

杨蒙,陈秋南,蒋刘妮,等.柴油污染改良土的击实特性及微观机理[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2022,37(4):25-30. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.004

YANG M, CHEN Q N, JIANG L N, et al. Compaction Characteristics and Micro-mechanism of Improved Soil Contaminated by Diesel Oil[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2022,37(4):25-30. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2022.04.004

柴油污染改良土的击实特性及微观机理

杨蒙¹,陈秋南^{2,3*},蒋刘妮⁴,谢云鹏²,李长利²,杨振宇²

(1.湖南省第六工程有限公司,湖南长沙410035;2.湖南科技大学土木工程学院,湖南湘潭411201;

3.湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室,湖南湘潭411201;

4.中机国际工程设计研究院有限责任公司,湖南长沙410007)

摘要:为研究柴油污染对水泥改良后花岗岩残积土压实特性的影响,通过室内击实试验,以柴油和水为介质,得到了单一水介质和油水混合介质时土样的击实曲线.发现污染土样的最优含水率呈下降趋势,而最大干密度却呈一定幅度的上升趋势.同时通过液限和塑限联合测定法得到土样的稠度界限,发现其塑限变化趋势与最优含水率相似,即土样的液限、塑限以及塑性指数都是先增大再减小,并且在含油率为6%时达到峰值.最后通过SEM扫描电子显微镜进行观察,分析并得到柴油污染改良土击实特性微观结构.微观视角下,水泥和柴油会发生物理胶结作用,填充了土颗粒之间的孔隙,导致单位体积下土样的孔隙率减小,从而密度增大.

关键词:柴油;污染土;花岗岩残积土;击实;微观结构

中图分类号:TU411

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2022)04-0025-06

Compaction Characteristics and Micro-mechanism of Improved Soil Contaminated by Diesel Oil

YANG Meng¹, CHEN Qiunan^{2,3}, JIANG Liuni⁴, XIE Yunpeng², LI Changli², YANG Zhenyu²

(1. Hunan No.6 Engineering Co., Ltd., Changsha 410035, China;

2. School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

3. Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring,

Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

4. China Machinery International Engineering Design Research Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: In order to study the influence of diesel oil pollution on the compaction characteristics of granite residual soil after cement improvement, the compaction curves of the soil with single water medium and oil-water mixture medium were obtained through indoor compaction tests. It was found that the optimum moisture content of contaminated soil samples decrease while the maximum dry density increase to a certain extent. At the same time, the consistency limit of soil samples was obtained by the combined determination of liquid limit and plastic limit. It was found that the change trend of plastic limit of soil samples is similar to the optimal water content. That is, the liquid limit, plastic limit and plastic index of soil samples increase first and then decrease, and

收稿日期:2019-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52078211;51909087);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4021);湖南省教育厅开放基金资助项目(18K064)

*通信作者,E-mail:cqndoc@163.com

reach the peak value when oil content is 6%. At last, the compaction characteristics of the improved soil polluted by diesel oil were analyzed and obtained by SEM. From the microscopic point of view, cement and diesel oil act as physical cementation, filling the voids between soil particles, resulting in the decrease of voids per unit volume and the increase of density of soil samples.

Keywords: diesel oil; contaminated soil; granite residual soil; compaction; microstructure

在我国的基础建设项目蒸蒸日上的同时,重型工程机械事故屡见不鲜.由于重型工程机械的动力大多由柴油提供,由此所导致的污染问题也迫切需要解决.很多学者对石油污染土体的问题进行了广泛的研究. Khamehchiyan 等^[1]在一系列室内试验中发现土壤受原油污染后,其强度、最大干密度和最优含水率与原土壤相比都显著降低;Rahman 等^[2]对石油污染的玄武岩残积土的基本性质进行了试验测定,发现其最大干密度、最优含水率和不排水剪切强度均降低;郑天元等^[3]利用室内试验对石油、柴油污染土的干密度进行了研究,得到不同孔隙流体土样干密度和击实曲线的变化规律;Safehian 等^[4]测定了柴油污染对土壤性质的影响,得到了污染土壤的最大干密度、最优含水率和抗剪强度会显著降低,压缩系数进一步增大的结论;刘松玉团队^[5-8]进行了一系列柴油污染土研究,得到了各种柴油污染土的界限含水率、电阻率的变化规律以及电阻率和热阻率的相关关系;Khosravi 等^[9]研究了高岭土受柴油污染后的工程特性,得到了一系列力学与土工基础指标.

