

西非砾质红土粒料掺砂改良及水泥稳定处置研究

金海兵¹, 易子程², 卓荣^{3*}

(1. 中国路桥工程有限责任公司, 北京市 100011; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510641;
3. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 广东 广州 510010)

摘要: 西非砾质红土粒料存在颗粒组成不良、液限与塑性指数偏高的现象, 限制了该典型地材在道路结构中的应用。该文通过对多种红土粒料以及掺砂改良前后的颗粒组成、界限含水率、CBR试验进行研究, 结果表明: 掺砂改良可以改善砾质红土粒料级配, 提高密实度, 降低塑性指数, 改良后的砾质红土可满足道路底基层、垫层及基层的使用要求。水泥稳定处置可提高西非红土粒料的力学特性。试验结果表明: 水泥剂量与砂掺量对无侧限抗压强度影响明显, 砂掺量存在最佳用量范围, 2.5%水泥剂量的PK58水泥稳定掺砂红土粒料和3.5%水泥剂量的PK6水泥稳定掺砂红土粒料可满足西非地区倒装结构中垫层材料使用要求。对西非地材的属地化设计与优化改良, 可以扩大典型地材的使用范围、提升使用层次, 为中国在西非地区的道路工程项目建设提供借鉴。

关键词: 砾质红土粒料; 西非; 掺砂改良; 水泥稳定处置; 无侧限抗压强度

中图分类号: U414

文献标志码: A

Improvement of Gravelly Laterite and Cement Stable Disposal in West Africa

JIN Haibing¹, YI Zicheng², ZHUO Rong^{3*}

(1. China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou, Guangdong 510641, China; 3. Guangzhou Metro Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510010, China)

Abstract: Owing to poor gradation and high liquid limit and plasticity index, the application of gravel laterite on road paving is limited in West Africa. To overcome this issue, laterite granule combined with sand at different content was explored. The performance including the particle composition, limit water content and CBR value was investigated. The results indicate that sand treatment can improve the gradation, enhance the compactness, and reduce the plasticity index. The improved gravel laterite can meet the requirements of subbase, cushion, and base courses. Cement treatment can improve the mechanical properties of laterite grains. Cement and sand content affect the unconfined compressive strength significantly, with an optimal sand content range identified. Specifically, laterite granules mixed with sand and stabilized with 2.5% PK58 cement and 3.5% PK6 cement meet the specifications for cushion layer materials in inverted structures in West Africa. The overall findings contribute to localization design and the optimization of indigenous materials in West Africa, broadening their application scope and enhancing their use in construction projects, offering valuable insights for Chinese engineering projects in West Africa.

Keywords: gravel laterite granule; West Africa; sand mixing improvement; cement stable disposal; unconfined compressive strength

收稿日期: 2023-02-28(修改稿)

基金资助: 广东省自然科学基金资助项目(编号: 2018A0303130150)

作者简介: 金海兵, 男, 大学本科, 高级工程师. E-mail: jinhb@crbc.com

*通信作者: 卓荣, 男, 硕士, 工程师. E-mail: 2439030405@qq.com

0 引言

红土粒料是一种广泛分布于西非地区的特殊砾石材料,现有研究普遍认为其在旱湿循环的风化演变条件下,母岩中难溶性的铁、铝、硅等氧化物不断胶结、复合形成砾料岩土颗粒,易破碎的母岩形成砂土颗粒^[1]。因褐铁矿等矿物质含量较高而呈现红褐色等颜色,储量丰富,被广泛用于道路工程中^[2-3]。

在西非地区的道路设计施工过程中,20世纪80年代,法国人就曾将其作为路基材料使用,效果良好^[4]。近年来随着中国在西非地区的援助项目不断增多,对西非红土粒料的研究和应用也逐渐展开。纪更占等^[5]、Onana等^[6]、张瑞菊等^[7]、孟会林等^[8]对不同地区的西非红土进行研究后认为:部分天然红土粒料可适用于铺筑非洲地区各级道路底基层;Mengue等^[9]、周大全等^[10]采用不同剂量的水泥处理非洲热带地区红土后认为:适当剂量的水泥可提升红土粒料的强度使其用作部分道路基层。但红土粒料种类较多,构成复杂,已有研究对于西非地区红土粒料组成与其工程性能和工程应用之间关系的认识还缺乏一定的系统性。

