

文章编号:1671-8879(2013)02-0038-06

石灰改良膨胀土强度试验

边加敏^{1,2}, 蒋 玲², 王保田¹

(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. 南京交通职业技术学院 江苏省道路交通节能减排技术研发中心, 江苏 南京 211188)

摘 要:以某边坡膨胀土为研究对象,在对石灰改良膨胀土的抗剪强度形成机理进行分析的基础上,用土力学中常用的快剪试验进行抗剪强度试验,研究了养护时间、初始含水率、掺灰率等与石灰改良膨胀土的凝聚力及内摩擦角的关系,根据试验结果,提出了综合考虑初始含水率与掺灰率的抗剪强度计算公式。结果表明:养护时间与抗剪强度参数不是直线关系,1~7 d 养护时间的增大值比 7~28 d 大,初始含水率和龄期对凝聚力的影响比内摩擦角的影响大。此外,引用其他学者的试验数据分析了 CBR 值与养护时间、初始含水率、掺灰率等的关系,结果显示 CBR 值随着掺灰率的增大而增大, CBR 值与初始含水率的关系与击实曲线类似。结合文中试验结果提出了采用最优含水率+3%为最优施工含水率。

关键词:道路工程;膨胀土;石灰改良土;抗剪强度;养护时间

中图分类号:U414.16 **文献标志码:**A

Experiment on the strength of lime-treated expansive soil

BIAN Jia-min^{1,2}, JIANG Ling², WANG Bao-tian¹

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Water Defenses Engineering of the Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. Jiangsu Research Center of Traffic Engineering Technology Energy Saving and Emission Reduction, Nanjing Communication Institution of Technology, Hohai university, Nanjing 211188, Jiangsu, China)

Abstract: Taking a slope of expansive soil as the research object, based on the analysis of shear strength formation mechanism of lime-treated expansive soil, the method of CQ test was used to study the relationship of curing-time, initial water content and lime rate, with the cohesion and the internal friction angle. According to the results of the tests, the author proposed the shear strength formula considering initial watercontent and lime rate. The results show that the relationships between curing-time and the shear strength parameters are not linear, the increased 1~7 d curing-time is more than that of 7~28 d, and the influences initial water content and curing-time on the cohesion are greater than that of the internal friction angle. The author used the other author's test results to analyze the relationship between CBR and curing-time, initial water content, line rate. The results show that the CBR increased with lime rate and the relationship between CBR and initial water content is similar to the compaction curves. Through the tests results the author proposes the optimum water content +3% as the optimal construction water content. 3 tabs, 9 figs, 12 refs.

收稿日期:2011-10-20

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50639010);教育部博士点基金项目(20100094110002);

江苏省交通厅科技项目(JN201103);南京交通职业技术学院科研项目(JY1006)

作者简介:边加敏(1979-),男,江苏南京人,河海大学工学博士研究生,南京交通职业技术学院讲师,E-mail:bianjiamin1114@yahoo.com.cn.

Key words: road engineering; expansive soil; lime-treated; shear strength; curing-time

0 引言

膨胀土工程问题由于其处理的复杂性,常常被认为是工程建设中的“癌症”,具有多次反复性与长期潜伏性。目前在中国开展的高速公路建设及南水北调工程中广泛遇到这种特殊性质的土。根据公路规范的相关规定,公路工程中不能使用强膨胀土铺筑路堤,中、弱膨胀土经过处理后可以用来铺筑路堤,工程上最常用的膨胀土改良方法有物理法与化学法,其中以石灰改良运用最广泛^[1-8]。为了准确掌握石灰改良膨胀土的各种性质,有必要对石灰改良膨胀土的变形、强度等方面进行研究。

