

文章编号: 1000-7598-(2008) 08-2209-06

消石灰对膨胀土团粒化作用的研究

程 钰¹, 石名磊², 周正明¹

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 武汉 430071; 2. 东南大学 岩土工程研究所, 南京 210096)

摘 要: 用消石灰作为外掺剂, 进行了两种不同的膨胀土的对比试验。研究了不同灰剂量和龄期对膨胀土“团粒化”作用效果的影响。对于消石灰改性膨胀土而言, 不同性质膨胀土界限含水率的改性效果不尽相同。强膨胀土的改性效果相对较为明显, 而弱膨胀土的改性效果相对较差, 其改性效果存在一个下限。在膨胀土路基的施工中, 二次掺灰工艺的闷料周期可以相对缩短。这样不仅有利于加快施工进度, 同时对提高石灰改良土碾压质量和加固效果十分有利。

关 键 词: 膨胀土; 消石灰; 颗粒分析; 石灰改性; 团粒化

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Aggregation effect of slaked lime on treated expansive soils

CHENG Yu¹, SHI Ming-lei², ZHOU Zheng-ming¹

(1. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China;

2. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Laboratory experiments were carried out to investigate the aggregation effect of lime dosage and age on two types of expansive soils treated with slaked lime. It was found that the treating effects are rather different for the expansive soils of different liquid-plastic limit. The treating effects on highly expansive soils are much greater than those on the weak expansive soils. The treating effects are mainly completed within the first 24 hour period. As such, the resting time period after the second mixing is suggested to be reduced in engineering practices, which is very beneficial for soil density and strength improvement.

Key words: expansive soils; slaked lime; particle size analysis; lime treating; aggregation

1 引 言

膨胀土是一种吸水膨胀、失水收缩、胀缩变形显著的黏性土, 膨胀土的特性对建筑物尤其是轻型建筑有比较强的破坏作用^[1], 因此要减少膨胀土对建筑物的破坏, 必须了解膨胀土的物理特性, 并采取措​​施加以处理。

膨胀土胀缩变形的本质是: 土粒中的亲水性矿物在水的作用下产生的吸水膨胀和失水收缩, 其中亲水性矿物成分主要是由蒙脱石组成的。蒙脱石是在碱性介质和湿热的环境条件形成的, 其胀缩变形是最为显著的特性。蒙脱石矿物颗粒晶层之间是一种平行板状结构, 层间以氧原子与氧原子相联, 仅靠分子间的相互连接, 结合力很弱, 水分子很容易进入晶胞之间使晶胞距离增大, 所以蒙脱石的晶格

是活动的, 吸水后体积会发生膨胀, 脱水后则可收缩, 这种胀缩性的反复作用对工程的危害非常大^[2]。衡量土中黏土矿物成分多少的两个重要宏观指标就是界限含水率和黏粒含量, 研究膨胀土中这两种指标的变化, 对于了解膨胀土工程性质是十分有意义的。

工程上对弱膨胀土采用控制含水率和密度的方法可以部分消除其胀缩性, 而中性以上的膨胀土, 用上述方法就不能达到消除其胀缩性的目的了, 必须化学改性处理。已有学者对化学改性处理膨胀土的方法已经做了大量的研究, 如掺石灰、水泥、粉煤灰、氯化钠、氯化钙和磷酸等来稳定膨胀土^[3, 4], 其中用掺石灰处理膨胀土是最普遍和有效的方法。石灰能显著降低膨胀土膨胀性, 包括液限、塑性指数、黏粒含量等物理指标。在膨胀土中加入石灰后

灰土之间会发生复杂的反应：主要是石灰中的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 与土中的 Na^{+} 、 K^{+} 进行离子交换，土颗粒表面的带电量增加。从而黏粒的含量和塑性指数都显著降低，与此相伴的是膨胀性的降低^[5-7]。另外一个主要的作用就是石灰的灰结作用，该作用会在较长时间内才能发挥作用，因此，本文主要从膨胀土及其消石灰改性之后，小界限含水率和黏粒含量两种宏观指标的变化来研究消石灰对膨胀土改性的微观机制。