因历史原因,非洲西部大多数国家采用法国与欧盟的标准体系。法国在1988年提出“倒装结构”,是法国几种典型路面结构中造价比较低的结构类型^[11],适应西非的经济与交通条件,成为西非的典型路面结构类型^[12]。中国的半刚性基层与倒装结构的基层材料相似,但西非红土粒料组成与力学特性具有独特性,因此,研究砾质红土掺砂改良及掺砂改良后水泥稳定材料的强度特性,优化道路材料设计,是西非属地化技术体系中的重要一环。

西非地区广泛分布着红土粒料等特殊筑路材料,这些特殊的当地常用筑路建材如果得到可靠的工程应用,可以明显降低工程造价,带动当地资源利用。针对西非红土粒料开展应用研究,有助于中国企业更好地将当地的资源、使用习惯与中国的标准体系、工程经验相结合,形成适应西非气候、交通、经济条件的筑路技术,并有助于中国参与西非国家公路设计建设体系。

1 西非天然红土粒料特性分析

1.1 土样

依托中国路桥公司在西非地区的交通建设项

目,对当地的典型地材进行取样。在非洲大陆地层发育形成过程中,经历了多期的、多阶段的构造作用、岩浆作用、变质作用和沉积作用,形成了其主要地形特征。非洲西部地区由于相近的地质形成时间和原因,形成了具有统一性的岩体,取样材料在西非地区具有较好代表性^[13]。取回的土样按表观性状进行分类,为方便描述不同种类红土粒料,根据红土粒料的取样地点分别进行编号,选取不同类别中具有代表性的6种砾质红土、6种砂土的路基填筑材料为研究对象,基本信息如表1所示。

表1 路基填筑材料基本信息
Table 1 Basic information of subgrade filling materials

材料	性质、用途	取样位置	土样编号
砾质红土	含贝壳黏性土	TS料场	TS
	褐色红土粒料	MK粒料露头区	MK
	多孔红土粒料	PK0料厂	PK0
	用于水稳	PK6水稳站	PK6
	用于水稳	PK58水稳站	PK58
	少量用于PST	三工区,PK85	PK85
红土砂	用于水稳	捷斯,PK6水稳站	PK6
	用于填芯	捷斯,PK19	PK19
	用于填芯	捷斯,PK28	PK28
	用于填芯	捷斯,PK35	PK35
	用于填芯	班贝,PK71+740	PK71
	用于填芯	久尔贝勒,PK95+400	PK95

注:PK6包含砾质红土和细粒砂,编号PK6分别表示砾质红土PK6和红土砂PK6。

1.2 颗粒组成分析

西非国家使用法国标准体系,按照法国筛分的尺寸要求,对不同类型的红土粒料进行筛分,得出红土粒料的颗粒组成如图1所示。

由图1可知:不同种类的西非天然砾质红土级配特征差异明显。非洲西部由于古生代时期多阶段的大规模海水及盆地升降作用,独特的地质形成条件,与中国的红土粒料具有显著差异。与中国桂林地区典型的红土级配相比,西非砾质红土细料含量更高,且存在部分红土如PK85和PK58的0.2~1.0 mm之间曲线较平缓,说明部分红土粒料级配呈现粗颗粒和细粒土含量较多,中间粒径缺失的现象。当砾质土的最大粒径为20~40 mm,0.075 mm以下粒径颗粒含量>15%,不满足中国道路底基层天然砾石推荐级配范围要求,但依据法国《公路垫层和路堤施工可采用的材料类型》,0.08 mm粒径颗粒含量为12%~35%时,2

mm 粒径颗粒含量小于 70%, 可划分为 B 级砾质土, 可处置 T1~T5 交通等级的道路基层和 T3~T5 交通等级道路的底基层。6 种红土细粒砂的粒径分布在 0.063~1 mm, 2 mm 通过率均为 100%, 0.08 mm 通过率均 < 35%, 根据法国标准属于 B 级细粒砂。

