

有机阳离子化合物对改善膨胀土性质的影响

罗 逸

(华中理工大学化学系, 武汉, 430074)

李国华

张 慧

(河海大学工程力学系, 南京, 210098) (中国地质大学水文系, 武汉, 430074)

文 摘 用微观分析和土工试验研究了含 N 的有机阳离子化合物对改善膨胀土性质的影响。研究表明, 土体亲水性改变和强度提高都与该化合物能有效地与土颗粒进行阳离子交换并在颗粒表面形成吸附膜有关。此外, 还对其应用可行性作了探讨。

关键词 膨胀土, 有机阳离子化合物, 阳离子交换, 吸附膜。

1 概 述

1938 年美国开垦局在俄勒冈州的一例基础工程中首次认识了膨胀土问题^[1]。从那时开始, 工程人员才领悟到结构物的损坏, 除了由于地基沉降造成损坏以外, 有时还有例如由膨胀土造成的结构性损坏。据美国学者 D. E. Jr Jones 和 W. G. Holtz 估计, 1973 年美国由于膨胀土造成的经济损失达 22.55 亿美元^[2], 即由膨胀土造成的损失已超过洪水、地震、飓风和龙卷风造成损失的总和。而中国在这一方面的经济损失估计每年也在数亿元以上^[3]。这种情况已经引起世界各国的注意, 并努力寻找各种有效方法避免或减轻它们的危害。

水的渗入和蒸发是造成膨胀性土层发生位移、开裂、隆胀和滑塌的主要原因。工程上常采用砂石垫层、排水沟、散水坡或挡水墙等方法以减少水与基础土层的接触机会。化学上则运用不同的原理和方式阻止膨胀。一种方法是用化合物固结土体, 例如水玻璃、树脂、丙烯酰胺、水泥及石灰等进行灌浆处理。另一种方法是对土本身进行化学改性, 即改变膨胀土的亲水性质。对后一种方法, 目前研究人员的兴趣主要集中在有机阳离子化合物上, 这是由于它们有可能同时满足如下基本条件: ①能显著改变土的水敏膨胀属性; ②与膨胀土作用速度快, 当它伴随大量的水注入土层时, 不会触发深层土的膨胀; ③有效作用期长; ④在低渗硬土中容易渗透和扩散; ⑤能提高土体力学强度; ⑥无毒性, 对环境影响小; ⑦与其它方法相比, 经济上可被接受。

早在 1949 年, 美国学者 D. T. Davidson 和 J. E. Glob 通过对依阿华州高塑性地基土进行实验研究发现, 能提供大量有机阳离子化合物的水溶液可减小塑性土样的塑性、收缩及膨胀性, 并认为将它们作为高塑性土的稳定剂具有极大的前途^[4]。70 年代, 美国科罗拉多州丹佛市土工技术公司采用 705 和 706 专利溶液处理丹佛粘土页岩重塑土, 进行膨胀及渗透实验, 结果表明土的膨胀潜势极大地降低了, 并且能渗透不透水性土, 其渗透性约为每年 $1.8288\text{m}^{[5]}$ 。虽然随后的现场试验未获成功, 但为后来的研究提供了有益的信息和经验。

2 实 验

2.1 微观分析实验

土样: X- 衍射实验采用天然钙蒙脱石。扫描电镜实验采用泥质砂岩, 其矿物成份为: 粘土含量 21.7%, 其中蒙脱石 85%, 伊利石 7%, 高岭石 5%, 绿泥石 3%。
方法: X- 衍射分析和扫描电镜分析方法。
处理液: H₁ 为烷基苄基吡啶化合物的 10% 的水溶液。
实验结果: X- 衍射实验结果参见图 1, 扫描电镜实验结果参见图 2。

