

新型高分子材料 SH 加固黄土强度及机理探讨

王银梅¹, 杨重存², 谌文武³, 韩文峰³

(1. 太原理工大学 建筑与环境工程学院, 山西 太原 030024; 2. 同济大学 地下建筑与工程系 上海 200092;
3. 兰州大学 资源环境学院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 高分子材料在土加固工程中有很大的发展前途。SH 为新型水溶性高分子固化材料。通过单轴抗压强度试验、X 射线衍射、红外光谱、扫描电镜结合 X 射线电子能谱及比表面/微孔隙分析等现代测试手段, 研究了 SH 加固黄土的强度特征, 探讨该固化材料的固化机理。结果表明: SH 加固黄土的强度随着 SH 掺量的增大而增加, 但不是线性关系; SH 固化黄土的后期强度很高。黄土用 SH 固化后, 压缩性减小, 湿陷性消失。SH 的掺入, 改变了黄土的结构, 使黄土的颗粒间联结增强。它通过氢键、离子交换、吸附、絮凝等物理化学作用于黄土而显著提高黄土的强度。

关键词: 土力学; 生态环境材料; 高分子材料; 化学加固; 黄土; 抗压强度; 机理

中图分类号: TU 441

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)14-2554-06

STRENGTH CHARACTERISTICS AND MECHANISM OF LOESS SOLIDIFIED WITH NEW POLYMER MATERIAL SH

WANG Yin-mei¹, YANG Zhong-cun², CHEN Wen-wu³, HAN Wen-fen³

(1. *College of Architecture and Environment Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030024, China*;
2. *Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*;
3. *College of Earth and Environment Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Polymer materials have wide prospect of application to soil solidification engineering. SH is a new water-soluble solidification material. Based on the uniaxial compressive strength test, and modern analysis methods such as X-ray diffraction(XRD), Fourier transform infra-red(FTIR), scanning electron microscope, X-ray energy dispersive spectrum(EDS) and surface area/micro porosity, the mechanism and strength characteristics of the SH solidified loess are analyzed. The research results show that the strength of the solidified loess increases with the content of SH, but the interrelationship is not linear, and long-term strength of solidified loess is very high. After loess is solidified by SH, the compressibility decreases, and the collapsibility is lost. The admixing of the SH changes the structure of the loess. It makes the connection of loess grains stronger. By hydrogen bond, ion exchange, absorption of macromolecular and flocculation; the physicochemical interaction may occur between SH and the loess. This may be the main reason for the improvement of the strength of the loess.

Key words: soil mechanics; ecomaterial; polymer material; chemical solidification; loess; compressive strength; mechanism

收稿日期: 2004-04-05; **修回日期**: 2004-06-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)课题(2001AA322110)

作者简介: 王银梅(1965-), 女, 2004年于兰州大学资源环境学院地质工程专业获博士学位, 主要从事岩土工程和工程地质方面的教学与研究工作。
E-mail: wangym65@163.com.

1 引言

黄土占据我国西北、华北等地区 $6.4 \times 10^5 \text{ km}^2$ 疆土,若在这些地区进行经济建设和改善生态环境工程,一般均要遇到黄土。但天然黄土具有强度低、变形大、承载力低、灵敏度高等一系列不良的工程性质,所以一般需对这样的黄土进行加固处理。黄土的化学加固法方便、快速,已为人们所接受,但由于大部分黄土固化剂属于无机胶结材料,在实际工程应用中有程度不同的缺点,应用受到限制。如石灰固结黄土,强度不高,后期强度也没有增加,且耐水性差;水泥黄土的强度和耐水能力都较高,但收缩性很大,极易开裂^[1];硅化法、碱液加固法以及水泥浆与水玻璃混合加固法等,费用较高,一般只用来处理局部范围的地基事故。为此,新型的水溶性高分子固化剂引起了人们广泛的重视^[2]。

由兰州大学自行研制开发的SH高分子固化材料为固化行列中的新兴产品,其亲水性强,在水中能无限溶解而形成溶液。可在常温下固化而形成强度,且后期强度很高,耐水性非常优越。SH液的使用非常方便,施工时,可保持其他施工工艺不变,只需将其按需要用清水稀释至一定浓度后均匀洒于翻松的黄土基层表面,碾压后即可满足工程要求。通常SH用量少,成本低(为低成本制备技术)。SH固化材料经兰州医学院药理教研室对小白鼠作急性毒力试验(对小白鼠进行强行喂养),其结论为无毒,完全达到了环保要求,本身不会对环境产生负面影响和破坏;而用较低浓度的SH固化黄土后表面还可长出植物,从而可与植树种草有机结合,所以为生态环境材料。

