

文章编号:1671-8879(2014)02-0051-08

石灰改良膨胀土路基施工控制参数

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:为了解决石灰改良膨胀土最优施工含水率现行确定方法存在不足的问题,以某边坡膨胀土为研究对象,在对现行石灰改良膨胀土施工控制参数常用方法分析的基础上,进行了石灰改良膨胀土的强度和膨胀性能的相关试验。研究表明:石灰改良膨胀土的最优施工含水率在 $w_{op} + (2\% \sim 4\%)$ 之间,石灰改良膨胀土的强度在 7 d 内增长最快,以后逐渐趋于稳定,合理地掺加石灰对石灰改良膨胀土的强度增长影响较大;随着石灰掺量的增加塑性指数减小,自由膨胀率先减小后增大,掺石灰对膨胀土膨胀性质的改善作用非常迅速,在最初的 24 h 内就已基本完成,继续增加龄期对其影响不大。结合强度及膨胀性试验的结果,提出了以膨胀性指标作为主要控制指标,强度指标作为验证指标的路基施工参数确定方法。

关键词:道路工程;膨胀土;石灰改良土;施工控制参数;养护时间

中图分类号:U416.167 **文献标志码:**A

Subgrade construction control parameters for lime-treated expansive soils

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

(1. Key Laboratory of Geotechnics and Embankment Engineer 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 Communications Institution of Technology, Nanjing 211188, Jiangsu, China)

Abstract: Taking the slope of expansive soil as the research object, based on the analysis of construction control parameters of lime-treated expansive soil, this paper did relevant tests on the strength and expansive properties of the soil. The results show that the optimal construction water content of lime-treated expansive soils should be within $w_{opt} + 2\% \sim 4\%$. The strength of lime-treated expansive soil increase fast in 7 days, and after 7 days it tends to be stable, the reasonable lime rate has great influence on the strength improvement of lime-treated expansive soil. The results show that with the increasing of lime rate the plasticity index decreases, and the free swelling ratio decreases first and then increases. The properties of expansive soil mixed with lime will be improved rapidly, which will be finished in first 24 h, and increasing curing of time has little influence on it. Combined with the results of strength and expansive properties tests, the method for the determination of the subgrade construction control parameters with the expansive properties as the main control indexes, and the strength as the confirmation index is proposed. 3 tabs, 8 figs, 19 refs.

收稿日期:2013-04-21

基金项目:国家自然科学基金重点项目(NO50639010);江苏省道路交通节能减排研发中心项目(JN201103);

南京交通职业技术学院科研项目(JY1205);教育部博士点基金项目(20100094110002)

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

Key words: road engineering; expansive soil; lime treated soil; construction control parameter; curing time

0 引 言

中国是膨胀土广泛分布的国家,在高速公路建设中经常需要穿过广大膨胀土地地区,由于膨胀土具有遇水膨胀、失水收缩的特点,造成了公路建设中路基的大面积破坏^[1-4]。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”,为了解决这一难题,大量的学者对其进行了长时间的研究。查甫生等对掺石灰后的强度进行了相关研究,研究结果显示掺石灰后的膨胀土强度与石灰掺量存在一定的关系^[5-11];李雄威等对素膨胀土的强度及膨胀性能进行了相关研究,结果表明只要改进膨胀土相关参数的测定方法,素膨胀土的强度可以满足路基设计规范的要求^[12-15];李志祥等对路基填筑含水率进行了研究,研究结果显示对于石灰改良膨胀土路基的最优施工含水率比素土的最优含水率大^[16-17]。目前中国对路基施工含水率、掺灰率等路基施工控制参数方面的研究开展的较少。石灰改良膨胀土的路基施工控制参数包括许多方面,本文仅从最优施工含水率及最优掺灰率 2 个方面进行研究,现行的最优施工含水率及最优掺灰率确定方法存在一定的不足,主要表现在以下方面。

最优施工含水率:目前广泛采用素土的最优含水率来确定石灰改良膨胀土施工含水率,这种方法没有考虑石灰与土料之间的物理、化学反应,对于这些反应来说,水是必不可少 的关键成分之一,石灰改良膨胀土混合料中物理、化学反应水的获取量主要与粘土的矿物成分、颗粒级配、初始含水量及液塑限等土性参数有关,水获取量的多少直接影响石灰土最终强度、自由膨胀率、液塑限和颗粒级配等相关指

