

中风化泥质粉砂岩石灰改良回填料试验研究

罗战友¹,邱少锋¹,闫自海²,李华威²,金威²,邹宝平¹

(1. 浙江科技学院 土木与建筑工程学院,杭州 310023;2. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司,杭州 310014)

摘 要: 中风化泥质粉砂岩遇水易软化崩解造成工程性质不稳定,为合理利用中风化泥质粉砂岩,克服常规碎石基料来源困难并解决成本高的问题,依托浙中某地铁项目,对开挖区典型中风化泥质粉砂岩的物理力学特性进行了分析。然后采用生石灰对中风化泥质粉砂岩进行改良配合比设计,开展了不同石灰掺量及含水率下的石灰改良回填料的无侧限抗压强度和最优含水率试验研究。结果显示,中风化泥质粉砂岩干强度最高,天然强度次之,饱和强度最低,干强度和饱和强度差与天然强度比值达46%;石灰掺量4%~20%范围内石灰改良回填料的应力应变关系曲线呈现峰前硬化及峰后软化的特征,无侧限抗压强度随石灰掺量增加而升高;含水率10%~20%范围内石灰改良回填料干密度随含水率增加呈现出先升高后降低的特征,最优含水率随石灰掺量增加而增加。石灰改良回填料的强度及含水率试验结论可以为后续工程应用提供重要指导。

关键词: 中风化泥质粉砂岩;石灰改良;回填料;无侧限抗压强度;最优含水率

中图分类号: TU459.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-8798(2020)06-0563-06

Experimental research on lime-improved backfill of middle-weathered argillaceous siltstone

LUO Zhanyou¹, QIU Shaofeng¹, YAN Zihai², LI Huawei², JIN Wei², ZOU Baoping¹

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, Zhejiang, China; 2. Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 310014, Zhejiang, China)

Abstract: Middle-weathered argillaceous siltstone exposed to air results in unstable engineering properties because of susceptibility to being softened and disintegrated by water. In order to reasonably utilize the middle-weathered argillaceous siltstone and avoid the scanty supply and high cost of conventional crushed stone base, the physical properties of typical middle-weathered argillaceous siltstone were analyzed in the excavation area of a certain metro project in Zhejiang. Lime was used to improve middle-weathered argillaceous siltstone for the design of mix proportion scheme. Experimental study was conducted on the unconfined compressive strength and the optimum moisture content of the lime-improved backfill under different lime

收稿日期: 2020-04-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572299,41602308)

通信作者: 罗战友(1974—),男,河南省漯河人,教授,博士,主要从事隧道工程、岩土工程研究。E-mail: lzy0395@163.com。

contents and moisture contents. Results show that middle-weathered argillaceous siltstone has the highest strength in the dry state, the moderate strength in the natural state and the lowest strength in the saturated state. Ratio of the difference between dry strength and saturated strength to natural strength reaches 46%; the stress-strain curve of lime improved backfill in the range of 4%—20% lime content shows pre-peak hardening and post-peak softening characteristics, and the unconfined compressive strength of lime-improved backfill increases with the lime content; the dry density of lime-improved backfill in the range of 10%—20% moisture content increases initially and then decreases. Optimal moisture content of lime-improved backfill increases with the lime content. Lime-improved backfill strength and water content test conclusions can provide important guidance for subsequent engineering applications.

Keywords: middle-weathered argillaceous siltstone; lime improvement; backfill; unconfined compressive strength; optimum moisture content

路基沉降是影响交通安全的重要因素,由于填料特性及施工质量等原因造成回填路段沉降较挖方路段更加严重,严重者会发生失稳破坏,常造成巨大的人员伤亡和经济损失。回填料性质直接影响回填段路基质量,但常规碎石路基回填料来源紧张、运输困难、费用巨大,故常利用工程所在地土体做路基回填料;然而,由于其工程性能差,难以直接用于路基,因此常通过物理、化学等改良技术来提升路基填料的工程性能,做到因地制宜,减少费用^[1-3]。

