

黄土化学改良试验研究*

王银梅 高立成

(太原理工大学水利科学与工程学院 太原 030024)

摘要 黄土的化学改良是黄土工程地基处理研究领域中的重要课题之一,开展这方面的研究对于治理黄土地基基础工程,从根本上解决黄土危害具有重要的理论价值和较好的工程应用前景。在我国西北、华北地区,经常要碰到填筑路基、渠道和边坡等黄土工程,由于黄土及重塑黄土具有许多特殊的物理力学性能,必须经过改良处理后才可应用。为了探讨化学材料对黄土特性的影响,本文以山西太原黄土为对象,通过掺加新型高分子土固化材料 SH 和水泥进行化学改良,就改良土试样进行抗压强度、直接剪切和渗透试验等分析研究。研究结果表明:SH 和水泥均能改变黄土的工程性质。黄土加固后强度指标,抗渗性优于黄土本身。固化黄土的强度特性和渗透性能受固化材料掺量、密度和龄期的影响明显。随着掺量增加,密度增大和养护时间的延长,抗压强度提高,抗剪强度增强,渗透系数减小。考虑到大掺量会超过经济限度,建议两者较适宜掺量控制在 10% 左右。SH 为水溶性液体固化材料,固含量较少,成本较低,但固化后强度较大,渗透性小,浸水不崩解,化学改良效果优于水泥,实际应用时可根据具体情况考虑优先选用 SH 改良黄土。

关键词 黄土 改良 无侧限抗压强度 抗剪强度 渗透性

中图分类号:TU444 **文献标识码**:A

EXPERIMENTAL RESEARCH ON CHEMICAL IMPROVEMENT OF LOESS

WANG Yinmei GAO Licheng

(College of Water Resource Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024)

Abstract Chemical improvement of loess is an important topic in the area of loess foundation engineering treatment. It has important theoretical value and good applied prospects in loess foundation treatment, loess hazard and control. Loess as filling material of roadbed, channel and slope engineering is frequently encountered in northwest and north of China. Loess and remolded loess possess many distinctive physical-mechanical properties that can lead to the improvement and development of various ground improvement techniques such as soil solidification and reinforcement. Loess must be improved. Otherwise it cannot be applied to engineering construction. In order to study the effects of loess solidified by chemical materials, a series of indoor experiments are conducted to analyze the properties of the raw loess of Taiyuan before and after treated by mixed with varying contents of new polymer-soil stabilizer(SH) and cement. The results of compressive strength, direct shear and permeability tests show that the engineering properties of the loess are improved by SH or cement. The strength and impermeability of solidified loess with chemical solidified materials are better than the raw loess. The properties of strength increased with the content of solidified agent, its density and curing time, but the permeability coefficients decreased. The suitable

* 收稿日期: 2012-05-03; 收到修改稿日期: 2012-07-20.

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2010011029-2).

第一作者简介: 王银梅, 主要从事工程地质与岩土工程方面的教学与科研. Email: wangym65@163.com

content of mixed SH or cement is about 10%. SH is a new polymer-stabilized agent of water-solubility. Because of its less dosage, cheap price, high strength, low permeability and no disintegrating effect on loess, SH is better than cement. SH can be taken into consideration according to practical situation.

Key words Loess, Improvement, Unconfined compressive strength, Shear strength, Permeability

1 引言

黄土广泛分布于我国西北华北地区,具有大孔隙性、水敏性和湿陷性等特殊性质,一般不能满足高速公路、铁路路基和水利类等较大工程要求,必须采取措施进行处理,使天然素黄土的强度和水稳性能等得以提高,这一课题长期为众多科研人员关注。

