

阳离子改性剂改良膨胀土试验研究

李志清^{1,2}, 胡瑞林², 王立朝³, 王艳萍⁴, 谢芳⁵

(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. 中国科学院地质与地球物理研究所工程地质力学重点实验室, 北京 100029; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 中国公路工程咨询集团有限公司, 北京 100083; 5. 建设综合勘察研究设计院, 北京 100007)

摘要: 膨胀土化学改性是化学岩土工程中的一重要课题, 受到广大岩土工程师的重视。结合云南某高速公路路堤工程, 采用一种阳离子改性剂对膨胀土进行化学改良试验, 探讨了改性剂的改性机理和效果。结果表明: 改性剂可以彻底改变膨胀土的亲水性、胀缩性, 降低自由膨胀率, 大大改善膨胀土的颗粒级配、强度特性、水理特性等物理力学性质。改性后的膨胀土黏粒减少, 粉粒增多, 孔隙明显减少, 结构更加致密, 改性剂的“团聚”、“凝胶”效果显著。改性后的膨胀土干密度随含水率变化较小, 水稳性提高, 可以满足设计施工要求, 降低了工程造价, 可见该改性剂对膨胀土的工程性质有很大程度的改善。

关键词: 膨胀土; 化学改性; 路堤

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2009)07-1094-05

作者简介: 李志清(1981-), 男, 博士, 主要从事公路工程、非饱和特殊土方面的研究。E-mail: lizhiq-2002@163.com。

Experimental study on expansive soil improved with cation modifier

LI Zhi-qing^{1,2}, HU Rui-lin², WANG Li-chao³, WANG Yan-ping⁴, XIE Fang⁵

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. China Institute for Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 4. China Highway Engineering Consulting Group Company, Ltd., Beijing 100083, China; 5. China Institute of Geotechnical Investigation and Surveying, Beijing 100007, China)

Abstract: The improvement of expansive soil with chemical medicine is an important topic in chemical-geotechnical engineering, so it has been concerned by geotechnical engineers. For the embankment engineering on an express highway in Yunnan Province, the expansive soil is improved with the cation modifier. The mechanism and the effectiveness of the improved expansive soil are discussed. It is discovered that hydrophilic nature and swelling-shrinkage property are changed drastically, that the free swelling ratio can be reduced, and that the particle size gradation, strength characteristics and hydrated properties of the treated expansive soil are improved by a wide range. Clay content decreases, but silt content increases. Pore decreases sharply, but the fabric is compact. The effectiveness of improving medicine reunited and cemented is obviously. The change of dry density with water content decreases and the hydrated property of modified soil is enhanced. The indexes are satisfied to the project and the cost is reduced. So the engineering properties of the treated expansive soil are improved to a considerable extent.

Key words: expansive soil; chemical modification; embankment

0 引言

膨胀土是以蒙脱石、伊利石为主要矿物的高塑性黏土, 黏粒含量高, 一般自由膨胀率大于 40%, 液限高于 40%。由于膨胀土含有强亲水性矿物成分, 表现出明显的膨胀性、多裂隙性、超固结性。在公路工程中, 经常有因膨胀土失水收缩, 遇水膨胀软化、强度衰减, 而造成边坡塌陷、滑坡等事故灾害。在云南修建高速公路, 遇到较多的膨胀土地区, 往往采用开山

碎石等作为路基填料, 投资成本较高, 如果能就地利用改性膨胀土, 并达到路基施工要求, 则可以大大降低工程费用。因此, 改善膨胀土的亲水性, 提高膨胀

基金项目: 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室开放研究基金项目 (GH200802); 中国科学院工程地质力学重点实验室开放研究基金项目 (2008)

收稿日期: 2008-04-25

土的物理力学性能,对于公路工程路堤、路堑的边坡稳定性和减少投资成本均有重要意义。

1 传统治理方法

对于一般膨胀土路堤、路堑,常采用石灰等材料改性或框架梁、浆砌片石等刚性防护。采用石灰等改性,一方面影响环境、污染地下水,另一方面石灰改性存在时间效应问题,长期条件下改性不够稳定。况且对于云南等某些地区,石灰产量较小,利用不方便。对于刚性防护,在一定程度上可以缓解膨胀土的危害,但不能从根本上解决大气风化影响深度范围内膨胀土体的胀缩问题。尽管膨胀土的胀缩变形不大,但也会对刚性防护结构起破坏作用,慢慢形成裂缝,雨水从裂缝中浸入,加剧膨胀土的胀缩变形,甚至引发连锁破坏^[1]。

