

DOI: 10.11779/CJGE2021S2042

水泥-废砖细骨料双掺固化黏土试验研究

段 坤, 边晓亚*, 陈家乐, 白俊龙

(武汉工程大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 高含水率黏土与废砖等建筑垃圾的弃置会造成巨大的资源浪费和严重的环境污染, 如何有效解决这一问题是国内外研究的热点。提出用水泥-废砖细骨料双掺固化处理高含水率黏土(双掺固化土)的方法, 通过室内试验测试了不同配合比条件下双掺固化土的无侧限抗压强度, 分别研究了废砖细骨料、水泥掺量对双掺固化土强度特性的影响及其压缩变形特性。试验结果表明: 当水泥掺量大于等于8%时, 掺入废砖细骨料能够提高高含水率黏土的强度, 且早期强度增长速率比后期快; 但废砖细骨料的加入也增大了双掺固化土的变异性; 双掺固化土的破坏形态主要表现为塑性剪切破坏, 其破坏应变一般在2.5%~3%, 表明双掺固化土韧性比一般水泥固化土好。

关键词: 水泥; 废砖细骨料; 高含水率黏土; 固化处理; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU472.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2021)S2-0174-04

作者简介: 段 坤(1996—), 男, 硕士研究生, 主要从事软土固化处理方面的研究工作。E-mail: duank@stu.wit.edu.cn。

Experimental investigation on clay stabilized by cement and waste brick fine aggregate

DUAN Kun, BIAN Xiao-ya, CHEN Jia-le, BAI Jun-long

(School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The disposal of high water content clay and waste bricks (including other construction wastes) has caused huge resource waste and serious environment of pollution. How to effectively solve these problems is a hot issue. An innovative approach mixing cement and brick waste fine aggregate is proposed to stabilize the high water content clay (called as double mixing stabilized clay, DMSC). The laboratory experiments are conducted to test the unconfined compressive strengths of DMSC with different mixing proportions and curing time. In addition, the influences of waste brick fine aggregate and cement content on the strength and compressive deformation characteristics of DMSC are studied respectively. The results indicate that when the cement content is greater than or equal to 8%, adding the waste brick fine aggregate can enhance the strength of the cement-stabilized clay with high water content, and the growth rate of early strength is faster than that of late strength. It is noteworthy that the addition of waste brick fine aggregate increases the variability of DMSC. The failure modes of DMSC is mainly the plastic shear failure, and its failure strain generally ranges from 2.5% to 3%, so the toughness of DMSC is better than that of the general cement-stabilized clay.

Key words: cement; waste brick fine aggregate; high water content clay; solidification; unconfined compressive strength

0 引言

在水利工程建设与湖泊、河道的清淤疏浚过程中会产生大量的高含水率疏浚淤泥。在工程上因其力学性质差难以直接利用, 通常进行抛泥处理, 造成大量的资源浪费和严重的环境污染。水泥固化法处理高含水率淤泥, 在填海工程中被大量使用^[1]。在水泥固化土的研究中, 有学者就水泥固化土强度影响参数方面展开了研究, 也有学者为提高水泥土材料的力学特性, 研究了掺入其它材料的影响^[2-4]。

另一方面, 中国每年产生的废弃砖块约占建筑垃圾总量的30%~50%。关于废砖细骨料再生研究中,

Letelier等^[5]利用再生骨料和废砖粉作为水泥替代品, 研究了结构混凝土的力学性能。Kumar等^[6]利用废砖细骨料、混凝土细骨料和pozzol烷材料制备砌块, 测试了砌块养护28 d后湿压强度、吸水率和吸湿率等特性。中国目前仍存在建筑垃圾排放量大, 回收利用率低等问题^[7]。

在疏浚土等不良土的处理方法中, 还可掺混不同

基金项目: 国家自然科学基金项目(52078396, 51708428); 武汉工程大学第十二届研究生教育创新基金项目(CX2020120, CX2020122)

收稿日期: 2021-08-18

*通信作者(E-mail: wit_bianxy@hust.edu.cn.)

