

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2019.06.006

# 酶石灰技术加快稳定软土路基试验研究

刘海鹏<sup>1</sup>, 陈冠一<sup>1,2</sup>, 杨和平<sup>1</sup> 编译

(1.长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2.广东鸿高建设集团有限公司)

**摘要:** 因自身强度低、承载能力弱、渗透性差及压缩性大,软土是工程中的一类常见问题土,在软土中添加石灰,对改善其工程性质的影响显著。为了解石灰加固软土的效果,该文采用5种不同类型土样,对每种土分组进行掺固化剂改良的对比试验,第1组添加石灰;第2组添加酶,第3组掺石灰+酶。采用加州承载比(CBR)作为加固效果评价指标,对3组试验结果开展对比分析。结果表明:添加石灰与生物酶固化的软土,在石灰稳定土壤期间其强度提升加快,能形成高强度的土质基体。路面设计时采用这种酶石灰加固软土技术,路面路基结构层的设计厚度可适当减薄。

**关键词:** 酶石灰; 固化剂; 软土; 路基; 加固; CBR 值

修建公路时,外借土或现场改良土均须满足强度标准,改良现场土常用石灰、水泥和粉煤灰作添加剂。尽管石灰易制取成本低,且稳定土施工工艺简单,但因对环境有害,如今在国外已不再大量采用(Little 1995; Najmiah 和 Razap, 2007)。

中国土壤改良技术研究仍较薄弱,添加剂多采用石灰、水泥、粉煤灰及其这类材料的拌和物,近些年来虽也在引进、消化国外固化剂技术,并研制了 TFISS 等几种新型固化剂,不过因制作工艺、成本等原因,其实用性较差无法大面积推广。发达国家 1980 年就开

始生物酶固土技术研究,并取得了良好经济环保效益且得到国内外业界的认可,但中国将其引进至今只铺筑了几条生物酶固土低等级道路,其研究应用仍在起步阶段,缺乏成型且适合中国国情的技术和施工工艺。近年来,深圳、东莞等沿海城市掀起了新一轮大规模“围海造陆”热潮,同时为处置城市建筑渣土,采用了“推填挤淤”技术构筑陆域工作面,不少废渣土因质量差,加之对海相淤泥需做加固处治,采用常规添加剂因污染环境被海洋局严控使用,给围海造陆工程建设带来极大困扰。随着中国对海洋环境保护的日益重视,

施工简便快捷,加固效果安全可靠,无需对倾斜失效的抗滑桩进行纠偏复位及拆除,可应用于发生较大倾斜角度的悬臂式抗滑桩失效加固修复工程。

(3) 扶壁结构的提出,丰富了治理悬臂式抗滑桩失效这一实际工程问题的解决方案,可为类似工程提供了治理思路,具有较强的实用借鉴价值。

## 参考文献:

- [1] 孙岩平.抗滑桩失效判断与滑坡稳定性分析[D].长安大学硕士学位论文,2013.
- [2] Shangyi Zhao, Lijun Deng. Analyses of Embedded Piles Reinforced Landslides Using Strength Reduction Finite Element Method[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2017(2): 389-401.
- [3] 吴永,何思明,李新坡.地震波作用下抗滑桩的失效机理

[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2009(5).

- [4] Lin Chen, et al. Failure Mechanism of a Slope Anti-Sliding Pile[J]. Advanced Materials Research, 2013, 639-640: 593-597.
- [5] 田义斌, 厚行霞. 某滑坡治理中桩板墙失效原因的分析与探讨[J]. 路基工程, 2007(2).
- [6] 陈林, 姚勇, 杨炯, 等. 某边坡抗滑桩失效机理研究[J]. 四川建筑科学研究, 2014(4).
- [7] 王伟德, 刘前进. 抗滑桩+扶壁式挡土墙联合支护的工程应用[J]. 工程建设与设计, 2013(1).
- [8] 钟国辉. 高填方区双排桩叠加扶壁式挡墙边坡支护技术[J]. 建筑监督检测与造价, 2017(7).
- [9] 中铁西北科学研究院有限公司西南分院. 一种抗滑桩倾斜复位纠偏与加固方法: 中国, CN105887948A[P]. 2016-08-24.
- [10] JTG D30-2015 公路路基设计规范[S].

