

天然红土粒料矿物组成及其对工程性能影响分析

周兴业¹, 蒋勇², 王旭东¹

(1. 交通运输部公路科学研究院 基础研究创新中心, 北京市 100088; 2. 中国路桥工程有限责任公司)

摘要: 针对目前天然红土粒料因矿物组成对工程性能影响不明确, 而导致红土粒料物理、力学性质认识不全面等问题, 选择非洲塞内加尔某高速公路沿线 7 种天然红土粒料, 通过矿物组成分析、工程性能试验及其在路面基层材料中的路用性能评价, 研究了红土粒料矿物组成与物理、力学等工程性能的相关关系。结果表明: 高岭石、石英、褐铁矿、纤磷钙铝石等矿物是天然红土粒料的主要组成成分, 且不同产地红土粒料的矿物组成差异较大, 从而导致表观特征和工程特性差异显著; 红土粒料的矿物组成对界限含水率具有明显影响, 红土粒料液限随着高岭石和石英总含量的增加, 呈先增大后减小的二次曲线变化; 红土粒料中的石英含量以及高岭石与石英的总含量, 对红土粒料的重型击实试验都具有较为明显的影响; 水泥稳定以后, 石英和褐铁矿含量较高的红土粒料, 因矿物结晶程度较高, 其强度和硬度明显高于纤磷钙铝石含量高的发白红土粒料; 矿物晶格结构越不稳定、材料的工程性能越差。

关键词: 道路工程; 矿物组成; 物相分析; 天然红土粒料; 工程性能

红土粒料是世界上广泛分布的一种筑路材料, 特别是在非洲的公路工程建设中使用较为普遍。近年来, 随着中国援非项目的增多, 中国国内对于红土粒料的研究和应用也逐渐引起关注。一般而言, 优质天然红土粒料可以直接用于填筑路基或上路床, 也可通过掺入天然砂降低塑性指数的方式用于水泥稳定基层中。已有研究中, 周大全认为当红土粒料用于底基层时, 为避免相邻两层的模量比过大, 需采用水泥或石灰对红土粒料进行处理, 掺加量需通过试验确定; 曹长伟认为天然红土粒料中掺加 30% 的粗粒碎石和 20% 的砂后液塑限下降幅度最大, 用于基层时具有最好的工程性质; 还有些研究采用水泥稳定掺砂红土粒料, 用于路面基层以下各个结构层的填筑。

事实上, 红土粒料的工程性质与其矿物组成和演变过程密不可分, 但目前研究多数针对的是它的工程特性, 很少涉及红土粒料的矿物组成对其使用性能的影响, 对天然红土粒料的认识也并不全面, 导致其物理、力学性质所表现出的某些现象无法合理解释。特别是, 由于红土粒料的形成机理和矿物组成的复杂性, 多数天然红土粒料具有不良的工程性质, 如: 大颗粒和细粒土含量过高导致其抗破碎能力不足、物理力学性能随风化程度或母岩的种类变化多样、同区域红土粒

料的变异性过大等, 都大大限制了其作为高等级公路筑路材料的应用。因此, 如果能够对红土粒料的矿物组成进行系统分析, 寻找到矿物组成与物理、力学等工程性能的相关关系, 对于红土粒料的工程应用具有十分重要的意义。

该文选取非洲塞内加尔某高速公路沿线不同产地的 7 种红土粒料作为研究对象, 通过矿物组成分析、工程性能试验及其在路面基层材料中的路用性能评价, 研究天然红土粒料化学组成与工程性能的相关性, 为工程应用提供切实可行的技术指导。

1 天然红土粒料基本性能分析

1.1 表观特征

表 1 为研究选择的塞内加尔 7 种红土粒料的基本特征观测结果。

从表 1 可以看出: 7 种红土粒料的颜色多呈红褐色, 破碎后新鲜面多为深褐色, 湿润后多呈褐色。砾石表面粗糙多孔, 类似于一般工业废渣。大颗粒硬化程度高; 中颗粒较为坚硬, 但部分颗粒容易在轻敲后破碎; 细颗粒表观特征与中国国内红黏土相类似, 未见细颗粒成团块现象。

1.2 矿物组成分析

为了确定天然红土粒料的化学组成,采用 X 射线衍射物相分析方法对 7 种材料进行试验,得到各自的

X 射线衍射图谱,利用 JADE 软件对图谱进行半定量分析,通过计算得到各化学物成分含量百分比,如表 2 所示。

表 1 红土粒料基本特征

序号	高速编号	产地	特征描述
1	A	K6 红土粒料	红褐色,颗粒较粗,铁质含量丰富,材质坚硬
2	A	K58 红土粒料	呈红褐色,颗粒较粗
3	A	K0 多孔土粒料	呈黄色,颗粒较粗、多孔,天然含水率低
4	A	K0 包边土粒料	红褐色,颗粒较粗,铁质含量丰富,材质坚硬
5	A	K0 发白红土粒料	灰黄色,颗粒较粗,伴有白色粒料,天然含水率低
6	B	B 高速红砂土粒料	灰红色,颗粒较粗
7	C	C 高速红土粒料	灰褐色,颗粒呈块状,铁质含量丰富,材质坚硬

