

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2019.04.19

改性纳米硅材料加固松散砂土的工程特性研究

徐 岗,裴向军,袁进科,陈 杰,任 和

(成都理工大学,地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室,四川 成都 610059)

摘要: 为了改变松散砂土的低强度和低抗侵蚀性,本文以纳米硅材料为基础,采用聚丙烯酰胺类作为改性剂,对松散砂土进行加固研究。分别研究在不同浓度的纳米硅材料以及不同掺量的改性剂的共同作用下,加固松散砂土的无侧限抗压强度、抗剪强度以及其崩解特性的变化规律,并对其加固机理进行分析。试验结果表明,改性后的纳米硅材料对松散砂土的无侧限抗压强度、抗剪强度以及抗崩解能力都得到较大的提高。当纳米硅材料浓度一定时,砂土的抗压强度和抗剪强度随着改性剂掺量的增加出现先增大后减小的趋势;在纳米硅浓度 20%、改性剂掺量 0.2% 时抗压强度达到最大值 970 kPa;在纳米硅浓度 20%,改性剂掺量 0.3% 时黏聚力和摩擦角分别为 173.2 kPa 和 39.3°;在加固松散砂土的抗崩解试验中,当纳米硅浓度大于 20%、改性剂掺量大于 0.1% 时,加固后的砂土在水中浸泡 8 d 后砂样的崩解率低于 50%;当纳米硅浓度 20%,改性剂掺量 0.2% 时,加固砂土不崩解。综合试验结果,建议纳米硅溶液的浓度在 20%,改性剂的掺量为 0.2% 作为改性纳米硅材料加固松散砂土的最优配比。

关键词: 纳米硅;改性剂;砂土;加固;崩解特性

中图分类号: TU411.6;TU411.7;TU411.91

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2019)04-0142-08

A study of the engineering characteristics of reinforced loose sand by modified nano-Si materials

XU Gang, PEI Xiangjun, YUAN Jinke, CHEN Jie, REN He

(State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection,
Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: In order to change the low strength and low erosion resistance of loose sand, the reinforcement of loose sand is examined in this paper, which is based on nano-silicon material and takes polyacrylamide as modifier. Under the joint action of different concentrations of nano-silicon material and different amount of modifier, the unconfined compressive strength, shear strength and disintegration characteristics of the consolidated loose sand are studied respectively, and the reinforcement mechanism is analyzed. The experimental results show that the unconfined compressive strength, shear strength and anti-disintegration ability of the modified nano-silica material are greatly improved. When the concentration of nano-silicon is constant, the compressive strength and shear strength of sand increase at first and then decrease with the increasing modifier content. When the concentration of nano-silicon is 20% and the amount of modifier is 0.2%, the compressive strength reaches the maximum 970 kPa. When the concentration of nano-silicon is 20% and the amount of modifier is 0.3%, the adhesion force and friction angle are 173.2 kPa and 39.3°, respectively. In the anti-disintegration test of the consolidated loose sand, when the concentration of nano-

收稿日期: 2019-01-03; 修订日期: 2019-01-28

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(41702318);四川省教育厅项目资助(18ZA0057);地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室自主研究课题资助(SKLG2015Z022);四川省国土资源厅项目资助(KS-2018-25)

第一作者: 徐岗(1992-),男,硕士研究生,主要从事地质灾害评价与预测的研究。E-mail:1193645065@qq.com

通讯作者: 裴向军(1970-),男,教授,博士,从事地质灾害、工程边坡稳定性评价与工程治理研究。E-mail:peixj0119@tom.com

silicon is more than 20% and the amount of modifier is more than 0.1%, the disintegration rate of the reinforced sand sample is less than 50% after 8 days of invading in water. When the concentration of nano-silicon is 20% and the amount of modifier is 0.2%, the stabilized sand will not disintegrate. Comprehensive test results suggest that the concentration of nano-silicon solution of 20% and the amount of modifier of 0.2% are the best proportions of the modified nano-silicon material to strengthen loose sand.

Keywords: nano-silicon; modifier; sand; reinforcement; disintegration characteristics

砂土是一种松散结构的堆积体,其自然状态下具有强度低、渗透性较强等特点,在我国邢台地震、唐山地震、2008 年汶川地震以及 2017 年九寨沟发生 7.0 级地震都出现了砂土引起的灾害^[1-2],其中时间最近的九寨沟地震引发了 1 000 余处的地质灾害,主要以中小型浅层滑坡和崩塌为主,产生了大量的松散砂土,在雨水作用下极易产生水土流失。

