

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2016.06.010

压实时间对固化土强度影响试验

赵子荣^{1,2}, 徐建勇³, 陈永辉^{1,2}, 陈庚^{1,2}, 王波^{1,2}, 李斌⁴

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;
2. 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098; 3. 浙江省交通规划设计研究院, 浙江 杭州 310006;
4. 31 省道北延绍兴市市区段工程建设指挥部, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 以固化土压实时间、水泥掺量和养护龄期为控制变量, 通过无侧限抗压强度试验研究上述变量对固化土强度的影响。结果表明: 压实时间过长一方面使得固化土便于压实, 另一方面又会损失压实时间内的胶结强度; 对其进行机理分析, 发现重塑固化土强度与试样干密度相关, 并通过试验数据拟合出线性公式。建议固化土拌和后应尽早使用, 以求更好地发挥水泥的胶结作用, 否则必须提高其压实度, 才能达到设计要求。

关键词: 固化压实土; 重塑固化土; 无侧限抗压强度; 压实时间; 水泥掺量; 养护龄期; 干密度

中图分类号: TU411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2016)06-0531-05

Experimental study on influence of compaction period on strength of solidified soil

ZHAO Zirong^{1,2}, XU Jianyong³, CHEN Yonghui^{1,2}, CHEN Geng^{1,2}, WANG Bo^{1,2}, LI Bin⁴

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Jiangsu Research Center for Geotechnical Engineering Technology, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Zhejiang Provincial Institute of Communications Planning, Design and Research, Hangzhou 310006, China;
4. Construction Headquarters of Highway 31 North Extension Section in Shaoxing, Shaoxing 312000, China)

Abstract: The influence of the compaction period, cement content, and curing period on the strength of solidified soil was studied using an unconfined compressive strength test. The results show that a compaction period that is too long makes the solidified soil more easily compacted, but causes a loss of the cementing strength. According to mechanism analysis, it is found that the strength of the remolded solidified soil is related to the dry density of the sample, and a linear equation is fitted to test data. Based on the test results, it is recommended that solidified soil be used as soon as possible after mixing so as to make full use of cementation of cement. Otherwise, it is necessary to improve the degree of compaction in order to achieve the design requirements.

Key words: solidified compaction soil; remolded solidified soil; unconfined compressive strength; compaction period; cement content; curing period; dry density

固化土广泛应用于污染土治理、淤泥固化、软弱地基处理等工程中, 例如港口、航道的疏浚以及湖泊的清淤工程都会产生大量淤泥, 这些淤泥强度低、含水率高并且压缩性高^[1-2]。为了实现资源的再利用, 可以将淤泥进行固化处理, 处理后的固化淤泥强度高、变形小, 同时对污染物有稳定和包裹作用^[3]。

目前国内外学者开展了很多关于水泥固化的研究, 例如分析固化剂的类型、不同的配比、养护龄期对固化土强度及变形的影响。朱伟等^[4]通过对疏浚淤泥固化后的基本力学性质进行研究, 发现固化土的无侧限抗压强度与水泥掺量之间具有线性关系。汤怡新等^[5]通过大量的试验研究, 发现任意一种软质原料土都存在最小的水泥用量。然而在很多工程中, 固化淤泥从拌和到压实需要一段时间的放置和运输, 由于固化后的

收稿日期: 2015-12-24

基金项目: 水利部公益性行业科研专项(201401006); 水利部“948”项目(201435); 浙江省交通运输厅科技计划项目(2012H29, 2014H28)

