

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2010.02.013

高含水率疏浚淤泥生石灰材料化土闷料期内强度变化规律

桂 跃^{1,2},高玉峰^{1,2},宋文智^{1,2},蔡 超^{1,2}

(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.河海大学岩土工程科学研究所,江苏 南京 210098)

摘要 :研究了 3 种初始含水率疏浚淤泥添加不同比例生石灰,经不同时长的闷料期,其击实土的强度及变形变化规律.试验结果表明:击实生石灰淤泥材料化土的无侧限抗压强度随闷料期增大而增大,且强度增加速率和掺灰比有关,掺灰比越大,强度增加速率越大.对应不同初始含水率的疏浚淤泥,掺灰比存在临界点,该临界点是生石灰淤泥材料化土应力-应变关系由塑性向脆性转化的转折点.小于该掺灰比,生石灰淤泥材料化土单轴压缩下是理想弹塑性变形,大于该掺灰比,击实生石灰淤泥材料化土是脆性破坏变形.对于小于临界掺灰比的生石灰淤泥材料化土,延长闷料期,其击实土应力-应变关系有由塑性向脆性转化的趋势,但是改良效果缓慢;对于大于临界掺灰比的生石灰淤泥材料化土,延长闷料期,其击实土的强度有显著提高.实际工程中如果场地条件及工期允许,可以通过延长闷料期改善土性,从而减小掺灰比,以节省工程造价.

关键词 :疏浚淤泥;填土材料;闷料期;无侧限抗压强度

中图分类号 :TU441 文献标识码 :A 文章编号 :1000-1980(2010)02-0185-06

湖泊、港口及航道的疏浚清淤过程中会产生大量的疏浚淤泥^[1-2].疏浚淤泥含水率、黏粒含量均较高,排水性差,强度极低,很多淤泥还富含有机质,是工程上难以直接利用的一种特殊土.对于内陆产生的疏浚淤泥通常要设置堆场放置.由于疏浚淤泥体积巨大,渗透系数小,在自身重力作用下排水固结需要较长的时间,如果不加以妥善处理,就会长时间占用大量的土地,且存在环境污染隐患,因此近年来对疏浚淤泥的处理研究成为热点.采用添加一定比例生石灰的方法,将高含水率的疏浚淤泥处理成松散、可击实、有一定强度的工程填土材料,则该填土材料称之为生石灰淤泥材料化土.生石灰淤泥材料化土压实之后,与传统的石灰土一样,随着龄期增长,其抗压强度增大、变形减小.生石灰淤泥材料化土可以作为淤泥堆场的围堰、工程便道用土及堤防挡墙背后的填土材料等,也可作为海洋吹填等工程的堆载用土,可以加快吹填土的固结,并在吹填土表面形成硬壳层^[3].生石灰淤泥材料化处理不仅可以解决疏浚淤泥废弃对环境的危害问题,还可以生成新的工程填土资源,对于社会的可持续发展具有重要意义.

闷料期是从掺灰拌和到碾压等待的时间,是水泥土、石灰土等改良土研究中的重要问题.王宝田等^[4]采用室内击实试验研究了闷料期 6、8、10 d 对石灰改良膨胀土压实效果的影响,发现随着第一次掺灰到土体击实之间时间间隔的延长,石灰改良膨胀土最大干密度逐渐降低,而最优含水率则基本不变.因此为了使石灰改良膨胀土压实时达到更好的压实效果,应尽可能缩短从掺灰至碾压期间的的时间间隔.沙爱民等^[5]研究了掺有硫酸钠石灰稳定土的强度与体积变化,发现闷料时间的延长可以显著降低乃至完全消除石灰稳定土的体积膨胀量.