粒径的砂土, 通过改变粒径级配达到改善不良土力学特性的目的^[8]。基于此, 本文在传统水泥固化土方法基础上提出用水泥-废砖细骨料双掺固化处理高含水率黏土的方法, 通过测定不同龄期和不同配合比试样的无侧限抗压强度, 分析了双掺固化土的应力-应变关系、抗压强度-破坏应变关系及废砖细骨料的掺入对强度的影响。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

(1) 通过预试验确定本试验所用细骨料的粒径范围为 2~5 mm, 密度 1.306 g/cm³, 吸水率为 10.57%。

(2) 所取原状土的物理力学性质指标见表 1, 通过加入水使其达到本文所设计的含水率 72.4%。

表 1 黏土的物理力学性质指标

Table 1 Physical and mechanical properties of clay

含水率 /%	孔隙比	液限 /%	塑限 /%	液性指数	塑性指数
32.06	0.397	55.11	15.11	0.42	40.00

(3) 采用工程上常用的普通硅酸盐水泥, 即 P.O 42.5R 水泥。

1.2 试验方法

考虑废砖细骨料掺量分别为 0%, 8%, 10% 和 12%, 水泥掺量分别为 6%, 8% 和 10% (均为黏土干质量的百分比) 等多种情况, 设置 7 d 和 28 d 两种养护龄期。每组配合比条件下分别制作 3 个压缩试样, 测定其无侧限抗压强度。试样的制备步骤如下:

(1) 混合底泥进行搅拌。加入计算所需的相应固化剂和细骨料, 使用搅拌器匀速搅拌 5 min 制备一定含水率的黏土-水泥-废砖细骨料混合物, 搅拌均匀后制成混合泥浆。

(2) 开展试样制作。为方便后期脱模, 在装入混合料前, 在模具 (直径为 3.91 cm, 高度为 8 cm) 内壁均匀涂上一层凡士林。将制备好的混合泥浆, 分 3 次延模具壁一侧缓缓滑入, 一次倒入 1/3 模具容积, 每次倒入后作一段时间振捣, 使小气泡从表面破出, 避免内部气泡间隙对试样强度的影响。灌制满后, 用刮刀进行刮平, 铺垫保鲜膜后封盖。

(3) 开展试样养护。将试样密封后置于充满水的水箱中, 并放置在标准养护室 (20±3℃, 湿度>95%) 内, 养护至设计龄期。

2 试验结果与分析

2.1 废砖细骨料掺量对强度的影响

图 1 为废砖细骨料掺量与无侧限抗压强度在水泥掺量在 10% 条件下的关系曲线图。由图 1 可知: 当废

砖细骨料掺量从 10% 增加到 12%, 试样强度均有了较大幅度的提升; 但养护龄期为 28 d 增长率比 7 d 时略小。分析认为: 当养护龄期达到 28 d 时, 近似认为废砖细骨料中的水分达到饱和, 此时细骨料的湿润度与周围水泥土湿润度相当, 根据再生废砖骨料的吸水返水特性^[9]分析可知, 此时细骨料的返水能力比吸水能力强, 双掺固化土中的水分会有所增加, 故出现龄期为 28 d 的水泥-废砖细骨料双掺固化土的强度增长速率较 7 d 变缓的现象; 在相同废砖细骨料掺量情况下, 双掺固化土抗压强度随试样养护龄期的增加而增大, 且 28 d 无侧限抗压强度相较 7 d 无侧限抗压强度平均提升了 1.63 倍。

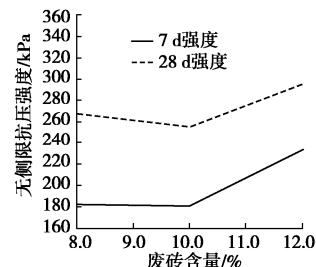


图 1 废砖细骨料掺量对强度的影响

Fig. 1 Influences of amount of waste brick fine aggregate on strength

2.2 水泥掺量对强度的影响

图 2 为废砖细骨料掺量在 10% 条件下, 水泥掺量与无侧限抗压强度的关系曲线图。由图 2 可知: 当养护龄期为 7 d 时, 试样强度随水泥掺量的增加成线性增长; 养护龄期为 28 d, 当水泥掺量大于 8% 时, 强度增长速率有减小的趋势。分析认为: 这一现象与废砖骨料的吸水返水特性有关; 在相同水泥掺量情况下, 双掺固化土抗压强度随试样养护龄期的增加而增大, 且 28 d 无侧限抗压强度相较 7 d 无侧限抗压强度平均提升了约 1.44 倍。