在传统的边坡加固方式中,采用水泥类、格构形式以及护面墙的较多,但是这类方式对于环境具有一定的影响,不利于环保。随着绿色发展的兴起,越来越多的研究者着重于研究绿色型加固剂,以减少对环境的破坏,Kukal 等^[3]研究了不同粒径和不同种类的土壤水稳定性随着聚乙烯醇浓度增加而增加;李建法等^[4]对木质素磺酸盐用作砂土稳定剂进行了研究,结果表明单独的木质素磺酸盐不适用于作为砂土的稳定剂;刘瑾等^[5]通过采用丙烯酸等乙烯基单体为主体经过高分子聚合反应对土体进行加固;唐朝生等^[6]采用聚丙烯纤维加固软土并取得了较好的效果;王银梅等^[7]采用高分子材料 SH 对砂的强度、抗冻性以及抗老化性进行了测试;冯巧等^[8]采用聚丙烯纤维和聚氨酯组成的复合材料对砂土进行改良,利用加筋方式配合固化剂一定程度上提高了砂土强度;卜思敏^[9]研究了纳米硅溶液固化黄土的强度特性及固化机理,结果表明随着纳米粒径的增大黄土强度逐渐降低。

纳米硅溶胶是一种颗粒粒径在 1.5×10^{-5} mm 的二氧化硅胶体溶液,分子式 $x\text{SiO}_2 - n\text{H}_2\text{O}$,颗粒晶核是二氧化硅的多聚体,表层被 Si-OH 基覆盖,其胶体溶液具有比表面积大、高吸附性、高渗透性等特点,且对环境无毒无害。本文在前人研究的基础上,结合九寨沟地震引起的大量松散物质的治理,以纳米硅材料为基础,通过添加聚丙烯酰胺类高分子物质进行改性研究,分别测试在改性纳米硅材料作用下砂土的无侧限抗压强度、抗剪强度以及湿化崩解特性,从而对改性剂的掺量以及纳米硅的浓度提出最优的方案,并对其固化机理进行初步探讨,为后续改性纳米硅溶液加固砂土提供参考依据。

1 试验材料及试验方法

1.1 试验材料

试验用砂土取自九寨沟松散砂土。将砂土风干后,剔除大于 2 mm 和小于 0.075 mm 的颗粒,得到砂土的粒径分布(图 1),其中颗粒粒径在 0.1~1.0 mm 之间的含量为 80%。试验所用的改性纳米硅加固材料是以纳米硅材料与水混合组成纳米硅溶液为基础,以分子量为 1 200 万的聚丙烯酰胺为主体组成改性剂混合而成,纳米硅溶液的物理特性如表 1。

表 1 纳米硅溶液物理参数
Table 1 Physical parameters of the Nano-silicon solution

类型	颜色	密度/ (g·cm ⁻³)	黏度/ (mPa·s)	pH	氧化 钠/%	平均 粒径/nm
纳米硅溶胶	无色	1.19	8	7.5	≤0.3	10~15

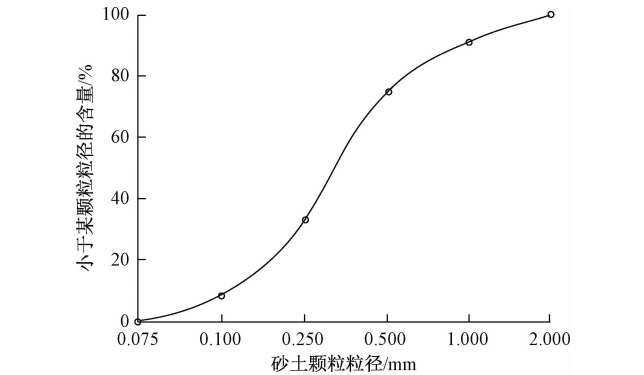


图 1 砂土粒径分布曲线
Fig. 1 Distribution curve of the sand particle size

1.2 试验方法

1.2.1 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度能反映试样在无侧向压力的情况下,抵抗轴向压力的极限强度,是对加固效果评价的重要指标。为研究纳米硅浓度与改性剂掺量对砂土强度的影响,参照《土工试验教程》中三轴压缩试验步骤进行制样,制备纳米硅材料浓度为 10%,20%,30% 三个梯度备用,其中改性剂添加量为砂土质量百分数的 0.1%,0.2%,0.3% 三个梯度。本次试验按照加固剂

与砂土质量比 1 : 5 拌合,用于制样的模具采用直径 39.1 mm,高 80 mm(图 2),一共配置 16 组砂柱样(试样编号见表 2),每组 3 个样品,控制砂土样的干密度在 1.6 g/cm^3 ,制作过程先将模具刷润滑油,然后套上保鲜膜(防止加固砂土与模具粘连),称取定量的砂土,再以砂土质量百分数确定改性剂的掺量,将改性剂溶解于不同浓度的纳米硅材料得到加固液,最后将加固液与砂土拌合。

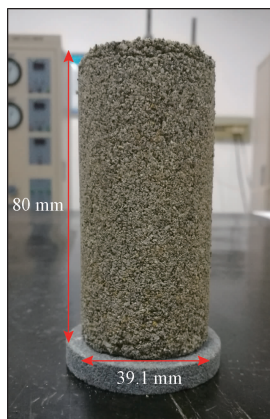


图 2 砂柱样品

Fig. 2 Sand column sample

1.2.2 抗剪强度

抗剪强度试验采用四联式应变控制式直剪仪,其最大特点是将读数过程由电脑自动采取,从而减小人为读数误差,其中土样内径 61.8 mm、高 20 mm。抗剪

强度的土样配比和无侧限抗压试验相同,将制备好的土样在相同条件下养护 7 d,试验过程中,分别施加垂直向压力 100,200,300,400 kPa,数据处理剔除变化较大值。