收稿日期: 2019-04-19

石灰固土过程中带来的环境污染问题亟待解决。

国外最新研究认为,解决石灰固土污染环境的可行方案是加替代物——酶,以减少石灰的掺量。酶是环保型有机胶状物质,因能被生物分解,可避免污染风险(Shankar 等,2009;Shukla 等,2003),且土中掺酶还被证实能提高土路基的耐久性,目前国外研究正尝试用酶部分替代石灰。大量试验研究虽已完成并弄清在其他盐类或化学物质存在条件下土中掺石灰后形成的混合物性质,但至今在国内外未见有关酶石灰稳定土壤的研究报道。然而,已有许多个案研究(Vedula 等,2002)说明酶自身就能改善土壤性质。该文目的是通过观测经熟石灰、酶、酶石灰处治后各类型土的加州承载比值(CBR)的变化,分析酶石灰用于路基路面设计和建造的可能及经济性。

1 稳定的方式

罗马时代起,用石灰固土就是各项工程建设常用的传统方法且从未完全消失,其机理是阳离子交换而并非火山灰反应的强化作用(Sherwood,1993),Khalid 和 Rogers 等认为石灰生成的硅酸盐黏粒黏合剂改变了黏土表面矿物学特性,使土的塑性和持水能力降低而稳定性提高。但石灰稳定土有缺点,石灰碳化与硫酸盐盐反应随龄期可导致黏结崩解。为消除该负面影响,已开展灰土中掺各类盐及化学物质试验并验证有效添加剂为水泥、粉煤灰和稻壳灰。

该文重点研究酶在石灰固土中的作用。酶是种亲水性有机催化剂,如条件对反应有利,将刺激某些化学

反应(Choudalakis 和 Gotsis,2009),但不会积极参与反应,故低浓度就足够。与大型有机分子连接的酶添加剂会被黏土矿物的负表面电荷吸引,一旦土与酶紧密结合将失去再吸水能力,其力学性能提高(Tingleet 等,2007)。因石灰和酶用相同阳离子交换机制改善黏土特性,土中同时加石灰和酶(称酶石灰)似乎可行,还需研究加固土的 CBR 值变化。

2 使用的材料和方法

所用土样均是从万神庙采购取自印度喀拉拉邦的一种高岭土(取于同一深度)。石灰为喀拉拉邦巴尔卡德一采石场所产石灰。生物酶购自印度金奈,学名为泰然酶,是一种糖蜜中的提取物。

天然土风干 1 周,经人工破碎,过 4.75 mm 筛筛分后,保存于封闭室内大型敞口容器中,成为一类土样;用 75 μm 筛湿筛另备两组额外天然土样,提取细粒加到两组未筛分土中以增大黏粒含量,并命名含黏粒 40%和 60%两控制土样为 C-40 和 C-60;此外还用两类土样:购于萨吉夫和卡利卡特,分别产自特里凡得琅和金奈黏土矿的高岭土和钠基膨润土。高岭土先用烧碱和水洗处理,过滤后所得的浆液在熔炉中喷洒干燥;膨润土则经简单碾磨处理去除水和易挥发物质(CO<sub>2</sub>),并需磨成合适粒径。表 1、2 分别为 5 种土样和生物酶的基本性质,表 1 中高岭土、膨润土相对密度及缩限性质的微小异常源于它们为经化学处理的商业用品。

不同石灰掺量重塑样是按印度标准确定的最佳含

表 1 试验土样的工程性质

土样 特性	相对 密度	土壤 分类	液限/ %	塑限/ %	缩限/ %	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最佳 含水 率/%	无侧限抗压强度/kPa		CBR 值/%	
								425 μm 筛分样	未筛分样	干法	湿法
天然土 (20%黏粒)	2.60	CH	79	48	27	1.75	32	60	50	3.6	2.7
C-40	2.50	CH	98	56	34	1.62	44	128	70	6.0	5.0
C-60	2.50	CH	130	72	38	1.54	46	65	45	8.0	4.0
高岭土	2.40	MH	32	15	33	1.41	30	70	55	9.0	7.0
膨润土	2.35	CH	435	50	4	1.28	39	1200	980	56.0	48.0