花岗岩残积土在我国南部地区广泛分布,出于经济方面的考虑,其经水泥改良后的产物常用于道路的水稳层或路基.之前众多研究者大多是针对单一黏土或砂土,并没有考虑在实际工程中这些土并不能直接用于施工的问题.以花岗岩残积土为例,之前的研究发现其水泥最佳掺入量为 6%^[10],掺入水泥后其土体承载能力与抗崩解能力大大加强.

在实际道路工程中,路面压实度是路基路面施工质量检测的关键指标之一.压实度是指现场达到的密度与室内标准密度的比值,而室内标准密度(最大干密度)的数值是通过室内击实试验得到的.

文章主要研究柴油污染后的改良花岗岩残积土的击实特性,并通过 SEM 扫描电子显微镜对污染前后的土样进行观察,通过 XRD 法对土样进行测试,研究柴油影响土样击实特性的工作机理,为工程中测定柴油污染土的压实度提供一些理论依据.

1 材料的基本性质

1.1 试验土样

试验所用土样均取自湖南省株洲市芦淞区庙岭上国道旁某新开挖边坡处,土样在自然条件下未经石油及其衍生物的污染.本次试验依据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》对土样的基本性质进行了测试,判定该土样为粉黏土质砂.花岗岩残积土土样的粉晶 XRD 衍射谱图如图 1 所示,相关数据见表 1.

由图 1 可知:土样的主要矿物成分有高岭石、蛇纹石、石英、辉绿岩等,其中,高岭石与石英为土体矿物的主要成分,决定了花岗岩残积土的主要结构特性.

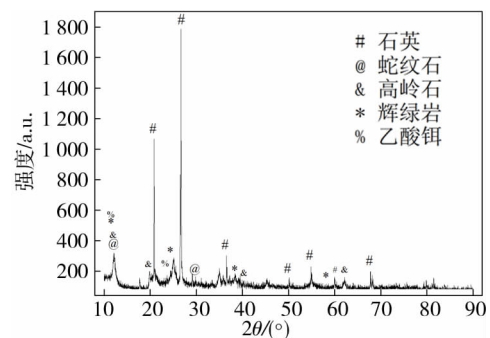


图 1 花岗岩残积土土样的粉晶 XRD 衍射谱图

表 1 试验土样物理指标

含水率/%	相对密度	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数
22.7	2.67	1.77	14.1	37.1	26.1	11.0

土的矿物成分也是决定土体物理特性的重要依据^[11-12].为了较为全面地获取并分析所取土样的矿物成分,对所取花岗岩残积土样进行 XRD 试验.遵循文献^[13]提出的 XRD 试验测试条件:工作电压 40 kV、工作电流 250 mA、入射狭缝与接收狭缝 1°、扫描范围 5°~90°(2θ)、扫描速度 12(°)/min、采样部宽 0.02°.

1.2 试验油样

试验选用中石化湖南湘潭石油分公司销售的0#柴油对试验土样进行污染处理.本试验油品呈淡黄色,略有光泽,清澈且可见性好,微溶于水,黏滞性大于水但远小于原油,挥发性较强,暴露于空气中时有较强的刺激性气味.其相关数据如表2所示.

表2 试验油品物理指标

相对密度	20℃时的黏滞系数/(mPa·s)	燃点/℃	沸点/℃
0.841	3.88	56	150~390

2 柴油污染土含水率的测定

由于试验所用土为柴油污染土,无法直接使用规范所推荐的酒精燃烧法和烘干法,因此,含水率的计算方法与传统的土样含水率的计算不同.采用文献[14]的测定方法,其研究结果发现:烘干过程中油和水的挥发互不影响,每种油品的挥发损失比例固定.因此,可以通过固定的柴油损失系数来修正传统烘干法的含水率公式.