作者简介: 赵子荣(1990—), 男, 安徽界首人, 硕士研究生, 主要从事软土地基研究。E-mail: 1558773703@qq.com

淤泥并不是立即使用,使淤泥的固化搅拌与浇筑施工在时间和空间上不能同步^[6],导致固化淤泥丧失了部分黏聚力。杨廷玉等^[7]通过对水泥固化土的不固结不排水三轴试验结果分析,发现水泥固化土抗剪强度的重要指标是黏聚力。黄英豪等^[8]通过对比水泥固化土和重塑固化土的无侧限抗压强度,得出重塑固化土的无侧限抗压强度有很大折减的结论。以上结果说明经过重塑后的水泥固化土强度与固化土强度不同,水泥土破碎的时间越晚,强度越低。佐藤厚子等^[9]通过对高炉矿渣水泥和石灰固化土试验,明确了固化土与击实土的无侧限抗压强度之间有一定的关系,并指出击实土体的黏聚力和内摩擦角可以用其无侧限抗压强度来表示。桂跃等^[10]通过分析不同配比生石灰淤泥材料化土土性与压实时间的关系,得出无侧限抗压强度随压实时间增大而增大,然而并没有考虑固化土压实后强度增长的问题。时田博之等^[11]通过在淤泥中加入水泥、石灰和专用固化剂的研究表明,击实土的强度同样可以满足工程设计的要求。由于固化压实土经过固化、破碎、碾压、填筑后,经过一段时间的养护,强度还会增长。本文基于工程中固化压实土的使用方法,分析不同的压实时间、养护龄期及水泥掺量对固化土强度的影响,得出压实时间对固化土强度的影响规律,分析了压实时间对固化土强度作用的机理,以供施工参考。

1 试验设计及过程

1.1 试验材料及方案设计

试验所用淤泥来自浙江温州,其具体的物理指标:含水率 67%,密度 1.63 g/cm^3 ,相对密度 2.76,液限 53.7%,塑限 28.2%,孔隙比 1.737。试验所用水泥为 32.5#普通硅酸盐水泥。

为模拟固化土放置和运输消耗的时间对其强度的影响,通过制作不同压实时间的无侧限试样,测试其相应龄期的无侧限抗压强度,研究固化土经过破碎、再养护后的强度变化规律。

其中,水泥掺量是指水泥的质量/湿土的质量,压实时间是指水泥土从拌和到制样时所用的时间。试验水泥掺量分别为 3%、5%、7% 和 9%,压实时间分别为 4 h、10 h、72 h 和 168 h,养护龄期分别为 7 d、14 d 和 28 d。试样共有 $4 \times 4 \times 3 = 48$ 种,每种试样设计 3 个平行试样。

1.2 制样方法及养护

首先,将淤泥的含水率调制到 67%,然后向调好的淤泥内分别加入 3%、5%、7% 和 9% 的水泥,搅拌均匀。将拌和好的水泥土用聚乙烯塑料袋包裹起来,置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度大于 90% 的养护箱,分别压实 4 h、10 h、3 d 和 7 d 后,再进行无侧限抗压强度试验的制样,控制试样的湿密度相同。按照(JTG E51—2009)《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》进行制样,试样直径为 50 mm,高为 50 mm。到了预定的压实时间后,将水泥土用切土刀剥成直径不大于 5 mm 的小块,分 3 层填入模具内,每层经振捣后再填筑下一层,最后将模具放入反力架的液压千斤顶上,静力脱模。制好后的试样用聚乙烯塑料袋包裹起来,置于 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、湿度大于 90% 的养护箱中养护 7 d、14 d、28 d。当养护时间达到试验设计值时,进行无侧限抗压强度试验。需要说明的是,应将水泥土破碎重塑前的压实时间算入试样龄期,保证当水泥掺量一样时,相同龄期内的水泥水化产物含量也保持一致,便于对比不同压实时间对固化土强度的影响。如图 1 所示,当 $t_1 = 0$ 时,即没有压实时间,制作的试样称为水泥固化土^[12];当 $t_1 < t_2$ 时,制作的试样称为固化压实土^[13];当 $t_1 = t_2$ 时,即破碎重塑后,立即测试其强度,制作的试样称为重塑固化土^[14]。本文主要研究的是压实时间对固化压实土的强度影响规律。