注:CH 为高塑性黏土;MH 为高塑性粉土。

水率和最大干密度条件下制备,试样在贴有标签塑料袋内养生并置于干燥器中以防失水,分别完成 1、2、3、

4 周养生后,测试无侧限抗压强度,取强度平均增幅最高样的掺灰量为最佳掺量。用同样方法确定酶和酶石

表 2 生物酶的性质

特性	单位	数值
沸点	°F	212
pH 值		2.8~3.5
蒸气压(mmHg)		同水
熔点		液态
蒸气密度(大气=1)	g/cm <sup>3</sup>	1
溶解度		无限
蒸发速率		同水
比重		1.00~1.10
外观和气味		淡金色液体;特殊气味

灰最佳掺量。

为研究 CBR 强度,按各最佳固化剂掺量和最佳含水率分别制备石灰、酶和酶石灰稳定土样,经养生后测试各自的 CBR 值,分析不同固化剂对处治土 CBR 的影响。

### 3 天然土的试验结果

无侧限抗压强度测试结果表明:3%的灰土比为最佳石灰掺量,与其他学者所做研究(Bell 1996, Eren 和 Filiz 2009, Kassim, 2000)得到的最佳石灰掺量也相差无几;同样测得的天然土最佳酶掺量为 80 mL/m<sup>3</sup> (Isaacetal 等, 2003);最佳的酶石灰配比为酶 70 mL/m<sup>3</sup>,灰土比为 1.75%。

天然土养生与试验期间,对石灰、酶及酶石灰加固土同样按各自最佳含水率及固化剂掺量分别完成制样、养生及 CBR 试验。相比天然土,固化剂稳定土的 CBR 均有所提高。图 1 为各养生周期分别用干、湿法测得 4 种土的强度增长,干法测得石灰土及酶土的 CBR 值比天然土的分别增高 5 倍和 3 倍,类似试验也测得石灰土 CBR 增大达 4 倍(Modarres 和 Nosoudy, 2015),酶土 CBR 增大更是高达 15 倍(Rubensand 和 Sheldon, 2002)。

由图 1 可知:酶石灰稳定土的干法 CBR 测试值为天然土的 6 倍多。经 2 周养生,石灰及酶稳定土 CBR 值获得的提高不足 2 倍;而酶石灰稳定土的干法 CBR 测试值则提高近 4 倍,湿法测试结果也有类似规律。因此,现试验研究结果证实酶石灰比仅用石灰或酶稳定土壤效果更显著,可节约时间和建筑材料,推测经济效益会更好。

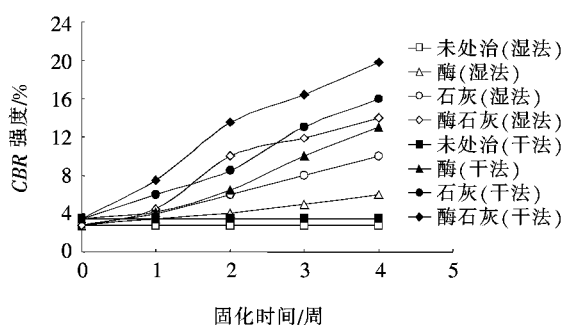


图 1 不同固化剂掺量对天然土 CBR 的影响

图 2、3 为未处治土和稳定土养生 4 周干法和湿法 CBR 样的应力—贯入量关系曲线。

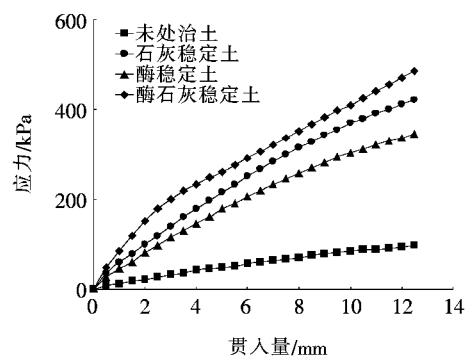


图 2 干法养生(28 d)天然土样的应力—贯入量曲线

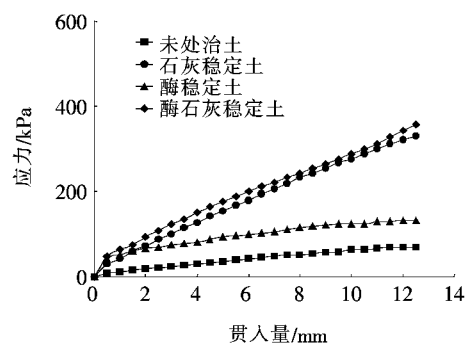


图 3 湿法养生(28 d)天然土样的应力—贯入量曲线

由图 2、3 可知:无论干、湿法条件酶石灰稳定土的 CBR 值均最大。干法条件下相同应变时,酶石灰稳定土比石灰稳定土能承受的荷载要大得多。但湿法条件下养生 4 周,石灰稳定土与酶石灰稳定土应力应变特性基本相同。