2.1 柴油污染土土样损失率测定

污染土样分为烘干土样和风干土样,烘干土样和风干土样的配制方法如下:

1)烘干土样:先将土样在105℃的条件下用烘箱烘干,再配制含油率分别为0%,4%,8%,12%,16%的污染土样(按油与烘干土样的质量比配制).

2)风干土样:先将原状土放置于通风干燥的环境一周,再取风干土样配制含油率分别为0%,4%,8%,12%,16%的污染土样(按油与风干土样的质量比配制).

对烘干污染土样和风干污染土样分别进行烘干处理,将2种土样的试验数据绘制在同一张图上,如图2所示.

由图2可知:风干土的柴油损失率为0.291,烘干土的柴油损失率为0.31475.两者损失率相近,可以确定本试验土样的柴油烘干损失系数 γ 为0.31.

2.2 柴油污染土含水率的确定

将柴油污染土烘干质量损失率定义为土样减少的质量与烘干后土样的质量比,其数学表达式为

$$W_{ss} = \frac{M_t - M_d}{M_d} \times 100\%$$

式中: W_{ss} 为柴油污染土烘干质量损失率; M_t 为柴油污染土烘干前湿土的质量,g; M_d 为柴油污染土烘干后干土的质量,g.

下面是改进的含水率计算公式,可以用于柴油污染土的研究^[15].

$$W_w = \frac{(M_t - M_d) - M_o}{M_d} \times 100\% = \frac{(M_t - M_d) - M_d n \gamma}{M_d} \times 100\% = W_{ss} - n \gamma$$

式中: W_w 为污染土含水率; M_o 为柴油烘干损失质量,g; n 为土样含油率.

3 试样制备和试验方案

3.1 试验土样的配制

试样制样过程:采用干法配制不同含水率的击实土样,将花岗岩残积土在自然状态下风干、破碎、碾

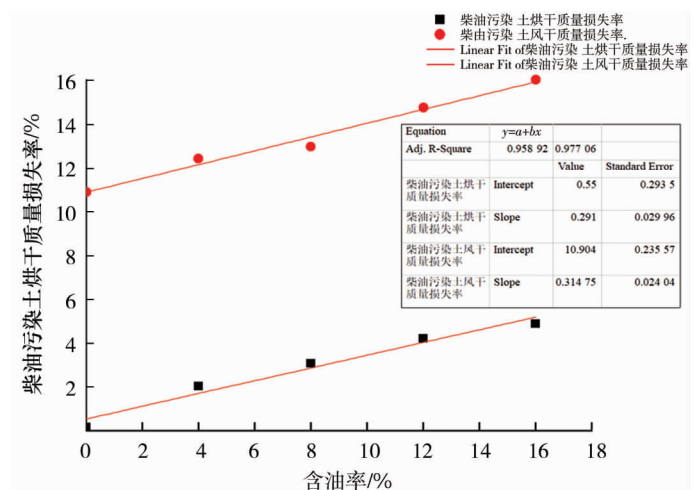


图2 柴油污染土中含油率和烘干质量损失率的关系

压,平铺在树脂板上;再将计算所得重量的纯水均匀喷洒入风干土样上,翻转、搅拌均匀后装入密封袋中焖料 24 h;再往焖好料的土样中均匀撒入 6%(水泥与风干土样的质量比)的水泥,搅拌均匀后喷洒不同量的柴油配制成不同含油率的试验土样,焖料 24 h.由于水在 24 h 的焖润后已经均匀分布在土样里,因此,水泥水化反应对土样的影响不大,多次验证发现土样不会结块,无明显硬化现象.再用同样的方法分别配制含油率为 0%, 3%, 6%, 9%, 12% 的柴油污染水泥改良花岗岩残积土土样.

3.2 试验内容及方法

根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》,并综合考虑重型击实相较于轻型击实更符合实际工程的要求,选择重型击实进行试验.试验仪器选用南京宁曦土壤仪器有限公司生产的 DJS-1 数控电动击实仪,该击实仪的单位体积击实功能为 2 677.2 kJ/cm³.土料配制后立即进行击实试验.