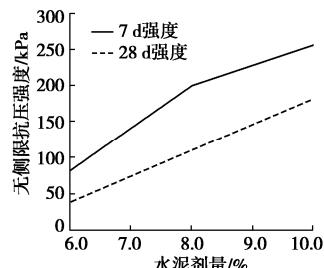


图 2 水泥掺量对强度的影响

Fig. 2 Influences of cement content on strength

2.3 双掺固化土与水泥固化土的对比

通过对两种固化土的强度特性进行对比分析 (图 3) 发现, 龄期为 7 d 的水泥固化土, 随水泥掺量的增加成非直线增长, 这与郑少辉等^[3]分析不同水灰比固

化土的强度所得研究结果相近,即当水泥剂量小于16%时无侧限抗压强度随水泥剂量的增加呈非线性增长。在两种养护龄期下,均出现双掺固化土强度的总体增长速率比水泥固化土强度增长速率高的现象。分析可知,再生废砖细骨料具有孔隙率高、吸水性强等特征,能够吸收土体中部分多余水分,且废砖细骨料含量越多吸水性越强,从而有效降低土体含水率,进而随之强化水泥在低含水率下的固化效率,加快了双掺固化土强度的形成。对7 d龄期条件,当水泥剂量大于等于8%时,废砖细骨料的掺入,明显提高了固化土的强度,说明要使废砖细骨料在改善固化土强度方面发挥作用,对水泥掺量存在一个最低剂量要求。

废砖细骨料为颗粒状,在固化土体中可视为游离状态,在制作无侧限抗压试样时,由于分层振捣处理导致废砖颗粒分布不均,形成的受力骨架也有所差异,故测出的强度不一,导致随着龄期和废砖细骨料含量的增长,强度的变异系数明显变大。

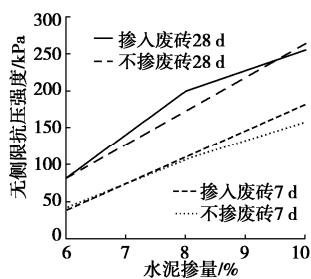


图3 废砖颗粒掺入对强度的影响

Fig. 3 Influences of waste brick particle on strength

综上所述,在水泥剂量满足最低要求(本文测的最低剂量为8%)的情况下,废砖细骨料掺入和龄期增长都有利于固化土强度的提升;废砖细骨料的掺入,在增大固化土强度的同时也会增大固化土的变异性。

2.4 双掺固化土的破坏形态

图4为双掺固化土无侧限抗压强度试验的破坏形态。试样受压破坏后出现多条裂缝,主裂缝不突出不明显,破坏后试样破碎成块状,为塑性剪切破坏。故水泥-废砖细骨料双掺固化土的破坏形态主要表现为塑性剪切破坏。



图4 破坏形态

Fig. 4 Failure modes

2.5 压缩变形特性

图5为用水泥-废砖细骨料双掺法处理高含水率黏土的固化土应力-应变曲线图。由图可见其破坏应变分布在2.5%~3%,与水泥固化土的破坏应变一般介于0.5%~2%的认识^[8, 11-14]有一定的偏差。分析其原因为两点:①由于废砖骨料在试样中成悬浮分布状态,当其掺量较小时,颗粒之间并没有形成骨架;②当骨料的湿润度与周围水泥土湿润度相当时,骨料表现出返水能力比吸水能力强的特性,使土体的水分略微增加所致。

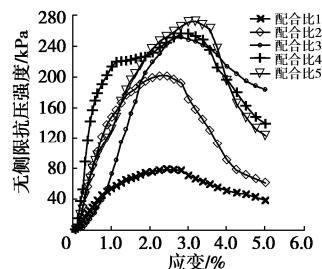


图5 双掺固化土试样应力-应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of DMSC samples

图6为双掺固化土破坏应变与抗压强度的关系曲线。由图6可知,破坏应变随着抗压强度增大呈先略微减小后明显增大的趋势,这与其他学者得出的破坏应变随抗压强度增大而减小的试验结果^[8, 10-14]有一定的偏差。分析其原因,主要是废砖的掺入使固化土的韧性在一定程度上得到提升。

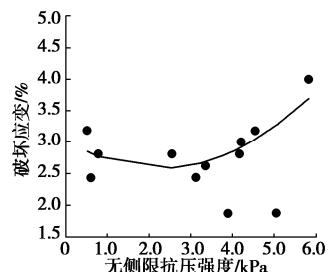


图6 固化土破坏应变与抗压强度的关系

Fig. 6 Relationship between failure strain and compressive strength of DMSC samples