生石灰掺入高含水率淤泥中拌和后,会发生一系列化学反应,其中生石灰的消化反应数小时内完成^[6],而火山灰反应会持续数年以上^[7-8].随着反应时间的延长,生石灰淤泥材料化土的土性逐步改善.现场施工中常常会遇到生石灰淤泥材料化土经不同闷料期后的施工情况.闷料期的不同实际上是土中化学反应的时长不同,导致土的改良效果不同,因此研究闷料期对生石灰淤泥材料化土的土性影响具有实际意义.本文从应用性出发,系统地研究了高含水率疏浚淤泥在添加不同比例生石灰后,闷料期内在单轴作用下生石灰淤泥材料化土的强度及变形特性,明确了不同配比生石灰淤泥材料化土土性与闷料期的关系,有助于在工程实际中选择合适的压实施工时机.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

疏浚淤泥取至江苏淮安市白马湖疏浚淤泥吹填堆场,为高液限黏土,其基本物理性质指标为含水率 72.2% 密度为 1.38 t/m³ 相对密度 2.65 液限(落锥深度 17 mm) 6.7% 塑限 29.3/%,各粒组质量分数为砂粒 4.5% 粉粒 65.3% 黏粒 30.2%,有机质质量分数(重铬酸钾容量法)为 4.2%。试验用的生石灰是南京市麒麟镇麒麟石灰厂生产的磨细生石灰粉,其中有效 CaO + MgO 质量分数为 87.0% 筛余量 7%,属于一等钙质石灰。

加水搅拌配置不同初始含水率淤泥。本文疏浚淤泥初始含水率 ω_0 分别为 72.8% 80.2% 92.6%,掺灰比(石灰质量/湿土质量) $\times 100\%$ 分别为 3% 6% 9% 12% 15% 18% 21% 24%,相应闷料期为 1 d 3 d 7 d 14 d 28 d。

1.2 试验方法

土样制备过程如下:称取一定质量的淤泥,按设计好的掺灰比加入生石灰,倒入搅拌机搅拌 10 min,搅拌均匀后装入聚乙烯塑料袋中,为模拟现场情况,未将塑料袋封口,装样的塑料袋置于标准养护箱(温度(20 $\pm$ 2)℃、湿度 > 90%)中闷料,闷料 1 3 7 14 28 d 时分别测试生石灰淤泥材料化土的物理力学性质。

当生石灰淤泥材料化土闷料至相应的时长,采用轻型击实仪击实,以生石灰淤泥材料化土的击实干密度为控制指标称取一定质量的土样,取内径 5 cm、高度 13 cm 的试模筒及 2 个直径 5 cm、高 1.5 cm 的垫片,1 个垫片放入试模筒底部,将土样分层倒入试模筒中;另一块垫片放置顶端,采用静压法将土压实,脱模后即成为 $\Phi 5 \times 10$ cm 的圆柱体试样。试样制好后不养生,立即进行无侧限抗压强度试验,采用南京宁曦土壤仪器厂生产的 YSH-2 型石灰土无侧限压力仪,对不同试样组别分别测定 3 个平行试样,结果取其平均值。

2 闷料期内生石灰淤泥材料化土强度变化规律

无侧限抗压强度试验是评价改良土改良效果常用方法,试验操作简单方便。本文的无侧限抗压强度试验在完成压实制样脱模后数分钟内进行。无侧限抗压强度是击实生石灰淤泥材料化土黏聚力和内摩擦角的综合反应,体现了生石灰淤泥材料化土土性改良效果。