浙中某中心城市商城大道是集地铁隧道、管廊和城市快速路三线竖向交叠的重大工程项目,采用明挖设计方案造成隧道、管廊与城市快速路的路基回填料需求量巨大,而明挖范围内分布有大量中风化泥质粉砂岩,以此作为路基回填料将会显著减少废土产生,降低外运困难,节省施工成本。然而,中风化泥质粉砂岩遇水易软化、崩解,致使工程性质不稳定,直接用于路基回填容易出现路面破坏、不均匀沉降等问题^[4-5],因此,亟须开展中风化泥质粉砂岩改良回填料的物理力学特性研究。

国内外把泥质粉砂岩作为回填料的研究主要集中在回填料适宜性、回填料改良机理及改良剂选择等方面。在适宜性方面,叶飞亚等^[6-8]开展了针对泥质粉砂岩的红砂岩物理力学性能研究,通过理论分析、室内试验等方法研究了红砂岩作为改良回填材料的适宜性,结果表明红砂岩不宜直接回填。在回填料改良机理方面,Ouhadi 等^[9]通过理论分析了石灰的改良机理;Xing^[10]结合电镜扫描技术(scanning electron microscope)分析了改良回填料的强度发展因子。在改良剂选择方面,梁伟等^[11]综合考虑工程中改良回填效果、经济和适用性等因素后,提出采用石灰作为回填料改良剂。崔伟等^[12]通过对济南、淄博地区膨胀土的室内物理力学性质及石灰改性的系列试验分析,确定了掺入石灰的最佳配比,研究结果表明采用石灰作为改良剂能起到显著的效果。

综上所述,国内外虽然开展了较多改良回填料方面的研究,但针对浙中某区域的中风化泥质粉砂岩改良回填料的此类研究还较少,因此本文在分析中风化泥质粉砂岩物理力学特性的基础上,选取石灰作为改良剂,通过无侧限抗压强度试验和最优含水率试验,研究中风化泥质粉砂岩石灰改良回填料的物理力学特性,以期工程设计提供试验依据。

1 中风化泥质粉砂岩物理力学特性

1.1 赋存状态

拟建工程属浙中盆地地貌,为义乌江阶地向盆周低丘过渡地带,地势西北高东南低。受城市建设影响,原有地貌经过较大平场改造,目前地面较为平坦开阔,局部为人工堆积土、基岩裸露及少量池塘,场地岩土层自上到下分布情况见表 1。

表 1 岩土层分布情况

Table 1 Rock soil layer distribution

土层	层厚/m	分布情况
填土	0.2~14.5	大部分分布
软土	0.5~9.2	局部分布
风化泥质粉砂岩	1.5~37.9	全线分布

地层挖深范围内中、强风化泥质粉砂岩全线分布,揭露最大层厚 37.9 m,埋置深度约为 15.6 m,该土层全场均有分布,钻孔取样如图 1 所示。

1.2 中风化泥质粉砂岩物理力学指标

根据地质勘测报告,获得原状土样 248 组、扰动样 183 组、岩样 471 组。取样点在全场地均匀分布,基本上能反映所在地层情况。对中风化泥质粉砂基岩获取的岩样分别在天然、干燥、饱和状态下进行单轴抗压强度试验及其风化产物的液塑限试验,测试结果见表 2。其中, q_u 为试样的单轴抗压强度; q_{un} 、 q_{ud} 、 q_{us} 分别为天然、干燥、饱和状态下试样的单轴抗压强度; w_l 、 w_p 分别为液限、塑限; w 为含水率; ρ_d 与 ρ 分别为干密度和湿密度; a_{1-2} 为压缩系数。



图 1 中风化泥质粉砂岩取样照片

Fig. 1 Sampling photo of middle-weathered argillaceous siltstone

表 2 中风化泥质粉砂岩物理力学指标

Table 2 Physical and mechanical indexes of middle-weathered argillaceous siltstone

q_u			$w_l/\%$	$w_p/\%$	$w/\%$	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	$\rho_d/(g \cdot cm^{-3})$	a_{1-2}/MPa^{-1}
q_{un}/MPa	q_{ud}/MPa	q_{us}/MPa						
15.0	17.7	10.8	29.2	18.7	25.8	1.91	1.53	0.36

