

西非塞内加尔红土粒料的承载特性研究

孟会林^{1,2}, 金海兵³, 刘雄伟⁴, 谢国瑞⁵

(1. 河北省交通规划设计院, 河北 石家庄 050091; 2. 公路建设与养护技术、材料及装备行业研发中心;
3. 中国路桥工程有限责任公司; 4. 河北省道路结构与材料技术创新中心; 5. 交通运输部公路科学研究院)

摘要: 通过室内试验对比研究了西非地区塞内加尔分布的8种红土粒料的矿料组成、级配特征、膨胀性及击实与承载特性。结果表明:粒料天然级配相对连续、粉料黏性较小的红土粒料具有相对更好的工程应用性质;塞内加尔大部分红土粒料的最佳含水率为10%~16%;部分红土粒料具有一定膨胀性,最大线膨胀率可达2.0%以上;大部分红土粒料95%压实度的CBR不低于40%,满足非洲地区路面底基层材料的技术要求,部分红土粒料的CBR受压实度影响显著。

关键词: 道路工程; 红土粒料; 膨胀; CBR值; 承载能力; 底基层

1 前言

红土粒料是非洲地区广泛存在的一种天然筑路材料,已有资料普遍认为其是在非洲特殊的旱湿两季循环交替的气候条件下形成的,与弱酸性雨水的下渗、粒料原岩中不溶性铁、铝、硅等氧化物的胶结、复合、脱水等过程相关。颜色有红褐色、黑褐色、土黄色等多种类别,但一般均由圆球状的铁质铝硅结合物、破碎微孔块石及碎屑和粉质黏性土组成。

非洲地区公路工程设计施工中,红土粒料主要用在垫层与底基层结构,经水泥或石灰处治后也用于基层结构。张瑞菊等研究认为天然红土粒料的CBR值普遍偏低,通常为30%~70%,经水泥或石灰处治后红土粒料的CBR值可达到150%以上;纪更占等对西非马里地区红土粒料的基本物理性能、矿物质组成及路用性能进行了全面分析,认为在96%压实度前提下,红土粒料饱水4d的CBR接近80%,回弹模量变化范围为190~300 MPa,可满足西非地区路面底基层的使用要求。

红土粒料的组成复杂、种类较多,其工程性质与组成有很大关系,特别是受其中的粉质黏性土的影响。该文依托塞内加尔Thies-Touba高速公路建设,在

塞内加尔境内西部地区取得8种不同的红土粒料土样,对其进行级配分析和击实试验,并完成不同压实度水平下的CBR试验,分析不同红土粒料的承载特性。对典型样品,在承载特性研究之外,还进行物理性质分析。试验结果可供塞内加尔及其他西非地区国家的公路建设提供参考。

2 红土粒料

2.1 形貌特征

该文所获取的8种红土粒料基本信息如表1所示。采用水洗法观察不同红土粒料的组成及其中粒料的具体形貌。结果发现,绝大部分红土粒料中均不含砂,由粒料及其碎屑和粉土组成,其中TT-1、TT-4及TT-5共3种红土粒料的组成及形貌比较接近,粒料强度相对较高;TT-2及TS-1红土粒料中的粒料均为轻质、吸水性较强的材料;TT-3红土粒料中所含粒料为强度较低的多孔材料,孔内充满粉性黏土。而TT-6与MK-1红土粒料外观形貌及组成均接近,与其他6种具有显著不同,由高强度粒料、白砂及黏性较大的粉料组成。各种红土粒料的颜色与其中所含粉土的颜色密切相关。图1、2分别为代表性TT-1、TT-6两种红土粒料水洗后的外观状态。

表 1 红土粒料基本信息

样品编号	土的颜色	粒料颜色	粒料形状特征	取样位置
TT-1	红褐色	红褐色	不规则级配颗粒	Thies—Sindia 与 TT 互通
TT-2	土黄色	黄白色	不规则级配颗粒	Thies—Sindia 与 TT 互通
TT-3	黑褐色	黑褐色	不规则多孔级配颗粒	Thies—Sindia 与 TT 互通
TT-4	红褐色	红褐色	不规则级配颗粒	Pout Ndiack 村庄附近
TT-5	红褐色	红褐色	不规则级配颗粒	Pout Ndiack 村庄附近
TT-6	黑灰色	黑褐色	类圆形光滑级配颗粒	TT 至 Diourbel 出口附近
TS-1	紫褐色	红褐色	不规则级配颗粒	N2 国道 Cherif Lo 附近
MK-1	黑灰色	黑褐色	类圆形光滑级配颗粒	R61 道路 Sinediane 附近