不同掺灰比的生石灰淤泥材料化土分别进行了闷料期为 1 3 7 14 28 d 的强度测试,结果如图 1 2 所示。

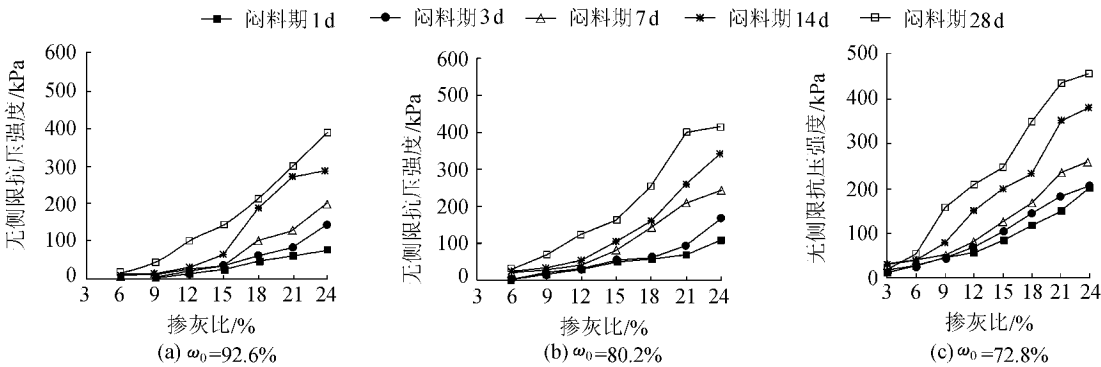


图 1 掺灰比与无侧限抗压强度关系

Fig. 1 Relationship between unconfined compression strength and lime content

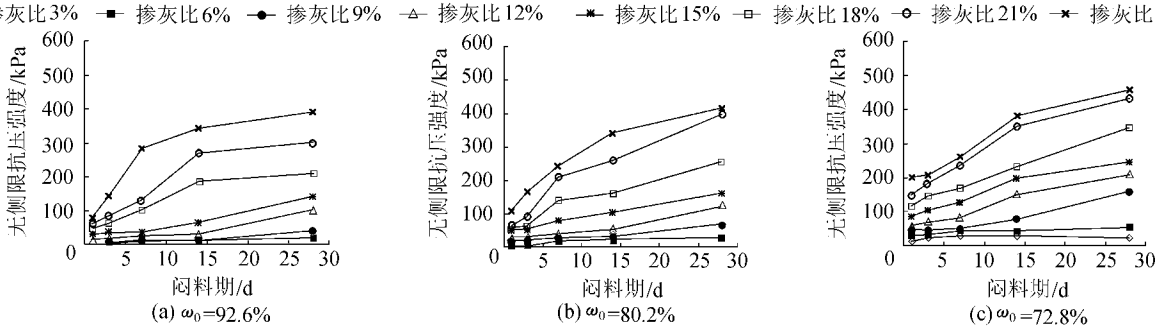


图 2 闷料期与无侧限抗压强度关系

Fig. 2 Relationship between unconfined compression strength and delay time

由图 1 2 分析可知,击实生石灰淤泥材料化土的无侧限抗压强度与掺灰比有关.同一初始含水率生石灰淤泥材料化土,掺灰比越大,其击实土的无侧限抗压强度越大,说明生石灰淤泥材料化土改良效果越显著;生石灰淤泥材料化土闷料期越长,其击实土的无侧限抗压强度越大.

闷料期过长无疑会增加周转时间,增大工程成本,所以实际工程中生石灰淤泥材料化土闷料期通常不会过长.现分析闷料期 7 d 内生石灰淤泥材料化土的无侧限抗压强度变化规律.不同掺灰比的生石灰淤泥材料化土,延长闷料期其无侧限抗压强度的增长率不同.当掺灰比小于一定比例时,闷料期延长,其无侧限抗压强度几乎不增加;当掺灰比大于该比例时,闷料期越长,其无侧限抗压强度越大,则称该掺灰比为临界掺灰比 a_0 .如 $\omega_0 = 92.6\%$ 时,临界掺灰比 a_0 可视为 15%; $\omega_0 = 80.2\%$ 时,临界掺灰比 a_0 可视为 12%; $\omega_0 = 72.8\%$ 时,临界掺灰比 a_0 可视为 9%.临界掺灰比 a_0 与淤泥初始含水率有较好的线性相关性,如图 3 所示.闷料期为 7 d 时,临界掺灰比 a_0 的击实生石灰淤泥材料化土无侧限抗压强度约为 45 kPa.

由以上分析可知,延长闷料期对掺灰比较大的生石灰淤泥材料化土的土性改善有显著的效果.闷料期越长,土性改良效果越好.当场地条件不允许闷料期过长时,为了获得较好土性的生石灰淤泥材料化土,可以增大掺灰比;如果场地条件及工期允许,闷料期越长,则材料化土土性改良效果越显著,从而减小掺灰比,节省工程造价.如 $\omega_0 = 72.8\%$,掺灰比 $a_c = 12\%$ 的生石灰淤泥材料化土,闷料期 7 d 的无侧限抗压强度为 148 kPa,而掺灰比 $a_c = 21\%$ 的生石灰淤泥材料化土,闷料期 1 d 的无侧限抗压强度为 140 kPa.