黄土地区常用重锤表层夯实、强夯、垫层、挤密、预浸水和化学改良等方法进行地基处理,由于每种方法优缺点不同,必须根据工程的特点和黄土的特性,并考虑施工设备,材料来源等因素综合分析比较,才可以选择合适的方法。化学改良黄土是通过在黄土中加入化学固化材料来改善黄土的工程地质特性,使其满足实际工程要求的一种方法。化学固化材料又称土壤固化剂已有很长的应用历史,最早出现的是水泥类土壤固化剂,随后石灰、粉煤灰,有机高分子材料及它们的组合产品相继问世,种类很多,发展较快。当土中掺加土壤固化剂时,不同类型的土和固化剂之间有可能发生诸如充填土粒孔隙或胶结土粒的水解水化,离子交换,絮凝,碳酸化,结晶和解离等物理化学反应,以改良土的工程性能。多数土固化剂适用于加固一般黏性土,固化剂固土后不能完全满足实际建设的需要,其最主要的问题是强度较低,干缩性较大,易脆裂,水稳性差^[1,2]。所以尽管土的固化剂不断出现,而固化材料的开发和试验研究仍一直在探索之中。

近些年,国外土壤固化剂被引入中国,针对我国土类特点,国内很多单位和学者开始了固化材料本土化的研究和探索,对土壤固化材料改性黄土进行了试验研究。如姚爱玲等以 ISS 土壤稳定剂加固靖边、安塞和西安黄土^[3];郭婷婷研究了石灰、粉煤灰

加固黄土的工程特性^[4];张伟锋和陈涛开展了以 HEC 固化剂加固黄土的试验研究^[5,6];张丽萍、韩苏建、樊恒辉和韩信来等分别以杨凌黄土,EN-1, SSA, MBER, CONAID, LUKANG 等材料作为研究对象,研究了影响固化黄土强度的主要因素和固化黄土的工程性能,针对土壤固化剂加固黄土的影响因素主要从固化剂剂量、密度、含水率、龄期等方面进行了分析^[7~15]。目前有的固化材料已经应用于黄土地区路基处理、堤坝加固、渠道防渗及水土保持等工程领域。室内试验研究结果和工程实践表明,一种固化材料不能保证不同土料都得到最佳固化,某种固化材料只是在处理某些土体时才有显著的效果,随着土体性质与环境的变化,固化效果也会随之发生改变^[1~15]。

SH 是一种新型的土固化材料。本文采用 SH 和水泥,就太原地区黄土进行改性试验,通过新型高分子和传统无机化学材料固化黄土对比研究分析,目的是探讨化学材料对黄土力学特性的影响,较全面掌握 SH 改良黄土的性能效果,为黄土加固理论及进一步的研究和工程应用提供有益的参考。

2 改良方法与材料

2.1 试验用土和改良材料

试验选用山西太原 Q₂ 黄土(表 1)。

改良材料为 SH 和水泥固化剂。SH 是由化工废料制成的新型高分子材料,固含量 5%(指 SH 中溶质的量占溶液质量的百分数),亲水性强,常温下可固化。

水泥为太原水泥厂生产的 P. S. A 32.5 矿渣硅酸盐水泥。

表 1 黄土的性质

Table 1 Properties of studied loess

含水率/ (%)	密度/ g·cm ⁻³	液限/ (%)	塑限/ (%)	塑性 指数	最优 含水率/ (%)	最大干密度/ g·cm ⁻³	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	粒度成分/(%)		
									砂粒 2~0.05mm	粉粒 0.05~0.005mm	黏粒 <0.005mm
8.9	1.45	30.1	19.2	10.9	17.62	1.73	15.64	10.91	22.8	64.8	12.4

2.2 固化材料用量控制、试样制备与养护

设计固化材料掺量 SH 为 4%~20% (即固含量为 0.2%~1.0%), 与水泥(4%~20%) 进行对比。

先称取一定量的已过 2mm 筛子的风干黄土, 与相应比例的固化材料及水 (SH 不另外加水, 水泥按最优含水率设计添加) 充分混合, 静置于密闭容器中。按预设的干密度, 抗压强度试样在 $\Phi 40 \times 80 \text{mm}$ 的模具内手工压实制备, 直剪试件在容积为 60cm^3 的环刀内成型, 渗透试样环刀容积为 120cm^3 。由 SH 固化的所有试件都置于室内通风干燥处自然养护, 而使用水泥固化的试件脱模后均用塑料袋装好, 在袋周加水浸泡保持在 80% 左右的湿度条件下养护, 养护龄期分别为 7, 14, 28, 60d。