由表 2 可知,中风化泥质粉砂岩干强度最高,天然强度次之,饱和强度最低,干强度和饱和强度差与天然强度比值高达 46%,遇水后强度降低主要是与中风化泥质粉砂岩的矿物成分和组成结构有关。采用 X 射线衍射仪分析了矿物成分,结果显示,中风化泥质粉砂岩以石英、方解石、绢云母等原生矿物为主,约占 70%~80%,其次是黏土矿物高岭石,而亲水性很强的黏土矿物蒙脱石含量较低。泥质粉砂岩浸水崩解机理有如下两个方面:1)干燥的岩样快速吸水后会对内部气体产生压缩,从而使得被压缩气体反过来对岩土颗粒产生拉应力,若岩块抗拉强度不足以抵抗这种内部的拉应力,则会使岩块产生开裂、崩解^[13];2)当水首先进入孔隙后,土中的可溶盐矿物与水发生水解反应,使得土体孔隙变大,胶结力降低进而诱发泥质粉砂岩崩解、泥化。

2 石灰改良土无侧限抗压强度试验

由于中风化泥质粉砂岩遇水易崩解的特点,根据国内外研究成果和 中风化泥质粉砂岩物理力学特性选取生石灰^[14]作为改良剂,并采用中风化泥质粉砂岩的质量百分比为 4%~20%的生石灰^[15]作为改良配比掺量。

2.1 配合比设计

采用石灰进行中风化泥质粉砂岩改良,石灰改良回填料配比设计见表 3。

表 3 石灰改良回填料配比设计

Table 3 Mix proportion design of lime-improved backfill

%

中风化泥质粉砂岩掺量	石灰掺量	含水率
96	4	12
95	5	12
94	6	12
93	7	12
92	8	12
85	15	12
80	20	12

2.2 石灰改良回填料试样制备

由现场取样获取中风化泥质粉砂岩,对于较大岩块先将其初步破碎,随后把破碎后的颗粒状岩样放入烘箱中烘干,然后利用岩石粉碎机将中风化泥质粉砂岩进行粉碎,对于粉碎后的岩石粉状颗粒进行筛检。若存在尚未完全粉碎的岩样要进行二次或者多次粉碎处理,直至符合试验要求的颗粒粒径范围,随后利用三瓣模具将粉碎后岩样粉状颗粒按照配合比要求进行制样,具体制作过程如图 2 所示。