3 闷料期内生石灰淤泥材料化土应力-应变关系分析

3.1 掺灰比对生石灰淤泥材料化土应力-应变关系影响分析

取闷料期 7 d 时的生石灰淤泥材料化土无侧限抗压强度试验结果进行分析,比较同一闷料期下不同掺灰比生石灰淤泥材料化土应力-应变关系,如图 4 所示.

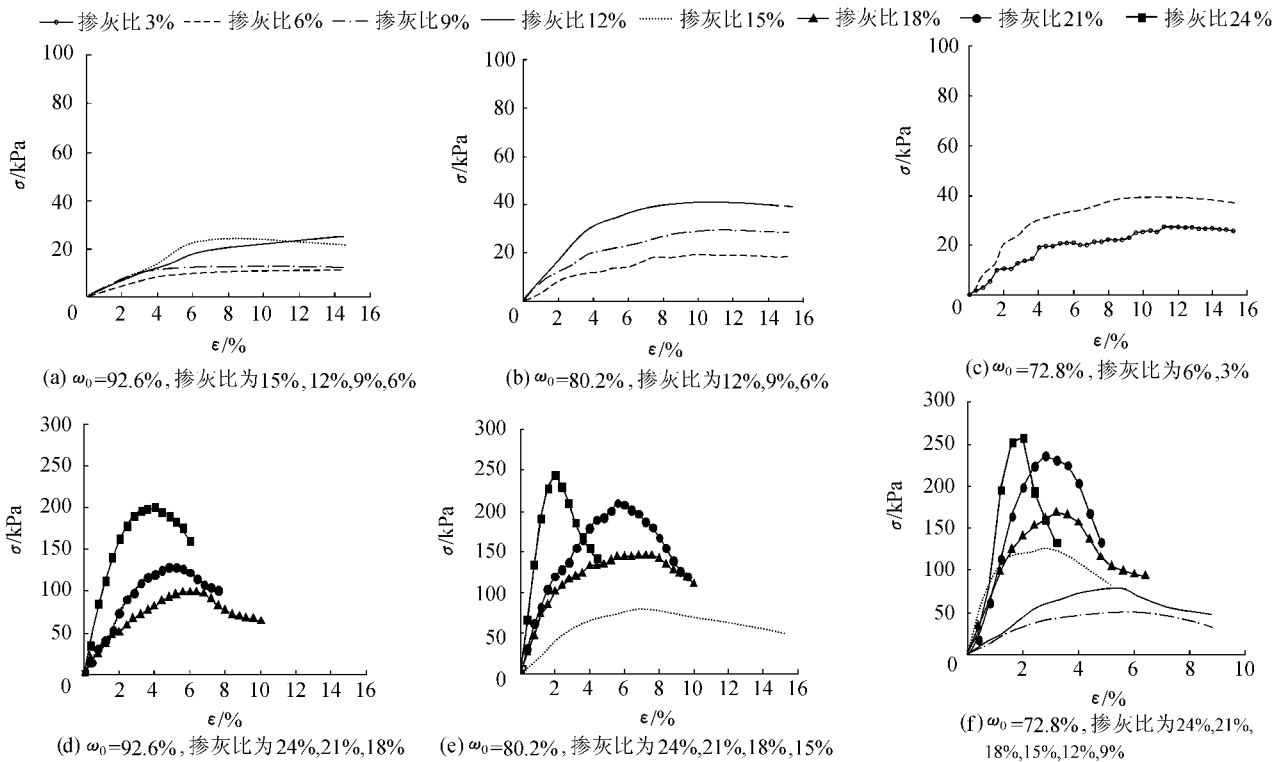


图 4 击实材料化土的应力-应变与掺灰比的关系曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of dredged sludge soil treated with different lime contents

