

DOI: 10.16285/j.rsm.2015.03.004

重塑石灰土的强度恢复方法与机制初探

谈云志, 喻 波, 刘 云, 左清军, 胡莫珍, 郑 爱

(三峡大学 三峡地区地质灾害与生态环境湖北省协同创新中心, 湖北 宜昌 443002)

摘 要: 石灰稳定土工程翻修改造后会产生大量的石灰土弃渣, 为避免污染环境和节约工程投资, 需重新利用破碎的石灰土进行填筑。但石灰土破碎后强度急剧降低, 需要添加胶凝材料提升其力学性能。以重塑石灰土为研究对象, 通过添加 5% 石灰或水泥进行再改良, 对比分析两种再改良土的强度和压缩性等力学指标, 结果表明, 石灰再改良土的力学特性优于水泥再改良土。借助粒度分析、电镜扫描、X 衍射和热重分析试验手段揭示了石灰再改良土性能优越的内在机制, 发现石灰再改良土中的石灰和石灰土团粒能形成很好的胶结; 但水泥未能和石灰土团粒形成有效胶结, 自身形成了边-面和边-边接触的片状多孔架构。重塑石灰土残存的氢氧化钙是引起水泥再改良土性能劣于石灰再改良土的主要诱因。

关 键 词: 重塑石灰土; 强度再生; 红黏土; 微观形貌

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2015)03-633-07

Strength recovered method and mechanism for remolded lime soil

TAN Yun-zhi, YU Bo, LIU Yun, ZUO Qing-jun, HU Mo-zhen, ZHENG Ai

(Collaborative Innovation Center for Geo-hazards and Eco-Environment in Three Gorges Area, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: There are large amounts of crushed lime stabilized soils after the rebuilding of engineering projects which are constructed with limed soils many years ago. It's necessary to reuse them to avoid environmental pollution and to save construction investment. But the strength of crushed lime soil would significantly reduce. So, the gel materials are added to enhance the mechanical properties of crushed lime soil. The remolded lime soil is re-stabilized through adding 5% lime or cement. Comparisons of strength and compressibility between the lime re-stabilized soil and cement re-stabilized soil are made. The results show that the mechanical properties of lime re-stabilized soil are better than those of cement re-stabilized soil. Furthermore, it reveals the internal mechanism of superior performance for lime re-stabilized soil with particle size analysis, scanning electron microscope, X-Ray diffraction and thermo gravimetric analysis tests. It is found that the lime and limed-aggregates in lime re-stabilized soil can be cemented up well. But cement fails to form effective cementation with limed-aggregates. The cement re-stabilized soil forms edge-plane and edge-edge contact porous structure. The Calcium hydroxide remained in the remolded lime soil is the major factor which makes the property of cement re-stabilized soil inferior to the lime re-stabilized soil.

Keywords: remolded lime soil; strength recovered; laterite soil; microtopography

1 引 言

添加石灰或水泥等材料可以提高土体的强度和水稳定性, 特别是对于膨胀土、红黏土、软土等这类特殊土具有十分显著的效果^[1-5]。但随着工程服役期限逼近或工程过早发生灾变, 早期利用石灰土处治的工程将面临重建、改造等问题。谈云志等^[6]对重塑石灰土的力学特征与性能劣化机制开展了相关研究, 发现重塑过程中破坏了石灰土的胶结强度, 致使黏聚力部分丧失, 从而降低了其力学性能。然

而, 石灰稳定土呈碱性, 如果随地弃置将严重污染周边土壤; 另外, 需寻找其他填筑材料进行置换, 显然既不环保又不经济。那么如何恢复石灰土的强度, 选择何种外添剂能有效提高重塑石灰土的力学强度呢? 由于石灰稳定土工程还未进入重建、翻修的鼎盛时期, 故有关石灰稳定土再利用的研究成果鲜有报道。

破碎后的石灰稳定土黏粒(粒径 $<0.002\text{mm}$)含量由改良前的 31.5% 下降至改良后的 5.1%, 出现了明显的“砂化”现象^[6]。而“二次掺灰”施工工艺

收稿日期: 2014-06-08

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(No.51009084); 博士后科学基金项目(No.2013M542057); 三峡大学土木与建筑学院创新基金项目(No.CX2014001)。

