

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20220119001

文章编号: 1674-599X(2023)03-0046-06

引用格式: 何艳春, 章孝建, 成岗. 偏高岭土地聚物对红黏土力学性能影响[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(3): 46-51.

Citation: HE Yanchun, ZHANG Xiaojian, CHENG Gang. Effect of metakaolin geopolymer on mechanical properties and microstructure of red clay [J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(3): 46-51.

偏高岭土地聚物对红黏土力学性能的影响

何艳春¹, 章孝建², 成岗¹

(1. 湖南路桥建设集团有限责任公司, 湖南 长沙 410018; 2. 中交北疆工程咨询有限公司, 内蒙古自治区 呼和浩特 010000)

摘 要: 为增强红黏土力学性能, 利用偏高岭土对红黏土进行改良。针对偏高岭土地聚物改良红黏土进行无侧限抗压强度试验及渗透试验, 分析碱激发剂模数、地聚物掺量对改良红黏土的无侧限抗压强度及渗透系数的影响, 并进行最佳碱激发剂模数的改良红黏土的干湿循环试验, 研究不同干湿循环次数对偏高岭土地聚物改良红黏土损伤规律。试验结果表明: 改良红黏土无侧限抗压强度随碱激发剂模数的增大呈先增大后减小的趋势, 当碱激发剂模数为 1.2 时, 无侧限抗压强度最高; 地聚物掺量越大, 改良红黏土无侧限抗压强度越大; 偏高岭土地聚物还可有效改善红黏土的渗透性, 当碱激发剂模数为 1.2 时, 改良红黏土的渗透系数为最小; 干湿循环次数越多, 改良红黏土的无侧限抗压强度越小, 经过 12 次干湿循环试验后, 改良红黏土无侧限抗压强度降低了 20.7%。

关键词: 偏高岭土地聚物; 红黏土; 碱激发剂模数; 干湿循环; 力学性能

中图分类号: U416.1

文献标志码: A

Effect of metakaolin geopolymer on mechanical properties and microstructure of red clay

HE Yanchun¹, ZHANG Xiaojian², CHENG Gang¹

(1. Hunan Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Changsha 410018, China; 2. CCCC Northland Engineering Consulting Co., Ltd., Hohhot 010000, China)

Abstract: The improvement of red clay was carried out by using kaolinite to improve the engineering properties of red clay. The effect of the modulus of the alkali exciter and the amount of the geopolymer on the unconfined compressive strength and permeability coefficient of the improved red clay was analyzed, and the dry and wet cycle tests of the improved red clay with the optimum modulus of the alkali exciter were carried out to analyze the extent of damage to the improved red clay by different dry and wet cycles of the alkali exciter. The test results showed that the unconfined compressive strength of the improved red clay tended to increase and then decrease with the increase of the modulus of the alkali exciter, and was greatest when the modulus of the alkali exciter was 1.2; the greater the dose of the geopolymer, the greater the unconfined compressive strength of the improved red clay; the kaolin geopolymer could effectively reduce the permeability coefficient of the red clay, and the permeability coefficient of the improved red clay was the smallest when the modulus of the alkali exciter was 1.2, and the decrease was the greatest. The higher the number of wet and dry cycles, the lower the unconfined compressive strength of the modified red clay and the greater the damage, and after 12 wet and dry cycles, the strength damage of the modified red clay was 20.7%.