目前中国学者对石灰改良膨胀土的抗剪强度参数的研究主要集中在以下几个方面。谭松林等研究了养护时间对石灰改良膨胀土相关试验参数的影响,得出加石灰后膨胀土的自由膨胀率、膨胀量、收缩率等均发生了明显的下降,抗剪强度相关参数及 CBR 值均有不同程度的增加,且随着掺灰量及养护时间的增加其相关各参数增加量不一致^[9]。李雄威等对考虑水化状态影响的膨胀土强度特性进行了研究,通过直剪试验得出粘聚力随水化时间的延长逐渐衰减并趋于稳定的规律,内摩擦角主要围绕在一个定值上下波动,膨胀土水化作用的温度越高,土体强度越低^[10]。李志祥等通过对石灰改良膨胀土相关试验参数的研究,得出需要将现行规范施工方法中的最优施工含水量用最优含水量控制的方法进行修改,并针对相关试验土样提出将最优施工含水量确定为最优含水量+3%这一数值^[11-12]。

以上学者只研究了影响石灰改良膨胀土强度参数的某一方面性质的因素,未能就石灰的掺灰率、初始含水率、龄期等对石灰改良膨胀土强度参数的影响做全面的研究,为了更加明确地研究石灰改良膨胀土的强度参数,本文就这一问题进行了相关的试验研究。

1 石灰土强度形成机理

石灰改良膨胀土的过程既有物理反应,又有化学反应,2 方面共同作用促使土体性质发生了根本改变,其主要的强度形成机理主要包括以下 4 个方面。

1.1 阳离子交换作用

在土壤中水的作用下,生石灰迅速消解,产生 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和少量 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,进一步离解出 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子。 Ca^{2+} 离子很容易置换膨胀土颗粒所吸附的低价

Na^+ 、 K^+ 、 H^+ 等离子, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 离子结合水膜较薄,使土颗粒胶体的双电层中扩散层变薄,土颗粒间结合力增强,使膨胀土分散性、坍塌性、亲水性和膨胀性降低,塑性指数下降,并易稳定成型,形成早期强度,改善土体性质。由于石灰中的 Ca^{2+} 离子与土颗粒表面的阳离子发生交换作用,改变了土颗粒表面的带电性质,从而加速胶体颗粒絮凝,使小的团粒相互凝聚变成大的团粒。

1.2 胶凝作用

离子交换反应后期,随龄期增长,膨胀土中的硅胶、铝胶与石灰进一步反应形成含水硅酸钙、铝酸钙,这 2 种凝胶能够在水环境下发生硬化,在膨胀土的粘粒外围形成稳定的保护膜,产生较强的粘结作用,具有很强的粘结力,使灰土强度增长,并保持长期的稳定。同时保护膜还能起到隔离水分的作用,使膨胀土获得水稳定性,胶凝反应是构建石灰土早期强度的主要原因之一。

1.3 碳酸化作用

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 在土中还会不断与空气中的 CO_2 反应生成 CaCO_3 和 MgCO_3 坚硬的固体颗粒,具有较高的强度和水稳定性。由于 CaCO_3 对土体的胶结作用使得土体加固,形成石灰稳定土。经过相当长的化学作用,便体现出石灰土的后期强度。

1.4 结晶作用

在石灰稳定土中只有一部分熟石灰 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进行了离子交换作用,而绝大部分饱和的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 可以自行结晶,将膨胀土颗粒胶结成一个整体。

2 初始含水率、掺灰率对抗剪强度参数的影响

2.1 试验方法及土性参数的确定

试验用土选自湖北省枣阳某取土场,按照膨胀土胀缩等级判定标准判定为弱膨胀土。具体物理性质见下页表 1。针对在江苏地区普遍采用的二次掺灰法,本次试验中石灰土的拌合采用二次掺灰法。根据相关资料及试验用土的性质,笔者将第一次掺灰的石灰剂量选择为 2%,拌和均匀并放入袋中扎紧,放入阴凉处养护 2 d,取出后掺加剩余的石灰,并拌和均匀,再养护 48 h 后制作试样,试样初始干密度选择 1.7 g/cm^3 (此干密度指的是干土质量除以环刀体积,不考虑石灰质量)。根据试验用土的最优含水率选用 12%、14%、16% 和 18% 这 4 种初始含水率。试验仪器采用 ZJ-4 型直剪仪,试验方法采用快剪试验,分别选择 50、100、150 和 200 kPa 这 4 种固结压力。

表 1 膨胀土物理性质
Tab. 1 Physical characteristics of expansive soil

液限	塑限	塑性指数	自由膨胀率	轻型击实		重型击实		不同直径(mm)的筛孔通过率/%				
				最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	2	1	0.5	0.25	0.075
47	21	26	54	1.65	22	1.71	16	100	99.7	97.5	94.9	87.1