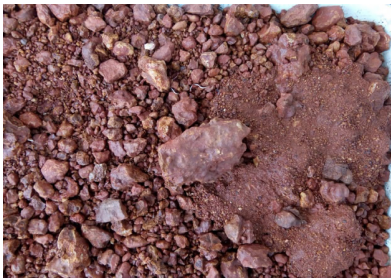


图 1 TT-1 红土粒料外观



图 2 TT-6 红土粒料外观

2.2 级配组成

曹长伟等对马里境内 BAMAKO—SEGOU 公路沿线的不同红土粒料进行了级配特征分析,结果表明:红土粒料的天然级配较差,中间粒径普遍缺失,细粒土含量普遍较大。图 3 为 8 种红土粒料级配曲线。从图 3 可见,所取 8 种红土粒料的粒径均在 50 mm 以下,0.08 mm 筛孔的通过率为 12%~35%,按照 NF P11—300 标准中的粒径分类均属 B 级砾质土壤。级配组成方面:天然红土粒料的级配整体较差,主要表现为粒径分布不均匀;细粒土含量普遍较高且个别存在断档的情况(如 TT-6 与 MK-1 样品);多数样品中粗粒料含量少,如 TT-1、TT-3、TT-5、TT-6 及 TS-15 几种红土粒料>16 mm 粒料的含量不到 10%。因此,天然红土粒料用于基层时必须进行处理。

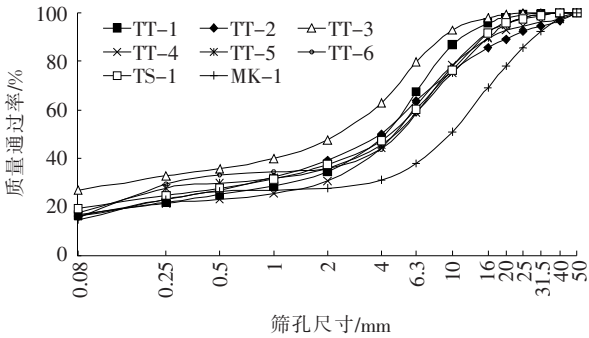


图 3 红土粒料级配曲线

图 4 为 8 种红土粒料不同筛孔通过率的变异系数范围,整体上 4.0 mm 及以下筛孔通过率变异系数较大,该粒径范围内 TT-6 样品的变异系数最大, MK-1 样品的变异系数最小;10.0 mm 以上筛孔通过率的变异系数较小,均不足 10%,其中 TT-4 样品的变异系数最大,TT-3 样品变异系数最小。

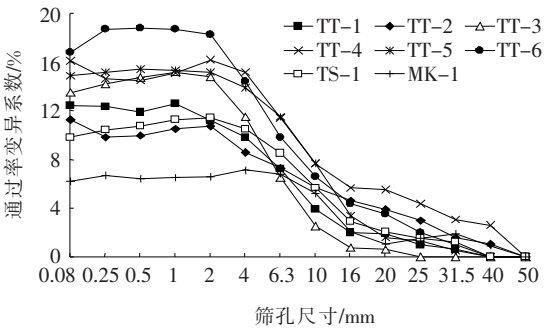


图 4 各筛孔通过率变异区间

3 击实特性

按照法国 NF P94—093 标准对 8 种红土粒料进行两平行击实试验,采用直径 150 mm 的大筒,粒料分 5 层击实,每层击实 56 次,击实锤的质量为 4 535 g,落

距为 457 mm,击实功约为 2 678.7 kJ/m³,与中国 T0131 方法中的重型击实基本一致。两平行的控制标准为最大干密度平行偏差不大于 0.02 g/cm³,最佳含水率平行偏差不大于 0.5%。击实试验结果见表 2。

表 2 红土粒料击实试验结果

样品编号	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%
TT-1	1.963	13.3
TT-2	1.814	18.1
TT-3	2.061	12.1
TT-4	2.106	11.1
TT-5	2.187	10.3
TT-6	2.275	7.5
TS-1	2.036	16.0
MK-1	2.254	7.5

由表 2 可知:

(1) 8 种红土粒料的最大干密度差异明显,主要表现在 TT-2 红土粒料最大干密度明显偏小,而 TT-5、TT-6 及 MK-1 红土粒料的最大干密度明显偏大,其他 4 种红土粒料的最大干密度相差不大。