表 2 红土粒料矿物组成 %

高速编号	产地	高岭石	石英	褐铁矿	纤磷钙铝石	长石	褐帘石	合计
A	K6 红土粒料	53.5	22.5	21.7	0.0	1.1	1.2	100.0
A	K58 红土粒料	57.8	41.7	0.5	0.0	0.0	0.0	100.0
A	K0 多孔土粒料	73.5	21.6	2.1	2.8	0.0	0.0	100.0
A	K0 包边土粒料	73.7	9.0	9.0	8.3	0.0	0.0	100.0
A	K0 发白红土粒料	13.1	4.3	19.2	63.4	0.0	0.0	100.0
B	B 高速红砂土粒料	75.5	13.8	6.6	4.1	0.0	0.0	100.0
C	C 高速红土粒料	12.9	55.3	29.3	0.0	2.5	0.0	100.0

1.2.1 化学组成分析

从表 2 可以看出:天然红土粒料主要含有氧化铁、氧化铝、氧化硅等氧化物,主要组成为高岭石[化学式为:Al₄(Si₄O₁₀)(OH)₈]、石英(化学式为:SiO₂)、褐铁矿[化学式为:FeO(OH)×nH₂O]、纤磷钙铝石{化学式为:(Ca,Sr,Pb)₂Al₇[(OH)₁₆(PO₄)₃]×3H₂O}等矿物。其中:① 铁元素(Fe)主要存在于褐铁矿中,Fe 元素含量和矿物种类决定了红土粒料的颜色和部分工程性能,会导致不同粒径的天然红土粒料在表观上表现为不同程度的红色或赤褐色。同时,由于褐铁矿石结晶程度高,尺寸稳定性好,可以为颗粒提供一定的强度、硬度和刚度;② 铝元素(Al)主要存在于高岭石中,由于高岭石矿物具有稳定的晶格结构,甚至在潮湿状态下也能保持其晶格结构,在水环境下引起的膨胀和收缩较小;此外,高岭石属于黏土矿物,结构较为脆弱,其存在降低了颗粒的抗冲击性能,使颗粒较易破碎;③ 硅元素(Si)主要以石英矿物的形式存在,少部分存在于高岭石矿物中,由于石英具有相对较大的强度和硬度,结晶度高,物理、化学稳定性好,因此石英含量越高,红土粒料的工程性能越好。

1.2.2 不同产地红土粒料矿物组成分析

从表 2 可以看出:不同产地红土粒料的矿物组成

差异较大。① 除 A 高速的 K0 发白红土粒料之外,A 高速和 B 高速沿线红土粒料主要成分均为高岭石,含量占 50%~75%,其次为石英,再次为褐铁矿;C 高速沿线红土粒料主要成分为石英,含量占 55%以上,其次为褐铁矿、占 30%左右,并含有 13%左右的高岭石和少量长石;A 高速的 K0 发白红土粒料主要成分为纤磷钙铝石,含量占 63%,其次为褐铁矿、占 19%,并含有 13%左右的高岭石和少量石英。由此可见,7 种不同产地天然红土粒料由于矿物组成不同,导致其化学组成差异较大,由此表现出来的表观特征和工程特性明显不同;② 一般而言,石英和褐铁矿含量越高,矿物结晶程度越高、红土粒料氧化结核程度越深,其强度和硬度越大。此外,矿物晶格结构越不稳定,材料的工程性能越差,因高岭石和石英通常具有稳定的晶格结构,而纤磷钙铝石的晶格结构不稳定,因此高岭石和石英含量较大的红土粒料(如 A 高速 K6 红土粒料、C 高速红土粒料等),工程性能一般较好;而富含纤磷钙铝石的 A 高速 K0 发白红土粒料工程性能较差。

2 矿物组成对工程性能的影响

天然红土粒料的工程性能主要包括天然状态下的

粒径、界限含水率、亚甲蓝等,以及重型击实和水泥稳定后的路用性能。该文主要针对红土粒料的界限含水率和重型击实试验的最大干密度及最佳含水率进行分析,试验结果如表 3 所示。