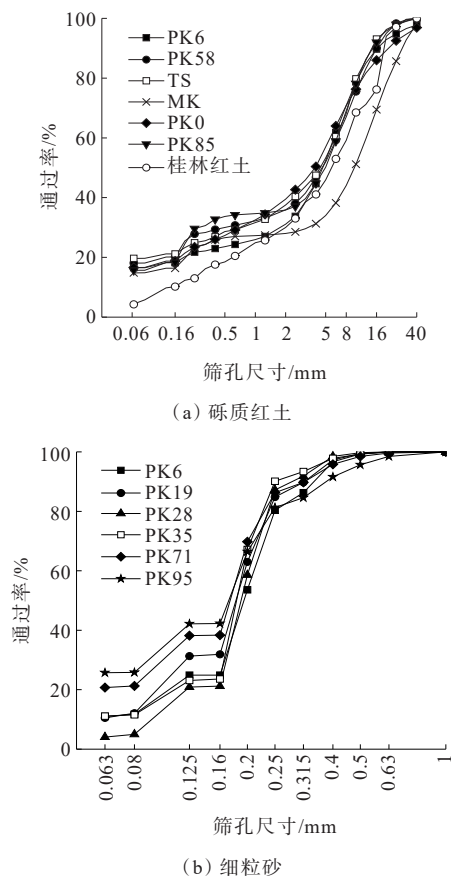


图 1 典型西非红土粒料级配组成

Figure 1 Gradation of typical laterite granules in West Africa

1.3 界限含水率试验结果分析

界限含水率试验是中法两国标准体系划分土壤分类的方法。几种典型西非红土粒料的界限含水率试验结果如图 2 所示。

根据现有《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015)规定,级配砾石、天然砾石和砾石土等材料应满足液限 $\leq 28\%$, 在潮湿多雨地区塑性指数宜 < 6 , 其他地区宜 < 9 。除 PK85 红土外, 大部分砾质红土液限与塑性指数不满足要求。通过掺配一定比例的细粒砂, 可降低红土粒料塑性指数, 并提高施工便利性。