(2) 8 种红土粒料之间存在较大差异,其中,TT-2 与 TS-1 红土粒料的最佳含水率明显偏大,这与其含吸水性较强的轻质石料有关;TT-6 与 MK-1 红土粒料的最佳含水率明显偏小,这与其含有黏性较大的粉料及其粒料表面致密光滑且吸水性差有关;其他 4 种红土粒料的最佳含水率均为 11% 左右。显然,最佳含水率的差异与 0.08 mm 筛孔以下粉土的含量及性质有关。

击实试验结果充分说明所取的 8 种红土粒料的组成成分存在差异,且击实试验结果与形貌分析及筛分结果在反映材料差异性方面具有一致性。

4 承载特性

4.1 红土粒料的膨胀性

已有研究认为,非洲天然红土粒料浸水后变形量相对较低,最小值仅 0.3,最大值一般不超过 1,因此整体水稳定性能较好,甚至马里巴杜谷—图科多—巴弗拉贝公路工程项目试验表明红土粒料的线膨胀率为 0。对于上述 8 种红土粒料,CBR 试验浸水过程中试件的膨胀量均非常小,最大为 TS-1 红砂土,膨胀量为 71(0.01 mm),线膨胀率为 0.6%。但考虑到 CBR

制件前红土粒料已在试验含水率下放置较长时间(24 h),在此过程中膨胀可能已经完成,从而导致浸水过程中膨胀量较小。为验证这一猜测,采用储量丰富的 TT-4 红土粒料进行膨胀量及回缩量的观测试验。

试验准备阶段将红土粒料自然风干,并筛除 40 mm 以上粒料,不测风干后的含水,根据经验直接加水 10% 拌匀后进行击实,成型后连同试模迅速浸水,架设百分表观测膨胀量;浸水总时间为 48 h 后膨胀量基本稳定,取出试件,测吸水量,然后连同试模放入 60 ℃ 烘箱中烘干,观测失水过程中是否存在回缩及回缩量。

浸水总时间为 48 h,浸水结束后红土粒料的含水率较试验含水率进一步提高约 4.4%,烘干 144 h,烘干后红土粒料的含水率较试验含水率平均降低约 1.6%,浸水及烘干过程中试件总的含水率变化约为 6.0%,变形率见图 5。

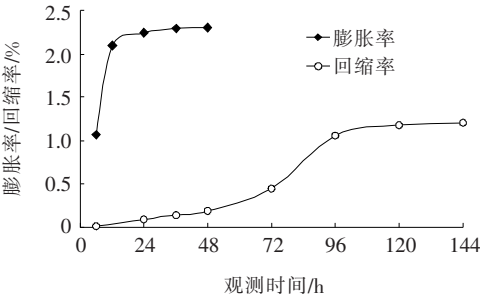


图 5 红土粒料的浸水与失水变形率

由图 5 可见:红土粒料在浸水初期 12 h 内迅速吸水膨胀,膨胀率可达到 2.0% 以上,12 h 后逐渐饱水,膨胀率趋于稳定。而烘干失水 48 h 内回缩不明显,回缩率不足 0.2%,48~96 h 内出现明显回缩,总回缩率可达 1.0% 以上,此期间的回缩量占总回缩量的 80% 以上,96 h 后回缩率趋于稳定。浸水与烘干失水过程中总的变形率差值在 1.0% 以上。

综合分析,塞内加尔地区的红土粒料具有一定膨胀特性,因此,作为垫层、底基层施工完成后应及时覆盖,以保持结构层含水率基本稳定,避免出现因失水导致的缩裂,雨季施工更应注意这一点。

4.2 CBR 试验

按照确定的最大干密度及最佳含水率,采用静压成型的方法制备圆柱体试件,进行 CBR 试验,分析不同红土粒料的承载特性,每种材料均对比 100%、95% 及 90% 共 3 个压实度水平,试件制备完成浸水 4 d 后进行贯入试验。