标。不同矿物成分和初始含水率的土,其物理化学反应所需要的水量存在较大的差别,若施工时按照素土的最优含水率确定石灰改良膨胀土的最优施工含水率,显然存在一定的缺陷。

最优掺灰率:目前采用的方法是测定不同掺灰率下的石灰土强度和膨胀性能,其中以强度为主的同时兼顾膨胀性能,综合确定石灰的最优掺灰率。这种最优掺灰率的确定方法没有考虑龄期及施工含水率对石灰土强度及膨胀性能的影响。实际上对于石灰改良膨胀土来说,随着养护时间的增长,石灰土的强度得到了大幅度的提高,而膨胀土的膨胀性膨胀势大幅度的降低,有些强度指标甚至增大一倍以上。研究成果表明,掺灰率与强度及变形性能之间不呈直线关系,而是存在最佳掺灰率,即过多地掺加石灰不仅不能有效提高石灰土的强度与变形性能,超过某一合理数值后反而使得其强度与变形性能降低。如果在确定灰剂量时不考虑养护时间对石灰土强度及膨胀势的影响,不仅会造成浪费,而且对石灰改良膨胀土的改良效果也会有一定程度的影响。

鉴于现行方法所存在的问题,本文对最优施工含水率与最优掺灰率进行相关研究,最终达到确定合理的相关施工控制参数的目的。

1 土性参数的确定

1.1 试验用土

试验用土采用南京芜申线胥河边坡东坝航道段膨胀土,其自由膨胀率为 50,按照相关试验规范,该土为高液限的弱膨胀土,根据路基设计规范,不能直接用于路基的铺设,试验用土的相关试验参数见表 1。

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

液限/%	塑限/%	塑性 指数/%	自由 膨胀率/%	重型击实		不同筛孔(mm)的颗粒级配/%				
				最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	<2	<1	<0.5	<0.25	<0.075
56	25	31	50	1.83	16.5	100	99.70	97.50	94.90	87.10

不同筛孔(mm)的颗粒级配/%							
<0.056 8	<0.040 4	<0.025 8	<0.015 2	<0.010 7	<0.007 7	<0.005 4	<0.001 6
76.81	72.61	63.71	49.04	47.99	41.71	35.94	16.56

1.2 石灰

试验用消石灰化学成分分析结果见表 2。

表 2 石灰成分

Tab. 2 Composition of lime

成分	CaO	MgO
质量分数/%	74.2	0.67

2 石灰土的室内强度试验

2.1 试验目的与方法

试验目的是通过研究石灰掺量、龄期及施工含水率对石灰改良膨胀土膨胀潜势及强度相关指标的变化规律,并以此确定石灰土的最优掺灰率及最优施工含水率。试验方法是对掺加不同石灰剂量的石灰土进行不同施工含水率及龄期的相关试验,文献[18-19]研究表明石灰土的强度变化期为 23 d,超过这一时间段后,石灰土的强度变化较少。鉴于此,本文试验用养护时间最大选取为 28 d(文中试验土样的养护采用塑料袋包扎,以防止水分散失),文中素土最大干密度是指采用干法、重型击实的最大干密度。

2.2 CBR 值试验

CBR(加州承载比)值是土性参数强度指标中比较重要的一种指标,目前在公路工程的设计中被广泛采用,作为路基施工的控制指标,路基设计规范规定在路基设计中 CBR 值不得小于 3%,文献[14-15]的试验结果表明,对于膨胀土而言,只要改进 CBR 值的试验方法,大部分素膨胀土的 CBR 值能够满足路基铺筑的要求,但对初始含水率及龄期对改性膨胀土 CBR 强度的影响却未加研究。为了研究改性膨胀土 CBR 值与各相关施工参数的关系,笔者进行了相关试验,具体结果如图 1、图 2 所示。

由图 1 可知,掺石灰对于膨胀土 CBR 强度有较大的提高作用,但石灰土的 CBR 值与掺灰量的提高不呈直线关系,对于本文的试验用土从素土到掺加 2%石灰的 CBR 值增幅最大,2%掺灰率到 4%掺灰率次之,4%掺灰率到 6%掺灰率的提高幅度最小,部分含水率下 6%掺灰率甚至小于 4%掺灰率的 CBR 值。分析本文试验用土,就 CBR 值而言,只要掺加 2%的石灰,其 CBR 值就能满足路基铺筑的要求。这一试验结果与文献[8]的试验结果基本一致。造成这一现