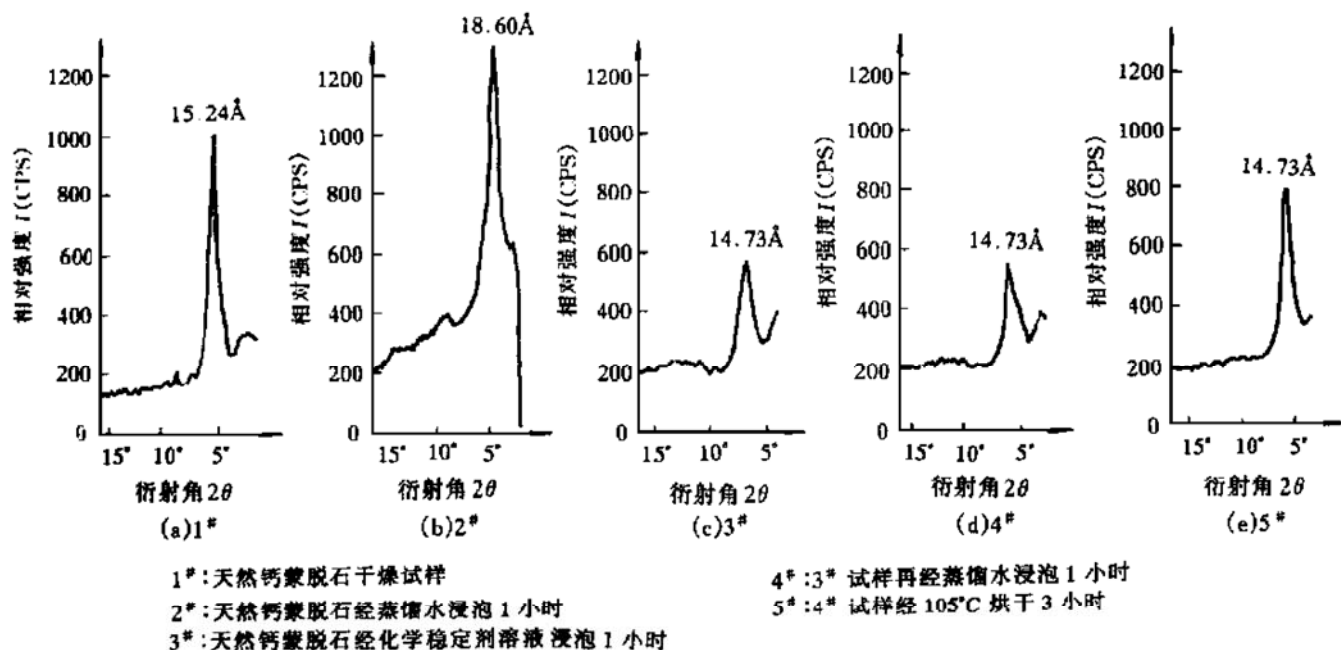


图1 钙蒙脱石 X- 衍射实验结果($d_{(001)}$)



(a) 未经处理的泥岩颗粒松散表面棱角清晰 (b) 经 H-1 处理的泥岩颗粒被膜状物胶结包裹, 边缘圆钝。

图2 扫描电镜实验结果

2.2 土工实验

土样: 人工模拟土(膨润土:高岭土=1:1)重塑制样及原状土样。
方法: 参照国家《土工试验方法标准》。
处理液: H₁ 为烷基苄基吡啶化合物为主成份的水溶液; H₂ 为多羟基多 N 原子聚合物为主成份的水溶液; H₃ 为 AlCl₃ 水溶液; H₂₄ 为 H₂ 改进型化合物水溶液; H₄ 为



实验结果: 参见表 1。

表 1 化学稳定剂处理膨胀土室内实验结果

土样	处理液	物理性质							可塑性		膨 胀			压 缩		抗剪强度	
		含水量 (%)	容重		比重	孔隙比	孔隙度 (%)	饱和度 (%)	液 限 (%)	塑 限 (%)	自由膨胀率 (%)	膨胀含水量 (%)	膨 胀 力 (kPa)	压缩系数 (MPa ⁻¹)	压缩模量 (MPa)	内 聚 力 (kPa)	内摩擦角 (°)
			湿 (kN/m ³)	干 (kN/m ³)													
模 拟 土	蒸馏水	52.9	1.40	0.92	2.70	1.95	66.0	73.0			176.9	72.5	0.26	0.47	6.3	5.6	2.38
	2% H ₁	35.0	1.41	1.40	2.70	1.59	61.0	60.0			53.8	35.4	0.19	0.35	7.4	11.5	3.32
	2% H ₂	37.0	1.39	1.01	2.70	1.66	64.0	60.0			46.2	40.9	0.18	1.69	1.60	14.4	5.99
	5% H ₃	37.6	1.37	1.00	2.70	1.71	63.0	57.0			38.5	34.0	0.26	1.85	1.40	10.4	5.98
	10% H ₄	37.3	1.41	1.03	2.70	1.63	62.0	62.0			215.4	32.1	0.18	1.84	1.40	9.70	2.93
天 然 土	原状土	18.4	18.8	15.9		0.726	42.1	69.4	49.0	24.6							
	蒸馏水	26.1	19.0	15.1		0.818	45.0	87.4			75			0.40	4.5	19.85	8.69
	10% H ₄	21.6	19.1	15.7		0.744	42.7	79.5			30			0.17	10.3	68.45	14.44
	10% H _{24-C}	26.9	19.6	15.4		0.794	43.6	95.2			25			0.11	16.1	44.89	10.87