1.4 CBR 试验结果分析

世界各国普遍将 CBR 强度作为天然粒料用于道

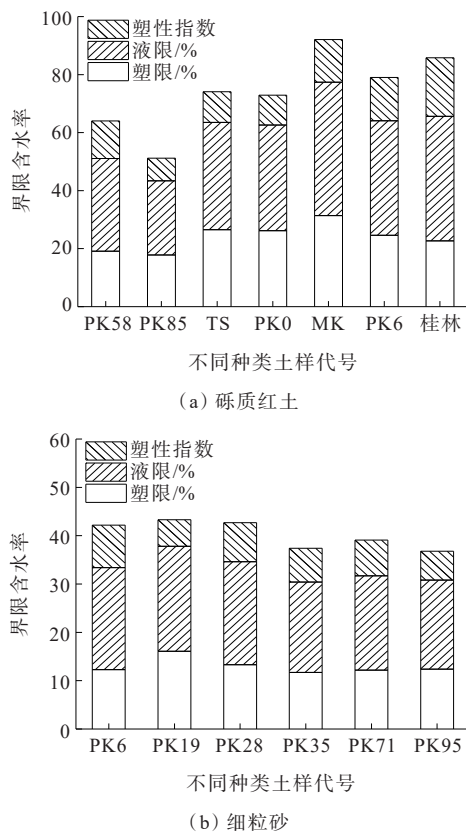


图 2 界限含水率分布

Figure 2 Distribution of boundary moisture content

路基层的重要指标。西非国家要求道路基层 $R_{CBR} \geq 80\%$; 要求底基层或垫层 $R_{CBR} \geq 30\%$ 。几种砾质红土与细粒砂 CBR 试验结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出: ① 不同种类的砾质红土之间 R_{CBR} 差异显著, 在常规要求的 95% 压实度下, PK6、PK0 和 PK58 砾质红土的 R_{CBR} 可达到 80% 以上, 可用于道路基层; TS 砾质红土 R_{CBR} 在 30% 以上, 可用于底基层或垫层; 而 MK 砾质红土和 PK85 砾质红土的 R_{CBR} 显著低于其他砾质红土。不同土样的 R_{CBR} 与其矿物组成和间断级配有关, PK6 砾质红土主要包含的矿物组成是石英、高岭石和褐铁矿, 粒料颗粒较粗, 材质坚硬, 铁质含量丰富, 所以 R_{CBR} 最大; MK 和 PK85 红土粒料的级配间断现象更为明显, 且 MK 红土粒料黏性粉粒含量较高; ② 细粒砂在 95% 压实度下的 R_{CBR} 普遍较低, 因此砾质红土掺配细粒砂使用时, 需确定合适的掺配比例, 保证混合料的 R_{CBR} 在容许范围内。

2 砾质红土掺砂改良及指标分析

为提高红土粒料在道路结构中的应用层次、扩

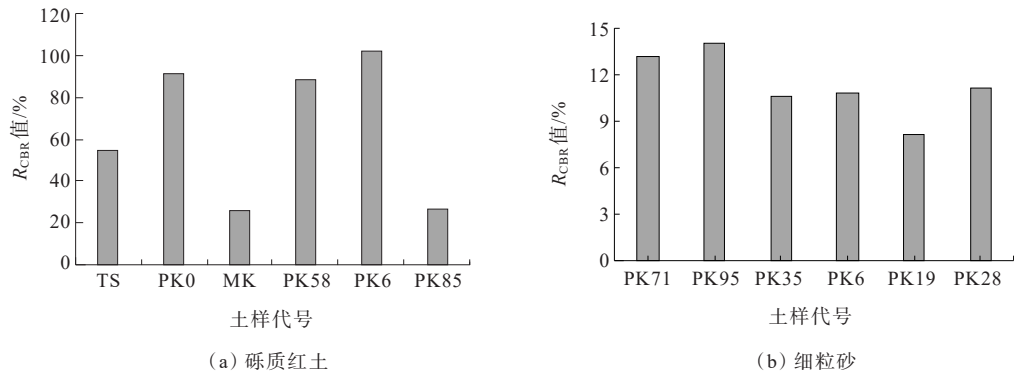


图3 红土粒料 R_{CBR} 值(压实度95%)

Figure 3 CBR value of typical laterite granules(compaction degree 95%)

大使用范围,需要对天然红土粒料进行改良。石崇喜等^[14]对云南昆明地区的红土粒料研究表明:掺砂可显著降低红土塑性指数和最优含水率,提高最大干密度。为改善颗粒级配、降低红土粒料塑性指数、提高密度,可对砾质红土进行掺砂改良。

由上可知:PK58砾质红土具有较好的工程特性和承载能力,且在西非分布广泛,因此选择PK58砾

质红土作为红土粒料掺砂改良性能研究的土样。为降低天然红土粒料的塑性,研究采用塑性指数相对较低的PK6砂料场的细粒砂,以PK58砾质红土与PK6细粒砂为掺配土样,以砂的重量占掺砂红土总重量的比例为掺配比列,探究不同砂掺量下的PK58砾质红土的特性及变化。使用的PK58砾质红土及PK6细粒砂基本性质如表2所示。

表2 PK58砾质红土和PK6细粒砂基本性质

Table 2 Basic properties of PK58 gravelly laterite and PK6 sand

种类	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	最佳含 水率/%	最大干密度/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	R_{CBR} (压实度 95%)/%	下列筛孔(mm)通过率/%	
							2	0.08
PK58砾质红土	19.1	32.0	12.9	10.3	2.20	88.6	35.9	18.1
PK6细粒砂	21.1	12.3	8.8	8.9	1.82	10.8	100.0	11.8