图1 试验步骤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of test steps

2 试验结果及分析

2.1 水泥掺量对无侧限抗压强度的影响

首先分析水泥掺量对其无侧限抗压强度的影响,如图 2 所示,随着水泥掺量的增加,各压实时间的固化土无侧限抗压强度也随之增加。

如图 2(a) 和图 2(c) 所示,压实时间 t 为 4 h、10 h 和 72 h 的固化土,7 d 和 28 d 龄期的无侧限抗压强度随着水泥掺量的增加呈近似线性增加。而从图 2(b) 可以看出, t 为 4 h、10 h 和 72 h 的固化土,随着水泥掺量的

增加,14 d龄期的无侧限抗压强度先增加较快后来增加较慢。以 t 为72 h的固化土为例,当水泥掺量由5%增加到7%时,无侧限抗压强度由311.6 kPa增加到654.8 kPa,增加了110%;当水泥掺量由7%增加到9%时,无侧限抗压强度由654.8 kPa增加到722 kPa,增加了10%。

如图2(a)和图2(b)所示, t 为4 h的固化土无侧限抗压强度曲线位于 t 为10 h的固化强度无侧限抗压强度曲线之上。而由图2(c)可以看出, t 为72 h,掺量为7%和9%的固化土无侧限抗压强度曲线位于最上方,其余依次是 t 为4 h、10 h、168 h的固化土。

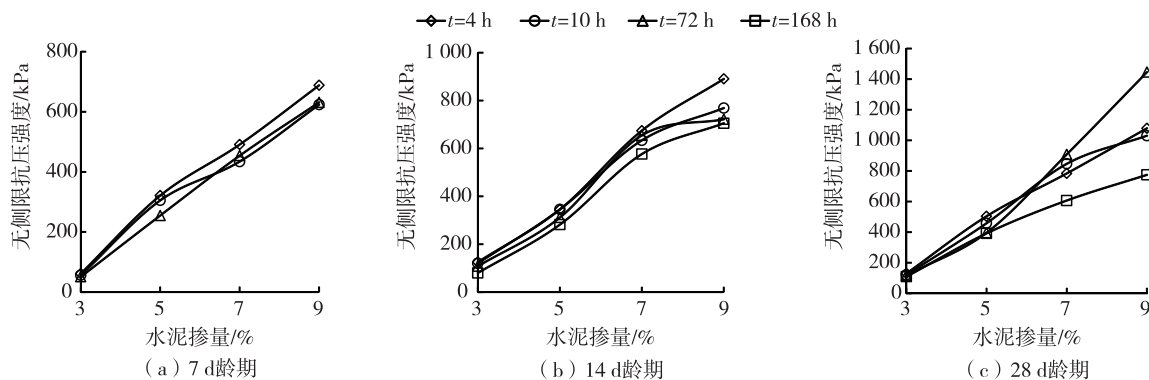


图2 水泥掺量与无侧限抗压强度的关系

Fig. 2 Relationship between cement content and unconfined compressive strength with different curing periods

2.2 龄期对无侧限抗压强度的影响

压实时间为4 h的固化压实土与常规制样方法(水泥固化土)最为贴近,以其为例,分析固化压实土无侧限抗压强度与龄期的关系。

如图3所示,固化压实土的强度随着养护时间的增加而增加,当水泥掺量 c 为3%时,随着养护时间的延长,14 d强度和28 d强度相差不大,固化压实土强度增加比较缓慢;当 c 为9%时,随着养护时间的增加,固化压实土强度增加较快,28 d强度为7 d强度的1.56倍。