Key words: metakaolin geomorphs; red clay; alkali exciter modulus; wet and dry cycles; mechanical properties

收稿日期: 2022-01-19

作者简介: 何艳春 (1974—), 男, 湖南路桥建设集团有限责任公司高级工程师。

红黏土较多分布于中国南方,已被广泛用于高速公路聚集填筑^[1-2]。但因其具有液限高、孔隙率大、易收缩开裂、水稳定性差等特点,导致其在填筑时难以压实,即使压实后也易受气候影响,发生吸水软化、失水开裂、翻浆冒泥等病害,严重影响高速公路的运营安全^[3-5]。因此,在实际工程中常利用石灰或水泥等无机材料对其进行改良处理^[6-7]。这些方法虽然可提高红黏土的液塑限和稳定性,但对环境影响大、成本高^[8],且传统胶凝材料在生产过程中释放出大量的CO₂、SO₂等有害气体^[9]。因此,寻求可替代石灰或水泥等无机材料的新型改性材料成为当前实际工程中的热点。

地聚物作为一种低能耗、低排放的新型胶凝材料,是一种较理想的传统胶凝材料的替代品^[10-11]。地聚物主要通过富含活性硅铝的原材料在碱性环境中活化,生成具有胶凝作用的硅铝化物,具有蠕变低、早期强度高、耐酸性好等特点^[12-15]。俞家人等^[16]研究了地聚物改良的软黏土的力学特征及其改良机理,发现地聚物能增强软黏土的力学强度,且地聚物主要通过产生的水化硅铝酸钠、水化硅酸钙、碳酸钙晶体和莫来石晶体等填充土体中微观孔隙,并通过胶结作用提高土体的整体性能。YAGHOUBI等^[17]通过无侧限抗压强度试验,研究了地聚物对淤泥质黏土的力学性能的改良问题,发现碱激发剂对其强度影响较大,且地聚物掺量为20%时,其改性后的淤泥质黏土的无侧限抗压强度最大。ALAM等^[18]利用Na₂SiO₃作为碱激发剂改良赤泥,发现改良后赤泥的水稳性能显著增强。

因此,本研究采用氢氧化钠与水玻璃的混合溶液作为碱激发剂制备偏高岭土地聚物,并将其用于改良红黏土。且针对不同地聚物掺量改良后的红黏土进行无侧限抗压强度试验,分析地聚物不同掺量、养护龄期对改性红黏土的力学性能的影响。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验所用红黏土均取自湖南省常宁市常祁高速公路第二合同段某处。经筛分试验得到的该红黏土的粒径级配曲线如图1所示。从图1可以看出,粒径小于0.075 mm的细粒黏粒质量分数约为

20.3%,其天然干密度为1.25 g/cm³,天然含水率为37.4%。依据《公路工程试验规程》(JTG E40—2020)^[18],测得其基本特性,见表1。经X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)、X荧光光谱仪(X-ray fluorescence, XRF)分析,该地区红黏土的主要成分为高岭石、伊利石、云母、方解石等。其主要化学成分见表2。

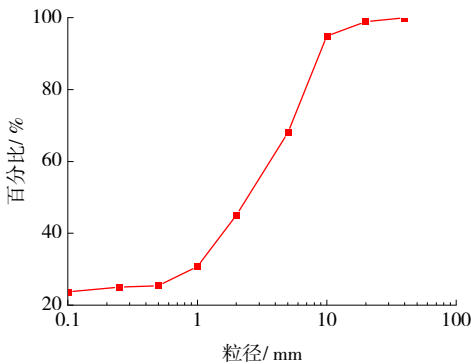


图1 级配曲线

Fig. 1 Gradation curve

表1 红黏土的基本特性

Table 1 Basic properties of red clay

液限/ %	塑限/ %	塑性指数	土的相对密度	最佳含水率/ %	最大干密度/(g·cm ⁻³)	自由膨胀率/ %	线收缩量/ %
56.5	35.0	21.5	2.71	26.2	1.48	16.9	1.94

表2 红黏土的主要成分

Table 2 Composition of red clay

成分	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(MgO)	w(Na ₂ O)	w(其它)
质量分数/ %	49.5	23.6	15.5	5.4	4.8	1.2

偏高岭土是德国巴斯夫公司提供的产品,它由高岭土经过600~800℃煅烧和研磨而成,其主要氧化物种类的质量分数,见表3。其中,氧化硅和氧化铝的质量分数占比极高,约占总质量的92%,所以具有极高的火山灰活性。