2.1 掺砂对级配的影响

随着砂掺量的增加,红土粒料的0.1~1 mm 粒径颗粒含量逐步提升,0.075 mm 粒径以下颗粒含量略微下降且小于规范值15%(图4),已经能够满足中国道路底基层天然砾石的要求。根据最大理论密度线

(Maximum Theoretical Density Lines,MTDL)与骨料间隙之间的关系^[15],级配曲线与MTDL的距离越大,密度降低,骨架间隙率 R_{VCA} 值越大,嵌挤作用减弱。

2.2 掺砂对塑性指数与 R_{CBR} 的影响

掺入PK6细粒砂引起的PK58砾质红土塑性指数、最佳含水率、最大干密度的变化情况如表3所示。

由表3可以看出:随着砂掺量从0增加到40%,掺砂红土的液限、塑限、塑性指数、最佳含水率、 R_{CBR} 呈现下降趋势,在20%砂掺量时最大干密度达到峰值。这些变化主要受矿物组成影响,红土中黏性粉粒矿物高岭石含量多,高岭石自身液限较大,红土粒料液限与高岭石含量呈正相关;高岭石矿物吸水性较强,红土粒料高岭石含量也影响红土粒料的最佳含水率;黏性粉粒含量影响最大干密度。掺砂红土的 R_{CBR} 主要受石英含量影响,砾质红土占比较大时,石英矿物含量较大, R_{CBR} 相应较大。

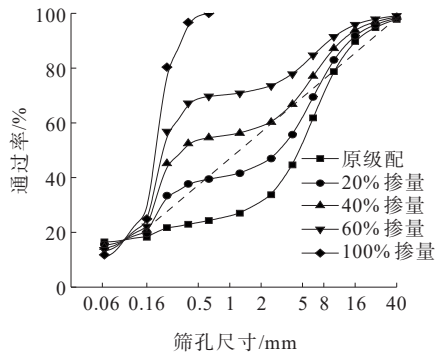


图4 掺砂量对PK58砾质红土级配的影响

Figure 4 Effect of sand content on gradation of PK58 gravelly laterite

表3 砂掺量对PK58掺砂砾质红土影响

Table 3 Effect of sand content on PK58 gravelly laterite

掺砂量/ %	塑限/ %	液限/ %	塑性指数	最佳含 水率/%	最大干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	R_{CBR} (压实度 95%)/%
0	19.1	32	12.9	10.30	2.21	102.2
10	17.2	27.7	10.5	9.87	2.27	92.1
20	15.3	20.5	5.2	9.12	2.32	82.9
40	11.5	15.7	4.2	8.50	2.28	67.8
100	12.3	21.1	8.8	8.90	1.82	10.8

因此,在部分砾质红土中,掺加适当比例的细粒砂可使红土粒料0.2~2 mm粒径的中间颗粒得到补充,塑性指数降低至适宜范围,根据施工经验,塑性指数6~10的材料施工便利性最优。红土粒料掺砂后最大干密度变化如表3所示,10%~40%砂掺量时,密实度较大,在20%砂掺量时,密度达到峰值, R_{CBR} 结果表明:改良后的掺砂砾质红土可满足道路底基层、垫层及基层的使用要求。

3 水泥稳定红土粒料无侧限抗压强度

对西非红土粒料进行水泥稳定处置,可提高混合料的力学特性,提高红土粒料的使用层次。中法两国水泥稳定材料均采用7 d无侧限抗压强度作为设计指标,但对试件养生要求不同,法国的养生方法一般为7 d标准室内养生,中国的养生方法为6 d标准室内养生组合1 d浸水养生,最后1 d浸水养生是为了获取最不利状态下材料的力学性能。试验研究表明:中国的养生条件获得的强度偏低,采用中国养生方法,可提高设计的可靠性。