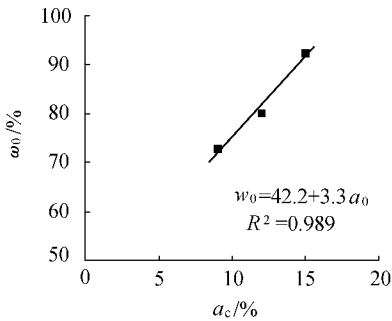


图 3 临界掺灰比与淤泥初始含水率关系

Fig. 3 Relationship between initial water content and critical lime content

对图 4 中的 $\sigma \sim \epsilon$ 曲线的特征进行分析可知,不同初始含水率、不同掺灰比的生石灰淤泥材料化土表现出 2 种压缩变形:理想弹塑性变形和脆性破坏变形.不同脆性破坏变形形式和掺灰比有关,掺灰比越小,无侧限抗压强度越小,破坏变形越大;掺灰比越大,无侧限抗压强度越大,破坏变形越小.2 种应力-应变关系形式的击实生石灰淤泥材料化土大致以掺灰比 a_0 为分界.

3.2 闷料期对生石灰淤泥材料化土应力-应变关系影响分析

取不同初始含水率临界掺灰比为 a_0 的生石灰淤泥材料化土,研究其无侧限抗压试验的应力-应变关系随闷料期的变化,如图 5 所示.