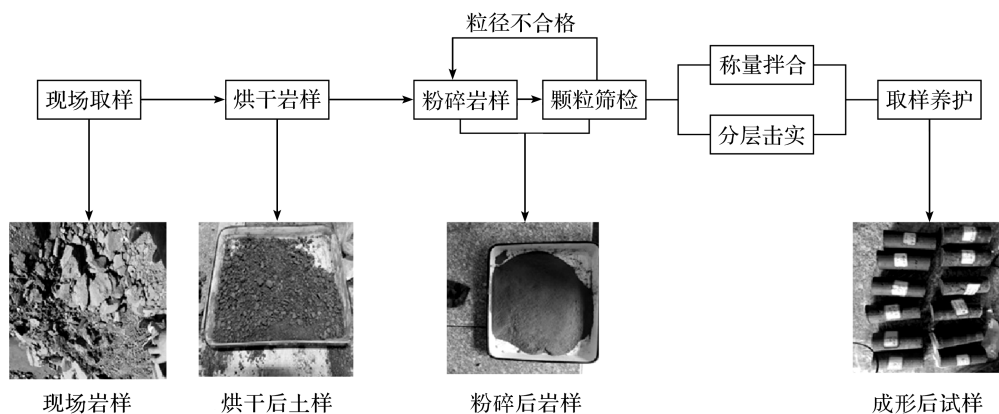


图 2 试样制作过程

Fig. 2 Sample production process

2.3 无侧限抗压强度试验结果

采用 TKA-TTS-1S 型全自动应力路径三轴仪开展无侧限抗压强度试验,压缩速率为 0.08 mm/min,测试结果如图 3 和图 4 所示,图 3 是石灰改良回填料的应力应变曲线(4%~20%石灰掺量),图 4 是石灰改良回填料无侧限抗压强度与石灰掺量关系图。由图 3 和图 4 可知,石灰掺量 4%~20% 范围内石灰改良回填料的应力应变关系曲线呈现峰前硬化及峰后软化特征,无侧限抗压强度随石灰掺量增加而升高。石灰加入土中发生一系列物理化学反应,主要分为水化、结晶、火山灰、碳化四个反应。石灰在水化反应时能产生氢氧化钙,且中风化泥质粉砂岩中含有大量二氧化硅,二者与中风化泥质粉砂岩中其他亲水性矿物发生反应,生成具有胶结作用的硅酸钙和硅酸铝,从而较大程度提升了改良土强度,增大土体密实度,使石灰改良回填料强度随石灰掺量的增加而升高。当石灰掺量达到 8% 时,改良回填料的无侧限抗压强度约为 0.7 MPa,考虑到实际工程中经济性需求,石灰掺量可确定为 8%~12%。

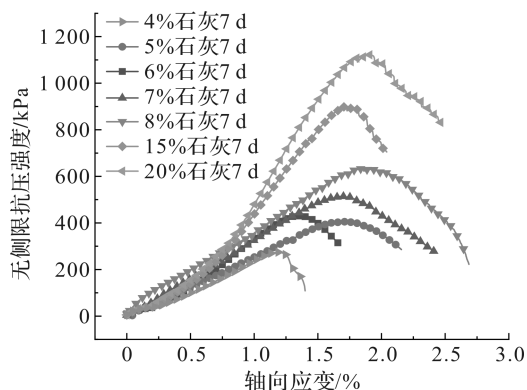


图 3 石灰改良回填料的应力应变曲线(4%~20%石灰掺量)

Fig. 3 Stress-strain curve of lime-improved backfill(4%—20% lime content)

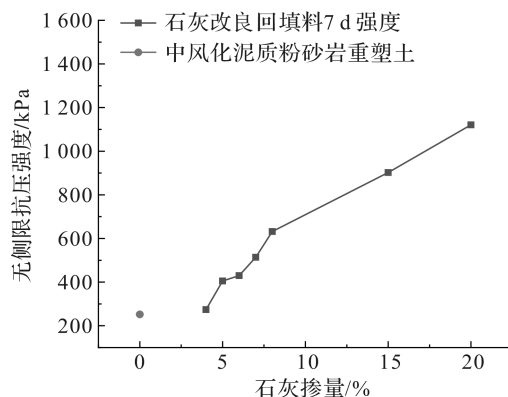


图 4 石灰改良回填料无侧限抗压强度与石灰掺量关系

Fig. 4 Relationship between unconfined compressive strength and lime content of lime-improved backfill

3 最优含水率试验

3.1 配合比设计

根据中风化泥质粉砂岩的天然含水率及石灰掺量,对最优含水率试验进行了配比设计,见表 4。

表4 最优含水率试验配比

Table 4 Test ratio of optimum moisture content

%

风化泥质粉砂岩掺量	石灰掺量	含水率(步长 2%~3%)
96	4	10~20
94	6	10~20
92	8	10~20

3.2 最优含水率试验结果

由现场取得岩样后,通过烘干处理,按照公路土工试验规程^[16],使岩样通过 40 mm 的孔筛,随后将过筛后的岩样按照 2%~3% 配比含水率递增逐一配样,最后将配好试样密封备用。采用标准击实仪(试模筒尺寸为 10 cm×12.7 cm,击实功为 598.2 kJ/m³)对试样进行击实试验。先测量试模筒质量,击实后取下试模筒削平顶部多余改良回填料可测得总质量,两者相减即可获得对应含水率的试样质量,进而获得试样干密度,测试结果如图 5 和图 6 所示。