3.1 水泥剂量对无侧限抗压强度的影响

水泥剂量直接影响水泥稳定红土粒料的抗压强度,水泥剂量对掺砂15%的PK58和PK6红土粒料7 d无侧限抗压强度的影响如图5所示。养生方法为6 d标准室内养生组合1 d浸水养生,2.5%水泥剂量的PK58水泥稳定红土粒料和3.5%水泥剂量的PK6水泥稳定红土粒料达到西非地区垫层材料7 d无侧限抗压强度不小于1.50 MPa的要求^[16-18]。

3.2 砂掺量对无侧限抗压强度的影响

水泥剂量采用3.0%,砂掺量对PK58和PK6水泥稳定红土粒料7 d无侧限抗压强度的影响如图6所示。

试验结果表明:随着砂掺量从0增加到100%,混合料无侧限抗压强度先增大后减小,PK58和PK6砾

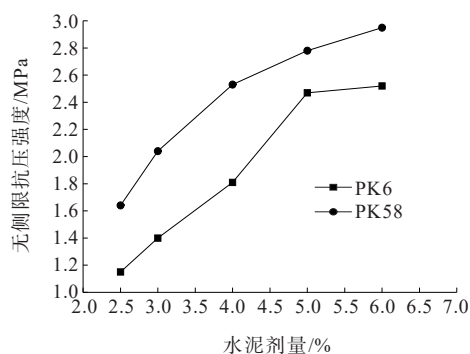


图5 水泥剂量对无侧限抗压强度的影响

Figure 5 Effect of cement content on unconfined compressive strength

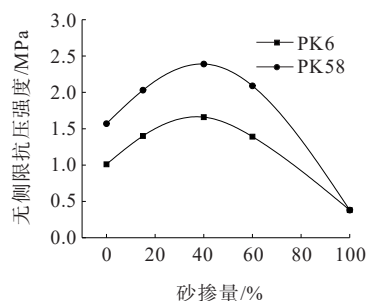


图6 砂掺量对红土粒料7 d无侧限抗压强度的影响

Figure 6 Effect of sand content on 7 d unconfined compressive strength

质红土掺砂40%时,混合料逐渐形成骨架-密实结构,无侧限抗压强度达到最大。掺砂后PK58的强度明显高于PK6红土粒料。对照中国规范对水泥稳定材料的7 d龄期无侧限抗压强度要求,PK58水泥稳定红土粒料掺砂后强度可满足中国重交通等级下二级以下公路底基层及中轻交通等级下的二级公路基层使用要求;PK6水泥稳定红土粒料可满足中轻交通二级及以下公路底基层使用要求。3.0%水泥剂量时,掺砂量60%以内的PK58与掺砂40%的PK6红土粒料无侧限抗压强度大于1.50 MPa,满足西非倒装结构路面垫层材料强度要求。

4 西非典型红土粒料应用技术方案

通过对在西非地区采样的具有代表性的6种砾质红土、6种砂土路基填筑材料在基本特性以及掺砂、掺水泥对砾质红土粒料的改良研究,依据法国路面结构,对不同种类红土粒料的应用方案进行总结。其基本适用性(表4)如下:

(1) 填方路基应用方案。①可采用沿线地材(盐渍土路段除外)进行填筑;②也可采用砾料类材料作为包边、砂土作为填充物的“砂填芯”方式填筑。砂应有一定塑性指数,有条件时可掺加20%~40%红土砾料;③盐渍土地区:盐渍土上铺设一定厚度的塑性指数低、非盐渍性砂,其上铺设30 cm掺加少量红土砾料的砂,

之后再铺设路基上部,且施工用水需要净化处理。

(2) 路基上部的填筑方案。①优先选择红土砾料填筑;②当红土粒料缺乏时,可采用红土砾料和砂混填,掺砂比例根据现场CBR试验确定,一般最大掺量可达40%;③可采用低水泥剂量的水泥处置砂进行填筑。