2.2 含水率、掺灰率与抗剪强度参数的关系

试验用消石灰化学成分分析结果:CaO 含量为 74.20%、MgO 含量为 0.67%,含量均为质量分数。不同含水率、不同掺灰率下抗剪强度参数的试验数据见表 2。

表 2 含水率、掺灰率与抗剪强度参数试验数据
Tab. 2 Test results of shear strength parameters
under different water contents and lime rates

掺灰率/ %	不同含水率(%)的 c、φ 值							
	12		14		16		18	
	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)	c/kPa	φ/(°)
2	126.4	36.0	137.0	36.5	141.2	36.8	150.0	37.1
4	132.0	36.5	140.0	36.8	154.0	37.0	162.5	37.3
6	141.0	36.6	152.7	37.0	159.3	37.1	170.4	37.4
8	147.0	37.1	160.3	37.5	169.1	37.6	181.0	37.8

图 1、图 2 显示,在相同含水率的情况下,粘聚力和内摩擦角都随着掺灰率的增大而增大,且近似成线性关系,即

$$\left. \begin{aligned} c &= a_1 h + b_1 \\ \varphi &= a_2 h + b_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:c 为粘聚力(kPa);φ 为内摩擦角(°);h 为掺灰率(%);a₁、b₁、a₂、b₂ 为试验参数。

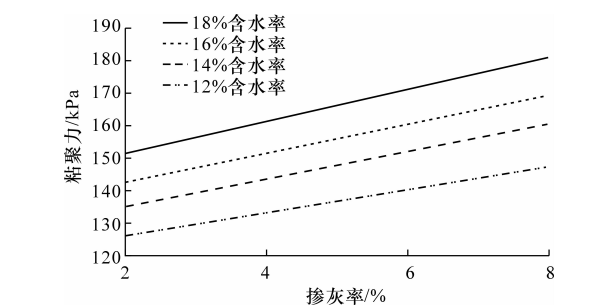


图 1 掺灰率与粘聚力的关系

Fig. 1 Relationship between lime rate and cohesion

在相同含水率的情况下,掺灰率对试验含水率段的石灰改良土粘聚力的影响较大,分别增加20.6、22.7、27.9 和 31.0 kPa,但对内摩擦角的影响不大,4 种含水率对应内摩擦角增大的数值分别为1.1、2.0、0.8、0.7。这从另一个方面证明了内摩擦角与土样的自身性质有关,外界对其影响较小。

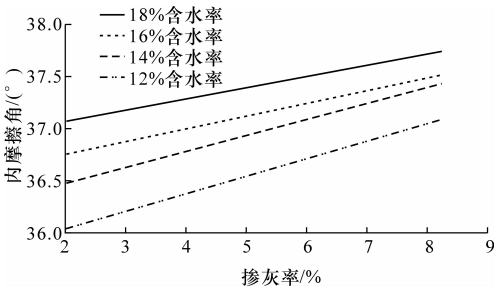


图 2 掺灰率与内摩擦角的关系

Fig. 2 Relationship between lime rate and internal friction angle

将系数 a₁、a₂、b₁、b₂ 与含水率的关系进行拟合,如图 3、图 4 所示。图 3、图 4 中,y₁、y₂、y₃、y₄ 分别为 a₁、b₁、a₂、b₂;x 为含水率;R² 为判定系数。