第一作者简介: 谈云志, 男, 1979 年生, 博士, 副教授, 主要从事特殊土方面的教学与科研工作。E-mail: yztan@ctgu.edu.cn

就是利用焖料过程降低黏土的天然含水率,充分利用其“砂化”特性提高石灰土的碾压性能^[7-9]。因此,石灰稳定土再利用技术的研究可以借鉴“二次掺灰”的基本原理进行探索,但到底是继续添加石灰还是水泥进行改良,还没有明确的结论。

为此,论文以破碎的石灰稳定土(简称重塑石灰土)为研究对象,分别添加石灰和水泥进行再次改良(简称石灰再改良土和水泥再改良土),对比分析石灰再改良土、水泥再改良土、重塑石灰土的工程特性,借助粒度分析、扫描电镜和 X 射线衍射等试验揭示重塑石灰土的强度再生机制,为重塑石灰土的再利用提供理论参考依据。

2 试验方案

2.1 试验材料

重塑石灰土是由红黏土添加 4% 的石灰改良养护完成后经过人工破碎而成。

表 1 试样的物理性质^[6]

Table 1 Physical properties of specimens

试样	土粒相对密度	液限 /%	塑限 /%	最大干密度 /(g/cm ³)	最优含水率 /%	黏粒含量 /%
石灰土	2.66	49.4	38.6	1.44	32.1	5.1

试验用石灰的 CaO 含量为 73.4%, MgO 含量为 1.5%, 烧失量为 25.1%, 属于优质石灰; 试验用水泥为普通硅酸钙水泥。

2.2 试样制备

将石灰土试样用橡胶锤破碎后过 2 mm 孔径的筛, 分别掺 5% 石灰和 5% 水泥后制备土样放在保湿箱中养护 7 d。石灰再改良土和水泥再改良土的制样干密度分别为 1.30、1.34 g/cm³, 试样含水率为最优含水率 32.1%。

具体制样步骤如下: ①根据最优含水率配制土样, 用塑料袋密封放置保湿箱内静置 7 d; ②根据干密度和初始含水率计算每个试样的湿土质量后, 将称好的土样倒入预先定制好的钢模内进行静压成型; ③试样成型后用密封袋封装好, 再次放入保湿箱内以供试验所用。

压缩和直剪试验用试样为环刀样, 其尺寸为 $\phi 61.8$ mm、高 20 mm; 无侧限抗压强度试验用试样为圆柱样, 其尺寸为 $\phi 50$ mm、高 100 mm。

2.3 试验方法

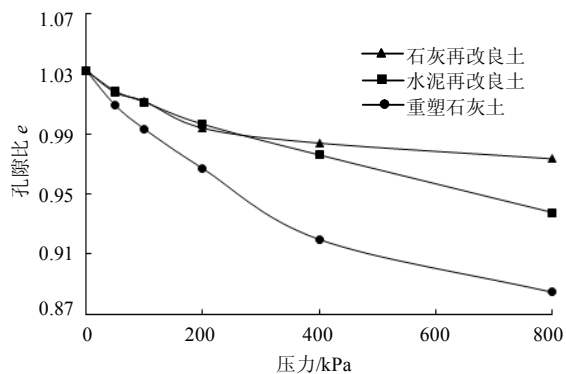
参照《公路工程无机结合料稳定材料试验规程 JTG E51—2009》^[10]、《公路土工试验规程 JTG E40

—2007》^[11]等规范, 从土体的压缩特征、无侧限抗压强度、直接剪切强度角度研究石灰再改良土、水泥再改良土以及重塑石灰土的工程力学特性, 试验时试样保持制样时的湿度状态; 宏观力学试验结束后把试样按照粒度分析、扫描电镜和 X 射线衍射试验的要求制备完成后进一步开展微观试验。