界限含水率 (100 g/20 mm) 是反映土体中土粒与液相 (水) 之间灵敏性的指标，用液限 W_L 、塑限 W_P 和塑性指数 I_p 之间的关系来表征的。膨胀土的液限和塑性指数越大，持水能力越强、水稳定性就越差、胀缩性能也越大，相反，液限和塑性指数的减小将有利于膨胀土的水稳定性增加和强度增强。通过分析这些指标的变化来研究土粒表面活性、亲水能力的变化，是从一个侧面研究胀缩性的变化。粒度成分是反映膨胀土物质组成基本特性的指标，如果土中小于 0.002 mm 的黏粒含量较高，则比表面积大，亲水性强，膨胀性就可能较大，因此膨胀土的黏粒含量指标可以用于评价膨胀土内在特性。

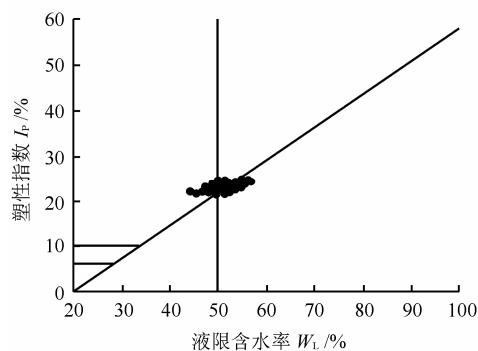
目前在高速公路的路基施工中较为普遍采用的是二次掺灰工艺，要求保证 3 d 以上的闷料周期，以作为膨胀土掺石灰“砂化”控制技术要求^[8]。笔者认为，这种称谓是不合适的，前者所说的“砂化”意思就是粒径较小的黏土颗粒聚集成粒径较大的颗粒，这与形成真正砂粒的过程完全不同。因此，将这一过程称谓“团粒化”更为恰当。

2 基本物理特性

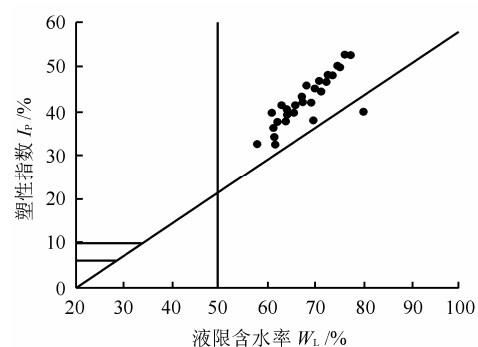
(1) 土样。取自合肥某高速公路 (HF) 沿线的弱膨胀土和蚌埠某高速公路 (BM) 沿线的强膨胀土，其基本物理特性见表 1，在标准塑性图上的分布分别见图 1。由膨胀土在塑性图上的分布可以看出，合肥膨胀土试验数据主要分布在膨胀土和非膨胀土的边缘，定义为高液限膨胀土。从蚌埠膨胀土在标准塑性图上的分布可以定义为中强膨胀土。通过比较合肥膨胀土的液塑限较低，分布比较均匀，相比之下蚌埠膨胀土的液塑限较高，分布离散性较大。

表 1 HF 与 BM 土样界限含水率汇总
Table 1 The physical indices of HF and BM

取土地点	界限含水率 /%			黏粒含量 /%	自由膨胀率 /%
	液限 W_L	塑限 W_P	塑性指数 I_p		
HF	55.7	24.4	31.3	30.8	51.5
BM	74.7	23.6	51.1	42.2	95.5



(a) 土样 HF



(b) 土样 BM

图 1 膨胀土塑性图

Fig.1 The plasticity chart

按照规范^[9]规定，膨胀土的自由膨胀率大于或等于 30 %且小于 50 %时，判定为弱膨胀潜势土。一般认为，液限大于 50 %、塑性指数大于 20 的土属于高液限土，因此可以判定该试验用膨胀土为高液限弱膨胀土。