2.3 压实时间对无侧限抗压强度的影响

如图4所示,固化土的无侧限抗压强度随着压实时间的增加而降低,然而不同水泥掺量的固化土强度受压实时间影响程度不同。

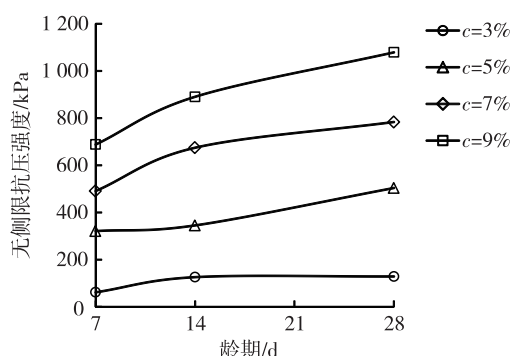


图3 龄期与无侧限抗压强度的关系

Fig. 3 Relationship between curing period and unconfined compressive strength

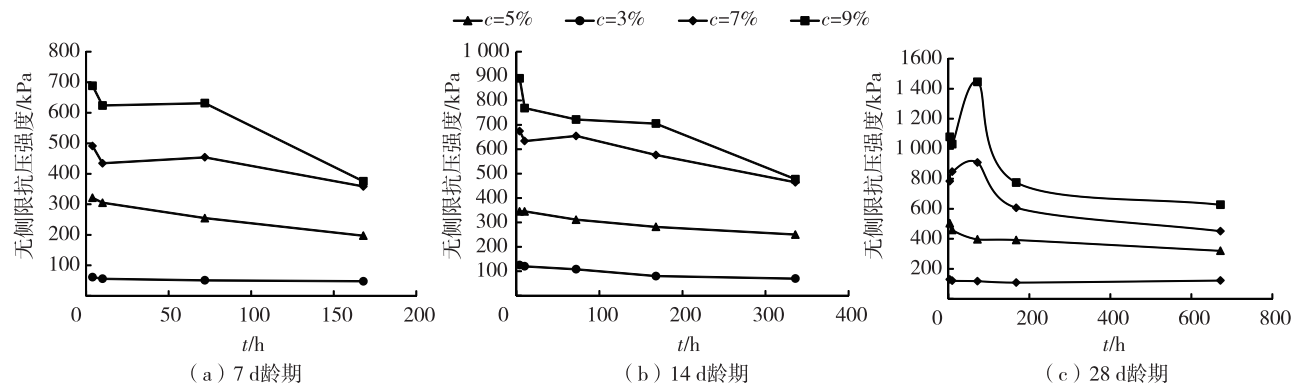


图4 无侧限抗压强度与压实时间的关系

Fig. 4 Relationship between compaction period and unconfined compressive strength with different curing periods

由图4(a)和图4(b)可知,当水泥掺量 c 为5%、7%和9%时,7 d和14 d龄期固化土的无侧限抗压强度随

着压实时间增加而降低。以 c 为 9%、7 d 龄期的固化土为例,当压实时间由 4 h 增加到 168 h 时,无侧限抗压强度由 688 kPa 下降到 375.1 kPa,下降了 45%。然而当水泥掺量较低时,随着压实时间增加,固化土无侧限抗压强度降低的幅度不高。以 c 为 3%、7 d 龄期的固化土为例,压实时间为 4 h 和 168 h 时的固化土,无侧限抗压强度分别为 61.4 kPa 和 47.6 kPa,下降了 22%。

由图 4(c)可知,对于 c 为 7%和 9%的固化土,随着压实时间的延长,固化土无侧限抗压强度先增加、后降低,且无侧限抗压强度在 72 h 时达到最大值。以 9%水泥掺量的固化土为例,压实时间由 4 h 增加到 72 h,无侧限抗压强度由 1079 kPa 增加到 1445.6 kPa,增加了 34%;当压实时间由 72 h 增加到 168 h 时,无侧限抗压强度由 1445.6 kPa 下降到 774.5 kPa,下降了 46%。这是由于水泥掺量较高,水化反应消耗的水分较多,试样更易于压实,干密度较大,使得强度达到最大值。