表 3 红土粒料的工程性能试验结果

高速 编号	产地	塑限/ %	液限/ %	塑性 指数	最佳含 水率/%	最大干密度/ (g·cm ⁻³)
A	K6 红土粒料	24.6	39.5	14.9	10.97	2.125
A	K58 红土粒料	19.1	32.0	12.9	10.28	2.200
A	K0 多孔土粒料	26.5	37.0	10.6	12.07	2.060
A	K0 包边土粒料	31.4	46.0	14.7	13.49	1.966
A	K0 发白红土粒料	26.2	36.4	10.3	18.19	1.805
B	B 高速红砂土粒料	27.0	42.8	15.8	15.95	2.036
C	C 高速红土粒料	19.6	38.0	18.4	7.49	2.251

2.1 矿物组成对界限含水率的影响

图 1 为红土粒料中高岭石和石英总含量与液限的关系曲线。

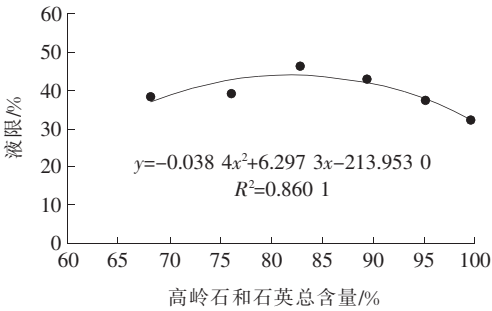


图 1 红土粒料中高岭石和石英含量与液限的相关关系

从图 1 可以看出:随着高岭石和石英总含量的增加,红土粒料液限呈先增大后减小的二次曲线变化,A 高速 K0 包边土粒料对应着二次曲线峰值点位置、高岭石和石英总含量为 82.7%,C 高速红土粒料对应着图中二次曲线左侧液限最低的数据点、高岭石和石英总含量为 68.2%,A 高速 K58 红土粒料对应着图中二次曲线右侧液限最低的数据点、高岭石和石英总含量为 99.5%。由表 2、3 可知:液限最高的 A 高速 K0 包边土粒料中高岭石含量为 73.7%、石英含量为 9.0%,液限较低的 C 高速红土粒料中高岭石含量为 12.9%、石英含量为 55.3%,液限较低的 A 高速 K58 红土粒料中高岭石含量为 57.8%、石英含量为 41.7%。从矿物组成成分和组成比例来看,液限较低的两种红土粒料,石英含量均较高,占总矿物成分的 40% 以上,受石英自身液限较低的影响,红土粒料的石英含量越多,其液限会越小,因此 7 种红土粒料中,石英含量较高的 C 高速红土粒料以及 A 高速 K58 红土粒料的液限是最低的;反之,由于 A 高速 K0 包边土粒料中的石英含量

最少、高岭石含量最多,因此它的液限也最高。由此可见,红土粒料的化学组成对界限含水率具有明显的影响。

2.2 矿物组成对重型击实最大干密度的影响

图 2、3 分别为红土粒料中石英含量、高岭石和石英总含量与重型击实试验最大干密度的相关关系。

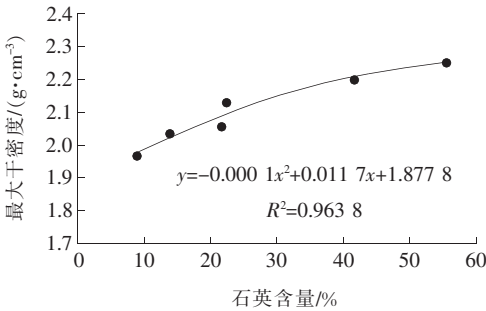


图 2 红土粒料石英含量与最大干密度相关关系

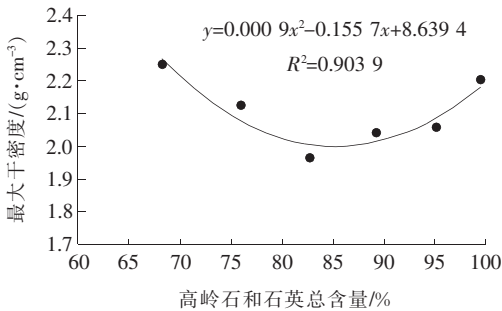


图 3 红土粒料高岭石和石英总含量与最大干密度的相关关系

从图 2 中可以看出:随着石英含量的增加,红土粒料重型击实的最大干密度数值逐渐增大,呈单调递增趋势变化。而图 3 结果表明:随着高岭石和石英总含量的增加,红土粒料重型击实的最大干密度呈先减小后增大的二次曲线变化,当高岭石和石英总含量为

82%时,最大干密度最小,由前面的研究结果可知,此时红土粒料的液限也最大。说明红土粒料中的石英含量以及高岭石与石英的总含量,对红土粒料的重型击实试验都具有较为明显的影响。