(2) 石灰。试验所用的消石灰有效成分的检测结果见表 2。按照《建筑生石灰粉》和《水泥化学分析方法》标准方法^[10, 11]测试，均属于优等品。

表 2 消石灰有效成分

Table 2 The effective constitution of hydrate lime

有效成分	有效成分含量 /%	
氧化钙 (CaO)	68.86	71.87
氧化镁 (MgO)	3.01	

(3) 石灰改性指数。为了评价石灰对膨胀土改性的效果，本文提出了石灰改性指数 I_{lt} ，可以定义为

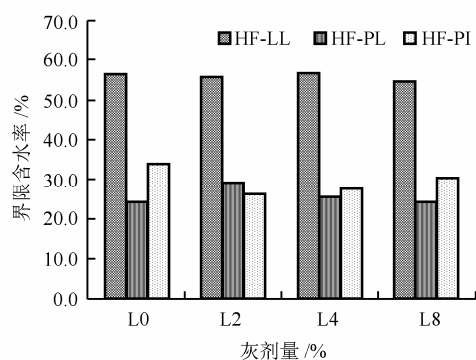
$$I_{lt} = I_l / I_s \quad (1)$$

式中： I_{lt} 为膨胀土的石灰改性指数； I_l 为掺加石灰改性之后的试验指标； I_s 为未改性之前素土试样的指标。当 $I_{lt} = 1.0$ 时，表明石灰对膨胀土没有改善效果， I_{lt} 的值距离 1.0 越远，说明石灰对膨胀土的作用效果越好。

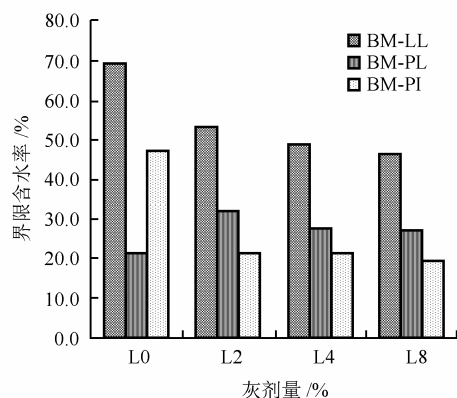
3 试验及其分析

3.1 界限含水率

首先把土样和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 8 % 共 4 种灰剂量, 加入适量 (约为塑限) 的蒸馏水拌合均匀, 并将灰土在标准条件下闷料养护达式 24 h, 然后按照规范^[12]的规定 (100 g/20 mm) 的标准, 利用液塑限联合测定仪进行试验, 试验结果如图 2 所示, 图中 LL 代表液限, PL 代表塑限, PI 代表塑性指数。另外, 为了了解养护龄期对膨胀土石灰“团粒化”的作用, 选择合肥的膨胀土进行不同龄期 (1, 12, 24, 48, 72 h 和 144 h) 的界限含水率试验。



(a) 土样 HF



(b) 土样 BM

图 2 界限含水率与灰剂量关系

Fig.2 Relationship between limit water content and lime dose

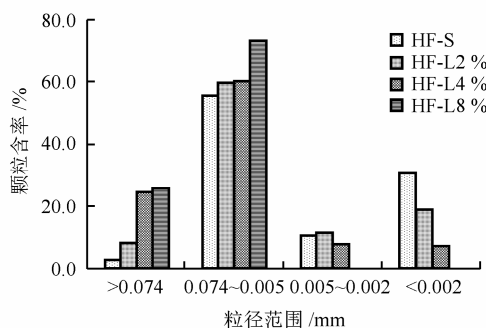
从试验数据可以看出, 掺消石灰之后各土样的液限和塑性指数都已有所下降, 但是对各土样界限含水率指标的改善效果却不尽相同。根据不同石灰掺量测试的合肥膨胀土界限含水率变化柱状图可以看出, 界限含水率随着石灰剂量的增加具有一定的规律性, 灰剂量为 0~8 % 时液限略有降

低, 甚至几乎没有变化, 见图 2(a), 将其与蚌埠膨胀土的界限含水率试验数据对比可见, 液限较高的蚌埠膨胀土其液限和塑性指数消石灰改性效果相对十分明显, 灰剂量为 8 % 时液限降低了近 40 %, 见图 2(b)。液限的降低说明膨胀土亲水能力大为下降, 且在一定灰剂量范围内, 随着灰剂量增加, 液限和塑性指数都相应降低, 塑限相应提高。然而液限较低的合肥膨胀土效果相对不明显, 且随着灰剂量的增加, 液限、塑限和塑性指数变化的规律性也不强。