2.4 重塑固化土强度与干密度的关系

重塑固化土是拌和后的水泥土养护到相应龄期后,经破碎后立即制样,并测试其无侧限强度的试样。此时水泥水化反应产生的胶结作用被破坏,重塑固化土的强度主要是颗粒之间的孔隙填充,通过分析干密度与重塑固化土强度的关系,研究压实性与固化土强度的关系。如图 5 所示,重塑固化土的无侧限抗压强度随着干密度的增加而增加,呈线性关系 ($R^2 = 0.9652$)。重塑固化土的含水率较低,便于压实,使干密度增加,土体内部的孔隙减小,固化土强度增加。

$$q_u = 6828.9\rho_d - 6978.2$$

式中: q_u ——重塑固化土无侧限抗压强度; ρ_d ——重塑固化土的干密度。

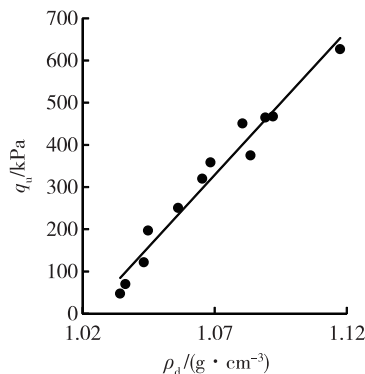


图 5 重塑固化土无侧限抗压强度与干密度的关系

Fig. 5 Relationship between dry density and unconfined compressive strength of remolded solidified soil

3 固化压实土无侧限抗压强度组成的机理分析

由以上分析可知,影响无侧限抗压强度的因素有龄期、水泥掺量和压实时间,这些因素通过影响固化土颗粒的填充和胶结起作用。随着水泥掺量的增加,养护龄期的延长,固化土的胶结强度越高。随着压实时间的增加,水化反应会消耗更多的孔隙水,使固化土含水率下降,便于压实,干密度会有所增加;但是重塑过程会导致固化土的结构破坏,使得胶结强度下降。

综上,水泥掺量和龄期与固化土强度具有正相关关系,而压实时间与固化土强度的关系较为复杂。一方面,随着压实时间的延长,原本起到胶结作用的水化产物被破碎,导致水泥水化产物的胶结作用减弱,使固化土的胶结强度降低;另一方面,由于压实时间增加,固化土含水率越低,便于压实,试样内部的孔隙变小,干密度随之增加,使固化土的强度增加。压实时间既会导致压实时间内水化产物的胶结强度丧失,又会使压实时间后的固化土便于压实。

如果在某个压实时间,重塑过程导致固化土损失的强度小于其便于压实而增加的强度,固化土强度则会达到峰值。如图 4(c)所示,当压实时间为 72 h 时,水泥掺量 7%、9%的固化土无侧限抗压强度达到峰值;水泥掺量 3%、5%的固化土无侧限抗压强度随着压实时间的增加而降低。对于高水泥掺量(本文 7%、9%)的固化土而言,水泥水化反应消耗的水分更多,土体更易压实,干密度更大;72 h 的压实时间相比于 28 d 龄期而言,重塑过程损失的胶结强度并不是很大,随着养护时间的增加,胶结强度还会增加。由于便于压实增加的强度大于重塑损失的压实时间内胶结强度,从而导致在压实时间为 72 h 时,固化土强度达到峰值。而对于低水泥掺量(本文为 3%、5%)的固化土而言,尽管随着压实时间的增加,固化土的干密度会增加,但是水泥水化产物的胶结作用是固化土的主要强度来源^[15-16],使固化土强度随压实时间的增加而降低。

4 结 论

a. 固化压实土的强度除受水泥掺量、养护龄期影响之外,还与其拌和后的压实时间有关系。试验结果

表明:水泥掺量和养护龄期与水泥固化土强度具有正相关的关系,而压实时间的延长一方面使得固化土便于压实,另一方面破碎重塑后又会损失压实时间内的胶结强度。

b. 压实时间越长,重塑损失的压实时间内的胶结强度也就越大,因此应避免造成压实时间过长,否则必须提高其压实度,才能达到设计强度。

c. 重塑固化土的无侧限抗压强度在一定范围内与干密度呈线性关系,填筑固化土时,可以通过选择合理的碾压方式,提高固化土的压实度,从而提高固化土的无侧限抗压强度。

参考文献:

- [1] 朱伟,张春雷,刘汉龙,等.疏浚泥处理再生资源技术的现状[J].环境科学与技术,2002,25(4):39-41.(ZHU Wei, ZHANG Chunlei, LIU Hanlong, et al. The status of dredged spoils utilization[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(4): 39-41. (in Chinese))
- [2] TANG Y X, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment[J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5): 129-143.
- [3] DUBIOS V, ABRIAKE N E, ZENTAR R, et al. The use of marine sediments as a pavement base material[J]. Waste Management, 2009, 29(2): 774-782.
- [4] 朱伟,张春雷,高玉峰,等.海洋疏浚淤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 Chunlei, GAO Yufeng, et al. Fundamental mechanical properties of solidified dredged marine sediment[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2005, 39(10): 1561-1565. (in Chinese))
- [5] 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 Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549-554. (in Chinese))
- [6] 黄英豪.固化淤泥的流动性及压实后力学性质[D].南京:河海大学,2011.
- [7] 杨廷玉,周宇,赵莹莹,等.水泥固化土强度特性试验研究[J].黑龙江工程学院学报,2012,26(3):6-9. (YANG Tingyu, ZHOU Yu, ZHAO Yingying, et al. Experiment study on strength characteristics of cement solidification soil [J]. Journal of Heilongjiang Institute of Technology, 2012, 26(3): 6-9. (in Chinese))
- [8] 黄英豪,董婵,关云飞.击实对固化淤泥物理力学性质的影响[J].岩土工程学报,2012,34(9):1728-1733. (HUANG Yinghao, DONG Chan, GUAN Yunfei. Effect of compaction on physical and mechanical properties of solidified dredged materials [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 34(9): 1728-1733. (in Chinese))
- [9] 佐藤厚子,西本聪,铃木辉之.固化破碎土的强度特性[R].北海道:第2回日中地盘シンポジウム,2005.
- [10] 桂跃,高玉峰,宋文智,等.高含水率疏浚淤泥生石灰材料化土压实时间内强度变化规律[J].河海大学学报(自然科学版),2010,38(2):186-190. (GUI Yue, GAO Yufeng, SONG Wenzhi, et al. Strength variation rules of filling soil improved from high-water-content dredged sludge with quicklime during preparation time [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(2): 186-190. (in Chinese))
- [11] 时田博之,桜井裕万,长谷国男.高含水不良土を材料とする固化破碎土による盛土施工[R].北海道:北海道技术研究发表会,2005.
- [12] CHIU C F, ZHU W, ZHANG C L. Yielding and shear behavior of cement-treated dredged materials[J]. Engineering Geology, 2009, 103(1/2): 1-12.
- [13] ZHU W, HUANG Y H, ZHANG C L, et al. Effect of curing time on mechanical behaviors of crushed solidified dredged material [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2009, 46(9): 1093-1099.
- [14] 黄英豪,朱伟,张春雷,等.固化淤泥重塑土力学性质及其强度来源[J].岩土力学,2009,30(5):1352-1356. (HUANG Yinghao, ZHU Wei, ZHANG Chunlei, et al. Mechanical characteristics and strength source of remolded solidified dredged material [J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(5): 1352-1356. (in Chinese))
- [15] ZHU W, ZHANG C L, CHIU A C F. Soil-water transfer mechanism for solidified dredged material [J]. Journal of Geotechnical and Geo environmental Engineering, 2007, 133(5): 588-598.
- [16] HORPILSUK S, MIURA N, NAGARAJ T S. Assessment of strength development in cement-admixed high water content clays with Abrams' law as a basis [J]. Geotechnique, 2003, 53(4): 439-444.