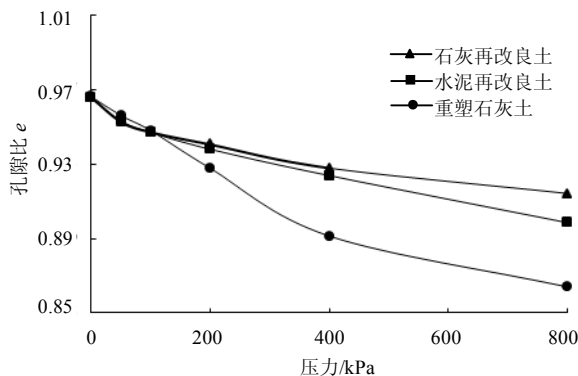
3 试验结果分析与讨论

3.1 压缩特性

重塑石灰土、石灰再改良土和水泥再改良土的压缩曲线如图 1 所示。



(a) 干密度为 1.30 g/cm³



(b) 干密度为 1.34 g/cm³

图 1 e-P 曲线

Fig.1 e-P curves

为进一步分析两种再改良土的压缩特性, 计算了压缩系数, 如表 2 所示。

表 2 试样压缩系数

Table 2 Compressive coefficients of specimens

干密度/(g/cm ³)	试样类别	压缩系数 a_{1-2}
1.30	石灰再改良土	0.12
	水泥再改良土	0.15
	重塑石灰土	0.32
1.34	石灰再改良土	0.11
	水泥再改良土	0.12
	重塑石灰土	0.25

从图1可以看出, 应力0~200 kPa范围内, 石灰再改良土与水泥再改良土压缩量基本相同, 当应力超过200 kPa以后至800 kPa时, 前者的压缩量明显要低于后者的压缩量, 后者的压缩曲线变得陡峭, 这说明当超过应力200 kPa以后, 水泥再改良土的结构性趋于屈服状态。但相土粒相对密度塑石灰土而言, 经石灰或水泥再改良后其压缩量都下降了50%左右。

图2为石灰再改良土与水泥再改良土放大2000倍后的微观形貌图。

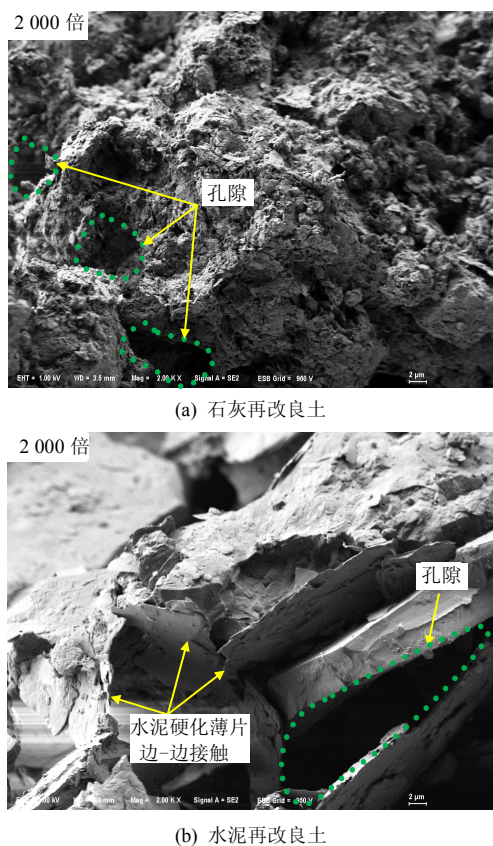


图2 扫描电镜图

Fig.2 Images of scanning electron microscope

重塑石灰土加入水泥后形成硬化片状物, 虽然固体片状物自身很密实, 但其整体结构仍存在较大的孔隙, 片状物呈现面-边或面-点接触的排列模式, 没有形成很好的定向排列, 所以仍存在被压实的空间。虽然石灰再改良土也存在孔隙, 但团粒之间形成较稳定的联接。因此, 当应力超过200 kPa后水泥再改良土压缩性比石灰再改良土大。

3.2 强度特性

石灰再改良土、水泥再改良土的无侧限抗压强度应力-应变曲线如图3所示, 压实度分别为90%、93%。

取应力-应变峰值, 得到石灰再改良土、水泥再改良土的无侧限抗压强度如表3所示。

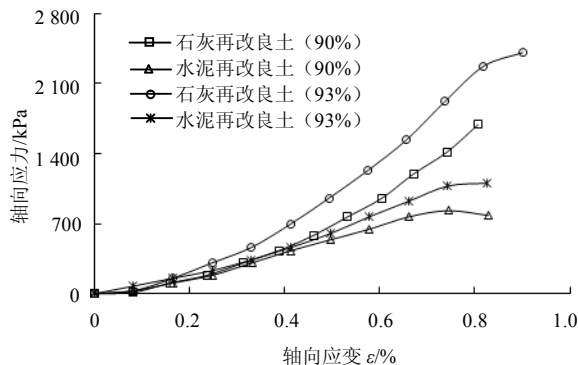


图3 轴向应力与应变的关系

Fig.3 Relations between axial stress and strain

表3 无侧限抗压强度

Table 3 Unconfined compressive strengths		
干密度/(g/cm ³)	试样类别	无侧限抗压强度/kPa
1.30	石灰再改良土	1 691.0
	水泥再改良土	831.0
	重塑石灰土	62.8
1.34	石灰再改良土	2 275.0
	水泥再改良土	1 077.0
	重塑石灰土	75.8