以素黄土 (不掺加固化材料) 作为对照, 比较黄土与不同材料固化黄土试样的差异, 选出较优改良方法。

3 结果分析

3.1 无侧限抗压强度试验

采用 STWCY-1 型无侧限压力仪测定不同条件下改良黄土的抗压强度, 与素黄土的结果对比分析改良土抗压强度特性及影响因素。

3.1.1 改良黄土抗压强度与掺量的关系

随着 SH 或水泥掺量的增加, 改良黄土的强度增大, 但增大的幅度不同 (图 1)。当掺量在 10% 以下时, 强度增长相对较小, 超过 10% 以上时强度增加明显, 所以掺量较大对黄土强度的提高效果会更好。但掺量增大就会相应增加实际工程的经济投入, 如填筑路基等实际工程所用水泥掺量为 3%、5%、7%, SH 用量还可以更小, 两者的掺量一般都不应超过 10%。生产单位应当根据实际工程的强度要求和改性黄土的特点合理选择固化材料的掺量, 有针对性的加固处理, 以达到经济合理。

3.1.2 干密度对抗压强度的影响

试验时设计了 1.55, 1.60 和 $1.65 \text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的 3 种干密度, 分别测试了养护 28d 的 SH 黄土和水泥黄土的抗压强度 (图 2, 3)。

从图 2 和图 3 可见, 固化黄土的强度随着干密度的增加而增大, 大致呈直线上升, 故在施工过程中, 一定要控制压实, 尽可能达到较大的密实度。用最小二乘法进行回归计算, 得出抗压强度 P 与干密

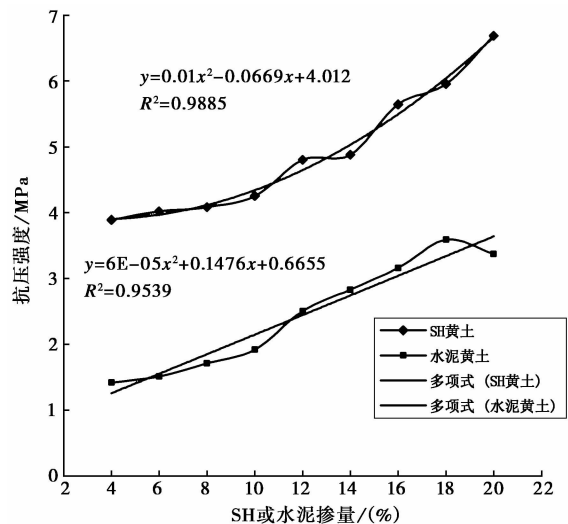


图 1 抗压强度与固化材料掺量关系

Fig. 1 Compressive strength of samples with SH or cement content

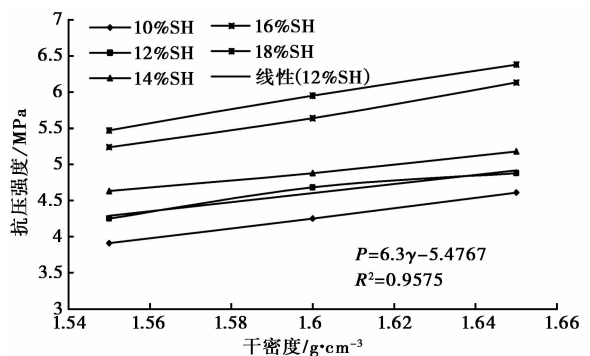


图 2 SH 黄土的抗压强度与干密度关系和趋势图

Fig. 2 Compressive strength development of loess solidified by SH with dry density