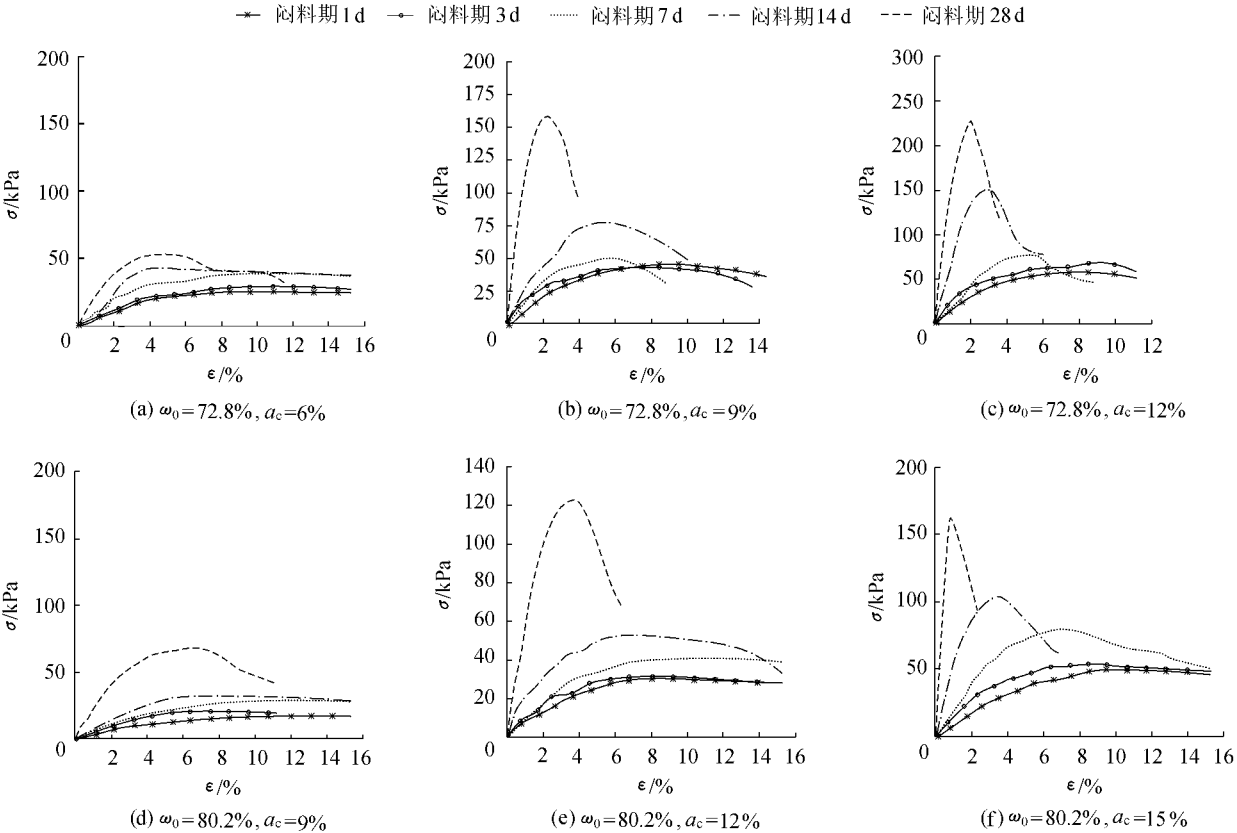


图 5 不同闷料期时生石灰淤泥材料化土应力-应变关系曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of dredged sludge soil treated with lime under different delay time

由图 5 分析可知,随着闷料期增长,生石灰淤泥材料化土的应力-应变曲线也由强度低、变形大的塑性状态转变为强度高、变形小的脆性状态,说明闷料期延长使生石灰淤泥材料化土的土性有所改善.掺灰比小于临界掺灰比的生石灰淤泥材料化土,其土性改善缓慢,要取得较理想的土性改良效果需要较长的闷料期,因此对于实际工程来说意义不大;对于大于临界掺灰比的生石灰淤泥材料化土,闷料期内土性改良效果显著.

4 淤泥材料化土抗压强度闷料期内增长机理

高含水率疏浚淤泥和生石灰搅拌完之后,发生一系列的化学反应,首先是生石灰的水化反应,反应本身及反应放热消耗部分自由水,反应生成的 Ca^{2+} 和淤泥黏土矿物上结合的 Na^+ 、 K^+ 离子进行交换吸附,使颗粒间吸附膜变薄,引起土颗粒的絮凝,这个反应在很短时间内基本完成^[9-11],一定程度上会使淤泥土颗粒团聚化成为土团聚体.这些土团聚体的形状是不规则的.击实生石灰淤泥材料化土的抗压强度主要来源于土团间的胶结、摩擦和咬合,其抗压强度及剪切破坏模式与土团聚体的土性有关.

当掺灰比较小时,生石灰淤泥材料化土的含水率较高,土团聚体粒径较大.土团聚体属于软塑状态,压实情况下发生变形,容易失去土团聚体的轮廓,除少量气体残余外土团聚体间的大孔隙基本排除,土骨架强度比较小,而且没有形成整体的结构性,宏观上表现出强度低、变形大的塑性特点,应力-应变关系是理想弹塑性的.当掺灰比较大时,生石灰淤泥材料化土的含水率相对较低,土团聚体脆硬性特征明显,粒径相对较小,

外力压实会对土团聚体间的大孔隙和土团聚体中的微孔隙产生压缩作用,击实生石灰淤泥材料化土团聚体间成为土骨架,宏观上表现出强度高、变形小的脆性特性,土的应力-应变关系是脆性破坏变形。生石灰淤泥材料化土的击实及剪切破坏示意模型如图 6 所示。