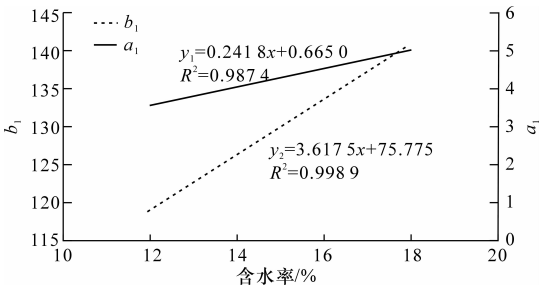


图 3 a₁、b₁ 与含水率的关系

Fig. 3 Relationship between a₁、b₁ and water content

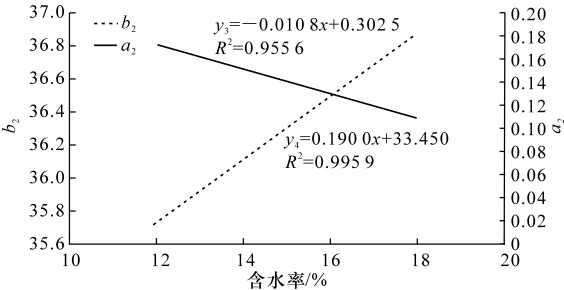


图 4 a₂、b₂ 与含水率的关系

Fig. 4 Relationship between a₂、b₂ and water content

由图 3、图 4 可知,a₁、a₂、b₁、b₂ 与含水率近似成直线关系。

根据本文的试验用土,综合以上得到

$$\left. \begin{aligned} c &= (a_{c1} w + b_{c1}) h + a_{c2} w + b_{c2} \\ \varphi &= (a_{\varphi1} + b_{\varphi1}) h + a_{\varphi2} w + b_{\varphi2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中:a_{c1}、b_{c1}、a_{c2}、b_{c2}、a_{φ1}、b_{φ1}、a_{φ2}、b_{φ2} 为相关试验参数;w 为含水率。

2.3 抗剪强度参数与初始含水率的关系

选取 8% 掺灰率的石灰改性膨胀土,并对 2 种抗剪强度参数与含水率的关系进行拟合,其他掺灰率的石灰改良膨胀土的拟合结果类似,典型结果如图 5 所示。图中, y_5 、 y_6 分别为粘聚力和内摩擦角。

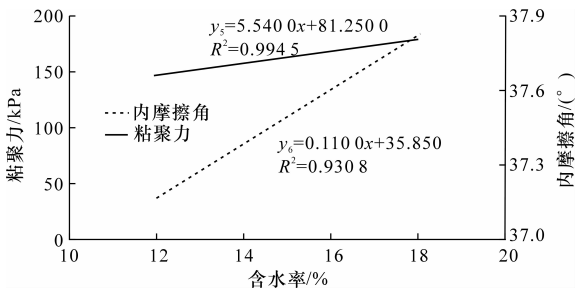


图 5 粘聚力、内摩擦角与含水率的关系
Fig. 5 Relationship between water content and cohesion, internal friction angle

(1)图 5 表示在相同掺灰率的情况下,粘聚力和内摩擦角随初始含水率的增加而增大,且与初始含水率近似成线性关系,即,其相关系数较高,4 种掺灰率的抗剪强度参数的线性相关系数都达到 0.97 以上。这一结论似乎与相关文献的不一致,造成不一致的原因主要是本文所采用的最大初始含水率为 18%,仅大于重型击实最优含水率 2 个百分点。根据文献[12]的研究结果,在初始含水率小于最优含水率+3%时,石灰土的抗剪强度随着掺灰率的增加而增加,这与本文的试验结果较为符合。同时文献[12]指出当初始含水率大于最优含水率+3%时,抗剪强度随着初始含水率的增加而减小,由于本文试验含水率限制,故未能得出相关结论。

(2)初始含水率对内摩擦角的影响不大,随着初始含水率的增大,内摩擦角的最大增加率为 2%,增加量为 1.1,其余内摩擦角的增加基本一致,约增加 0.8,表现为直线的斜率仅为 0.11,可近似认为不变。