3.3 击实试验结果分析

由于花岗岩残积土不是黏土,不能使用塑限大概预测最大含水率的范围,且由于经过水泥改良和柴油污染后,其最大含水率更加不可预估.因此,每种土样配制 7 个击实样,每个击实样的含水率间隔 (2±0.5)% 进行击实试验,去除问题点且补足后得到的击实曲线如图 3 所示.最优含水率与最大干密度的数据如表 3.

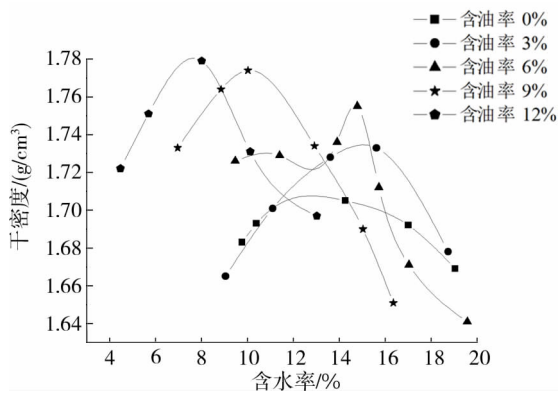


表 3 不同污染程度土样的最大干密度和最优含水率

含油率/%	最大干密度/(g/cm ³)	最优含水率/%
0	1.718	13.11
3	1.737	15.13
6	1.759	14.94
9	1.777	10.04
12	1.781	8.07

图 3 柴油污染改良污染土的击实曲线

与之前学者所发现的柴油污染土样的最大干密度与最优含水率均下降的现象不同,本试验中,随着含油率的增加,虽然最优含水率是呈先略微上升后下降的趋势,但最大干密度却呈一定幅度的上升趋势,这与之前学者提出的“油膜润滑”观点^[3]有所差别.由于试验与其他污染土击实试验的区别在于改良物水泥的参与,而水泥在国外的污染重建工程中常作为固化剂参与维护,水泥与石油并不会发生剧烈的化学反应,因此,猜测水泥在柴油污染后的存在形式发生了物理反应.通过扫描电子显微镜试验进一步验证该观点.

3.4 稠度界限变化规律

细粒土的最优含水率一般在塑限附近,约为液限的 0.55~0.65^[16],其他土类的塑限变化规律也与最优含水率的变化规律相似^[17].因此,通过检测土样的稠度界限来进行击实试验参考.根据 JTG E40—2007《公路土工试验规程》,通过液限和塑限联合测定法得到土样的稠度界限值和含油率的关系如图 4 所示.由图 4 可知:检测土样的液限、塑限以及塑性指数都有一定程度的上升,当含油率为 6% 时,稠度界限值都达到峰值,含油率在 6% 之后,随着柴油的进一步污染,稠度界限值则呈下降的趋势,在含油率为 12% 时,稠度界限值的下降趋势有所缓解,其中,除污染

