊铺机铺料、20 t单钢轮压路机压实。碾压次数和行驶速度要求:第1遍进行静压,行驶速度为1 km/h;第2遍进行弱振,行驶速度为1.5 km/h;第3遍进行强振,行驶速度为2 km/h。根据现场测压实度情况,若压实度达不到要求则进行强振直到达到压实度标准为止,再采用胶轮碾压至表面无轮迹。

图6为施工现场照片。



图6 施工现场

Fig. 6 Construction site

碾压完成并经检验合格后进行为期3 d的养生。在养生期间,始终保持基层表面潮湿状态,并实行交通管制。

2.2 施工质量检测

采用灌砂法及酒精烧干法测定压实度和含水率。检测从第3遍碾压后开始,每25 m检测一个点,直至压实度检测满足设计要求,并测量终压后标高。终压后的检测结果见表4。养生3 d后用贝克曼梁以及承载板法测定了基层的弯沉值和回弹模量,检测结果见表5。

表4 压实度和含水率检测结果

Table 4 Test results of compaction degree and water content

编号	桩号	压实度/%	含水率/%
1	PK84+335 左	98.7	7.3
2	PK84+360 中	98.9	7.4
3	PK84+385 右	99.4	8.0
4	PK84+410 中	99.9	7.4

表5 弯沉值和回弹模量检测结果

Table 5 Test results of deflection and resilience modulus

编号	桩号	弯沉值/mm	回弹模量/MPa
1	PK84+335 左	0.80	255
2	PK84+360 中	0.70	220
3	PK84+385 右	0.68	241
4	PK84+410 中	0.72	259

刚果(布)2号路基层按法国设计规范要求:路面基层的压实度不低于98%,弯沉值小于0.9 mm,回弹模量不低于140 MPa。从检测结果可以看到,试验路段所配置的主要机械设备、施工工艺能够满足摊铺基层的施工要求。

3 结论

1) 非洲刚果盆地的红土砾石主要由铁质硅铝结核性砾石和黏性土组成,具有强度高、水稳定性好等优点。天然红土砾石可以满足路基、垫层以及底基层

的要求。

2) 水泥稳定红土砾石的承载比试验表明, 击实功、压实度、水泥掺量、含水率等对土样的 CBR 都有明显影响。随着水泥掺量增加和压实度的提高, 稳定土的 CBR 值增大; 相同水泥掺量和压实度时, 重型击实时 CBR 值较轻型击实时的要高; 当含水率高于最佳含水率时, 土样的 CBR 值出现下降; 当含水率超过最佳含水率, 即使增加水泥掺量也有可能达不到要求。

3) 当采用水泥稳定红土砾石作为基层(底基层)填料时, 现场施工宜采用重型击实标准配置施工设备, 严格控制土样含水率和压实度, 水泥掺杂质量分数控制为 4%。

4) 现场试验表明, 以水泥掺杂质量分数为 4% 的水泥稳定红土砾石作为路面基层材料时, 经过合理的施工碾压和养护, 可以满足刚果(布)2 号公路基层的技术要求。

参考文献:

- [1] 周大全, 甄玉凤. 非洲热带地区红土砾料在公路工程中的应用[J]. 中外公路, 2015, 35(增刊1): 124-127.
ZHOU Daquan, ZHENG Yufeng. Application of Red Soil Gravel in Tropical Area to Highway Engineering[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(S1): 124-127.
- [2] 纪更占, 钱劲松, 凌建明. 西非马里地区红土粒料的矿物组成与路用性能[J]. 公路工程, 2017, 42(5): 327-331.
JI Gengzhan, QIAN Jinsong, LING Jianming. Mineralogical and Engineering Properties of Lateritic Gravels From the Republic of Mali in West Africa[J]. Highway Engineering, 2017, 42(5): 327-331.
- [3] 应巩邦, 汪日灯, 申景辉. 红土砾料在南苏丹朱巴国际机场改造项目中的应用研究[J]. 路基工程, 2016, 36(1): 110-113.
YING Gongbang, WANG Rideng, SHEN Jinghui. Research on Red Clay Rravel Applied in Juba International Airport Renovation Project of South Sudan[J]. Subgrade Engineering, 2016, 36(1): 110-113.
- [4] 郭奕清. 科特迪瓦水泥稳定红土砾石基层[J]. 国外公路, 1990(2): 18-20.
GUO Yiqing. Cement Stabilized Red Soil Gravel Base of Cote D'Ivoire[J]. Foreign Highway, 1990(2): 18-20.
- [5] 曹长伟, 罗志刚, 钱劲松. 西非马里地区级配红土粒料的室内试验研究[J]. 中外公路, 2015, 35(5): 54-57.
CAO Changwei, LUO Zhigang, QIAN Jingsong. Laboratory Test of Grading Laterite Pellets in Mali Region of West Africa[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(5): 54-57.
- [6] 董 剑. 红土粒料在非洲公路施工中的应用研究[J]. 建筑机械, 2017(6): 108-110.
DONG Jian. Application of Laterite Materials in Construction of Highway in Africa[J]. Construction Machinery, 2017(6): 108-110.
- [7] 黄 超, 肖来兵, 周如明. 西非地区水稳天然重砾石红土基层施工技术[J]. 交通建设与管理, 2014(7): 147-150.
HUANG Chao, XIAO Laibin, ZHOU Rumeng. Construction Technology of Water Stabilized Natural Heavy Gravel Laterite Base in West Africa[J]. Transportation Construction & Management, 2014(7): 147-150.
- [8] 刘 泽, 谷 明, 黄凯峰, 等. 国内外红土砾石工程特性与路用性能研究[J]. 湖南交通科技, 2017, 43(4): 27-30.
LIU Ze, GU Ming, HUANG Kaifeng, et al. Study on Engineering Characteristics and Road Performance of Laterite Gravel at Home and Abroad[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2017, 43(4): 27-30.
- [9] 庄开伟, 杨建华. 含砾砂岩 CBR 值的影响因素研究[J]. 湖南工业大学学报, 2010, 24(4): 17-21.
ZHUANG Kaiwei, YANG Jianhua. Analysis on Effect Factors of CBR of Gravel-Bearing Sandstone[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2010, 24(4): 17-21.
- [10] 杨 阳, 刘 杰, 仵永杰, 等. 全风化花岗岩路基改良土处理试验研究[J]. 湖南工业大学学报, 2015, 29(6): 11-15.
YANG Yang, LIU Jie, WU Yongjie, et al. Experimental Research on Improvement of the Whole Weathered Granite Subgrade[J]. Journal of Hunan University of Technology, 2015, 29(6): 11-15.

(责任编辑: 申 剑)