2 改性原理

膨胀土的胀缩性能主要与黏土矿物组成、黏土矿物堆聚的微结构等有关,膨胀土中所含蒙脱石和伊利石发生晶层膨胀和黏粒间膨胀是造成膨胀变形的主要原因。基于对膨胀土物理力学性质的认识,我们试验了一种新型化学试剂,主要由阳离子聚丙烯酰胺(PAM)和硅酸钠组成。该改性剂可以改善黏土矿物的强亲水性,减小黏土矿物的吸水膨胀能力,提高黏土颗粒之间的连接强度,改善其微结构,减少水分在土中的渗透与迁移,改善黏土矿物(如蒙脱石、伊利石等)晶层间的连结,并提高黏土颗粒间的黏结作用。

硅酸钠是一种无机类水溶性固化剂,其负离子可以逐步与氢离子结合产生聚合而形成凝胶;反应生成的胶体沉淀在土颗粒表面,使土颗粒表面形成一层薄膜。由于该物质的胶结性,将土颗粒相互胶结起来,并脱水缩聚,由单分子的结构,最后变成空间结构,把分散的颗粒进一步聚裹成一个整体,达到提高土体强度的作用。

阳离子聚丙烯酰胺是一类具有水溶性的有机高分子化合物,对膨胀土具有化学固化和改变土体结构的效能。该有机物不仅改善膨胀土的膨胀性能,而且对土体强度、土的渗入性、水敏性、时效性均有改善作用。阳离子有机物联接有多个N原子,带有较强正电荷,利用其高分子效应,它可以和具有很大的阳离子

交换容量的蒙脱石、伊利石发生充分的离子交换吸附反应,分子链上带有的大量氨基和矿物晶面上的氧层、氢氧层形成氢键,并在表面形成一层覆盖膜将膨胀土的大小微粒联结和包裹,形成空间网络结构。这种吸附反应和较强的静电作用削弱了层间负电斥力,阻止了由于外来水浸入导致晶层间距的增大形成膨胀的结果,有时甚至产生收缩,使得试样膨胀土对水不再“敏感”,即蒙脱石、伊利石的亲水性和膨胀特性发生根本性变化,这种性能不会随时间的推移而减弱。离子交换能力与土中胶粒(<0.002 mm)含量有关,含量越高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越强。该改性剂无污染、无公害,属环保产品。

3 膨胀土改性试验

3.1 膨胀土试样

试验所用膨胀土取自云南蒙自,该地发育第四系褐灰色、灰色、灰白色砂质黏土、亚黏土,厚度较大,多呈硬塑状,标贯 $N=15\sim 21$ 击,容许承载力 $180\sim 240$ kPa,多具有不同程度膨胀性,与湖沼相沉积环境复杂多变有关,自由膨胀率一般 $50\%\sim 80\%$,最大达 130% 。经土工试验分析,以最佳配比方案改性膨胀土,改性前后物理力学性质如表 1 所示。改性土液限变小,塑限增加,塑性指数明显降低 40% 多,表明改性土的亲水性大大减弱。自由膨胀率是体现膨胀土特征的重要指标,由表 1 可以看出,膨胀土已由中等膨胀降低到 40% 以下,已经达到改性为非膨胀土的要求(符合公路工程规范)。颗粒中 <0.002 mm 的胶粒含量明显减少,表明土体的比表面积减小,土粒分散程度降低。

3.2 改性剂配制

膨胀土改性剂的配制为硅酸钠+阳离子聚丙烯酰胺+水按比例配制而成。具体指标:阳离子聚丙烯酰胺离子度要求大于 30% ,分子量要求低于 300 万,硅酸钠模数要求介于 $2.5\sim 3.0$,水为饮用水。

3.3 自由膨胀率试验

取风干土 200 g,分别取硅酸钠为 1, 5, 10, 15, 20 g 和阳离子聚丙烯酰胺为 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 g 进行独立试验和交叉配比改性试验,用水量以能溶解两种化合物为准。先将一种或两种化合物完全溶于水后,再将风干土倒入改性剂中,浸泡 24 h,在 60°C

表 1 膨胀土改性前后物理力学指标

Table1 Physical and mechanical indexes of expansive soil before and after improvement

