

文章编号: 1673-9469(2019)04-0065-07

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.04.011

## 淤泥减水后淤泥海砂混合料固化试验研究

谢康<sup>1,2</sup>, 丰土根<sup>1,2\*</sup>

(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 江苏省岩土工程技术工程研究中心, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 为了研究物理力学性质接近工程要求的淤泥海砂掺合比, 首先通过晾晒及掺入生石灰的方式对淤泥进行减水, 找到易于破碎均匀的含水率, 再按照不同质量比掺合且依据不同的试验规定进行制样, 设计不同的养护龄期样品。在相对应龄期通过直剪试验、压缩试验、无侧限抗压强度试验以及渗透试验来甄选适合于工程实际的掺合比。结果表明: 海砂与石灰土的掺合比为 1:2 时, 黏聚力基本达到峰值, 内摩擦角随石灰土比重增加而减小, 养护 28 d 后混合料接近低压缩性土, 也满足对渗透要求低的工程。

**关键词:** 淤泥减水; 直剪试验; 无侧限抗压强度试验; 渗透特性试验

**中图分类号:** U654

**文献标识码:** B

## Experimental Study on Solidification of Silt and Sea Sand Mixture after Water Reduction of Silt

XIE Kang<sup>1,2</sup>, FENG Tugen<sup>1,2\*</sup>

(1. Key Laboratory of Geomechanics and Embankment Engineering, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Geotechnical Engineering Research Center of Jiangsu Province, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

**Abstract:** In the sea embankment filling project, in order to find out the suitable mixing ratio of silt and sea sand, The methods of drying and adding quicklime was used to reduce the water content of the silt, and finds the moisture content which is easy to be broken and even. According to different quality ratio and different test regulations, samples are prepared, and different curing age is designed. In the corresponding age, direct shear test, compression test, unconfined compressive strength test and penetration test are used to select the appropriate mixing ratio for the actual project. The results show that the cohesion basically reaches the peak value, when the mixing ratio of sea sand and lime soil is 1:2, and the internal friction angle decreases with the increase of the proportion of lime soil. After curing for 28 days, it is close to the low compressibility soil, which also meets the engineering of low permeability requirements.

**Key words:** mud water reduction; direct shear test; unconfined compressive strength test; permeability test

福建省位于中国东南沿海, 背山面海, 山地多平地少, 有 3 752 km 的海岸线。沿海海堤多采用山土、砂性土填筑, 而沿海地区山土、砂性土比较缺乏, 若从内陆运输则会导致工程造价高、工期长。

根据相关调查显示我国沿海地区海砂储量较为丰富, 但无黏聚力砂土路堤在长期风浪荷载作用下易失稳, 补救较困难<sup>[1]</sup>。又由于沿海地区淤泥储量丰富, 适当配比的淤泥掺海砂理论上可用于海堤填筑。

收稿日期: 2019-10-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51009054); 教育部科学技术研究重点项目(109077); 江苏省科学基金资助项目(BK2010513); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014B04914)

作者简介: 谢康(1996-), 男, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 从事岩土工程方面的研究。\* 通讯作者: 丰土根(1975-), 男, 浙江金华人, 博士, 日本名古屋工业大学博士后, 教授, 硕士生导师, 主要从事土动力学与工程抗震、深海岩土工程地下空间开发、软土地基处理等方面的研究。

在利用石灰对土进行固化方面,国内外的学者们做了很多研究,如桂跃等<sup>[2-3]</sup>通过试验研究石灰固化土不同龄期的强度,并探究采用石灰固化土作为工程填筑材料的工程可行性;张丽华等<sup>[4]</sup>通过采用石灰及粉煤灰对高含水率淤泥进行固化,探究其强度特性、压缩性能及渗透性能的变化规律;王保田等<sup>[5]</sup>认为使用生石灰可以有效降低固化土的含水率,使固化土颗粒有效地分散并团聚呈团粒状,且增加闷料时间可以有效提高固化效果;Christopher等<sup>[6]</sup>采用石灰等无机材料对淤泥进行固化研究,探究其强度的变化规律。本研究以晾晒减水结合生石灰固化来找到让石灰土易于破碎均匀的含水率。本文主要是在对比分析中,找出最佳的固化剂及固化剂掺量,不仅满足填筑需求,同时尽可能地节约固化成本。