1.2.3 湿化崩解

崩解是指土体在水作用下发生分散、塌落,完整性和稳定性遭到破坏,其崩解速率能很好地表明加固砂土抗冲性能,也是评价水土流失的重要指标。本文参考樊恒辉等^[10]对土体湿化崩解的测量,利用荷重传感器和 DH5902 静态数据采集仪组装成简易的砂土崩解测量仪,主要原理是通过传感器采集砂土在水中崩解后漏网上剩余试样质量与浮力的差值。由于试验中浮力随着试样的崩解而不断变化,因此很难进行精确的测量,结合谷天峰等^[11]、曾庆建等^[12]对崩解的研究,对浮力进行简化计算,采用崩解率 H 分析改性纳米硅溶液对砂土湿化崩解的影响:

$$H = (M_0 - M_{\text{仪}}) / M_0 \times 100\%$$

式中: H ——已崩解量和土样初始质量的百分比/%;

M_0 ——土样的初始质量/g;

$M_{\text{仪}}$ ——采集仪的换算值/g。

2 实验结果及分析

本次试验的结果汇总如表 2 所示。下面将结合不同的试验分析改性纳米硅材料固化砂土的无侧限抗压强度、抗剪强度以及湿化崩解特性。

表 2 试验结果汇总

Table 2 Summary of the test results

试验 编号	纳米硅 浓度/%	改性 剂/%	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	黏聚力 c/kPa	无侧限 抗压强度/MPa	崩解率(H) 及崩解特征(8 d)
1	/	/	27.7	0.0	0.00	气泡迅速消失,10 min 后 100% 崩解
2	/	0.1	28.9	5.8	0.07	气泡很快消失,30 min 后 100% 崩解
3	/	0.2	29.6	19.1	0.13	气泡很快消失,1 h 后 100% 崩解
4	/	0.3	31.3	31.4	0.21	气泡逐渐消失同时试样逐渐软化,1.5 h 后 100% 崩解
5	10	/	26.0	17.9	0.11	气泡逐渐消失,2 h 后 100% 崩解
6	10	0.1	31.6	59.6	0.24	气泡逐渐消失,2.5 d 后 100% 崩解
7	10	0.2	32.8	72.8	0.47	气泡逐渐消失,3.7 d 后 100% 崩解
8	10	0.3	29.8	92.1	0.58	气泡缓慢消失,8 d 后 90% 崩解
9	20	/	25.3	41.2	0.17	气泡逐渐消失,4 h 后 100% 崩解
10	20	0.1	41.9	131.5	0.72	气泡缓慢消失,8 d 后 41% 崩解
11	20	0.2	42.6	170.4	0.97	气泡缓慢消失,不崩解
12	20	0.3	39.3	173.2	0.90	气泡缓慢消失,8 d 后 5% 崩解
13	30	/	25.5	74.9	0.21	气泡逐渐消失,4 h 后 100% 崩解
14	30	0.1	33.2	144.7	0.66	气泡缓慢消失,8 d 后 21% 崩解
15	30	0.2	37.3	160.4	0.87	气泡缓慢消失,8 d 后 48% 崩解
16	30	0.3	35.8	155.8	0.83	气泡缓慢消失,8 d 后 30% 崩解

2.1 无侧限抗压试验

在经过相同条件的养护后,测试纳米硅材料浓度在 10%、20%、30% 以及改性剂掺量在 0.1%、0.2%、0.3% 下加固砂土的强度值,图 3 为抗压强度变化规律。从图 3a 中可以看出,在未添加改性剂的纳米硅材料的作用下,砂土的抗压强度值呈现增长趋势,当纳米硅浓度为 30% 时抗压强度值为 210 kPa。当在纳米硅溶液中加入改性剂时(图 3b),在纳米硅浓度小于 10% 时,随着改性剂的增加,加固砂土强度不断增大,最大达到 580 kPa;在纳米硅浓度大于 10% 时,随着改性剂的增加,加固砂土强度呈现先增长后降低的趋势,最大值达到 970 kPa,是未添加改性剂强度的 4.5 倍。同时从图 3a 中可发现,随着纳米硅浓度的不断增大,加固砂土的强度呈现先增长后降低的趋势,其最大强度值出现在纳米硅浓度为 20% 时,说明纳米硅浓度过大不利于其强度的增长。