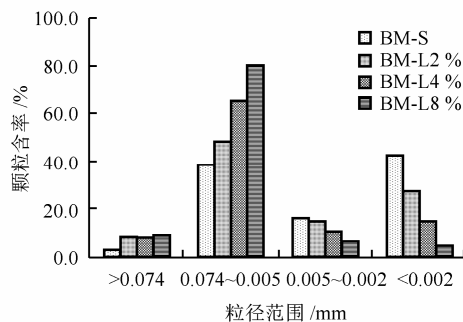
从灰剂量的角度看, 随着灰剂量的增加液限和塑性指数都在下降, 高液限膨胀土的液限下降较为明显, 相对而言, 液限较低的膨胀土则不是很明显。在灰剂量 4 % 之后的再增大灰剂量, 对膨胀土的界限含水率的指标改善不再明显。较高灰剂量 (8 %) 对于改善膨胀土的液塑限性质已经不是太明显。

3.2 颗粒分析

按照与界限含水率相同的方法制备试样, 按照试验规范中移液管法进行颗粒分析试验, 试验结果如图 3 所示。



(a) 土样 HF



(b) 土样 BM

图 3 颗粒级配分布柱状图

Fig.3 The mechanical composition distribution

从试验结果来看, 两种膨胀土的试验结果大同小异。掺加消石灰改良膨胀土对粒组分布的影响

主要表现在黏粒组 ($< 0.002 \text{ mm}$) 含量降低, 粉粒与相对较大粒组 ($0.074 \sim 0.002 \text{ mm}$) 的含量增加 (图 3), 这一现象的深入揭示尚待研究。黏粒组含量的降低, 显然是石灰与土之间离子交换作用的效果, 而粗粒含量的增加, 则可能是灰土之间的多种作用形成集聚体含量增加的缘故。在 8 % 灰剂量的范围以内, 粉粒组 ($0.074 \sim 0.005 \text{ mm}$) 的含量都是最高的, 且随灰剂量的增大而粉粒组的含量显著增加。同时, 黏粒组含量则随之相应减小, 有的甚至减小至 0, 这说明消石灰对膨胀土黏粒的聚凝作用十分明显。从粒组分布改善的角度出发, 掺加较高的灰剂量 (8 %) 是非常合理的, 因为高灰剂量的对黏粒减小的最为明显。

对图表数据的分析可以看出, 掺加石灰改良膨胀土后, 在灰土联结物的作用下土中的黏粒多集聚成粉粒或更大的颗粒, 因此膨胀土的粒度成分发生了显著变化, 黏粒急剧减少。在消石灰生成物的联结作用下, 大部分黏粒聚集成团的粒粒多集中于 $0.074 \sim 0.005 \text{ mm}$ 之间。黏粒的凝聚化是促使膨胀土膨胀性降低的主要原因之一^[13]。