## 1 试验内容

### 1.1 试验材料

材料采用的是从福建省琅岐岛取得淤泥和海砂,淤泥土初始含水率高,压缩性高,不能直接作为工程填料。因此,拟先降低淤泥含水率,再与海砂进行掺和。通过向淤泥中掺入生石灰降低淤泥含水率,并结合石灰的砂化效果晾晒减水,找到易于均匀破碎的含水率,将破碎的掺灰土与海砂进行均匀拌和。考虑经济效益,石灰掺量采用3%、5%、7%、9%四种掺量。

### 1.2 淤泥掺灰减水

为防止人工搅拌带来的误差,分别将各桶中的淤泥与过2 mm筛的石灰放入搅拌器中,低速搅拌3 min后装入试验桶进行闷料。淤泥的掺灰状态如图1所示。

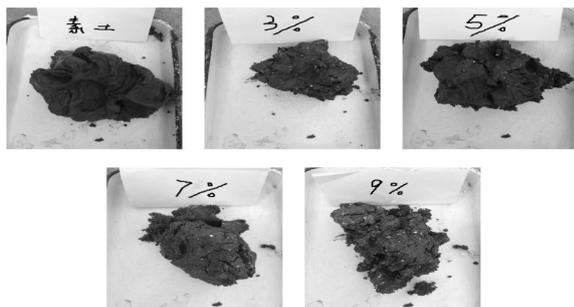


图1 不同掺灰量石灰土的出现状态

Fig.1 Presentation of silt with different lime content

### 1.3 淤泥晾晒减水

试验期间正值高温天气,故晾晒持续时间较短,期间平均最高、最低温度为36℃和28℃,风力达到3~5级,晾晒天气情况见表1。在晾晒试验前,按试验设计在淤泥中掺入不同比例的生石灰闷料,然后将不同石灰掺量的石灰土分别倒入桶中并搬到室外进行晾晒减水处理,晾晒期间不对石灰土进行翻拌,记录在不翻拌的情况下石灰土含水率的变化情况。由于晾晒时淤泥各个部位含水率不同,含水率应取淤泥上部含水率、中部含水率与底部含水率的平均值。

表1 晾晒期间天气情况

Tab.1 Weather conditions during air-drying

日期	最高温度 /℃	最低温度 /℃	天气	风力
7-20	35	28	多云	西南风4~5级
7-21	35	28	多云-晴	西南风4~5级
7-22	36	28	多云-晴	南风4~5级
7-23	37	29	晴	西南风4~5级
7-24	38	28	多云-晴	西南风3~4级
7-25	38	29	晴	南风3~4级
7-26	38	30	晴	西南风3~4级
7-27	37	29	多云-晴	西南风3~4级
7-28	38	29	多云-晴	西南风3~4级
7-29	38	29	多云-晴	西南风3~4级

## 2 试验结果分析

### 2.1 闷料时间对不同掺灰量石灰土含水率变化影响

为揭示闷料时间与掺灰量对石灰土含水率变化的影响,对四种不同掺量的石灰土进行闷料处理,设计时间分别为1 d、3 d、5 d、7 d、14 d、28 d。不同掺量石灰土的含水率变化与闷料时间的关系曲线如图2所示,不同闷料时间石灰土含水率与掺灰量的关系如图3所示。

从图2、图3中可见,初始含水率为63%左右的试验淤泥,随着石灰掺量的增加,含水率降低的幅度越来越大。这主要是由于生石灰与淤泥中的水分立即发生消化反应。同时,从图2可见,闷料时间对石灰土含水率变化的影响很小,同一种石灰掺量闷料14 d与闷料28 d石灰土的含水率相差1%左右,可知采用闷料降低含水率显然不理想,故闷料处理后可考虑采用晾晒来降低土料含水率。

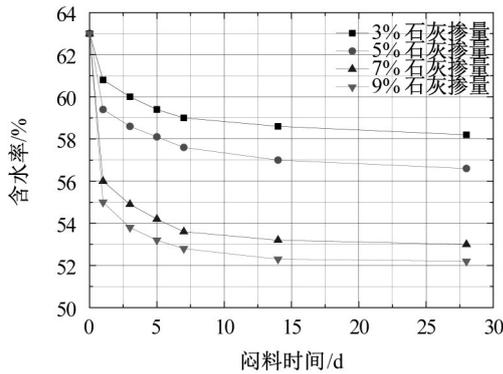


图2 不同掺灰量石灰土含水率与闷料时间关系曲线  
Fig.2 Curve of relationship between moisture content of silt with different lime content and stuffing time