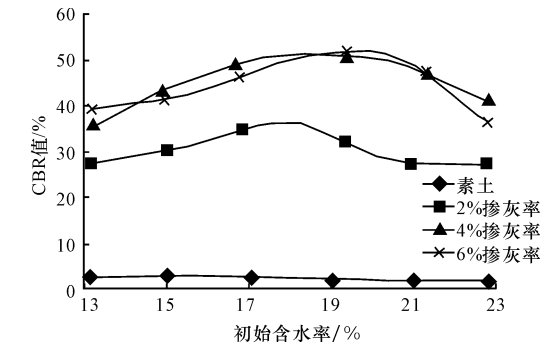


图 1 初始含水率与 CBR 关系

Fig. 1 Relationship between initial water content and CBR

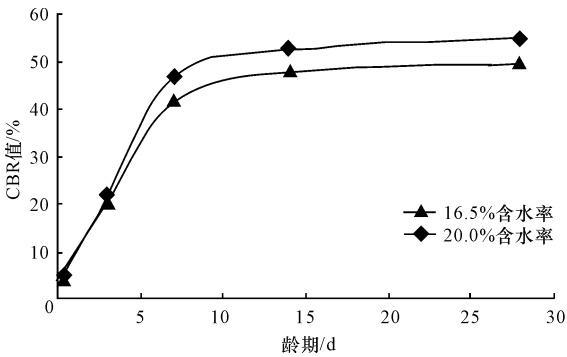


图 2 龄期与 CBR 关系

Fig. 2 Relationship between curing time and CBR

象的原因,笔者认为将一定量的石灰加入土体中,由于石灰中存在大量游离的 CaO、MgO,游离的 CaO、MgO 与土体产生硬凝反应,使得土体强度增大,但硬凝反应需要大量的水参加,在含水量一定的情况下,试验中过多地掺入石灰,必然会造成石灰不能与土体完全反应,石灰颗粒的存在增加了土体粉粒的含量,最终使得石灰改良膨胀土的 CBR 值降低。

对相同掺灰率的石灰改良膨胀土而言,其 CBR 值与含水率关系曲线与击实曲线类似,存在最优施工含水率,根据图 1 的试验结果,该含水率比素土的最优含水率稍大,不同的掺灰率其最优拌土含水率不同,但基本在 $w_{op} + (2\% \sim 4\%)$ 之间(w_{op} 为最优含水率),通过对文献数据的研究,表明石灰土的最优拌土含水率在 $w_{op} + 3\%$ 左右^[14-15]。对于相同掺灰率来说,土样的施工含水率越大,石灰与土体硬凝反应进行得越充分,在一定掺灰率下,土体 CBR 值随土体含水量的增大而增大,但当土体含水量增大到某个程度时,石灰不能完全消耗完土体中的水分,剩余的水反而降低了石灰土的强度。

选取 4%掺灰率的石灰土,在素土的最优含水率

(16.5%)及按照本文 4% 掺灰率的 CBR 值确定的最优施工含水率(20%)2 种含水率下拌和,研究其 CBR 强度与龄期的关系,具体如图 2 所示。图 2 表明石灰土的 CBR 值随着养护时间的增大而增大,但增大幅度不成直线关系,前段增大幅度较大,随后逐渐减小,增幅转折点随着不同的初始含水量而有微小的区别,本文试验用含水率分别对应于 7 d 和 8 d。养护龄期为 0 d 时 20% 含水率的 CBR 值较 16.5% 含水率的 CBR 值稍小,都接近于素土的 CBR 值,但随后 20% 含水率的 CBR 值增幅较 16.5% 含水率大,到达某一养护龄期后,2 种含水率的 CBR 值增幅基本一致。根据查甫生等的研究,石灰改良膨胀土强度的形成可以分为 3 个阶段:第 1 阶段发生的时间段大致为 7 d,该阶段发生的反应为离子交换反应,这一阶段,膨胀土中存在的硅胶、铝胶进一步与石灰中游离的 CaO 、 MgO 等发生化学反应,生成水化硅酸钙与水化铝酸钙,这 2 种化合物在水环境下硬化,在膨胀土粘粒周围形成很强的保护膜,使得改良膨胀土的强度增长并长期稳定;第 2 阶段为残余反应阶段,土体强度继续增长,但增长比前一段时间明显缓慢,在后期已经接近稳定,这一阶段发生的化学反应主要为第 1 阶段物理化学反应的延续,同时石灰带来游离的 CaO 、 MgO 与膨胀土成分发生的化学反应,加强了改良膨胀土后期强度与耐久性;第 3 阶段为长期反应阶段,达到这一阶段后主要的化学反应都已经完成,主要是改良膨胀土中存在的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 以及凝胶体等与空气中含有的 CO_2 发生碳化作用,对改良膨胀土的强度有一定的提高作用,但不明显^[6]。