3 分析与讨论

3.1 抑制蒙脱石晶层膨胀性的影响

蒙脱石发生晶层膨胀是造成膨胀土具有膨胀特性的原因之一。当外来水浸入时, 原有的维持晶层间静电平衡的吸附阳离子(如 Na⁺, Ca²⁺ 等)会和水分子发生水反应。水合离子吸附力较弱易被流水带走, 此时, 仅靠晶层间的微弱分子力(范德华力)已不足以克服由于正电荷的损失而产生的负静电斥力, 致使晶层间距增大形成膨胀。研究选用的均为带有较强正电荷的联接有多个 N 原子的有机物。对于具有很大的阳离子交换容量的蒙脱石来说, 选择吸附规律使得这些化合物可以和原有的无机阳离子发生交换吸附。有机阳离子化合物的吸附和较强的静电作用削弱了层间负电斥力, 阻止晶层间距的扩展, 有时甚至产生收缩。X-衍射实验结果证实(图 1), 在烷基苄基吡啶分子的作用下, 晶层已经产生收缩, 由原始样的 15.24 Å 收缩为 14.73 Å, 而未经处理的试样则发生水化膨胀, d₍₀₀₁₎ 值扩展为 18.60 Å。进一步的实验结果还明, 无论对处理过的试样再进行水泡或是干燥, d₍₀₀₁₎ 值不再发生改变, 始终为 14.73 Å, 这说明试样已对水不再“敏感”, 即蒙脱石的亲水性和膨胀特性已发生了改变。

3.2 抑制粘土微粒间膨胀性的影响

膨胀性粘土的膨胀性还来源于粘粒间的膨胀。膨胀土的粒度成份以小于 0.005mm 的粘粒为主, 其中小于 0.002mm 的占有相当大的比例, 因此具有巨大的比表面。外来水在粘粒表面形成吸附水膜和扩散双电层, 当水量很高时, 表面水膜和双电层增厚, 水合能和双电层斥力增大, 致使粒与粒之间的间隔变大, 形成所谓的外膨胀现象。粘粒表面带负电荷, 有利于有机阳离子化合物的吸附; 有机化合物一般都具有很大的分子量, 因而可以和粘粒表面产生较大的范得华力; 分子链上带有羟基的有机化合物有时还可以和矿物晶面上的氧层和氢氧层形成氢键, 这些因素致使有机阳离子化合物能在粘粒表面产生很强的附着力, 而且在适当的浓度条件下, 有的化合物还会在表面形成一层覆盖膜。扫描电镜照片(图 2(b))显示了 H₁ 在粘粒表面

形成的覆盖膜的情况下,它沿表面分布,将大小微粒联结和包裹。膜的作用在于:①削弱微粒间的负电斥力;②减小吸附水膜的量及扩散双电层产生的粒间斥力;③阻止土壤中水溶性盐和胶结物的溶解;④加强粘粒间的胶联作用。

由图2还可以看出,覆盖物仅对粘粒极细小的空隙有堵塞作用,而对粘粒间的孔隙喉道不产生明显影响,即土体的渗透性不会发生较大的改变,这已为孔体积测定实验所证实^[7]。当外来水沿孔缝、裂隙进入土体时,由于带有大量斥水基团(如烷基、苄基等)的覆盖膜的保护作用,它们可能将主要以自由水的形成存在而对粘土的膨胀不再产生太大的影响。

3.3 对降低膨胀土强度衰减性的影响

有机阳离子化合物的交换吸附作用及吸附膜的形成不仅改变或部分改变了膨胀土的亲水性能,而且使土的工程力学性质得到了改善。分析表1的实验结果可以发现,与蒸馏水对照组相比,除个别情况外,经处理过的试验土样均表现为含水量、饱和度、孔隙比、孔隙度的降低和容重的增加以及抗剪强度提高的规律。在压缩性能方面,则因处理剂的种类不同而异,有的提高而有的反而降低,原因目前还不清楚,有待进一步研究。在天然原状土实验中,以 H_{24} 为主剂的处理液试验效果比较明显,土样的压缩系数由 0.40MPa^{-1} 降低到 $0.11\sim 0.17\text{MPa}^{-1}$;内聚力由 19.85kPa 提高到 $44.89\sim 68.45\text{kPa}$;内摩擦角由 8.69° 增大到 $10.87^\circ\sim 14.44^\circ$ 。这种处理效果在工程上是有一定意义的。此外,实验时还发现,经蒸馏水处理过的土样质软且粘性很强,而经处理液处理过的土样则似有砂质性,手感硬,这说明处理液已改变或部分改变了土壤的物理化学性质。表1的结果证实了在有机阳离子化合物的作用下,膨胀土遇水强度迅速衰减的特性受到了抑制。