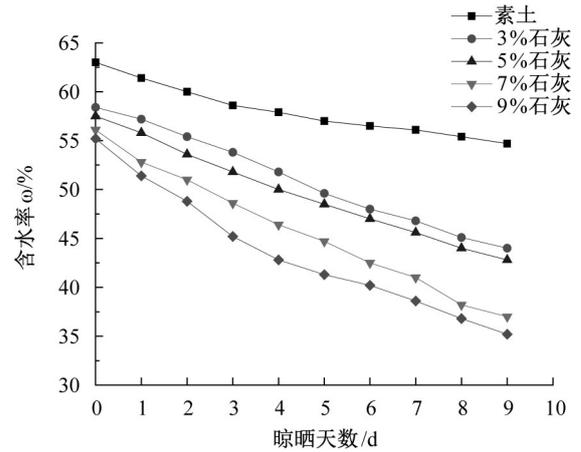


图4 不翻拌情况下石灰土含水率变化曲线  
Fig.4 Change curve of moisture content of silt without Flipping

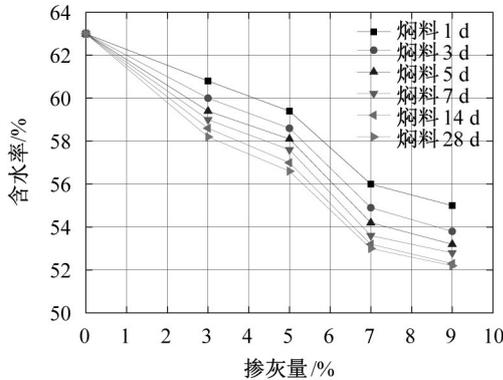


图3 不同闷料时间石灰土含水率、掺灰量的关系曲线  
Fig.3 Curve of relationship between moisture content of silt and lime content at different stuffing time

## 2.2 晾晒翻拌情况对石灰土含水率变化影响

### 2.2.1 不翻拌情况下不同掺灰量石灰土含水率变化情况

从图4可见，在不翻拌的情况下石灰土与素土的含水率都随着晾晒时间的增加而降低，但是降低的幅度有所不同；素土的含水率降低的幅度最小，这由于素土的渗透性小，晾晒时素土表面还会形成一层硬壳阻碍水分蒸发。而石灰土由于石灰的砂化效果使其土粒间孔隙增大，增大土体与空气接触的面积，导致水分蒸发速度快，含水率降低较快；同时从图中曲线可见，随晾晒时间增加，各掺量的石灰土的含水率变化幅度基本保持一致，说明在晾晒过程中在不翻拌土体情况下，增加石灰掺量对含水率的影响并不大。

### 2.2.2 不同翻拌次数的情况下石灰土含水率变化规律

试验土在晾晒时，对土料进行翻拌，将土团内部土体暴露在空气中。图5是不同翻拌次数下4种石灰掺量的石灰土含水率随时间变化的关系曲线。

从图5中可见，在不同翻拌次数的情况下，

石灰土的含水率变化幅度明显不同，不翻拌的情况下石灰土的含水率变化幅度明显要小于一天一次和两天一次翻拌的情况。而且两天翻拌一次与一天翻拌一次的石灰土的含水率相比不翻拌的情况下相差10%以上，这说明在晾晒的过程中采用机械翻拌明显提高减水效率，达到缩短工期的效果。

为了解掺灰量对晾晒过程中含水率的影响，取不同掺灰量土料两天翻拌一次情况下含水率变化进行分析，两天翻拌一次情况下不同掺灰量土料含水率变化情况如图6。

可见，两天翻拌一次的情况下，晾晒期间掺量为7%与9%的土料含水率明显比掺量为3%与5%的土料含水率降低速度快，这主要是由于石灰的砂化效果引起的，石灰掺量3%与5%对土料砂化效果相当，且砂化效果不明显，土团内部的含水率降低速度较慢；而掺量为7%与9%的土料破碎较明显，含水率降低速度明显加快。但随着晾晒继续进行，各掺灰量土料都很破碎，含水率降低速度基本保持一致。说明在对土料晾晒减水的过程中，结合石灰的砂化效果与机械的翻拌可以很好地提高减水效率，石灰掺量在应选择7%或者高于7%时晾晒减水效果明显。