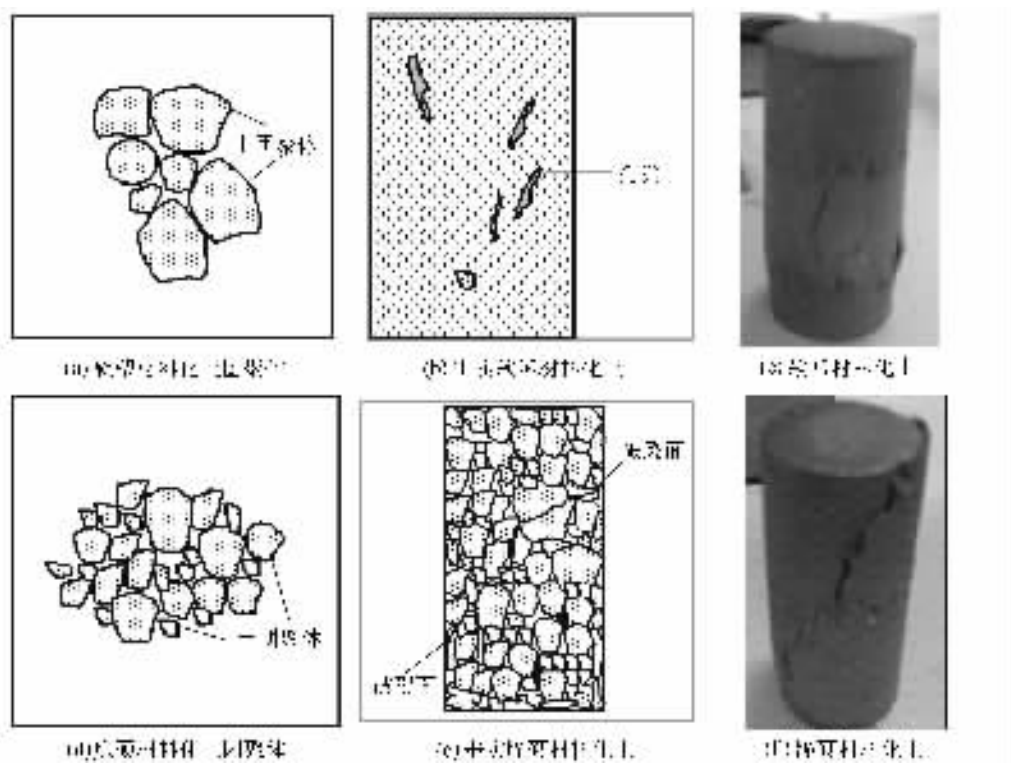


图 6 生石灰淤泥材料化土击实及剪切破坏示意图

Fig. 6 Compaction and shear failure of dredged sludge soil treated with lime

由试验结果可知,掺灰比的增大及闷料期的延长,均会影响击实生石灰淤泥材料化土的强度。当掺灰比较大时,生石灰的消化反应除去淤泥中大量水分,使土团聚体很快获得一定的脆硬性,因此击实生石灰淤泥材料化土不需要很长的闷料期即可获得较高的强度。随着闷料期延长,生石灰淤泥材料化土中消石灰发生碳化、结晶反应,和土中活性物质发生火山灰反应^[12-13],将土团聚体中的自由水转化为结构水、结合水。这些反应的速度、程度与温度、湿度有关^[14-15],生石灰淤泥材料化土团聚体土性的塑性减弱、脆性增强,导致土团聚体间摩擦和咬合作用的增强,宏观上无侧限抗压强度增大。单位体积土内石灰含量越大,生石灰淤泥材料化土的性质改良越显著。当生石灰淤泥材料化土掺灰比较小时,由于土团聚体中含水率高,虽经过一定的闷料期,生成的水化物质及胶凝物不足以使土颗粒结合至较牢固,宏观上土性得不到有效的改善,所以在闷料期内强度变化不大,因此单纯延长闷料期产生的效果不明显,现场还需要采取摊铺晾晒等辅助手段使水分减少。

5 结 论

a. 对应不同初始含水率的疏浚淤泥掺灰比存在临界点,是生石灰淤泥材料化土应力-应变关系由塑性向脆性转化的转折点。小于该掺灰比的生石灰淤泥材料化土在单轴压缩下是理想弹塑性变形;大于该掺灰比的击实生石灰淤泥材料化土是脆性破坏变形。

b. 随着闷料期的延长,对于小于临界掺灰比的生石灰淤泥材料化土,虽然击实土应力-应变关系有由塑性向脆性转化的趋势,但单纯采用增加闷料期的方法效果不明显;对于大于临界掺灰比的生石灰淤泥材料化土,其击实土的强度有显著提高。实际工程中如果场地条件及工期允许,可以通过延长闷料期,从而减小掺灰比以节省工程造价。

参考文献:

[1] DETZNER H D ,SCHRAMM W ,DOING U ,et al. New technology of mechanical treatment of dredged material from Hamburg harbour[J].

Water Science and Technology ,1998 ,37 :337.