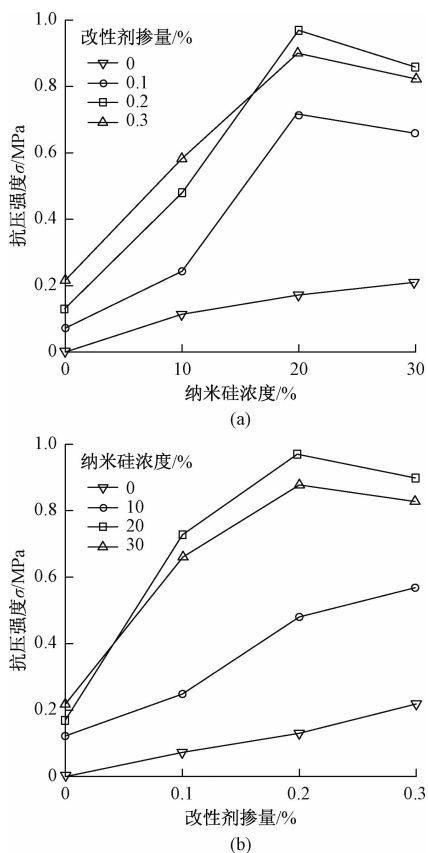


图3 不同配比下加固砂土强度变化规律

Fig. 3 Change in strength of the reinforced sand under different proportions

图4是加固砂土试样在纳米硅浓度20%和改性剂掺量0.2%时破坏方式,可以发现破裂面沿着 45° 方向,即剪应力最大的方向。



图4 纳米硅浓度20%和改性剂0.2%加固试样破坏特征
Fig. 4 Destruction characteristics of the reinforced samples with nano-silicon concentration of 20% and modifier of 0.2%

图5是在不同配比下改性纳米硅材料加固砂土的应力-应变曲线。由于砂土的特殊性,在未添加加固材料的情况下,砂土结构松散无法形成固结体,因此,无法测得其应力-应变曲线。对比在纳米硅溶液浓度0%~30%的作用下砂土的应力-应变曲线可以发现,其破坏主要是脆性破坏,破坏过程主要分为三个阶段。第一阶段为弹性段(e-f段),曲线表现为直线,随着轴向压力的不断增大,应变的产生主要是颗粒之间的孔隙压缩,同时砂土具有逐渐摆脱颗粒之间胶结力的趋势;第二阶段曲线斜率逐渐变缓直至变为负数(f-g段),砂土试样内部的裂隙逐渐贯通,此时轴向力达到最大值后,应变迅速增大,曲线变缓为迅速降低;第三阶段为破坏阶段(g-h段),试样沿着贯通裂隙不断滑移,轴向应力不断减小。

2.2 直剪试验

根据直剪试验数据处理后得到不同配比下加固砂土的抗剪强度值如表2,得到其黏聚力和内摩擦角的变化规律如图6,其剪切前后的试样如图7。

根据图6可以看出,在纳米硅加固液的作用下松散砂土的内摩擦角(φ)和黏聚力(c)明显提高。相同改性剂掺量下的加固砂样随着纳米硅溶液浓度的增大, c 、 φ 值都具有较大的增长,呈现先增大后减小的趋势,最大值可达到173.2 kPa和 42.6° ,内摩擦角增大了近50%。当纳米硅溶液的浓度控制在20%时,随着改性剂掺量的变化,加固砂样的 c 、 φ 值都出现峰值,但是当改性剂的添加量 $>0.2\%$ 时,加固砂样的 c 、 φ 值逐渐降低,说明改性剂具有最优值,过多或者过少的改性剂影响加固效果,因此其最佳掺量为砂土质量百分数的0.2%左右。