3 初始含水率、掺灰率对 CBR 值的影响

为了研究初始含水率、掺灰率对 CBR(加州承载比)值的影响,选用文献[11]中的相关数据进行有关分

析,如图 6、图 7 所示。

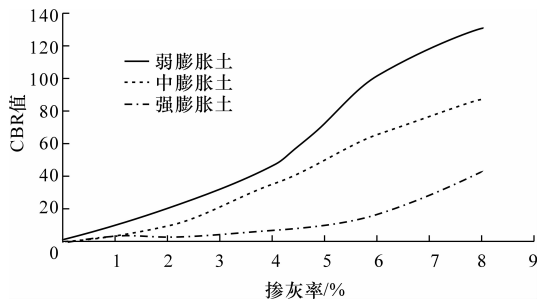


图 6 掺灰率与 CBR 值的关系
Fig. 6 Relationship between lime rate and CBR

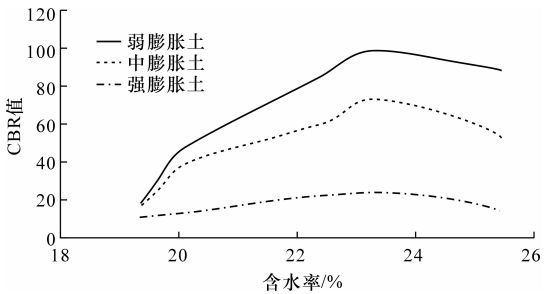


图 7 初始含水率与 CBR 值的关系
Fig. 7 Relationship between water content and CBR

图 6 表示文献[11]中 3 种不同膨胀土的 CBR 值都随着掺灰率的增大而有不同程度的增大,弱膨胀土增大的幅度最大,强膨胀土增大的幅度最小。

图 7 表示对于 3 种掺加 4% 灰剂量的膨胀土而言,含水率与 CBR 值的关系曲线与击实曲线类似,但 CBR 极值点对应的含水率不是最优含水率,而比最优含水率大 3% 左右,说明目前规范规定的采用最优含水率拌土不能使石灰改良膨胀土的 CBR 强度达到最大。除此之外,不同的膨胀土类型采用石灰改良的效果不同,对于强膨胀土来说改良的效果较差,对于弱膨胀土则改良效果较好。

4 龄期对强度的影响

4.1 龄期对抗剪强度参数的影响

采用 16% 的最优击实含水率,分别掺加 0、2%、6% 的石灰剂量,并对每种剂量的石灰土进行不同龄期的抗剪强度参数试验,具体试验结果见表 3。

表 3 养护时间与抗剪强度参数试验结果

Tab. 3 Test results of curing time and the parameters of shear strength

掺灰率/%	养护时间/d	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	掺灰率/%	养护时间/d	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	掺灰率/%	养护时间/d	c/kPa	$\varphi/(^{\circ})$
0	1	140.0	35.0	2	1	145.0	36.8	6	1	156.0	39.0
	7	145.0	35.2		7	206.0	37.0		7	210.0	38.2
	28	151.7	35.7		28	219.0	37.3		28	224.0	39.3

为了研究抗剪强度参数与龄期的关系,将表 3 的相关试验结果绘制于图 8 中。图中,粘聚力(2%)表示 2% 掺灰率的粘聚力,其他以此类推。

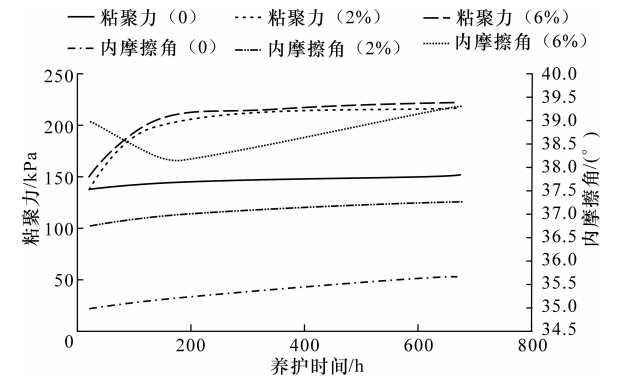


图 8 养护时间与抗剪强度参数试验结果

Fig. 8 Relationship between curing time and parameters of shear strength

通过分析图 8 得出以下几点结论。

(1)对于相同的掺灰率来说,粘聚力与内摩擦角随着养护时间的增加而增加(6%掺灰率的内摩擦角除外),且 1~7 d 的粘聚力增长比 7~28 d 粘聚力增长快,在图 8 上表现为在 7 d 处出现一个拐点,这一结论在其他学者的研究资料中也得到了验证。笔者认为出现这一现象的原因可能有以下几个方面:①由于前期出现的CaCO₃ 晶体形成的保护膜将Ca(OH)₂与空气中的 CO₂ 隔开,阻止离子交换作用、碳化作用及结晶作用的进一步发生而造成的;②不同的养护时间段,石灰土强度形成的机理不同,研究表明硬凝作用在石灰土早期强度形成的过程中起到重要的作用。同时掺灰量为 0 的素土经过一段时间的养护后,抗剪强度参数也有微小的提高,这可能是由于在养护过程中水分散失,造成含水率降低造成的。