## 2.3 石灰土的晾晒破碎情况

随着晾晒时间的增加，土料的含水率逐渐降低，土料也越来越破碎，对土块施加破碎力进行破碎后，石灰掺量为3%与5%的破碎土料破碎效果差，而掺量为7%与9%的土料施加破碎力后土料破碎较均匀。对此时各掺量的石灰土施加同一破碎力后进行筛分，

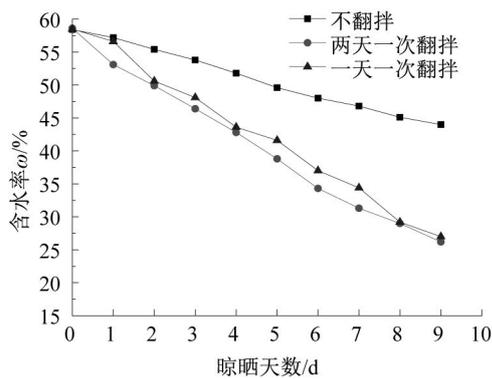


图 (a)3% 石灰掺量

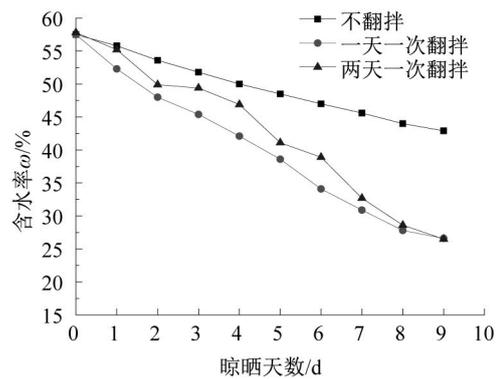


图 (b)5% 石灰掺量

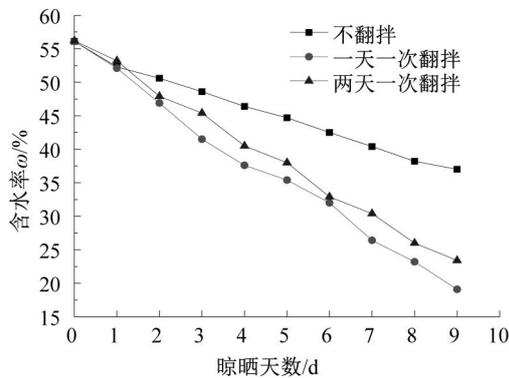


图 (c)7% 石灰掺量

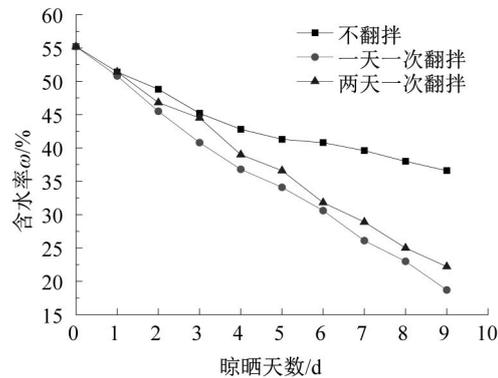


图 (d)9% 石灰掺量

图 5 不同石灰掺量含水率变化与晾晒天数的关系曲线

Fig.5 The relationship between the change of moisture content of different lime content and the days of drying

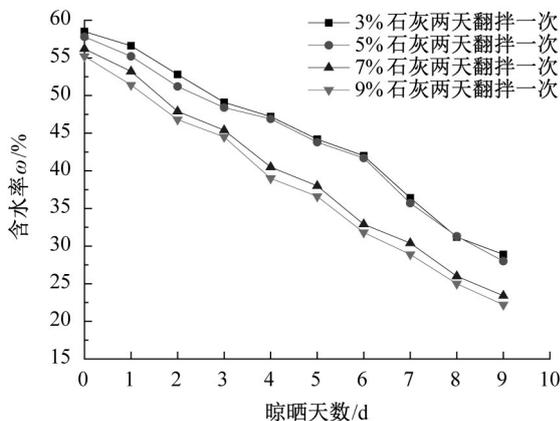


图 6 不同掺量的石灰土含水率随时间变化的关系曲线  
Fig.6 Relation Curve of Water Content of Limestone with Time in Different Dosage