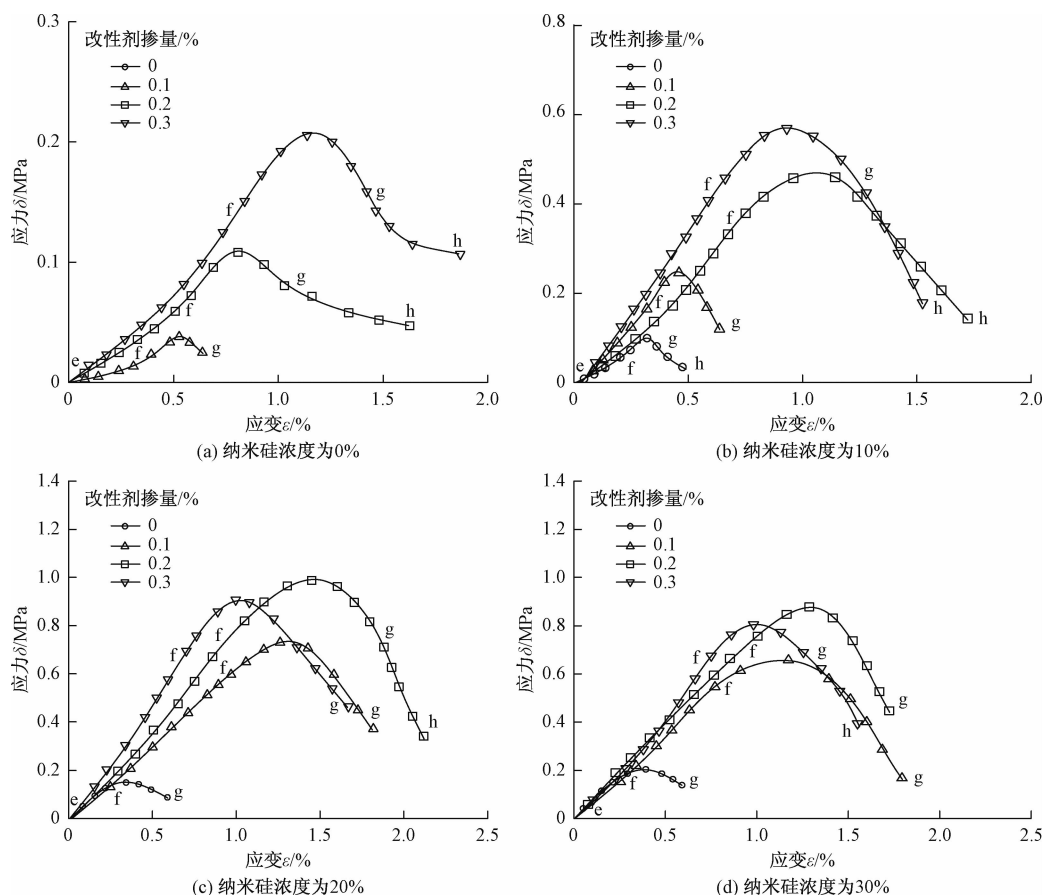


图5 不同配比加固砂土的应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of the reinforced sands with different proportions

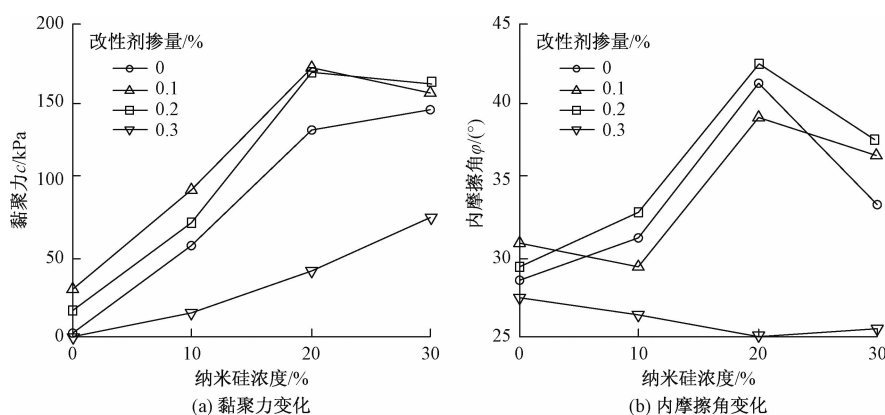


图6 不同配比下砂土内摩擦角和黏聚力变化规律

Fig. 6 Variation in the internal friction angle and cohesive force of sands under different proportions

图7是20%浓度的纳米硅和0.2%的改性剂加固试样剪切前(图7a)和剪切后(图7b)的对比图,从图7b中可以看出,加固试样具有明显的剪破面,破坏面凹凸不平,砂样颗粒之间接触紧密,剪切过后的砂样比较完整,可见砂土颗粒在纳米硅加固液的作用下咬合力较大,且颗粒之间呈团聚状态,改变了原有的松散结构。

2.3 湿化崩解试验

加固砂土在相同条件下养护28 d后进行湿化崩解试验,浸泡8 d后崩解状态记录如表2,图8为崩解过程的状态,图9为崩解量随时间的变化。

观察砂土崩解过程可以发现,试样在入水后立即产生大量气泡,随后气泡逐渐减少,气泡完全消失所经

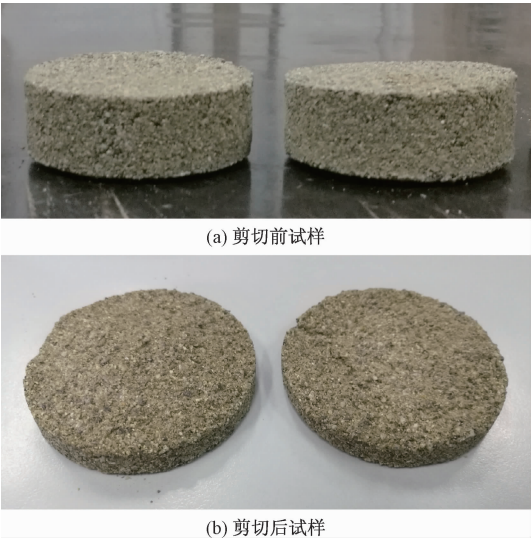


图 7 纳米硅浓度 20% 和改性剂 0.2% 的加固砂样

Fig.7 Reinforced sand samples with nano-silicon concentration of 20% and modifier of 0.2%