2.3 无侧限抗压强度试验

公路部门对石灰改良土膨胀强度的主要评价依据是无侧限抗压强度值,目前无侧限抗压强度确定的规范方法有以下 2 个方面的缺陷:①只在最优含水率下拌制石灰土,并测定其强度,这种方法不能有效地反映出不同初始含水率对石灰改良膨胀土无侧限抗压强度的影响;②无侧限抗压强度的确定只有 1 个龄期,即从制样结束到试验开始共养护 7 d,无法真实反映出石灰土后期强度的增加。

为了研究养护时间及初始含水率对无侧限抗压强度的影响,笔者拌制 4% 石灰剂量的石灰土,将石灰土拌合均匀,静置 24 h,并将土样分为 3 份分别制作试件,第 1 份按照规范方法养护并试验,另外 2 份分别养护至 14 d、28 d,分别测定其无侧限抗压强度,具体如图 3、图 4 所示。

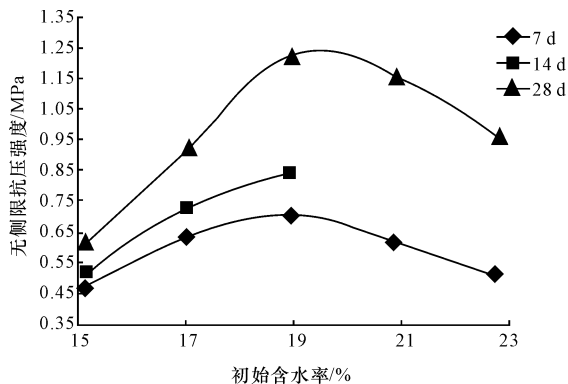


图3 初始含水率与无侧限抗压强度关系

Fig. 3 Relationship between initial water content and unconfined compressive strength

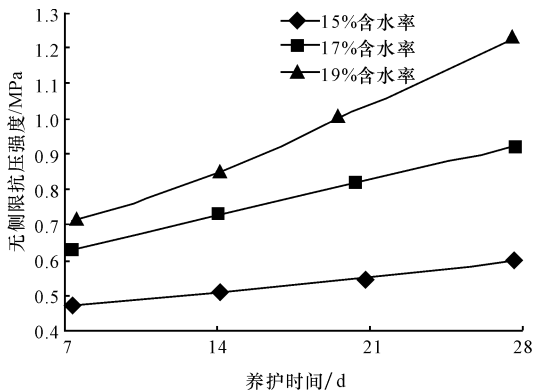


图4 养护时间与无侧限抗压强度关系

Fig. 4 Relationship between curing time and unconfined compressive strength

图3显示石灰改良膨胀土的无侧限抗压强度与初始含水率的关系曲线与击实曲线类似,存在一个最优施工含水率,对本文试验用土及掺灰率而言,其最优施工含水率在19%左右,不同养护时间所对应的最优施工含水率一致。

图4显示对于不同养护龄期而言,石灰改良膨胀土的无侧限抗压强度随着养护龄期的增大而增大。对本文的试验用土,在小于最优拌土含水率20%的情况下,初始含水率越大,其无侧限抗压强度的增幅越大。