按照规定的试验方法将晾晒试验土放入依次叠好的最上面一层筛中, 利用振筛机将盛有土料的筛子充分振动, 称量出留在各级筛子上土颗粒的质量, 按照下式 (1) 计算小于某土粒粒径的土粒含量百分数。

$$X = \frac{m_i}{m} \times 100 \quad (1)$$

式中:  $m_i$ 、 $m$  分别为小于某粒径的土粒质量及土料的总质量, g。

石灰在稳定基层施工要求中, 对于人工搅拌石灰土, 规定将土预先破碎, 并过 20 mm 筛, 由于本次晾晒的破碎状态没有固定的评价标准, 根据土块的破碎情况, 决定选用土料通过 10 mm 筛的通过率大小作为土料破碎情况的好坏的判别标准。土粒通过率与孔径的关系曲线如图 7 示。土粒通过 10 mm 孔径的通过率结果见表 2。

从图 7 看出, 土粒的粒径大小与石灰掺量有关, 土粒通过小孔径的通过率随掺灰量增大而增大。同时从表 2 可知, 石灰掺量为 7%、9% 时, 土料已经

表 2 土粒过 10 mm 筛通过率

Tab.2 Screening pass rate of soil particles passing 10 mm

石灰掺量 /%	含水率 /%	10 mm 孔径通过率 /%
3	46.4	41.6
5	45.4	47.8
7	41.5	67.0
9	40.8	73.1

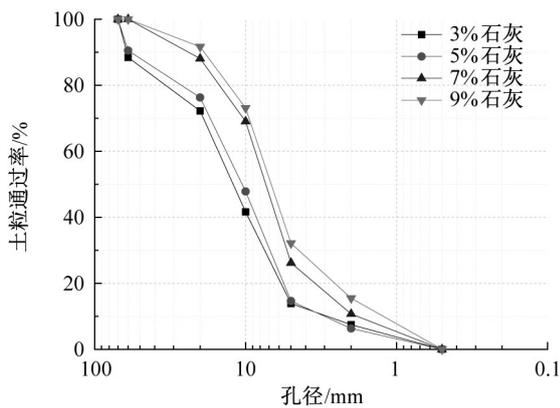


图7 不同掺量晾晒土的土粒通过率、孔径关系曲线  
Fig.7 Curves of the relationship between the particle trafficability and pore size of air-dried soil with different dosages

很破碎，9% 掺量的土粒通过 10 mm 孔径筛的通过率仅比 7% 掺量的通过率高了 6.1%，可见两种掺量的石灰土破碎情况相当，均可以与海砂混合均匀。考虑成本问题，推荐石灰掺量为 7% 的土料进行晾晒减水处理，将含水率降低到 41% 左右。淤泥中掺入 7% 的生石灰闷料 3 d 后进行晾晒处理，含水率降至 41% 左右易破碎均匀，将掺灰土破碎后，将海砂与掺灰土按照表 3 的掺和比混合在一起，以混合料的形式进行室内试验。不同掺和比混合料制样干密度见表 3。