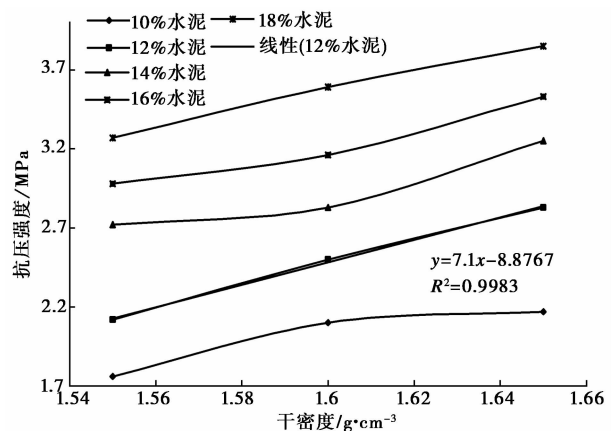


图 3 水泥黄土的抗压强度与干密度关系和趋势图

Fig. 3 Compressive strength development of loess cement with dry density

度 γ 的变化关系式,如 12% 的 SH, $P=6.3\gamma-5.4767$ (相关系数 $R^2=0.9575$); 12% 的水泥, $P=7.1\gamma-8.8767$ ($R^2=0.9983$)。根据这一关系不仅可以预测固化黄土的强度,也说明了相同掺量和干密度条件下,用 SH 固化黄土的强度比水泥为大。即要达到满足工程要求的强度值,实际所需的 SH 用量较少或施工压实度较小。

3.1.3 抗压强度与龄期成正相关

将 10% 的 SH 和水泥分别与黄土充分拌和均匀,在设计干密度 $1.6\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 下制样,养护时间为 7、14、28 和 60d,测定其抗压强度。

随着养护龄期的逐渐增加,改良黄土强度逐渐在增大(图 4)。当养护龄期在 7~14d 之间时,试样的强度增加的幅度比较大,14d 之后强度继续增加,但增加的幅度相对降低。28d 时 SH 改良黄土试件的强度已大部分完成,往后强度增加缓慢,而水泥黄土的强度仍有较大增长。

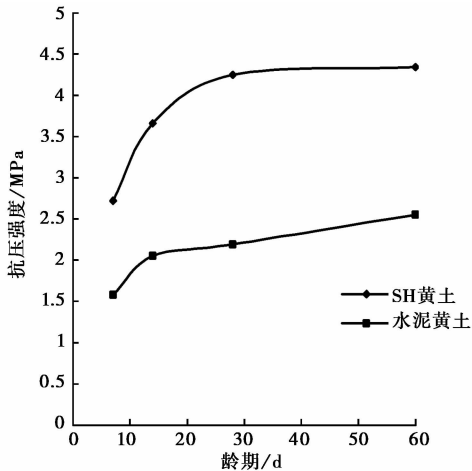


图 4 抗压强度与龄期的关系曲线

Fig. 4 Curve of relationship between compressive strength with curing time

3.2 抗剪强度试验

细粒土的抗剪强度主要决定于粒间连结强度,其次是结合水的黏滞阻力。经 SH 和水泥处理后,将引起土的抗剪强度的改变。因此研究黄土加固前后的抗剪强度变化是必要的。

采用掺量分别为 4%、6%、8%、10%、12%、14%、16% 和 18% 的 SH 和水泥,设计干密度为 $1.65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 制备改良黄土环刀试件,养护一定龄期后,采用 EDJ-1 型等应变控制式直剪仪进行直接剪切试验,测试试件的抗剪强度。

3.2.1 改良材料掺量对抗剪强度的影响

素黄土的内摩擦角和黏聚力分别为 38.11° 和 254.74kPa ,加入 SH 和水泥养护 28d,测试结果如表 2。较之素黄土,改良黄土的内聚力和内摩擦角增大并随固化材料掺量增加而提高,特别是黏聚力明显增大。