(3) 垫层的填筑方案。①应结合路面整体结构形式综合考虑;②当采用全厚式路面结构或组合结构时,为了保证整体路面结构的承载能力,垫层应选择具有一定强度和整体性的半刚性材料,可采用水泥稳定砂、水泥稳定红土砾料或者水泥稳定掺砂红土砾料进行填筑,水泥剂量可使用中、低剂量;③当采用半刚性结构时,可不设置垫层。

表4 路基填筑材料的适用性
Table 4 Applicability of subgrade filling materials

材料	土样编号	用途		
		填方路基	路基上部	垫层
砾质红土	TS、PK85	在路基填筑中,该材料应首先采取洒水加湿至中等含水或潮湿状态,并采用强度压实的方式进行使用,且填方高度不可超过10 m	TS红土化学分析试验判定为中盐渍土,需要结合路面结构设计提出相应的处理措施,防止路面结构承载能力不足及失稳	推荐采用水硬性结合料(水泥等)对其处置后使用,厚度至少为35 cm
	MK、PK0、PK6、PK58	该材料应首先采取洒水加湿至潮湿状态,并采用强度压实的方式进行使用,且填方高度不可超过5 m	用于路基上部的级别为no ₁ 、no ₂ 、no ₃ 时,路基上部顶面的AR等级为AR ₁ ,要求 $E_{V2} \geq 20$ MPa	推荐采用水硬性结合料(水泥等)对其处置后使用,厚度至少为35 cm
	PK6、PK28、PK35	该材料在路基填筑中,可采取洒水后中度压实的方式进行使用	用于路基上部的级别为no ₅ ,路基上部顶面的AR等级对应为AR ₂ 和AR ₃ ,要求 $E_{V2} \geq 50$ MPa	采用水硬性结合料(水泥、石灰等)对其处置后使用,且垫层厚度至少为35 cm
红土砂	PK19、PK71、PK95	该材料应首先采取洒水加湿至潮湿状态,并采用中度压实的方式进行使用,且填方高度不可超过10 m;其次可采用浅层开挖、洒水处理后,采用强度压实的方式进行使用,且填方高度不可超过10 m	用于路基上部的级别为no ₁ 、no ₂ 、no ₃ 时,路基上部顶面的AR等级为AR ₁ ,要求至少 $E_{V2} \geq 20$ MPa	采用水硬性结合料(水泥、石灰等)对其处置后使用,且垫层厚度至少为35 cm

注: E_{V2} 为路面承台中的土基上部(PST)层对应的计算模量。

5 结论

通过对西非典型红土粒料颗粒组成、基本特性以及掺砂、掺水泥对砾质红土粒料的改良研究,得出如下主要结论:

(1) 级配不良的砾质红土的液限与塑性指数偏高, R_{CBR} 明显偏低,不满足西非国家对道路底基层或垫层技术指标的要求,无法直接使用。

(2) 在砾质红土中掺加适当比例的细粒砂,可以改善级配,提高混合料密实度,降低塑性指数,

R_{CBR} 值表明,改良后砾质红土具有相对较好的承载能力,可满足西非底基层、基层及垫层材料使用要求。

(3) 红土粒料掺砂改良级配与水泥的加强作用明显。砂掺量存在最佳范围,PK58和PK6砾质红土掺砂40%时,混合料无侧限抗压强度达到最大。增加水泥剂量可显著提高混合料强度,2.5%水泥剂量的PK58水泥稳定红土粒料和3.5%水泥剂量的PK6水泥稳定红土粒料可以满足西非倒装结构路面垫层材料强度要求。

参考文献:

References:

- [1] 杨戈,陶泽峰.西非红土粒料形成及其应用[J].中外建筑,2016(7): 142-143.
YANG Ge,TAO Zefeng.On the formation and application of the West African clay pellet[J].Chinese & Overseas Architecture,2016(7): 142-143.
- [2] 杨开合.尼日利亚道路工程红土粒料改良特性研究[J].国防交通工程与技术,2017,15(1): 15-17.
YANG Kaihe.A study of the property improvement of the laterite granular in Nigerian road engineering[J].Traffic Engineering and Technology for National Defence,2017,15 (1): 15-17.
- [3] 周兴业,蒋勇,王旭东.天然红土粒料矿物组成及其对工程性能影响分析[J].中外公路,2020,40(5): 263-266.
ZHOU Xingye,JIANG Yong,WANG Xudong.Analysis of mineral composition of natural lateritic gravels and its influence on engineering performance[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(5): 263-266.
- [4] IVANSCHITS E, MILES J F. Heavy-duty finishers efficiently and economically lay crushed aggregate and laterite base courses in West Africa[C]//The Fourth IRF African Highway Conference,Nairobi,Kenya Pavers,1980.
- [5] 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.
- [6] ONANA V L,NGO' O ZE A,EKO R M,et al.Geological identification, geotechnical and mechanical characterization of charnockite-derived lateritic gravels from Southern Cameroon for road construction purposes [J].Transportation Geotechnics,2017,10: 35-46.
- [7] 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): 23-26.
ZHANG Ruiju, WANG Guokang, BAI Mo. Road performance and application standard of African natural laterite granules[J].Transportation Science & Technology, 2017(1): 23-26.
- [8] 孟会林,金海兵,刘雄伟,等.西非塞内加尔红土粒料的承载特性研究[J].中外公路,2020,40(5): 267-270.
MENG Huilin,JIN Haibing,LIU Xiongwei,et al.Research on bearing behavior of laterite in Senegal of West Africa[J].Journal of China & Foreign Highway,2020,40(5):267-270.
- [9] MENGUE E, MROUEH H, LANCELOT L, et al. Mechanical improvement of a fine-grained lateritic soil treated with cement for use in road construction[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2017,29(11):1-11.
- [10] 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(S1): 124-127.
ZHOU Daquan, ZHEN Yufeng. Application of red clay gravel in highway engineering in tropical Africa[J].Journal of China & Foreign Highway,2015,35(S1): 124-127.
- [11] 沈金安.国外沥青路面设计方法总汇[M].北京:人民交通出版社,2004.
SHEN Jin'an.Summary of foreign asphalt pavement design methods[M].Beijing:China Communications Press,2004.
- [12] 付佳伟,吕高虎.西非红土地区典型路面结构破坏案例分析[J].公路交通科技(应用技术版),2016,12(4):59-61.
FU Jiawei,LYU Gaohu. Case analysis of typical pavement structure failure in laterite area of West Africa[J].The Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2016, 12 (4):59-61.
- [13] JACKSON M P.The geology of Africa:The geochronology and evolution of Africa[J].Science,1984,226(4680): 1309-1310.
- [14] 石崇喜,黄英,杨玉婷,等.掺砂红土的力学特性及掺砂机理研究[J].工程勘察,2011,39(4): 1-8.
SHI Chongxi,HUANG Ying,YANG Yuting,et al.Research on mechanical properties and sand-doped mechanism of the laterite improved with sand[J]. Geotechnical Investigation & Surveying,2011,39(4): 1-8.
- [15] 朱洽斌.粗集料骨架间隙率形成规律研究[D].济南:山东大学,2016.
ZHU Qiabin.Research on the formation of the voids ratio of coarse aggregate[D].Jinan: Shandong University,2016.
- [16] AWOYERA P O,AKINMUSURU J O,NDAMBUKI J M. Green concrete production with ceramic wastes and laterite [J].Construction and Building Materials,2016,117: 29-36.
- [17] NZABAKURIKIZA A, ONANA V L, ZE A N, et al. Geological, geotechnical, and mechanical characterization of lateritic gravels from Eastern Cameroon for road construction purposes[J].Bulletin of Engineering Geology and the Environment,2017,76(4): 1549-1562.
- [18] JOEL M, AGBEDE I O. Mechanical-cement stabilization of laterite for use as flexible pavement material[J].Journal of Materials in Civil Engineering,2011,23(2): 146-152.