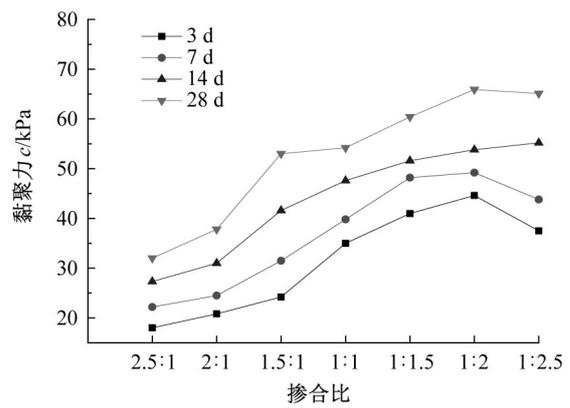
表 3 不同掺和比混合料制样干密度

Tab.3 Dry density of mixtures with different mixture ratios

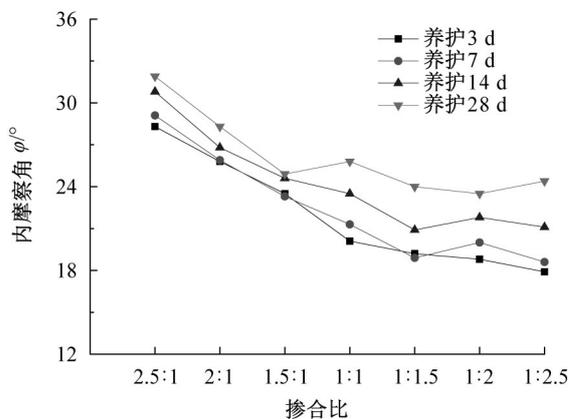
掺和比	2.5:1	2:1	1.5:1	1:1	1:1.5	1:2	1:2.5
干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.66	1.67	1.69	1.67	1.67	1.57	1.53

### 2.4 掺和比和养护天数对直剪强度参数的影响

土的抗剪强度指标是表征地基承载力与稳定性的重要参数，可通过分析抗剪强度参数  $c$  值，得到土的强度特性，寻找接近工程实际指标的掺和比。图 8 体现海砂石灰土的掺和比对混合料直剪强度参数的影响。从图中明显看出，随着淤泥所占比重的增加，混合料的黏聚力基本呈现增加的趋势，主要是因为海砂自身没有黏聚力，海砂占的比重越大，固化料的黏聚力越小，但并不是一定的，当掺和比由 1:2 到 1:2.5 时黏聚力有一定的减小，这可能是由于海砂的掺入量较少，导致混合料的密实程度减小，故固化料的黏聚力有一定程度的减小。内摩擦



(a) 黏聚力变化



(b) 内摩擦角变化

图 8 直剪强度参数随掺和比变化曲线

Fig.8 Curve of direct shear strength parameters with mixing ratio

角随着石灰土增加而减小，因为海砂表面粗糙，棱角多密实度大，其内摩擦角大于掺灰土，随着混合料中海砂含量减少，内摩擦角减小。

### 2.5 无侧限抗压强度试验结果分析

压缩变形特性是土体性质的重要方面，将海砂石灰土混合料作为工程应用填土，必须考虑其沉降变形特性。工程中常采用 100 ~ 200 kPa 压力区间对应的压缩系数  $a_{1-2}$  评价土的压缩性，当  $a_{1-2} < 0.1 \text{ MPa}^{-1}$  时为低压缩性土， $0.1 \text{ MPa}^{-1} < a_{1-2} < 0.5 \text{ MPa}^{-1}$  时为中压缩性土， $a_{1-2} > 0.5 \text{ MPa}^{-1}$  时属于高压缩性土。

从图 10 可见，试样中海砂含量越高，其  $e-p$  曲线越平缓，通过对比图中掺和比为 2.5:1 与 1:2.5 两个极端比例可以得出，由于混合料中海砂含量较高，提高了混合料骨架强度，抵抗变形的能力增强。对比两图，同一掺和比的  $e-p$  曲线，养护 28 d 龄期的明显比养护 14 d 龄期的要平缓，说明养护 28 d 的试样比养护 14 d 的试样沉降量低，抵抗变形的能力更强，