本文在SH固化黄土强度试验研究的基础上,探讨加固黄土的机理,目的在于认识SH加固黄土的微结构特征,探寻SH固化材料对土的工程性质产生影响的原因,以深刻认识这种新型固化材料,为这一新材料加固土的推广应用提供理论依据,从而提高实用性。

2 试验方法

2.1 材料

选用兰州地区黄土,其主要性质见表1,该黄土具有湿陷性。固化黄土样品中SH固含量为6%

(固含量指SH中所含固体的质量占黄土质量的百分数)。

表1 试验用黄土的性质
Table 1 Properties of the loess

土样名称	含水量 /%	密度 $/(g \cdot cm^{-3})$	液限 /%	塑限 /%	液性指数	相对湿陷系数
黄土	8.8	1.30	31.7	20.2	1.32	0.062

2.2 试件制备与养护

先将试验用黄土风干,粉碎过0.5 mm筛,掺入不同量的SH及空白水样,拌合均匀,浸润1 d后用小型击实试验方法,按设计干密度在 $7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm} \times 7.07 \text{ cm}$ 的模具内进行成型、脱模。所有试件都置于室内通风干燥处至龄期结束。

2.3 试验方法

(1) 抗压强度试验:

用WE-30型液压式万能材料试验机测试固化试件的单轴抗压强度,掌握SH加固土的强度随固化剂掺量的变化规律。

(2) X射线衍射试验

X射线衍射(X-ray diffraction, XRD)是物相定性分析的重要手段。用Rigaku RINT 2100 X射线衍射仪对黄土和固化黄土样品进行分析。

(3) 红外光谱试验

红外光谱法简便易行,特别适用于聚合物的分析^[3]。

SH薄膜可直接测绘红外谱图。以KBr压片法测定的黄土和固化黄土体的红外光谱,是被测样品中各个键与基团吸收红外能量的总和,所以反映的是样品颗粒表面与内部的平均构成。用Nicolet NEXUS 670傅立叶变换红外光(Fourier transform infra-red, FTIR)测定仪,测试黄土、SH及SH固化黄土块体的FTIR图。

(4) 扫描电镜和能谱分析

扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)的试样为黄土及SH固化黄土。试块风干后,用锯条将其切割成直径为5 mm,高约2 cm的柱体,然后用手掰断,取其较平整的断面,用吸球把表面的拢动颗粒除去,得到新鲜而较完整且保持其原状结构的试样。在试样表面喷镀一层黄金薄膜后,即为扫描电镜的断面。用日本电子光学公司JSM-5600LV低真空扫描电镜(分辨率3.5 nm)观察显微照片。

利用能谱分析技术结合扫描电镜来测定颗粒间胶结物的化学成分。本文采用美国 KeveX 公司的 X 射线能量色散谱(X-ray energy dispersive spectrum, EDS)仪器(分辨率 131.7 eV)测定了黄土在 SH 作用前后的成分分布^[4]。

(5) 比表面/微孔隙测试

比表面/微孔隙(surface area/micro porosity, SMP)试验用中国科学院兰州物理化学研究所 Micromeritics ASAP 2010 快速表面积孔隙分析仪测定。用 N₂ 吸附和 BET 规程测定矿物的表面积。

3 试验结果

3.1 SH 加固黄土的强度特征

设计固化黄土的干密度为 1.6 g/cm³, 分别掺加不同配比 SH 的固化试样的无侧限抗压强度试验结果见表 2。

表 2 不同配比试样 60 d 的抗压强度

SH 掺量/mL	SH 固含量/%	抗压强度/MPa
0	0.00	2.29
60	0.28	2.60
100	0.35	3.02
120	0.42	5.04

从表 2 中可以看出, 黄土的强度仅为 2.29 MPa, 掺入少量的 SH 后, 其强度明显提高。

为了达到既能保证加固黄土的质量又能降低工程造价的目的, 有必要求得新型固化材料掺量与固化土强度之间的关系。试验中 SH 的掺量分别为 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130 mL, 对应的换算为 SH 固含量比例分别为 0.63%, 0.73%, 0.83%, 0.94%, 1.04%, 1.15%, 1.25%, 1.35%。SH 固化黄土的干密度为 1.60 g/cm³。测定结果如图 1, 2 所示。