土样	天然含水率/%	液限/%	塑限/%	塑性指数	<0.002 mm 含量/%	最大干密度/(g·cm ⁻³)	最佳含水率/%	自由膨胀率/%	膨胀力/kPa
改良前	25.3	56.9	21.7	35.2	21.5	1.84	17.1	77	34.8
改良后		41.1	23.1	18.0	10.6	1.86	16.3	32	8.9

条件下烘干后按规范要求进行自由膨胀率试验。单独使用一种改性剂效果如图 1 所示,可见当 NaSiO_3 和 PAMC 分别达到使用量为 10 g 和 0.5 g 时,改性效果出现明显转折,但随着使用量增加,改良最终达到的自由膨胀率都高于 50%。如表 2 所示,将两种化合物按一定配比制成溶液进行改良时,当 NaSiO_3 为 10 g, PAMC 为 0.5 g 时,自由膨胀率降到 32%,我们认为这种配比方案既达到了工程要求,又节约了改良剂,降低了工程造价,属于改良剂最佳配比方案。按室温条件下质量配比 NaSiO_3 :PAMC:干土为 5:0.25:100 的方案继续进行改良膨胀土的研究。

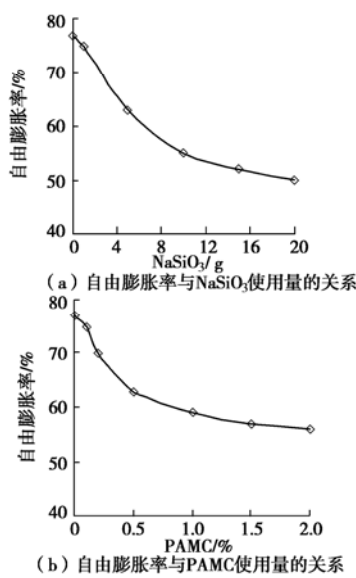


图 1 改良膨胀土自由膨胀率试验

Fig. 1 Tests on free expansive ratio of improved soil

表 2 含不同配比改性剂的改良土自由膨胀率

Table 2 Free expansive ratio of improved soil with different contents of cation modifier %

NaSiO_3 /g	PAMC/g					
	0.1	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
1	73	65	60	57	55	53
5	70	59	49	47	42	37
10	51	45	32	32	30	28
15	49	44	32	30	27	24
20	47	43	30	28	25	23

3.4 颗粒级配的变化

按最佳配比方案制备改良土,对膨胀土改良前后进行颗分试验,如图 2 所示。在粒径分配曲线上,可以看出黏土颗粒明显减少,改良后的膨胀土不均匀系数提高到 $C_u = d_{60}/d_{10} = 10 > 5$ 为不均匀土,此种土中细颗粒充填于粗颗粒所形成的孔隙中,使得土质密度较高,力学特性较好。

3.5 击实试验对比

利用击实仪对按最佳配比方案制备的改良土进行击实试验,考察其最佳含水率和最大干密度变化规律。

对改良前后膨胀土分别配置 5 种不同含水率的试样,含水率间隔约为 2%,经闷料 24 h 后,按规范规定进行重型击实,并绘制干密度随含水率变化曲线,如图 3 所示。由图可见,未改良土最大干密度较小,最佳含水率较大,曲线较陡,改良土最大干密度变大,最佳含水率变小。整条曲线向左上方移动,曲线较平缓扁平,含水率控制范围增大,干密度变化随含水率变化较小,压实度对含水率的变化敏感程度降低,含水率容易控制,更有利用开展现场施工。改良后的膨胀土最佳含水率一般要减小 1%~2% 左右。