3.3 自由膨胀率

按照与前两文中试验相同的方法制备试样, 进行试验规范试验, 试验结果如表 3 和图 4 所示。

表 3 不同灰剂量土样的自由膨胀率

Table 3 Results of free swell test under different lime doses

土样类型	灰剂量 / %			
	0	2	4	8
HF	54.6	22.2	19.2	27.8
BM	95.5	23.5	12.3	19.5

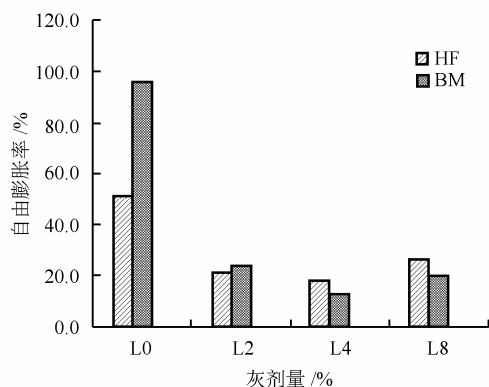


图 4 灰剂量与自由膨胀率关系图

Fig.4 Chart of free swell test under different lime doses

掺加消石灰后膨胀土的自由膨胀率明显下降, 两种土样都降到 30 % 以下。随着灰剂量的增加自

由膨胀率都出现了先下降后升高的趋势, 在较低灰剂量时 (2 %~4 %) 各土样的自由膨胀率都在 20 % 左右, 增加灰剂量达到 8 % 时, 灰土的自由膨胀率反而有所升高。产生这种现象的原因较为复杂, 笔者认为主要应该是当少量石灰掺入膨胀土后灰土之间发生作用形成黏结, 使土粒粒径增大, 而相应孔隙直径也相应增大, 从而在内部消耗掉了由于土粒吸水产生的膨胀, 降低了土样的膨胀性。当较多的石灰加入土样中, 石灰的用量出现了过剩, 剩余的石灰填充于大土颗粒之间, 内部不能抵消掉土粒产生的吸水膨胀, 使得整个土样的体积变大, 其宏观表现就是自由膨胀率变大, 由此可以看出, 并不是灰剂量越大越好。从自由膨胀率来看, 灰剂量不宜过大或过小, 适量控制灰剂量 (4 % 左右) 对控制膨胀土的自由膨胀率是很有必要的。

3.4 试验结果分析

膨胀土的界限含水率是土粒特性的反映, 液限较高时土中黏粒含量也就相对较高。掺加石灰后, 石灰中有效成分与黏粒结合发生的一系列物理化学反应使黏粒的含量降低到一定水平。液限较低的土, 土中的黏粒含量和其持水能力都相对较低, 加入石灰之后土的黏粒含量有所下降, 下降到和液限较高土样加石灰之后黏粒含量相似的水平。比较而言石灰对液限较高的膨胀土 (BM) 的作用较为明显, 而对液限相对较低的膨胀土 (HF) 的作用就不是太明显, 因此可以认为消石灰对液塑限的降低作用是有一个下限的。

液限相对较高的膨胀土在掺石灰改良后的显著下降; 而液限较低合肥膨胀土界限含水率的改善却不是很明显。合肥膨胀土界限含水率改善不明显而粒度成分变化却很显著, 这种现象似乎是相互矛盾的。当黏土掺入石灰之后, 石灰与土中黏粒发生相互作用, 由于黏土颗粒具有很大的比表面积, 含量越高, 土颗粒表面电荷所形成的表面能就越大, 相应的离子交换作用进行得更为显著。离子交换的结果使土粒双电层中的扩散层变薄, 结合水减少, 从而, 使黏粒间的结合力增强。反映在界限含水率中就是膨胀土塑限的降低和收缩界限的提高, 也反映了土样持水能力的下降。随着黏粒含量的增加土样液限也在同步增大, 但是石灰对界限含水率和粒度成分的改善效果却是不尽相同, 即液限和塑性指数下降较小而黏粒含量下降十分显著。

膨胀土的高液限是由于黏粒表面的弱结合水引起, 掺加石灰之后黏粒含量减小、粉粒含量增加、比表面积减小, 但是此时的毛细现象仍然比较活

跃,毛细水的弯液面和土粒接触处的表面引力反作用土粒上,土粒受这种表面引力的作用而挤紧,具有微弱的凝聚力,这种毛细水压力使土粒聚合在一起,使灰土呈现一种潜在的塑性,可以解释为什么掺加石灰之后膨胀土液塑限的改善效果不如粒度成分的改善效果好。

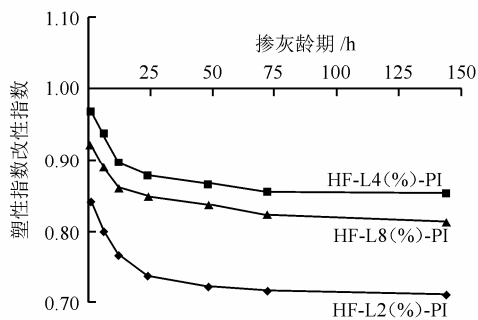


图5 塑性指数改性指数与龄期关系

Fig.5 Relationship between plasticity index improvement ratio and age

从养护龄期影响规律来看,闷料养护龄期对消石灰改良膨胀土界限含水率和黏粒含量的改善效果有一定的影响。从试样的塑性指数和黏粒含量的指标来看,在掺消石灰后最初的24 h,塑性指数的改性指数都随龄期显著下降(图6),随着龄期的增大,当龄期大于24 h之后其改性指数的下降幅度比较平缓,基本保持不变。黏粒含量的改性指数与界限含水率的变化趋势比较相似。所有的土样都在1.0之下,有的甚至接近0,说明石灰对粒度成分的改善效果十分显著。随着龄期的增长黏粒组含量整体都是下降趋势,且刚开始阶段24 h的下降最为显著,这与液限和塑性指数随龄期降低趋势一致。因此可以认为,消石灰对膨胀土界限含水率性质的改善作用是非常迅速的,在最初的24 h之内就已经完成,以后的各养护龄期测得的数据变化不大。