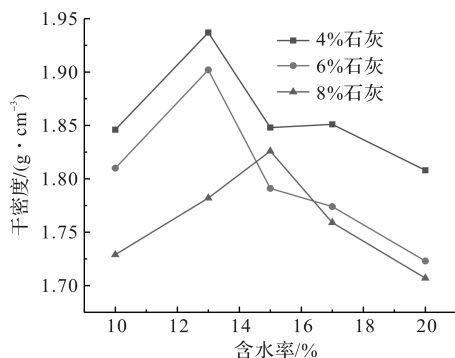


图5 石灰改良回填料击实曲线

Fig. 5 Compaction curve of lime-improved backfill

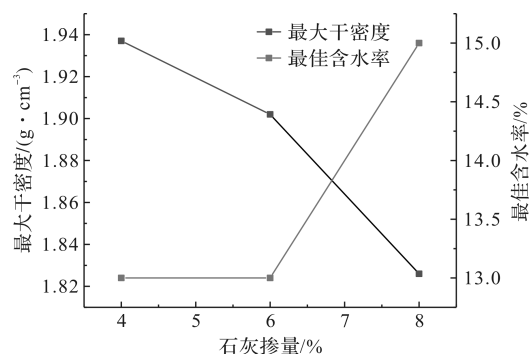


图6 最大干密度及最优含水率与石灰掺量关系曲线

Fig. 6 Relationship curve between maximum dry density, optimum moisture content and lime content

图 5 是石灰改良回填料干密度与含水率的变化曲线,由图 5 可知,在含水率 10%~20% 范围内中风化泥质粉砂岩石灰改良回填料干密度随含水率的增加呈现出先升高后降低的特征,这是因为石灰主要成分是氧化钙,会与土中水发生水化反应降低含水率,水化产生的氢氧化钙与中风化泥质粉砂岩中的石英等矿物成分反应生成胶结体骨架结构降低了干密度。图 6 是最大干密度及最优含水率与石灰掺量关系曲线,由图 6 可知,回填料最优含水率随石灰掺量增加而呈现出升高的变化规律,改良回填料最大干密度随石灰掺量增加呈现出降低的变化规律,其对应的最大干密度均在 1.8 g/cm³ 以上,能够满足工程要求。

4 结 论

为了解决浙中某城市商城大道中风化泥质粉砂岩遇水软化、强度低的不足,开展了石灰改良回填料的无侧限抗压强度试验及最优含水率试验研究,主要结论如下:

- 1) 中风化泥质粉砂岩干强度最高,天然强度次之,饱和强度最低,干强度与饱和强度差与天然强度比值达 46%。
- 2) 石灰掺量 4%~20% 范围内石灰改良回填料的应力应变关系曲线呈现峰前硬化及峰后软化特征,无侧限抗压强度随石灰掺量增加而升高。
- 3) 含水率 10%~20% 范围内石灰改良回填料干密度随含水率增加呈现出先升高后降低的特征,最优含水率随石灰掺量增加而增加。

参考文献:

- [1] 朱剑锋,虞秋水,邓温妮,等. 镁质水泥复合固化剂固化有机质土的抗压强度模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2019, 53(1): 2168.
- [2] OUHADI V R, YONG R N, AMIRI M, et al. Pozzolanic consolidation of stabilized soft clays[J]. Applied Clay