表3 偏高岭土的主要成分

Table 3 Composition of metakaolin

成分	w(SiO ₂)	w(Al ₂ O ₃)	w(CaO)	w(Fe ₂ O ₃)	w(MgO)	w(Na ₂ O)	w(其它)
质量分数/ %	52.0	40.0	1.0	2.5	0.8	0.5	3.2

碱激发剂为氢氧化钠与水玻璃的混合溶液,水玻璃的初始模数M(SiO₂与Na₂O的质量分数之比)为2.31,Na₂O的质量分数为12.7%,SiO₂的质量分数为29.3%。

1.2 试验方案

为确定碱激发剂与偏高岭土之间的最佳配比,调

整氢氧化钠与水玻璃之间的配比,先配置碱激发剂模数 M 分别为0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1的碱激发溶液;然后,将其与定量的偏高岭土进行混合,制备偏高岭地聚物;最后,分别按照偏高岭土地聚物掺量为0%、2%、4%、6%、8%对红黏土进行改良处理。试验方案见表3。

表4 试验方案
Table 4 Test scheme

碱激发剂模数	地聚物掺量/%	养护龄期/d
0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1	0、2、4、6、8	3、7、14、28

1.3 试样制备

将氢氧化钠与水玻璃按照表4的模数配置碱激发剂,并将激发剂与偏高岭土均匀混合后,制备不同模数碱激发剂的偏高岭土地聚物,分别按照掺量为0%、2%、4%、6%、8%,将偏高岭土地聚物与红黏土进行混合,得到偏高岭土地聚物改良的红黏土。采用静压法分三层分别制备尺寸为 $\varnothing 50 \times 100$ mm和 $\varnothing 61.8 \times 40$ mm的圆柱形试样,该试样的干密度为 1.4 g/cm^3 ,含水率为26%。将制备好的试样置于标准养护箱中分别养护3、7、14、28 d后,再进行后续试验。

1.4 试验方法

1) 无侧限抗压强度试验。

将养护至相应龄期的试样按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2020)^[19]进行无侧限抗压强度试验,分析不同碱激发剂模数、地聚物掺量、养护龄期对改良红黏土力学性能的影响。无侧限抗压强度采用YSH-2型应变控制仪进行测试,测试速率为 1 mm/min 。

2) 渗透试验。

采用变水头渗透试验对养护3 d后偏高岭土地聚物改良红黏土进行渗透试验。具体方法是:将尺寸为 $\varnothing 61.8 \times 40.0$ mm的圆柱形试样置于变水头渗透装置中密封,调整水头高度。记录不同时间间隔的水头高度,以便计算改良红黏土的渗透系数。

3) 干湿循环试验。

将养护至相应龄期的试样取出,并将其完全浸泡在去离子水中12 h,再将试样取出,并置于温度为 106°C 下的烘箱中干燥12 h,记此为1次干湿循环。重复该操作程序,直至试样干湿循环12次,每1次干湿循环后均进行无侧限抗压强度测试。为减小试验误差,每组试验均测试3个试样,取其平均值作为试验结果。

2 结果与分析

2.1 地聚物改良红黏土无侧限抗压强度

1) 碱激发剂模数。

当碱激发剂掺量为4%时,不同碱激发剂模数的地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度变化如图2所示。从图2可以看出:①随着碱激发剂模数逐渐增大,地聚物改良红黏土的力学性能呈先增大后减小的趋势;当碱激发剂模数为1.2时,地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度最大。这表明:对于偏高岭土地聚物,最佳碱激发剂模数为1.2,当碱激发剂模数较高时,地聚物中碱性减弱,硅铝原料的反应速率降低。②当碱激发剂模数为2.1时,地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度几乎为0,这主要是由于当碱激发剂模数为2.1时,氢氧化钠的质量分数过高,改良红黏土为弱碱性,碱激发剂未能成功激活偏高岭土,导致其改良失效。③随着养护时间的增加,不同碱激发剂模数的地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度均随之增大。这表明:地聚物可表现出与水泥相类似的性质,其均需要一定的时间减小反应,在红黏土内部形成胶凝材料,增强其力学性能。