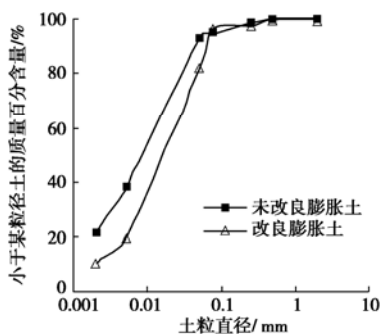


图 2 粒径分配曲线

Fig. 2 Curves of particle size analysis

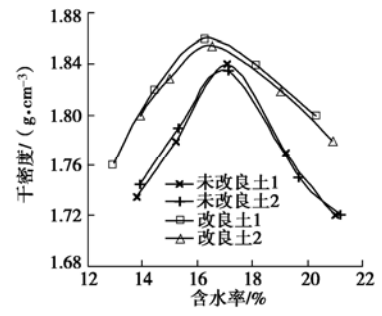


图 3 击实试验对比

Fig. 3 Comparison of the compaction tests

3.6 抗剪强度对比

取原状土与改良土进行直剪试验,结果如表 3 所示。改良土 φ 值差别不大,但 c 值提高了 25.1%,说明了改良剂对膨胀土的工程性质有很大程度的改善。

3.7 CBR 试验对比

如图 4 所示,相同干密度改性样与未改性样 CBR 值与含水率变化关系对比。当含水率低于最优含水率时, CBR 值变化较小,当超过最优含水率时, CBR 值急剧下降。一种可能是由于颗粒周围的水膜在试件剪切移动时起到润滑作用。如果含水率过大,水膜过厚,颗粒间摩擦力会大大减小,因而黏土含量越高,对浸水越敏感, CBR 值受到的影响就越大, CBR 值降低的就越多。这也说明了改良土黏粒含量降低了,土质矿物成分对浸水的敏感性也降低了。改性土 CBR 值在未改良土 CBR 值之上,在一定程度上说明了土

表 3 膨胀土改性前后抗剪强度对比

Table 3 Comparison of shear strengths of expansive soil before and after modification

土类	含水率/%	干密度/(g·cm ⁻³)	不同垂直压力下的剪应力/kPa				抗剪强度指标	
			50	100	200	300	<i>c</i>	<i>φ</i>
改良前	17.1	1.84	180	200	250	315	148.4	28.4
改良后	16.3	1.86	210	240	304	345	185.7	28.7

表 4 改良前后土体水理特性对比

Table 4 Comparison of hydrated properties of the soil before and after improvement

土样名称	自由膨胀率/%	密度/(g·cm ⁻³)	浸泡开始情况	浸泡最终情况
原状土	77	1.91	浸水后试样有气泡冒出, 慢慢发生开裂, 3~4 min 后开始崩解, 试样周围出现浑浊现象, 半小时后塌落 50%以上。	24 h 后几乎崩解为小团块, 塌落 90%以上
改良土	32	2.02	试样浸水, 有少量气泡冒出, 10 min 后出现微量裂隙, 1 h 后裂隙增多, 出现土屑滑落现象。	24 h 后试样塌落量小于 40%
二倍改性剂改良土	25	2.09	试样浸水, 0.5 h 后出现微量裂隙, 1 h 后逐渐开裂。	24 h 后试样表面起皮, 48 h 后塌落量小于 30%
三倍改性剂改良土	20	2.08	试样浸水, 24 h 内未见开裂	72 h 后, 无崩解, 无变形, 无容裂, 整体形状完好

质膨胀量较低。另一种可能就是过高的含水率降低了改良剂浓度, 造成改良剂流失, 影响了改良效果。对云南等多雨地区, 进行现场改良施工时, 要保证在填土路堤含水率控制在最优含水率附近时碾压, 宜低不宜高, 要特别注意避免在填土含水率较高的条件下喷洒改良剂, 这对路基的水稳性有重要的指导意义^[3-5]。高速公路上路堤填筑要求 CBR>3.0, 可见改良土已满足路堤填筑要求。

即使长期浸泡, 崩解性也较小。这一膨胀土改良特性特别适合云南等多雨地区路堤施工。

4 经济对比

对于云南某高速公路路堤填筑方案中各种设计方案, 我们按施工直接价格进行了对比, 如表 5 所示。该化学改性土工程造价 32 元/m², 比填石路堤方案低 48%, 比填山渣低 41%, 比加筋灰土低 33%, 比石灰土低 25%, 大大降低了工程造价。

表 5 膨胀土传统填筑方案与改性土填筑方案价格对比表

Table 5 Comparison of prices between traditional project for

expansive soil and improved project	
膨胀土路堤填筑方案	工程单价/(元·m ³)
填石路堤	62
填山渣	54
加筋灰土	48
石灰土	40
化学改性土	32

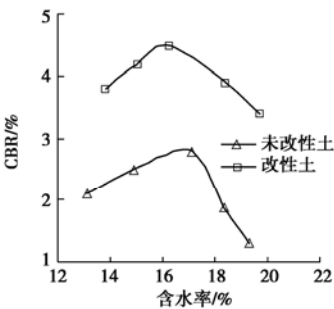


图 4 膨胀土改良前后 CBR 值随含水率变化

Fig. 4 Variation of CBR values with water content for expansive soil before and after modification