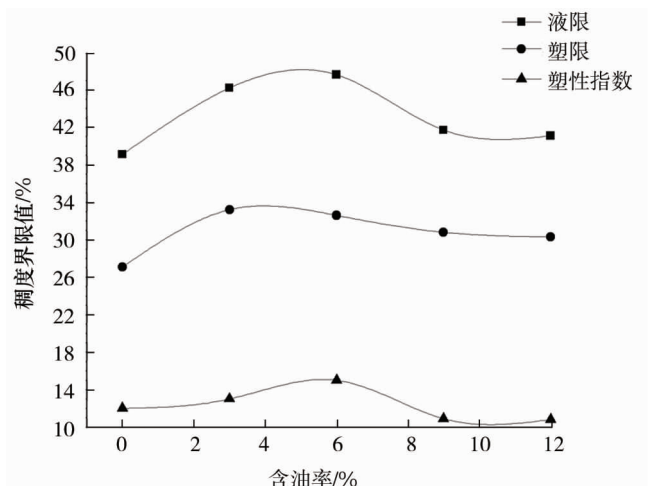


图 4 柴油污染改良土样的稠度界限值和含油率的关系

前的含油率为0%这一土样外,其余土样的塑限是呈下降趋势的,与最优含水率的变化趋势相符。

3.5 SEM 扫描电子显微镜试验结果及分析

试验采用日本电子公司生产的JSM-6380LV扫描电子显微镜.试验设计观察6个花岗岩残积土土样: Y_1 为水泥掺入量6%,含油率0%的土样; Y_2 为水泥掺入量0%,含油率0%的土样; Y_3 为水泥掺入量0%,含油率6%的土样; Y_4 为水泥掺入量6%,含油率6%的土样; Y_5 为水泥掺入量6%,含油率12%的土样; Y_6 为水泥掺入量0%,含油率12%的土样.

不同试样的微观结构图如图5所示.从未污染的花岗岩残积土、含油率6%的花岗岩残积土和含油率12%的花岗岩残积土的对比分析可以看出(图5b、图5d和图5f):柴油污染后的花岗岩残积土发生了明显的破碎与分离,由片状、块状结构变为粒径更小的团粒装和碎片状结构.而在图5d和图5f中可以看见絮状物黏结或者漂浮在主要颗粒附近.

从水泥改良前后的污染前花岗岩残积土的对比分析可以看出(图5a和图5b):水泥改良后的花岗岩残积土的孔隙会大大减少,片状结构会互相黏结成带絮状分支的块状、团状结构.

从污染前改良花岗岩残积土与不同含量柴油污染的水泥改良土的对比分析可以看出(图5a、图5d和图5e):柴油污染会使之前的水泥改良后胶结成块的颗粒进一步变大,颗粒间的孔隙也进一步减少.随着柴油占土样含量的增大,土颗粒物理胶结的现象也愈加明显.柴油在常温条件下的静电荷较多,水泥颗粒可能由于吸附或电离等原因带电,并在颗粒周围形成双电层,倾向于与柴油相互发生物理作用.物理反应产物的增多促使颗粒团聚,填充了土体孔隙.