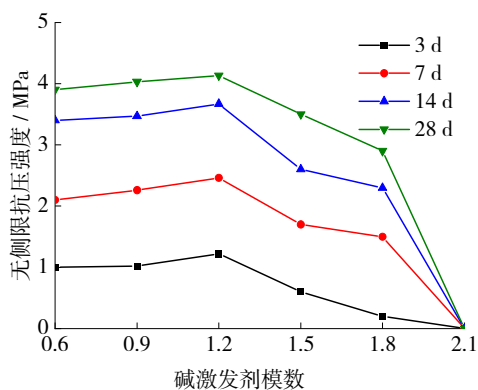


图2 不同碱激发剂模数的地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度

Fig. 2 UCS of geopolymer modified red clay with different modulus of alkali exciter

2) 偏高岭土地聚物掺量。

当碱激发剂模数分别为0.9和1.2时,不同地聚物掺量的地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度如图3所示。从图3可以看出:①在养护3 d后,未经处理的红黏土无侧限抗压强度仅为 0.24 MPa 。当碱激发剂模数为0.9时,随着地聚物质量分数的增大,改良红黏土的无侧限抗压强度也随之增大。当地聚物掺量为8%时,养护3 d的改良红黏土的无侧限

抗压强度为 2.67 MPa,其强度较未处理的红黏土的增大了约 9 倍。当碱激发剂模数为 1.2 时,改良红黏土的无侧限抗压强度表现出与碱激发剂模数为 0.9 时相似的趋势,两者均随地聚物掺量的增加而增大,且当地聚物掺量为 8% 时,养护 3 d 后,其强度增大了约 7 倍。这表明:地聚物可明显增强改良红黏土的无侧限抗压强度。② 随着养护时间的增长,改良红黏土的无侧限抗压强度逐渐增大。在养护前期,其强度受地聚物掺量影响较大,当期养护时间超过 28 d,且地聚物掺量大于 4% 时,改良红黏土的无侧限抗压强度基本不变。这主要是由于随着养护时间的增加,碱激发剂与偏高岭土持续反应,消耗了改良红黏土中的 OH^- ,使其中 OH^- 含量逐渐减小,最终趋于 0。因此,改良红黏土在养护前期受地聚物掺量影响较大。③ 与碱激发剂模数为 0.9 相比,碱激发剂模数为 1.2 的改良红黏土养护 3 d 的无侧限抗压强度较小。但是随着养护时间的增长,碱激发剂模数为 1.2 的改良红黏土的无侧限抗压强度在后期逐渐大于碱激发剂模数为 0.9 的改良红黏土的无侧限抗压强度。这主要是由于改良红黏土在养护 28 d 后,碱激发剂模数为 0.9 的改良红黏土中的 OH^- 被完全消耗,内部反应停止;而碱激发剂模数为 1.2 的改良红黏土中仍存在 OH^- ,这些 OH^- 仍可与偏高岭土中硅铝原料继续反应,生成胶凝物质。

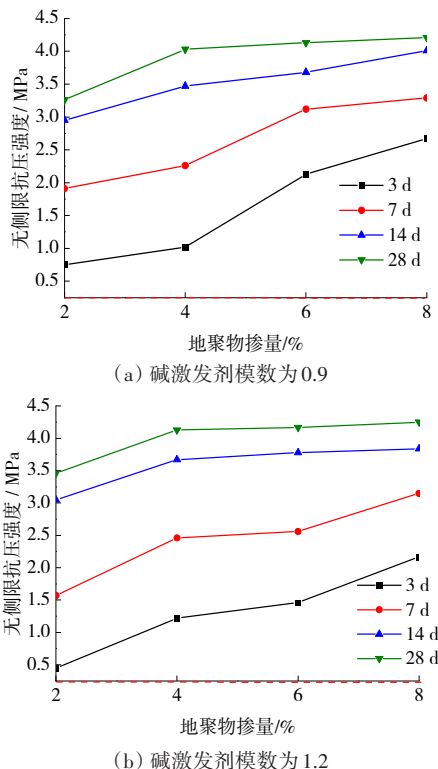


图3 不同地聚物掺量的地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度
Fig. 3 UCS of geopolymer-amended red clay at different geopolymer admixtures