- [2] FORSTNER U ,CALMANO D W. Characterisation of dredged materials[J]. Water Science and Technology ,1998 ,38 :149.
- [3] 张铁军.高含水率疏浚淤泥材料化处理技术研究[D].南京 :东南大学 ,2007.
- [4] 王宝田 张福海.膨胀土的改良技术与工程应用[M].北京 :科学出版社 ,2008.
- [5] 沙爱民 ,许永明 ,刘文锁 ,等.掺有硫酸钠石灰类稳定土的强度与体积变化[J].岩土工程学报 ,1998 ,20(1) :34-38.(SHA Ai-min ,XU Yong-ming ,LIU Wen-suo ,et al. Strength and volume change of lime stabilized soils with sodium sulphat[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering ,1998 ,20(1) :34-38.(in Chinese))
- [6] 魏金照 ,刘巽伯 ,孙丽玲.胶凝材料——水泥、石灰、石膏的生产和性能[M].上海 :同济大学出版社 ,1990 :40-45.
- [7] BELL F. Lime stabilisation of clay soil[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment ,1989 ,39(1) :67-74.
- [8] CHRISTOPHER R R ,JASPERSE B H. Deep soil mixing at the Jackson lake dam[J]. ASCE Geotechnical and Construction Divisions Special Conference ,1989(5) :25-29.
- [9] BOARDMAN D I ,GLENDINNING S ,ROGERS C D F. Development of stabilization and solidification in lime-clay mixes[J]. Geotechnique ,2001 ,51(1) :533-543.
- [10] RAJASEKARAN G ,RAO S N. Lime migration studies in marine clay[J]. Ocean Engineering ,1996 ,23(4) :325-355.
- [11] 梅淑贞.灰土材料的硬化机理及其性能研究[J].水利学报 ,1989(5) :47-53.(MEI Shu-zhen. Study of the harden mechanical and property of lime treated soil[J]. Journal of Hydraulic Engineering ,1989(5) :47-53.(in Chinese))
- [12] GUNAY Y ,SARI D ,CETIN M ,et al. Impact of cyclic wetting-drying on swelling behavior of lime-stabilized soil[J]. Building and Environment ,2007 ,42(2) :681-688.
- [13] RAJASEKARAN G ,RAO S N. Permeability characteristics of lime treated marine clay[J]. Ocean Engineering ,2002 ,29(2) :113-127.
- [14] GEORGE S Z ,PONNIAH D A ,LITTLE J A. Effect of temperature on lime-soil stabilization[J]. Construction and Building Materials ,1992 ,6(4) :247-252.
- [15] ROJAS M F ,CABTETA J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin-lime-water system[J]. Cement and Concrete Research ,2002 ,32(1) :133-138.

Strength variation rules of filling soil improved from high-water-content dredged sludge with quicklime during delay time

GUI Yue^{1,2} , GAO Yu-feng^{1,2} , SONG Wen-zhi^{1,2} , CAI Chao^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering ,
Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Geotechnical Research Institute , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : The strength and deformation variation rules of the filling soils improved from 3 kinds of high-water-content dredged sludge with lime treated with different initial water contents and delay time were studied. The experimental results indicate that the unconfined compressive strength of the compacted soil increases with the increase of the delay time. The increase rate relates to the lime content. The larger the lime content , the higher the increase rate of the unconfined compressive strength. As for the dredged sludge with different initial water contents , there is a critical lime content for the mixing proportion , which is the turning point of the soil from the stress-strain relationship to the plastic-brittle one. The soil with a mixing proportion smaller than the critical lime content under the uniaxial compression deformation exhibits ideal elastic-plastic deformation , and the compacted soil with a mixing proportion larger than the critical lime content exhibits brittle failure deformation. As for the former , if the delay time extends , the stress-strain relationship of the compacted soil will show a tendency from plasticity to brittleness and have slow conversion efficiency. As for the latter , if the delay time extends , the strength of the compacted soil will have a significant increase. In the engineering practices , if the site conditions and the construction period are allowable , the delay time should be extended so as to improve the soil properties and to reduce the lime content and to save project cost.

Key words : dredged sediment ; filling material ; delay time ; unconfined compressive strength