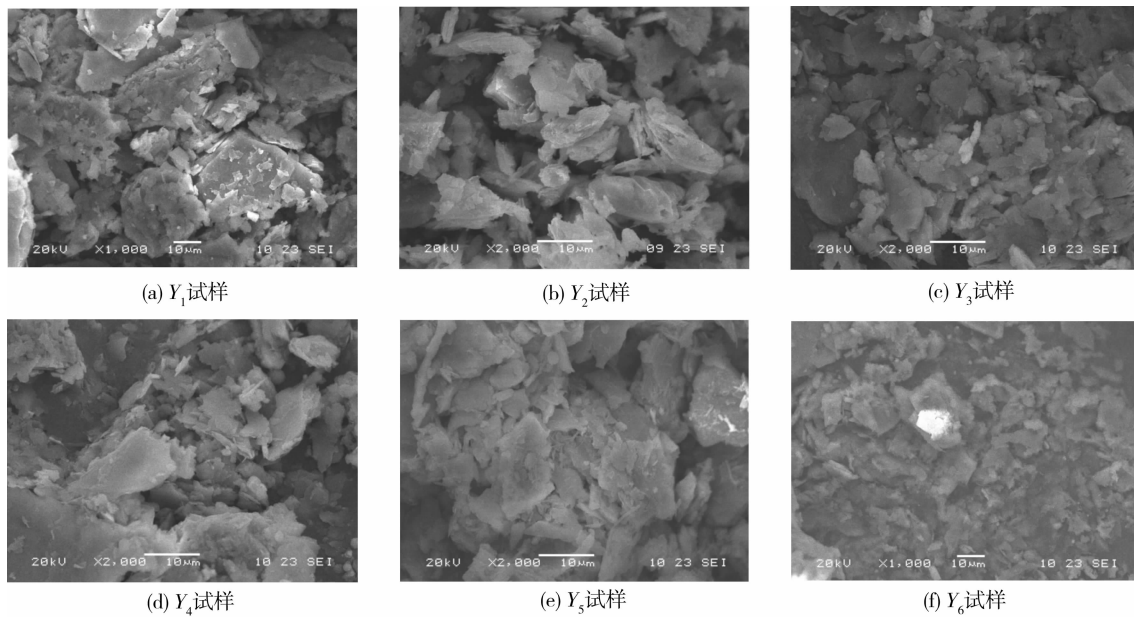


图5 不同花岗岩残积土试样SEM图

4 结论

1) 随着含油率的增大,污染程度的增加,水泥改良花岗岩残积土的最优含水率随之减小,即柴油作为孔隙流体代替了一部分水的功能,在土颗粒表面形成油膜.

2) 随着含油率的增大,水泥改良花岗岩残积土的最大干密度会增大.这是因为微观视角下,水泥和柴油会发生物理胶结作用,填充了土颗粒之间的孔隙,导致单位体积下土样的孔隙率减小,从而密度增大.

3) 土样的液限、塑限以及塑性指数都是呈先增大再减小的趋势,并且在含油率为6%时达到峰值.

4) 实际工程中,如果施工机械发生漏油事件,水稳层或地基为改良花岗岩残积土时,在测量此类工程的压实度时,可以参考提出的击实特性,从而更好地指导工程压实.

5) 发现柴油与花岗岩残积土中的细粒土略有黏结,但黏结比例不大.

参考文献:

- [1] Khamehchiyan M, Charkhabi A H, Tajik M. Effects of crude oil contamination on geotechnical properties of clayey and sandy soils[J]. *Engineering Geology*, 2007, 89(3/4):220-229.
- [2] Rahman Z A, Hamzah U, Taha M R, et al. Influence of Oil Contamination on Geotechnical Properties of Basaltic Residual Soil[J]. *American Journal of Applied Sciences*, 2010, 7(7):954-961.
- [3] 郑天元,杨俊杰,刘江娇,等.石油污染土的击实特性[J]. *水文地质工程地质*, 2010, 37(3):102-106.
- [4] Safedian H, Rajabi A M, Ghasemzadeh H. Effect of diesel-contamination on geotechnical properties of illite soil[J]. *Engineering Geology*, 2018, 241:55-63.
- [5] 曾玲玲,周梦学,王钢,等.柴油污染土的含水量计算方法与界限含水量变化规律[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(6):1278-1283.
- [6] 边汉亮,刘松玉,蔡国军,等.柴油污染土电阻率与热阻率的相关关系[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2016, 46(s1):129-134.
- [7] 边汉亮,刘松玉,蔡国军,等.柴油污染粉质黏土的电阻率特性及影响因素[J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2017, 38(8):1177-1182.
- [8] Liu Z B, Liu S Y, Cai Y. Engineering property test of kaolin clay contaminated by diesel oil[J]. *Journal of Central South University*, 2015, 22(12):4837-4843.
- [9] Khosravi E, Ghasemzadeh H, Sabour M R, et al. Geotechnical properties of gas oil-contaminated kaolinite[J]. *Engineering Geology*, 2013, 166:11-16.
- [10] 赵磊军.改良花岗岩残积土强度特性及崩解特性的研究[D].湘潭:湖南科技大学,2015.
- [11] Yamaguchi H, Yoshida K, Kuroshima I, et al. Slaking and shear properties of mudstone[C]// *Symposium on Rock Mechanics and Power Plants*, 1988:133-144.
- [12] Prikryl R. Some microstructural aspects of strength variation in rocks[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2001, 38(5):671-682.
- [13] Irfan T. Mineralogy, fabric properties and classification of weathered granites in Hong Kong[J]. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 1996, 29(1):5-35.
- [14] 梁春,郑西来,张俊杰,等.石油污染多孔介质含水量测定技术[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011(3):826-830.
- [15] 何小红.长春地区柴油污染土性质及水泥固化效果研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [16] 陈仲颐,周景星,王洪瑾.土力学[M].北京:清华大学出版社,1994.
- [17] 中华人民共和国水利部.土工试验方法标准:GB/T 50123—1999[S].1999.