历的时间跟掺加的改性纳米硅溶液有关。随着纳米硅材料浓度的逐渐增加,气泡消失的时间可延长至 40 min;当纳米硅材料经过改性剂作用后,气泡消失的时间最长可延长至 4 h,说明加固剂改善了土颗粒之间的间距,同时有效填充了孔隙通道。

由图 8 可以发现,在掺量 0.3% 改性剂的单独作用下,加固试样崩解比较迅速,崩解核表层软化且有明显的絮状物质析出,使得土颗粒之间的胶结效果减弱(图 8a);在纳米硅浓度 10%、改性剂掺量 0.2% 的加固试样崩解 1 d 后,试样表面没有絮状物质析出,颗粒崩解时间延长到 3.7 d(图 8b);在纳米硅浓度 20%、改性剂掺量 0.2% 的加固试样崩解 8 d 后,试样保持完整,无颗粒脱落(图 8c);在纳米硅浓度 30%、改性剂掺量 0.2% 的加固试样崩解 3 d 后,试样上表层出现部分脱落现象(图 8d)。

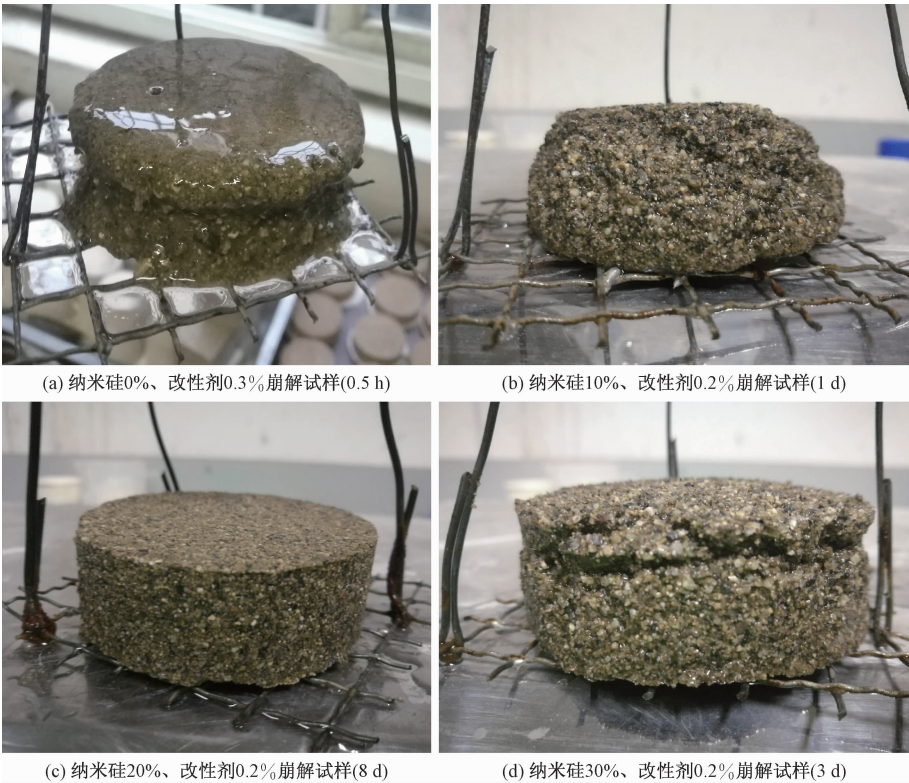


图 8 不同配比下松散砂土加固试样过程

Fig.8 Process of the reinforcing sand samples by loose sand under different ratios

由图 9b 可以发现,在单独纳米硅材料的作用下,砂土遇水后快速崩解,浓度越大崩解越缓慢,最长崩解时间为 21 h;通过在纳米硅溶液中添加改性剂后,加固砂样的崩解速率逐渐降低,在保持纳米硅浓度为 20%,改性剂掺量 0.2% 的作用下,砂土的湿化崩解效

果表现最好,其在水中浸泡 8 d 后基本上保持完整,无崩解现象,说明砂土颗粒在纳米硅溶液单独作用下不具有抵抗侵入水的能力,而在加入改性剂之后,砂土颗粒之间的抗崩解力得到提高,随着纳米硅溶液浓度在 20% 与改性剂含量在 0.2% 时,加固的砂土能表现出