石灰再改良土的无侧限抗压强度大于水泥再改良土, 前者为后者的1倍左右。表明添加石灰再改良的效果要比添加水泥再改良的效果好; 但两者与重塑石灰土相比, 强度均呈现大幅度提高。

石灰再改良土和水泥再改良土直剪试验的典型应力-位移曲线, 如图4所示。

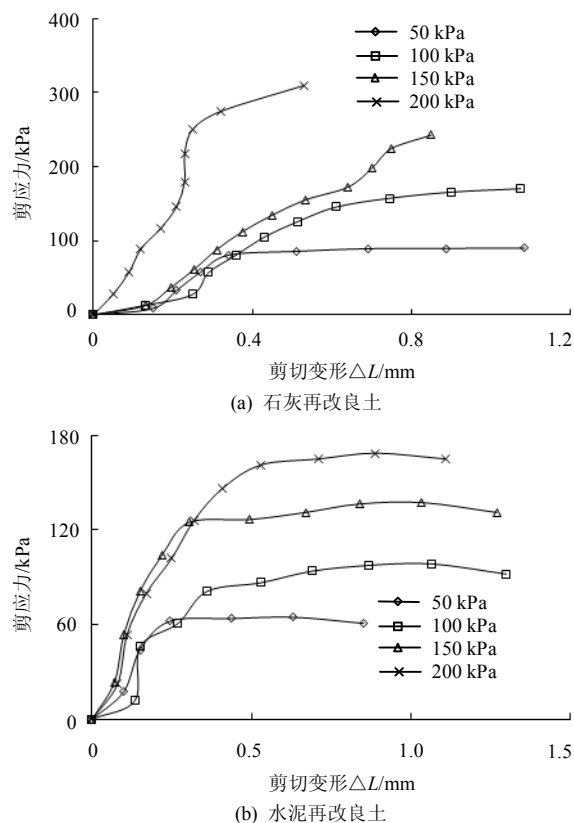


图4 剪切应力与位移的关系

Fig.4 Relations between shear stress and displacement

通过直线拟合获得的内摩擦角 φ 和黏聚力 c 强度参数, 如表 4 所示。

表 4 试样剪切强度指标

Table 4 Parameters of shear strength of specimens

压实度/%	试样类别	黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ /(°)
90	石灰再改良土	26.6	45.6
	水泥再改良土	20.7	33.2
	重塑石灰土	20.6	24.4
93	石灰再改良土	30.6	55.6
	水泥再改良土	27.1	35.6
	重塑石灰土	26.1	25.0

石灰再改良土的内摩擦角较重塑石灰土提高了 1 倍左右; 水泥再改良土的内摩擦角较重塑石灰土提高了 50% 左右。石灰再改良土和水泥再改良土土粒相对密度塑石灰土的黏聚力都略有增加, 但增加的幅度不大。