(2)2%和 6%掺灰率的石灰土在 1~7 d 内的粘聚力增加量基本一致,分别为 61 kPa 和 54 kPa,表现为图 8 中 2 段直线近似平行,2%的石灰土 7~28 d 的粘聚力增加量比 1~7 d 的增加量小。出现这一现象的原因可能是由于 1~7 d 内 2%灰剂量的石灰反应完全,而 6%灰剂量的石灰土反应不完全。这一结果说明了不同初始含水率、掺灰率的石灰土形成最终强度的时间不同。在一定含水率段内,形成最终强度时间随着初始含水率和掺灰率的增加而增加。

(3)龄期对粘聚力的影响要远远大于对内摩擦角的影响,文中试验用土 28 d 的粘聚力增大在 40% 左右,而内摩擦角的增大在 5% 以下。

4.2 龄期对 CBR 值的影响

文献[11]以掺加 2% 石灰的弱膨胀土为例,研究了养护龄期对石灰改良膨胀土 CBR 值的影响,结果如图 9 所示。

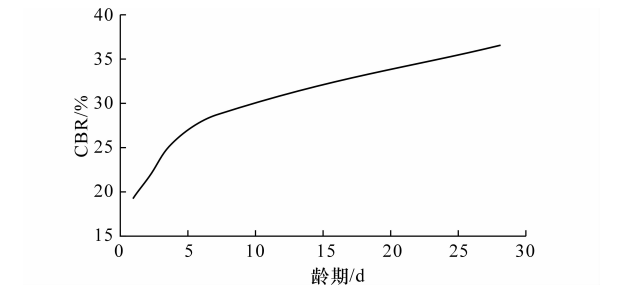


图 9 养护时间与 CBR 值的关系

Fig. 9 Relationship between curing-time and CBR

从图 9 中可以看出,对于 2% 掺灰率的弱膨胀土,其 CBR 值随着养护时间的增加而增加,但增加的幅度不一致,1~7 d 增加的幅度较大,7 d 的增大幅度为 48%,在图中表现为斜率较大,7~28 d 增加的幅度较 1~7 d 小,14 d 的增大幅度为 40%,表现为曲线斜率较小。

5 相关问题思考

5.1 最优拌土含水率

从本文的抗剪强度参数及其他学者的 CBR 值试验结果来看,目前工程上采用的最优含水率作为施工含水率是不合理的,因为在最优含水率附近拌灰,灰土所能达到的最大强度并不是最大。根据相关文献研究表明,最优施工含水率为最优含水率以上某一数值,具体数值应该根据土质情况确定,文献[11-12]中采用最优含水率+3%,笔者认为可行的。这样做既可以节约晒土的时间即缩短施工工期,也可以更加合理地发挥石灰土的强度,减少工程造价。

5.2 最优掺灰率

目前中国公路路基设计规范采用 CBR 值来表示路基的最小强度,这在素土路基的设计中无疑是适用的。但石灰改良土与素土有一定的区别,根据本文的研究成果,石灰改良土的强度与龄期、拌土初始含水率等都有着密切的关系,采用 0 d 龄期的强度来确定石灰土的最终强度方法明显会使得石灰土强度测定结果变小。根据本文的试验结果,笔者认为采用 7 d 龄期的强度测定结果更为合理。

6 结 语

(1)粘聚力和内摩擦角与掺灰率近似呈线性关

系, a_1 、 a_2 、 b_1 、 b_2 与含水率均呈线性关系, 综合以上, 提出考虑掺灰率与含水率的抗剪强度参数计算公式。

(2) 粘聚力、内摩擦角、CBR 值等强度参数随着掺灰率的增大而增大, 不同的膨胀土其增大的幅度不一致。CBR 值与初始含水率的关系曲线与击实曲线类似, 但最大 CBR 值对应的最优拌土含水率并不是素土的最优含水率, 而是最优含水率以上的某一数值。