3.8 水理特性试验

从 CBR 试验中, 我们就已经发现, 改良后的膨胀土吸水膨胀率明显低于未改良土, 说明了改良土的水稳性较好。为了可以直观的观察改良效果, 将具有相同含水率(位于击实曲线干半支)的膨胀土原状样和改良样制成环刀重塑样放入水中, 进行水理特性试验, 观察土质在水中湿化崩解情况, 如表 4 所示。试验结果说明, 改性土的水稳性较好, 特别是随着改性剂添加倍数的增多, 膨胀性逐渐降低, 水稳效果更好,

5 结 论

通过分析膨胀土改性剂改性原理和进行系统的室内试验, 对改性土的基本物理力学特性, 诸如颗粒级配、击实特性、强度特性、水理特性等进行了探讨, 得出如下主要结论:

(1) 该膨胀土化学改性剂通过离子交换、联结、包裹、凝胶作用, 与黏粒表面产生较大分子力, 形成空间网络结构, 大大改善了膨胀土的颗粒级配、胀缩特性、强度特性、水理特性等物理力学性质。

(2) 改性后的膨胀土黏粒含量降低, 孔隙明显减少, 结构更加致密, 改性剂的“团聚”、“凝胶”效果显著。

(3) 改性后的膨胀土含水率容易控制、易于施工, 最佳含水率一般要减小 1%~2% 左右。

(4) 改性后的膨胀土自由膨胀率降低、抗剪强度、CBR 值都有明显提高, 水理特性更加稳定, 这对于路基稳定性、安全性有重要意义, 可见该改性剂对土的工程性质有很大程度的改善。

(5) 路堤在满足设计施工要求的情况下, 工程造价低于常规方案, 有较大的应用价值。

参考文献:

- [1] 郑健龙, 杨和平, 等. 膨胀土处治理论、技术与实践[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (ZHENG Jian-long, YANG He-ping, et al. Theory and practice of expansive soil treatment technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))
- [2] 赵颖文, 孔令伟, 郭爱国, 等. 典型红黏土与膨胀土的对比试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 15(23): 2593 - 2598. (ZHAO Ying-wen, KONG Ling-wei, GUO ai-guo, et al. Comparative laboratory study on typical red clay and expansive soil[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 15(23): 2593 - 2598. (in Chinese))
- [3] 余 颂, 陈善雄, 许锡昌, 等. 中膨胀土 CMA 改性室内试验研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1622 - 1627. (YU Song, CHEN Shan-xiong, XU Xi-chang, et al. Laboratory test study on CMA-treated expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1622 - 1627. (in Chinese))
- [4] 朱志铎, 郝建新, 黄立平. CBR 试验影响因素及在工程中应注意的几个问题[J]. 岩土力学, 2006, 27(9): 1593 - 1596. (ZHU Zhi-duo, HAO Jian-xin, HUANG Li-ping. Influential factors in CBR test and several problems to be noticed in engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(9): 1593 - 1596. (in Chinese))
- [5] 李志清, 胡瑞林, 吴礼舟, 等. 生态防护在高速公路护坡中的应用研究[J]. 工程地质学报, 2005, 13(2): 280 - 284. (LI Zhi-qing, HU Rui-lin, WU Li-zhou, et al. Research on zoology protection in the application of expressway revetment[J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(2): 280 - 284. (in Chinese))

请订阅《岩土工程学报》

《岩土工程学报》创办于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发刊。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表我国理论和实践水平的论文、报告、实录等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国有自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有论文、短文、工程实录、焦点论坛、学术讨论和动态简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续 5 版确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中排列首位; 本刊被收录为国家科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊), 并被评为“百种中国杰出学术期刊”; 本刊被“中国科技论文与引文数据库”、“中国期刊全文数据库”和“中文科技期刊数据库”

等多个国内重要的数据库收录, 并可在《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》、万方网和重庆维普网全文检索; 本刊被美国工程索引 Ei Compendex 等国际检索系统收录。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, 大 16 开, 双栏排版, 160 页, 每月中旬出版, 定价 25 元/期, 全年 300 元。

本刊国际标准刊号 ISSN1000 - 4548, 国内统一刊号 CN32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO0520。

欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: (210024) 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 联系电话: (025) 85829534, 85829553; 传真: (025) 85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

(本刊编辑部)