3.3 讨论与分析

3.3.1 团粒化效应

为揭示掺入石灰或水泥再改良后, 重塑石灰土的强度再生机制, 进行了粒度分析和扫描电镜试验, 试验结果分别如图 5、6 所示。

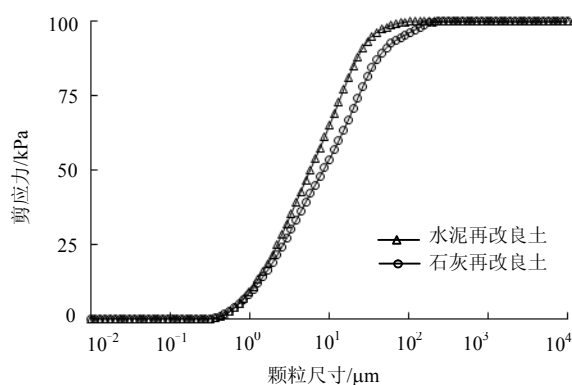


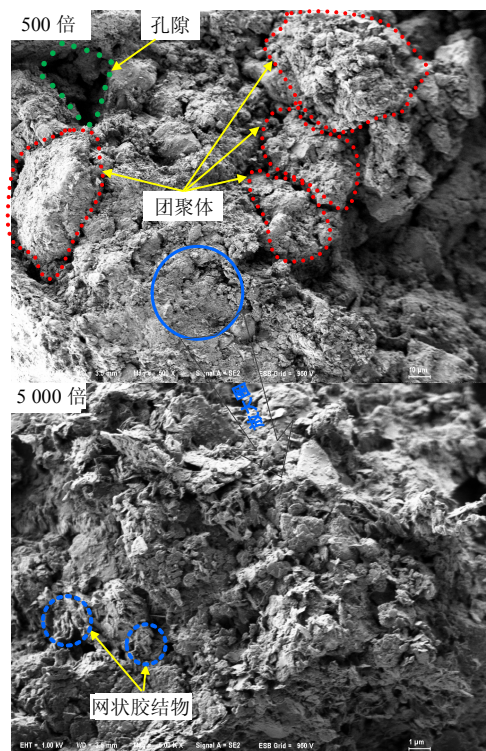
图 5 粒度分析曲线

Fig.5 Particle size distribution curves

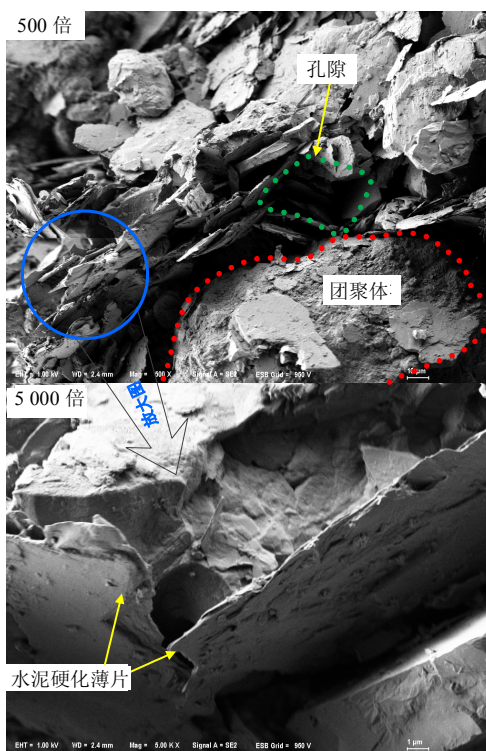
粒度分析曲线表明, 石灰再改良土的团粒主要分布在粒径 $0.32 \sim 120.2 \mu\text{m}$ 范围内, 含量占 69.8%; 水泥再改良石灰土的团粒则主要分布在粒径 $0.32 \sim 275.4 \mu\text{m}$ 范围, 含量约占 58.1%, 再次说明掺水泥再改良的团粒化效果没有石灰再改良土的效果好。

图 6(a)为石灰再改良土的微观形貌。可以看出石灰与团粒之间发生充分反应, 石灰土团粒之间以及黏土颗粒由钙化结晶物包裹, 形成了较为稳定的土体结构。图 6(b)为水泥再改良土的微观形貌图, 与图 6(a)相比, 胶结物包裹石灰土颗粒和团粒的现象不明显, 存在许多类似水泥硬化薄片的物质填充

在土粒周围, 轮廓分明, 硬化薄片未能把团粒与团粒胶结在一起形成更大的团粒, 而且自身呈边-边和点-边接触状态, 形成不稳定的孔隙构架。因此, 石灰再改良土团粒化效果比水泥再改良土的效果好。



(a) 石灰再改良土



(b) 水泥再改良土

图 6 扫描电镜图片

Fig.6 Images of scanning electron microscope

3.3.2 胶结强度

依据石灰和水泥水化机制可知,起胶结作用的物质主要是水化硅酸钙、水化铝酸钙、氢氧化钙等^[12-15]。借助X射线衍射方法(XRD)探测石灰和水泥再改良土中的胶结成分,如图7所示。

XRD图表明,重塑石灰土经石灰、水泥再改良后均生成了 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 结晶体、硅酸盐类水化物、碳