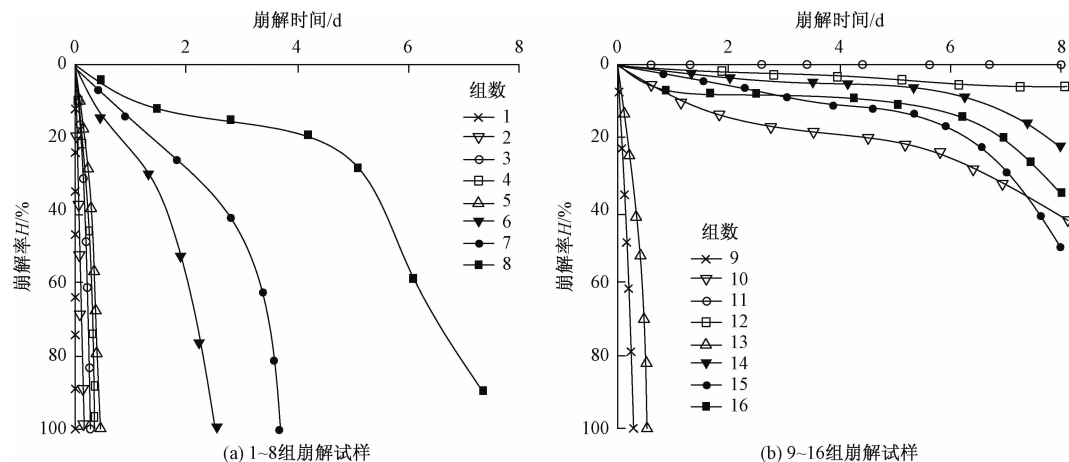


图 9 不同配比下松散砂土加固试样崩解曲线

Fig. 9 Disintegration curves of the loose sand reinforcement samples under different ratios

完全的抵抗侵入水的作用,在水的作用下并不能使得包裹砂土颗粒之间的改性纳米硅材料失去粘结性,有效地改善了砂土遇水崩散的特性。

3 加固机理初探

根据上述试验可知,在砂土中加入改性纳米硅材料后,其结构特性得到改善,由于改性纳米硅材料是由 1.5×10^{-5} mm 的微小颗粒和可溶性改性剂溶于水之后形成的加固材料,纳米 SiO_2 在溶液中呈三维网状结构,同时表面含有大量的不饱和残键和不同状态的羟基,可以使多种物质与 SiO_2 颗粒发生化学修饰^[16],改性剂中主要是 PAM 非离子型高聚物,其溶于水后所形成的长链结构,在与 SiO_2 颗粒发生修饰之后进而影响颗粒之间的 ξ 电位平衡。

当改性纳米硅溶液与砂土颗粒混合后,逐渐将土颗粒包裹形成表面网状层,由于分子链的活性很强,在土颗粒表面形成一层具有强粘结力的薄膜,增加了砂土颗粒表层的黏聚力和摩擦力,使得砂土颗粒之间接触紧密,同时部分纳米硅颗粒所形成的团聚体填充于砂土颗粒形成的孔隙之中,有助于连接不同粒径砂土颗粒,增强其结构特性。当纳米硅浓度过大时, $\text{SiO}_2 - n\text{H}_2\text{O}$ 粒子增多,形成的团聚体过大,反而增加了土颗粒之间的间距,不利于颗粒的受力,进而降低了加固砂土的强度。

4 结论

(1) 改性纳米硅加固材料是由颗粒在 1.5×10^{-5} mm 的 SiO_2 材料为基础,掺加可溶性的聚丙烯酰胺类作为改性剂配置而成的加固材料。

(2) 改性纳米硅材料提高了砂土的抗压强度和抗剪强度,改善了其抗崩解特性。当纳米硅浓度在 20%、改性剂掺量 0.2% 时,加固砂土抗压强度达到最大 970 kPa,且加固的砂土能完全抗崩解。当纳米硅浓度在 20%、改性剂掺量 0.3% 时,加固砂土 c 、 φ 值达到 173.2 kPa 和 39.3° 。

(3) 砂土经改性纳米硅材料加固后,颗粒表层形成包裹膜,使得颗粒之间接触更加紧密,同时纳米硅颗粒有效地填充了颗粒之间的孔隙通道,增强了砂土的结构性。结合试验过程中改性纳米硅溶液的可操作性,以及施工的方便性,建议加固松散砂土中纳米硅溶液的浓度控制在 20%,改性剂的掺量 0.2% 为最佳。

参考文献:

- [1] 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等.汶川 M_S8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J].地震地质,2008,30(3):597-629. [XU X W, WEN X Z, YE J Q, et al. The M_S8.0 Wenchuan earthquake surface rupture and its seismogenic structure[J]. Seismology and Geology, 2008, 30(3):597-629. (in Chinese)]
- [2] 许冲,王世元,徐锡伟,等.2017 年 8 月 8 日四川省九寨沟 M_S7.0 地震触发滑坡全景[J].地震地质,2018,40(1):232-260. [XU C, WANG S Y, XU X W, et al. A panorama of landslides triggered by the August 8, 2017, Jiuzhaigou M_S7.0 earthquake in Sichuan [J]. Seismology and Geology, 2018, 40(1):232-260. (in Chinese)]
- [3] KUKAL S S, KAUR M, BAWA S S, et al. Water-drop stability of PVA-treated natural soil aggregates from different land uses[J]. Catena, 2007, 70(3):475-479.
- [4] 李建法,宋湛谦.木质素磺酸盐及其接枝产物作沙土稳定剂的研究[J].林产化学与工业,2002,22