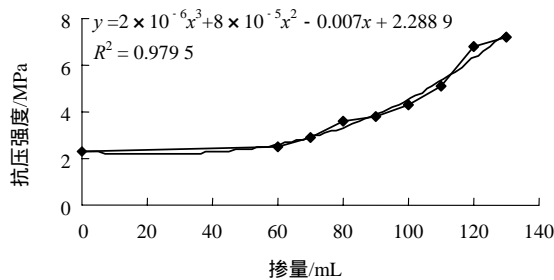


图 1 SH 掺量与固化黄土强度的关系

Fig.1 Relation between compressive strength and SH content of SH solidified loess

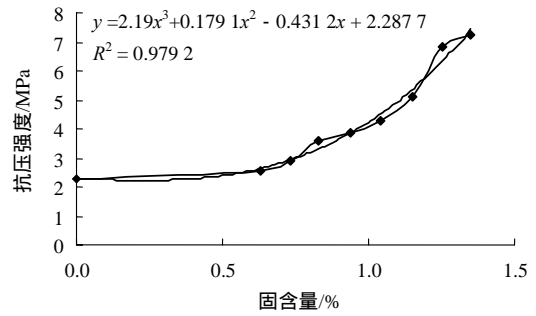


图 2 SH 固含量与固化黄土强度的关系

Fig.2 Relation between compressive strength and SH solid content of SH solidified loess

图 1, 2 说明, 用 SH 固化黄土, 虽 SH 的用量很小, 而强度却很大。用最小二乘法作回归分析得到强度-掺量关系, 其相关系数为 0.97。由此可知, SH 的掺量与固化黄土的强度之间存在着较好的相关性。因此, 在实际施工前, 只要有足够时间, 事先取实际土样, 作一定数量掺有给定配比的新型固化土的固化土强度试验, 便可得到固化黄土的强度-掺量经验式。施工中可根据工程要求的加固土强度, 计算出需加固的 SH 掺量, 这对设计和施工是很有益的。

3.2 SH 对黄土微结构的影响

为了研究 SH 加固黄土的加固机理, 选择黄土 0[#] 试样及 SH 加固黄土(1[#] 试样, 其 SH 固含量为 1.04%)进行试验。下面给出试验结果及其分析。

3.2.1 XRD

XRD 结果如图 3, 4 所示。由图 3 可知, 黄土的主要成分为石英、长石、方解石和伊利石。将图 3, 4 进行对比, 发现两者基本吻合, 固化后的衍射曲线没有新峰产生, 说明没有新物相出现。这一结果定性地说, 用 SH 固化黄土时, 虽相互间发生作用, 但没有发生化学反应而生成新的化合物。