综合图 1~图 4 可以看出,石灰改良膨胀土的强度与初始含水率的关系曲线与素土的击实曲线类似,在素土最优含水率下拌土所得到的强度并非最大。根据本文的试验结果,对于不同掺灰率的膨胀土,其最优施工含水率不一致,但基本稳定在 $w_{op} + (2\% \sim 4\%)$ 。因此,将最优施工含水率确定为 $w_{op} + (2\% \sim 4\%)$ 之间比较符合试验结果。研究结果还表明,随着养护龄期的增加,石灰土的强度仍存在较大幅度的增加,对于不同养护龄期的石灰改良膨胀土,强度随着养护龄期的增大而增大,但增大幅度不一致,而养护时间对最优施工含水率的影响不大。因此,在确定最优施工含水率时可以不考虑养护时间的影响。

3 石灰土的室内膨胀性试验

土样的膨胀性能,主要取决于土样的持水能力与基本性质,在基本性质当中,界限含水量能反映土体的持水能力,其中塑性指数最能体现土体的持水能力与水稳定性,塑性指数越大,表明土样的持水能力越强,石灰土样的膨胀性越高。因此,本文以界限含水量、自由膨胀率及有荷膨胀量等为对象研究膨胀土的膨胀性能。

3.1 界限含水量试验

将土样与石灰在烘箱内烘干碾碎并分别过 2 mm 和 0.5 mm 的标准筛,采用 0、2%、4% 和 6% 共 4 种灰剂量的石灰土,加入一定量的自来水拌匀,进行界限含水量测定。选取 4% 掺灰率的石灰土放入袋中分别养护 0、1、3、7、14、28 d,并进行界限含水量测定,具体试验方法按照《公路土工试验规程》(JTG E40—2007)进行试验,试验仪器采用液塑限联合测定仪。具体结果如图 5、图 6 所示。

从图 5 中可以看出,随着掺灰量的增加,石灰土的界限含水量发生了一定的变化,液限值减小,塑限值增大,塑性指数出现了大幅度减小。对于不同的掺灰率而言,塑性指数的减小幅度不同,掺加 2% 石灰的塑性指数减小幅度最大,继续增加石灰,塑性指数减小幅度逐渐减小,至掺加 4% 石灰时增加石灰对石灰土塑性指数的减小影响较小。液限与塑性指数的减小表明石灰土持水能力的减弱,亲水性及土

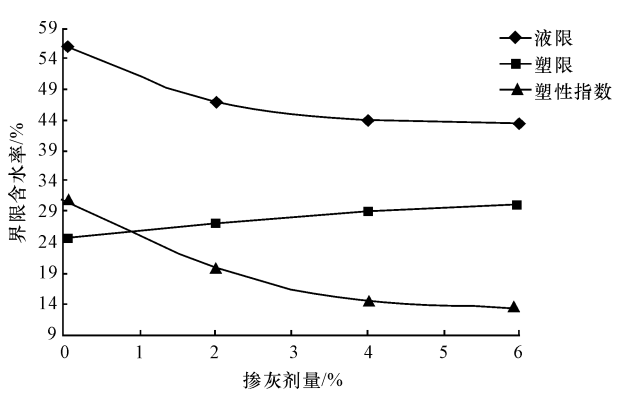


图 5 界限含水率与掺灰剂量关系

Fig. 5 Relationship between lime rate and limit water content

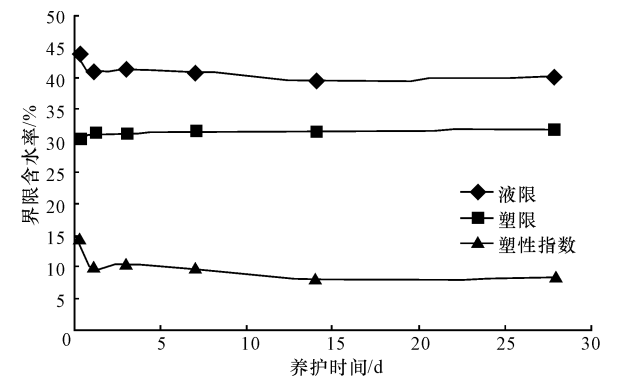


图 6 界限含水率与养护时间关系

Fig. 6 Relationship between limit water content and curing time

颗粒表面活性的减小,从另一个方面证明掺入石灰对改善膨胀土的膨胀性能具有一定的帮助,但过多地掺入石灰对改良膨胀土的变形性能效果不明显。

从图 6 中可以看出,掺灰 24 h 的界限含水率变化最大,以后随着养护时间的增加液塑限及塑性指数的变化比较平缓,石灰对界限含水率性质的改善作用是非常迅速的,在最初的 24 h 内就已经改善完成了,增加龄期对其影响不大。