2.2 地聚物改良红黏土渗透特性

不同碱激发剂模数下地聚物改良红黏土的渗透性能如图 4 所示。从图 4 可以看出:① 随着地聚物掺量的增加,其渗透系数从初始的 $6.1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 逐渐减小;当地聚物掺量为 0%~2% 时,渗透系数减小幅度最大,之后随着地聚物掺量的不断增加,其渗透系数的减小幅度逐渐减小。这主要是由于地聚物在掺入红黏土后,生成了具有胶凝作用的材料。胶凝材料能使红黏土细颗粒粘聚在一起,形成大的团聚体,且胶凝材料还可填充红黏土中的微观孔隙,减小了入渗通道。② 当碱激发剂模数为 1.2 时,地聚物改良红黏土的渗透系数减小幅度最大;当碱激发剂模数为 0.6~1.2 时,随着碱激发剂模数的不断增大,其渗透系数逐渐减小;当碱激发剂模数为 1.2~2.1 时,随着碱激发剂模数的不断增大,其渗透系数逐渐增大。这主要是由于碱激发剂模数较小时,地聚物中碱激发剂可与偏高岭土中硅铝物质持续生成胶凝材料。而当碱激发剂模数较大时,其地聚物中碱度不断减小,导致其与偏高岭土生成胶凝材料含量减小。当碱激发剂模数为 2.1 时,由于碱度太小导致碱激发剂未发生应有的作用。因此,当碱激发剂模数为 2.1 时,其渗透性能减小幅度较小,基本保持不变。

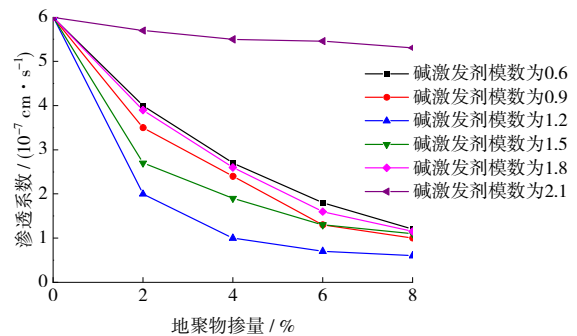


图4 不同碱激发剂模数下地聚物改良红黏土的渗透性能

Fig. 4 Permeability properties of geopolymer-amended red clay at different geopolymer admixtures

2.3 地聚物改良红黏土水稳性

在干湿循环作用下,红黏土的力学强度急剧降低。因此,在地聚物改良红黏土的研究过程中,需对改良后红黏土的水稳性进行分析。不同干湿循环次数下地聚物改良红黏土无侧限抗压强度的变化如图 4 所示。从图 4 可以看出:① 在不同地聚物掺量下,改良红黏土的无侧限抗压强度均随干湿循环次数的增加而减小,特别是在原状红黏土经历 10 次干湿循环后,其无侧限抗压强度趋于 0。而经过

地聚物改良后的红黏土均能保持较大的无侧限抗压强度。当地聚物掺量分别为2%、4%、6%、8%时,改良红黏土在经过12次干湿循环后,无侧限抗压强度分别为1.03、1.95、2.11、2.70 MPa,未开展干湿循环的改良红黏土的无侧限抗压强度分别降低了34.3%、20.7%、17.6%、14.3%。这表明:地聚物可有效改善红黏土的水稳性,且地聚物掺量越大,其受干湿循环的影响程度越小,强度损失率越小,水稳性越强。这主要是由于地聚物生成的胶凝材料使细小的红黏土颗粒粘聚在一起,提高了红黏土强度,且地聚物还填充了红黏土内部的孔隙结构,堵塞外部水进入试样内部的通道,增强了水稳性。