Ouhadi 等(2014)研究了石灰对泥灰质黏土的影响并报告湿法测试 CBR 其值降低 78%。该研究湿法条件下测得的 CBR 值降低:石灰稳定土为 29%,酶稳定土近 50%,酶石灰稳定土近 32%。

该研究用 3 种固化剂稳定天然高岭土效果相当

好,石灰中掺酶比单用石灰对提高稳定土特性好。可假设酶诱导的黏土颗粒聚集,通过阳离子桥接和氢键形成了黏土聚合物互连网络。以前有过类似机构报道:电泳阳离子酶导致高岭土晶体结构发生阳离子交换并改变其反应性质(Tate 和 Theng,1980)并使介入成为可能(Schnitzer 和 Kodama,1966)。

黏粒吸附酶蛋白使其改性(Pinck,1960;Franchi等,2003;Theng,2012)。酶主要与黏土基质连接而改变黏土分子,当反应结束又恢复到原来的形式,将改变的黏土重新连接(Pfeiffer,1954)。新改性土与石灰结合时阳离子键加速形成,短期内完成强度增长,这也是因为改性土与石灰反应所需活化能低导致的。

#### 4 控制土样和黏土矿物的试验结果

控制土样采用黏粒矿物高岭土和膨润土。选高岭土是因各试验土中含有高岭石矿物;选钠基膨润土是为模仿蒙脱土这种最大问题土的特性。而膨润土中的钠离子有望促进与石灰与酶中钙离子的离子交换。

就控制土样来说,其石灰、酶和酶石灰的最佳剂量保持与天然土样相同。然而,就高岭土和膨润土矿物而言,各自的最佳剂量分别为 $6\%+80\text{ mL/m}^3$ , $4\%+70\text{ mL/m}^3$ ; $2\%+70\text{ mL/m}^3$ ; $1\%+70\text{ mL/m}^3$ 。养生后,石灰和酶石灰稳定控制土样的稠度界限,因黏粒含量增加而显示重大变化。对照土样中的界限含水率发生显著的变化。但像天然土一样,各种稳定土的界限含水率受酶稳定的影响非常小。

图4~7为经石灰、酶和酶石灰稳定土样的CBR增长曲线。试验结果表明:与石灰和酶稳定的情况相同,随黏粒含量增多酶石灰的稳定效率提高。黏粒含量越多意味着改性的黏土越多,与石灰发生火山灰反应越剧烈,因而稳定土的强度就越高。但C-60的CBR增长系数比C-40的低(Che Mamat,2013)。