黄土及 SH 固化黄土样的面间距(假想为理想晶

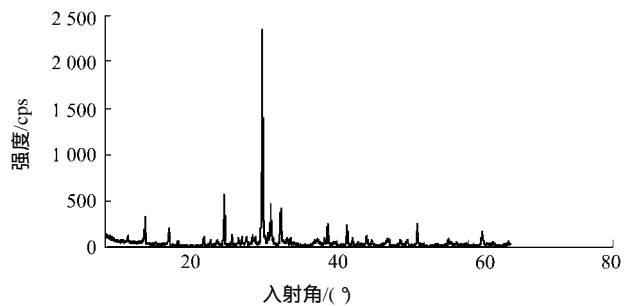


图 3 黄土的 XRD 曲线图

Fig.3 XRD of the loess

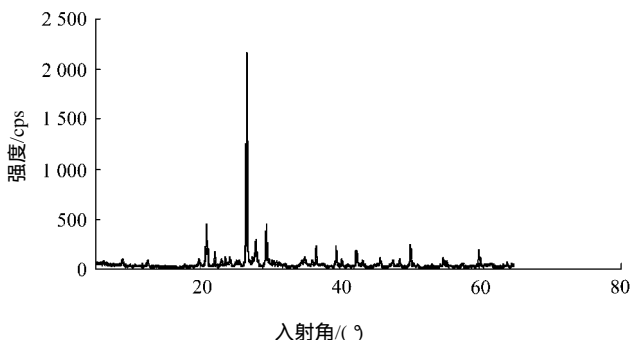


图 4 黄土固化后的 XRD 曲线图

Fig.4 XRD of the loess solidified with SH

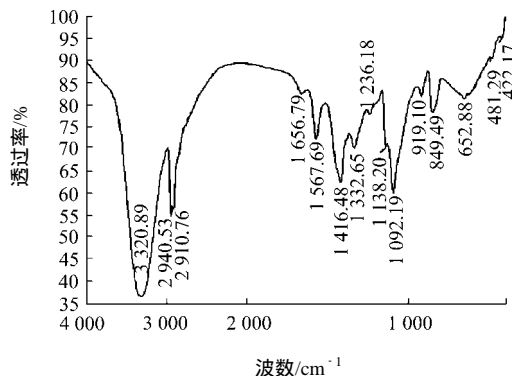


图 6 SH 的 FTIR 谱图

Fig.6 FTIR of SH

体,由无穷平行的晶面组成,面与面间的距离即面间距 d 值如表 3。

表 3 试样的 d 值情况

Table 3 d value of samples

试样编号	$2\theta = 20^\circ$	$2\theta = 60^\circ$
0 [#]	4.487 4	1.542 4
1 [#]	4.462 4	1.540 6

表 3 的 d 值表明,不论在低角度区还是高度角区,在入射角 2θ 相同时,掺入固化材料 SH 的 d 值将变小。 d 值越小,即面间距越小,也就是土颗粒接触越紧密,土体固化越密实。

3.2.2 FTIR

黄土、SH 及 SH 固化黄土试样的 FTIR 如图 5 ~ 7 所示。

(1) SH 与黄土结合后,谱无明显变化,没有出现新峰,说明没有新基团产生。原黄土 FTIR 中的主要吸收峰都依然存在。FTIR 谱图 SiO_3^{2-} 吸收峰位由 1 028.93 变为 1 027.29,说明氢键的形成使电

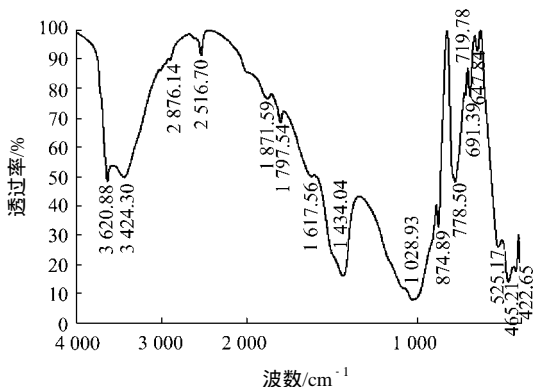


图 5 黄土的 FTIR 谱图

Fig.5 FTIR of the loess

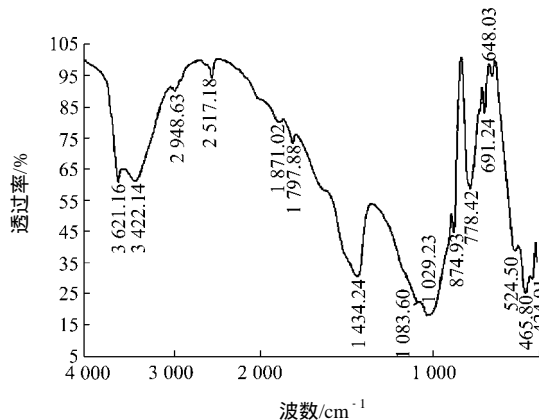


图 7 固化黄土的 FTIR 谱图

Fig.7 FTIR of the loess solidified with SH

子云密度平均化,从而使键力常数减小,频率下降。

分析图谱可知:

(2) SH 与黄土作用后,SH 的主要吸收峰完全没有出现,这是由于在固化样品中,SH 用量较少(SH 固含量 1.04%)的缘故。

FTIR 试验所测的 SH 固化前后的谱图揭示了:

(1) SH 与黄土结合以后,材料本身的官能团对土没有化学键的结合,只表现出微弱的氢键及范德华力的影响。

(2) 固化强度主要是物理化学作用而形成的。

3.2.3 SEM

由 SEM 观察到了多张显微照片,其中典型的如图 7, 8 所示。

黄土为粒状架空结构或粒状镶嵌接触结构,颗粒及孔隙清楚,孔隙内有胶结物,主要为粘土矿物和碳酸钙,其次是其他水溶盐和腐殖质等,它们为弱粘合剂。用 SH 加固后,可见 SH 附着在土颗粒表面,土颗粒因团聚而增大,边缘粗糙不清,空隙内也可见增加了少量的丝状胶结联结。