酸钙、氯酸钙等胶结物。

结合热重分析方法(TGA)确定胶结物的含量,如图8所示。图中, TG 为热作用下重量的损失量; DTC 是对 TG 曲线求微分。

经计算,石灰再改良土、水泥再改良土在200~550℃范围内分别分解了4.42%、3.47%;在550~650℃范围内分别分解了1.3%、2.11%;在

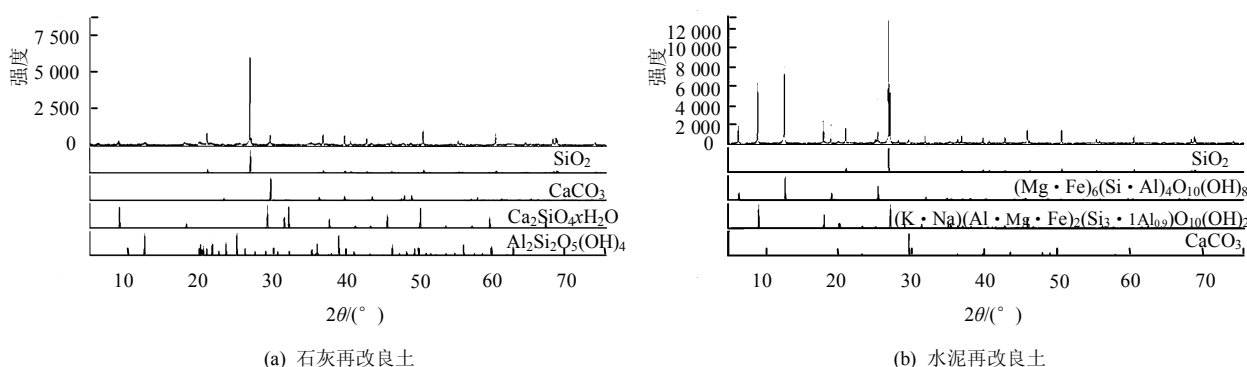


图7 X射线衍射图

Fig.7 Curves of X-Ray diffraction

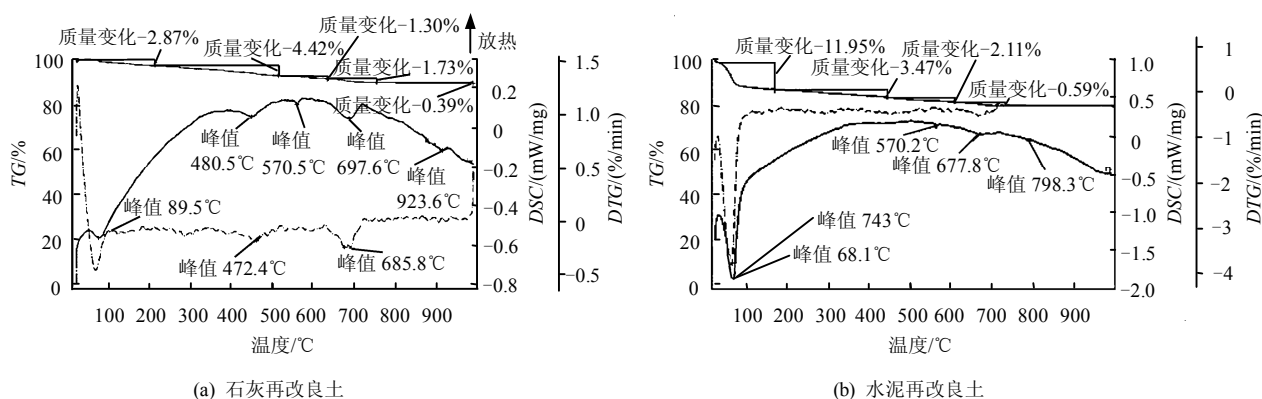
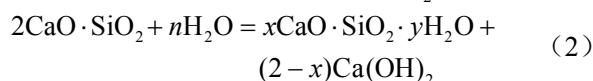
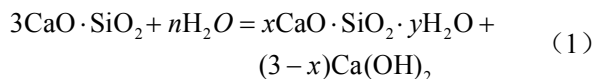


图8 热重分析曲线

Fig.8 Curves of thermo gravimetric analysis

650~800℃范围内分别分解了1.73%、1.64%。联合XRD试验结果可知,在200~550℃内分解的物质为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 胶结物;在550~650℃分解的物质为硅酸盐类胶结物;在650~800℃范围内分解的物质为碳酸钙胶结物。可以看出,石灰再改良土中的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与碳酸钙胶结物明显多于水泥再改良土,进一步佐证添加石灰更能促进重塑石灰土的强度再生。虽然水泥再改良土中硅酸盐类胶结物含量高于石灰再改良土,但由于水泥水化后产生的大量硅酸盐类胶结物自身凝固形成薄片硬块,见图6(b)。这些胶结物并没有把石灰土的团粒相互胶结在一起,对重塑石灰土的强度恢复贡献不大。