表 2 不同掺量的 SH 和水泥改良黄土抗剪强度参数

Table 2 Shear strength parameters of loess improved at varying percentage of SH and cement

掺量/ (%)	内聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	SH 黄土	水泥黄土	SH 黄土	水泥黄土
4	351.56	341.43	56.7	43.62
6	385.62	378.61	57.9	44.17
8	440.4	410.41	59.2	44.99
10	539.83	518.05	59.9	45.06
12	663.24	623.47	60.0	45.45
14	758.13	745.63	60.1	52.61
16	817.62	757.7	61.3	54.52
18	877.11	769.77	61.8	56.43

3.2.2 龄期对抗剪强度的影响

试验选用掺量为 10% 的 SH 和水泥黄土试件,分别测试其不同龄期的抗剪强度指标内聚力和内摩擦角值(表 3)。

表 3 不同龄期的改良黄土剪切试验结果

Table 3 Shear test results of improved loess at different curing age

龄期/d	内聚力/kPa		内摩擦角/(°)	
	SH 黄土	水泥黄土	SH 黄土	水泥黄土
3	385.3	299.1	53.9	34.7
7	408.6	335.3	54.1	39.5
14	458.9	466.9	54.7	41.2
28	539.8	518.1	59.9	45.1

从表 3 可以看出,SH 和水泥改良黄土在养护 28d 时的抗剪强度参数远大于 3d 和 7d,表明要有效提高抗剪强度,掺量不变时,应尽可能多养护一段时间。而相同掺量条件下的 SH 固化黄土的内聚力和内摩擦角高于水泥黄土。

3.3 渗透性试验和崩解性变化

黄土属于粉质黏土,渗透性较小,渗透系数随着干密度的不同,一般在 $(10^{-4} \sim 10^{-6})\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间变化^[13]。采用南 55 型渗透仪,用变水头试验测定黄

表4 不同掺量的SH和水泥固化黄土的渗透系数

Table 4 Permeability coefficients of loess solidified by varying percentage of SH and cement

掺量/(%)	4	6	8	10	12	16	18	20	
渗透系数/ $\times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$	6.14	5.96	5.67	5.35	5.03	4.54	4.28	4.17	(SH黄土)
	8.14	7.97	7.55	6.91	6.29	6.04	5.83	5.76	(水泥黄土)

土和固化黄土的渗透系数。

本次渗透试验测定干密度为 1.50、1.55 和 $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的压实黄土的渗透系数分别为 11.86×10^{-6} 、 10.67×10^{-6} 和 $8.788 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同比例的SH和水泥固化黄土的渗透试验结果如表4和表5。

表5 不同龄期的SH和水泥固化黄土试样的渗透系数($\times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Table 5 Permeability coefficients of loess solidified by SH and cement at different curing age

龄期/ d	掺量/(%)							
	12		16		18		20	
	SH	水泥	SH	水泥	SH	水泥	SH	水泥
3	6.64	7.32	6.08	6.97	5.88	6.73	5.73	6.47
7	5.56	6.71	5.03	6.50	4.79	6.44	4.58	6.28
14	5.29	6.52	4.85	6.33	4.64	5.97	4.41	5.82
28	5.03	6.29	4.54	6.04	4.28	5.83	4.17	5.76

可以看出,黄土加入SH和水泥后,无论加入比例多少和养护时间的长短,试样的渗透系数均有所减小,但减小值不明显,基本在一个数量级或降一个数量级内变化。固化剂掺量越大,养护龄期越长,渗透系数越小。

同掺量条件下,如12%的SH固化黄土的渗透系数为 $5.03 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,水泥黄土的渗透系数为 $6.29 \times 10^{-6} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$,说明用SH固化黄土的抗渗能力要比水泥黄土稍好。