- (1): 17 - 20. [LI J F, SONG Z Q. Study on lignosulfonate and its grafted product as sand stabilizer [J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2002, 22(1): 17 - 20. (in Chinese)]
- [5] 刘瑾, 陈晓明, 张峰君, 等. 高分子土固化剂的合成及固化机理研究[J]. 材料科学与工程, 2002, 20(2): 230 - 234. [LIU J, CHEN X M, ZHANG F J, *et al.* Study on synthesis and solidification mechanism of the polymer soil consolidator [J]. Materials Science & Engineering, 2002, 20(2): 230 - 234. (in Chinese)]
- [6] 唐朝生, 施斌, 蔡奕, 等. 聚丙烯纤维加固软土的试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(9): 1796 - 1800. [TANG C S, SHI B, CAI Y, *et al.* Experimental study on polypropylene fiber improving soft soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(9): 1796 - 1800. (in Chinese)]
- [7] 王银梅, 孙冠平, 谌文武, 等. SH 固沙剂固化沙体的强度特征[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(增刊2): 2883 - 2887. [WANG Y M, SUN G P, CHEN W W, *et al.* Strength characteristics of sand fixated by SH [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Sup 2): 2883 - 2887.]
- [8] 冯巧, 刘瑾, 卢毅, 等. 一种复合加固剂改良砂土的强度试验研究[J]. 工程地质学报, 2017, 25(4): 903 - 911. [FENG Q, LIU J, LU Y, *et al.* Experimental study on strength of sand reinforced with composite reinforcement agent [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(4): 903 - 911. (in Chinese)]
- [9] 卜思敏. 纳米硅溶胶固化黄土的强度特性及其固化机理[D]. 兰州: 兰州大学, 2016. [BU S M. Strength characteristics and modification theory of loess modified by Nano silica sol [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016. (in Chinese)]
- [10] 樊恒辉, 赵高文, 孔令伟, 等. 一种测定土体湿化、崩解与分散的试验方法: 中国, 201210001204.8 [P]. 2012 - 07 - 11. [FAN H H, ZHAO G W, KONG L H, *et al.* A test method for determination of soil moisture, disintegration and dispersion: China, 201210001204.8 [P]. 2012 - 07 - 11. (in Chinese)]
- [11] 谷天峰, 袁亮, 胡炜, 等. 黑方台黄土崩解性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2017, 44(4): 62 - 70. [GU T F, YUAN L, HU W, *et al.* Experimental research on disintegration of the Heifangtai loess [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2017, 44(4): 62 - 70. (in Chinese)]
- [12] 曾庆建, 刘宝臣, 张炳晖, 等. 红黏土崩解特性试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 93 - 97. [ZENG Q J, LIU B C, ZHANG B H, *et al.* An experimental study of the disintegration characteristics of red clay [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 93 - 97. (in Chinese)]
- [13] 裴向军, 罗阳楚君, 杨晴雯. 含水率及掺砂量对双聚材料改良碎石土性能的影响[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(9): 48 - 52. [PEI X J, LUO Y C J, YANG Q W, *et al.* Impact of water content and sand content on performance of improved gravel soil with dimeric materials [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural science), 2018, 37(9): 48 - 52. (in Chinese)]
- [14] 刘彤彤. HPMC 改性硅溶胶/聚丙烯酸酯杂化乳液的合成与性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015. [LIU T T. Synthesis and properties of HPMC modified Silica-Sol / Polyacrylate hybrid emulsion [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)]
- [15] 黄英, 符必昌. 土壤强固剂加固红土的力学特性[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(5): 4 - 6. [HUANG Y, FU B C. Mechanical properties of the soil-solidified additive on the strengthening of laterite [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2002, 29(5): 4 - 6. (in Chinese)]
- [16] 黄河, 施斌, 刘瑾, 等. STW 型生态土壤稳定剂改性膨胀土水理性质试验研究[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(8): 1236 - 1240. [HUANG H, SHI B, LIU J, *et al.* Water-physical properties of expansive soils modified by STW ecotypic soil stabilizer [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(8): 1236 - 1240. (in Chinese)]
- [17] 王许诺, 杨平, 鲍俊安, 等. 冻结水泥土无侧限抗压试验研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(3): 79 - 83. [WANG X N, YANG P, BAO J A, *et al.* Test research on unconfined compressive strength of freezing cement soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2013, 40(3): 79 - 83. (in Chinese)]
- [18] 束华东, 李小红, 张治军. 表面修饰纳米二氧化硅及其与聚合物的作用[J]. 化学进展, 2008, 20(10): 1509 - 1514. [SHU H D, LI X H, ZHANG Z J. Surface modified nano-silica and its action on polymer [J]. Progress in Chemistry, 2008, 20(10): 1509 - 1514. (in Chinese)]
- [19] 邢鲜丽, 李同录, 李萍, 等. 黄土抗剪强度与含水率的变化规律[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(3): 53 - 59. [XING X L, LI T L, LI P, *et al.* Variation regularities of loess shear strength with the moisture content [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(3): 53 - 59. (in Chinese)]