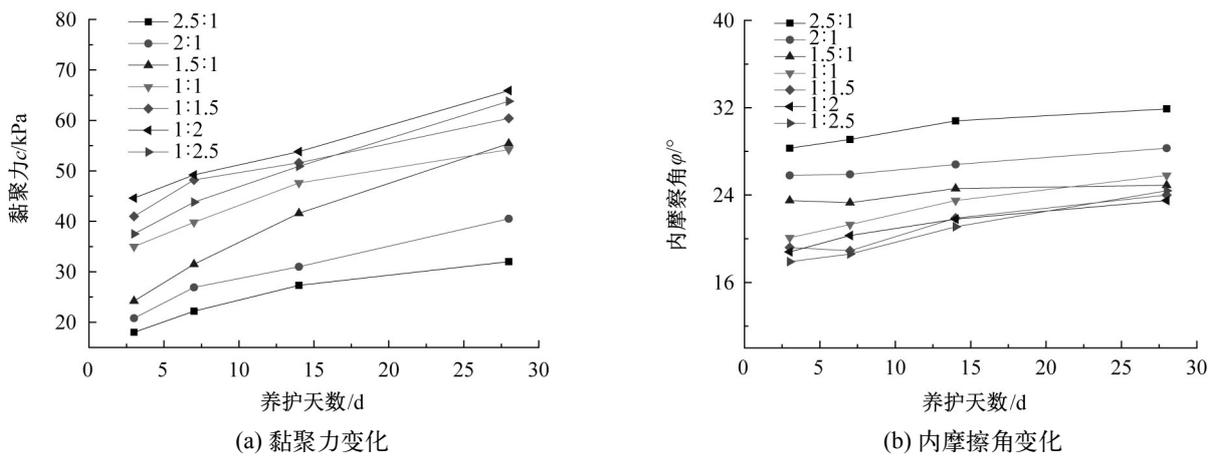


图9 直剪强度参数随养护天数变化曲线

Fig.9 Curve of direct shear strength parameters with number of maintenance days

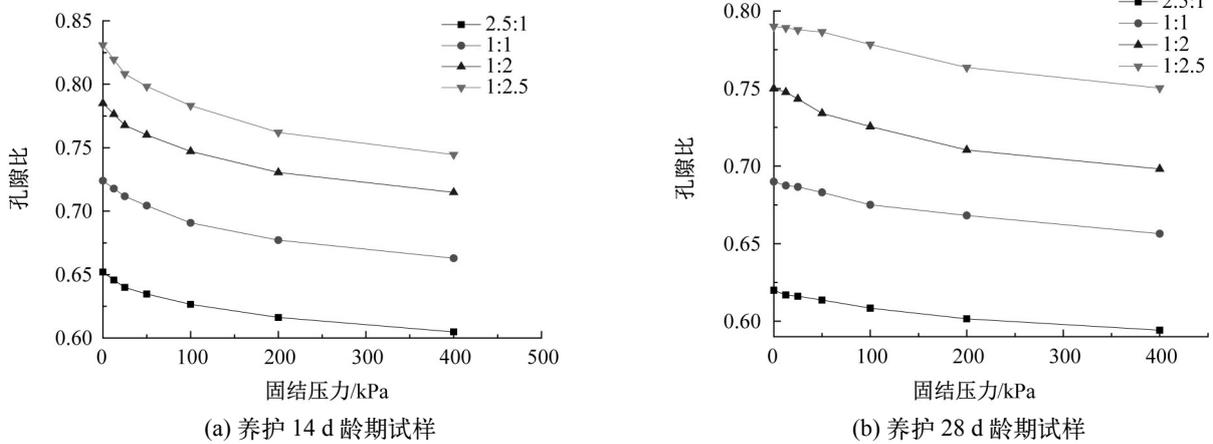


图10 不同养护龄期试样的 e-p 曲线

Fig.10 e-p curve of samples with different curing ages

表4 不同养护龄期下不同掺合比试样压缩系数  
 Tab.4 Compression coefficient of samples with different mixing ratio under different curing age

掺合比	2.5:1	1:1	1:2	1:2.5
养护 14 d 的压缩系数 /MPa <sup>-1</sup>	0.101	0.134	0.182	0.213
养护 28 d 的压缩系数 /MPa <sup>-1</sup>	0.069	0.094	0.158	0.152

由于随着养护时间的增加,石灰的固化产物相互联接在一起形成了比原来的土骨架更稳定的结构。

### 2.6 渗透特性试验结果分析

不同工程对材料的渗透性有所不同,渗透系数对混合料的渗透特性具有指导调节作用。试验前将渗透试样抽水饱和和 24 h,试样掺和后第 1 d 各掺合比混合料的渗透系数如图 11 所示。各掺合比不同养

护天数的渗透系数见表 5。

从图 11 可见,掺合比为 2.5:1 的混合料为  $8.256 \times 10^{-4}$  cm/s,随着混合料中石灰土的含量增加,混合料的渗透系数逐渐减小,直到掺合比为 1:2.5 时,渗透系数减小为  $1.68 \times 10^{-5}$  cm/s,两者渗透系