2.3 矿物组成对水泥稳定红土粒料强度的影响

表 4 为 A 高速 4 种矿物组成差异较大的红土粒料水泥稳定后的 7 d 无侧限抗压强度试验结果。

表 4 水泥稳定红土粒料 7 d 强度试验结果 MPa

产地	3%水泥剂量		6%水泥剂量	
	6 d 空养+ 1 d 浸水	7 d 空养	6 d 空养+ 1 d 浸水	7 d 空养
K6 红土粒料	1.21	1.25	2.07	2.52
K0 发白红土粒料	0.43	0.89	1.32	1.97
K58 红土粒料	1.80	1.57	2.51	3.62
K0 多孔土粒料	0.89	1.23	1.72	1.67

从表 4 可以看出:经过水泥稳定以后,在相同水泥剂量、相同养生条件下,K6 和 K58 红土粒料的 7 d 强度要明显大于 K0 发白红土粒料。这主要是由于,K6 和 K58 红土粒料的石英和褐铁矿含量较高,矿物结晶程度较高,其强度和硬度明显高于 K0 发白红土粒料。同时,因 K6 和 K58 红土粒料富含具有稳定晶格结构的高岭石和石英,而 K0 发白红土粒料中纤磷钙铝石的含量较高、其晶格结构不稳定,由于矿物晶格结构越不稳定、材料的工程性能越差,因此 K0 发白红土粒料工程性能要更差。

3 结论

选取非洲塞内加尔某高速公路沿线不同产地的 7 种红土粒料,开展了矿物组成分析、工程性能试验及其在路面基层材料中的路用性能评价,研究了天然红土粒料矿物组成与工程性能的相关性。结果表明:

(1) 天然红土粒料主要含有氧化铁、氧化铝、氧化硅等氧化物,主要组成为高岭石、石英、褐铁矿、纤磷钙铝石等矿物。铁元素主要存在于褐铁矿中、铝元素主要存在于高岭石中、硅元素主要存在于石英矿物中。铁元素含量和矿物种类决定了红土粒料的颜色和部分工程性能;高岭石矿物具有稳定的晶格结构,甚至在潮湿状态下也能保持其晶格结构,在水环境下引起的膨胀和收缩较小;石英具有相对较大的强度和硬度,结晶度高,物理、化学稳定性好,因此石英含量越高,红土粒

料的工程性能越好。

(2) 不同产地红土粒料的矿物组成差异较大。7 种不同产地天然红土粒料由于矿物组成不同,导致其化学组成差异较大,由此表现出来的表现特征和工程特性明显不同。

(3) 随着高岭石和石英总含量的增加,红土粒料液限呈先增大后减小的二次曲线变化,红土粒料的矿物组成对界限含水率具有明显的影响。

(4) 随着石英含量的增加,红土粒料重型击实的最大干密度数值逐渐增大,呈单调递增趋势变化。而随着高岭石和石英总含量的增加,红土粒料重型击实的最大干密度呈先减小后增大的二次曲线变化。红土粒料中的石英含量以及高岭石与石英的总含量,对红土粒料的重型击实试验都具有较为明显的影响。

(5) 水泥稳定以后,在相同水泥剂量、相同养生条件下,石英和褐铁矿含量较高的红土粒料,矿物结晶程度较高,其强度和硬度明显高于纤磷钙铝石含量高的发白红土粒料。矿物晶格结构越不稳定,材料的工程性能越差。

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(S1).

[2] 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).

[3] 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(4).

[4] 陈亮亮,赵银,冯德成. 水泥稳定砂砾击实特性与击实方法[J]. 公路,2011(12).

[5] 陈亮亮. 水泥稳定砂砾材料标准击实方法研究[D]. 哈尔滨工业大学硕士学位论文,2010.

[6] 赫文秀,申向东. 掺砂水泥土的力学特性研究[J]. 岩土力学,2011(S1).

[7] David A. Alao. Geology and Engineering Properties of Laterites from Ilorin, Nigeria[J]. Engineering Geology, 1983(2).

[8] Bello AA. Analysis of Shear Strength of Compacted Lateritic Soils[J]. Pacific Journal Science Technology, 2011(1).

[9] Suksun Horpibulsuk, Apichat Suddeepong, Pokin ChaCet, et al. Compaction Behavior of Fine - Grained Soils, Lateritic Soils and Crushed Rocks[J]. Soils and Foundations, 2013(1).

[10] Ugbe FC. Basic Engineering Geological Properties of Lateritic Soils from Western Niger Delta[J]. Journal of Environment and Earth Science, 2011(5).