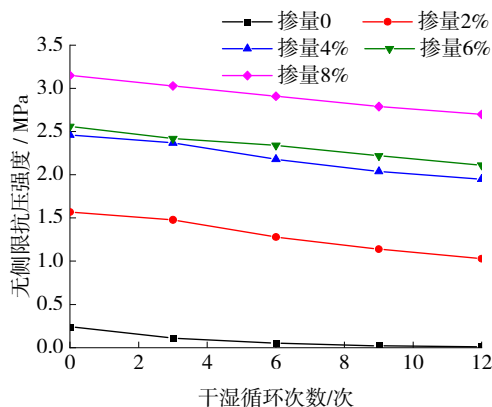


图5 不同干湿循环次数的地聚物改良红黏土无侧限抗压强度

Fig. 5 UCS of ground aggregate-modified red clay under dry and wet cycles

3 结论

利用氢氧化钠与水玻璃制备了偏高岭土地聚物,并将其用于改良红黏土,分析碱激发剂模数、地聚物掺量对地聚物改良红黏土的力学性能及渗透性能的影响,探讨了干湿循环次数对不同地聚物掺量的改良红黏土水稳性能的影响,得到结论:

1) 地聚物改良红黏土的力学性能随着碱激发剂模数的增加呈“抛物线”焰火的趋势,且当碱激发剂模数为1.2时,地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度最大。

2) 地聚物含量越大,地聚物改良红黏土的无侧限抗压强度也越大,且随着养护时间的增加,改良红黏土的无侧限抗压强度增大。

3) 随着地聚物掺量的增大,其渗透系数逐渐减小,最终趋于稳定,且当碱激发剂模数为0.6~1.2

时,其渗透系数随着碱激发剂模数的增加而逐渐减小;当碱激发剂模数为1.2~2.1时,其渗透系数随着碱激发剂模数的增加而逐渐增大。

4) 地聚物可有效改善红黏土的水稳性,且地聚物掺量越大,其受干湿循环次数影响的程度越小,强度损失率越小,水稳性越强。

参考文献(References):

- [1] 刘维正,万家乐,徐阳,等.反复湿化和动载作用下路基红黏土累积变形特性研究[J].中国公路学报,2022,35(8):129-139.
LIU Weizheng, WAN Jiale, XU Yang, et al. Accumulative deformation characteristics of lateritic clay under combined action of cyclic wetting and dynamic loading [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(8): 129-139.
- [2] 丁才,甘先永,王亚晓.路基红粘土动态回弹模量的影响因素研究[J].交通科学与工程,2017,33(1):27-31.
DING Cai, GAN Xian Yong, WANG Yaxiao. Study on influencing factors of dynamic resilient modulus of roadbed red clay [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2017, 33(1): 27-31.
- [3] 李娜,陈昌富,朱世民,等.考虑干密度影响的红黏土蠕变特性及蠕变模型研究[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(8):2174-2182.
LI Na, CHEN Changfu, ZHU Shimin, et al. Research on creep characteristics and creep model of red clay considering effect of dry density [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2020, 51(8): 2174-2182.
- [4] 熊俊豪,刘宝臣,刘磊,等.基于摄影法的红黏土裂隙试验研究[J].地下空间与工程学报,2020,16(2):381-387.
XIONG Junhao, LIU Baochen, LIU Lei, et al. A method for crack image processing of red clay [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(2): 381-387.
- [5] 常松涛,查轩,黄少燕,等.地面覆盖条件降雨强度和坡度对红黏土坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2019,33(6):79-85.
CHANG Songtao, ZHA Xuan, HUANG Shaoyan, et al. Influence of rainfall intensity and slope on red clay slope erosion under mulching conditions [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 79-85.
- [6] 谢栋,吴建奇.循环荷载作用下红黏土累积变形研究