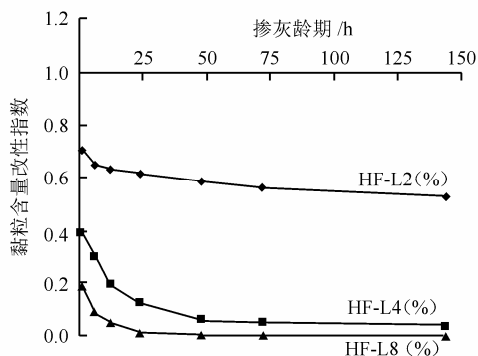


图6 黏粒含量改性指数与龄期关系

Fig.6 Relationship between clay content reduction ratio and age

由图7中龄期与自由膨胀率改性指数的变化可以看出,所有的数据点都在1.0之下,说明石灰对降低自由膨胀率的效果是明显的。膨胀土掺入消石灰之后,在水的作用下产生大量钙离子。而膨胀土颗粒中含有蒙脱石-伊利石等大量矿物成分,它们在吸收水分的同时,也把 Ca^{2+} 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粒子或分子吸附到颗粒表面,经硬化结晶作用形成了一种阻止膨胀土颗粒内水分外散和颗粒外水分内浸的固化层。从而增加了颗粒自身的稳定性,这是石灰改善膨胀土膨胀性的机理^[14]。随着龄期的增长这种固化层的作用会进一步增强,而龄期对进一步降低膨胀土的自由膨胀率效果作用很小。这一结果表明,灰土之间的作用过程是十分迅速的,这与塑性指数以及黏粒含量随龄期的变化趋势是一致的,也从另一个方面证明了缩短“团粒化”周期的控制技术的科学性。

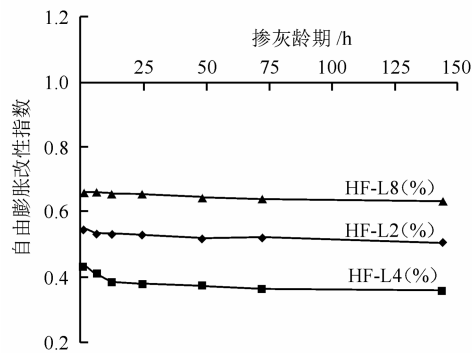


图7 自由膨胀率改性指数与龄期关系

Fig.7 Relationship between free swell reduction ratio and age

目前在高速公路的路基施工中较为普遍采用的二次掺灰工艺,要求保证3 d以上的闷料周期,以作为膨胀土掺灰“团粒化”控制技术要求。但是单从界限含水率和粒度成分的角度,笔者认为这是缺乏科学依据的,因此取土场的“团粒化”过程,在考虑翻拌均匀性要求基础上可以连续翻拌,达到粉碎要求之后,即可上路进行二次掺灰以缩短“团粒化”周期,这样不仅有利于加快施工进度,同时对提高石灰改良土碾压质量和加固效果十分有利,尤其是在膨胀土天然含水率相对不是很高的情况下。在合肥某高速公路和蚌埠高速公路石灰改良膨胀土路堤填筑的工程实践中都证明了这一控制技术的正确性。

5 结 论

(1) 对于消石灰改性膨胀土而言,不同性质得膨胀土界限含水率的改善效果不尽相同。强膨胀

土的改善效果相对较为明显,而弱膨胀土的改善效果相对较差。可以认为,消石灰对液塑限的降低作用是有一个下限的。

(2) 二次掺灰工艺中,要求保证 3 d 以上的闷料周期作为膨胀土“团粒化”技术控制标准可以相对缩短。在考虑翻拌均匀性的基础上可以连续翻拌,达到粉碎要求之后,即可上路进行二次掺石灰以缩短“团粒化”周期,这样不仅有利于加快施工进度,同时对提高石灰改良土碾压质量和加固效果十分有利。