黄土具有遇水强度骤降,同时发生以崩离、迸离和解离3种作用方式进行的散解的特性^[16]。素黄土压实试样开始浸水有大量气泡冒出,随后试样逐渐崩解,在1min之内完全崩解^[14]。10%及以上的SH改良黄土试件,刚浸水时也冒有少量气泡,但6个月内试件完好,不崩解;水泥黄土浸水后强度还有所增加,试件长时间浸泡后局部掉片掉块,也不会崩解。故SH和水泥改良黄土后抗水性增强,水稳性变好。

黄土通过SH和水泥得以固化改良,是由于SH通过高分子链将黄土搭接交联为空间网状结构;水

泥和黄土发生物理化学反应,形成硅酸三钙等凝胶而使土体胶结密实^[17, 18]。SH和水泥掺量越大,养护的时间越长,上述作用进行的会愈充分彻底,表现为强度增大,渗透系数数降低,水稳性增强。

3.4 SH和水泥改良黄土的效果及性价比对比

由3.1可知,相同试验条件下,SH固化黄土的抗压强度数值可达4MPa以上,普遍较水泥黄土为大。根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》,固化土的强度在3~4MPa时,既可做集流场地集流,还可以做道路、场院、碾压晒场等,故SH改良黄土后用途会比较多。

化学改良土的长期强度是工程应用的一个重要参数。已有研究结果显示,化学改良土的强度增长时间约为60~90d^[19]。SH和水泥改良黄土的干燥和固化过程均比较长,抗压强度随着养护龄期的逐渐增加而增大。SH改良黄土试件的强度在28d时已大部分完成,往后强度增加缓慢,水泥改良黄土的强度仍有较大增长。SH和水泥改良黄土的长期强度均较大(表6)。

表6 固化剂改良黄土抗压强度值(MPa)

Table 6 Compressive strength of loess improved by stabilizers

固化剂 名称	固化剂掺量/10%			
	龄期/d			
	7	14	28	60
SH	2.72	3.66	4.25	4.34
水泥	1.58	2.05	2.15	2.55

此外,SH固化黄土在抗剪性能、抗渗性和耐崩解等综合性能方面要明显高于水泥。

固化剂应当有满意的性能、低廉的价格及便于规模化生产才能得到推广应用^[20]。以往配制的土壤固化剂所用的精料大部分由国外进口,价格昂贵。SH材料主要由化工废料制备,目前仍处于试验研究阶段,尚未批量生产,因而价格偏高,这是制约其工程应用的重要因素之一,相信其大规模生产后价格还会降低;水泥已广为使用价格较低。SH与水泥

的技术性能 P 和经济成本 C 的对比分析见表 7。其中技术性能为相同固化剂掺量所产生的固化土强度,成本为相同质量固化剂的成本。当前试验所用的 SH 和水泥的市场价格分别按 $650 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 和 $400 \text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ 计算。为分析方便,将水泥的各项指标作为基准值进行了归一化处理。利用 SH 固化黄土,SH 价格是水泥价格的 1.6 倍,但性价比较水泥为大。

表 7 固化剂性价比指标

Table 7 The comparison of properties/cost of the stabilizers

固化剂名称	SH	水泥	说明
固化剂价格	650	400	
P 归一化	1.94	1	用 10% 的 SH 和水泥固化黄土, 28d 的抗压强度分别为 4.25MPa, 2.19MPa。
C 归一化	1.625	1	
P/C	1.19	1	

4 结 论

(1) 黄土具有强度较小,浸水崩解等工程特性,对强度和耐水性等要求比较高的工程,不宜直接使用,需要处理改良。

(2) 用 SH 和水泥固化材料处理黄土后,强度提高,抗渗性和耐崩解性增强,黄土的工程性质得以改善。

(3) 固化材料的掺量,养护龄期和干密度是影响改良黄土性能的重要因素。随着固化材料加入比例的增加和试样养护时间的延长,固化黄土的强度均有不同程度的增长,无侧限抗压强度,内聚力和内摩擦角呈递增趋势,尤其内聚力明显提高,固化土的渗透系数递减。