水泥改良土体的机制包括两个过程:①水泥水化后生成水化硅酸钙凝胶和氢氧化钙;②氢氧化溶液再与黏土中的活性氧化钙和氧化铝反应生成水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶。式(1)、(2)分别为硅酸三钙和硅酸二钙的水化过程。



从化学反应的平衡过程来看,重塑石灰土前期残存有氢氧化钙,导致溶液中氢氧化钙的浓度较高,客观上阻碍了硅酸三钙等的水化进程,从而导致水

泥水化第一过程中水化硅酸钙凝胶的生成量减少。而石灰增强土体强度的机制主要包括离子交换、碳化和灰结等过程,显然重塑石灰土残存的氢氧化钙对再添加石灰改良没有不利的影响。

4 结 论

(1) 掺石灰和水泥再次改良后,重塑石灰土的无侧限抗压强度较重塑石灰土而言均得到大幅提高,其中掺石灰再改良效果要好于掺水泥再改良。

(2) 细观试验结果表明,石灰再改良土中石灰与团粒之间发生充分反应,形成了较为稳定的土体结构。而水泥再改良土中胶结物包裹石灰土颗粒和团粒的现象不明显,存在许多类似水泥硬化薄片的物质填充在土粒周围,但未能把不同团粒相互胶结在一起形成更大的团粒,而且自身呈边-边和点-边接触状态,形成不稳定的孔隙构架。

(3) 导致水泥再改良土的效果不及石灰再改良土效果好的主要原因是重塑石灰土前期残存有氢氧化钙,导致溶液中氢氧化钙的浓度较高,客观上影响了硅酸三钙等的水化进程,从而导致水泥水化第一过程中水化硅酸钙凝胶的生成量减少。

参 考 文 献

- [1] 陈小桐,邵介贤,张军,等. 稳定低液限粉土路面底基层的施工研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2001, 31(3): 7—10.
CHEN Xiao-tong, SHAO Jie-xian, ZHANG Jun, et al. Study on construction of the stabilized low liquid limit silt soil road subbase[J]. **Journal of Southeast University (Natural Science Edition)**, 2001, 31(3): 7—10.
- [2] 周琦,韩文峰,邓安,等. 滨海盐渍土作公路路基填料试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, 28(9): 1177—1180.
ZHOU Qi, HAN Wen-feng, DENG An, et al. Influences on unconfined compressive strength of stabilized coastal saline soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2006, 28(9): 1177—1180.
- [3] 谈云志,孔令伟,郭爱国,等. 红黏土路基填筑压实度控制指标探讨[J]. 岩土力学, 2010, 31(3): 851—855.
TAN Yun-zhi, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, et al. Discussion on the compaction degree index of subgrade filled with laterite[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(3): 851—855.
- [4] 胡明鉴,刘观仕,孔令伟,等. 高速公路膨胀土路堤处治后期土体性状试验验证[J]. 岩土力学, 2004, 25(9): 1418—1422.
HU Ming-jian, LIU Guan-shi, KONG Ling-wei, et al. Expansive soil character later test verification on freeway embankment treatment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(9): 1418—1422.
- [5] 孔令伟,郭爱国,赵颖文,等. 荆门膨胀土的水稳定性及其力学效应[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 727—732.
KONG Ling-wei, GUO Ai-guo, ZHAO Ying-wen, et al. Water stability of Jinmen expansive soils and their mechanical effect[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 727—732.
- [6] 谈云志,郑爱,喻波,等. 重塑石灰土的力学特征与性能劣化机制分析[J]. 岩土力学, 2013, 34(3): 653—658.
TAN Yun-zhi, ZHENG Ai, YU Bo, et al. Mechanical properties and degradation mechanism of remolded lime soil [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2013, 34(3): 653—658.
- [7] 程钰,石名磊,周正明. 消石灰对膨胀土团粒化作用的研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(8): 2209—2213.
CHENG Yu, SHI Ming-lei, ZHOU Zheng-ming. Aggregation effect of slaked lime on treated expansive soils [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2209—2214.
- [8] 程钰,石名磊. 石灰改性膨胀土击实曲线的双峰特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(4): 979—983.
CHENG Yu, SHI Ming-lei. Bimodal characters of compaction curve of lime treated expansive soil [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2011, 32(4): 979—983.
- [9] 郭爱国,孔令伟,胡明鉴,等. 石灰改性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.
- [10] 中华人民共和国交通部. JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.
- [11] 中华人民共和国交通部. JTG E40—2007 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
- [12] 杨志强,郭见扬. 石灰处理土的力学性质及其微观机制的研究[J]. 岩土力学, 1991, 12(3): 11—23.
YANG Zhi-qiang, GUO Jian-yang. The physico-