3.2 自由膨胀率试验

自由膨胀率是评价膨胀土膨胀性能的重要指标之一,为了研究石灰改良膨胀土的掺灰率及养护时间对自由膨胀率的影响,笔者进行了相关试验,下页图 7 为自由膨胀率与掺灰率的关系,下页图 8 为 4% 掺灰率的自由膨胀率与养护时间的关系。

图 7 显示,石灰改良膨胀土的自由膨胀率随着掺加石灰剂量的增加而显著减少,表明石灰对降低膨胀土膨胀性能的作用很明显,这是因为当膨胀土中加入石灰后,石灰在水的作用下产生 Ca^{2+} ,膨胀

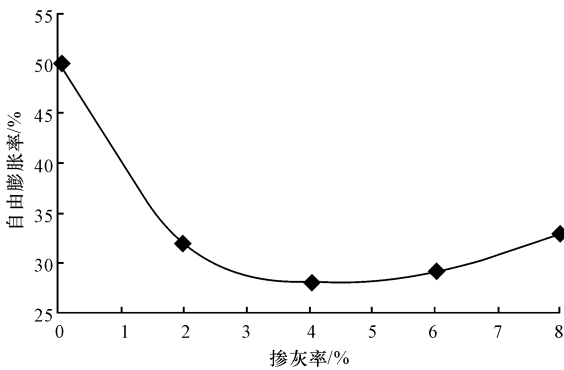


图 7 掺灰率与自由膨胀率关系

Fig. 7 Relationship between lime rate and free swelling ratio

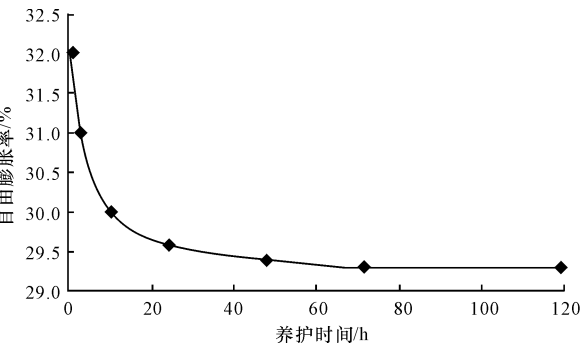


图 8 养护时间与自由膨胀率关系

Fig. 8 Relationship between curing time and free swelling ratio

土中的蒙脱石等矿物成分吸收水分的同时也将水中存在的 Ca^{2+} 吸附到土体颗粒的表面上,同时 Ca^{2+}

与土体发生硬化结晶作用形成一种固化层,阻止水分对外扩散与水体进入,从根本上增加了土体的稳定性。图 7 还显示自由膨胀率并不是单调减少,当掺灰的剂量大于 4% 时自由膨胀率反而随着石灰剂量的增加而略有增加,造成这一现象,笔者认为过多地掺加石灰,造成石灰用量过大,在硬化结晶作用完成以后还存在未完全反应的石灰,石灰的存在造成了土粒的自由膨胀率偏大。

通过图 8 可以看出自由膨胀率在最初的 20 h 降低幅度最大,以后逐渐趋于稳定,在 75 h 以后基本保持不变。通过图 6、图 8 可知,石灰对膨胀土膨胀性能及水稳定性的改善主要在养护时间的前 3 d,超过 3 d 以后,养护时间对膨胀性能的改善作用不明显。

3.3 有荷膨胀试验

为了研究石灰改良膨胀土的有荷膨胀量与石灰掺量及养护龄期之间的关系,笔者进行了相关试验研究。试验土样的击实含水量选择素土干法重型击实的最优含水率,分别选择 0、2%、4% 和 6% 这 4 种掺灰率,试验前 24 h 将要放置试样的透水石放入土样中一起养护 24 h,使得透水石的含水率与土样一致,养护完后,按照规范方法进行相关试验,具体数据见表 3。