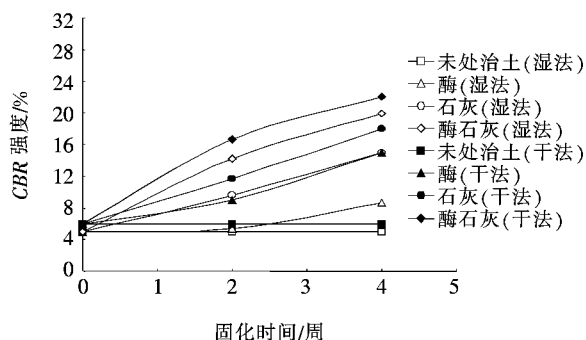


图4 最佳掺量下不同固化剂处治 C-40 土的 CBR 变化

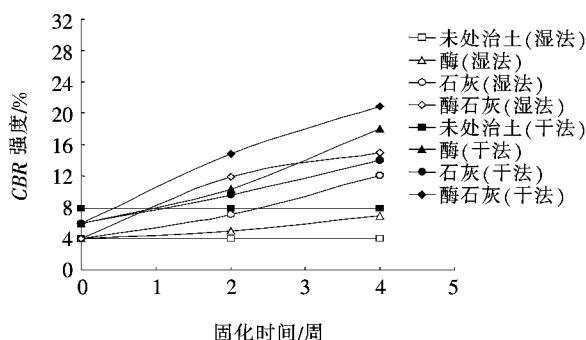


图5 最佳掺量下不同固化剂处治 C-60 土的 CBR 变化

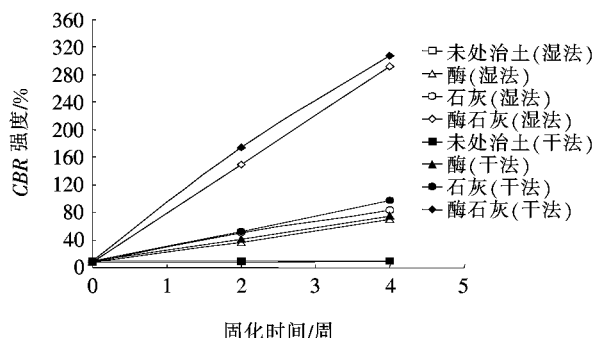


图6 最佳掺量下不同固化剂处治高岭土的 CBR 变化

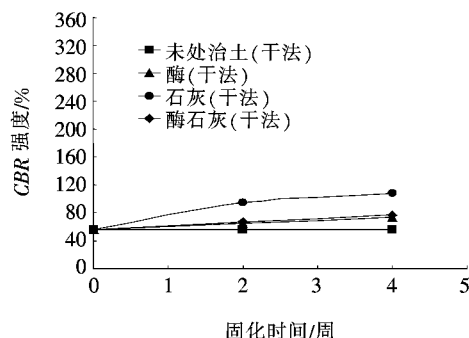


图7 用各最佳掺量固化剂处治的膨润土 CBR 变化

图4显示C-40无论干、湿法试验条件下,酶石灰稳定土的CBR均显著提高。石灰稳定土即使干法测试,其CBR强度也相对较低。而酶稳定土的强度增长比酶石灰稳定小更多。虽所有稳定土接触到水后CBR都会显著降低,但水对酶稳定土的影响最大。

此次试验,C-40获得最高强度的是含有40%黏土细粒的控制土样。对比图4、5可看出:强度增长与黏粒含量不成正比。与C-40相比,用石灰、酶和酶石灰稳定C-60土的强度提高程度均较低。但所有固化剂稳定土中,酶石灰稳定土强度增长仍最大。与酶石灰稳定天然土特性类似,控制土样也显示强度增长率加快,且养生两周内其强度增幅较大。

CBR试验总的趋势显示,黏粒含量为35%~

50%时,强度最大的提升与各种固化剂有关。黏粒含量过低时,因土中含大量未经处理的粉粒和砂粒,强度没得到充分提高。此外,较低黏粒含量延缓了现场土的干燥(NLA,2004)。黏粒含量过大时,自絮凝胶粒(Cao等,2012)抑制了强度增长,将阻止固化剂与土粒间阳离子交换。此外,黏土含量较大的土养生易干燥(Ragassi,1995),表现出低强度和高脆性。同样,石灰稳定过程中,其最佳掺量随黏土含量和黏土矿物而变化(Trivedi等,2013)。但石灰稳定土中有酶存在时表明,只需唯一的最小石灰掺量即可达到必要的固化强度。因此,催化剂酶减少了高石灰百分比对环境的影响。

研究发现,黏粒含量不低于20%时酶石灰稳定土是有效的,并证明土中黏粒含量低于10%时可直接用生物酶稳定(Bergmann和Dimas,2000)。该文所推荐的稳定体系也适合10%黏粒含量的土。

研究表明,酶石灰稳定土在养生时不会像石灰稳定土那样变得干燥,充分说明酶石灰稳定过程中只需非常低的水化热。因此,用此法稳定的道路能抵抗路面交通荷载的磨损作用,避免出现道路路面的常见问题,如坑洞、破裂和软化(Rubens和Sheldon,2002),因酶石灰可使稳定土更耐久。已证明酶稳定土还有防粉尘污染功效(ShirSavkar和Koranne,2010),此功能在酶石灰稳定土中也可发挥。