参考文献

- [1] 孙长龙,殷宗泽. 膨胀土性质研究综述[J]. 水利水电科技进展, 1995, 15 (6): 10—14.
SUN Chang-long, YIN Zong-ze. The summarizing statement properties of expansive soils[J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 1995, 15(6): 10—14.
- [2] 张梅英,谭罗荣,邵悟敏. 南方膨胀土的微结构特性与工程性质研究[J]. 岩土力学, 1993, 13 (1): 67—81.
ZHANG Min-ying, TAN Luo-rong, SHAO Wu-min. Microstructure and engineering properties of expansion soil from south china[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1993, 13(1): 67—81.
- [3] ABDULJAUWAD S N. Improvement of plasticity and swelling potential of calcareous expansive clays[J]. **Geotechnical Engineering Journal**, 1995, 26(1): 3—16
- [4] 崔伟,李华奎,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.
- [5] BELL F G. Lime stabilization of clay minerals and soils. **Engineering Geology**, 1996, 41(4): 223—237.
- [6] LOCAT J, TREMBLAY H, LEROUUEIL S. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 1996, 33(4): 654—669.
- [7] 贺行洋,陈益民,张文生,等. 膨胀土化学固化现状及展望[J]. 硅酸盐学报, 2003, 31 (11): 1 101—1 106.
HE Xing-yang, CHEN Yi-min, ZHANG Wen-sheng, et al. Research and development of chemical consolidation of expansive soil[J]. **Journal of the Chinese Chemical Society**, 2003, 31(11): 1 101—1 106.
- [8] 钱玉林,卜龙章,胡顺洋,等. 石灰稳定膨胀土的效用及其施工质量控制[J]. 岩土力学, 2002, 23 (3): 325—328.
QIAN Yu-ling, BU Long-zhang, HU Shun-yang, et al. Effectiveness of stabilized expansive lime soil and construction quality control[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2002, 23(3): 325—328.
- [9] 公路部公路科学研究所. JTJ033—95 公路路基施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1996.
- [10] 公路部公路科学研究所. JTJ051—93 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 1993.
- [11] 井昌远,期燕明. JC/T482.2—92 建筑生石灰粉[S]. 北京: [s. n.], 1992.
- [12] 中国标准出版社. GB/T176—1996 水泥化学分析方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [13] 张小平,施斌,陆现彩. 石灰改良膨胀土微孔结构实验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, 25 (6): 761—763.
ZHANG Xiao-ping, SHI Bin, LU Xian-cai. Experimental study on micro-pore structure of expansive soil improve by lime[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2003, 25(6): 761—763.
- [14] AL-MHAIDIB A A, AL-SHAMRANI. Expansive characteristic of expansive soil consolidated by lime[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1996, 27(2): 87—93.

自然灾害综合防御技术研究重点确定

“十一五”期间,我国将以地震、暴雨、洪水、崩塌、滑坡、泥石流、风暴潮等重大突发性自然灾害为重点,积极开展自然灾害综合防御技术研究。我国将开发未来极端气候事件和重大气象灾害预测技术,研究未来 5 年至 10 年内我国极端天气事件和重大气象灾害的变化规律和形成机理,建立相应的监测预测、预警、影响评价和灾害风险管理系统。

在洪涝灾害风险评估与预测方面,我国将重点开展气候变化条件下未来洪水风险评估技术研究,开展全流域洪水水文?气象预测技术和应急管理技术,开展大坝安全关键技术开发,提高防洪减灾的技术能力。

在地震灾害防御技术方面,我国将重点开展地震立体观测技术、强地震综合预测方法、分区地震预警技术等研究,开发地震灾情快速获取、危险源识别与评估、救灾智能指挥等技术,研制灾情监控装备、现场搜索装备,为地震防御和应急救援提供强有力的技术支撑。在地质灾害防御方面,我国将进行特大型灾难性滑坡的突发机理及成灾过程研究,建立灾害空间识别、状态预警和时间预报标准,开发地质灾害监测预警、风险评估和治理关键技术,提升我国地质灾害防灾减灾能力。