- [J]. 地震工程学报, 2019, 41(6): 1623-1629.
- XIE Li, WU Jianqi. Accumulative deformation of red clay in southern Jiangxi under cyclic loading[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(6): 1623-1629.
- [7] 谈云志, 胡焱, 曹玲, 等. 偏高岭土协同石灰钝化红黏土水敏性的机制[J]. 岩土力学, 2020, 41(7): 2207-2214, 2282.
- TAN Yunzhi, HU Yan, CAO Ling, et al. Mechanism of metakaolin and lime modification of water sensitivity for compacted laterite[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(7): 2207-2214, 2282.
- [8] 刘之葵, 郭彤, 王剑. 粉煤灰和二灰对桂林红黏土力学性质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(3): 86-92.
- LIU Zhikui, GUO Tong, WANG Jian. Effect of the fly ash and lime fly ash on the mechanical properties of red clay in Guilin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(3): 86-92.
- [9] 曾军. 石灰改良红黏土的试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(7): 1289-1293.
- ZENG Jun. Experimental study on improvement of red clay with lime [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(7): 1289-1293.
- [10] 薛亦峰, 曲松, 闫静, 等. 北京市水泥工业大气污染物排放清单及污染特征[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(1): 201-204.
- XUE Yifeng, QU Song, YAN Jing, et al. Development of an air pollutant emission inventory of cement industry for Beijing and pollution characteristics analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 37(1): 201-204.
- [11] MUGAHED AMRAN Y H, ALYOUSEF R, ALABDULJABBAR H, et al. Clean production and properties of geopolymer concrete; A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 251: 119679.
- [12] 邱豪杰, 姚佳良, 陈鑫, 等. 地聚合物在软土地基加固中的应用研究[J]. 公路与汽运, 2021(2): 64-69.
- QIU Haojie, YAO Jialiang, CHEN Xin, et al. Study on application of geopolymer in soft soil foundation reinforcement [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(2): 64-69.
- [13] BAJPAI R, CHOUDHARY K, SRIVASTAVA A, et al. Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 254: 120147.
- [14] ZHANG P, GAO Z, WANG J, et al. Properties of fresh and hardened fly ash/slag based geopolymer concrete: a review [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 270: 122389.
- [15] 王书勤, 尹平保, 贺伟, 等. 镍铁渣-黏土改性土承载特性试验研究[J]. 公路与汽运, 2022(4): 63-67.
- WANG Shuqin, YIN Pingbao, HE Wei, et al. Experimental study on bearing characteristics of nickel-iron slag-clay modified soil [J]. Highways & Automotive Applications, 2022(4): 63-67.
- [16] 俞家人, 陈永辉, 陈庚, 等. 地聚物固化软黏土的力学特征及机理分析[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2): 364-371.
- YU Jiaren, CHEN Yonghui, CHEN Geng, et al. Mechanical characteristics and mechanism analysis of geopolymer cured soft clay [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2): 364-371.
- [17] YAGHOUBI M, ARULRAJAH A, DISFANI M M, et al. Effects of industrial by-product based geopolymers on the strength development of a soft soil [J]. Soils and Foundations, 2018, 58(3): 716-728.
- [18] ALAM S, DAS S K, RAO B H. Strength and durability characteristic of alkali activated GGBS stabilized red mud as geo-material [J]. Construction and Building Materials, 2019, 211: 932-942.
- [19] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG 3430-2020 [S]. 北京: 人民交通出版社有限公司, 2020.
- Research Institute of Highway Ministry of Transport. Test methods of soils for Highway Engineering: JTG 3430-2020 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd..
- (责任编辑: 欧兆虎; 校对: 李脉; 英文编辑: 陈璐)