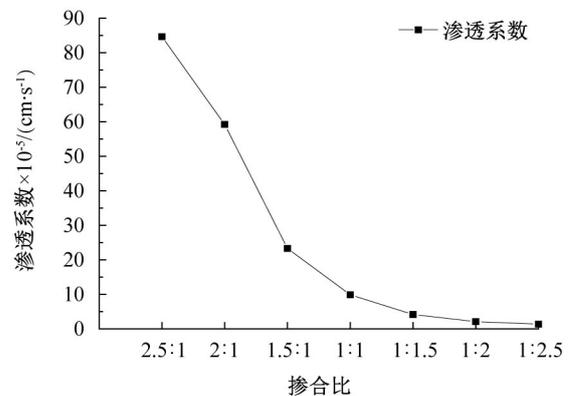


图 11 渗透系数随掺合比的变化曲线

Fig.11 The curve of permeability with mixing ratio

表5 各掺合比渗透系数

Tab.5 Permeability coefficients of different mixing ratios

单位:  $\times 10^{-5}/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$ 

掺和比	养护天数 /d			
	3	7	14	28
2.5:1	82.56	77.45	71.34	62.48
2:1	59.26	54.32	45.68	38.55
1.5:1	22.65	18.32	15.44	10.21
1:1	9.69	9.21	6.85	5.64
1:1.5	4.26	3.99	3.75	3.02
1:2	2.12	1.89	1.42	1.12
1:2.5	1.68	1.65	1.22	1.08

数相差有一个数量级,混合料的渗透特性随着石灰土的增加得到了很好的改善。从表5中看出,随着养护天数的增加,各掺合比试样的渗透系数逐渐减小,但是养护28d后减小的幅度很小,其中掺合比为1:2和1:1.25的渗透系数接近 $10^{-6}\text{cm/s}$ 数量级,这表明掺合比为1:2与1:2.5的试样在养护28d时候的防渗性能很好。对于一般工程对渗透性能要求较低时,掺合比为1:2与1:2.5的渗透性能已经满足要求,但工程要求较高时应另做考虑。

### 3 结论

1)通过直剪试验得到各掺合比固化混合料的强度参数,分析发现:固化混合料的黏聚力随着混合料中石灰土所占比重的增加逐渐增大,掺合比为1:2时黏聚力基本达到峰值;内摩擦角随着混合料中石灰土的比重增加反而减小;养护天数对固化混

合料的黏聚力影响明显,随着养护天数增加,各比例固化混合料黏聚力基本呈线性增长趋势;养护时间对内摩擦角影响不大,虽然有所增长,但幅度很小。

2)各掺合比试样的无侧限抗压强度随着龄期的增加逐渐增大,养护28d的各试样压缩系数均接近或者小于 $0.1\text{MPa}^{-1}$ ,掺合比为1:2的试样养护28d后的压缩系数为 $0.158\text{MPa}^{-1}$ ,接近低压缩性土。

3)从渗透系数看,养护28d的各掺合比试样,掺合比为1:2与1:2.5的试样渗透系数接近 $10^{-6}\text{cm/s}$ 量级,满足对渗透要求低的工程。

### 参考文献:

- [1] 张春雷,管非凡,李磊,等.中国疏浚淤泥的处理处置及资源化利用进展[J].固废处理及处置,2014,12:95-99.
- [2] 桂跃.高含水率疏浚淤泥材料化处理及其击实方法研究[D].南京:河海大学,2010.
- [3] 桂跃,杜国庆,张勤羽,等.高含水率淤泥生石灰材料化土击实方法初探[J].岩土力学,2010,31(Z1):127-137.
- [4] 张丽华,范昭平.石灰-粉煤灰改良高含水率疏浚淤泥的试验[J].南京工业大学学报:自然科学版,2013,35(1):91-95.
- [5] 王建勋,王保田.真空预压联合石灰稳定法改良淤泥土实验研究[J].岩土力学,2008(29):575-579.
- [6] RYAN C R, JASPERSE B H. Deep Soil Mixing at the Jackson Lake Dam[C]//ASCE Geotechnical and Construction Division Special Conference, 1989(5):25-29.

(责任编辑 李新)