(4) 考虑到固化土的强度随材料掺量的增加而增加,但有效利用率却减小,大掺量还会超过经济限度,在实际应用中,应根据具体工程要求,确定固化剂的掺量,建议生产单位的适宜掺量控制在 10% 左右;为了使改良土具有良好的强度和抗渗性,应尽可能延长固化土的养护时间,增大压实密度。

(5) 从 SH 和水泥对黄土的改良试验结果看,已显示出两者均可以改善黄土的工程特性。SH 在固化黄土强度提高的同时,有利于防渗、不崩解,效果比较好,较水泥有一定的优越性,是新型的有发展前途的黄土化学改良材料。

黄土的化学改良目前处于室内试验阶段,为了更好地应用于工程实践,还需要做大量的研究工作。

参 考 文 献

- [1] Zhu Zhiduo, Liu Songyu. Utilization of new soil stabilizer for silt subgrade[J]. Engineering Geology, 2008, **97**: 192 ~ 198.
- [2] Tremblay H, Duchesne J. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, **39**(3): 535 ~ 546.
- [3] 姚爱玲, 延西利, 梁春雨, 杨仁强. ISS 土壤稳定剂路用性能的试验研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1998, **18**(1): 15 ~ 19. Yao Ailing, Yan Xili, Liang Chunyu, Yang Renqiang. Research for road performance of ISS soil stabilizer. Journal of Xi'an Highway University, 1998, **18**(1): 15 ~ 19.
- [4] 郭婷婷, 张伯平, 田志高, 吕东海. 黄土二灰土工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2004, **26**(5): 719 ~ 721. Guo Tingting, Zhang Boping, Tian Zhigao, Lv Donghai. Study on engineering characteristics of lime-flyash loess. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, **26**(5): 719 ~ 721.
- [5] 张伟锋, 刘清秉, 蔡松桃. 用 HEC 固化剂加固黄土的试验研究[J]. 人民长江, 2009, **40**(3): 56 ~ 60. Zhang Weifeng, Liu Qingbing, Cai Songtao. Experimental research of solidifying agent HEC on loess. Yangtze River, 2009, **40**(3): 56 ~ 60.
- [6] 陈涛, 周俊荣, 孙明星. HEC 固化剂对土壤渗透性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2004, **22**(4): 192 ~ 194. Chen Tao, Zhou Junrong, Sun Mingxing. Influence of solidifying agent HEC on loess permeability. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, **22**(4): 192 ~ 194.
- [7] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. EN-1 固化剂加固黄土的工程特性及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2009, **7**(4): 60 ~ 65. Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Engineering properties and influencing factors of solidified loess by EN-1 solidifying agent. Science of Soil and Water Conservation, 2009, **7**(4): 60 ~ 65.
- [8] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. SSA 土壤固化剂对黄土击实、抗剪及渗透特性的影响[J]. 农业工程学报, 2009, **25**(7): 45 ~ 48. Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Effects of SSA soil stabilizer on compaction, shear strength and permeability characteristics of loess. Transactions of the CSAE, 2009, **25**(7): 45 ~ 49.
- [9] 张丽萍, 张兴昌, 孙强. 2 种离子固化剂改善黄土抗剪强度和渗透性的研究[J]. 节水灌溉, 2009, (5): 35 ~ 38. Zhang Liping, Zhang Xingchang, Sun Qiang. Study on capacity of improving loess anti-shear strength and anti-permeability of two kinds of ionic soil solidified agent. Water Saving Irrigation, 2009, (5): 35 ~ 38.
- [10] 韩苏建, 郭敏霞, 李宁. 黄土地区渠道防渗固化剂初探[J]. 水土保持通报, 2005, **25**(2): 60 ~ 62. Han Sujian, Guo Minxia, Li Ning. Discussion on soil stabilizer for seepage control of canal in loess area. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2005, **25**(2): 60 ~ 62.
- [11] 樊恒辉, 高建恩, 吴普特, 姜宗科. 基于黄土物理化学性质变化的固化土强度影响因素分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(7):