有关黏土矿物,酶石灰稳定的高岭土显示其最大CBR增长系数约为34,而用石灰或酶稳定时其增长系数分别为11和8。分析图6中CBR的增长,表明酶石灰能有效改良高岭土,且干、湿法条件下其强度增长的特性类似。

然而,酶石灰稳定膨润土(图7)则表现出非常低的CBR增长系数(小于1)。膨润土缓冲能力低妨碍了高pH值黏性土的改良,而酶的存在也阻碍了土与石灰反应。因此,已证明用酶石灰去改良蒙脱土确无好的效果。且因膨润土矿物的膨胀性,做湿法试验也不大可能。

图8~10为石灰、酶和酶石灰处治土的应力应变关系。

由图8~10可知:相比石灰或酶稳定土,相同应变下酶石灰稳定土能承受更大应力,因而也证明酶石灰稳定土确比酶或石灰稳定土优越。

## 5 强度增长机理

分析测试数据可清楚看出,酶石灰能提高所有稳

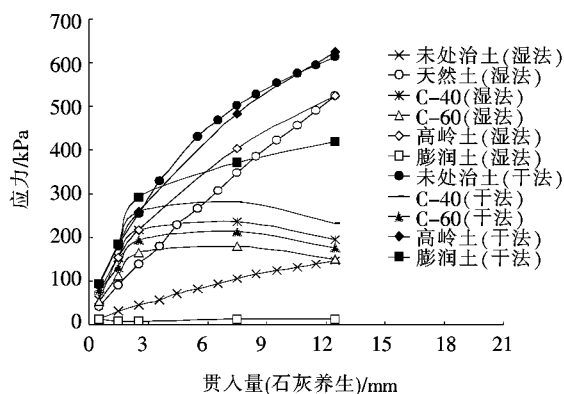


图8 最佳石灰掺量下不同类型土应力应变图

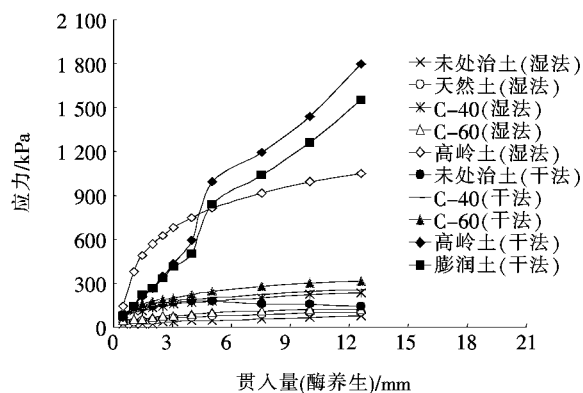


图9 最佳酶掺量下不同类型土的应力应变图

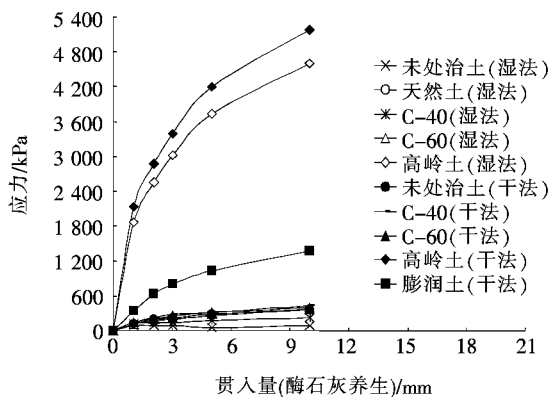


图10 最佳酶石灰掺量下不同类型土应力应变图

定土强度增长的速率,其机理是酶对黏土进行改性,改性后黏土与石灰相互作用,使处治土性质得到明显改善,CBR试验结果也是如此。石灰稳定土中,添加石灰仅几天后,火山灰反应即产生硅酸钙及铝酸钙水化物胶体,随后水化物的结晶作用(Tran等,2014)将土颗粒黏结在一起而形成整体骨架结构(Bergado等,1996)。然而,当石灰和酶混合使用时,不仅避免了反应初始延时问题,且明显提高了强度增长的速率。