- mechanical properties and micro-mechanism in lime-soil system[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1991, 12(3): 11—23.
- [13] 高国瑞. 灰土增强机制探讨[J]. 岩土工程学报, 1982, 4(1): 111—114.
- GAO Guo-rui. Discussion on the strength enhancement mechanism of lime soil[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1982, 4(1): 111—114.
- [14] GLENN R. Infrared spectroscopy of reacted mixtures of Otay bentonite and lime[J]. **Journal of the American Ceramic Society**, 1970, 53(5): 274—277.
- [15] GLENN R. X-ray studies of bentonite products[J]. **Journal of the American Ceramic Society**, 1967, 50(6): 312—317.

(接第 632 页)

《岩土力学》2014 年第 6 期被 EI 收录论文 (43 篇, 收录率 100 %)

序号	论文题名	作者	页码
21	天然胶结钙质土强度及微观结构研究	朱长歧, 周 斌, 刘海峰	1655—1663
22	循环荷载下桩网结构路基和垫层动力响应研究	张崇磊, 蒋关鲁, 袁胜洋, 等	1664—1670
23	路堤挡墙与预应力管桩连接方法现场试验研究	李国维, 苏建斌, 贺冠军, 等	1671—1678
24	高填方输煤暗道周边土压力试验研究	田建勃, 陈 凯, 韩晓雷, 等	1679—1686
25	铁路路基压实质量检测中的小型平板载荷试验分析	刘 钢, 罗 强, 张 良, 等	1687—1694
26	多层软弱夹层边坡岩体破坏机制与稳定性研究	张社荣, 谭尧升, 王 超, 等	1695—1702
27	大断面切眼主应力差转移规律及支护技术	何富连, 王晓明, 许 磊, 等	1703—1710
28	深部咸水层二氧化碳封存的干化效应及选址启示	王 媛, 刘 阳	1711—1717
29	基于正交试验设计的层状盐岩地下储库群多因素优化研究	贾 超, 张 凯, 张强勇, 等	1718—1726
30	隧洞变形引起的 TBM 施工事故综合风险分析	温 森, 贺东青, 杨圣奇	1727—1734
31	基于生物酶的固土技术在香港的应用研究	戴北冰, 徐 锴, 杨 峻, 等	1735—1742
32	基于 Hoek 建议的非线性关系求取岩体抗剪强度的算法及工程应用	夏开宗, 陈从新, 周意超, 等	1743—1750
33	黏性泥石流沟床冲刷深度研究	赵彦波, 游 勇, 柳金峰, 等	1751—1755
34	应用点安全系数分析基坑边坡三维稳定性	杨 涛, 刘涌江, 杨 兵, 等	1756—1761
35	改进 Koppejan 蠕变模型及其应用	魏丽敏, 冯胜洋, 何 群, 等	1762—1767
36	基于传递矩阵的两相介质波动问题时域显式有限元方法稳定性研究	李 亮, 杜修力	1768—1774
37	行波激励下防波堤地震动力响应分析	杨 勋, 王欢欢, 余克勤, 等	1775—1781
38	基于刚体平动运动单元的上限有限元研究	杨 峰, 赵炼恒, 张 箭, 等	1782—1786
39	基于线性互补的非连续变形分析	李小凯, 郑 宏	1787—1794
40	基于同伦分析法的非饱和土层固结问题的级数解	李纪伟, 汪华斌, 张 玲, 等	1795—1800
41	堆石料三维边界界面模型在 FLAC ^{3D} 中的开发与验证	陶 惠, 陈育民, 肖 杨, 等	1801—1808
42	模拟岩石压剪状态下主次裂纹萌生开裂的扩展有限元法	师 访, 高 峰, 李玺茹, 等	1809—1817
43	多地貌单元复合场地非线性地震效应特征二维分析	金丹丹, 陈国兴, 董菲蕃	1818—1824