3 结 论

(1)废砖细骨料对高含水率水泥固化土的强度有显著的提升效果,且早期强度增长速率比后期快。

(2)要发挥废砖细骨料的作用,水泥掺量需满足最低剂量8%的要求;掺入废砖细骨料在提高固化土强度的同时,也增加了固化土的变异性。控制变异性可提高其在工程建设上应用的安全可靠性。

(3)双掺法处理高含水率黏土固化土的破坏形态主要表现为塑性剪切破坏,其破坏应变在2.5%~3%,韧性比一般固化土的韧性好。

参考文献:

- [1] TANG Y X, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment[J]. *Soils and Foundations*, 2001, 41(5): 129 – 143.
- [2] TAJDINI M, HAJIALILUE BONAB M, GOLMOHAMADI S. An experimental investigation on effect of adding natural and synthetic fibres on mechanical and behavioural parameters of soil-cement materials[J]. *International Journal of Civil Engineering*, 2018, 16(4): 353 – 370.
- [3] 郑少辉, 赖汉江, 章荣军, 等. 不同水灰比水泥固化黏土的强度特性试验研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(6): 1281 – 1284, 1292. (ZHENG Shao-hui, LAI Han-jiang, ZHANG Rong-jun, et al. Experimental research on strength characteristics of cement-stabilized clay with different water-cement ratio[J]. *Chinese Journal of underground space and Engineering*, 2014, 10(6): 1281 – 1284, 1292. (in Chinese))
- [4] 朱红伟, 江 帅, 张晴波, 等. 水泥-生石灰双掺处理淤泥含水率变化规律[J]. *中国港湾建设*, 2015, 35(4): 33 – 38. (ZHU Hong-wei, JIANG Shuai, ZHANG Qing-bo, et al. Change rule of water content of dredged clays by adding cement and quick lime[J]. *China Harbour Engineering*, 2015, 35(4): 33 – 38. (in Chinese))
- [5] LETELIER V, TARELA E, MORICONI G. Mechanical properties of concretes with recycled aggregates and waste brick powder as cement replacement[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 171: 627 – 623.
- [6] KUMAR B M V, ANANTHAN H, BALAJI K V A. Experimental studies on cement stabilized masonry blocks prepared from brick powder, fine recycled concrete aggregate and pozzolanic materials[J]. *Journal of Building Engineering*, 2017, 10: 80 – 88.
- [7] 杜梦笔, 徐 森. 国内外城市建筑固体废弃物治理比较分析[J]. *现代商业*, 2012(26): 282 – 283. (DU Meng-bi, XU Sen. Comparative analysis on solid waste management of urban buildings at home and abroad[J]. *Modern Business*, 2012(26): 282 – 283. (in Chinese))
- [8] 杨永荻, 汤怡新. 疏浚土的固化处理技术[J]. *水运工程*, 2001, 34(4): 12 – 15. (YANG Yong-di, TANG Yi-xin. Dredged soils solidification treatment technique[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2001, 34(4): 12 – 15. (in Chinese))
- [9] 张士杰, 李 显, 王福晋, 等. 再生废砖骨料的吸水返水特性研究[J]. *混凝土*, 2017(12): 185 – 188. ZHANG Shi-jie, LI Xian, WANG Fu-jin, et al. Research on the water absorption and desorption properties of recycled brick aggregate[J]. *Concrete*, 2017(12): 185 – 188. (in Chinese))
- [10] 丁建文, 张 帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. *岩土力学*, 2010, 31(9): 2817 – 2822. DING Jian-wen, ZHANG Shuai, HONG Zhen-shun, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(9): 2817 – 2822. (in Chinese))
- [11] HORPIBULSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis[J]. *Géotechnique*, 2003, 53(4): 439 – 444.
- [12] MIURA N, HORPIBULSUK S, NAGARAJ T S. Engineering behavior of cement stabilized clay at high water content[J]. *Soils and Foundations*, 2001, 41(5): 33 – 45.
- [13] 汤怡新, 刘汉龙, 朱 伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2000, 22(5): 549 – 554. (TANG Yi-xin, LIU Han-long, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2000, 22(5): 549 – 554. (in Chinese))
- [14] 朱 伟, 张春雷, 高玉峰, 等. 海洋疏浚泥固化处理土基本力学性质研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2005, 39(10): 1561 – 1565. (ZHU Wei, ZHANG Chun-lei, GAO Yu-feng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2005, 39(10): 1561 – 1565. (in Chinese))

(编校: 胡海霞)