表 3 为不同红土粒料在不同压实度水平下的 CBR 试验结果,图 6 为不同红土粒料 CBR 值随压实

度的变化曲线对比。

表 3 不同压实度水平时红土粒料的 CBR 值

材料 编号	不同压实度水平(%) 红土粒料 CBR/%			备注
	100	95	90	
TT-1	169.1	40.2	21.7	均在 2.5 mm 时取值
TT-2	151.9	93.5	69.5	均在 2.5 mm 时取值
TT-3	218.0	94.3	46.7	均在 2.5 mm 时取值
TT-4	148.7	92.1	54.7	95%在 5.0 mm 时取值
TT-5	125.3	80.8	31.5	90%及 95%在 5.0 mm 时取值
TT-6	33.3	18.8	11.1	均在 2.5 mm 时取值
TS-1	71.5	43.0	20.8	90%在 5.0 mm 时取值
MK-1	36.7	29.6	22.8	均在 2.5 mm 时取值

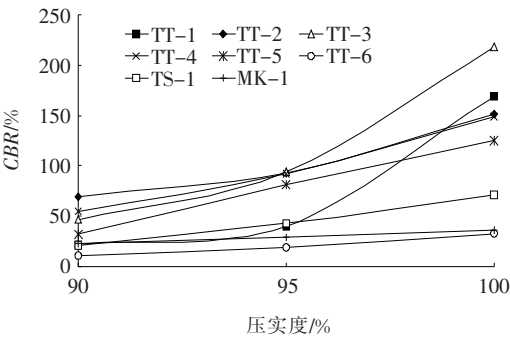


图 6 红土粒料 CBR 值随压实度的变化曲线

从表 3、图 6 可见：

(1) 不同红土粒料之间的 CBR 值差异非常显著，甚至达到数倍以上，95%压实度时，TT-2~TT-5 红土粒料的 CBR 明显高于另外 4 种材料，均可达到 80%以上。

(2) TT-6 与 MK-1 红土粒料的表现依然非常特殊，两者 CBR 值在同一水平，均显著低于其他对比材料，100%压实度时其 CBR 值仍不足 40%，仅为 TT 编号其他红土粒料的 1/4~1/6，显然这一结果与其含有黏性粉料及级配间断有关。

(3) 从 CBR 随压实度的变化曲线斜率看，除 TT-1、TT-2 与 TT-3 外，其他 5 种红土粒料的 CBR 与压实度之间均有较好的线性相关性。TT-1 与 TT-3 红土粒料的 CBR 受压实度影响最显著，而 TT-6 与 MK-1 的 CBR 受压实度影响最不明显。

CBR 试验结果表明：不同红土粒料的承载能力差

异显著，大部分红土粒料 95%压实度时的 CBR 均不小于 40%，满足非洲地区天然红土粒料用于路面底基层的技术要求，但少部分天然红土粒料承载能力较差，仅能用于垫层。此外，部分红土粒料的承载能力受压实度影响显著，作为底基层铺筑材料时，建议采取必要保证措施，确保压实度不低于 95%。

5 结论

(1) 西非塞内加尔红土粒料种类多样，形貌、矿质成分及粒径组成差异明显，仅从筛分结果分析，所取各种红土粒料按照 NF P11-300 标准的粒径分类方法均属于 B 级砾质土壤。

(2) 红土粒料中粒料及粉料的性质是影响其击实试验特性的关键因素，成分基本相同时，最佳含水率与 0.08 mm 筛孔以下的粉料含量对击实特性产生重要影响。

(3) 红土粒料中粒料的级配组成及粉料的性质对承载特性具有显著影响，天然级配相对连续、粉料黏性较差的红土粒料具有相对更好的工程应用性质。

(4) 塞内加尔部分种类红土粒料具有一定的吸水膨胀性，浸水 12 h 内膨胀基本稳定，膨胀率可达 2.0%以上，失水 48~96 h 内出现明显回缩，回缩率可达 1.0%以上，96 h 后回缩基本稳定。

(5) 塞内加尔大部分红土粒料 95%压实度的 CBR 不低于 40%，可用于底基层，但部分红土粒料的 CBR 受压实度影响显著，作为底基层铺筑材料时，压实度应保证不低于 95%，或采取必要的改良措施。

参考文献：

[1] 周大全,甄玉凤. 非洲热带地区红土粒料在公路工程中的应用[J]. 中外公路,2015(4).

[2] 张瑞菊,王国康,白墨. 非洲天然红土粒料的路用性能及使用标准[J]. 交通科技,2017(1).

[3] 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(5).

[4] NF P11-300-1992 Earthworks:Classification of Materials for Use in the Construction of Embankments and Capping Layers of Road Infrastructures[S].

[5] NF P94-093-1999 Soils:Investigation and Testing-Determination of the Compaction Reference Values of a Soil Type - Standard Proctor Test - Modified Proctor Test[S].