- Science, 2014, 95: 111.
- [3] 孙东彦. 冻融循环下镇赉地区非饱和盐渍土及石灰固化土的力学特性及机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
 - [4] 刘长武, 陆士良. 泥岩遇水崩解软化机理的研究[J]. 岩土力学, 2000, 21(1): 28.
 - [5] 田巍巍. 干湿循环下不同风化程度泥质粉砂岩崩解特性试验研究[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(6): 223.
 - [6] 叶飞亚, 徐立新, 陈永辉. 泥质粉砂岩路基填料改良试验研究[J]. 河北工程大学学报(自然科学版), 2014, 31(3): 22.
 - [7] 赵明华, 刘晓明, 苏永华. 含崩解软岩红层材料路用工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(6): 667.
 - [8] 王智猛, 蒋关鲁, 魏永幸, 等. 达成线红层泥岩路基循环加载试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(12): 1888.
 - [9] OUHADI V R, YONG R N. The role of clay fraction of marly soils on their post stabilization failure[J]. Engineering Geology, 2003, 70(3/4): 365.
 - [10] XING H, YANG X, XU C, et al. Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement[J]. Engineering Geology, 2008, 103(1/2): 33.
 - [11] 梁伟, 欧孝夺. 南宁高液限土路基石灰改良试验研究[J]. 建筑科学, 2008, 24(7): 57.
 - [12] 崔伟, 李华奎, 穆乃敏. 石灰改性膨胀土工程性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(4): 606.
 - [13] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.
 - [14] 查甫生, 刘松玉, 杜延军. 石灰-粉煤灰改良膨胀土试验[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2007, 37(2): 339.
 - [15] 李华奎, 于孝清, 路丽霞. 公路工程中膨胀土石灰改性试验研究[J]. 山东工业大学学报, 2002, 32(1): 92.
 - [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路土工试验规程: JTG E40—2019[S]. 北京: 人民交通出版社, 2019.

(上接第 556 页)

- [4] GÜNTHE R, WENZEL T, WEGNER M, et al. Big data driven dynamic driving cycle development for busses in urban public transportation[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 51: 276.
- [5] PENG Y H, ZHUANG Y, YANG H B. Development of a representative driving cycle for urban buses based on the K-means cluster method[J]. Cluster Computing, 2018, 22(2): 6871.
- [6] 刘子谭, 朱平, 刘旭鹏, 等. K 均值聚类改进与行驶工况构建研究[J]. 汽车技术, 2019(11): 57.
- [7] 王沛, 陈劲杰. 基于 PCA 主成分分析和 K-means 算法的汽车行驶工况数据量化研究[J]. 软件工程, 2020, 23(3): 17.
- [8] JING Z C, WANG G L, ZHANG S P, et al. Building Tianjin driving cycle based on linear discriminant analysis[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2017, 53: 78.
- [9] 高建平, 高小杰. 改进模糊 C 均值聚类法的车辆实际行驶工况构建[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(6): 21.
- [10] 苗强, 孙强, 白书战, 等. 基于聚类和马尔可夫链的公交车典型行驶工况构建[J]. 中国公路学报, 2016, 29(11): 161.
- [11] 亢朋朋, 倪国新, 陈知明. 基于峰度偏度和 WD-LDA 的飞机目标分类方法[J]. 现代雷达, 2019, 41(5): 39.
- [12] LU C X, YANG F R, YANG J. An adaptive time-domain Kalman filtering approach to acoustic feedback cancellation for hearing aids[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29(1): 139.
- [13] LOUTAS T, ELEFTHEROGLOU N, GEORGOULAS G, et al. Valve failure prognostics in reciprocating compressors utilizing temperature measurements, PCA-based data fusion and probabilistic algorithms[J]. IEEE transactions on Industrial Electronics, 2019, 64(6): 5022.
- [14] 赵丽. 全局 K-均值聚类算法研究与改进[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2013.
- [15] 彭育辉, 杨辉宝, 李孟良, 等. 基于 K-均值聚类分析的城市道路汽车行驶工况构建方法研究[J]. 汽车技术, 2017(11): 13.
- [16] GUO Y H, HAN R B, XU Y Z. Analysis of insulator leakage current under fog and haze conditions based on K-means algorithm[C]//2019 2nd International Conference on Informatics, Control and Automation. Hangzhou: Advanced Science and Industry Research Center, Science and Engineering Research Center, 2019: 428.
- [17] 李耀华, 宋伟萍, 任田园, 等. 基于聚类和比功率分布的西安城市公交行驶工况研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(4): 28.
- [18] 赵琦, 于雷, 宋国华. 轻型车与重型车高速公路比功率分布特征研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015, 15(3): 201-202.