3.4 实验中异常现象的解释

分析表1结果,经 H_4 溶液处理过的土样,各项性能指标均获得改善,唯有自由膨胀率反常地高,达到215%,远高于蒸馏水处理样的176%。其原因在于, H_4 聚合物在水中形成特殊的一种胶体溶液。在这种溶液中,细小的粘土微粒(过200目筛)并不以通常的方式产生较为密实的粒状沉淀,而是形成一种松散的絮状沉淀物。这种絮状物密度小,体积大且富含水,因此在观察读数时得到了异常高的结果。

3.5 对无机铝盐的效果评价

无机铝盐中的 Al^{3+} 具有很高的正电荷,对土壤中的 Na^+ 、 Ca^+ 等离子具有较强交换吸附能力,国外亦有用它处理软土地基的报道^[8]。本项研究为便于比较和评估有机阳离子化合物的效果,故设计和安排了铝盐试验组。实验结果证明, AlCl_3 在改善膨胀土的各项性能品质方面确有一定效果,但与有机长分子链的化合物相比,其吸附力,胶结性等均较弱,宏观上表现为抗流水冲蚀性差,有效作用期短,因此实际应用时应加注意。

3.6 工程应用可行性的探讨

如何降低工程处理费用是膨胀土稳定剂研制过程中亟待解决的难点之一。本项研究要求当稳定剂的浓度低于10%时仍然能有效地抑制膨胀土的膨胀。这是基于如下两方面的考虑:①只有当浓度等于或低于这种浓度时其药品费用才有可能为工程上所接受;②有机化合物的粘度都很大,必须借助大量的水以利于加大它们的扩散范围和在地体中分布均匀性。膨胀土俗有“硬土”之称,是一种透水性很差的土壤。尽管处理液中含有90%以上的水,粘度也与水很接近,但如果仅靠自然渗透,其速度是很慢的。最经济合理的方法是压力挤注。国外在1974年曾进行过一次现场挤注实验,采用的挤注机械能以每分钟 $6.096\text{m}/\text{min}$ 的速度钻进,并且一次可同时钻成3个孔,孔距为 0.9144m 英吋,注进压力为 68.95kPa 。这次稳定剂防膨实验尽管未获得预期的结

果,但取得了一些有价值的经验,例如孔距不能太大,挤注压力应大于 1.724MPa 以及应加设压力表,以帮助确定溶液是否沿土层的节理和裂缝漏失等^[9]。上述方法值得借鉴和参考。

4 结 论

综上所述,某些含 N 的有机阳离子化合物具有改善膨胀性粘土品质的效果。经这些化合物溶液处理过的土样,其膨胀性、含水量、孔隙比、孔隙度和饱和度降低,容重增加,抗剪强度也获得了相应的提高。膨胀土品质的改善是由于这些化合物能和土中的无机阳离子进行有效的阳离子交换吸附。吸附作用及吸附膜的形成在参与降低土的亲水性,膨胀性和强度衰减性的过程中起到了重要的作用。

参 考 文 献

- 1 Holtz W G, Gibbs H J. Engineering Properties of Expansive Clays. Proceedings, ASCE, 1954, 80.
- 2 Jounes D E Jr, Holtz W G. Expansive Soils —the Hidden Disaster. Civil Engineering, Aug. 1973, 43: 8
- 3 廖世文. 膨胀土与铁路工程. 北京: 中国铁道出版社, 1984. 11.
- 4 Davidson D T, Glab J E. An Organic Compound as a Stabilization Agent for Two Soil Aggregate Mixtures. Proceedings Highway Research Board, 1949, 29.
- 5 陈孚华. 膨胀土上的基础, 石油化学工业部化工设计院等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979. 175.
- 6 廖世文. 膨胀土与铁路工程. 北京: 中国铁道出版社, 1984. 80.
- 7 罗逸等. 改变膨胀岩土工程地质特性的化学处理方法初探. 见: 中国岩石力学与工程学会第三次大会论文集. 北京: 中国科学技术出版社, 1994. 166.
- 8 福岗正己. 最新软土地基处理方法. 丁玉琴译. 北京: 中国铁道出版社, 1988. 2
- 9 陈孚华. 膨胀土上的基础. 石油化学工业部化工设计院等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 1979. 177~ 178.

Effects of Nitrogenous Organic Compounds for Improving Engineering Properties of Expansive Clays

Luo Yi

(Department of Chemistry, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan)

Li Guo-hua

(Department of Engineering Mechanics Hehai University, Nanjing)

Zhang Hui

(Department of Hydrolgeology and Engineering, Geology, China University of Geosciences, Wuhan)

Abstract The specific properties for nitrogenous organic compounds which will be used for improving engineering properties of expansive clays have been researched by microcosmic analysis technology and geology engineering experiments. The results have shown that the expansibility was inhibited, the cohesive force and the angle of internal friction were increased and the original structure was preserved with a cation exchange and an adsorption of the organic film on the surface of clay corpuscle.

Key words expansive clay, nitrogenous organic compound, cation exchange, adsorption film.