- 1996~2001.
- Fan Henghui, Gao Jian'en, Wu Pute, Lou Zongke. Analysis of influence factors for solidified soil strength based on change of physicochemical properties of loess. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, **32**(7): 1996~2001.
- [12] 韩信来, 高建恩, 樊恒辉, 孙胜利, 王伯勤. 黄土高原不同地区固化土强度变化规律研究[J]. *人民长江*, 2009, **40**(22): 76~78.
- Han Xinlai, Gao Jian'en, Fan Henghui, Sun Shengli, Wang Boqin. Study of variation for solidified soil strength on different areas of loess plateau. *Yangtze River*, 2009, **40**(22): 76~78.
- [13] 李志高, 陈新民, 浦辛刚. 改性下蜀黄土防渗性能的优化设计[J]. *南京工业大学学报*, 2007, **29**(5): 25~29.
- Li Zhigao, Chen Xinmin, Pu Xingang. Optimal anti-permeable design for improved Xiashu loess. *Journal of Nanjing University of Technology*, 2007, **29**(5): 25~29.
- [14] 李志清, 余文龙, 范林峰, 付乐, 胡瑞林, 林杜军, 王艳萍. 改良黄土的强度特性与工程处置试验研究[J]. *工程地质学报*, 2011, **19**(1): 116~122.
- Li Zhiqing, Yu Wenlong, Fan Linfeng, Fu Le, Hu Ruilin, Lin Dujun, Wang Yanping. Experimental research on strength characteristics and engineering treatment of improved loess soil. *Journal of Engineering Geology*, 2011, **19**(1): 116~122.
- [15] 王辉, 岳祖润, 叶朝良. 原状黄土及重塑黄土渗透特性的试验研究[J]. *石家庄铁道学院学报(自然科学版)*, 2009, **22**(2): 20~22, 31.
- Wang Hui, Yue Zurun, Ye Chaoliang. Experimental investigation of permeability characteristics of intact and reshaped loess. *Journal of Shijiazhuang Railway Institute (Natural Science)*, 2009, **22**(2): 20~22, 31.
- [16] 李喜安, 黄润秋, 彭建兵. 黄土崩解性试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, **28**(增1): 3207~3213.
- Li Xi'an, Huang Runqiu, Peng Jianbing. Experimental research on disintegration of loess. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, **28**(S1): 3207~3213.
- [17] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. SH加固沙和黄土强度的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2004, **12**(增1): 339~342.
- Wang Yinmei, Han Wenfeng, Chen Wenwu. Experimental study on strengths of SH-fixed sand and loess. *Journal of Engineering Geology*, 2004, **12**(S1): 339~342.
- [18] 王银梅, 韩文峰, 谌文武. 新型高分子固化材料与水泥加固黄土力学性能对比研究[J]. *岩土力学*, 2004, **25**(11): 1761~1765.
- Wang Yinmei, Han Wenfeng, Chen Wenwu. Research on comparison between mechanical behaviors of loess solidified with new polymer material and cement. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, **25**(11): 1761~1765.
- [19] 贾厚华. 化学改良土无侧限抗压强度的试验研究[J]. *土工基础*, 2010, **24**(3): 84~87.
- Jia Houhua. Experimental research on unconfined compressive strength for chemical-improved soil. *Soil Engineering and Foundation*, 2010, **24**(3): 84~87.
- [20] 戴蕾, 李战国, 黄新. 利用工业渣制备软土固化剂的可行性探讨[J]. *中国工程科学*, 2010, **12**(3): 56~60.
- Dai Lei, Li Zhanguo, Huang Xin. Feasibility of soil stabilizer production with industrial wastes. *China Engineering Science*, 2010, **12**(3): 56~60.