表 3 有荷膨胀量试验数据

Tab. 3 Test data of load expansive volume

掺灰率/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最优含水率/%	50 kPa 下线膨胀率	膨胀力/kPa	线膨胀总率	<0.002 mm 颗粒含量/%
0	1.83	16.5	4.10	125.4	8.55	63.20
2	1.75	17.3	1.01	52.6	3.10	18.50
4	1.70	17.9	-0.20	38.3	1.31	9.30
6	1.63	18.8	-0.43	20.1	0.85	8.60

(1)从表 3 的试验结果来看,50 kPa 荷载下的线膨胀率与线膨胀总率随着石灰掺量的增加而减小,掺 2% 石灰后的减小幅度最大,以后增加相同的石灰剂量,50 kPa 下线膨胀率与线膨胀总率的减小幅度依次减小。研究表 3 的线膨胀总率可以发现,掺 2% 石灰的线膨胀总率不能满足路基施工规范的要求,而前文的强度试验结论则表明,掺 2% 石灰后的石灰土强度都能满足路基铺筑的强度要求。这表明,对于石灰土路基的灰剂量选用,采用强度作为灰剂量控制指标不能全面反映路基的铺筑要求,在强

度满足要求的情况下,路基的变形有不满足路基铺筑要求的可能。

(2)小于 0.002 mm 颗粒含量及膨胀力均随着石灰掺量的增加而减小,但减小幅度不一致。在掺灰增量相同的情况下,素土到 2% 剂量的石灰对膨胀性能的改善作用较 2% 到 4% 石灰剂量更明显。因此,在石灰土路基变形性能满足要求的情况下,过多地掺灰不能明显地改善石灰土的变形性能。

综合石灰土的强度与膨胀性试验结论表明,对于石灰改良膨胀土的强度而言,大部分膨胀土只要

掺加2%的石灰,其强度都可以满足路基施工的要求,在改变试验方法的情况下,部分素膨胀土的强度也可以满足要求,但对于石灰改良膨胀土而言,掺加2%石灰后,其50 kPa下的线膨胀率、膨胀力、线膨胀总率等指标均较大,不能满足路基铺筑的要求。鉴于此,笔者认为应该采用膨胀性指标为主,强度指标为辅的方法确定路基施工控制参数。

4 路基施工控制参数的确定方法

鉴于以上研究,笔者认为应按照如下步骤确定石灰改良膨胀土的最优掺灰率和最优施工含水率,即:①进行1 d龄期下石灰改良膨胀土的膨胀性能测定,膨胀性能建议采用自由膨胀率、界限含水率及线膨胀总率等指标,综合确定石灰土的最优掺灰率;②在最优掺灰率下,进行强度试验,确定石灰土的最优施工含水率;③石灰土在最优施工含水率下进行7 d龄期的CBR值、无侧限抗压强度等强度试验,以验证在最优掺灰率下石灰改良膨胀土能否满足路基铺筑的强度要求。若满足要求,确定结束。若不满足要求,重新根据①、②确定最优掺灰率及最优施工含水率,直至③满足要求为止。

5 结 语

(1)石灰改良膨胀土的CBR值、无侧限抗压强度与初始含水率的关系曲线类似于击实曲线,存在最优拌灰的含水率,这一含水率基本在 $w_{op}+(2\%\sim 4\%)$ 。

(2)随着掺灰率的增大,石灰改良膨胀土的液限减小,塑限稍增大,塑性指数减小较大,且增大幅度呈现前快后慢的趋势。在养护时间方面石灰对界限含水量的改善作用较快,在最初的24 h内就已经改善完成,增加龄期对其影响不明显。

(3)随着掺灰率的增大,自由膨胀率先减小后增大,养护时间对自由膨胀率的影响主要在前24 h,超过24 h后养护时间对自由膨胀率影响不明显。

(4)随着掺灰率的增大,膨胀土的膨胀性能有了明显的改善,但在掺灰率增量相同的情况下,膨胀性能的提高不一致,掺灰率较小时,增加相同的石灰,膨胀性能提高较多;在掺灰率较大时,增加石灰掺量对膨胀土膨胀性能的改善不明显,甚至会增加膨胀

土的自由膨胀率。

(5)采用强度为主要指标确定掺灰率存在缺陷,本文采用膨胀性指标为主,强度指标为辅的方法综合考虑养护时间、初始含水率等因素确定最优施工含水率及掺灰率。

参考文献:

References:

- [1] 廖世文. 膨胀土与铁道工程[M]. 北京:中国铁道出版社,1984.
LIAO Shi-wen. Expansive soils and railway engineering[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1984. (in Chinese)
- [2] 郭军辉,阎长虹,夏良斌,等. 某一级公路路基填土膨胀性试验[J]. 地球科学与环境学报,2007,29(1): 85-89.
GUO Jun-hui, YAN Chang-hong, XIA Liang-bin, et al. Experimental study on swelling property of subgrade soil in a first class highway[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007, 29(1): 85-89. (in Chinese)
- [3] 郑 军,阎长虹,夏文俊,等. 盱眙黏土团粒大小对填料水稳性影响试验[J]. 地球科学与环境学报,2008,30(4): 412-415.
ZHENG Jun, YAN Chang-hong, XIA Wen-jun, et al. Experimental study on size effect of aggregate derived from clay in Xuyi on water stability of filled material [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2008, 30(4): 412-415. (in Chinese)
- [4] 毛新虎. 公路膨胀土路堑边坡防护方案探讨[J]. 地球科学与环境学报,2004,26(4): 49-53.
MAO Xin-hu. Discuss of cutting slope treatment project for expansive soil on highway [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2004, 26(4): 49-53. (in Chinese)
- [5] 查甫生,刘松玉. 合安高速公路膨胀土掺石灰试验研究[J]. 公路交通科技,2006(1): 36-39.
ZHA Fu-sheng, LIU Song-yu. Experiment study on the effect of lime on expansive soils of Hean expressway [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006(1): 36-39. (in Chinese)
- [6] 查甫生,刘松玉. 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. Experiment on improvement of expansive clay with line-fly ash[J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2007, 37(2): 339-344. (in Chinese)
- [7] 陈爱军, 张家生. 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(2): 91-95.
- CHEN Ai-jun, ZHANG Jia-sheng. Experiment on unconfined compressive strength of lime improving expansive clay[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2011, 31(2): 91-95. (in Chinese)
- [8] 杨明亮, 陈善雄. 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. 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] 郭爱国, 刘观仕. 高速公路建设中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. Testing study on properties of mid-expansive soil for expressway construction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 397-403. (in Chinese)
- [10] 崔伟, 李华荣. 石灰改性膨胀土工程性质的试验研究[J]. 岩土力学, 2003, 24(8): 606-609.
- CUI Wei, LI Hua-luan. Experimental research on engineering character of improved expansive soil with lime[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(8): 606-609. (in Chinese)
- [11] 谭松林, 黄玲. 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. Engineering properties of expansive soil mixed with lime at Yichang-Jingmen expressway[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 17(3): 421-425. (in Chinese)
- [12] 李雄威, 孔令伟. 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. Strength characteristics of expansive soil considering effect of hydrous state[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(12): 3193-3198. (in Chinese)
- [13] 马新, 孙友宏. 高速公路路基膨胀土改性处理的实验研究[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2005, 26(3): 213-217.
- MA Xin, SUN You-hong. Study on the experimental of modified treatment on the expansive soil for expressway bed[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2005, 26(3): 213-217. (in Chinese)
- [14] 杨和平, 赵鹏程. 膨胀土填料改进 CBR 试验方法的提出与验证[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1751-1757.
- YANG He-ping, ZHAO Peng-cheng. Suggestion and verification on modified CBR test method for expansive soils fill[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(12): 1751-1757. (in Chinese)
- [15] 杨和平, 湛文涛. 南宁膨胀土做路堤填料的土性试验[J]. 中国公路学报, 2011, 24(1): 1-7.
- YANG He-ping, ZHAN Wen-tao. Soil property testing of Nanning expansive soil as embankment filler[J]. China Journal of Highway and Transport, 2011, 24(1): 1-7. (in Chinese)
- [16] 李志祥, 胡瑞林. 改良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. 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)
- [17] 郭爱国, 孔令伟. 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. On determination of optimum water content of lime-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(3): 517-521. (in Chinese)
- [18] Narasimha J K, Rajasekaran G. Reaction products formed in lime-stabilized marine clays[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 122(5): 329-336.
- [19] Lees G, Abdelkader M O, Hamdani S K. Effect of the clay fraction on some mechanical properties of lime-soil mixtures[J]. Highway Engineer, 1982, 11(1): 2-9.