(3) 养护龄期对粘聚力与内摩擦角的影响呈现前快后慢的特性, 即在文中养护时间下, 粘聚力、内摩擦角、CBR 值等强度参数 1~7 d 的增速比 7~28 d 大。

(4) 建议改变现行施工规范中的最优拌土含水率及最优掺灰率的确定方法, 用 7 d 龄期的石灰土 CBR 及直剪强度进行最优掺灰率的确定, 同时采用最优含水率+3% 的含水率来确定初始拌土含水率。

参考文献:

References:

- [1] Bell F G. Lime stabilization of clay minerals and soils [J]. *Engineering Geology*, 1996, 42(4): 223-237.
- [2] Locat J, Termbaly H, Leroueil S. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(4): 654-669.
- [3] 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): 339-344.
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu, DU Yan-jun. Experiment on improvement of expansive clays with lime-fly ash[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2007, 37(2): 339-344. (in Chinese)
- [4] 习红娟. 石灰土处理膨胀土路基施工技术[J]. *筑路机械与施工机械化*, 2005, 22(12): 46-48.
XI Hong-juan. Construction technique of processing expansive soil subgrade with lime soil[J]. *Road Machinery & Construction Mechanization*, 2005, 22(12): 46-48. (in Chinese)
- [5] 郭爱国, 刘观仕, 孔令伟, 等. 高速公路建设中膨胀土特性的试验研究[J]. *岩土力学*, 2005, 26(3): 397-403.
GUO Ai-guo, LIU Guan-shi, KONG Ling-wei, et al. Testing study on properties of mid-expansive soil for expressway construction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(3): 397-403. (in Chinese)

- [6] 崔伟, 李华鑫, 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): 606-609.
CUI Wei, LI Hua-luan, MU Nai-min. Experimental research on engineering character of improved expansive soil with lime [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2003, 24(4): 606-609. (in Chinese)
- [7] 陈爱军, 张家生, 刘君. 石灰改良膨胀土无侧限抗压强度试验[J]. *桂林理工大学学报*, 2011, 31(1): 91-95.
CHEN Ai-jun, ZHANG Jia-sheng, LIU Jun. Experiment on unconfined compressive strength of lime improving expansive clay[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2011, 31(1): 91-95. (in Chinese)
- [8] 杨明亮, 陈善雄, 全元元, 等. 空军汉口新机场试验路段石灰改性膨胀土试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(9): 1868-1875.
YANG Ming-liang, CHEN Shan-xiong, QUAN Yuan-yuan, et al. Experimental research on improved expansive soil with lime in test section of the new hankou airfield[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(9): 1868-1875. (in Chinese)
- [9] 谭松林, 黄玲, 李玉花. 加石灰改良后膨胀土的工程性质研究[J]. *工程地质学报*, 2009, 17(3): 421-425.
TAN Song-Lin, HUANG Ling, LI Yu-hua. Engineering properties of expansive soil mixed with lime at Yichang-Jingmen expressway [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(3): 421-425. (in Chinese)
- [10] 李雄威, 孔令伟, 郭爱国, 等. 考虑水化状态影响的膨胀土强度特性[J]. *岩土力学*, 2008, 29(12): 3193-3198.
LI Xiong-wei, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Strength characteristics of expansive soil considering effect of hydrous state[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(12): 3193-3198. (in Chinese)
- [11] 李志祥, 胡瑞林, 熊野生, 等. 改性膨胀土路堤填筑含水率优化试验研究[J]. *工程地质学报*, 2005, 13(1): 113-116.
LI Zhi-xiang, HU Rui-lin, XIONG Ye-sheng, et al. Experimental study on optimal water content of the modified experiment clay used as the embankment fills[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2005, 13(1): 113-116. (in Chinese)
- [12] 郭爱国, 孔令伟, 胡明鉴, 等. 石灰改良膨胀土施工最佳含水率确定方法探讨[J]. *岩土力学*, 2007, 28(3): 517-521.
GUO Ai-guo, KONG Ling-Wei, HU Ming-jian, et al. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(3): 517-521. (in Chinese)