酶石灰固化剂中存在唯一不确定因素是在高碱性

石灰介质存在下酶的活性。极高或极低的 pH/温度值通常会导致大多数酶的活性完全丧失。但众所周知,当酶—底物复合物形成时,酶在活性位点上的反应条件与其他位置完全不同。这样,pH 和温度的变化就不会阻碍黏土的改性。当前的研究也可采用同样假设,因为如果酶已经变性,观察到的土样改良情况可能就不会发生。此外,Pinck 研究发现,即使在自然条件下,蛋白质/酶也能被黏土迅速吸收,高岭土吸收酶的效果是蒙脱土的两倍(1960)。因此,可以说酶石灰稳定土的主要机理是新形成的酶改性土及其他与石灰在较高反应速率下进行的反应(Mihai 等,2005)。第二个机理涉及铝酸钙和硅铝酸钙与石灰的进一步反应,在酶  $R(OC_2H_4)_nOH$  作用下,钙离子取代现有的铝离子而形成的更强化合物。

## 6 结论

单独用酶或石灰稳定路基土的技术已广泛采用,酶石灰稳定土却是一种新的工艺技术,室内测试试验结果表明:用酶石灰固化剂可提供更快、更好的稳定土效果,揭示了其良好应用前景。用它将黏土转化为更强的基质土而改良土质,耗时仅需用石灰或酶固化的一半。该文用不同类型土的试验证明所推荐稳定技术有效,稳定土发生破坏时的应力、应变明显增大,且塑性指数较低,表明稳定土的胀缩性降低,这些都将有效解决软土地基上常见道路工程的病害,提高行车的舒适性。

研究的主要结论如下:

(1) 石灰稳定土中添加酶,开始 3 周内土的增长速率显著提高,4 周后的增长速率略有降低,但仍超过石灰或酶稳定土的增长速率。

(2) 用酶石灰固化剂稳定黏粒含量较高的土其效果更佳。

(3) 相比其他处治方法,所有酶石灰稳定土中石灰的掺量均最少,可减少对环境的污染。

(4) 酶或酶石灰固化剂对提高膨润土 CBR 强度

的效果均不佳,不适合对蒙脱石类黏土的稳定。

(5) 酶石灰固土技术的经济优势在于充分利用当地土,减少运输成本、缩短工期且节省建筑材料。

## 参考文献:

- [1] Greeshma Nizy Eujine, S. Chandrakaran, N. Sankar. Accelerated Subgrade Stabilization Using Enzymatic Lime Technique[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9).
- [2] Little, D. N. Handbook for Stabilization of Pavement Subgrades and Base Courses with Lime[M]. Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, IA, 1995.
- [3] Najmiah, N., and Razap, B. A. Effect of Lime on California Bearing Ratio (CBR) of Soft Soils[D]. B. E. Thesis, Universiti Teknologi Petronas, Tronoh, Malaysia, 2007.
- [4] Shankar, A. U. R., Rai, H. K., and Mithanthaya, R. I. Bio-Enzyme Stabilised Laterite Soil as a Highway Material[J]. J. Indian Roads Congr., 2009, 70(2).
- [5] Vedula, M., Nath, P., Chandrashekar, B. P. A Critical Review of Innovative Rural Road Construction Techniques and their Impacts[J]. National Rural Roads Development Agency, New Delhi, India, 2002.
- [6] BIS (Bureau of Indian Standards). Determination of Unconfined Compressive Strength [J]. Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1991: 1—4.
- [7] Cao, L., et al. Flocculations of Organisms with Clay[C]. Proc., Int. Conf. on Applied Biotechnology, Springer Science and Business Media, Berlin, 2012.
- [8] Kassim, K. A. Consolidation Characteristics of Lime Stabilised Soil[J]. J. Civ. Eng., 2000, 12(1).
- [9] Choudalakis, G., and Gotsis, A. D. Permeability of Polymer/Clay Nanocomposites: A Review[J]. Eur. Polym. J., 2009, 45(4), 967—984.
- [10] Cooper, G. M. Central Role of Enzymes as Biological Catalysts[M]. Sinauer Associates, 2000.
- [11] Eren, Ş., Filiz, M. Comparing the Conventional Soil Stabilization Methods to the Consolid System Used as an Alternative Admixture Matter in Ispartadaridere Material[J]. Constr. Build. Mater., 2009, 23(7): 2 473—2 480.